

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์
ลิโธกราฟีโดยตรงของสารไวแสง SU-8



นายวัชรพล ภูมรา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**FABRICATION OF CAPACITIVE PRESSURE SENSORS
USING DIRECT X-RAY LITHOGRAPHY OF
SU-8 PHOTORESIST**

Watcharapon Pummara



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์
ลิโธกราฟีโดยตรงของสารไวแสง SU-8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ พังสุวรรณรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ่านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



วัชรพล ภูมรา : การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์
ลิโธกราฟีโดยตรงของสารไวแสง SU-8 (FABRICATION OF CAPACITIVE
PRESSURE SENSORS USING DIRECT X-RAY LITHOGRAPHY OF SU-8
PHOTORESIST) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นิमित ชมนาวัง, 215 หน้า

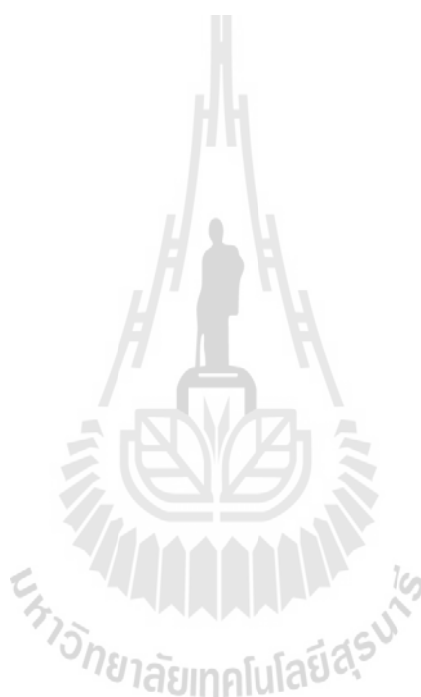
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่มี
ไดอะแฟรมเป็นตัวรับรู้ปริมาณอินพุต ส่วนของตัวเก็บประจุเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สร้างด้วย
กระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี และเคลือบโลหะบนโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้โครงสร้าง
นำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุมีขนาดความกว้างและความยาว เท่ากับ 500 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
เท่ากับ 60 μm ส่วนไดอะแฟรมสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์สองชนิดคือ Polyimide (PI) ความหนา
เท่ากับ 25 μm และ Polydimethylsiloxane (PDMS) ความหนาเท่ากับ 120 μm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง
1000 μm ตัวเก็บประจุที่เป็น โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะถูกนำมาติดตั้งบนไดอะแฟรมซึ่งเมื่อ
ไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวเนื่องจากความดัน ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนไปเท่ากับ
ระยะการโก่งตัว และเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม
เป็น PDMS (SUT-S) และ PI (SUT-I) ถูกปรับเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250
และ MPX5700 สำหรับย่านความดัน 0 – 100 kPa และ 0 – 500 kPa ตามลำดับ จากการทดสอบ
คุณสมบัติ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PDMS มีค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากที่สุด
38.23 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 4.714 fF/kPa ค่าความผิดพลาดในการวัดความดัน ± 9 % มี
ผลตอบสนองทางเวลาทั้งขาขึ้นและขาลงน้อยกว่า 1 วินาที ส่วนตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม
เป็น PI มีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากที่สุด 3.94 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.03343 fF/kPa และ
มีค่าความผิดพลาดในการวัดความดัน ± 7.4 % มีผลตอบสนองทางเวลาช่วงขาขึ้นเท่ากับ 7 วินาที
ขาลง 27 วินาที ตัวตรวจรู้ SUT-S ที่สร้างขึ้นจาก PDMS และ SUT-I ที่สร้างขึ้นจาก PI ได้ถูกนำไป
ทดสอบวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยมีการรายงานค่าความดันผ่านระบบไร้สาย
ระบบเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นนี้มีค่าความคลาดเคลื่อน 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa สำหรับตัว
ตรวจรู้ SUT-S และ 3.9 % จากเต็มสเกล 500 kPa สำหรับตัวตรวจรู้ SUT-I

WATCHARAPON PUMMARA : FABRICATION OF CAPACITIVE
PRESSURE SENSORS USING DIRECT X-RAY LITHOGRAPHY OF
SU-8 PHOTORESIST. THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG,
Ph.D., 215 PP.

MEMS/CAPACITIVE PRESSURE SENSOR/X-RAY LITHOGRAPHY

This research aimed to design and fabrication of capacitive pressure sensors which have two different types of diaphragm. Polymer capacitors fabricated by X-ray lithography were coated by metallic films in order to be electrically conductive material. The dimension of capacitors is 500 micron x 500 micron and gap between electrodes was 60 micron. The diameter of diaphragms fabricated by polymer materials was 1000 micron. The diaphragm made of Polyimide (PI) and polydimethylsiloxane (PDMS) were 25 micron and 60 micron thick, respectively. Is Polymeric capacitor was mounted on a pressure sensitive diaphragm so that its capacitance varies with input pressure. The pressure sensors with PDMS diaphragm (SUT-S) and that with PI diaphragm (SUT-I) were calibrated by MPX4250 for 0-100 kPa and MPX5700 for 0-500 kPa, respectively. Characterization of SUT-S pressure sensor showed the maximum capacitance change of 38.23%, sensitivity of 4.714 fF/kPa, error of $\pm 9\%$ full scale and rise time/fall time of 1s. On the other hand, Characterization of SUT-I pressure sensor showed the maximum capacitance change of 38.23%, sensitivity of 0.03343 fF/kPa, error of $\pm 9\%$ full scale, rise time of 7s and fall time of 27s, respectively. Applications of the SUT-S and SUT-I sensors in motorcycle tire pressure monitoring system (TPMS) were demonstrated. The system

could monitor the pressure inside a motorcycle tire in a range of 0 – 100 kPa for SUT-S and 0 – 230 kPa for SUT-I sensor with maximum error of 8.27% and 3.9% full- scale measurement error, respectively.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆที่ช่วยกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัยรวมถึงหน่วยงานต่างๆที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย อาทิ อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดีมาโดยตลอด ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนเครื่องสำหรับทดสอบงานวิจัย และเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงาน สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และสถานที่ทำวิจัย ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรักความอบอุ่น ความห่วงใย และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งตลอดมา รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมาและตลอดไป

วัชรพล ภูมรา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 บริบทศนั้วรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	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
2.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	13
3 กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค	22
3.1 กระบวนการเคลือบโลหะ.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1	กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering).....	22
3.1.2	กระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation).....	24
3.2	กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์.....	25
3.3	กระบวนการลิโทกราฟี.....	29
3.4	สรุป.....	31
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน.....	32
4.1	การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน.....	32
4.1.1	การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง.....	35
4.1.2	การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PDMS.....	36
4.1.3	การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PI.....	37
4.1.4	การจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมในกรณีต่างๆ.....	39
4.2	การออกแบบโครงสร้างและการสร้างตัวเก็บประจุ.....	47
4.3	สรุป.....	54
5	การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	55
5.1	การวาดลวดลายจุลภาค.....	55
5.2	กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน.....	57
5.2.1	การเตรียมแผ่นฐานรองพอลิอิมิดเคลือบโลหะ.....	58
5.2.2	การเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐานรองและการถ่ายภาพลดลวดลายลงบนสารไวแสง.....	59
5.2.3	การสร้างวัสดุคูลซ์รังสีเอกซ์โดยใช้โลหะเงินจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	60
5.2.4	การล้างสารไวแสงและกัดโลหะไทเทเนียม/เงินชั้นฐานออก.....	63
5.3	กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน.....	65
5.3.1	การทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์และการหมุนเคลือบสารไวแสง.....	66
5.3.2	การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่บดแสงเพื่อถ่ายภาพลดลวดลาย.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 กระบวนการชุบโลหะบนกราไฟต์.....	69
5.4 กระบวนการสร้างโครงสร้างสัปดาห์สูงและกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS.....	69
5.4.1 การเตรียมฐานกราไฟต์.....	71
5.4.2 การเตรียมสารไวแสง SU-8 บนฐานกราไฟต์.....	72
5.4.3 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์.....	74
5.4.4 กระบวนการเคลือบโลหะ.....	76
5.4.5 กระบวนการขัดกราไฟต์ขั้นพื้นฐาน.....	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.....	89
5.5.4 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า.....	91
5.6 สรุป.....	95
6 การสอบเทียบและผลการทดสอบ.....	96
6.1 การทดสอบระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	96
6.2 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	100
6.3 การทดสอบผลของอุณหภูมิ.....	104
6.4 การสอบเทียบตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์.....	106
6.4.1 การทดสอบตัวตรวจวัด SUT-S กับตัวตรวจวัด MPX4250.....	106
6.4.2 การสอบเทียบตัวตรวจวัด SUT-I กับตัวตรวจวัด MPX5700.....	109
6.5 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าและชุดทดสอบตัวตรวจวัดความดัน.....	112
6.6 การทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	115
6.7 เสถียรภาพของตัวตรวจวัดความดัน.....	117
6.8 ฮีสเตอร์รีซีสของตัวตรวจวัดความดัน.....	119
6.9 การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลา.....	121

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.10 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น.....	126
7 การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดัน.....	129
7.1 การวัดความดันในยางรถจักรยานยนต์แบบไร้สายโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	129
7.1.1 การออกแบบชุดรับส่งข้อมูลไร้สายและการติดตั้งตัวตรวจรู้ความดันภายในยางรถจักรยานยนต์.....	130
7.1.2 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน.....	134
7.1.3 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน.....	138
7.2 การทดสอบใช้งานและผลการทดสอบการส่งข้อมูล.....	141
7.3 สรุป.....	146
8 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	147
8.1 บทสรุปงานวิจัย.....	147
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	150
รายการอ้างอิง.....	151
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การประดิษฐ์สมการการโค้งตัว.....	153
ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดสอบผลของอุณหภูมิและการทดสอบผลเพื่อสอบเทียบ.....	172
ภาคผนวก ค. โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเก็บข้อมูลและรับส่งข้อมูล.....	179
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ที่เผยแพร่.....	201
ประวัติผู้เขียน.....	215

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและพื้นที่ของไดอะแฟรม..... 21
4.1	ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัว $w(0)$ ของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง..... 36
4.2	ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัว $w(0)$ ของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ..... 38
4.3	ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง..... 39
4.4	ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีต่างกัน..... 41
4.5	ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความหนาไดอะแฟรมต่างกัน..... 43
4.6	ผลการจำลองค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะห่าง x ต่างๆ..... 51
6.1	ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วยสมการที่(6.4) เทียบกับเทียบกับการทดลองที่ความดันต่างๆ..... 116
6.2	ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PDMS..... 127
6.3	ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PI..... 128

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความดันลักษณะต่างๆ.....	5
2.2 โครงสร้างของมาโนมิเตอร์.....	6
2.3 โครงสร้างของหลอดบัวร์ดองทั้ง 3 แบบ.....	8
2.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ.....	9
2.5 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	10
2.6 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	11
2.7 บารอมิเตอร์ของทอริเชลลิ.....	12
2.8 ตัวตรวจรู้ความดันของ Sung-Pil Chang (2002).....	14
2.9 ตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัสของ Satoshi (2003).....	15
2.10 ตัวตรวจรู้ความดันของ Min-Xin Zhu(2005).....	16
2.11 ตัวตรวจรู้ความดันของ Jithendra N.....	17
2.12 ตัวตรวจรู้ความดันของ Ezzat G (2010).....	18
2.13 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดันจากงานวิจัยต่างๆ ด้วยตัวชี้วัดคือความไวและขนาดของไดอะแฟรม.....	21
3.1 เครื่องเคลื่อนโลหะแบบสปีดเตอริง.....	23
3.2 วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลื่อนโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ.....	24
3.3 เครื่องเคลื่อนโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ.....	25
3.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนแผ่นพลาสติกใส.....	27
3.5 ภาพถ่ายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ด้านขวาเป็นภาพขยายแสดงลาย โครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	28
3.6 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนกราไฟต์.....	29
3.7 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายด้วยสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ.....	30
4.1 แบบจำลองโครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	33
4.2 ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรม.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การทดสอบวัดการ โกงตัวของไดอะแฟรม โดยใช้หลักการเชิงแสงด้วยเครื่อง WYKO NT1100.....	35
4.4 ผลการทดสอบการ โกงตัวของไดอะแฟรม PDMS เพื่อคำนวณหาค่ามอดุลัสของยัง.....	37
4.5 ผลการทดสอบการ โกงตัวของไดอะแฟรม PI เพื่อคำนวณหาค่ามอดุลัสของยัง.....	38
4.6 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่างๆ.....	40
4.7 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ.....	40
4.8 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีรัศมีขนาดต่างๆ.....	42
4.9 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีรัศมีขนาดต่างๆ.....	42
4.10 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีความหนาต่างๆ.....	44
4.11 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีความหนาต่างๆ.....	44
4.12 ผลการจำลองการ โกงตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่างๆ.....	46
4.13 ผลการจำลองการ โกงตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ.....	46
4.14 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุ.....	47
4.15 โครงสร้างของตัวเก็บประจุปรับค่าได้สำหรับตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	48
4.16 แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุสองตัวที่อยู่ตรงข้ามกัน.....	49
4.17 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ.....	52
4.18 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PDMS.....	53
4.19 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PI.....	53
5.1 แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของตัวเก็บประจุ.....	55
5.2 หน้าต่างโปรแกรม Layout editor สำหรับวาดลวดลายจุดภาค.....	56
5.3 หน้ากากลวดลายทึบแสงสำหรับกันแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	56
5.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน.....	57
5.5 แผ่นพอลิอิมิดเคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ขนาด 1.5 นิ้ว.....	58
5.6 การเตรียมสารไวแสงและฟิล์มทึบแสงสำหรับสร้างลวดลายบนสารไวแสง.....	59
5.7 การสร้างลวดลายบนสารไวแสงบนแผ่นใสเคลือบโลหะขนาด 1.5 นิ้ว.....	60
5.8 วงจรและอุปกรณ์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังจากหุบ โลหะเงินหนา 20 ไมโครเมตร ลงบนฐานรอง แผ่นใสที่เคลือบด้วยไทเทเนียม 300 A° และเงิน 500A°.....	62
5.10 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่ผ่านการหุบ โลหะนิเกิลบนผิวของโลหะเงิน.....	62
5.11 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากการล้างสารไวแสงและ โลหะเงิน/ไทเทเนียมออกแล้ว.....	63
5.12 ชั้นงานที่เสียหายเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการหมุนเคลือบสารไวแสง.....	64
5.13 ชั้นงานที่เสียหายเนื่อง โลหะชั้นฐานหลุดจากฐานแผ่นใสระหว่าง กระบวนการหุบ โลหะ.....	64
5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน.....	65
5.15 แผ่นกราฟไฟต์ที่ทำความสะอาดแล้วพร้อมเคลือบสารไวแสง.....	66
5.16 แผ่นกราฟไฟต์ที่ผ่านการหมุนเคลือบสารไวแสง SU8-3025.....	67
5.17 फिल्मที่บดแสงที่ใช้สำหรับถ่ายทอดลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดลบ.....	68
5.18 สารไวแสงหลังจากการฉายแสง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ละล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงออก.....	68
5.19 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่หุบ โลหะเสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน.....	69
5.20 กระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	70
5.21 แผ่นกราฟไฟต์ที่ผ่านการการอบและรีบเรียงด้วยเครื่องรีดร้อน.....	71
5.22 กราไฟต์ที่ติดกับกระจกด้วยเทป PI ซึ่งจะได้ฐานกราฟไฟต์ที่พร้อมใช้งานใน กระบวนการต่อไป.....	72
5.23 การหดยดสารไวแสงบนฐานกราฟไฟต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อน.....	73
5.24 กราฟวัดความหนาสารไวแสงที่ผ่านการขัดเพื่อให้ได้ความหนา ประมาณ 500 ไมโครเมตร.....	73
5.25 ชั้นงานหลังจากการฉายแสงเอกซเรย์ผ่านการอบหลังฉายแสง.....	75
5.26 ชั้นงานที่ผ่านการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออกไป.....	75
5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM).....	76
5.28 แสงพลาสมาจากกระบวนการสปัตเตอริง.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหมุนชิ้นงานในเครื่องสปีดเตอริง	78
5.30 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโลหะด้วยกระบวนการสปีดเตอริงแบบหมุน	78
5.31 การเทสารไวแสงลงบนชิ้นงานเพื่อให้โครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน	79
5.32 फिल्मที่บดแสงสำหรับฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อยึดโครงสร้าง	80
5.33 การติดชิ้นงานบนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราว	81
5.34 ชิ้นงานที่ผ่านการขัดคราไฟต์ออกไป	81
5.35 ชิ้นงานที่หลุดออกมาในน้ำยาล้างสารไวแสง SU8-Developer	82
5.36 โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์	82
5.37 ภาพ SEM ของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์	83
5.38 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS	85
5.39 การสร้างขอบสารไวแสง Dryfilm	86
5.40 การกดอัด PDMS และวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	87
5.41 PDMS ฟิล์มบางที่ได้จากการกดอัดและผ่านการทำความสะอาดพร้อมใช้งาน	87
5.42 แผ่นอะคริลิกใสที่เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรสำหรับติดไดอะแฟรม	88
5.43 แผ่นอะคริลิกใสที่ผ่านการพันทราย	89
5.44 การติดฟิล์มบาง PDMS ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม	89
5.45 แผ่น PI ที่พันทรายบริเวณผิว	90
5.46 การติดฟิล์ม PI ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม	90
5.47 การติดกาวอีพอกซีบนไดอะแฟรมเพื่อเชื่อมกับโครงสร้างตัวเก็บประจุ	91
5.48 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม	92
5.49 การเชื่อมต่อสายสายเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ	93
5.50 การเชื่อมต่อท่อความดันเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันด้วยกาวอีพอกซี	94
5.51 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว	94
6.1 ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรมแบบ Point contact และแบบ Large contact	97
6.2 ไดอะแกรมการทดสอบวัฏระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 ภาพขณะทำการทดสอบการวัดระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุ.....	98
6.4 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS เทียบกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	99
6.5 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI เทียบกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	99
6.6 ชุดทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง Precision LCR Meter.....	101
6.7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C).....	101
6.8 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C).....	102
6.9 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz.....	103
6.10 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz.....	103
6.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100kHz.....	105
6.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz.....	105
6.13 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ.....	106
6.14 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆ.....	107
6.15 ค่าความดันที่ได้จากสมการปรับเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของ ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	108
6.16 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆ.....	110
6.18 ค่าความดันที่ได้จากสมการปรับเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาด ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	111
6.19 การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	113
6.20 แผนผังชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	114
6.21 ภาพถ่ายของชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	115
6.22 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วย สมการที่(6.4) เทียบกับการทดลองที่ความดัน.....	117
6.23 ค่าความดันของตัวตรวจรู้ MPX4250 เทียบกับตัวตรวจรู้ SUT-S ที่ความดัน 80 kPa และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	118
6.24 ค่าความดันของตัวตรวจรู้ MPX5700 เทียบกับตัวตรวจรู้ SUT-I ที่ความดัน 370 kPa และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	118
6.25 ผลการทดสอบฮิสเตอร์ีซีสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	119
6.26 ผลการทดสอบฮิสเตอร์ีซีสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	120
6.27 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	121
6.28 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของ ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	122
6.29 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของ ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	122
6.30 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	123
6.31 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	124
6.32 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	124
6.33 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ SUT-S.....	125
6.34 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	126
7.1 ตัวตรวจรู้ความดันในยางรถยนต์แบบไร้สาย.....	129

สารบัญรูป (ต่อ)

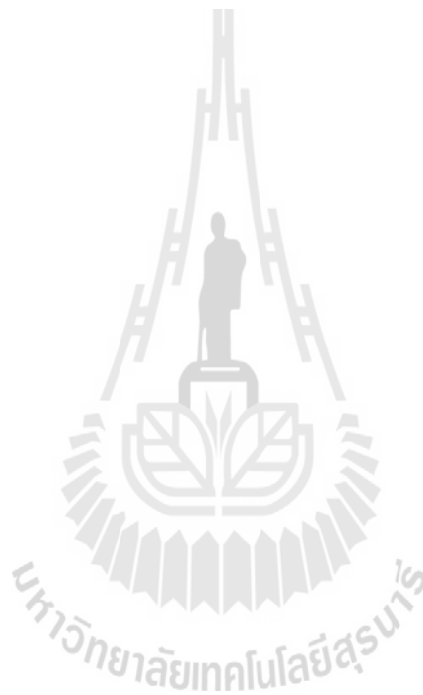
รูปที่	หน้า
7.2 โมดูลรับ-ส่งสัญญาณไร้สาย nRF24L01	130
7.3 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I ที่ใช้ในการทดสอบความดัน ในยางรถจักรยานยนต์.....	131
7.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่พร้อมทดสอบวัดความดันยางรถจักรยานยนต์.....	132
7.5 แผนผังอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล.....	133
7.6 แผนผังอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล.....	133
7.7 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐานในการวัด.....	137
7.8 กราฟผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ภายในยางรถจักรยานยนต์ ทดสอบเป็นเวลา 600 วินาที.....	137
7.9 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐานในการวัด.....	140
7.10 กราฟผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ภายในยางรถจักรยานยนต์ ทดสอบเป็นเวลา 600 วินาที.....	141
7.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล.....	142
7.12 ภาพชุดอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล.....	142
7.13 การใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ก่อนประกอบเข้ากับยางชั้นนอก.....	143
7.14 การปะยางบริเวณที่ถูกตัด.....	143
7.15 แสดงภาพอุปกรณ์ในการทดสอบ ตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ติดตั้งภายในยาง รถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยาง.....	144
7.16 ค่าที่ถูกส่งออกมาจากตัวตรวจรู้ความดันภายในยางมายังตัวรับและแสดงผล ผ่านคอมพิวเตอร์.....	145
7.17 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I และ MPX5700 ที่ติดตั้งภายในยาง รถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยางและแสดง ผลผ่านจอ LCD ของชุดรับสัญญาณ.....	145

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 8.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I
กับงานวิจัยอื่นๆ ด้วยตัวชี้วัดคือความไวและขนาดของไดอะแฟรม 148



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างตัวตรวจรู้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วซึ่งเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีการคิดค้นสร้างตัวตรวจรู้ต่างๆขึ้นมาเพื่อใช้ตรวจวัดในด้านต่างๆเช่น อุตสาหกรรมการแพทย์ การเกษตร เครื่องมือวัดต่าง ๆ ในงานวิจัย เป็นต้น ซึ่งการสร้างตัวตรวจรู้ในอดีตมีความแม่นยำไม่มากนัก เนื่องจากเริ่มต้นหลักการง่าย ๆ ที่สามารถสร้างได้ด้วยเทคโนโลยีในสมัยนั้น และมีการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นและมีความแม่นยำมากขึ้น ในปัจจุบันการสร้างตัวตรวจรู้ต่างๆ มีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วสามารถผลิตชิ้นส่วนทางกลและชิ้นส่วนทางไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง จึงสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการสร้างตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็ก ความถูกต้องแม่นยำสูง และมีการรวมเอาวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ที่เรียกว่า วงจรรวม (Integrated Circuit : IC) บรรจุเข้าไปในตัวทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถอ่านค่าได้ด้วยวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือคอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หรือแสดงผลต่อไป จะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้ในปัจจุบันถูกผลิตขึ้นมาให้ใช้งานง่าย มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง แต่เนื่องจากการสร้างจะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เป็นต้น ซึ่งเป็นผลทำให้การผลิตมีต้นทุนสูงขึ้น จึงทำให้ตัวตรวจรู้ปริมาณทางกายภาพในปัจจุบันมีราคาสูง

การพัฒนาตัวตรวจรู้ให้มีต้นทุนการผลิตต่ำลงต้องมีการออกแบบโครงสร้าง การเลือกใช้วัสดุ และการวางแผนออกแบบการผลิตที่ดีเพื่อลดขั้นตอนการผลิตลงให้น้อยที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นอีกทางเลือก ที่สามารถผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง โดยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนี้พัฒนามาจากเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม โดยในปัจจุบันมีความต้องการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก ส่งผลให้เทคโนโลยีดังกล่าวนี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ในการนำไปใช้งานในเครื่องมือวัด และความคุม ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ เช่น ตัวตรวจรู้อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ความเร่ง ตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซ ตรวจวัดอนุภาค เป็นต้น และการสร้างตัวขับเคลื่อน (actuator) ชนิดต่างๆ เช่น ไมโคร มอเตอร์ (Micromotor) ไมโครสวิตช์ (Microswitch) ไมโครปั๊ม (Micropump) และไมโครวาล์ว (Microvalve) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจวัดความดันก๊าซ ซึ่งมีการใช้งานค่อนข้างมากในทางอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ตัวตรวจวัดความดันของลมยางเพื่อลดอุบัติเหตุบนท้องถนน เป็นต้น โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันอากาศหรือความดันก๊าซ ลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของตัวตรวจวัดความดันก๊าซ จะมีไดอะแฟรมเป็นตัววัดปริมาณอินพุต โดยทั่วไปไดอะแฟรมจะถูกสร้างด้วยซิลิคอน และยังมีการใช้โลหะ พอลิเมอร์ และเซรามิก เพื่อความแข็งแรงและเหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับตัวตรวจวัดในงานวิจัยนี้เป็นแบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของตัวตรวจวัดความดันนี้ คือ มีตัวเก็บประจุติดอยู่บนแผ่นไดอะแฟรม เมื่อป้อนความดันเข้าไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวทำให้ระยะช่องอากาศของตัวเก็บประจุที่ติดอยู่บนไดอะแฟรมเปลี่ยนไป เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในส่วนของการออกแบบ ได้ศึกษาการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม ที่ใช้วัสดุสองชนิดคือ Polydimethylsiloxane (PDMS) และ Polyimide (PI) แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองการโก่งตัวมาทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างที่ออกแบบโดยใช้กระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี การอ่านค่าจากตัวตรวจวัดความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นจะในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวัดค่าความถี่เพื่อคำนวณค่าความดันจากความถี่ที่อ่านได้จากสมการการเปรียบเทียบ ตัวตรวจวัดความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS ได้ออกแบบให้ตรวจวัดความดันได้ในช่วง 0 – 100 kPa ส่วนตัวตรวจวัดความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI ได้ออกแบบให้ตรวจวัดความดันในช่วง 0 – 500 kPa และตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นจาก PDMS และ PI ได้ถูกนำไปทดสอบวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยมีการรายงานค่าความดันผ่านระบบไร้สาย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- สร้างตัวตรวจวัดความดันที่ใช้ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต
- ออกแบบและสร้าง โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะสร้างด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี
- ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากความดัน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- สร้างตัวตรวจวัดความดันแบบตัวเก็บประจุ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต
- ทดสอบตัวตรวจวัดความดันในช่วง 0 - 100 kPa สำหรับไดอะแฟรมที่เป็น PDMS และ 0 - 500 kPa สำหรับไดอะแฟรมที่เป็น PI

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุใช้ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณ อินพุตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm
- สร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ ลิโทกราฟี
- เปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดัน มาตรฐานเชิงพาณิชย์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี
- พัฒนาองค์ความรู้ในการสร้างชิ้นงานจำนวนมากด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บทได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่ คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึง กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน เช่น กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ กระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี กระบวนการเคลือบโลหะ บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดันซึ่งจะมีส่วนของ การออกแบบไดอะแฟรมและการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุรวม ไปถึงการจำลองผลการ ออกแบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วย กระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟี บทที่ 6 กล่าวถึง การทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวตรวจรู้ ความดัน การสร้างชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดันและผลการทดสอบตัวตรวจรู้ ความดัน บทที่ 7 เป็นการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น บทที่ 8 เป็นบทสรุปงานวิจัย ข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริมาตรนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

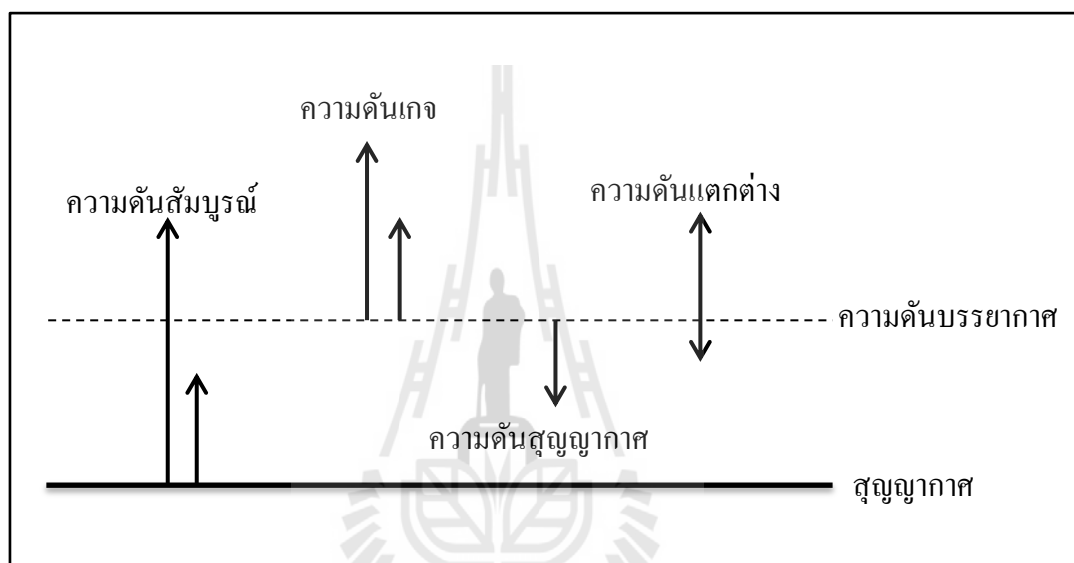
โดยที่ p คือ ความดัน (Pressure)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นๆ

A คือ พื้นที่ของแรงที่กระทำ

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 ในการวัดและควบคุมค่าความดัน สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เป็นอุปกรณ์ตัวตรวจรู้ความดัน โดยโครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพของอุปกรณ์แต่ละตัว ต้องพิจารณาจากการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม ซึ่งคำนึงถึงองค์ประกอบหลักๆ ที่สำคัญคือ ย่านการวัดความดัน รูปแบบหรือชนิดของความดัน และตัวกลางที่ทำให้เกิดค่าความดันที่เกิดจากของเหลว ก๊าซ อากาศ เป็นต้น อีกทั้งยังต้องพิจารณารายละเอียดลักษณะชนิดของของเหลว และชนิดของก๊าซ โดยชนิดของความดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ ความดันแบบเกจ (Gauge pressure) จุดเริ่มต้นของความดันเกจอยู่ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ซึ่งเทียบกับระดับความสูงของน้ำทะเล โดยความดันเกจจะสูงขึ้นไปจากความดันบรรยากาศ ซึ่งตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจจะอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ที่ความดันบรรยากาศ ความดันแบบสุญญากาศ (Vacuum pressure) โดยทั่วไปจุดเริ่มต้นของการวัดความดันมีจุดเดียวกับ

การวัดความดันแบบความดันเกจ คือเริ่มที่ระดับน้ำทะเลหรือที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) เป็นการวัดเทียบกับความดันที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (Vacuum) ความดันบรรยากาศมีค่า 101.325 kPa หรือ 14.7 psi ที่ระดับความสูงระดับน้ำทะเลซึ่งเทียบกับความดันที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งความดันสัมบูรณ์คือค่าความดันจริงทั้งหมด ของการรวมค่าความดันเกจและค่าความดันบรรยากาศและความดันแบบแตกต่าง (Differential pressure) การวัดความดันแบบแตกต่างนี้จะใช้การอ่านค่าผลต่างความดัน 2 ค่า ความดันทั้ง 4 ชนิด ที่กล่าวมาข้างต้น มีลักษณะดังรูปที่ 2.1



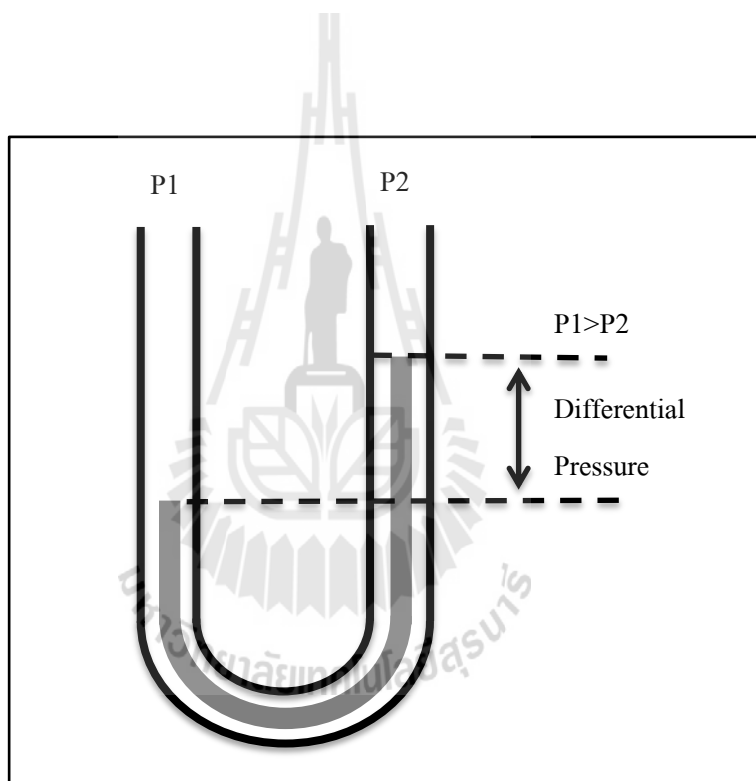
รูปที่ 2.1 ความดันลักษณะต่างๆ

2.1 ชนิดของตัวตรวจรู้ความดัน

ตัวตรวจรู้ หรือ เซนเซอร์ (Sensor) คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน แสง เสียง ความเร็ว ความเร่ง และอัตราการไหล 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

มาโนมิเตอร์มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัว U โดยมีสเกลบอกตำแหน่งในหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตร บนสเกลศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางและที่ปลายทั้งสองด้านของหลอดแก้วจะเปิดสู่บรรยากาศภายนอก ระดับของของเหลวซึ่งส่วนมากใช้ป็นน้ำหรือปรอท จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางทั้งสองด้าน เมื่อมีความดันมากระทบด้านใดด้านหนึ่งของมาโนมิเตอร์ของเหลวที่อยู่ภายในจะถูกกดลงส่งผลให้ของเหลวอีกด้านเพิ่มขึ้น ของเหลวจะหยุดเมื่อแรงที่เกิดจากความดัน

แตกต่างสมดุลกับแรงที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในหลอดแก้ว การวัดความแตกต่างระหว่างความสูงของของเหลวในหลอดแก้วทั้งสองด้าน นั้นคือค่าความดันในหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตรของของเหลวในนั้นนั่นเอง

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 หลอดบัวร์ดอง(Bourdon tube) และแบบเบลโลว์(Bellow)

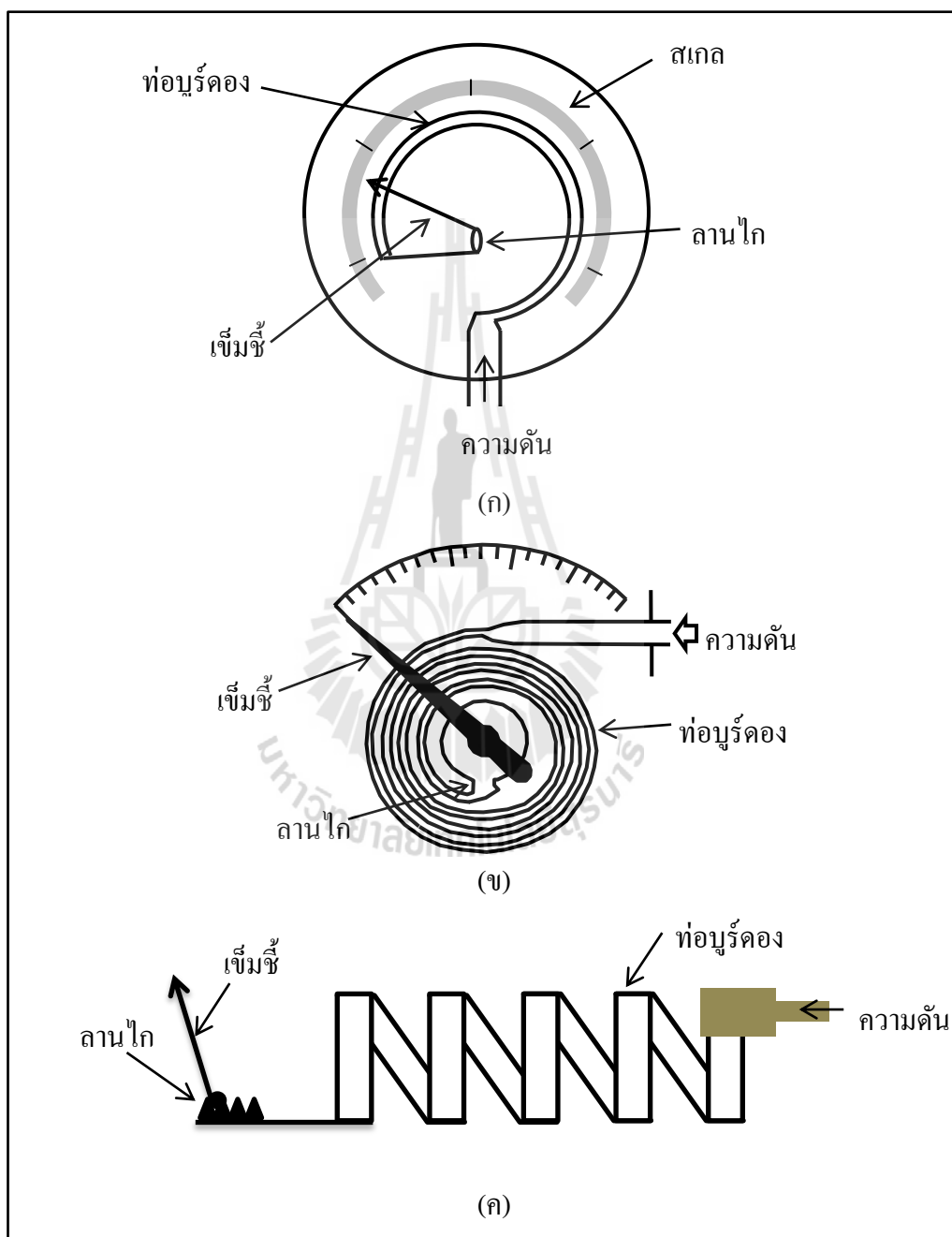
หลอดบัวร์ดอง ถูกคิดค้นขึ้นโดย Eugene Bourdon วิศวกรชาวฝรั่งเศส และถูกปรับปรุงขึ้นในปี ค.ศ.1848 บัวร์ดองเป็นอุปกรณ์วัดความดันที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมประมาณ 95 % ของเกจวัดความดันทั้งหมด เนื่องจากเป็นแบบที่มีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก สามารถวัดความดันในย่านสูงๆ ได้ และสามารถวัดสุญญากาศได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ใช้งานร่วมกับทรานสดิวเซอร์อื่นๆ ได้ บัวร์ดองที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ บัวร์ดองรูปตัว C บัวร์ดองรูปก้นหอย(Spiral Bourdon tube) และบัวร์ดองแบบขดซ้อน(Helical Bourdon tube)

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

บัวร์ดองรูปก้นหอย(Spiral Bourdon tube) บัวร์ดองชนิดนี้ จะมีลักษณะคล้ายบัวร์ดองรูปตัว C แต่จะถูกขดเป็นรูปก้นหอย ดังรูปที่ 2.3(ข) หลักการทำงานก็คล้ายกับบัวร์ดองรูปตัว C เช่นกัน แต่บัวร์ดองรูปก้นหอย จะคล้ายตัวเมื่อป้อนความดันและก้นหอยจะยืดตัวมากกว่าจึงไม่จำเป็นต้องมีชุดเฟืองขยาย มีความเที่ยงตรงมากกว่าบัวร์ดองรูปตัว C

บัวร์ดองแบบขดซ้อน(Helical Bourdon tube) บัวร์ดองแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบก้นหอย แต่การขดจะมีรัศมีเท่ากันและขดซ้อนเป็นวงหลายๆวง ซึ่งทำให้บัวร์ดองแบบขดซ้อนมีระยะการเคลื่อนที่

มากที่สุด ส่วนของเข็มฉีหรือทรานควเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ จะติดอยู่กับปลายของชิ้นส่วนที่ต่อ
ร่วมกับปลายของด้านที่ปิด ดังรูปที่ 2.3(ค) บุร๋ดองชนิดนี้สามารถทนต่อความดันเกินพิกัดได้ดีกว่า
ทั้งสองแบบที่กล่าวมา มีเสถียรภาพในการใช้งาน ทดต่อการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วได้ดี

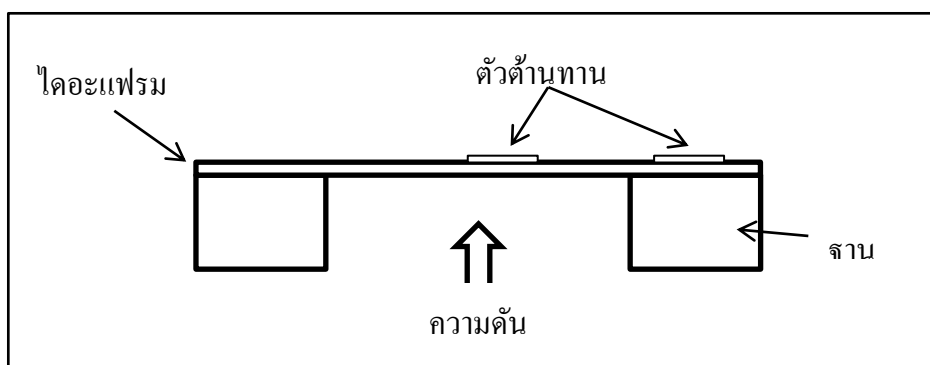


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดบุร๋ดองทั้ง 3 แบบ (ก) บุร๋ดองรูปตัว C
(ข) บุร๋ดองรูปก้นหอย (ค) บุร๋ดองแบบขดซ้อน

ข้อดีของตัวตรวจรู้ความดันแบบหลอดบรรจุคือ มีโครงสร้างที่ง่าย มีราคาถูก สามารถ ออกแบบให้ใช้งานได้ทุกย่านของการใช้งาน สามารถออกแบบให้เข้ากับทรานสดิวเซอร์ชนิดต่างๆ ได้ ทั้ง นิวเมติกส์ ไฮดรอลิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อเสียคือ มีฮีสเตอร์ซิส หรือค่าความผิดพลาด ภายในตัวเองค่อนข้างสูง ที่ความดันน้อยกว่า 1 bar หรือ 15 psi จึงไม่นิยมใช้เนื่องจากแรงดันที่มาจากท่อโลหะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด และไม่สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการ สั่นสะเทือนได้

2.1.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า จะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเมื่อโลหะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่าง ตัวตรวจรู้ความดันแบบนี้มีส่วนประกอบหลักๆ อยู่สองส่วนคือ ไดอะแฟรม และตัวต้านทานสเตรนเกจ ไดอะแฟรมที่เป็นตัวตรวจรู้ความดันส่วนใหญ่จะใช้วัสดุที่เป็นซิลิคอนเนื่องจากคุณสมบัติในการยืดหยุ่นที่ดี มีค่าความผิดพลาดในตัวหรือ ฮีสเตอร์ซิส น้อยมาก และมีตัวต้านทานสเตรนเกจติดอยู่ด้านบนไดอะแฟรม แสดงดังรูปที่ 2.4 เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัว ตัวต้านทานสเตรนเกจก็จะเกิดการยืดตัวทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป ตัวต้านทานสเตรนเกจจะสร้างขึ้นด้วยฟิล์มโลหะบาง ออกแบบให้มีโครงสร้างของวงจรตัวต้านทานภายในเป็นแบบ Wheatstone bridge ซึ่งจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบความต่างของแรงดันไฟฟ้า ความต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจะอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ และผ่านวงจรปรับแต่งและขยายสัญญาณเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากเพียงพอต่อการใช้งาน ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ มีข้อดีคือ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความดันได้ดี มีความไวสูง ค่าความผิดพลาดในตัวหรือ ความผิดพลาดฮีสเตอร์ซิสต่ำ อย่างไรก็ตามตัวตรวจรู้ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ตัวต้านทานมีสัญญาณรบกวนได้ง่าย และอุณหภูมิมีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน

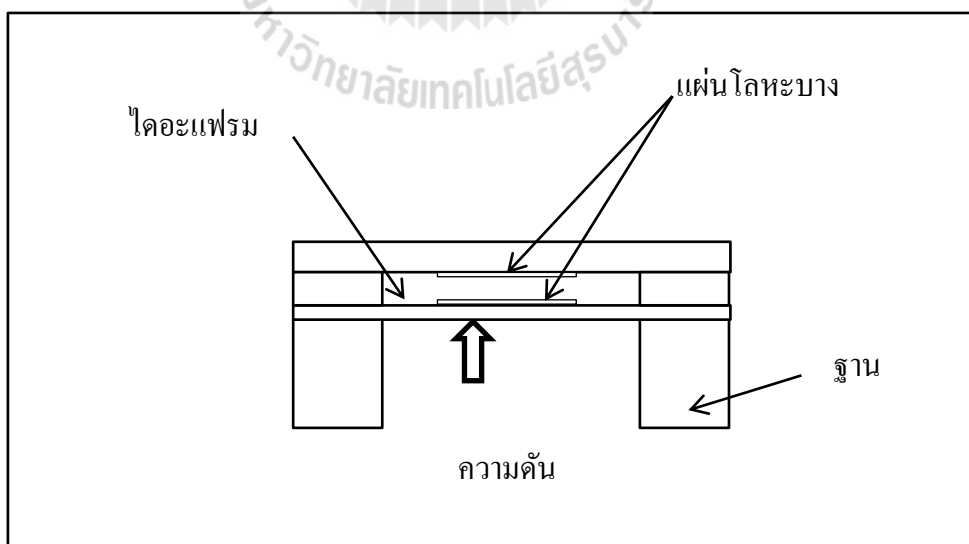


รูปที่ 2.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

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

2.1.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

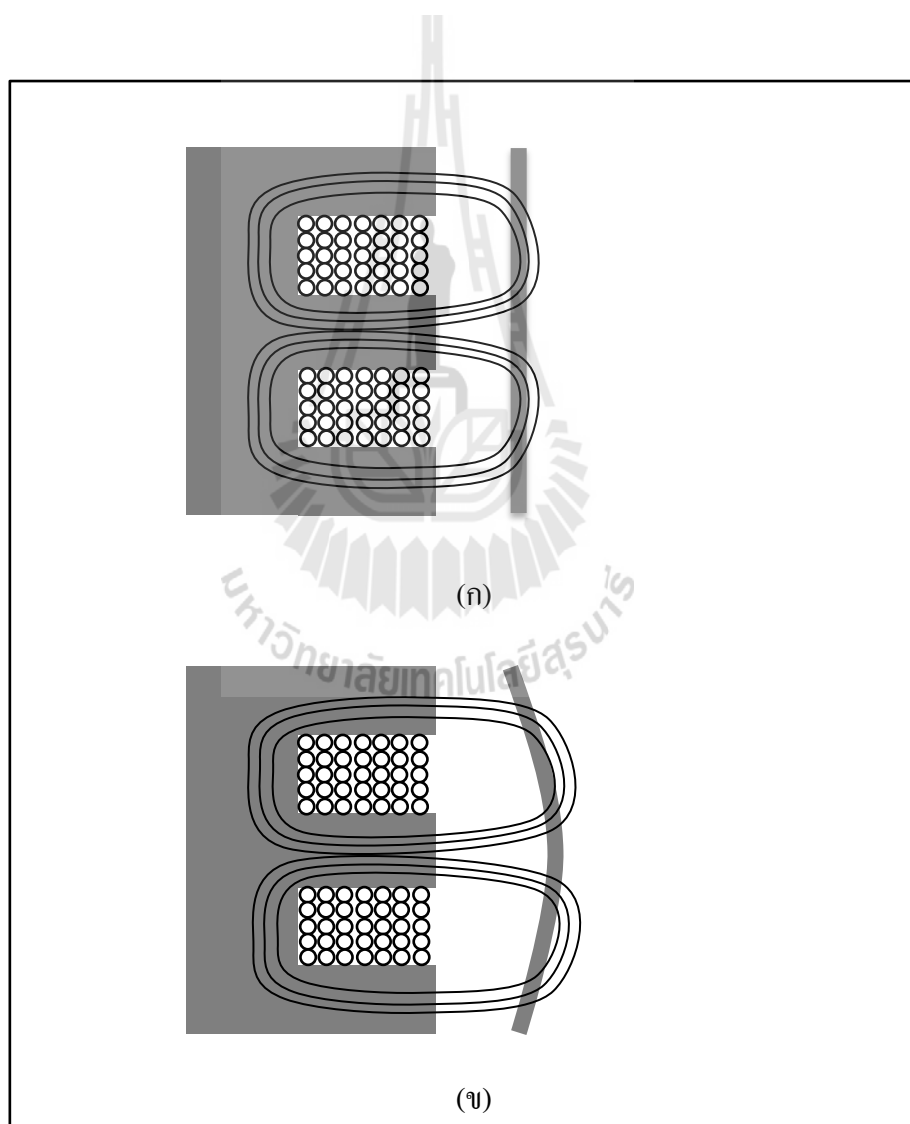
ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้ไดอะแฟรมเป็นตัวตรวจรู้ปริมาณอินพุต ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยส่วนประกอบหลักๆ มีไดอะแฟรมที่ติดกับแผ่นโลหะบาง ซึ่งเป็นขั้วของตัวเก็บประจุ และแผ่นโลหะอีกแผ่นอยู่ด้านบนขนานกับแผ่นโลหะที่ติดอยู่กับไดอะแฟรม เมื่อป้อนความดัน ไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุสามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าได้มากกว่า 25 % ของค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น และออกแบบให้ทนต่อความดันเกิดพิทัดได้โดยการออกแบบโครงสร้างทางกล ข้อดีของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุคือ เอาท์พุทมีความเป็นเชิงเส้นสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพสูง ความไวสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างด้วย อย่างไรก็ตามตัวตรวจรู้ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับการวัดความดันต่ำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

2.1.5 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ

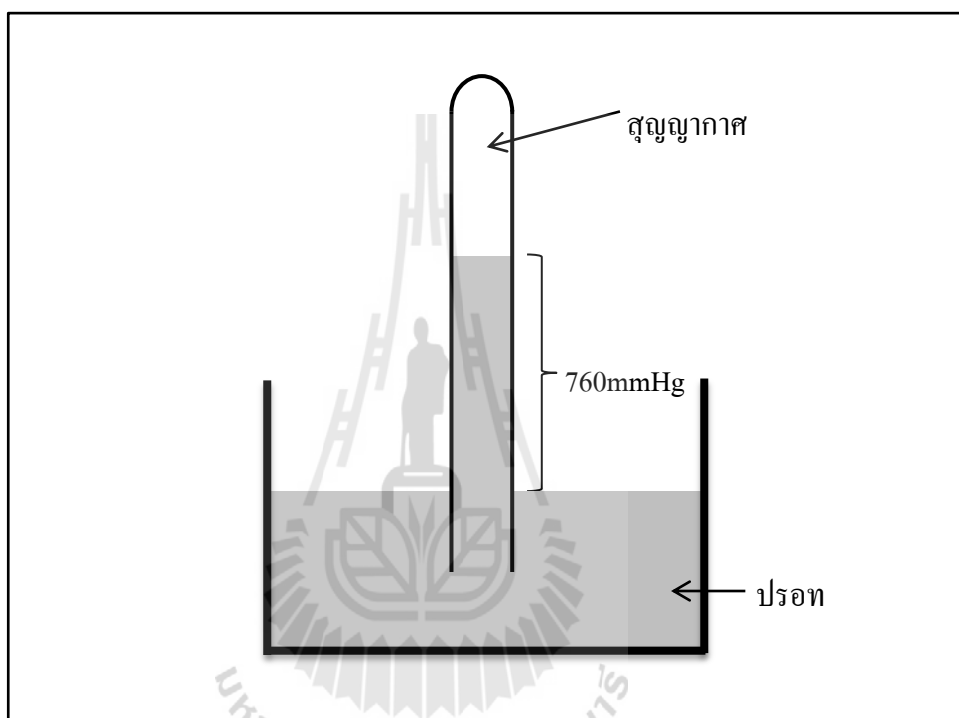
ในการวัดความดันที่มีค่าน้อยๆ ไโคอะเฟรมจะมีการ โกงตัวน้อยเช่นเดียวกันถ้าใช้ตัวต้านทานสเตรนเกจ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุไม่เหมาะสำหรับการวัดความดันค่าน้อยๆ การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใ้การเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็ก หรือตัวเหนี่ยวนำ เรียกว่า Variable reluctance pressure (VRP) ตัวตรวจรู้ความดันชนิดนี้จะใช้วัสดุแม่เหล็กเป็น ไโคอะเฟรม มีลักษณะเป็นตัวต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กซึ่งจะมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำมีเป็นดังรูปที่ 2.6



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

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 และได้คาดการณ์ว่าที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น ความสูงของปรอทในหลอดแก้วจะลดลง และจากการทดลองของปาสคาล ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของอากาศที่เรียกว่าความดัน จากนั้น Gottfried (1700) ได้คิดค้นวิธีทำมาตรวัดความดัน (Barometer) ที่ไม่ใช่ของเหลว แต่ใช้โลหะและสปริงแทน ซึ่งเรียกว่าบารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ (Aneroid barometer) แต่ยังไม่มีการนำมาสร้างเพื่อใช้งานจริงจนกระทั่ง

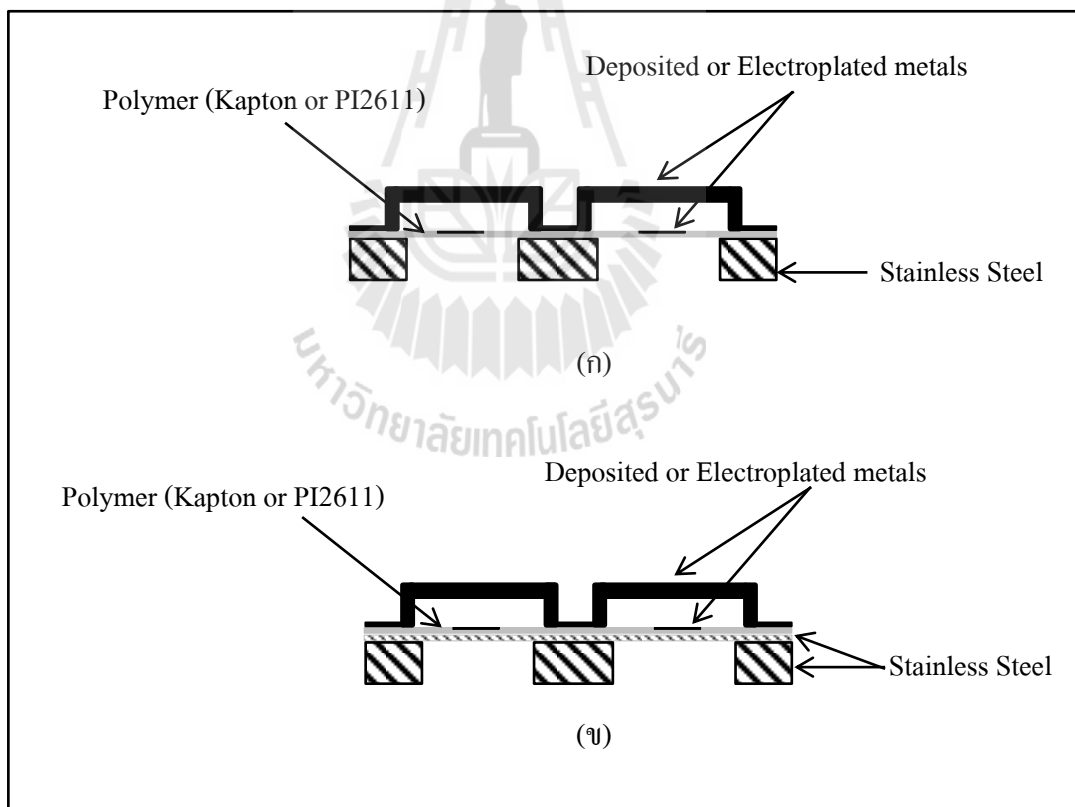
ในปี ค.ศ. 1843 Lucien นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้สร้างบารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ขึ้นมา เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายและเป็นที่มาของหลอดบัวร์ดอง (Bourdon tube) มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ในปี ค.ศ. 1849 ซึ่งมีการพัฒนาให้เหมาะกับการวัดความดันสูง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1856 ได้มีการค้นพบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ เนื่องจากแรงทางกลโดย William Thomson (Lord Kelvin) และในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันขึ้นมาเป็นครั้งแรก โดยอาศัยกลไกของการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรม และหลอดบัวร์ดอง ต่อมา Simmons and Ruge (1938) ได้ประดิษฐ์สเตรนเกจ (Strain gauge) ขึ้นซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าความเครียดในวัสดุเป็นค่าความต้านทานได้ และในปี ค.ศ. 1954 นักวิจัย Smith ได้ค้นพบปรากฏการณ์ เพียโซรีซิสทีฟ ในซิลิคอนและเยอรมันเนียม โดยปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟ คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อมีความเครียด (Strain) ทางกลมากระทำ และในปี ค.ศ. 1958 ได้มีการพัฒนาเพื่อสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟในเชิงพาณิชย์ โดยบริษัท Kulite Semiconductor Product Honeywell และบริษัท Microsystem Kulite (1961) ได้นำซิลิคอน สเตรนเกจซึ่งเป็นตัวต้านทานสร้างด้วยวิธีการแพร่สารกึ่งตัวนำ (Diffusion) ไว้บนซิลิคอนแบบบางที่ทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ต่อมาปี 1966 บริษัท Honeywell พัฒนาวิธีการสร้างไดอะแฟรมซิลิคอนโดยการกัดซิลิคอนเพื่อให้เกิดช่องว่าง (Cavity) เพื่อทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ปี ค.ศ. 1971 ตัวตรวจรู้ความดันที่มีสัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิตอลได้ถูกออกแบบและทำการทดสอบที่มหาวิทยาลัย Case Western Reserve : CWRU ด้วยซิลิคอนที่มีขนาดเล็กและตัวต้านทานแบบบริดจ์ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ในระหว่างการทดสอบและประเมินผลพบว่าบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจรู้ด้วย ซึ่งตัวตรวจรู้แบบเพียโซรีซิสทีฟมีความไวต่อสิ่งรบกวนมากทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความถูกต้องลดลง เพื่อให้ได้ความไวและเสถียรภาพของตัวตรวจรู้ที่ดี จึงได้มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุขึ้นในปี ค.ศ. 1977 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Pressure Sensor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford university) ต่อมาไม่นานมหาวิทยาลัย CWRU ที่มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันอย่างต่อเนื่อง ได้นำเอาระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถทำซ้ำได้ มีความน่าเชื่อถือสูง และให้ผลผลิตสูงอีกด้วย

2.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

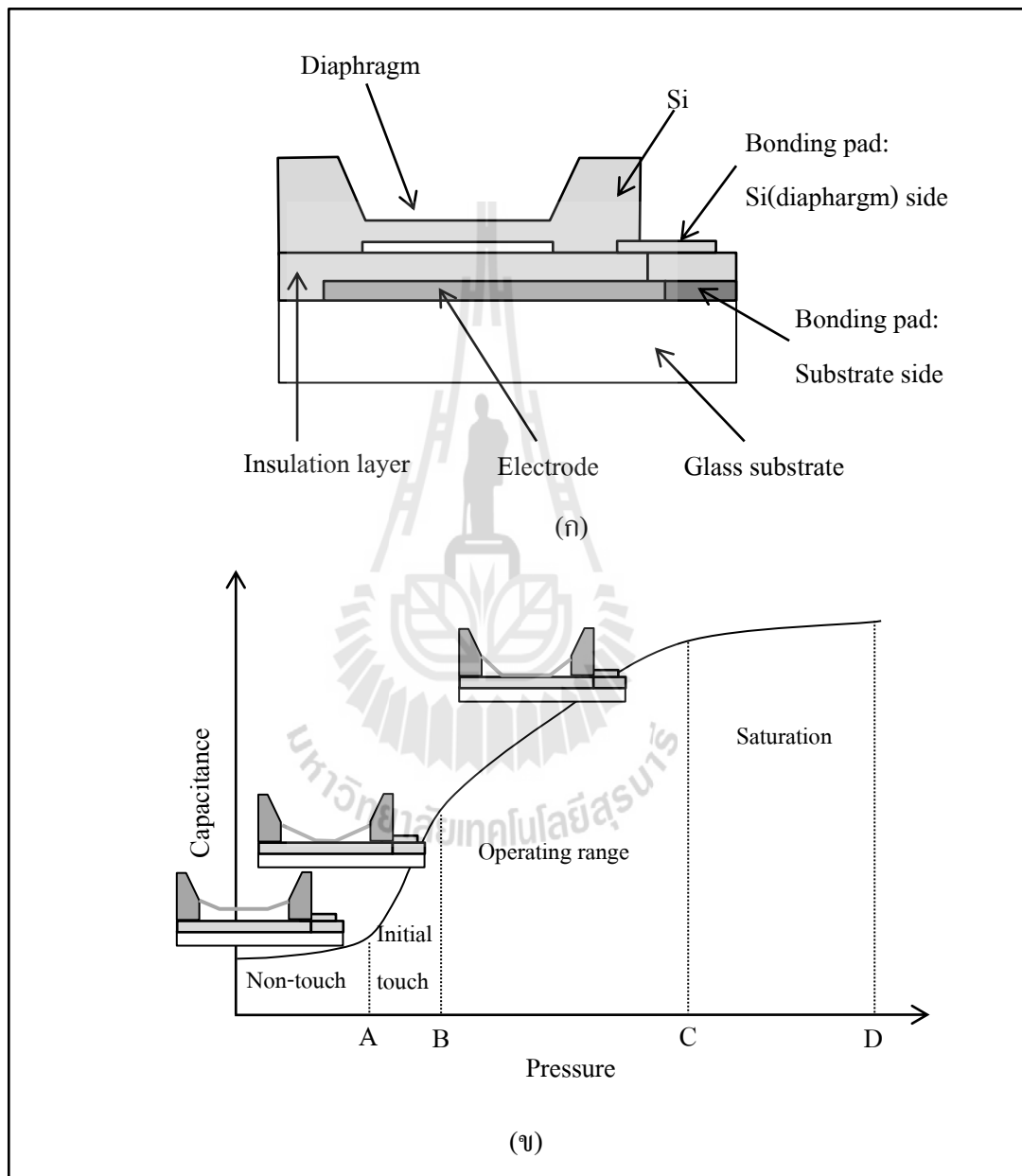
Sung-Pil Chang (2002) ได้นำเสนอตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุแบบอะเรย์ซึ่งจะมีตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุอยู่ภายในหลายตัว ซึ่งจะทำให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า

ความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน และทำการทดลองใช้วัสดุชนิดต่างๆในการสร้างไดอะแฟรม คือ Kapton , Stainless steel และ Titanium ไดอะแฟรมที่เป็น Kapton มีความหนา 50 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 8x8 ทดสอบที่ย่านความดัน 0 - 34 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 pF ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น Stainless steel ความหนา 12.7 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 6x6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0 - 178 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 pF และไดอะแฟรมที่เป็น Titanium ความหนา 25.4 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 6x6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0-178 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.25 pF จากการทดสอบพบว่าการใช้ไดอะแฟรมที่เป็นโลหะจะช่วยให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความทนทานต่อสภาพการใช้งานต่างๆ มากกว่าไดอะแฟรมที่เป็นพอลิเมอร์ โดยโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดันดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 2.8



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

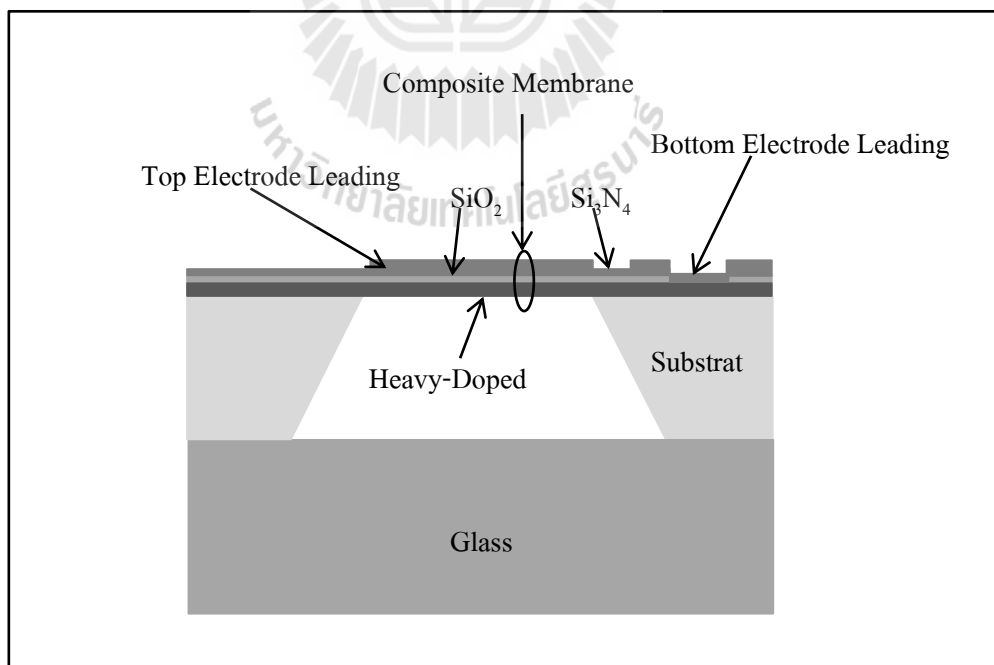
Satoshi Yamamoto (2003) ได้นำเสนอตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบให้ทำงานในโหมดสัมผัส (Touch Mode) สำหรับตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์ โดยตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัส จะให้ค่าความจุไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงแบบเชิงเส้นในช่วงที่ไดอะแฟรมที่มีขั้วอิเล็กโทรดเคลื่อนชนกันแสดงดังรูปที่ 2.9(ก)



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

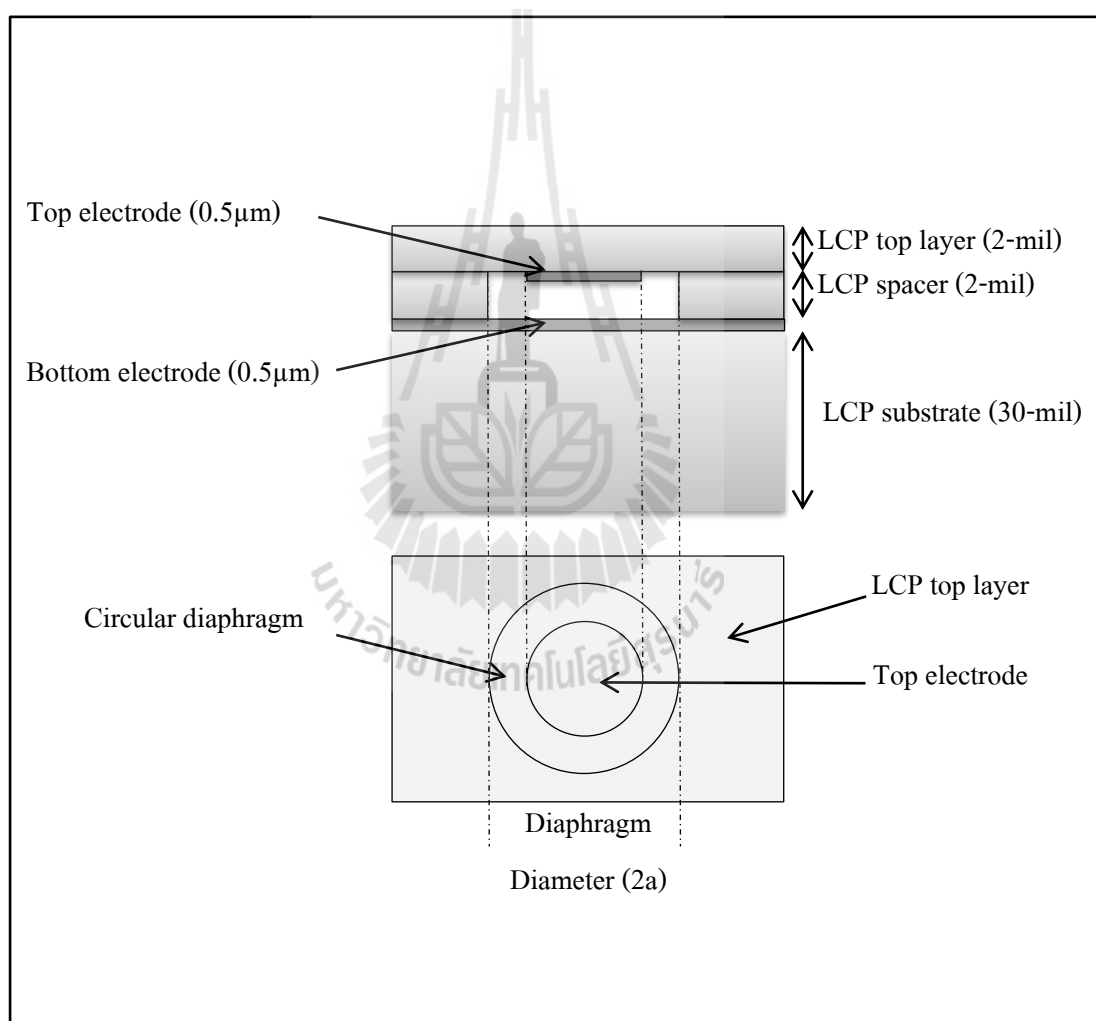
ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุชนิดนี้จะให้ค่าความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุทั่วไป (Non-touch mode) แต่มีข้อเสียคือจะสามารถให้ค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้นในช่วงที่ออกแบบเท่านั้น ซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความดันดังรูปที่ 2.9(ข) ตัวตรวจรู้ความดันที่ Satoshi สร้างขึ้นจะใช้ซิลิคอน 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) ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างไดอะแฟรมแบบแซนดวิช 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 ค่าความผิดพลาดฮิสเตอร์ซิสสูงสุด 3.3 % เทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด



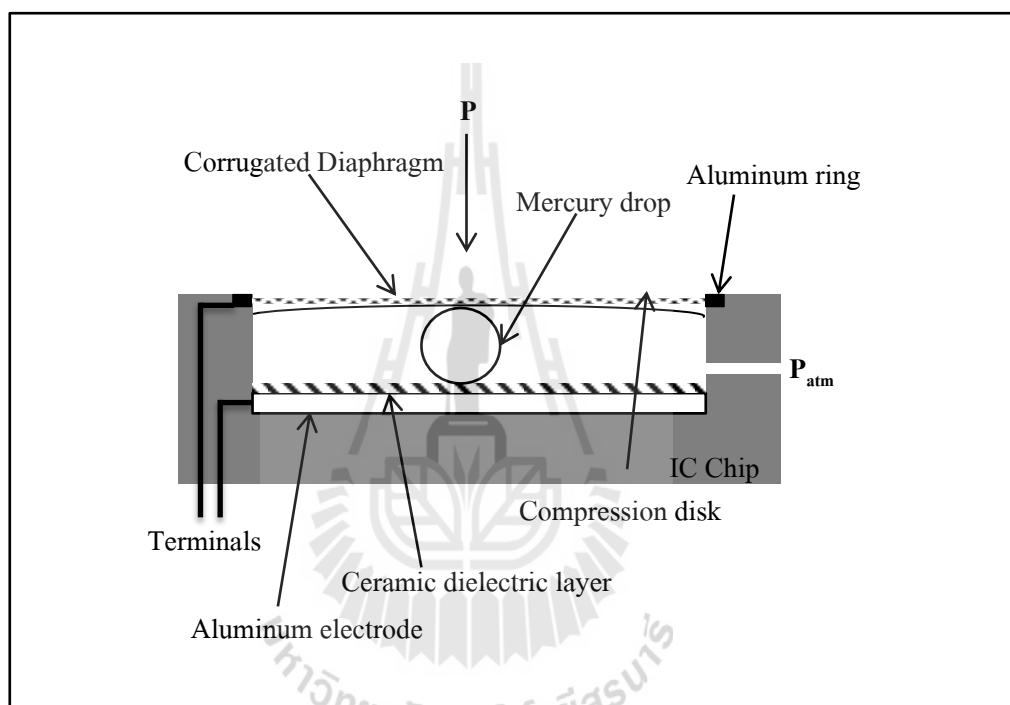
รูปที่ 2.10 ตัวตรวจรู้ความดันของ Min-Xin Zhu (2005)

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



รูปที่ 2.11 ตัวตรวจรู้ความดันของ Jithendra N.(2006)

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



รูปที่ 2.12 ตัวตรวจรู้ความดันของ Ezzat G (2010)

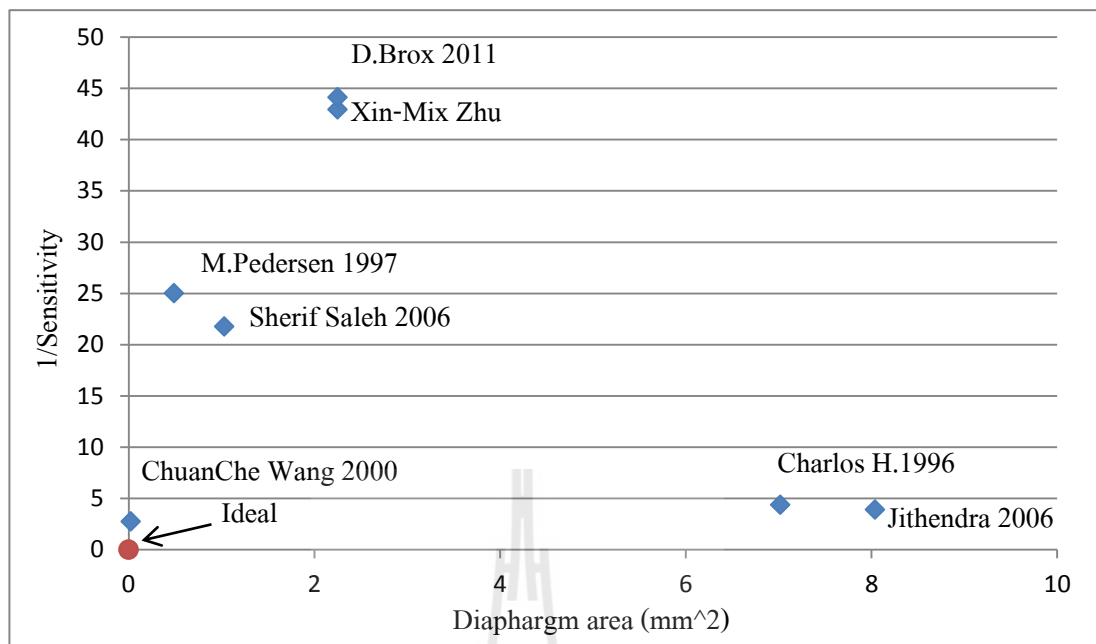
จากงานวิจัยในอดีตจะพบว่ามีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันด้วยเทคนิคต่างๆมากมาย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น พัฒนาให้มีขนาดเล็กลง มีความไวสูงขึ้น โครงสร้างแข็งแรงขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ พัฒนาระบบการผลิตเพื่อลดต้นทุน ปรับปรุงตัวเก็บประจุเพื่อลดผลของอุณหภูมิ เป็นต้น ในการออกแบบให้มีลักษณะเด่นในเรื่องต่างๆเพื่อตอบสนองการใช้งานในรูปแบบต่างๆซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะออกแบบให้มีความโดดเด่นในหลายๆด้าน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาในส่วนของความไวและไดอะแฟรมขนาดเล็ก การเพิ่มความไวของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ ทำได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้แผ่นโลหะขนานของตัวเก็บประจุให้มีระยะห่างที่น้อยที่สุด และมีขนาด

พื้นที่ของแผ่นโลหะใหญ่ส่งผลให้ขนาดของตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ดังนั้น การที่จะสร้างตัวตรวจรู้ความดันให้มีขนาดเล็กและมีความไวสูงจึงมีข้อจำกัดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดออกแบบเพื่อลดขนาดและเพิ่มความไวเป็นหลัก จากการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีตัวเก็บประจุหลายๆตัวอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน ลักษณะการออกแบบดังกล่าวส่งผลให้ตัวตรวจรู้มีขนาดเล็กลง และตัวเก็บประจุดังกล่าวได้สร้างขึ้นด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ออกแบบกระบวนการผลิตให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมากๆ ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยที่มีการพัฒนาขึ้นในอดีตถึงปัจจุบันนี้มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นของตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1 เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันที่มีขนาดเล็กและมีความไว (Sensitivity) หรืออัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นที่มีค่ามากแต่มีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อยนั้น ถือเป็นตัวตรวจรู้ความดันซึ่งเป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้งานทั่วไป ดังนั้นจึงเปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวตรวจรู้อันพึงประสงค์ (figure of merits) สองประการดังกล่าวจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต โดยนำค่าคุณลักษณะทั้งสองวาดลงในกราฟดังรูปที่ 2.13 จุดในกราฟซึ่งเข้าใกล้จุดกำเนิดมากแสดงถึงตัวตรวจรู้ที่มีค่าความไวสูงและมีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งออกแบบตัวตรวจรู้ความดันเพื่อให้มีคุณสมบัติทั้งสองประการมากที่สุด ที่วัสดุและเทคโนโลยีการผลิตจะอำนวย



ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและพื้นที่ของไดอะแฟรม

ปี	ผู้ประพันธ์	ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้น	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 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดันจากงานวิจัยต่างๆ ด้วยตัวชี้วัดคือความไวและขนาดของไดอะแฟรม



บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

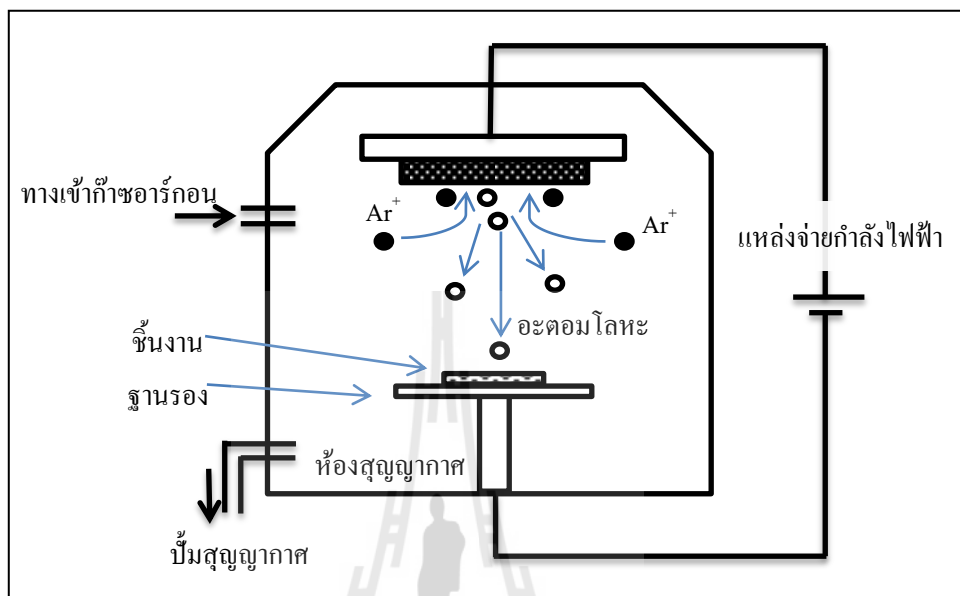
ในกระบวนการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กระบวนการลิโธกราฟี นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่น ๆ ที่มีความสำคัญในการสร้างและพัฒนา อุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นมีกระบวนการต่าง ๆ ก่อนข้างมากนอกเหนือจากกระบวนการลิโธกราฟี ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เช่น การสร้างตัวตรวจรู้แบบต่างๆ ตัวจับเร้า ช่องทางเดินจุลภาค เป็นต้น การสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีกระบวนการสร้างที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ การออกแบบกระบวนการสร้าง เช่น กระบวนการเคลือบโลหะ (Evaporation, Sputtering) กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray mask) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ (Etching) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอเพียงกระบวนการที่ จำเป็นสำหรับงานวิจัย ดังนี้

3.1 กระบวนการเคลือบโลหะ

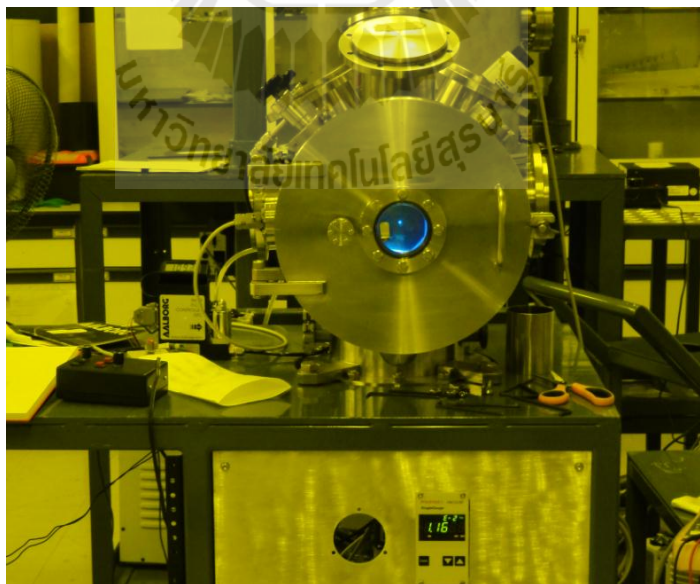
3.1.1 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)

การเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริงเป็นวิธีการเคลือบโลหะวิธีหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมมาก สามารถเคลือบใช้งานได้ทั้งบริเวณผิวหน้าและด้านข้างของชิ้นงานไปพร้อมกัน สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการนี้ในการเคลือบโลหะบนพอลิเมอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้มีหลักการคือ การสร้างพลาสมาจากก๊าซเฉื่อย Ar^+ ด้วยสนามไฟฟ้าและเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นลำแสงพลาสมา การสปัตเตอริงสามารถแบ่งชนิดของแหล่งจ่ายออกได้สองชนิดคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง(DC sputtering) สำหรับการเคลือบโลหะบนชิ้นงาน และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูง(RF sputtering) ซึ่งสามารถเคลือบได้ทั้งโลหะและฉนวน โดยทั่วไปจะนิยมใช้ความถี่ 13.56 MHz สำหรับการเคลือบโลหะบนโครงสร้างพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง และจะต้องเคลือบทุกทิศทาง จึงจำเป็นต้องมีการหมุนชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเคลือบโลหะ โลหะที่ใช้จะเป็นโครเมียม (Cr) เคลือบลงบนโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วตามด้วยโลหะ

เงิน (Ag) เนื่องจากโลหะเงินนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโครเมียมแต่ยึดเกาะกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดีนัก จึงต้องใช้โลหะโครเมียมเคลือบรองพื้นลงไปก่อน



(ก)

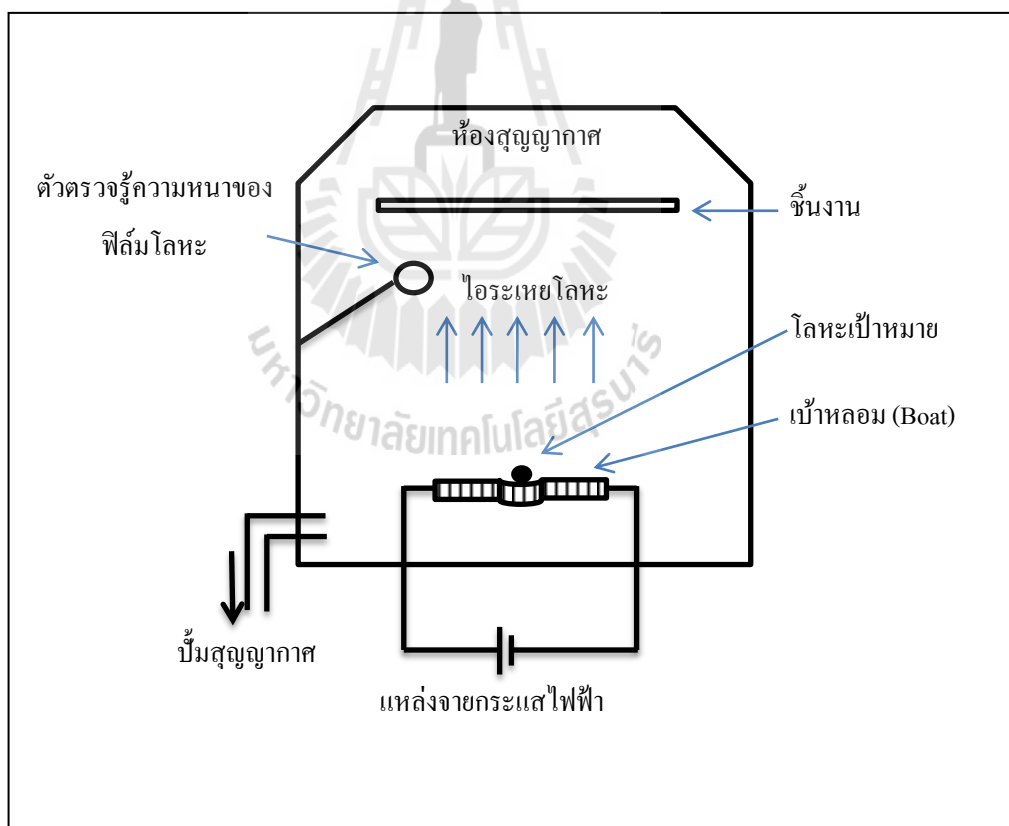


(ข)

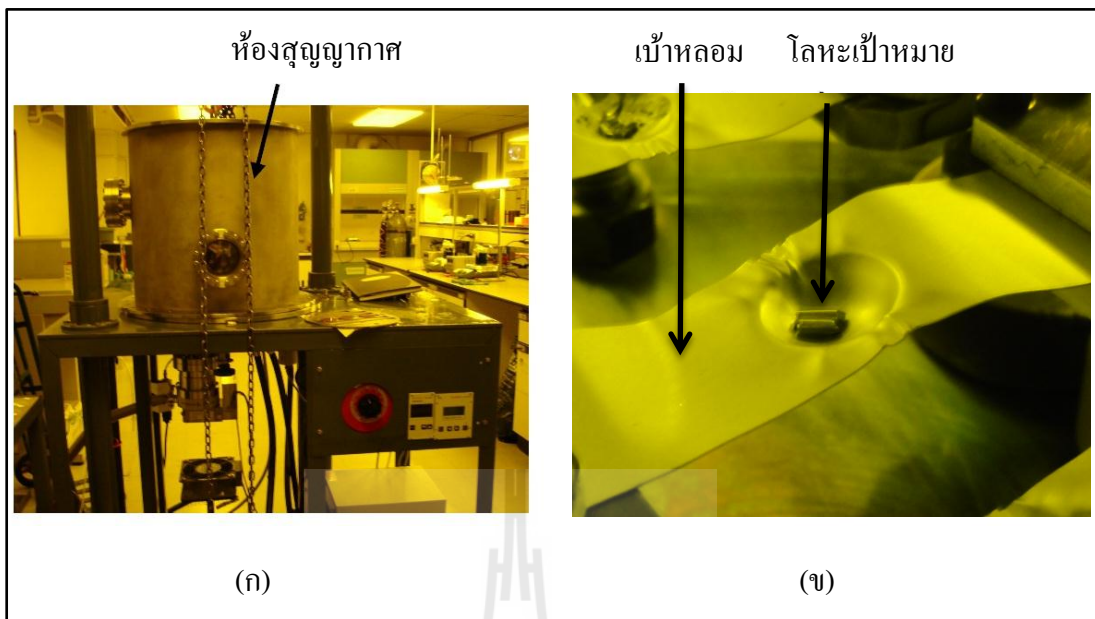
รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปีดเตอริง (ก) วงจรและอุปกรณ์ (ข) ภาพถ่ายเครื่องสปีดเตอริง

3.1.2 กระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

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



รูปที่ 3.2 วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ



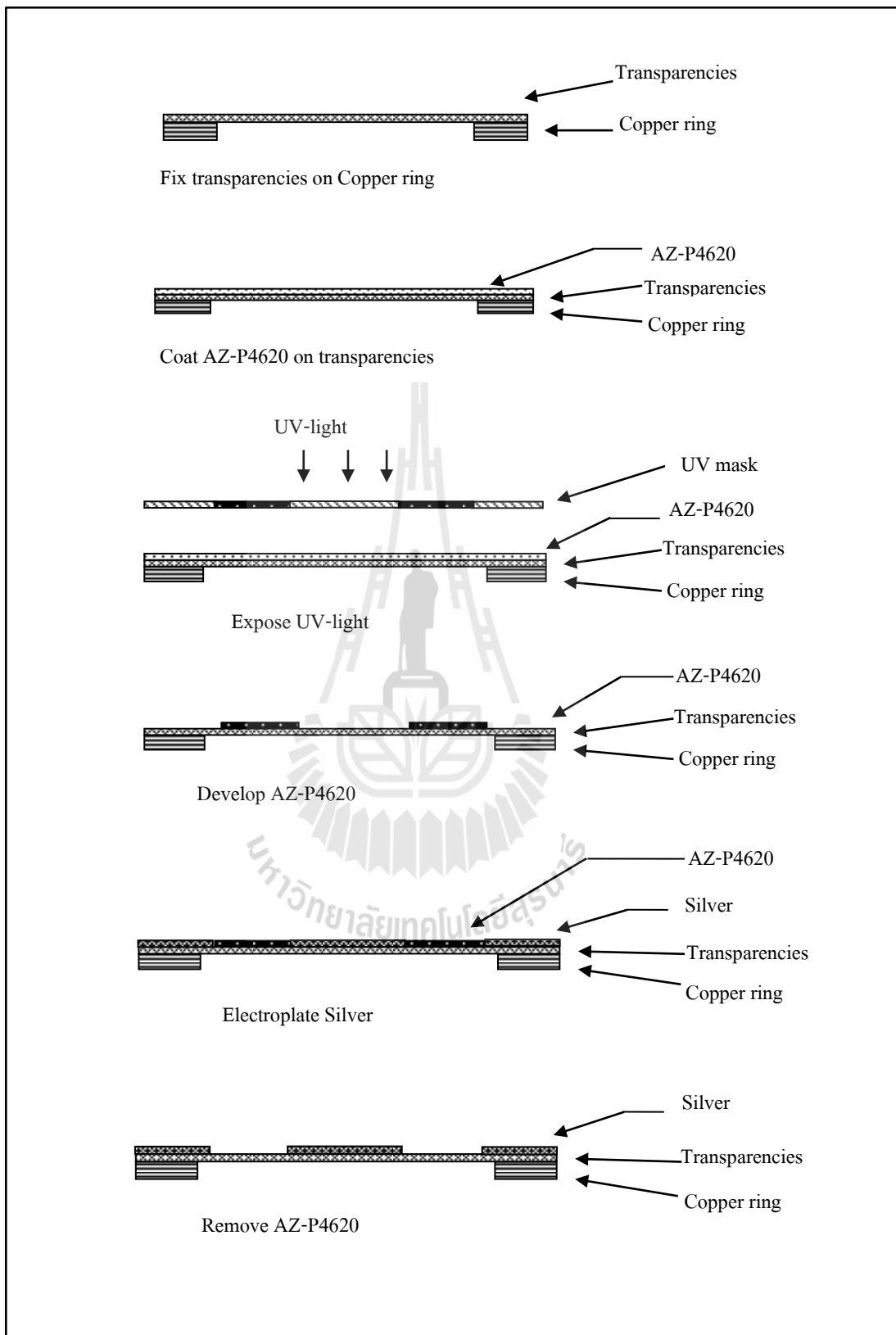
รูปที่ 3.3 เครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ (ก) ภาพถ่ายวงจรและอุปกรณ์ (ข) เบ้าหลอมโลหะ

3.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

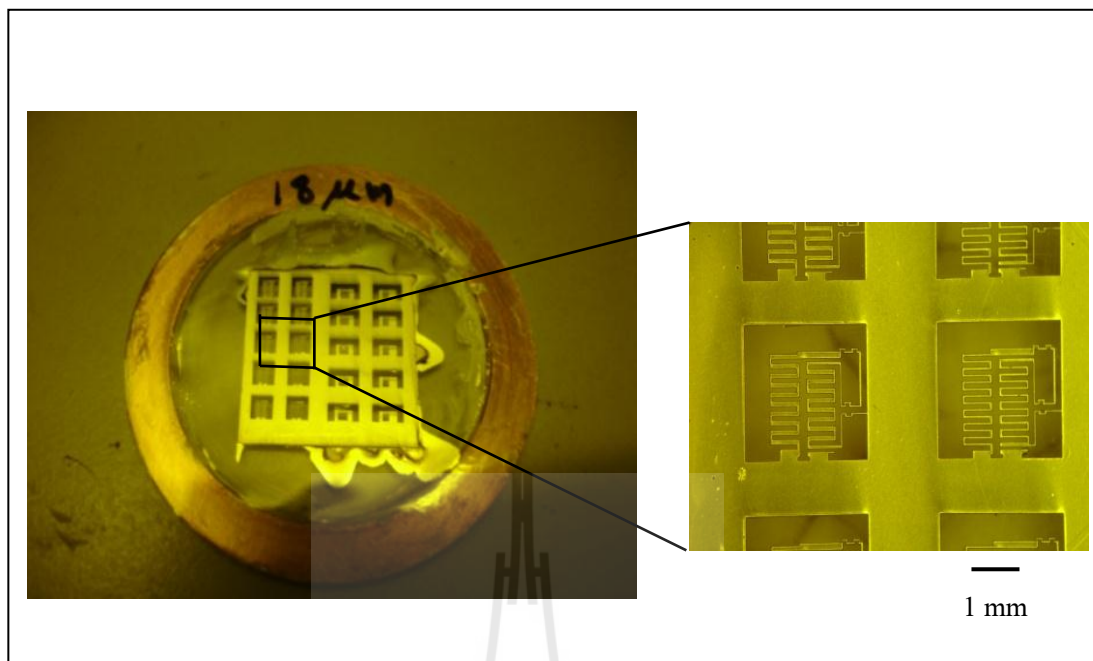
หน้ากากกันรังสีเอกซ์มีความสำคัญในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์เพราะ ลวดลายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเกิดจากการถ่ายทอดลวดลายผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ความถูกต้องแม่นยำของการถ่ายทอดลวดลายของโครงสร้างที่ออกแบบ ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์เช่นกัน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีคุณสมบัติการทะลุทะลวงสูงวัสดุที่ใช้สร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้สำหรับดูดซับรังสีเอกซ์จะเป็นวัสดุโลหะ เช่น ทองคำ เงิน ตะกั่ว เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปโครงสร้างขนาดเล็กได้ด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ในการขึ้นรูปโครงสร้างขนาดเล็กที่เป็นลวดลายจำเป็นต้องสร้างบนวัสดุฐานที่นำไฟฟ้าเช่น แผ่นกราฟไฟต์ แผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะ วัสดุฐานที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน แผ่นกราฟไฟต์จะสามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้หนากว่าแผ่นใสเคลือบโลหะ สามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้มากกว่า 100 ไมโครเมตร สามารถฉายรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่มีความหนาในระดับมิลลิเมตรได้ แต่กราฟไฟต์เป็นวัสดุทึบแสง เหมาะกับการสร้างชิ้นงานขึ้นเดียวหรือการฉายแสงเอกซเรย์ขึ้นเดียว ส่วนวัสดุฐานที่เป็นแผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้น้ำกากกันรังสีเอกซ์ที่มีบริเวณที่ไม่มีโลหะเงินจะมีลักษณะโปร่งแสงสามารถมองเห็นลวดลายได้ ซึ่งมี

ข้อดีในการสร้างโครงสร้างหลายชั้นช่วยให้วางหน้ากากได้แม่นยำ แต่กระบวนการชุบโลหะบนแผ่นพลาสติกทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากโลหะที่เคลือบแผ่นพลาสติกมีแรงยึดเกาะไม่มาก เมื่อทำการเติมโลหะขึ้นมาจะเกิดแรงกระทำกับโลหะที่เคลือบแผ่นพลาสติก ทำให้โลหะหลุดออกจากฐาน จึงทำให้วัสดุฐานที่เป็นพลาสติกเคลือบโลหะไม่สามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้หนามากนัก หรือหนาไม่เกิน 30 ไมโครเมตร ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้วัสดุฐานทั้งสองชนิดที่กล่าวมา มีกระบวนการดังนี้

กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกเคลือบโลหะเป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 3.4 โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ฉายผ่านหน้ากากลงบนสารไวแสง ซึ่งสารไวแสงที่ใช้ในที่นี้จะใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ-P4620 (Clariant Corp., USA) การเตรียมสารไวแสงในการทำหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ เริ่มจากการนำแผ่นโสมมาติดกับวงแหวนด้วยกาวอีพ็อกซี (Epoxy) แล้วทำความสะอาดแผ่นโสมด้วยไอพีเอ และน้ำสะอาดจากนั้นก็เคลือบโลหะไทเทเนียม (Ti) และเงิน (Ag) ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) เพื่อให้แผ่นโสมมีส่วนที่นำไฟฟ้า แล้วทำการหมუნเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ-P4620 ให้ได้ความหนาประมาณ 30-50 μm อบให้สารไวแสงแข็งตัวที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่มีลวดลายที่บดแสงแล้วล้างสารไวแสงออกด้วยสารเคมีจะเกิดเป็นลวดลายของสารไวแสงบนโลหะ จากนั้นทำการชุบโลหะเงินด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ให้ได้ความหนาประมาณ 20 - 30 μm เมื่อได้ความหนาที่ต้องการแล้วล้างสารไวแสงและโลหะไทเทเนียมและโลหะเงินที่ไม่ถูกชุบด้วยโลหะเงินออก จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 นำไปใช้ในการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงต่อไป

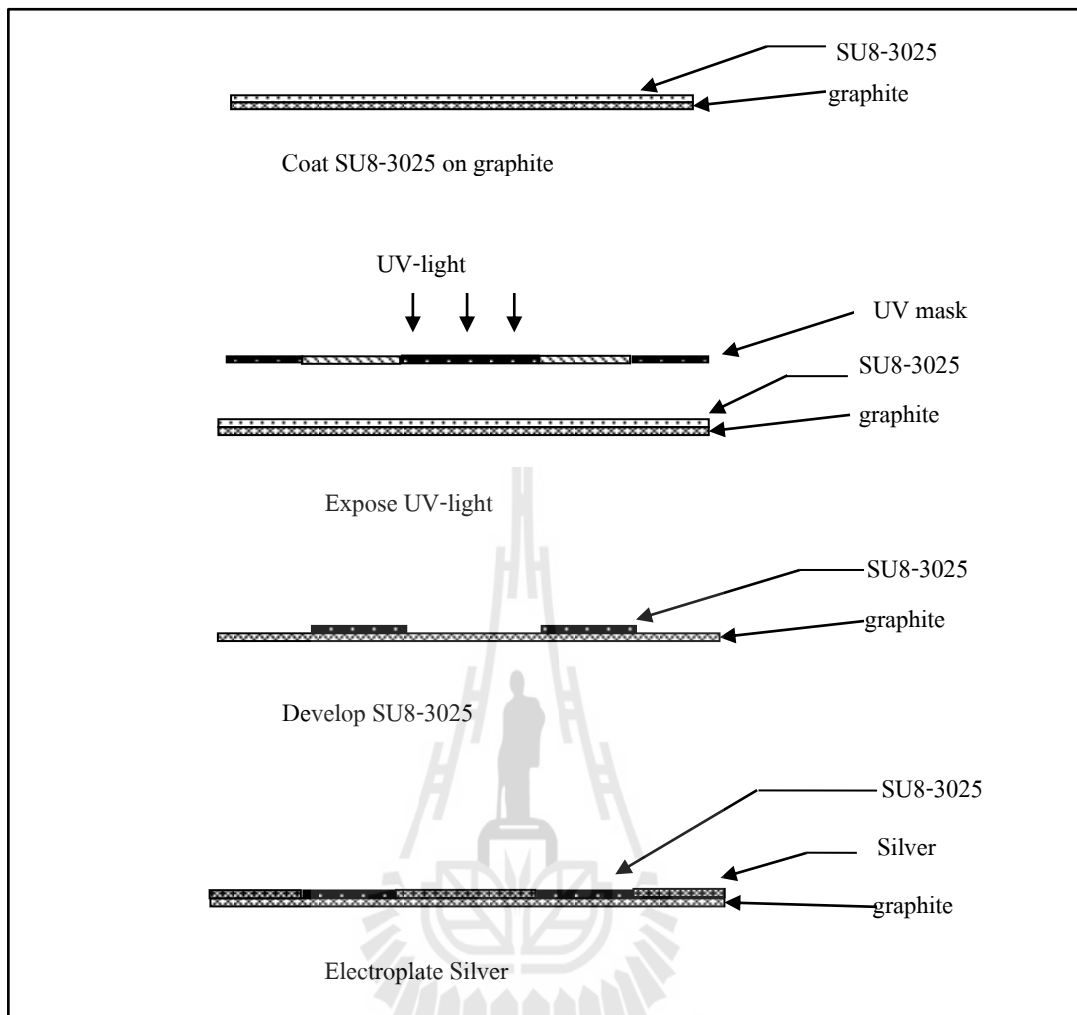


รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างหน้ากักกันรังสีเอกซ์บนแผ่นพลาสติกใส



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ด้านขวาเป็นภาพขยายแสดงลายโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟิเป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 3.6 โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ฉายผ่านหน้ากากลบนสารไวแสง ซึ่งสารไวแสงที่ใช้ในที่นี้จะใช้สารไวแสงชนิดลบ SU8-3025 (MicroChem Crop.,USA) การเตรียมสารไวแสงในการทำหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ เริ่มจากทำความสะอาดแผ่นกราฟิด้วยไอพีเอ และน้ำสะอาดจากนั้นทำการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU8-3025 ให้ได้ความหนาประมาณ 30-50 μm อบให้สารไวแสงแข็งตัวที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่มีลวดลายที่บดแสงแล้วล้างสารไวแสงออกด้วยสารละลายดีเวลลอปเปอร์จะเกิดเป็นลวดลายของสารไวแสงบนโลหะ จากนั้นทำการชุบโลหะเงินด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีความหนาประมาณ 20 - 30 μm ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้าย จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ซึ่งนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูงต่อไป

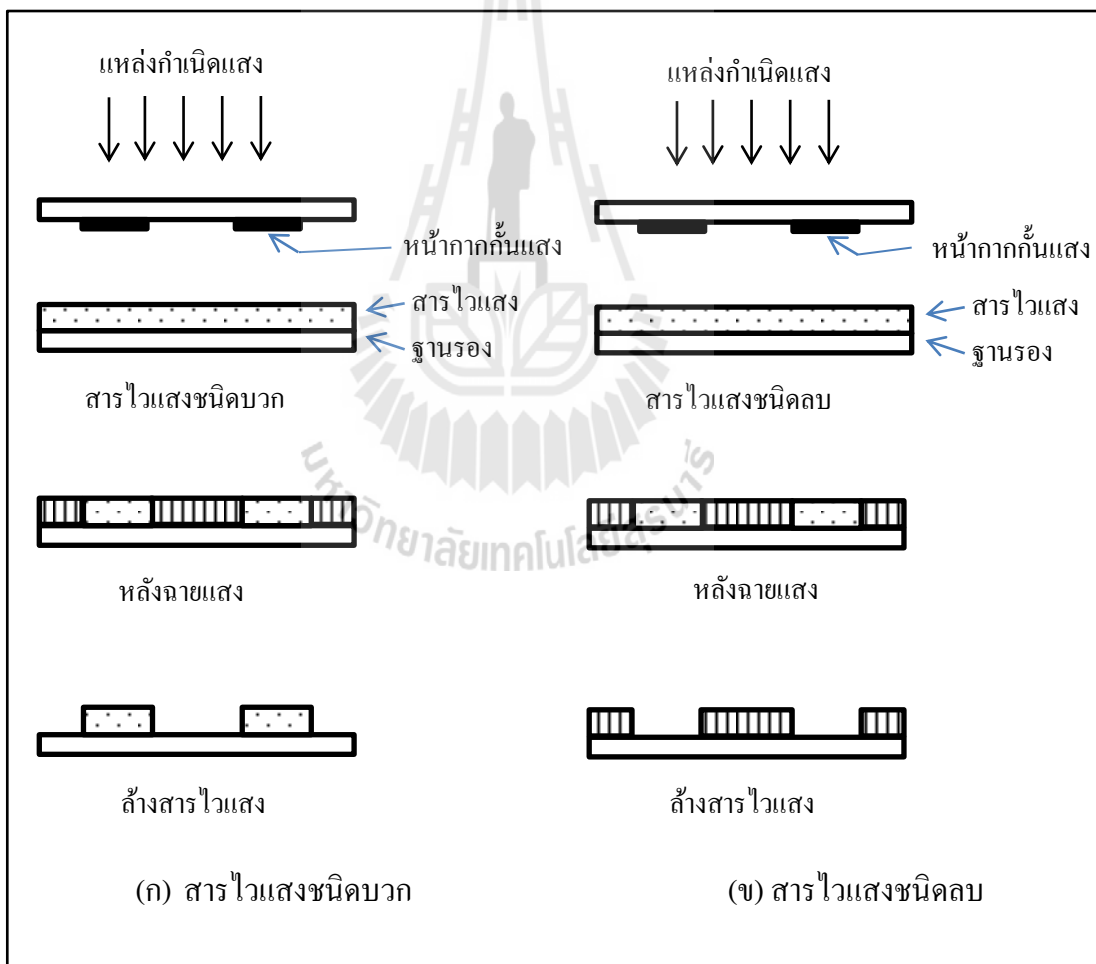


รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์บนกราฟไฟต์

3.3 กระบวนการลิโธกราฟี

กระบวนการลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตวงจรรวมในปัจจุบัน ซึ่งยังคงใช้กระบวนการลิโธกราฟีในการผลิตแต่ในส่วนของการวิธีการและแหล่งพลังงานแสงที่ใช้ได้ถูกพัฒนาให้มีสมรรถภาพมากขึ้นมาโดยตลอด โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้นั้นมีแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากกันแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่ง หรือฉายผ่านเลนส์เพื่อย่อขนาดของชิ้นงานลง โดยทั่วไปแล้วการฉายแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่งจะใช้ร่วมกับเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV mask aligner) แหล่งกำเนิดแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่นประมาณ 365 - 450 nm ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีจากแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวนี้ ความสูงของชิ้นงานหลังจากฉายแสงสามารถทำได้สูงถึง 100 μm แต่ในบางงานที่ต้องการความสูงของ

ชิ้นงานที่มีความสูงหลายร้อยไมโครเมตร หรือระดับมิลลิเมตร จึงได้มีการพัฒนากระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีซึ่งมีพลังงานสูงกว่าแสงอัลตราไวโอเลตมาก ในการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชิ้นงานจะฉายผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความหนามากถึงระดับมิลลิเมตรได้ ในส่วนของสารไวแสง (Photoresist) ที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟี จะจำแนกออกได้เป็นสองชนิดคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เมื่อสารไวแสงกระทบกับแสงจากแหล่งกำเนิด จะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดความแตกต่าง ระหว่างบริเวณที่กระทบแสงและบริเวณที่ไม่กระทบแสง เมื่อนำไปล้างด้วยสารละลายดีเวลอปเปอร์จะเกิดลวดลายตามหน้ากาที่ใช้กันแสง ซึ่งอาจจะเหมือนกับลวดลายต้นแบบหรือตรงข้ามกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสงดังรูปที่ 3.7

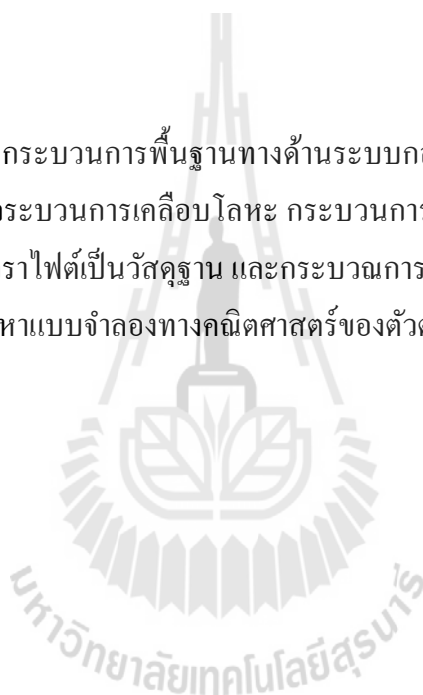


รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายด้วยสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการลิโธกราฟีในส่วนของการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์และการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูงที่เป็นโครงสร้างตัวเก็บประจุ ในส่วนของการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์จะใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ฉายผ่านหน้ากาฟิล์มที่บแสงลงบนสารไวแสงชนิดบวก AZ-P4620 ที่ความหนา 30 μm เพื่อสร้างลวดลายก่อนที่จะทำการเติมวัสดุอุดชั้นรังสีด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ส่วนของการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ จะใช้กระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีโดยการฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ลงบนสารไวแสงชนิดลบ SU8-2100 ความหนา 500 μm บนแผ่นกราไฟต์ เพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานสูงที่เป็นพอลิเมอร์และสามารถขัดแผ่นกราไฟต์ออกได้เพื่อนำโครงสร้างไปใช้งานต่อไป

3.4 สรุป

ในบทนี้ กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่จำเป็นในการสร้างตัวตรวจรู้ความดันได้แก่ กระบวนการเคลือบโลหะ กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นใสเคลือบโลหะและกราไฟต์เป็นวัสดุฐาน และกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความดันต่อไป



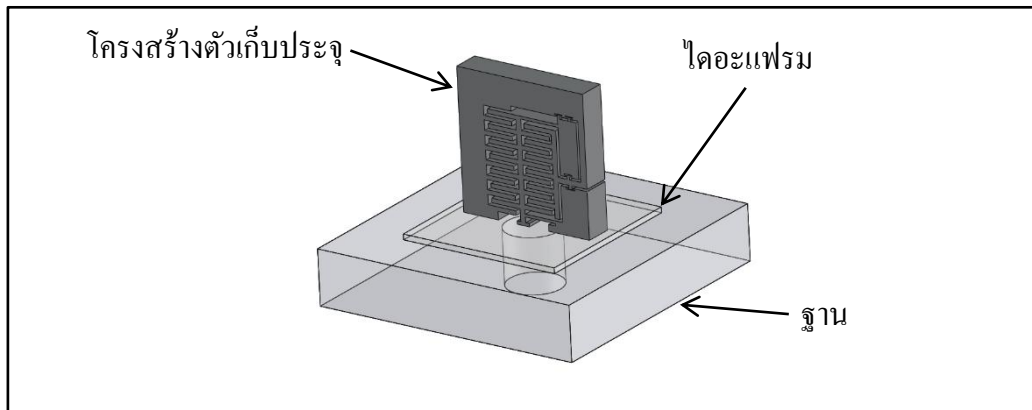
บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน

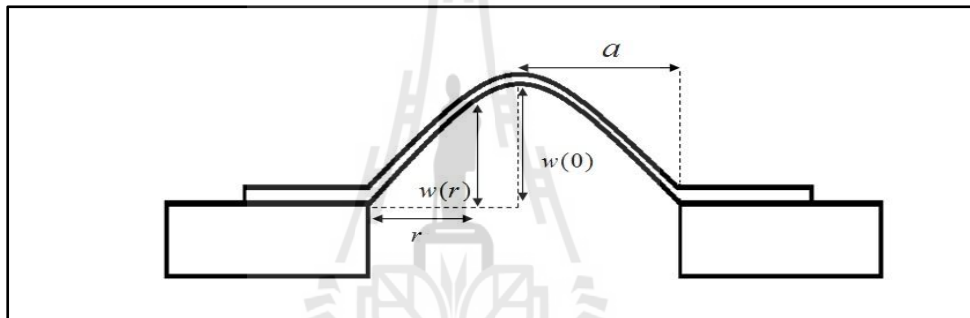
ตัวตรวจรู้ความดัน คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันอากาศหรือความดันก๊าซ โดยใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น การโก่งตัว การบิด-งอ เมื่อมีแรงเนื่องจากความดันอากาศหรือความดันก๊าซมากระทำกับวัสดุ จากนั้นเปลี่ยนเป็นค่าทางไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลง เช่น ความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า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

4.1 การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน

ในการออกแบบตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ ได้สร้างรูวงกลมขนาด บนแผ่นอะคริลิก แล้วติดไดอะแฟรมบนรูด้วยกาวอีพ็อกซี่ จากนั้นจึงนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่สร้างด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโทกราฟีติดบนไดอะแฟรม ดังรูปที่ 4.1 การออกแบบขั้นแรกเริ่มจากการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ยังไม่ติดโครงสร้างของตัวเก็บประจุ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ไดอะแฟรมที่มีลักษณะเป็นวงกลม มีความหนาไม่มาก (ไม่เกิน 20 % ของเส้นผ่านศูนย์กลาง) เมื่อทำการป้อนความดันที่ระนาบของไดอะแฟรม จะทำให้ไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวดังรูปที่ 4.2 และเนื่องจากไดอะแฟรมมีลักษณะเป็นวงกลมสมมาตร จึงทำให้ระยะการโก่งตัวสมมาตรด้วย ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่เป็นแผ่นวงกลมที่เกิดจากความดันก๊าซสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (4.1) โดย S.P.Timoshenko(1959) ซึ่งที่มาของสมการอธิบายในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.2 ลักษณะการโก่งตัวของไดอะแฟรม

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

โดยที่ w คือ ระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมในแนวตั้งฉากกับระนาบ

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 โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของวัสดุที่เป็นไคอะเฟรม

h คือ ความหนาของไคอะเฟรม

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุที่เป็นไคอะเฟรม

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

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

เนื่องจากไคอะเฟรมมีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งโดยปกติระยะการโก่งตัวของไคอะเฟรมวงกลมจะมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของแผ่นไคอะเฟรมนั่นคือ $r = 0$ และบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางทั้งสองข้างจะมีลักษณะสมมาตร จากสมการที่ (4.3) จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการโก่งตัวของไคอะเฟรม คือ ความดัน (P) ความยาวรัศมีไคอะเฟรม (a) และความหนาของไคอะเฟรม (h) ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุสองชนิดที่ใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุตหรือไคอะเฟรม คือ PI และ PDMS ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กับแพร่หลายในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

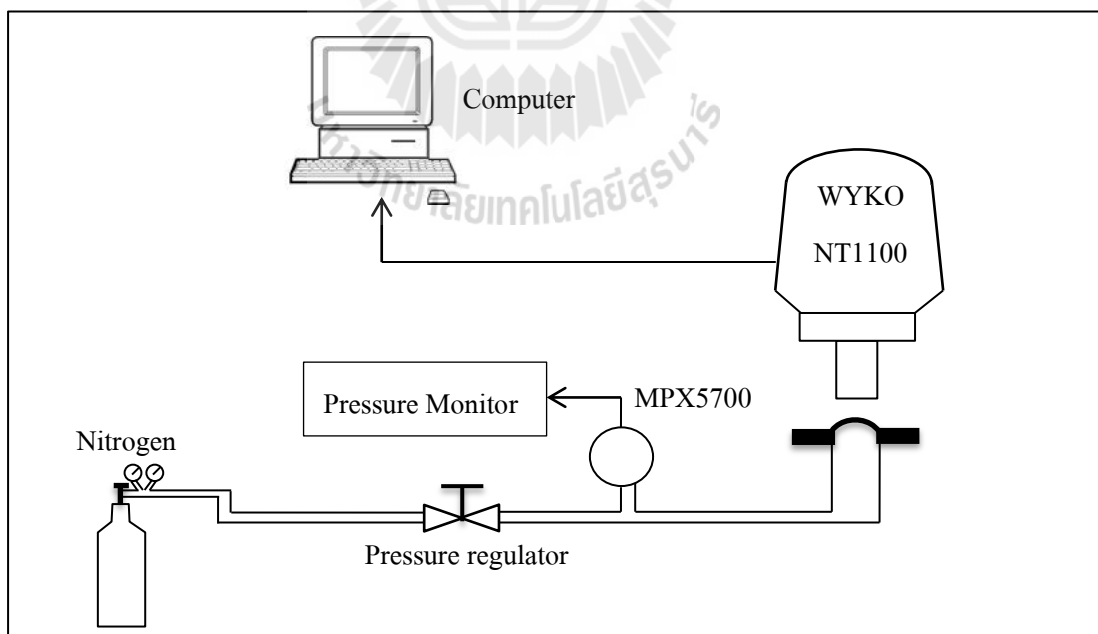
งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการโก่งตัวของไคอะเฟรมที่ใช้วัสดุทั้งสองชนิดภายใต้การทดสอบที่ความดันต่างกัน ซึ่งจะแบ่งพิจารณาเพียงครึ่งส่วนของไคอะเฟรมเนื่องจากไคอะเฟรมมีลักษณะสมมาตร โดยทำการจำลองผลการโก่งตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.3) ตามรายงานของ Wilson, Atkinson ในปี 2007 PI มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ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

เนื่องจากค่าโมดูลัสของยังของวัสดุต่างๆมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบภายในวัสดุนั้นๆ เช่น PDMS เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของยังไม่แน่นอน เนื่องจากอัตราส่วนในการผสมสารละลายลงใน PDMS มีผลต่อความแข็งของ PDMS ดังนั้นค่าที่รายงานจากผลงานตีพิมพ์อื่นๆ อาจจะไม่ตรงกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในการหาค่าโมดูลัสของยังสำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิดเพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสของยังที่เป็นของวัสดุที่ใช้จริง ในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซอง ยึดตามค่าที่รายงานจากผลงานตีพิมพ์ที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากเป็นค่าที่มีผลต่อการโก่งตัวของไคอะเฟรมน้อย เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสของยัง ในส่วนของรายละเอียดการทดสอบหาค่าโมดูลัสของยังของวัสดุทั้งสองชนิดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.1 การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง

มอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) หรือมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity หรือ elastic modulus) เป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งมอดูลัสของยังหาได้จาก ขอบเขตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้น(stress) ต่อ ความเครียด(strain) ที่ค่าความเค้นน้อย สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับความเครียด ที่ได้จากการทดลองดึง การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังสามารถทำได้โดยการใช้แรงภายนอกกระทำกับวัสดุ ต่อหน่วยพื้นที่ที่เรียกว่าความเค้น ทำให้วัสดุรูปร่างเปลี่ยนไปหรือมีความเครียด ซึ่งแรงที่กระทำกับวัสดุจะต้องมีค่าไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น เพื่อไม่ให้วัสดุเสียรูป ในส่วนของการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังของวัสดุ จะทำการทดสอบแรงดึงโดยขึ้นรูปวัสดุให้มีรูปแบบตามมาตรฐาน ซึ่งผลการทดสอบจะออกมาในรูปแบบของกราฟความเค้นและความเครียด ซึ่งค่าความชันของกราฟดังกล่าวคือค่ามอดูลัสของยัง

ในการทดสอบหามอดูลัสของยังในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบหาระยะการโก่งตัวของ ไดอะแฟรมเนื่องจากความดันโดยการวัดระยะการโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม โดยสร้างรูเจาะบนอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และติดตั้งไดอะแฟรม PDMS และ ไดอะแฟรม PI ซึ่งรายละเอียดในการสร้างฟิล์มบางและการติดไดอะแฟรมจะกล่าวถึงในบทที่ 5



รูปที่ 4.3 การทดสอบวัดการโก่งตัวของไดอะแฟรมโดยใช้หลักการเชิงแสงด้วยเครื่อง WYKO NT1100

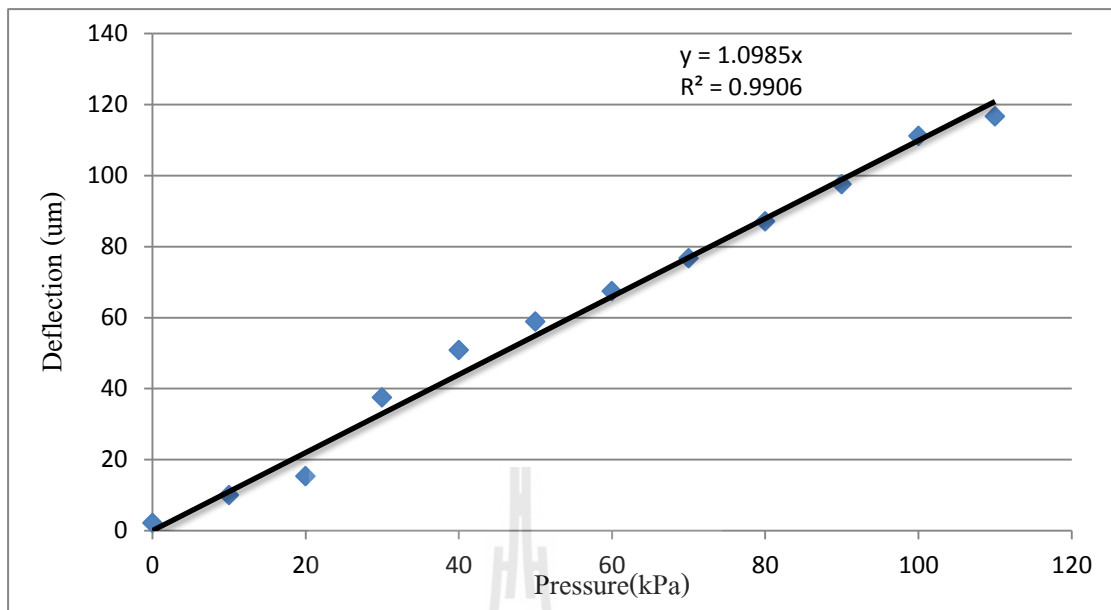
ในการทดสอบได้ทำการป้อนความดัน 0-100 kPa สำหรับไดอะแฟรม PDMS และ 0-500 kPa สำหรับไดอะแฟรม PI วัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม โดยใช้เครื่อง Veeco Optical profiling system รุ่น WYKO NT1100 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความสูงของพื้นผิวโดยใช้หลักการเชิงแสง มีแผนผังการทดสอบดังรูปที่ 4.3 จากนั้นนำค่าระยะการโก่งตัว (w) ที่ได้พล็อตเป็นกราฟเทียบกับความดันเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ การทดสอบค่ายังมอดูลัสของ PDMS และการทดสอบค่ายังมอดูลัสของ PI

4.1.2 การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PDMS

ในส่วนของ PDMS ได้ทำการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่างๆ ซึ่งระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่างๆ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังของวัสดุที่ทำการทดสอบได้ โดยค่าที่คำนวณได้จะใช้ในการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อออกแบบไดอะแฟรมให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับ PDMS ทำการทดสอบที่ความดันตั้งแต่ 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa ไปจนถึง 100 kPa บันทึกผลการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม $w(0)$ ในผลการทดสอบตารางที่ 4.1 และสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางไดอะแฟรม ดังรูป 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัว $w(0)$ ของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (kPa)	ระยะการโก่งตัว $w(0)$ จากการวัด (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 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม จากการทดสอบระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ภายใต้อัตราความดันต่างๆ จากผลของความสัมพันธ์ของความดันและระยะการโก่งตัวมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงในรูป $y = mx + c$ ซึ่ง C มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น สมการความสัมพันธ์คือ $w = mP$ โดยที่ m คือความชันของกราฟ ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการที่ (4.3) จะได้ว่า

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

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

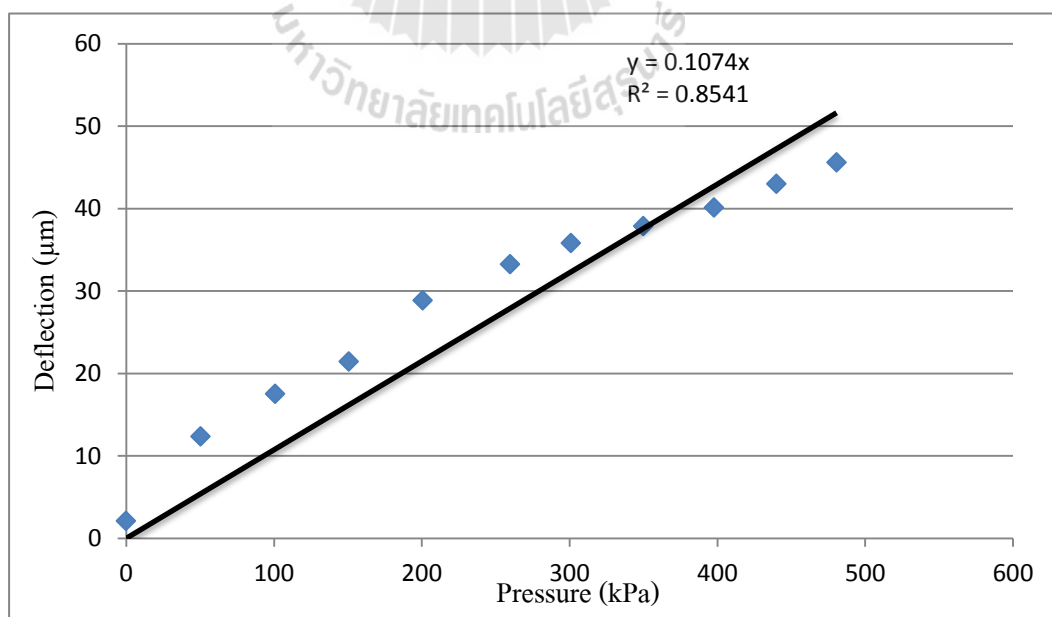
4.1.3 การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PI

ในส่วนของ PI ได้ทำการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่างๆ เช่นเดียวกับ PDMS สำหรับ PI ทำการทดสอบที่ความดันตั้งแต่ 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa ไปจนถึง 500 kPa และบันทึกผลการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม $w(0)$ ในผลการ

ทดสอบตารางที่ 4.2 และสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางไดอะแฟรม ดังรูป 4.5

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (kPa)	ระยะการโก่งตัว $w(0)$ จากการวัด (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 (4.4) 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

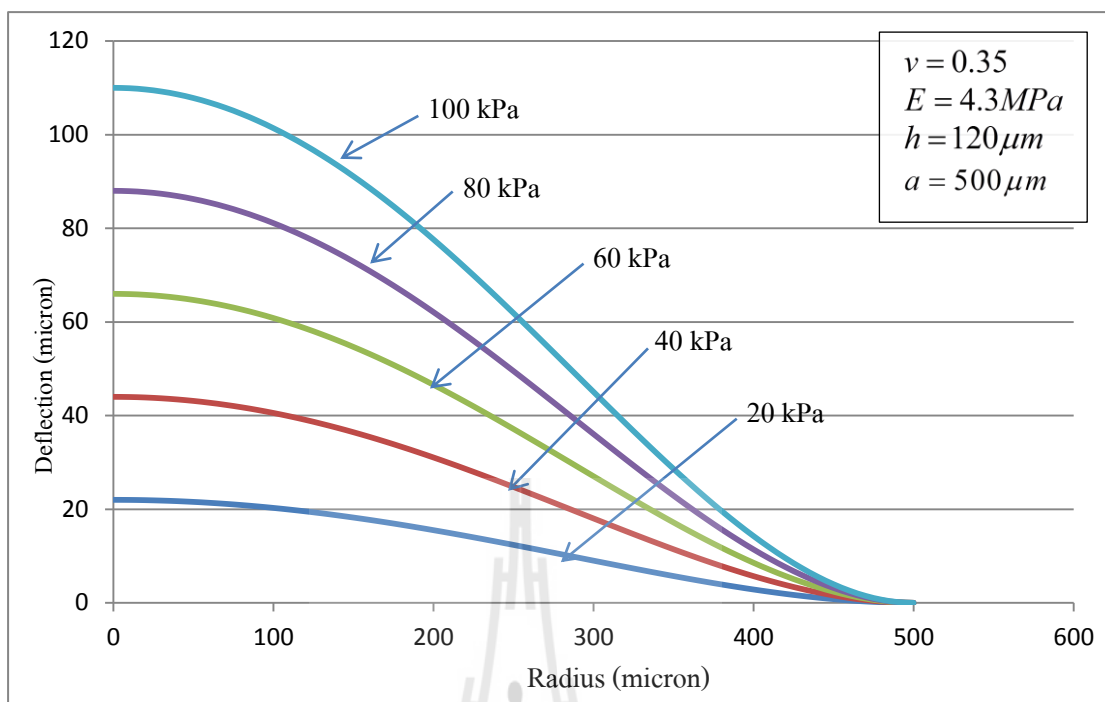
4.1.4 การจำลองการโก่งตัวของไคอะแฟรมในกรณีต่างๆ

การจำลองการโก่งตัวของไคอะแฟรมภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เพื่อศึกษาขนาดของไคอะแฟรมที่เหมาะสม เงื่อนไขแรกจำลองผลการโก่งตัวของไคอะแฟรมเนื่องจากความดันของไคอะแฟรม PDMS และ PI โดยจะกำหนดครีสมิของไคอะแฟรมเท่ากับ $500\mu\text{m}$ ภายใต้การทดสอบความดันตั้งแต่ 10 -150 kPa ความหนาของไคอะแฟรม PI เท่ากับ $25\mu\text{m}$ และ PDMS เท่ากับ $120\mu\text{m}$ คำนวณตามสมการที่ (4.3) ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

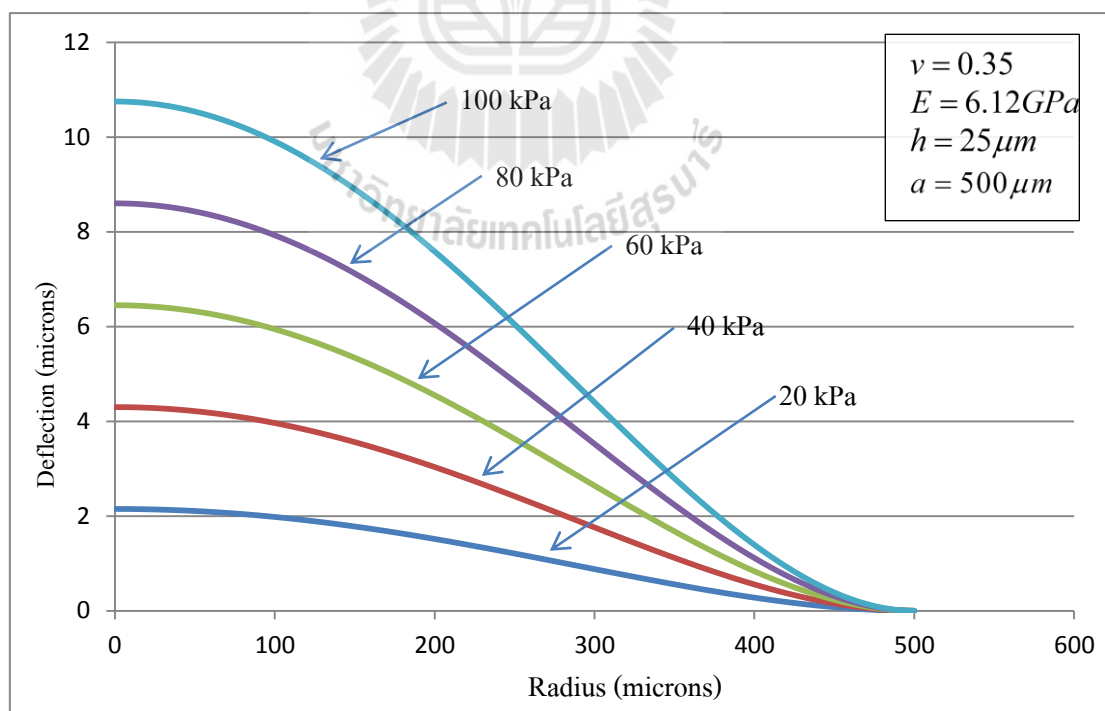
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไคอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

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)	ระยะการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลาง $w(0)$ ของไคอะแฟรม (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 ที่ความดันต่างๆ

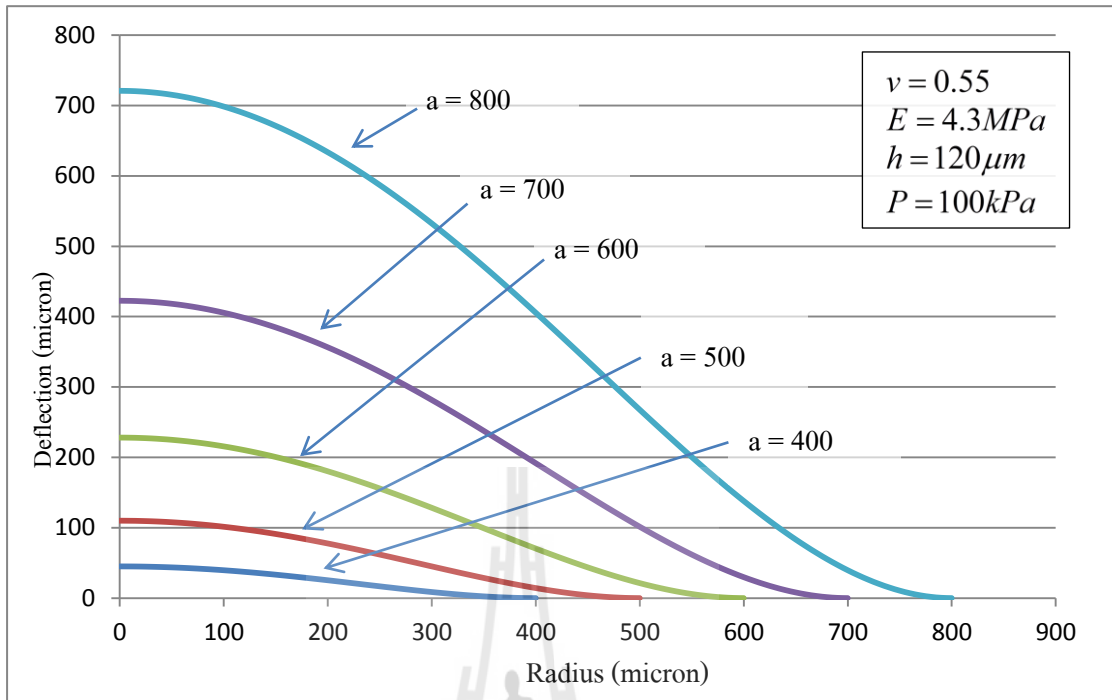


รูปที่ 4.7 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ

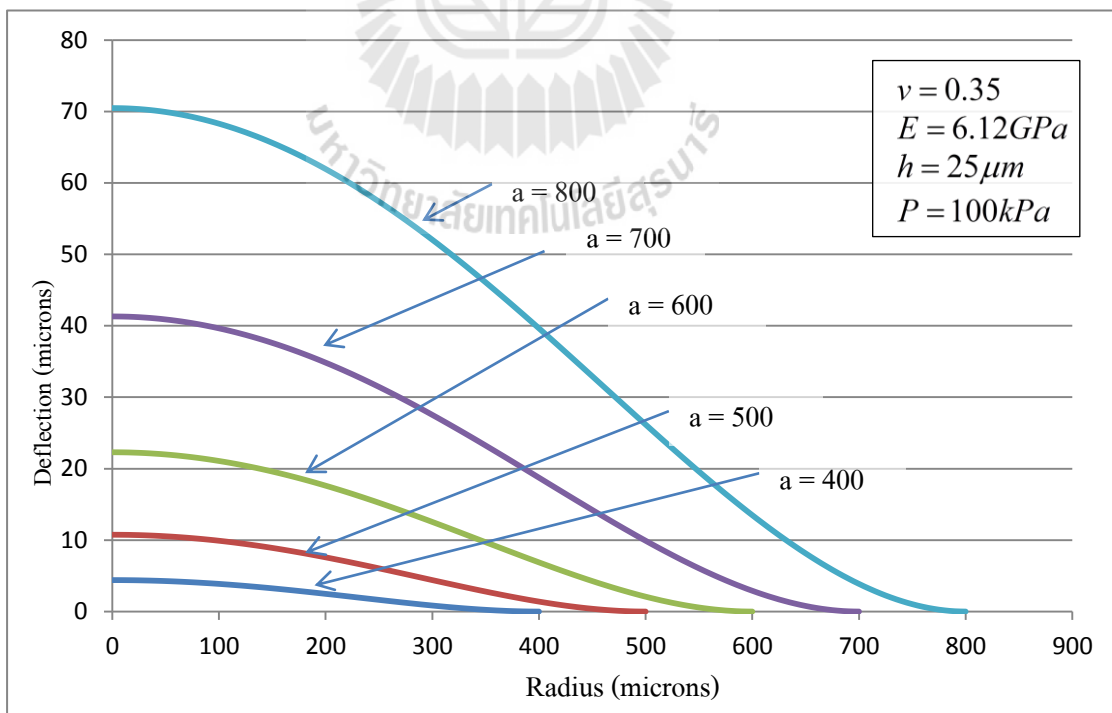
จากผลการจำลองระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมของวัสดุทั้งสองชนิดเมื่อความดันเพิ่มขึ้น พบว่าไดอะแฟรมมีการโค้งตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน และระยะการโค้งตัวจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม และลดลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง นอกจากความดันที่มีผลต่อระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมแล้วขนาดรัศมีของไดอะแฟรม (a) ก็มีผลต่อระยะการโค้งตัวเช่นเดียวกัน ในการจำลองผลของของการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่รัศมีต่างๆ 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 จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า ไดอะแฟรม PDMS มีระยะการโค้งตัวมากกว่า PI ถึง 10 เท่า เนื่องจากค่ามอดูลัสของยังของ PDMS มีค่ามากกว่า PI นั่นเอง ดังนั้นการสร้างไดอะแฟรมที่เป็น PDMS จึงเหมาะกับการวัดความดันในย่านที่ต่ำกว่า และ PI เหมาะกับการวัดในย่านความดันสูง

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองระยะโค้งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีต่างกัน

รัศมีไดอะแฟรม (μm)	ระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม (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 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะเฟรม PDMS ซึ่งมีรัศมีขนาดต่างๆ

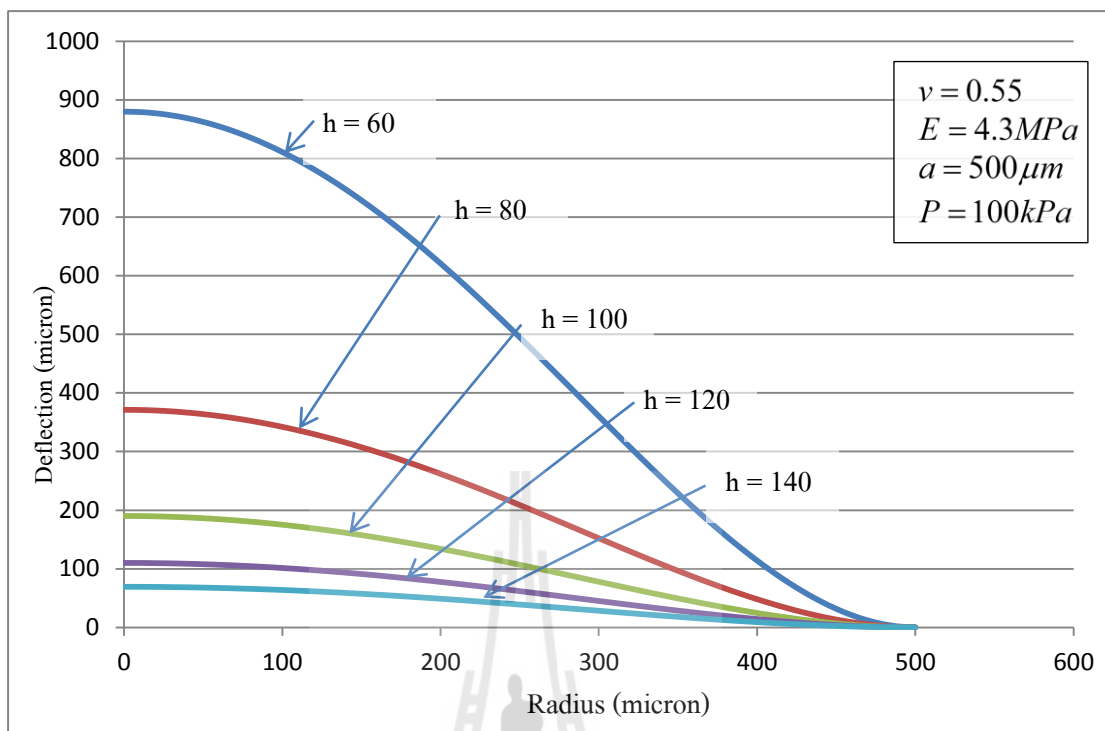


รูปที่ 4.9 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะเฟรม PI ซึ่งมีรัศมีขนาดต่างๆ

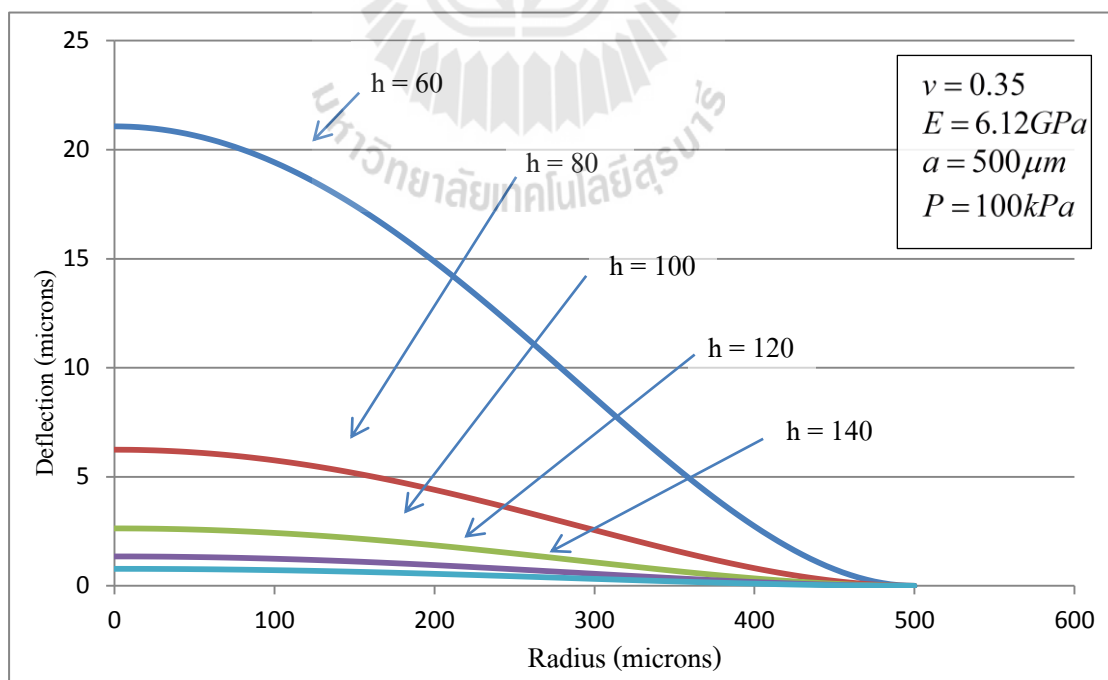
จากผลการจำลองพบว่าที่ความดันเดียวกัน ไคอะแพรมที่มีรัศมีมากกว่า จะมีระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางมากกว่าไคอะแพรมที่มีรัศมีน้อย และตัวแปรอีกตัวที่มีผลต่อระยะการโค้งตัวของไคอะแพรมคือ ความหนาของไคอะแพรม ในส่วนของการจำลองผลของของการโค้งตัวของไคอะแพรมที่ความหนาต่างๆ โดยในการจำลองจะกำหนดความดัน 100 kPa ความหนาของไคอะแพรม PI เท่ากับ 25 μm และ PDMS เท่ากับ 120 μm ทำการคำนวณตามสมการที่ (4.3) ได้ดังตารางที่ 4.5 และกราฟดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระยะโค้งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไคอะแพรมเมื่อความหนาไคอะแพรมต่างกัน

ความหนาไคอะแพรม (μm)	ระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไคอะแพรม (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 ซึ่งมีความหนาต่างๆ



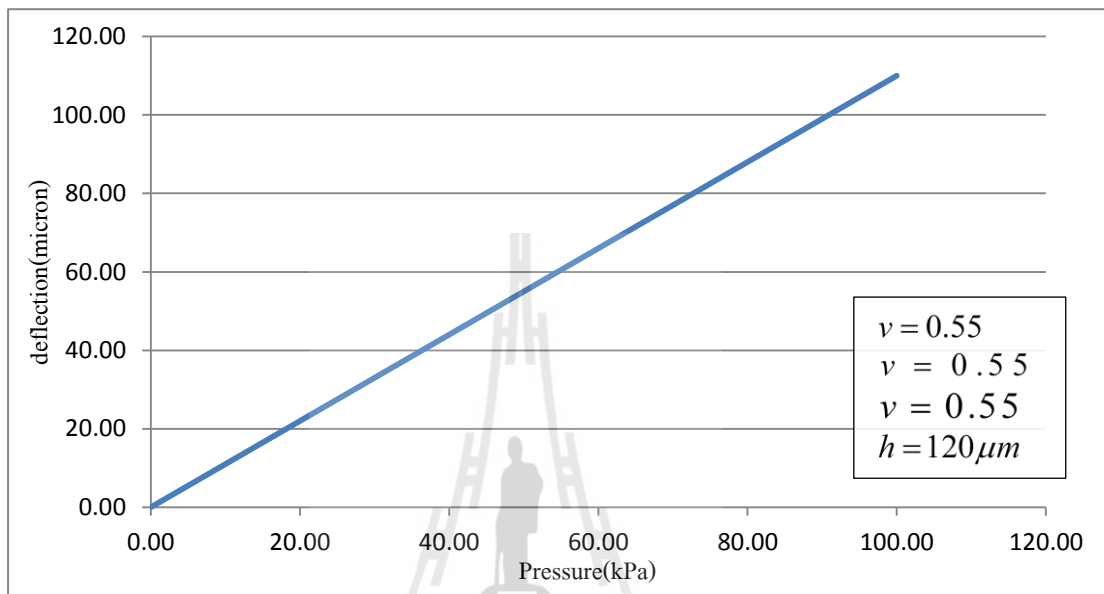
รูปที่ 4.11 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีความหนาต่างๆ

จากการจำลองผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระยะเวลา โกงตัวของไดอะแฟรมซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความไวของตัวตรวจวัดที่สามารถสรุปได้ดังนี้ ผลของความดันที่มีผลต่อระยะเวลา โกงตัวของไดอะแฟรมของวัสดุทั้งสองชนิด พบว่า ไดอะแฟรมที่เป็น PDMS จากการจำลองเลือกความหนาที่ 120 μm ซึ่งความหนานอกเหนือจากนี้จะมีข้อจำกัดในกระบวนการสร้าง สำหรับ PDMS มีระยะเวลา โกงตัวค่อนข้างมาก เนื่องจากค่ามอดูลัสของยังมีค่าน้อย จึงเหมาะกับการตรวจวัดความดันในย่านต่ำๆ ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น PI จากการจำลองเลือกความหนาที่ความหนา 25 μm ซึ่งเป็นความหนาที่มีขายตามท้องตลาด สำหรับ PI มีระยะเวลา โกงตัวค่อนข้างน้อยมาก จึงเหมาะกับการวัดความดันในย่านสูงๆ ในส่วนของการจำลองความยาวรัศมีที่มีผลต่อระยะเวลา โกงตัวของไดอะแฟรม จากกราฟพบว่า ไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีมากกว่า จะมีระยะเวลา โกงตัวมากกว่าไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีน้อย และการจำลองความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อระยะเวลา โกงตัวของไดอะแฟรม พบว่าไดอะแฟรมที่มีความหนามาก จะมีระยะเวลา โกงตัวน้อยกว่าไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อย

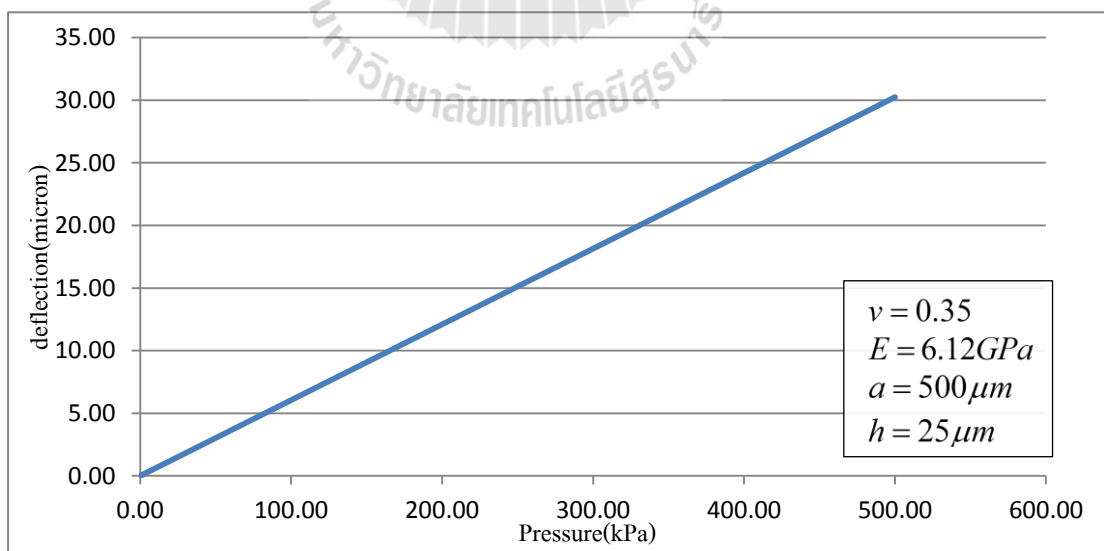
จากผลการจำลอง ได้ค่าความหนาของไดอะแฟรม และ ระยะห่างรัศมี ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบไดอะแฟรม โดยไดอะแฟรม PDMS จะเลือกความหนาที่ 120 μm เนื่องจากเป็นความหนาที่เหมาะสม มีระยะเวลา โกงตัวมากพอประมาณ และถ้าออกแบบให้มีความหนาน้อยกว่านี้อาจจะเกิดความเสียหายต่อไดอะแฟรมได้เนื่องจากคุณสมบัติของ PDMS ที่มีความอ่อนตัวสูง ส่วน PI จะเลือกความหนาที่ 25 μm เนื่องจากมีความหนาที่เหมาะสม มีระยะเวลา โกงตัวมากพอสำหรับการออกแบบตัวเก็บประจุในหัวข้อถัดไป ถ้าใช้หนามากกว่านี้ระยะเวลา โกงตัวจะน้อย จะส่งผลให้ตรวจวัดความดันในย่านต่ำไม่ได้ และ PI ในอุตสาหกรรมมีราคาต่ำ มีขนาดความหนาต่างๆ เช่น 25 μm 60 μm และ 120 μm ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดที่มีขายในท้องตลาด ในส่วนของความยาวรัศมีของไดอะแฟรม โดยไดอะแฟรมที่ทำจากวัสดุทั้งสองชนิด ได้เลือกขนาดความยาวรัศมีเท่ากันที่ 500 μm หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เนื่องจากเป็นระยะที่การโกงตัวของวัสดุทั้งสองชนิดมีความเหมาะสมที่สุดคือ PDMS มีระยะเวลา โกงตัวอยู่ในย่านที่ สามารถออกแบบตัวเก็บประจุได้และ PI มีระยะเวลา โกงตัวเหมาะสำหรับการออกแบบตัวเก็บประจุโดยโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ใช้กับไดอะแฟรมทั้งสองชนิดเป็นโครงสร้างเดียวกัน และเพื่อที่สามารถสร้างตัวตรวจวัดที่ทำงานในย่านต่างกันจากการใช้วัสดุแตกต่างกัน ภายใต้ออกแบบด้วยกระบวนการเดียวกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงต้องออกแบบให้ตัวตรวจวัด ทั้งสองชนิดมีความยาวรัศมีเท่ากัน เพื่อเป็นการลดเวลาในการสร้างและประหยัดงบประมาณในการสร้างอีกด้วย

เมื่อทำการจำลองและออกแบบไดอะแฟรมแล้วในหัวข้อต่อไปจะเป็นการออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่นำมาติดตั้งบนไดอะแฟรม ในขั้นต้นสามารถจำลองผลการโกงตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรมที่มีความดันต่างๆ โดยกำหนดค่าของตัวแปรที่ได้จากการออกแบบ สำหรับ

ไดอะแฟรม PI กำหนด $\nu = 0.35$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $E = 6.12\text{GPa}$ ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.12 ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น PDMS จะกำหนด $\nu = 0.55$ $h = 100\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $E = 4.30\text{MPa}$ ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.13



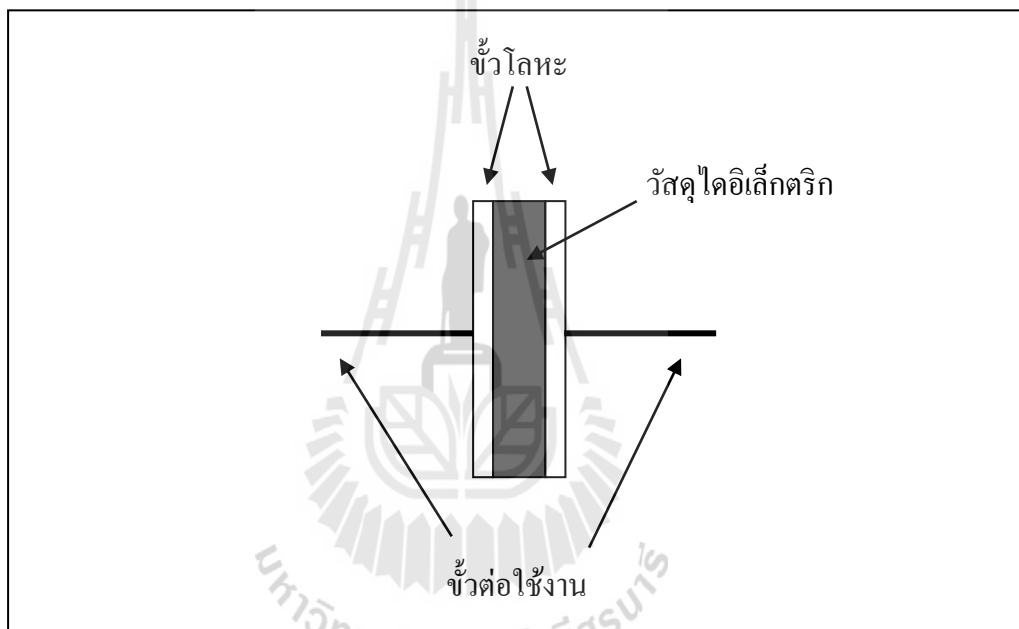
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ

4.2 การออกแบบโครงสร้างและการสร้างตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น โดยมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันแต่มีชนิดของขั้วตรงข้ามกัน ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และพบได้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทบทุกวงจร ในส่วนของโครงสร้างของตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันและคั่นด้วยวัสดุ ไดอิเล็กตริก (dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ ไมก้า เซรามิก หรืออากาศ โครงสร้างของตัวเก็บประจุมีลักษณะดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บ

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 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศอากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

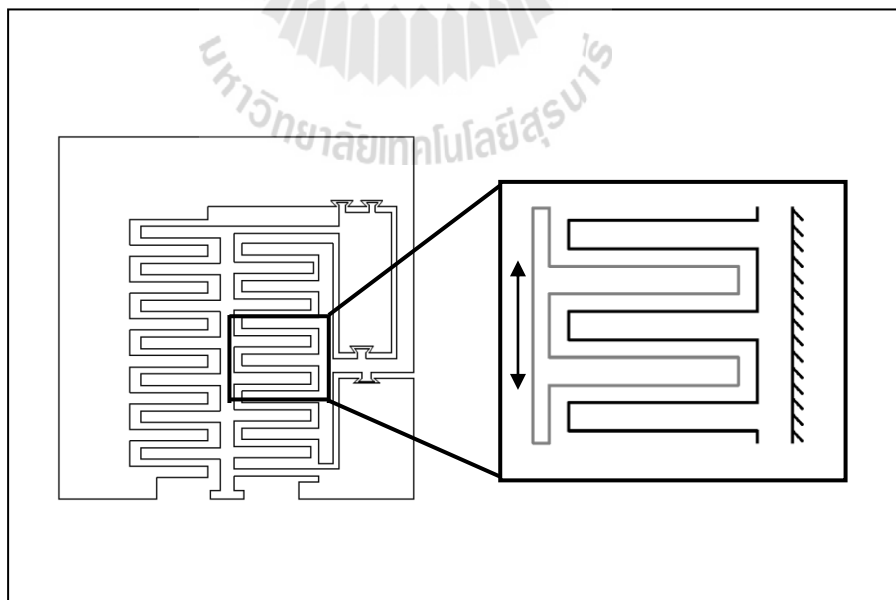
ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ขนานกัน

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน

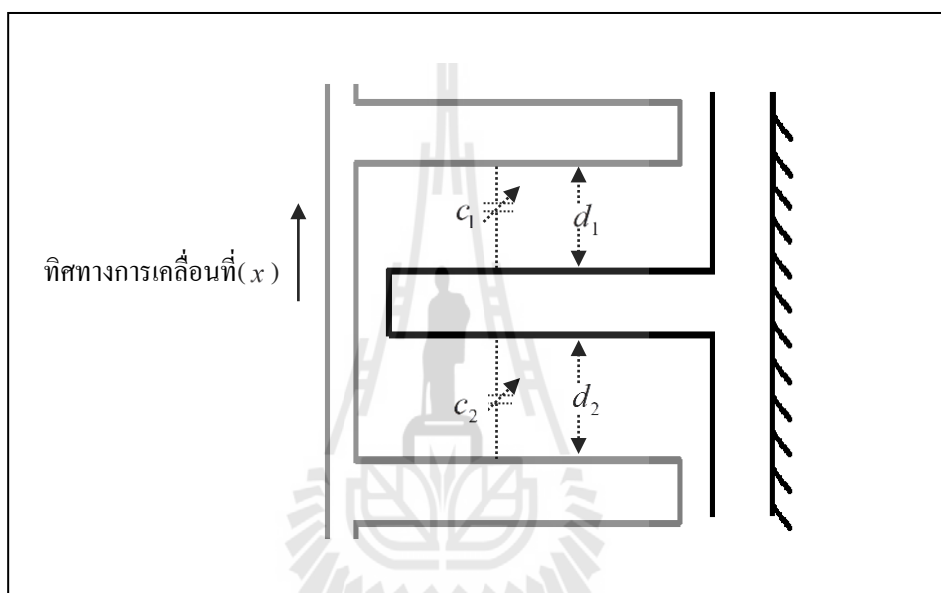
จากสมการที่ (4.10) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุไดอิเล็กตริก พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ขนานกัน และ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน จากหัวข้อที่แล้วได้ทำการจำลองผลการโค้งตัวของไดอะแฟรม ต่อมาจะทำการออกแบบตัวเก็บประจุแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ เพื่อติดตั้งบนไดอะแฟรม ในส่วนของการออกแบบตัวเก็บประจุแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ จากสมการที่ (4.10) ตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าโดยมีความสัมพันธ์กันระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีผลมากที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน (d) โดยมีพื้นที่ของขั้วโลหะเป็นค่าคงที่ และมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

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



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของตัวเก็บประจุปรับเปลี่ยนค่าได้สำหรับตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

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 ในกรณีที่ไม่มีมีการเคลื่อนที่ระยะห่าง d_1 จะเท่ากับ d_2 ซึ่งได้ออกแบบให้มีขนาด $60 \mu\text{m}$ 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 w แทนระยะการเคลื่อนที่ของแกนตัวเก็บประจุ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d_1 และ d_2 โดยตรงคือ

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

ดังนั้น

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

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

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

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

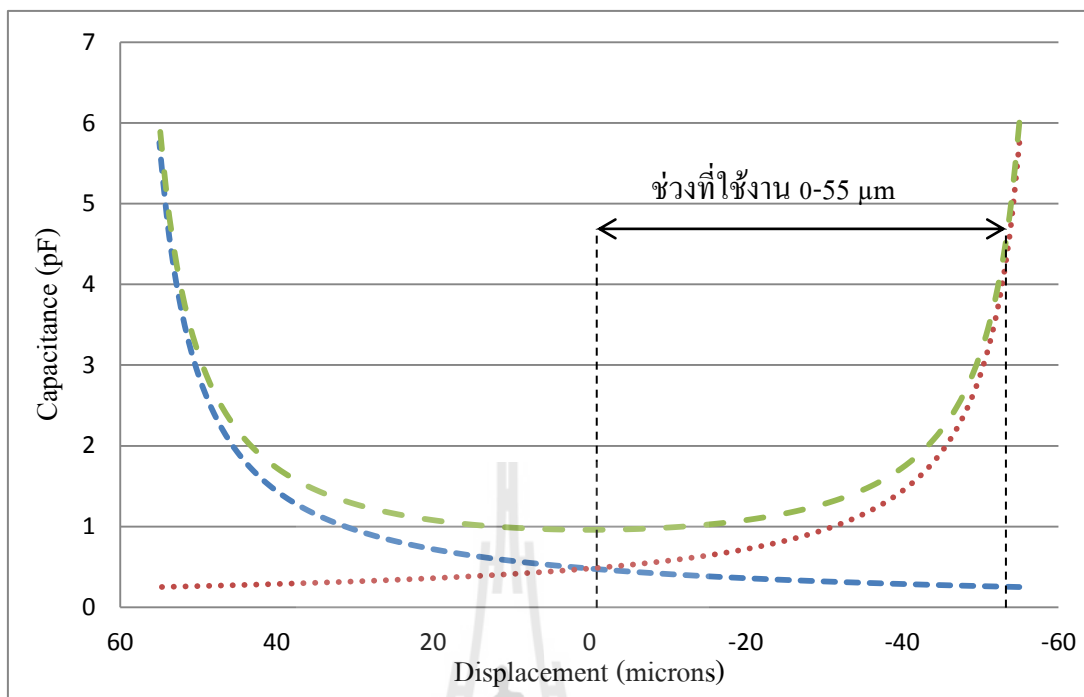
ในการออกแบบมีตัวเก็บประจุ c_1 ทั้งหมด 13 ตัว และตัวเก็บประจุ c_2 ทั้งหมด 13 ตัว ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดได้จากสมการที่ (4.15)

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

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

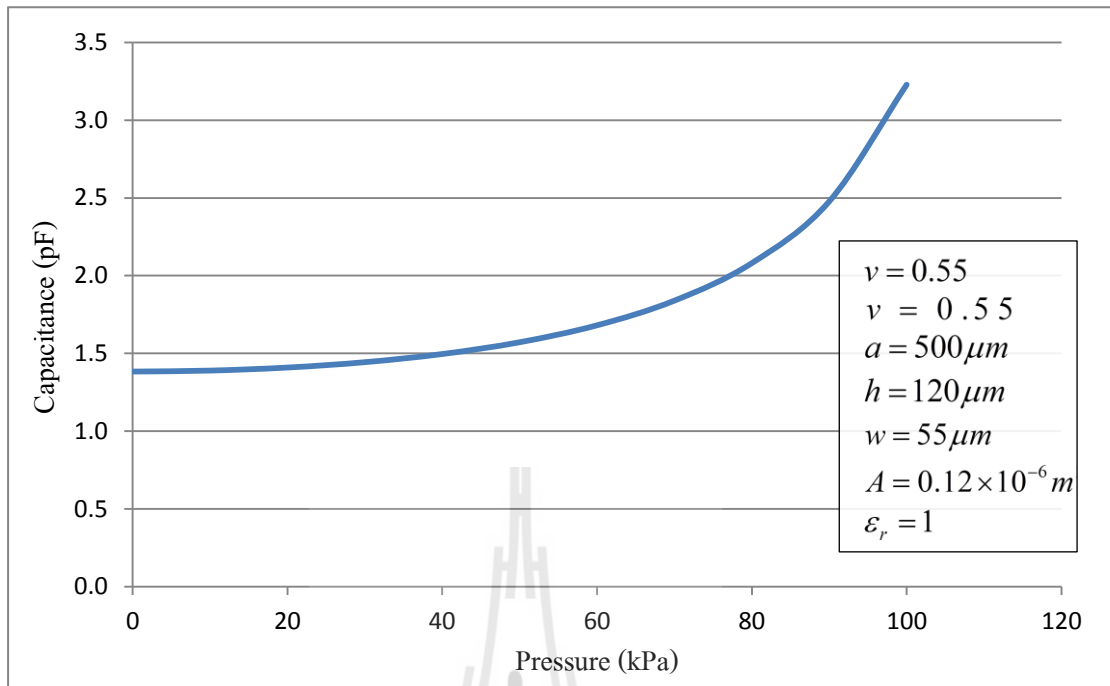
ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะห่าง w ต่างๆ โดยใช้สมการที่ (4.20)

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

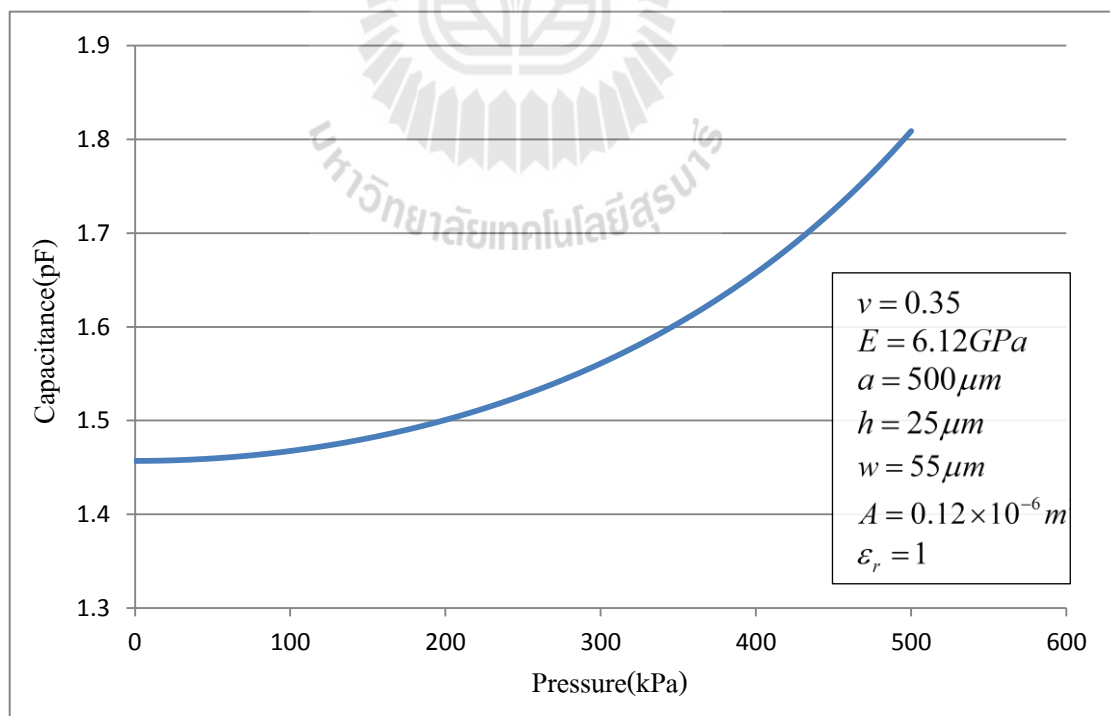


รูปที่ 4.17 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุกับค่าความจุไฟฟ้า ในรูปที่ 4.18 จากการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ 0 - 55 μm พบว่าเมื่อนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ออกแบบไปติดตั้งบนไดอะแฟรม ระยะการเคลื่อนที่ของแกนตัวเก็บประจุ จะขึ้นกับระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (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

จากการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าภายใต้ความดันต่างๆของไดอะแฟรมทั้งสองชนิด 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 % เนื่องจากตัวตรวจรู้ที่มีไดอะแฟรม PDMS มีการโก่งตัวมากกว่าจึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่าไดอะแฟรม PI แต่ค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นของทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าดังกล่าวของตัวตรวจรู้ไดอะแฟรม PDMS จึงมีค่ามากกว่า PI

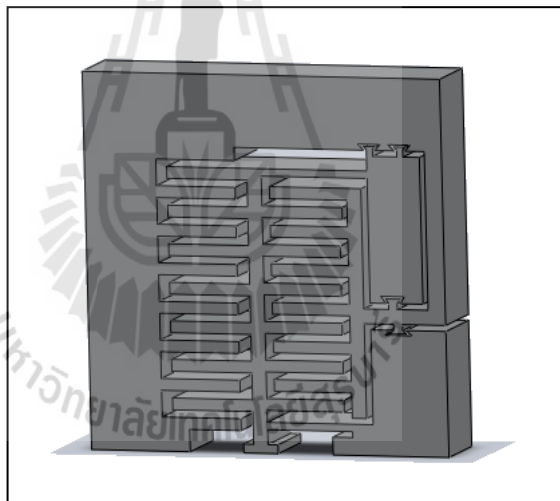
4.3 สรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน ในขั้นแรกได้ทำการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังโดยการติดตั้งไดอะแฟรมบนช่องเปิด จากนั้นทดสอบการโก่งตัวโดยการป้อนความดันต่างๆและวัดระยะการโก่งตัว คำนวณค่ามอดูลัสของยังโดยใช้สมการที่ (4.3) เมื่อได้ค่ามอดูลัสของยังแล้วต่อไปจะเริ่มจากการออกแบบขนาดของไดอะแฟรมทั้งสองชนิด โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไดอะแฟรม 1 mm ความหนาของไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 120 μm ความหนาของไดอะแฟรม PI เท่ากับ 25 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 สร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างก่อนที่จะทำการสร้างจริง ซึ่งผลการจำลองโครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 5.1 โดยส่วนของโครงสร้างจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนซึ่งเป็นขั้วของตัวเก็บประจุโดยจะไม่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า โดยจะใช้สารไวแสง SU8-2100 ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าในการยึดให้โครงสร้างนำไฟฟ้าทั้งสองส่วนติดกัน

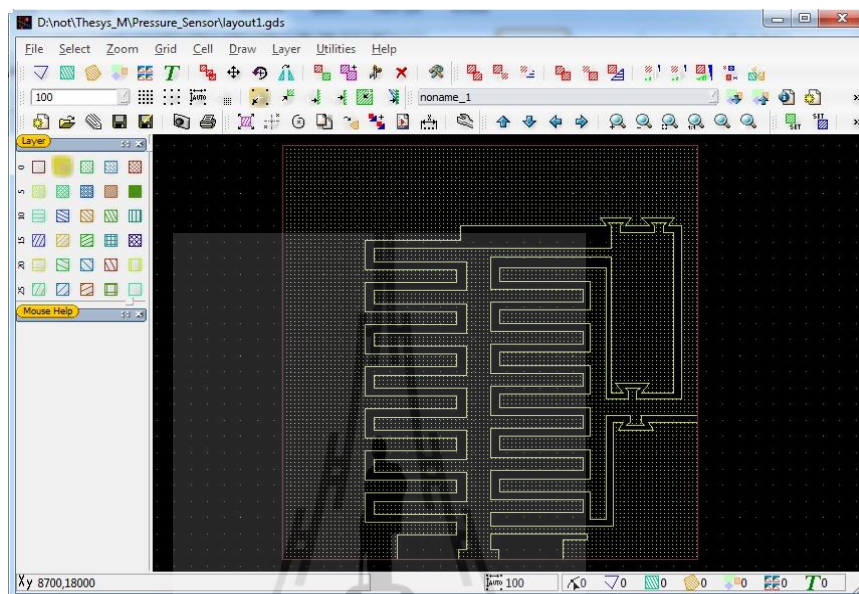


รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของตัวเก็บประจุ

5.1 การวาดลวดลายจุลภาค

การวาดลวดลายของโครงสร้างจุลภาคเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างโครงสร้าง สักส่วนสูงด้วยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ในการวาดลวดลายขนาดเล็กสำหรับกระบวนการดังกล่าว สามารถออกแบบได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อว่า Layout editor ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถออกแบบลวดลายขนาดเล็กระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งมีหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 5.2 เมื่อทำการวาดลวดลายเสร็จสิ้น จากนั้นจะทำการแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์โพสคริป

(Postscript : ps) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LinkCAD เพื่อทำการพิมพ์ลวดลายที่ออกแบบลงบนแผ่นฟิล์ม เพื่อใช้เป็นหน้ากากกันแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะมีส่วนที่โปร่งแสง และส่วนที่ทึบแสง ซึ่งจะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ต่อไป



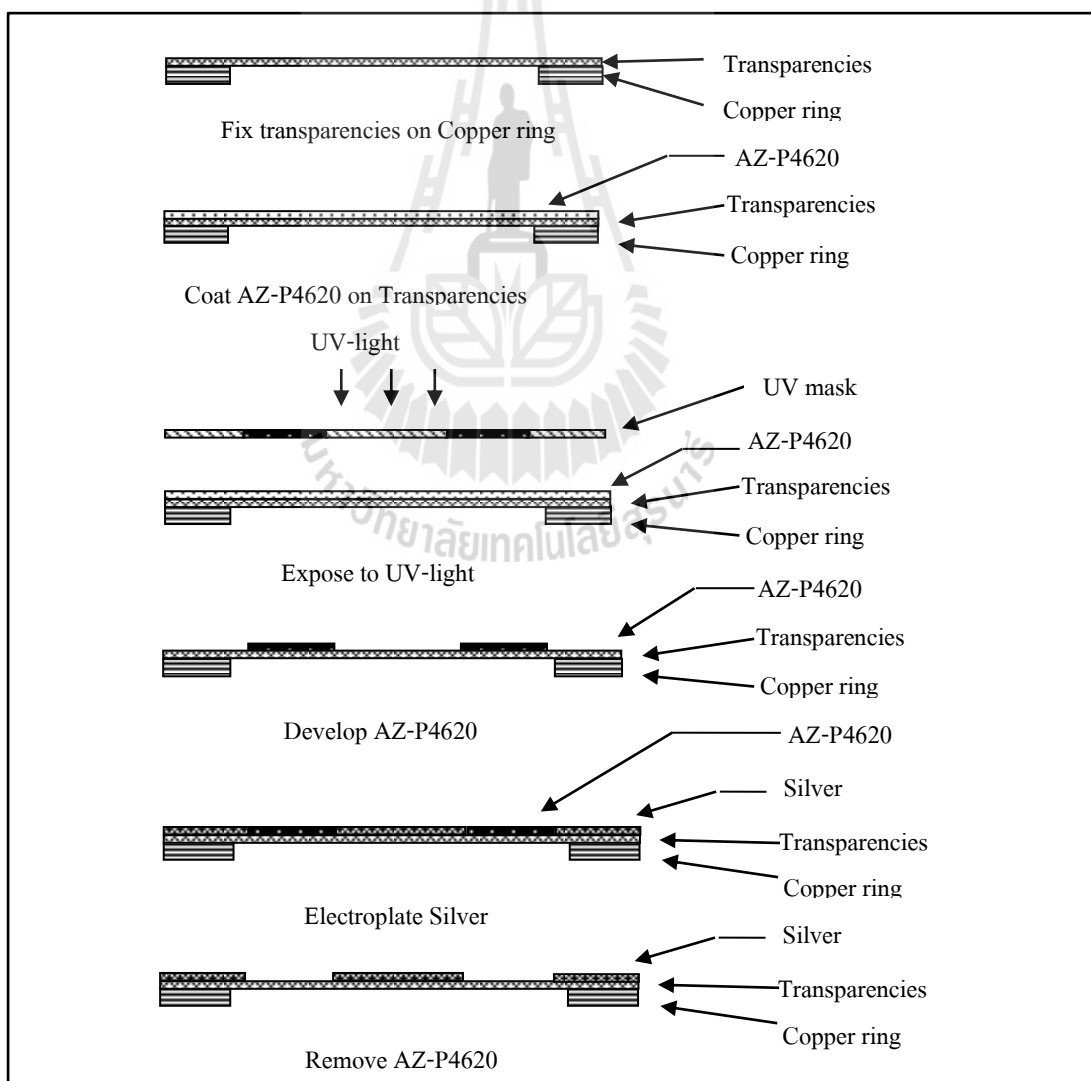
รูปที่ 5.2 หน้าต่างโปรแกรม Layout editor สำหรับวาดลวดลายจุลภาค



รูปที่ 5.3 หน้ากากลวดลายทึบแสงสำหรับกันแสงอัลตราไวโอเล็ต

5.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน

หน้ากากกันรังสีเอกซ์มีความสำคัญในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างที่สร้างด้วยกระบวนการนี้ จะต้องทำการฉายแสงเอกซเรย์บนชิ้นงาน โดยมีหน้ากากกันรังสีเอกซ์เป็นตัวดูดซับแสงเอกซเรย์ในบริเวณที่ไม่ต้องการใช้ชิ้นงานถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ หน้ากากกันรังสีเอกซ์จะทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอกซ์ เช่น โลหะทองคำ โลหะเงิน ตะกั่ว เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์ ในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ เนื่องจากเป็นโลหะมีราคาถูกกว่าทองคำและสามารถสร้างละลายโลหะเงินด้วยการบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กระบวนการสร้างเป็นดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน

จากรูปที่ 5.4 สามารถอธิบายกระบวนการโดยย่อได้ดังนี้

1. เคลือบโลหะชั้นฐานลงบนพอลิอิมิด์ที่ติดบนวงแหวนทองแดงด้วยโลหะไทเทเนียมและเงินตามลำดับ
2. หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐาน
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้าฉากที่เป็นฟิล์มทึบแสงลงไปบนสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลายบนสารไวแสง แล้วสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงทิ้งไป
4. ชุบโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุคูดัชนีรังสี
5. กัดโลหะชั้นฐานที่เป็นโลหะไทเทเนียมและโลหะเงินทิ้งไป

5.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองพอลิอิมิด์เคลือบโลหะ

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



(ก)



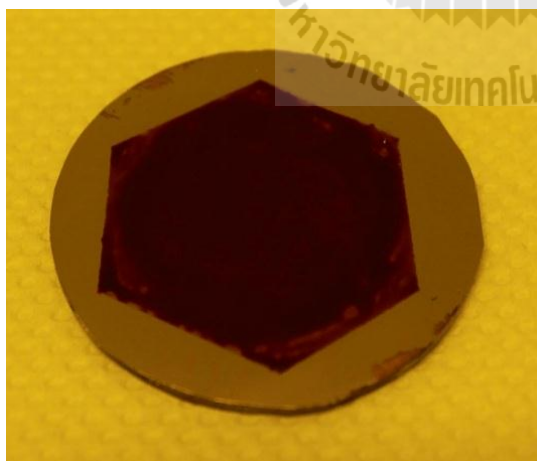
(ข)

รูปที่ 5.5 แผ่นพอลิอิมิด์เคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้าฉากกันรังสีเอกซ์ขนาด 1.5 นิ้ว

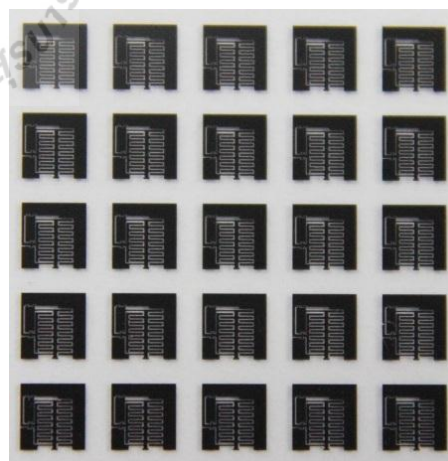
(ก) ก่อนเคลือบโลหะไทเทเนียม/เงิน (ข) หลังเคลือบโลหะไทเทเนียม/เงิน

5.2.2 การเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐานรองและการถ่ายทอดลวดลายลงบนสารไวแสง

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

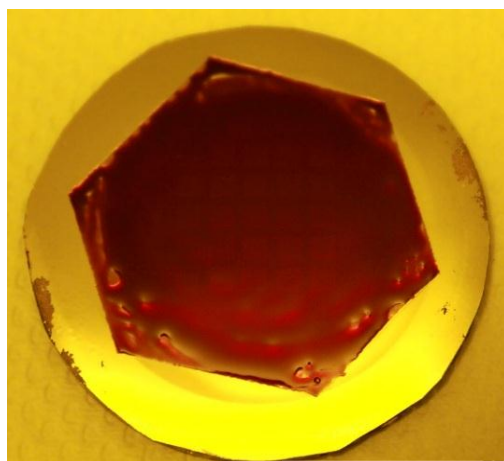


(ก)

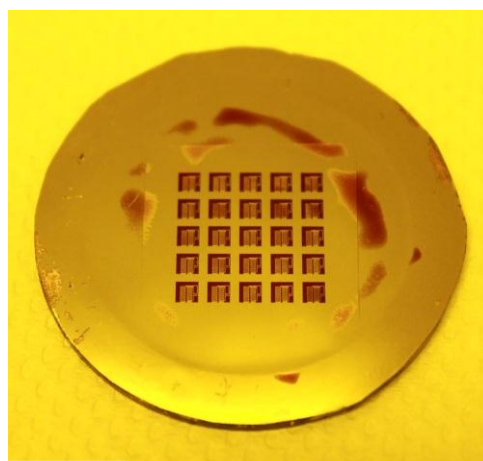


(ข)

รูปที่ 5.6 การเตรียมสารไวแสงและฟิล์มทึบแสงสำหรับสร้างลวดลายบนสารไวแสง (ก) สารไวแสงบนที่เคลือบบนแผ่นใสเคลือบโลหะ (ข) ฟิล์มทึบแสงที่ใช้เป็นแบบถ่ายทอดลวดลาย



(ก)



(ข)

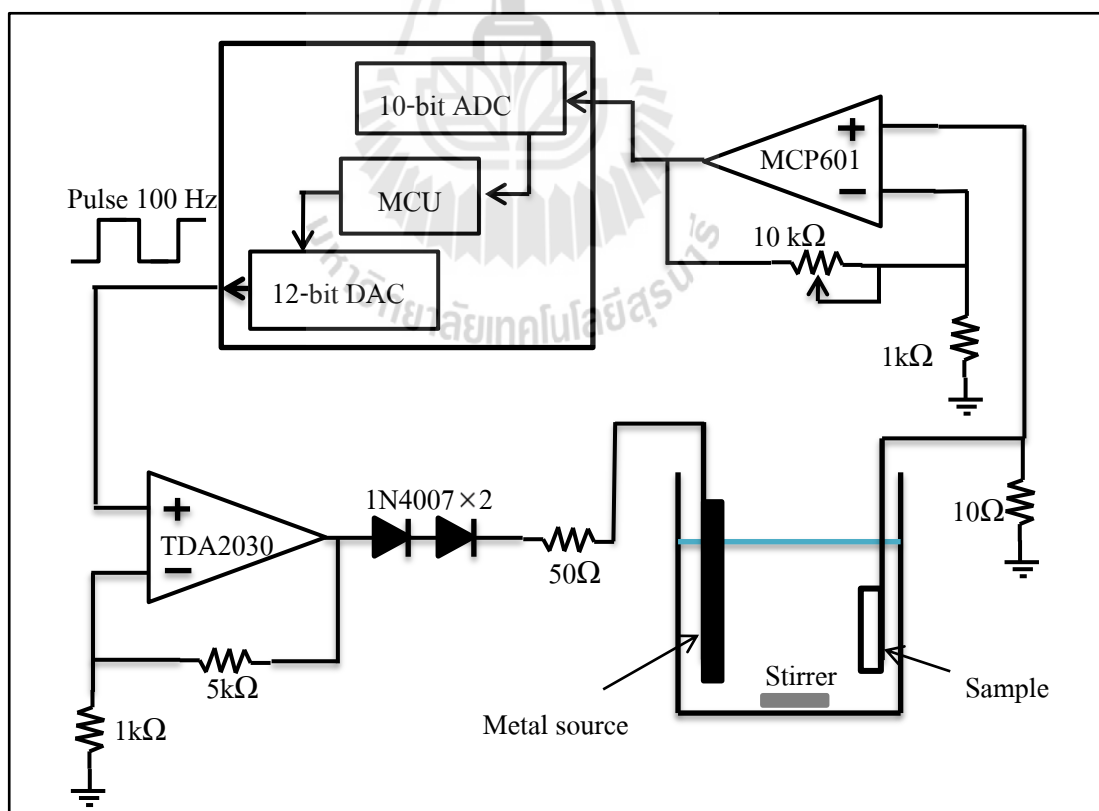
รูปที่ 5.7 การสร้างลวดลายบนสารไวแสงบนแผ่นใสเคลือบโลหะขนาด 1.5 นิ้ว(ก) ฐานรองที่เคลือบสารไวแสง (ข) ฟิล์มที่รับแสงสำหรับกันแสง UV (ค) สารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงUV (ง) ลวดลายสารไวแสงที่ล้างสารไวแสงแล้ว

5.2.3 การสร้างวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์โดยใช้โลหะเงินจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

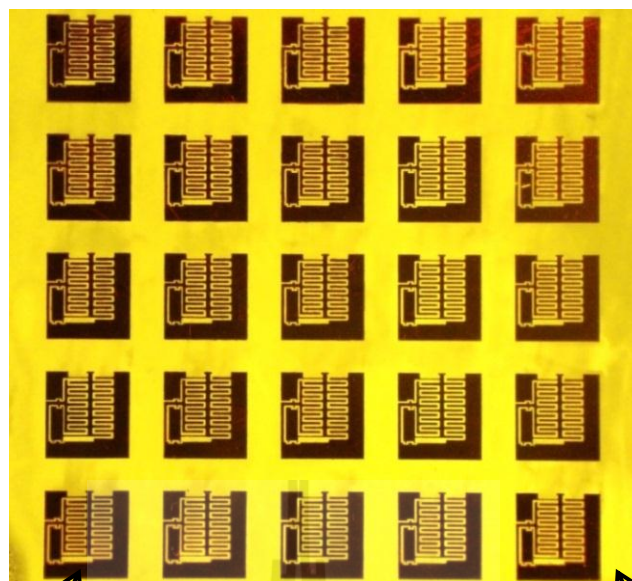
เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟฟีกระบวนการต่อมาคือการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารละลายเงิน (833g KCN:5000ml H₂O:75g K₂CO₃:225g CNAg:3ml Silver Glo 3K make up: 6.5ml Silver Glo 3K TY) ที่เตรียมไว้ในกระบวนการชุบโลหะใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วบวก (Anode) และชิ้นงานที่ต้องการเติมโลหะเป็นขั้วลบ กระแสที่ใช้ในการชุบโลหะนี้จะใช้การจ่ายกระแสแบบพัลส์ (Pulse plating) โดยมีอุปกรณ์ในการชุบโลหะดังรูปที่ 5.8 การชุบโลหะแบบพัลส์นี้จะช่วยให้ผิวของโลหะบริเวณขอบเรียบขึ้น และช่วยลดแรงตึงผิวของโลหะทำให้โอกาสที่โลหะจะหลุดออกจากแผ่นพอลิอิมัลด์ลดลงด้วย วงจรไฟฟ้าในกระบวนการการชุบโลหะแบบพัลส์เป็นดังรูปที่ 5.8 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ 100 Hz Duty cycle 60 % ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (Digital analog converter: DAC) ขนาด 12 บิต ซึ่งสามารถควบคุมกระแสในการชุบโลหะได้โดยการควบคุมแรงดันในช่วงเวลาเปิดของสัญญาณพัลส์ ออกแบบให้ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 – 2.5V จากนั้นป้อนสัญญาณพัลส์ผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier) อัตราขยาย 5 เท่า เนื่องจากสารละลายมีค่าความต้านทานต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย จึงต้องเพิ่มตัวต้านทานอนุกรมเข้าไปในวงจร 50 Ω ซึ่งจะลดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสารละลายที่มีผลต่อกระแสที่ใช้ในการชุบโลหะได้ จากนั้นต่อขั้วบวกของแรงดันที่ผ่านตัวต้านทานเข้ากับขั้วโลหะ

ที่อยู่ในสารละลาย ส่วนขั้วลบต่อกับชิ้นงานที่ต้องการชุบ ซึ่งขั้วลบจะมีตัวต้านทาน $10\ \Omega$ สำหรับวัดค่ากระแสโดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน แรงดันจากตัวต้านทานผ่านวงจะขยายแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่อัตราขยาย 5 เท่า ให้มีแรงดันอยู่ในย่านการวัดด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog digital converter: ADC) ขนาด 10 บิต จำนวนค่ากระแสในการชุบโลหะโดยใช้กฎของโอห์ม 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 เมื่อได้ความหนาแน่นของโลหะเงินตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นทำการชุบโลหะนิเกิล ($\text{NiSO}_4 \cdot \text{NiCl}_2 \cdot \text{H}_3\text{BO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยเท่ากับ $8\ \text{mA}/\text{cm}^2$ ลงบนผิวของโลหะเงินเพื่อป้องกันการกัดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดโลหะชั้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 5.10



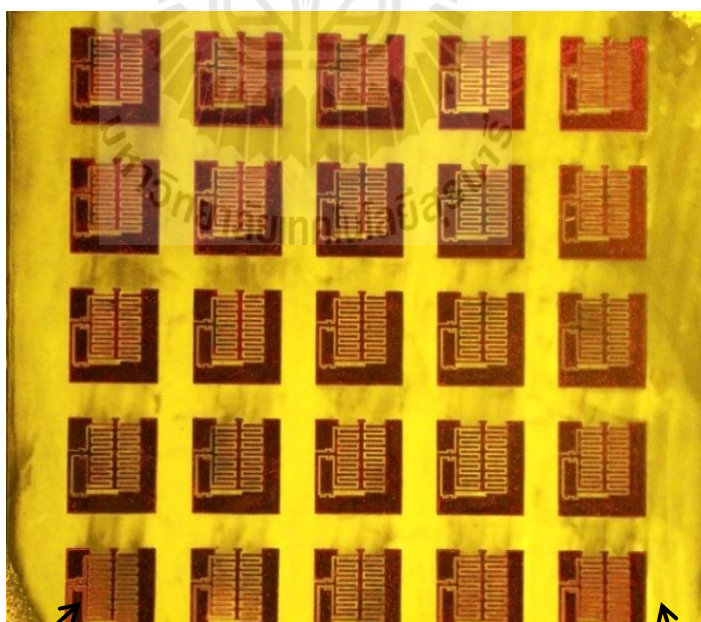
รูปที่ 5.8 วงจรและอุปกรณ์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



AZ mold/plating base/Transparencies

Plated Ag/plating base/Transparencies

รูปที่ 5.9 หน้ากากกันรังสีเอกซ์หลังจากชุบโลหะเงินหนา 20 ไมโครเมตร ลงบน
ฐานรองแผ่นใสที่เคลือบด้วยไทเทเนียม 300 Å และเงิน 500 Å



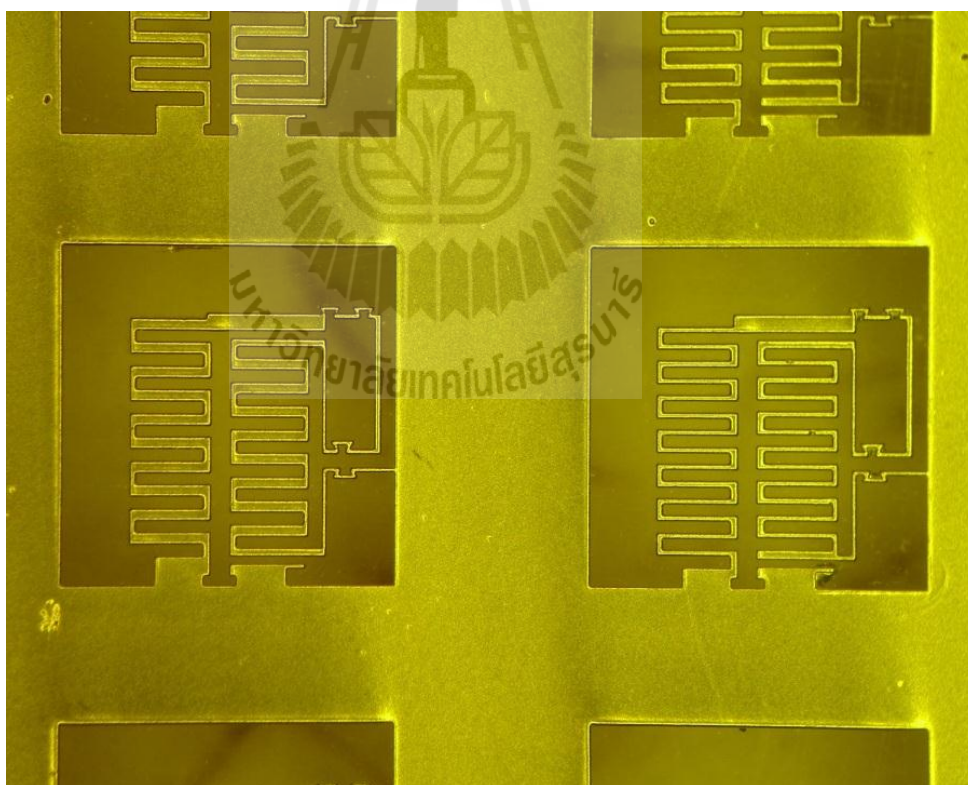
AZ mold/plating base/Transparencies

Ni/Plated Ag/plating base/Transparencies

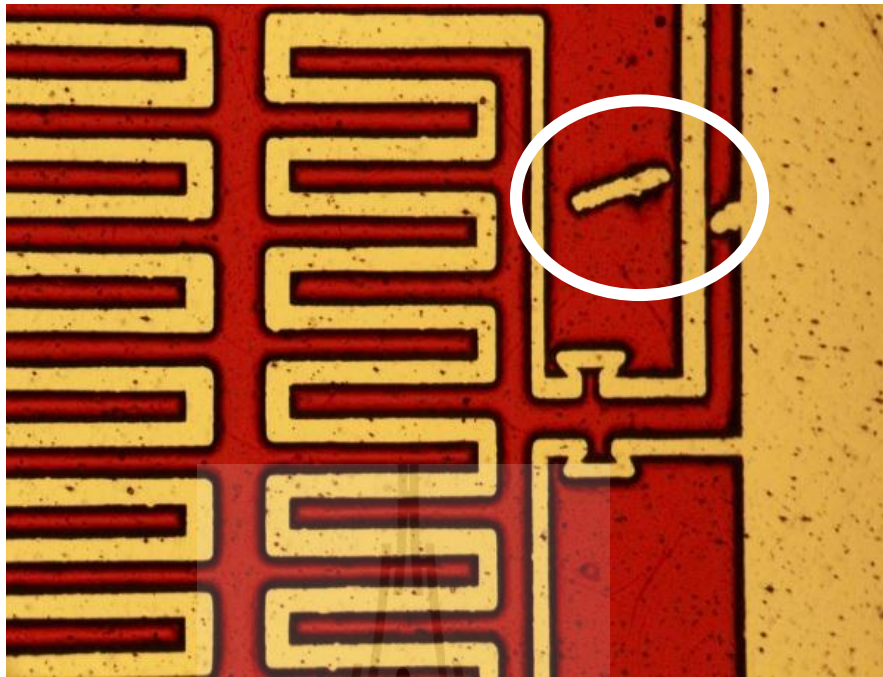
รูปที่ 5.10 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ผ่านการชุบโลหะนิกเกิลบนผิวของโลหะเงิน

5.2.4 การล้างสารไวแสงและกัดโลหะไทเทเนียม/เงินชั้นฐานออก

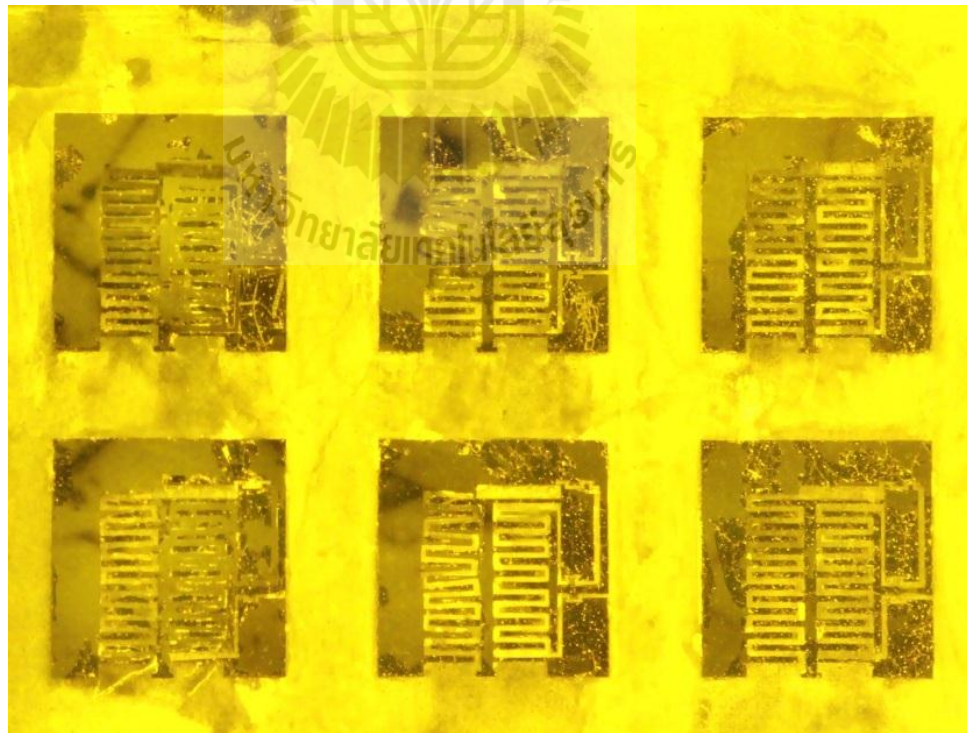
เมื่อทำการชุบโลหะได้ความหนาที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการล้างสารไวแสงออกไปโดยใช้อะซิโตน และล้างด้วยน้ำปอลดไอออน เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นกัดโลหะชั้นฐานทิ้งไป โดยการกัดโลหะเงินที่เป็นชั้นฐานด้านบนก่อนโดยใช้สารละลาย 1ml H_2O_2 :10ml NH_4OH และกัดโลหะไทเทเนียมโดยใช้กรด HF ความเข้มข้น 5% ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำปอลดไอออน จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ดังรูปที่ 5.11 เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ ในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์นี้มีทั้งชิ้นงานที่ใช้ได้และชิ้นงานที่เสียหายตั้งแต่กระบวนการเคลือบสารไวแสงที่มีฟองอากาศเข้าไปในเนื้อสารไวแสง ดังรูปที่ 5.12 ทำให้ไม่สามารถใช้งานในกระบวนการต่อไปได้ ในส่วนของกระบวนการเคลือบโลหะชิ้นงานบางส่วนเสียหายเนื่องจากการโลหะนำไฟฟ้าชั้นฐานยึดเกาะกับพอลิอิมิด์ไม่แน่นจึงทำให้โลหะหลุดออกมาระหว่างกระบวนการชุบดัง รูปที่ 5.13 เป็นต้น



รูปที่ 5.11 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากการล้างสารไวแสงและโลหะเงิน/ไทเทเนียมออกแล้ว



รูปที่ 5.12 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการหมุนเคลือบสารไวแสง

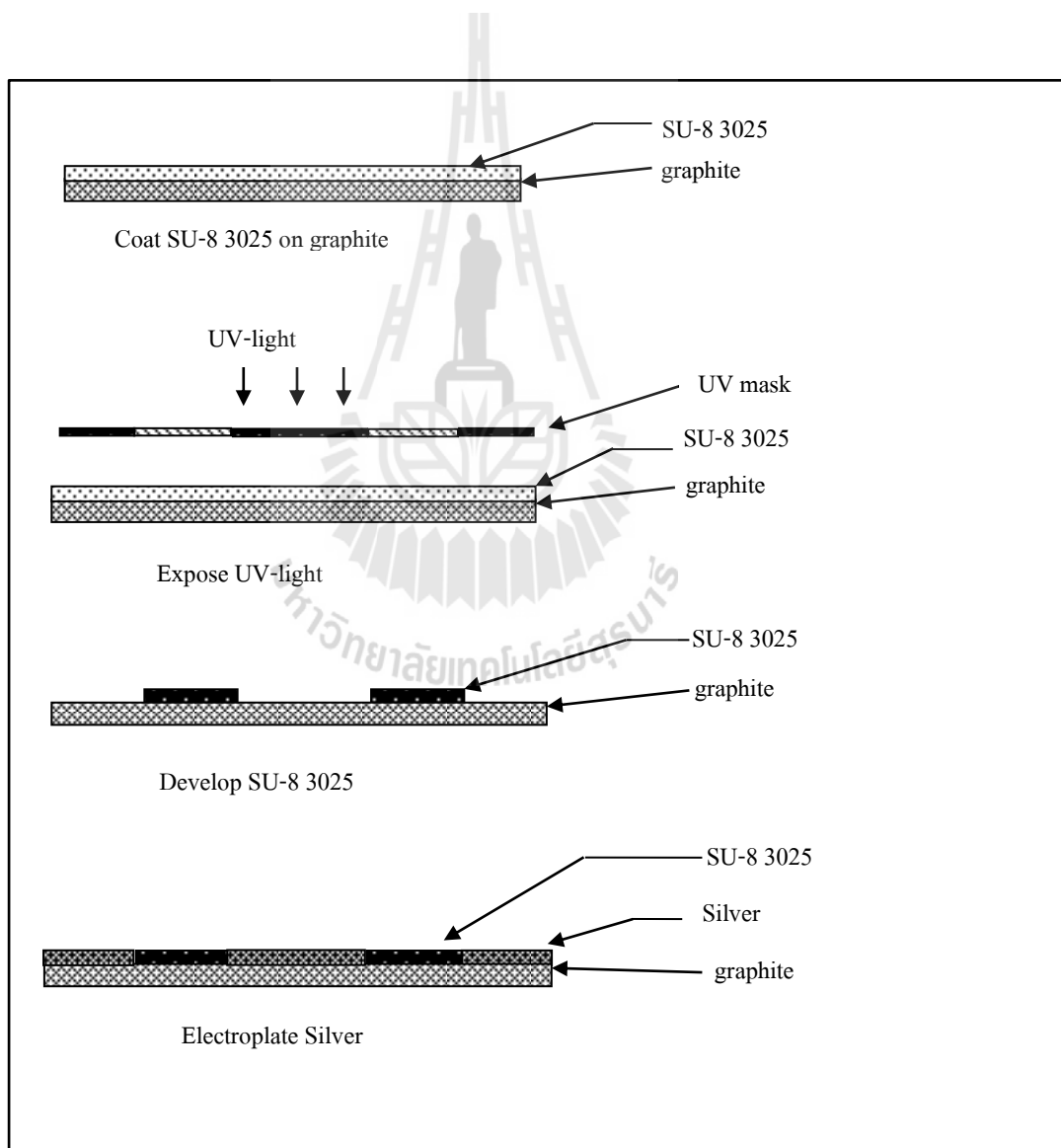


รูปที่ 5.13 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องโลหะชั้นฐานหลุดจากฐานแผ่นใสระหว่างกระบวนการชุบโลหะ

5.3 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน

กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการสร้างคล้ายกับการใช้แผ่นใสเป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 5.14 และมีกระบวนการโดยย่อ ดังนี้

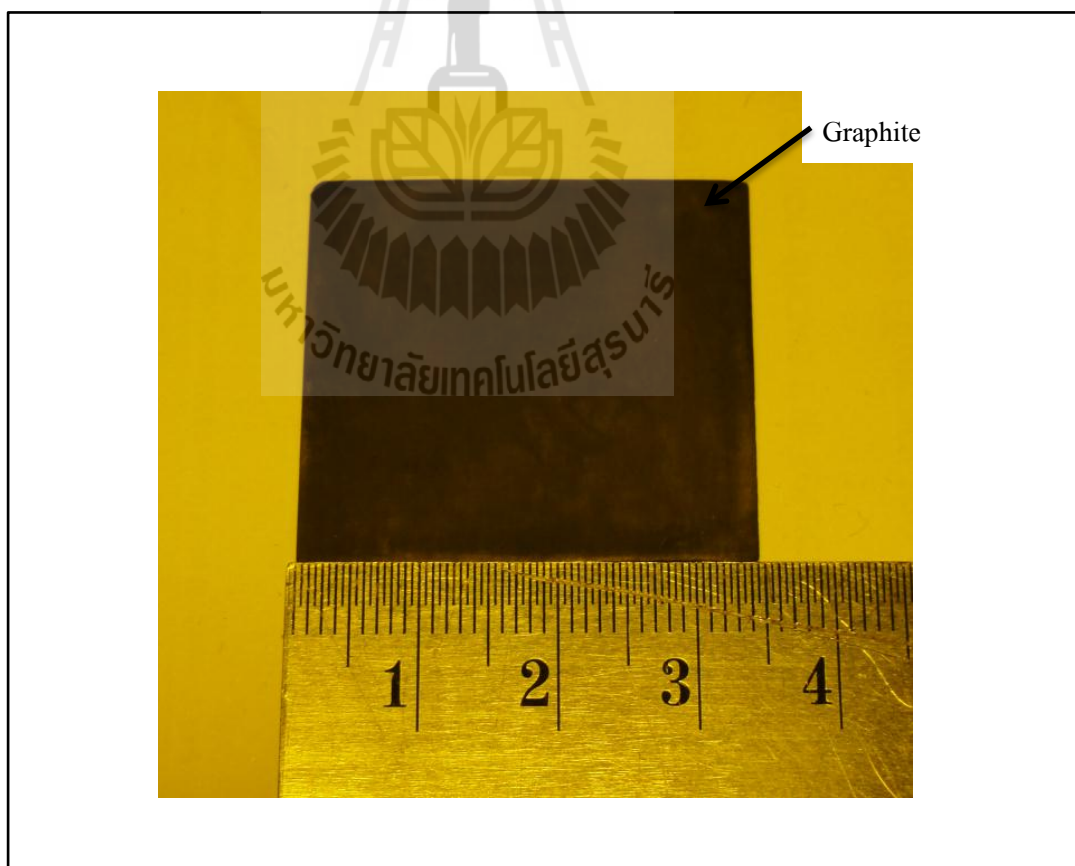
1. ทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์ และ หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 3025
2. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่เป็นฟิล์มทึบแสงลงไปบนสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลายบนสารไวแสง แล้วสารสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงทิ้งไป
3. ชุบโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุดูดซับรังสี



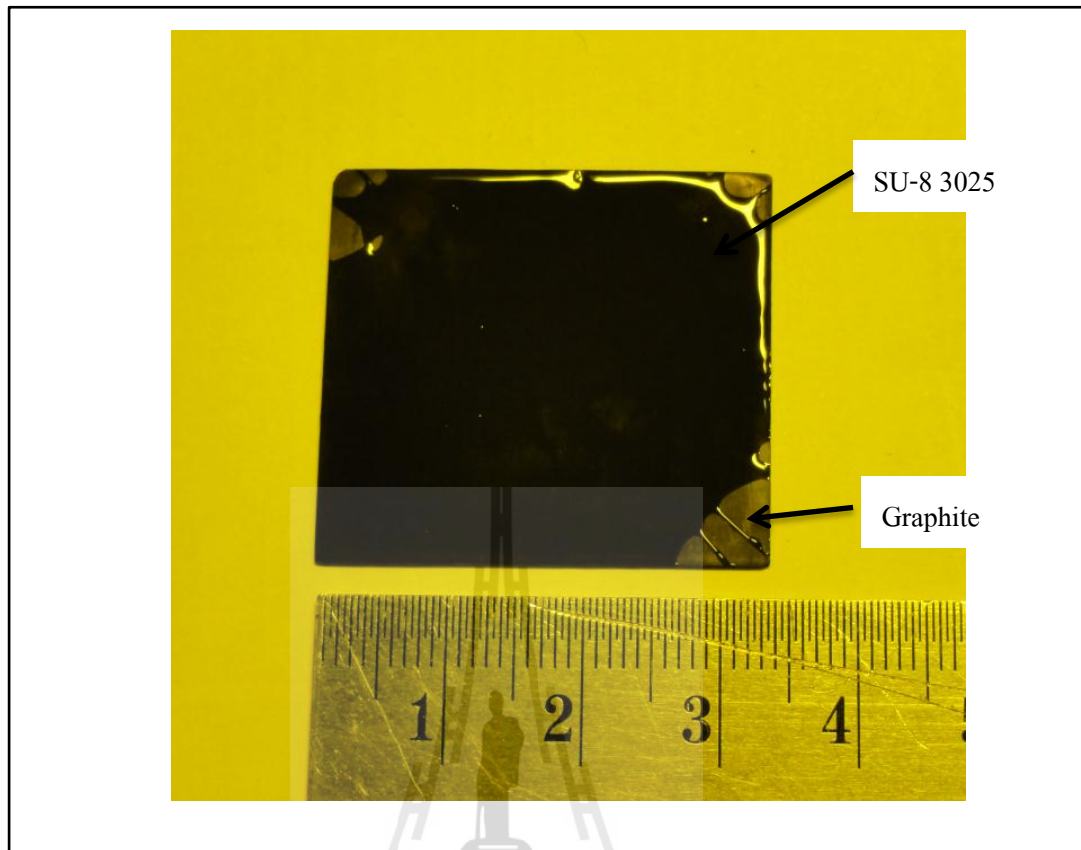
รูปที่ 5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน

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 SU-8 3025 ลงบนกราฟต์ โดยการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 2000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ โดยได้ความหนาประมาณ 30 - 40 μm ในการหมุนเคลือบสารไวแสงต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศในสารไวแสงเพราะจะทำให้เกิดลวดลายที่ไม่ต้องการบนสารไวแสง ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาในกระบวนการชุบโลหะได้ จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบจะได้กราฟต์เคลือบสารไวแสงดังรูปที่ 5.16



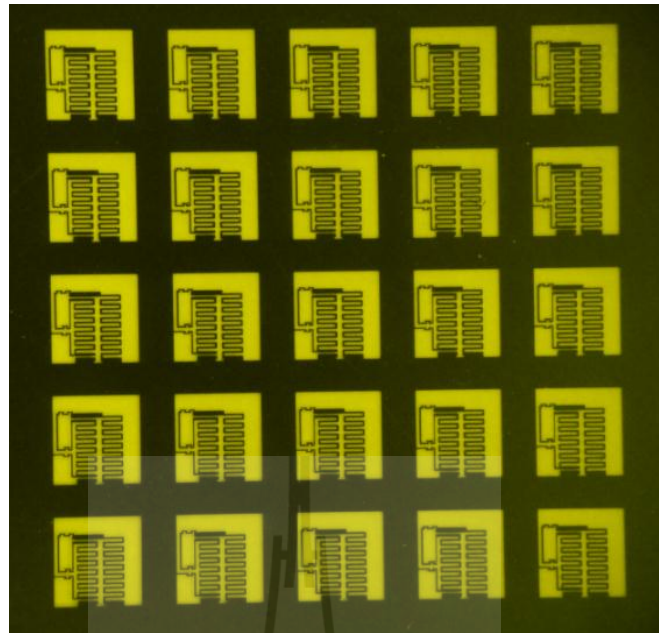
รูปที่ 5.15 แผ่นกราฟต์ที่ทำความสะอาดแล้วพร้อมเคลือบสารไวแสง



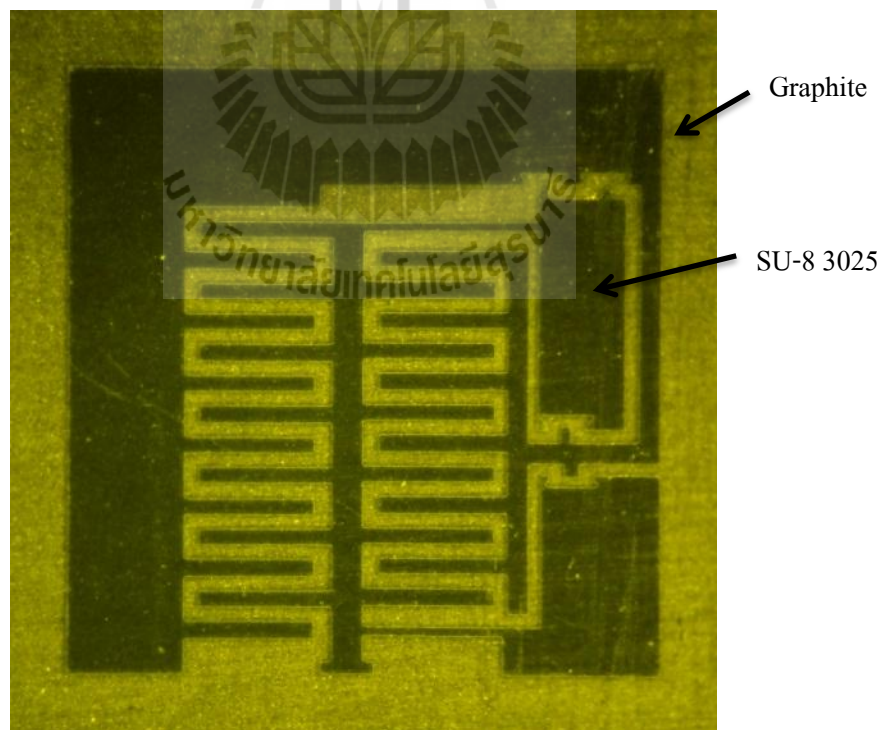
รูปที่ 5.16 แผ่นกราฟไฟต์ที่ผ่านการหมუნเคลือบสารไวแสง SU-8 3025

5.3.2 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากทึบแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลาย

ทำการถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มที่มีลวดลายทึบแสงซึ่งฟิล์มทึบแสงที่ใช้จะมีลวดลายตรงข้ามกับลวดลายที่ใช้กับสารไวแสงชนิดบวก ดังรูปที่ 5.17 ใช้ฟิล์มทึบแสงเป็นหน้ากาก แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel รุ่น Q4000 เป็นเวลา 9 วินาที ที่ความเข้มแสง 18.6 mW/cm^2 ได้พลังงานสะสมที่ตกกระทบสารไวแสงเท่ากับ 167.4 mJ/cm^2 หลังจากนั้นทำการอบสารไวแสงหลังฉายแสงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยน้ำยา SU-8 Developer เป็นเวลา ประมาณ 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จะได้ลวดลายของสารไวแสงดังรูปที่ 5.18



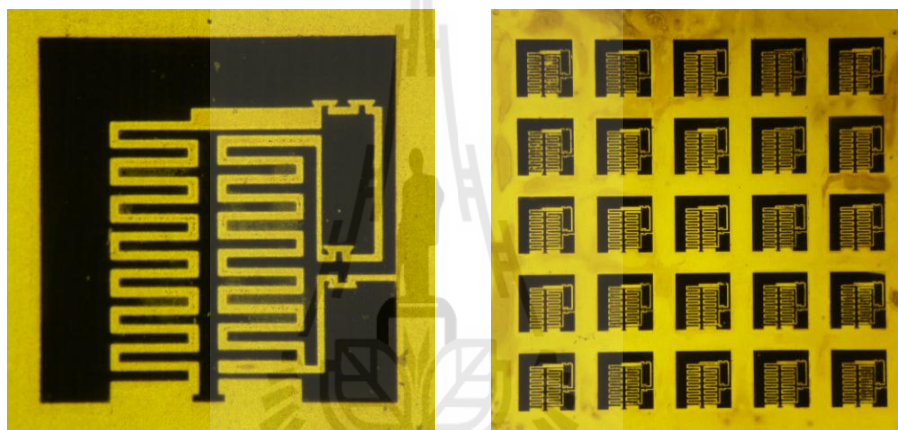
รูปที่ 5.17 फिल्मที่บแสงที่ใช้สำหรับถ่ายทอดลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดลบ



รูปที่ 5.18 สารไวแสงหลังจากการฉายแสง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออก

5.3.3 กระบวนการชุบโลหะบนกราฟไฟต์

กระบวนการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าจะใช้สารละลายเงินที่เตรียมไว้ เหมือนกับการชุบโลหะบนฐานรองที่เป็นแผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะ 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 22.41 ไมครอน ผลการชุบโลหะดังรูปที่ 5.19 ซึ่งเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน

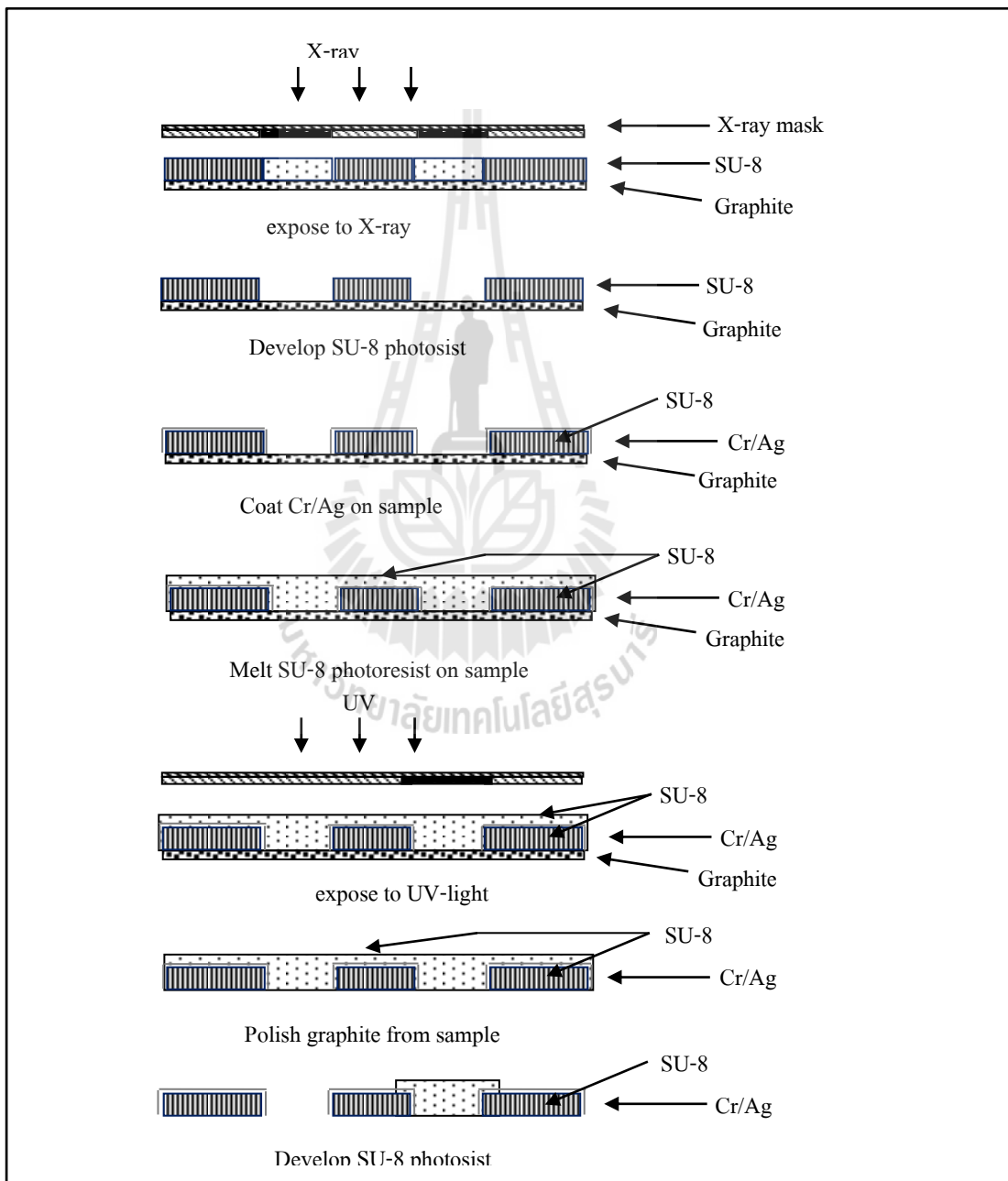


รูปที่ 5.19 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่ชุบโลหะเสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน

5.4 กระบวนการสร้างโครงสร้างสัปดาห์สูงและกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS

เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างโครงสร้างสัปดาห์สูงโดยใช้สารไวแสง SU-8 2100 ความหนา 500 ไมครอนเมตร บนฐานกราฟไฟต์ แล้วฉายแสงเอกซเรย์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ จากนั้นล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์ออกไป จะได้โครงสร้างสัปดาห์สูงที่เป็นพอลิเมอร์ จากนั้นเคลือบโลหะโครเมียมและโลหะเงินบนโครงสร้างพอลิเมอร์ จะได้โครงสร้างนำไฟฟ้าสำหรับเป็นตัวเก็บประจุของตัวตรวจวัดความดัน จากนั้นทำการสร้างฟิล์มบางสำหรับใช้เป็นไดอะแฟรมโดยใช้ Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่ง PDMS มีลักษณะเป็นของเหลวก่อนที่จะเติมสารเคมีเพื่อให้แข็งตัว ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง PDMS ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างหลุมโดยมีขอบที่มีของความหนาคงที่ ในการสร้างขอบดังกล่าวใช้ Dry film ที่เป็นสารไวแสงชนิดลบซึ่งมีความหนาคงที่ที่ $40 \mu\text{m}$ ริดดิกลงบนกระจกสไลด์ขนาด 3×1 นิ้ว

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



รูปที่ 5.20 กระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ

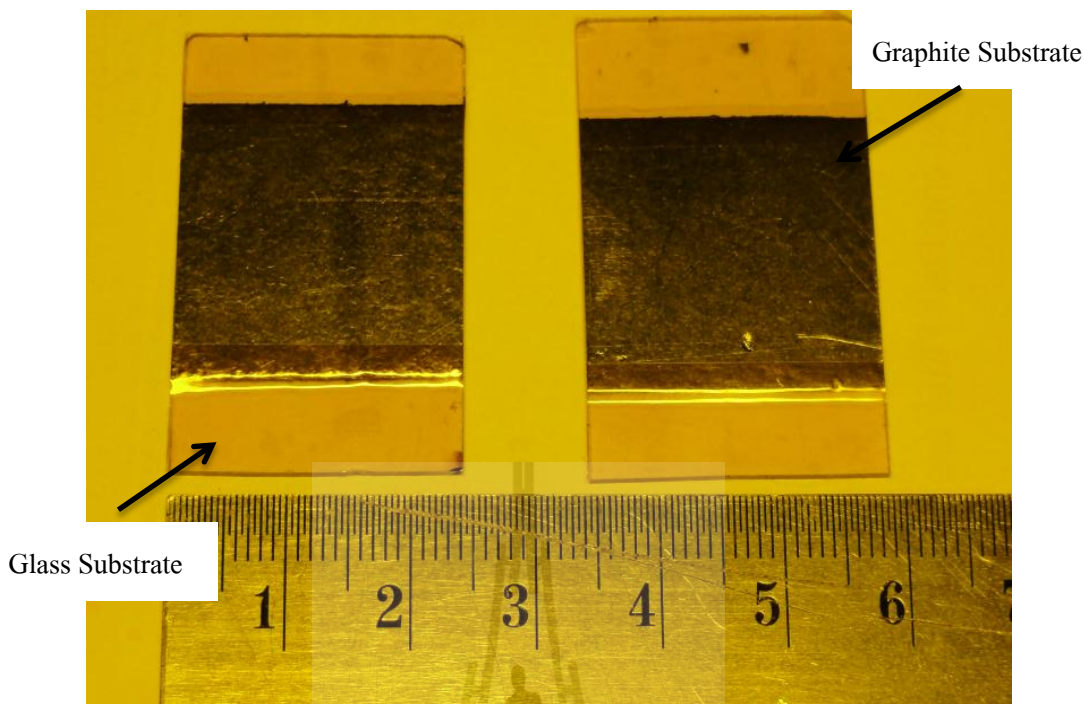
จากรูปที่ 5.20 ในส่วนของกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์และกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS มีขั้นตอนการสร้างโดยละเอียดดังนี้

5.4.1 การเตรียมฐานกราฟไฟต์

ในงานวิจัยนี้จะใช้กราฟไฟต์แบบอ่อนเป็นวัสดุฐาน ซึ่งมีราคาถูก และสามารถตัดออกได้ง่ายในกระบวนการสุดท้ายที่มีการขัดวัสดุชั้นฐานทิ้งไป โดยในการเตรียมกราฟไฟต์จะเริ่มจากการตัดกราฟไฟต์ให้ได้ความกว้าง 1 นิ้ว ยาวประมาณ 7 นิ้ว จากนั้นรีดแผ่นกราฟไฟต์ด้วยความร้อน โดยใช้เครื่องรีดร้อนหรือเครื่องเคลือบบัตรประมาณ 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 หลังจากเตรียมฐานกราฟไฟต์เสร็จควรจะนำไปใช้งานทันที เพราะถ้าเก็บไว้จะทำให้ความชื้นเข้าไปในกราฟไฟต์ได้ จะต้องทำการอบอีกครั้งก่อนใช้งาน



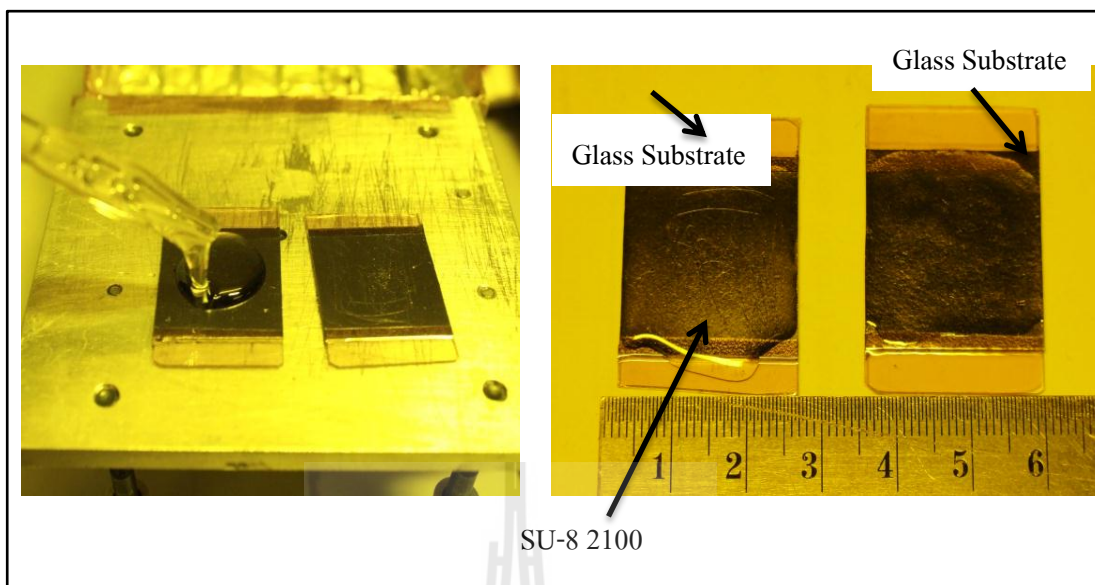
รูปที่ 5.21 แผ่นกราฟไฟต์ที่ผ่านการการอบและรีบเรียบด้วยเครื่องรีดร้อน



รูปที่ 5.22 กราไฟต์ที่ติดกับกระจกด้วยเทป PI ซึ่งจะได้ฐานกราฟิต์ที่พร้อมใช้งานในกระบวนการต่อไป

5.4.2 การเตรียมสารไวแสง SU-8 บนฐานกราฟิต์

หลังจากเตรียมฐานกราฟิต์แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการเตรียมสารไวแสงความหนา 500 ไมโครเมตรโดยประมาณบนฐานกราฟิต์ โดยเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นกราฟิต์โดยใช้ IPA ชุบล้างแล้วเช็ดบริเวณผิวของกราฟิต์ จากนั้นหยดสารไวแสงลงบนฐานกราฟิต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อนที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส ให้มีความหนามากกว่า 500 ไมโครเมตรโดยประมาณ ดังรูปที่ 5.23 อบบนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 20 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวทำละลายภายในสารไวแสงระเหยจนเหลือประมาณ 7% จะทำให้สารไวแสงแข็งตัว จากนั้นขัดให้ได้ความหนา 500 ไมโครเมตร โดยใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดความหนาของสารไวแสงหลังจากการขัด ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.23 การหยดสารไวแสงบนฐานกราฟไฟต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อน



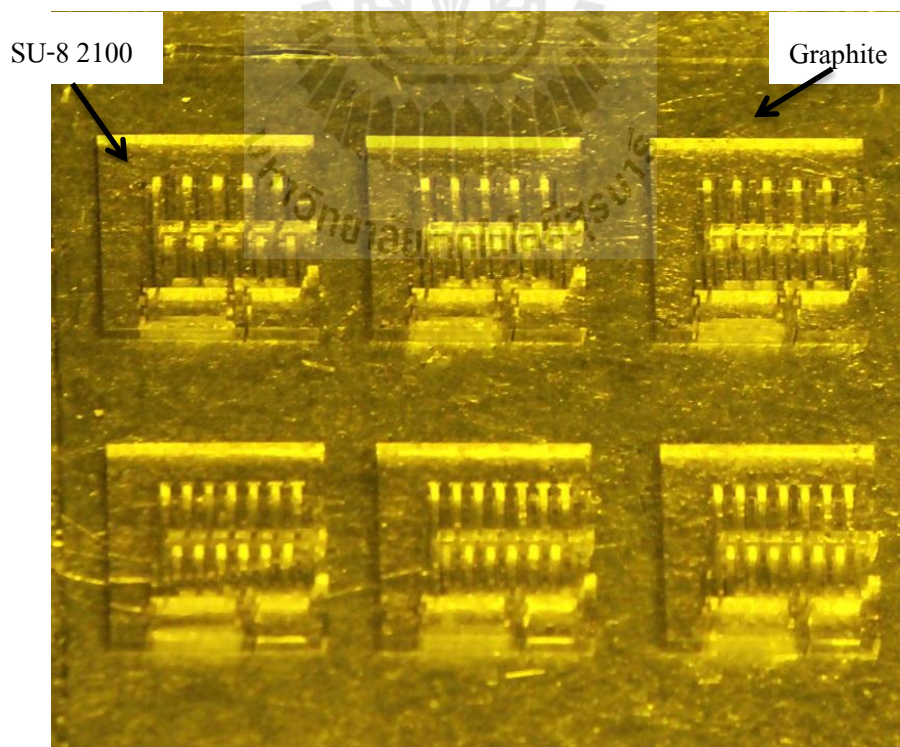
รูปที่ 5.24 การวัดความหนาสารไวแสงที่ผ่านการจัดเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 500 ไมโครเมตร

5.4.3 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

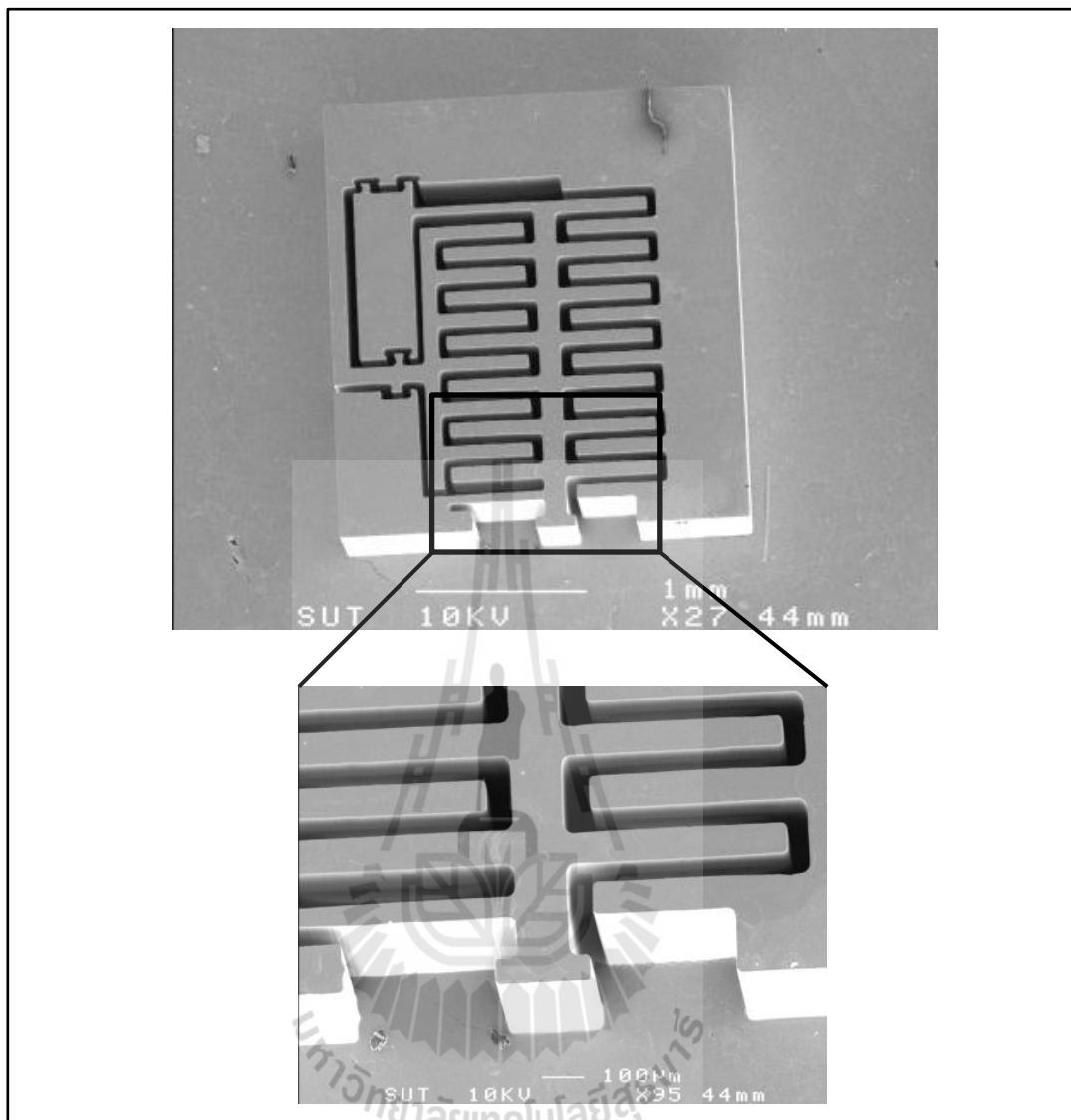
กระบวนการลิโธกราฟีคือการถ่ายทอดลวดลายจุลภาคจากหน้ากากกั้นรังสีลงบนชิ้นงานที่เป็นสารไวแสง โดยในการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงจะใช้แสงเอกซเรย์ฉายผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ไปยังชิ้นงาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเอกซเรย์ที่ สถานีทดลองที่ 6 (BL6A-DXL) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) โดยใช้หน้าต่างที่เป็นผลึกเบอริลเลียม (Beryllium windows) ซึ่งโปร่งใสต่อแสงเอกซเรย์และแสงย่านอื่นๆ เนื่องจากแสงซินโครตรอนที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีช่วงความถี่กว้าง ลักษณะของแสงซินโครตรอนที่ออกมาจะเป็นสีเหลืองส้มฟ้ามีความกว้าง 7.43 มิลลิเมตร ยาว 88.31 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่ต้องการฉายมีความใหญ่กว่าความกว้างของแสงเอกซเรย์ที่ออกมา จึงต้องมีการสแกนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวขึ้น-ลงเพื่อให้รังสีเอกซ์ตกกระทบชิ้นงานได้พลังงานเท่ากันทั้งชิ้น ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปฉายแสงเอกซเรย์จะต้องประกบหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่เป็นสารไวแสง ชิ้นงานที่ต้องการฉายแสงเอกซเรย์มีความหนา 500 ไมโครเมตร ใช้พลังงานในการฉาย (Dose) เท่ากับ 18000 mJ/cm^2 โดยจะฉายที่กระแสอิเล็กตรอน(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

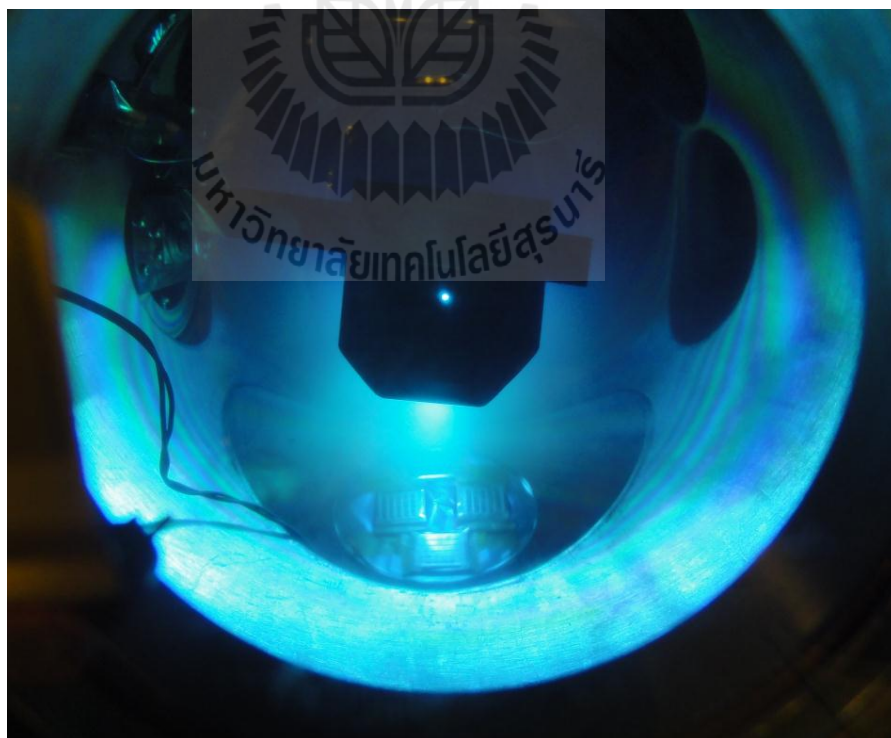


รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

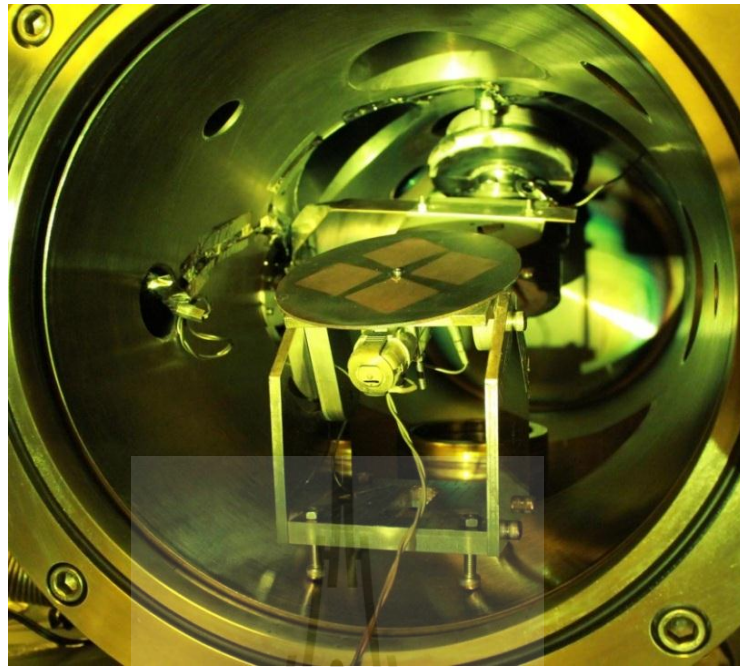
5.4.4 กระบวนการเคลือบโลหะ

สำหรับการสร้างโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ต้องการโครงสร้างที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบโลหะบนโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ปั่นสารไวแสงจากชั้นตอนที่ผ่านมา ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) โดยใช้เครื่องสปัตเตอร์ริง ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางโลหะอีกวิธีหนึ่ง การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้มีหลักการคือ การสร้างพลาสมาจากก๊าซเฉื่อย AR^+ ด้วยสนามไฟฟ้าและเน็ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานดังรูปที่ 5.28 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นลำแสง

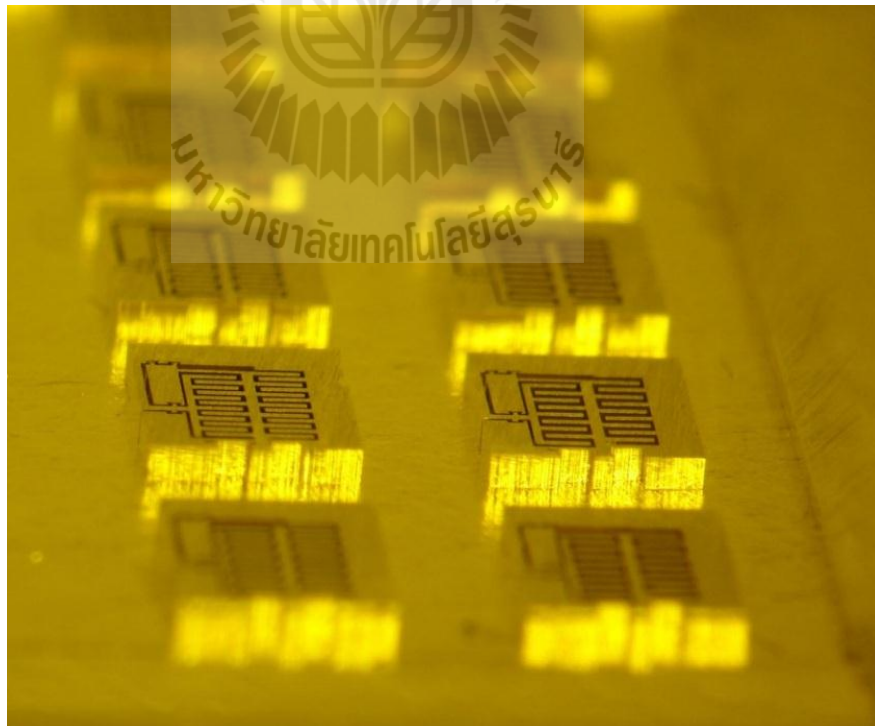
พลาสมา การสปีดเตอริงสามารถแบ่งชนิดของแหล่งจ่ายออกได้สองชนิดคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับการเคลือบโลหะบนชิ้นงาน และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง(RF) ซึ่งสามารถเคลือบได้ทั้งโลหะและฉนวน สำหรับการเคลือบโลหะบนโครงโครงสร้างตัวเก็บประจุจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และจะต้องเคลือบทุกทิศทาง จึงจำเป็นต้องมีการหมุนชิ้นงาน ในระหว่างกระบวนการเคลือบโลหะ อุปกรณ์ที่ใช้หมุนเคลือบโลหะมีลักษณะดังรูปที่ 5.29 โลหะที่ใช้จะเป็นโครเมียม (Cr) เคลือบลงบนโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วตามด้วยโลหะเงิน (Ag) เนื่องจากโลหะเงินนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโครเมียมแต่ยึดเกาะกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดีนัก จึงต้องใช้โลหะโครเมียมเคลือบลงไปก่อน โลหะโครเมียมจะทำการสปีดเตอริงด้วยแรงดันกระแสตรงที่กำลัง 150 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที ที่ความดัน 1.12×10^{-3} Torr ซึ่งโลหะโครเมียมจะยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จากนั้นเคลือบโลหะเงิน (Ag) บนโครเมียมโดยทำการสปีดเตอริงแรงดันกระแสตรงที่กำลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที ที่ความดัน 1.12×10^{-3} Torr ในกระบวนการสปีดเตอริงจะมีความร้อนค่อนข้างสูงซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้ ดังนั้นในการสปีดเตอริงแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เกิน 1 นาทีแล้วพักเป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงสปีดเตอริงอีกครั้ง ทำอย่างนี้ไปจนกว่าจะครบเวลาที่ต้องการ จะได้โครงสร้างเคลือบโลหะดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.28 แสงพลาสมาจากกระบวนการสปีดเตอริง



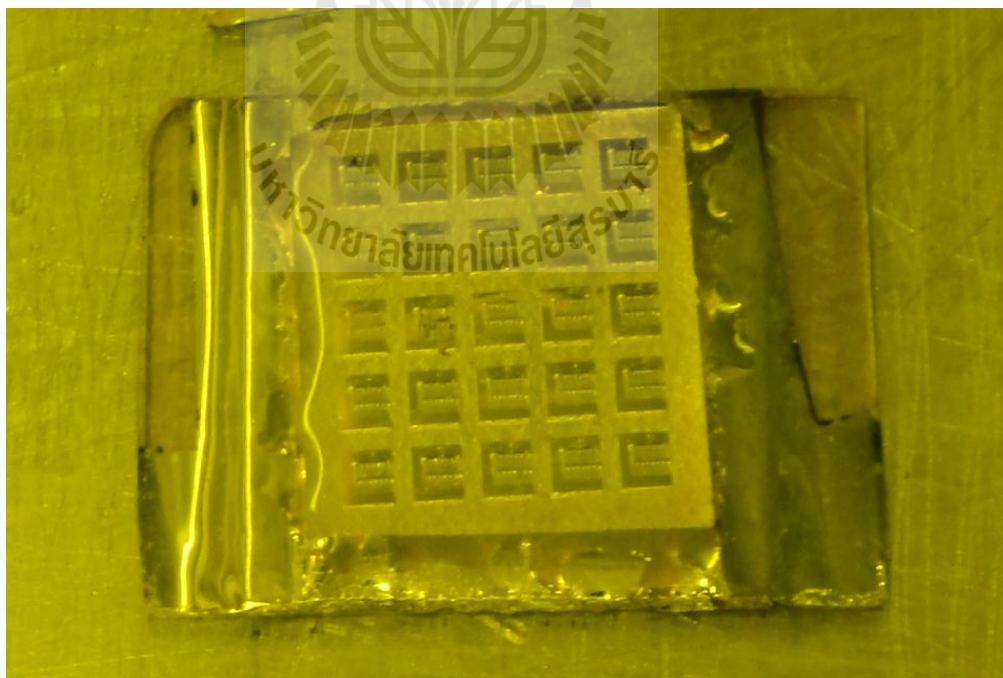
รูปที่ 5.29 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหมุนชิ้นงานในเครื่องสปีดเตอริง



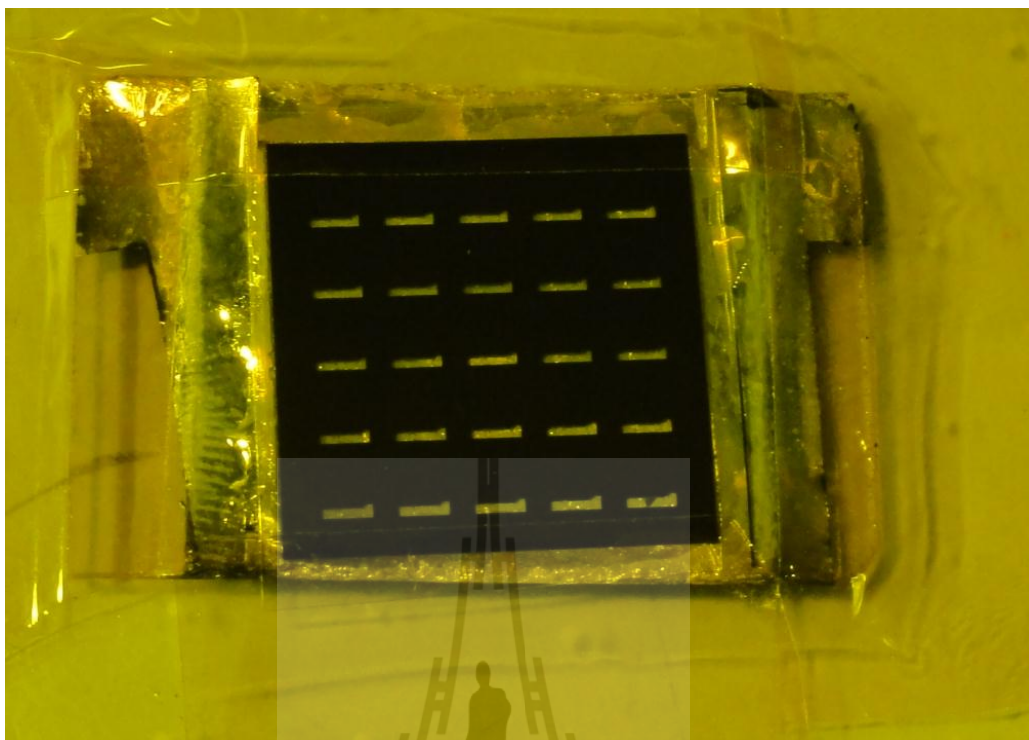
รูปที่ 5.30 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโลหะด้วยกระบวนการสปีดเตอริงแบบหมุน

5.4.5 กระบวนการขีดกราฟขั้นพื้นฐานทั้ง

ในส่วนของการขีดฐานกราฟไฟต์ออกไปเพื่อให้ได้โครงสร้างนำไฟฟ้ามาใช้งานในขั้นตอนต่อไป ในการขีดกราฟไฟต์ทั้งไปจะๆไม่สามารถขีดออกได้ทันทีเนื่องจากจะทำให้โครงสร้างขนาดเล็กเสียหายได้ ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการถนอมสารไวแสงลงบนชิ้นงานให้ทั่วเพื่อโครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกันดังรูป 5.31 ทำการเทสารไวแสง SU-8 2100 ลงบนชิ้นงานแล้วอบบนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการขีดฐานออกไปจะต้องทำการเชื่อมส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซึ่งจะไม่ติดกันถ้าขีดฐานออกไปก่อน จะทำให้โครงสร้างทั้งสองส่วนแยกออกจากกัน ซึ่งการเชื่อมต่อโครงสร้างทั้งสองส่วนสามารถทำได้โดยการใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ฉายแสงในส่วนที่ใช้ขีดโครงสร้าง โดยจะทำการขีดสารไวแสงที่ถนอมลงไปบนโครงสร้างให้มีความหนาใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงาน จากนั้นทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านฟิล์มที่บ่งแสงที่เปิดช่องเฉพาะบริเวณที่ใช้ขีดโครงสร้างทั้งสองส่วนดังรูปที่ 5.32 ฉายแสง เป็นเวลา 180 วินาที ที่ความเข้มแสง 18.1 mW/cm^2 ได้พลังงานสะสมที่ตกกระทบบสารไวแสงเท่ากับ 3258 mJ/cm^2 อบชิ้นงานหลังฉายแสงโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

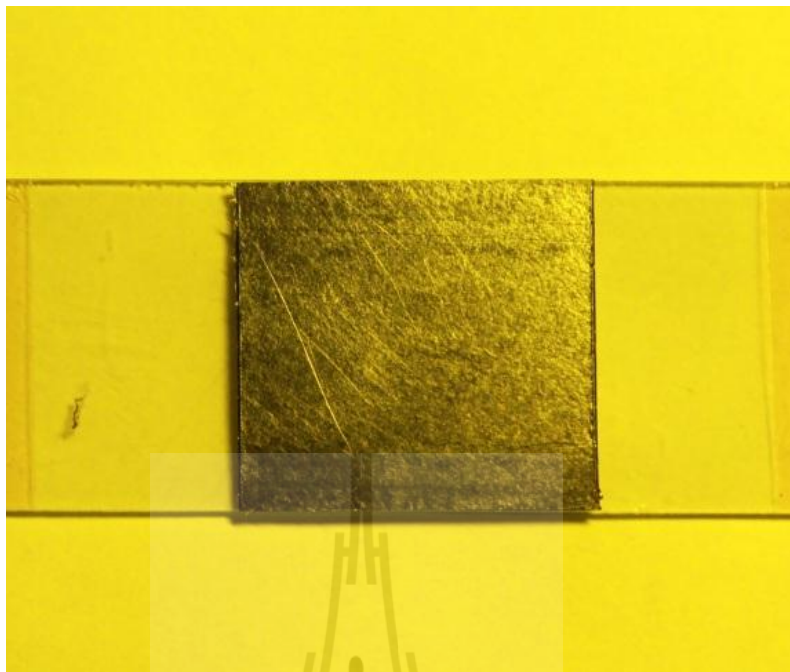


รูปที่ 5.31 การเทสารไวแสงลงบนชิ้นงานเพื่อให้โครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน

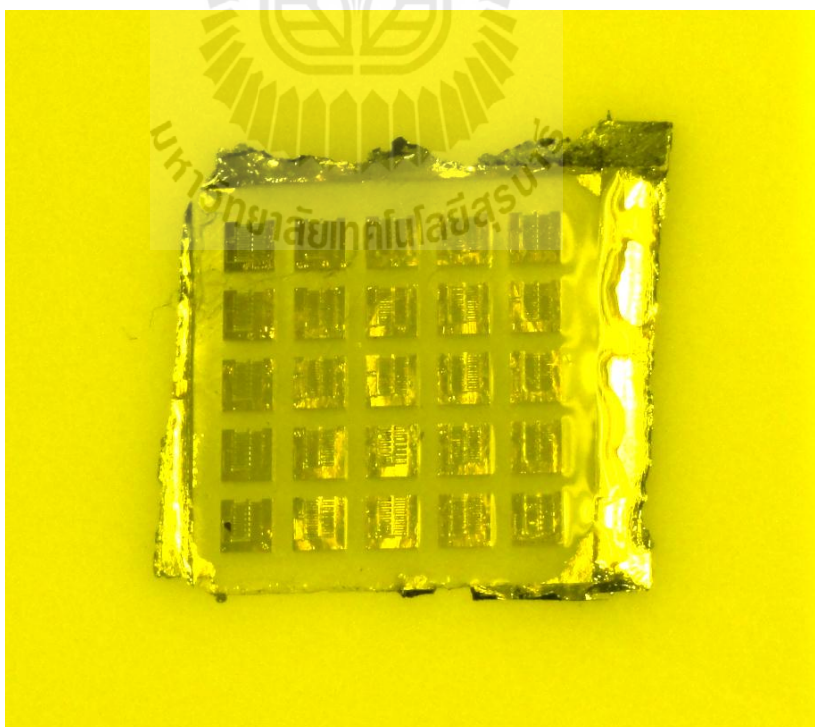


รูปที่ 5.32 ฟิล์มทึบแสงสำหรับฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อยึดโครงสร้าง

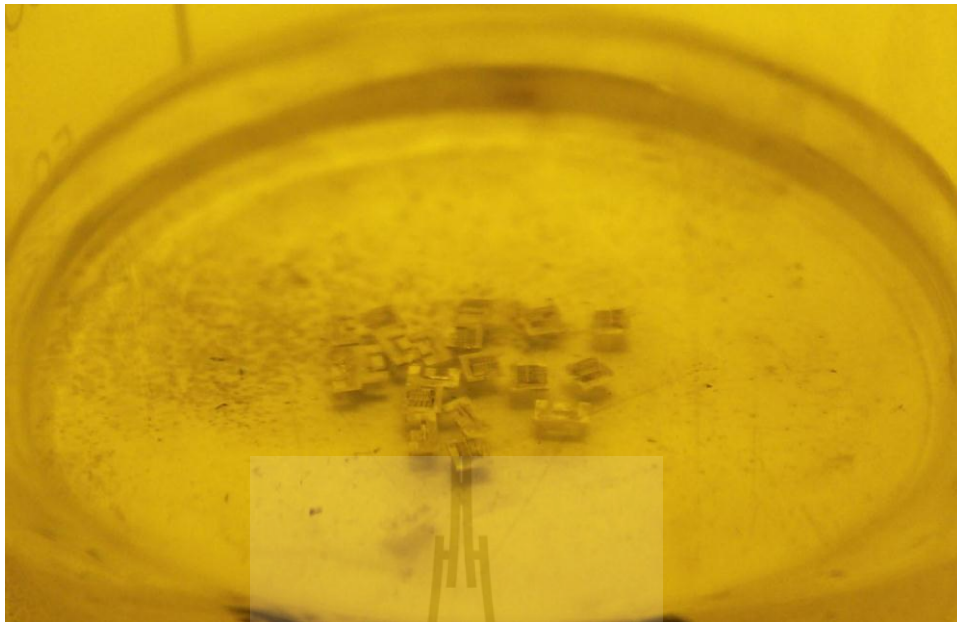
หลังจากการฉายแสงแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการการขีดคราไฟต์ชั้นฐานทิ้งไป ซึ่งเริ่มจากการใช้แผ่นใสติดกับกระจกสไลด์วางลงบนชิ้นงานในขณะที่ยังร้อนหลังจากการอบหลังฉายแสงและสารไวแสงยังไม่แข็งตัวเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราวดังรูปที่ 5.33 ก่อนที่จะขีดคราไฟต์ออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 จนบางเห็นเนื้อสารไวแสง แล้วขัดต่อด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 จนคราไฟต์หมดไปดังรูปที่ 5.34 จากนั้นล้างสารไวแสงออกไปโดยใช้น้ำยา SU-8 Developer เป็นเวลา 90 นาที ชิ้นงานจะหลุดออกมาจากฐานชั่วคราวดังรูปที่ 5.35 จากนั้นนำชิ้นงานขึ้นจากน้ำยา Developer วางไว้ให้น้ำยา Developer ระเหยจนแห้งเป็นเวลา 60 นาที แล้วทำความสะอาดคราบน้ำยา Developer บนชิ้นงานออก ด้วยการพลาสมาที่กำลัง 100 วัตต์เป็นเวลา 3 นาที จะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุสำหรับสร้างตัวตรวจรู้ความดันดังรูปที่ 5.36 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.33 การติดชิ้นงานบนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราว



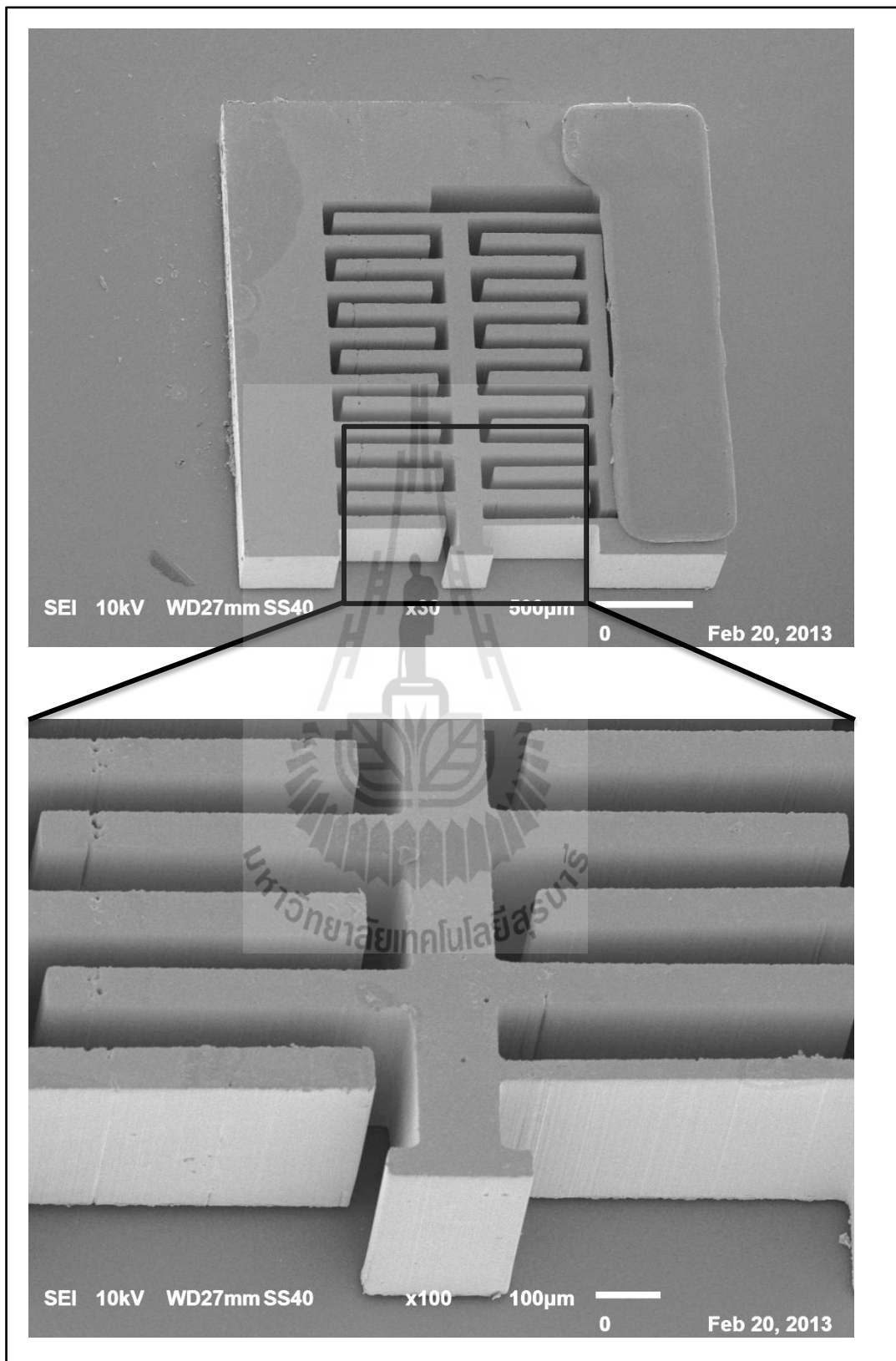
รูปที่ 5.34 ชิ้นงานที่ผ่านการขัดกรรไฟต์ออกไป



รูปที่ 5.35 ชิ้นงานที่หลุดออกมาในน้ำยาล้างสารไวแสง SU-8-Developer



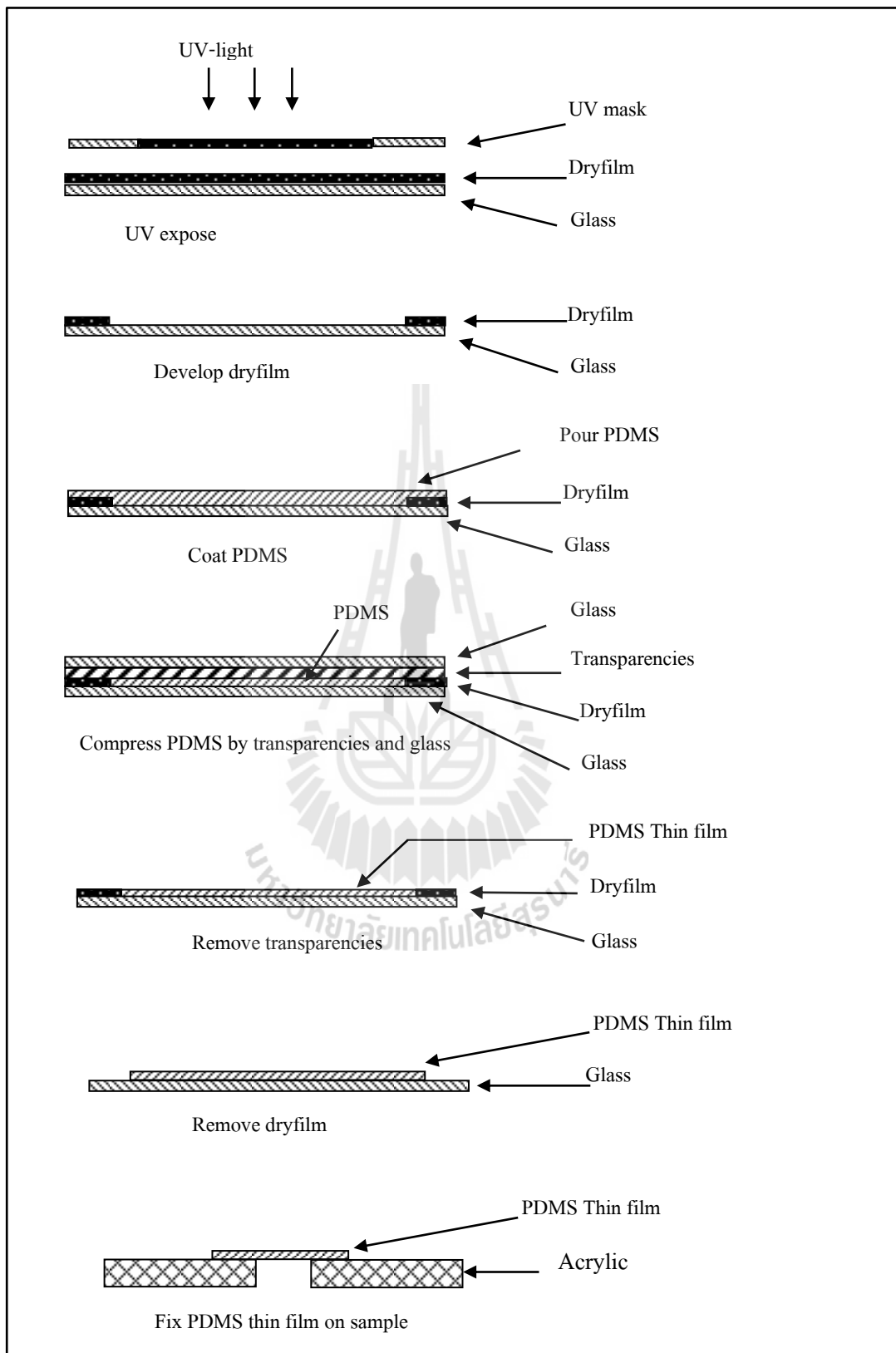
รูปที่ 5.36 โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์



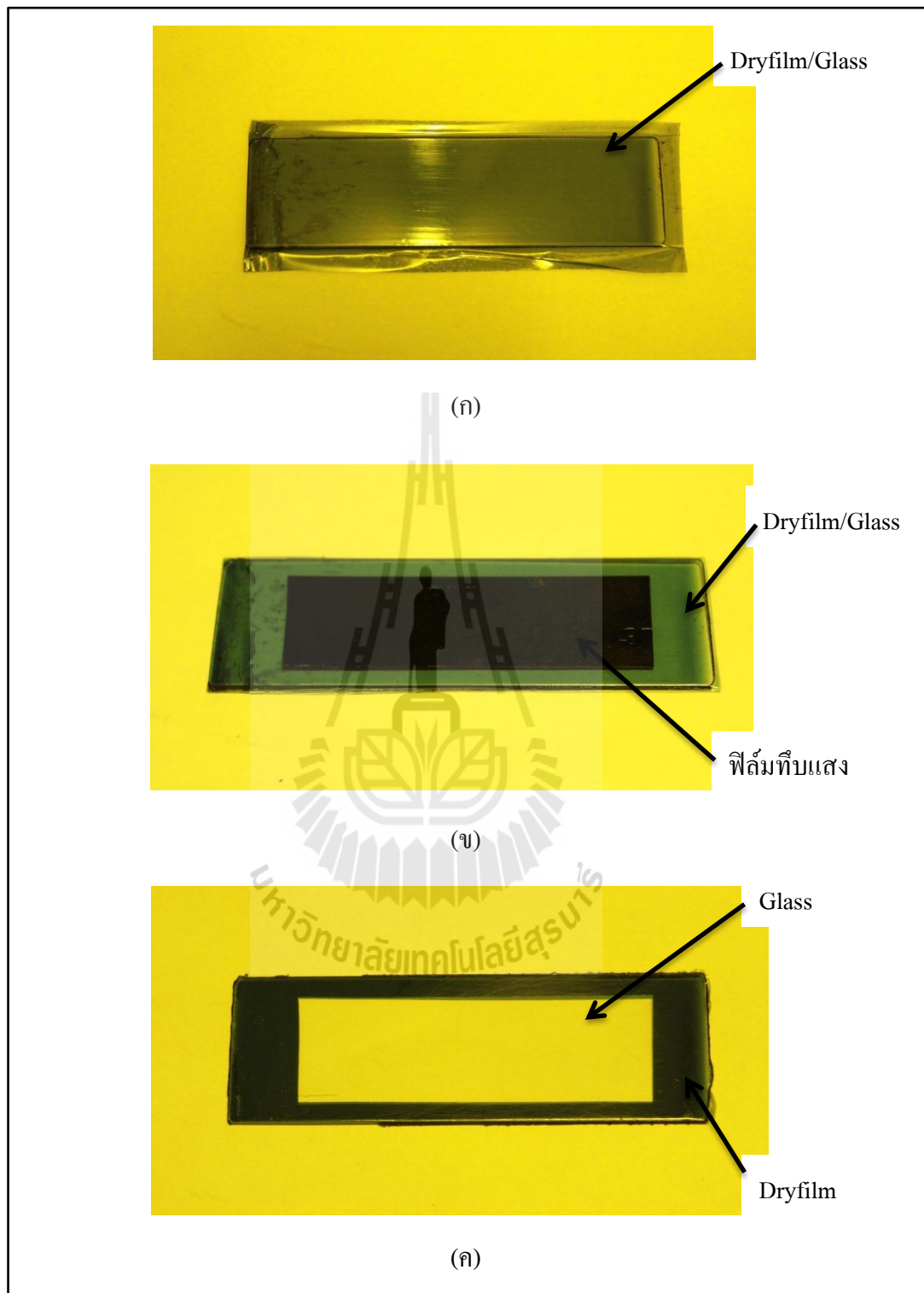
รูปที่ 5.37 ภาพ SEM ของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์

5.4.6 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS

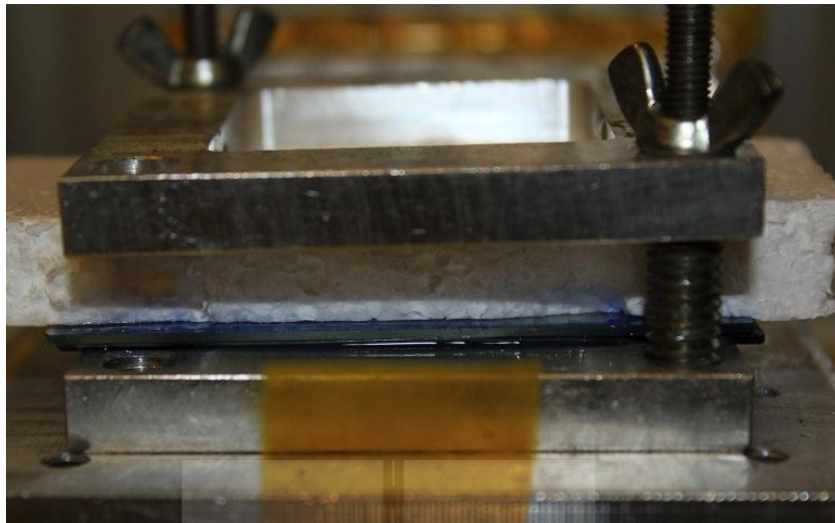
ในส่วนของการสร้างฟิล์มบาง PDMS สำหรับใช้เป็นไดอะแฟรม กัด PDMS เหลวบนขอบที่มีความหนาคงที่ ซึ่งจะได้ความหนาที่ต้องการ และสามารถทำซ้ำได้ สำหรับการเตรียมของที่มีความหนาคงที่ ต่างจากการหมุนเคลือบที่มักจะได้รับความหนาไม่แน่นอน มีกระบวนการดังรูปที่ 5.38 ในการสร้างฟิล์มบาง PDMS เริ่มจาก นำกระจกสไลด์ขนาด 1x3 นิ้ว มาเคลือบด้วยสารไวแสงชนิดบวกโดยจะใช้ Dryfilm ที่ซึ่งมีความหนา 40 ไมโครเมตร เคลือบสามชั้น เพื่อให้ได้ความหนา 120 ไมโครเมตรในส่วนของ การเคลือบจะใช้เครื่องเคลือบบัตร 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 แล้วปิดทับด้วยแผ่นใสและกระจกสไลด์และใช้ไฟมรองด้านบนก่อนที่จะกัดด้วยแผ่นอลูมิเนียมดังรูปที่ 5.40 นำไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที รอให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นลอก PDMS ที่อยู่ภายในกรอบ Dryfilm โดยใช้ น้ำยาถอดแบบ Mould release LU-158 (Grezzto product, Thailand) เมื่อฟิล์มบางหลุดออกมาแล้วนำไปวางบนกระจกสไลด์อีกแผ่นทำความสะอาดน้ำยาถอดแบบด้วยน้ำยา Mould SS Cleaner Spray (Grezzto product, Thailand) แล้วจุ่มลงใน IPA เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำยาถอดแบบถูกล้างออกไปหมดแล้ว จะได้ฟิล์มบาง PDMS ดังรูปที่ 5.41 สำหรับใช้เป็นไดอะแฟรมของตัวตรวจวัดความดัน



รูปที่ 5.38 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS



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



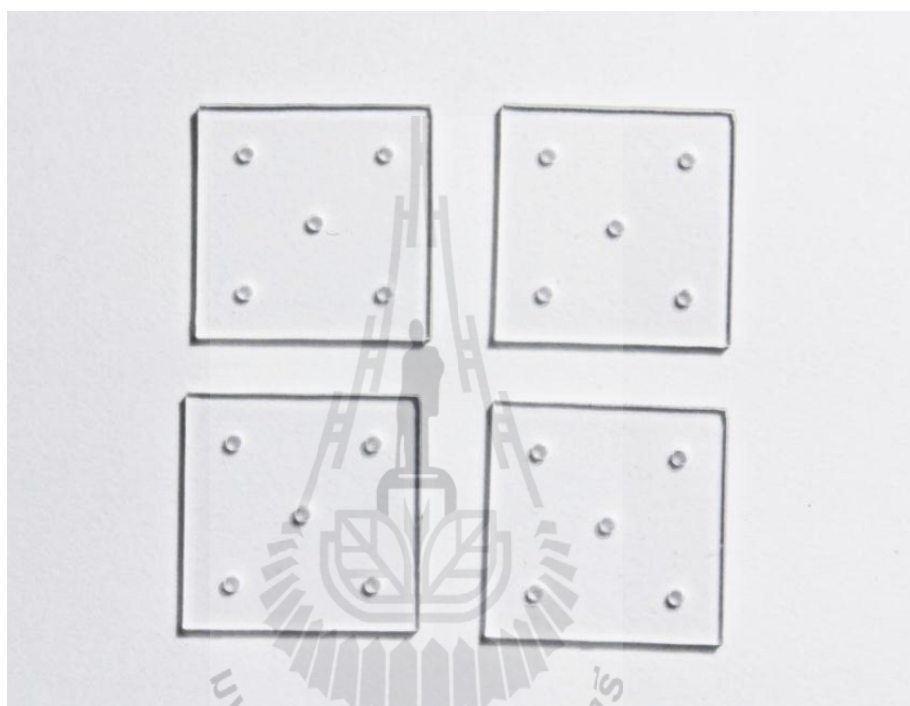
รูปที่ 5.41 PDMS फिल्मบางที่ได้จากการกดอัดและผ่านการทำความสะอาดพร้อมใช้งาน

5.5 กระบวนการติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุและฟิล์มบาง PDMS ต่อมาจะเป็นการติดฟิล์มบาง PDMS บนช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เพื่อจะได้ไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน จากนั้นนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุติดตั้งบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า มีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

5.5.1 การเตรียมช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

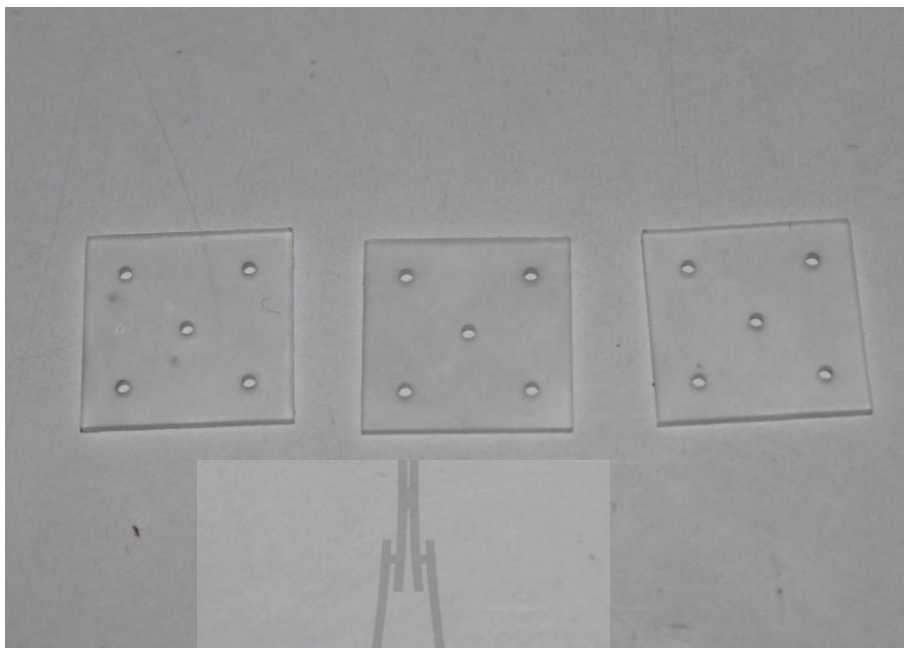
ในส่วนของการเตรียมช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จะใช้แผ่นอะคริลิกใส ตัดให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางด้วยดอกสว่านขนาด 1 มิลลิเมตร และเจาะรูบริเวณมุมทั้งสี่มุมของแผ่นเพื่อติดตั้งขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่อกับวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.42 โดยในการเจาะรูและการตัดทั้งหมดได้ใช้เครื่อง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



รูปที่ 5.42 แผ่นอะคริลิกใสที่เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรสำหรับติดโคเดอะเฟรม

5.5.2 การติดฟิล์มบาง PDMS บนช่องเปิดวงกลม

ในการติดฟิล์มบาง PDMS บนอะคริลิก จะใช้ PDMS เป็นตัวเชื่อมระหว่าง PDMS และอะคริลิก แต่ PDMS ไม่สามารถยึดติดกับแผ่นอะคริลิกได้เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีผิวเรียบ จึงต้องทำให้ผิวของอะคริลิกขรุขระเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูไว้แล้วไปพ่นทราย แล้วทำความสะอาดด้วยเครื่องซูปเปอร์โซนิคในน้ำเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ทรายที่ฝังในเนื้ออะคริลิกหลุดไป จะได้อะคริลิกที่มีผิวขรุขระดังรูปที่ 5.43 จากนั้นนำแผ่นอะคริลิกที่พ่นทรายแล้วไปหมუნเคลือบ PDMS ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีแล้วนำฟิล์มบาง PDMS ที่เตรียมไว้ ตัดให้มีขนาด 5x5 มิลลิเมตร ติดลงไปบนช่องเปิดวงกลมบนแผ่นอะคริลิกดังรูป 5.44 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที



รูปที่ 5.43 แผ่นอะคริลิกใสที่ผ่านการพันทราย

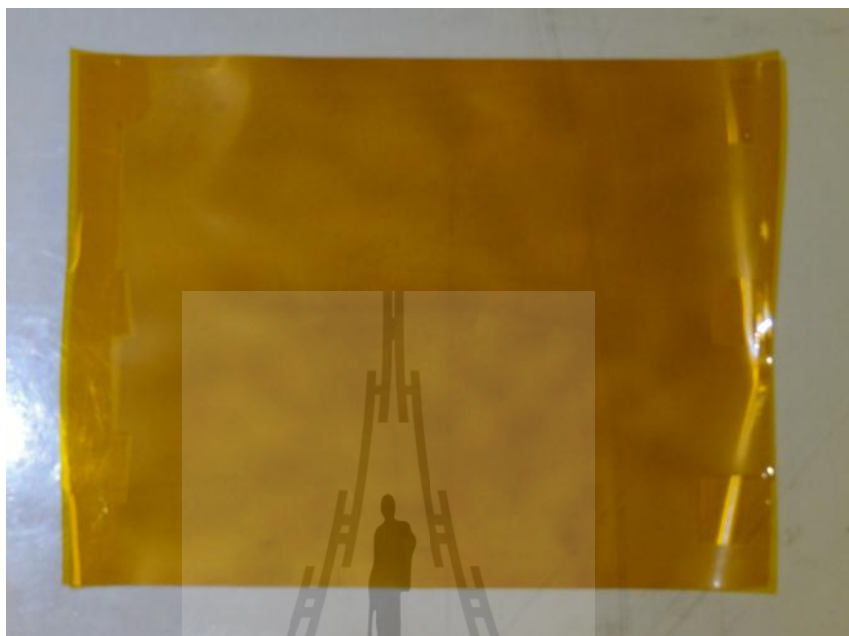


รูปที่ 5.44 การติดฟิล์มบาง PDMS ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม

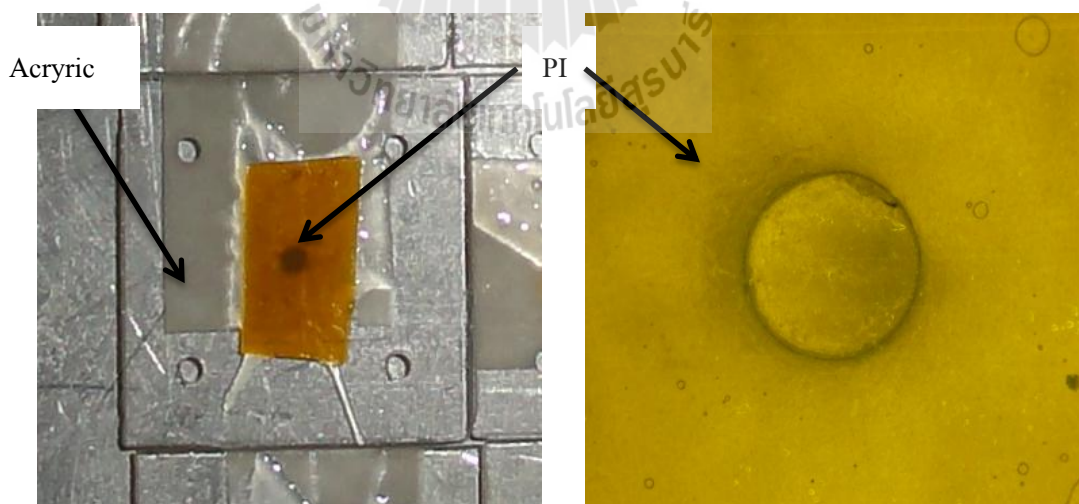
5.5.3 การติดฟิล์ม PI บนช่องเปิดวงกลม

การติดฟิล์ม PI บนช่องเปิดวงกลม จะมีขั้นตอนคล้ายกับการติดฟิล์มบาง PDMS คือนำแผ่น อะคริลิกไปพันทรายเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะ และพันทรายแผ่น PI ด้วยเช่นกัน โดยแผ่น PI ที่ทำการพันทรายมีลักษณะดังรูปที่ 5.45 ส่วนการยึดแผ่น PI บนช่องเปิดจะใช้กาวอีพอกซีแห้งช้า โดย

การหมุนเคลือบที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที จากนั้นนำแผ่น PI ด้านที่ถูกพ่นทรายติดบนช่องเปิด ดังรูปที่ 5.46



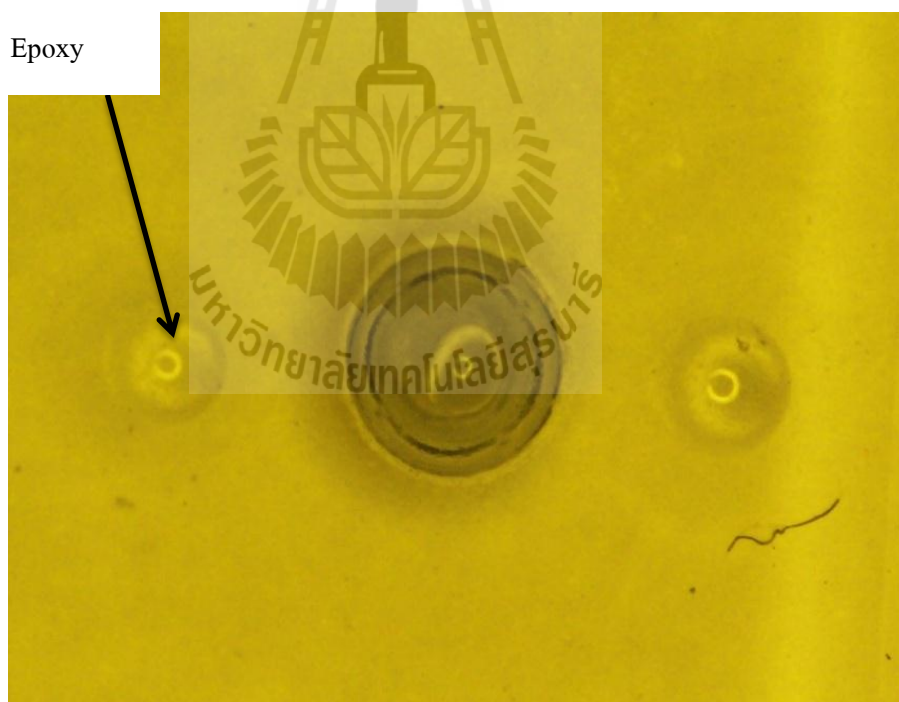
รูปที่ 5.45 แผ่น PI ที่พ่นทรายบริเวณผิว



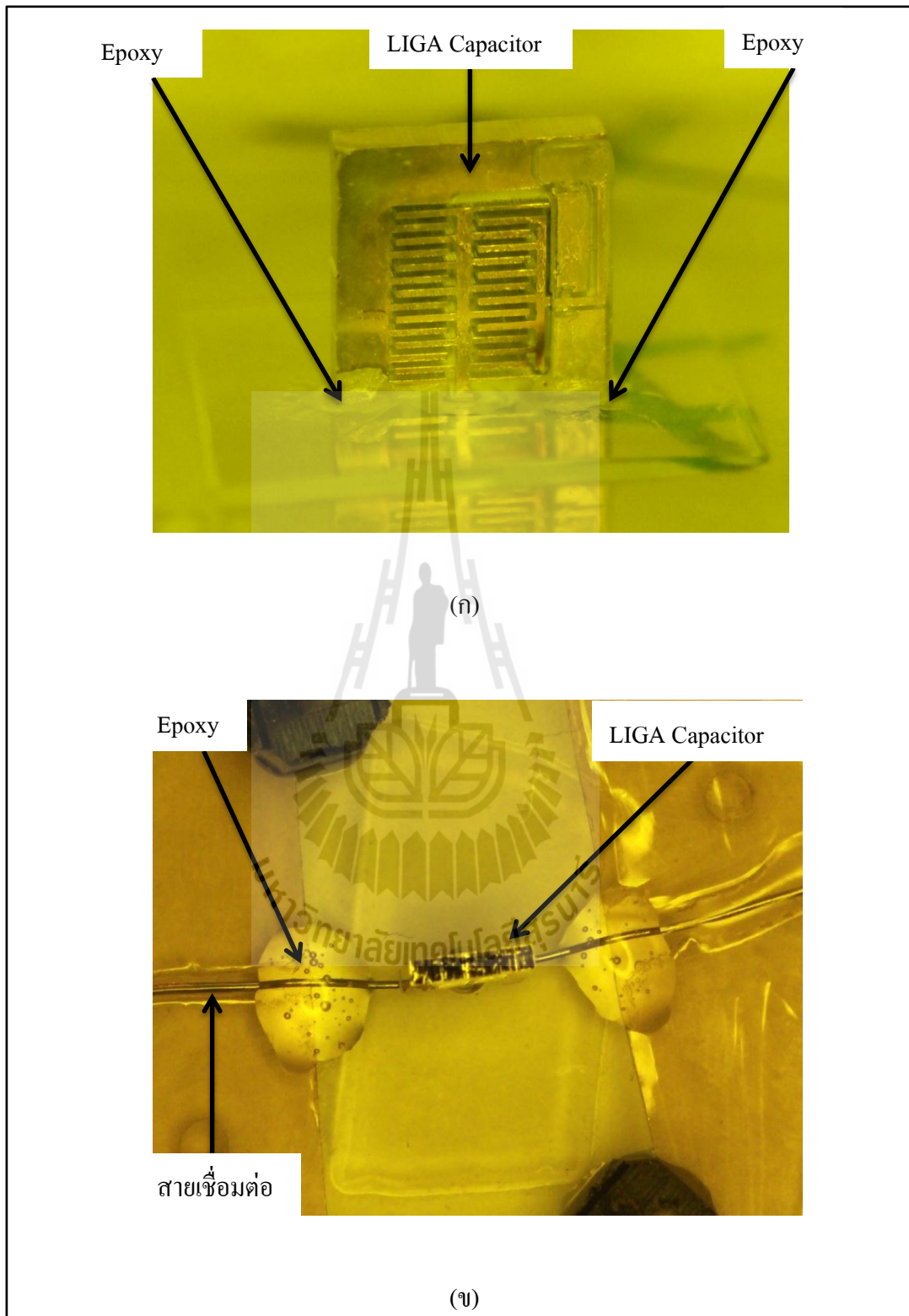
รูปที่ 5.46 การติดฟิล์ม PI ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะเฟรม

5.5.4 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า

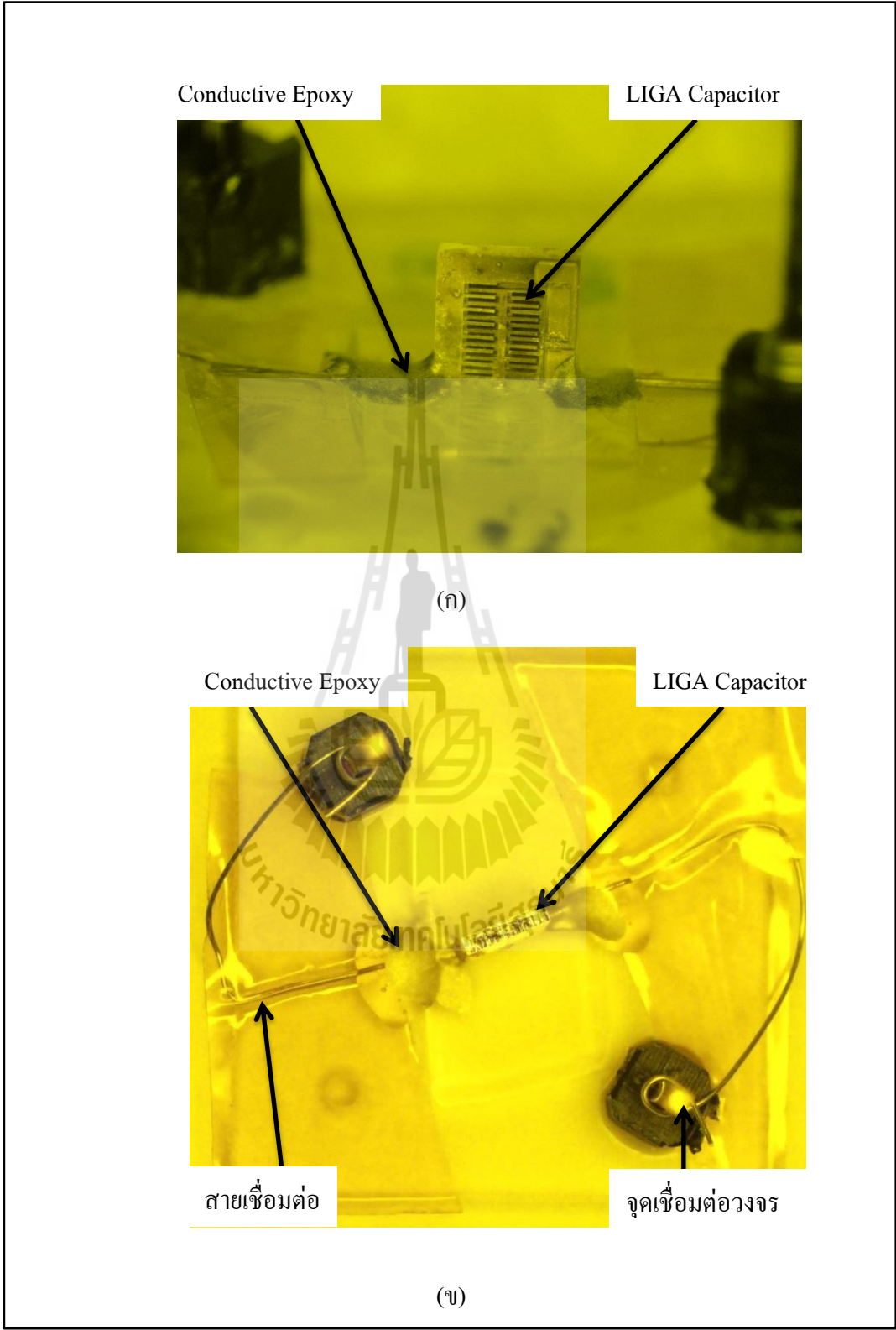
เมื่อติดไดอะแฟรมเรียบร้อยแล้ว ต่อมาเป็นการติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม การยึดตัวเก็บประจุให้ติดกับไดอะแฟรมจะใช้กาวอีพอกซีชนิดแห้งเร็ว 5 นาที ติดบนไดอะแฟรมดังรูปที่ 5.47 ก่อนที่จะวางตัวเก็บประจุลงไปดังรูปที่ 5.48(ก) รอให้กาวแห้งเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำเส้นลวดทองแดงวางไว้ให้ชิดกับขั้วของตัวเก็บประจุแล้วติดกาวอีพอกซีให้ลวดทองแดงไม่หลุดออกโดยเว้นช่องที่ปลายของเส้นลวดเพื่อติดกาวนำไฟฟ้า 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 เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุดังรูปที่ 5.51



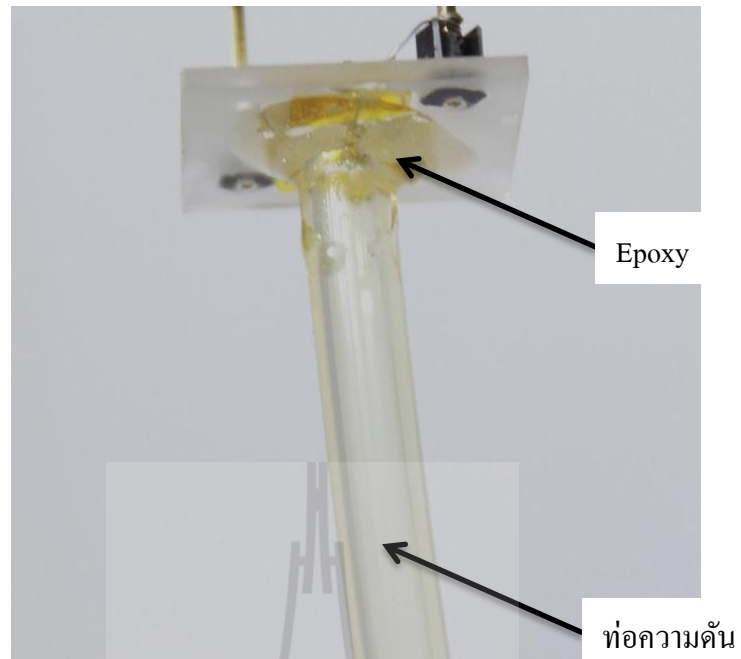
รูปที่ 5.47 การติดกาวอีพอกซีบนไดอะแฟรมเพื่อเชื่อมกับ โครงสร้างตัวเก็บประจุ



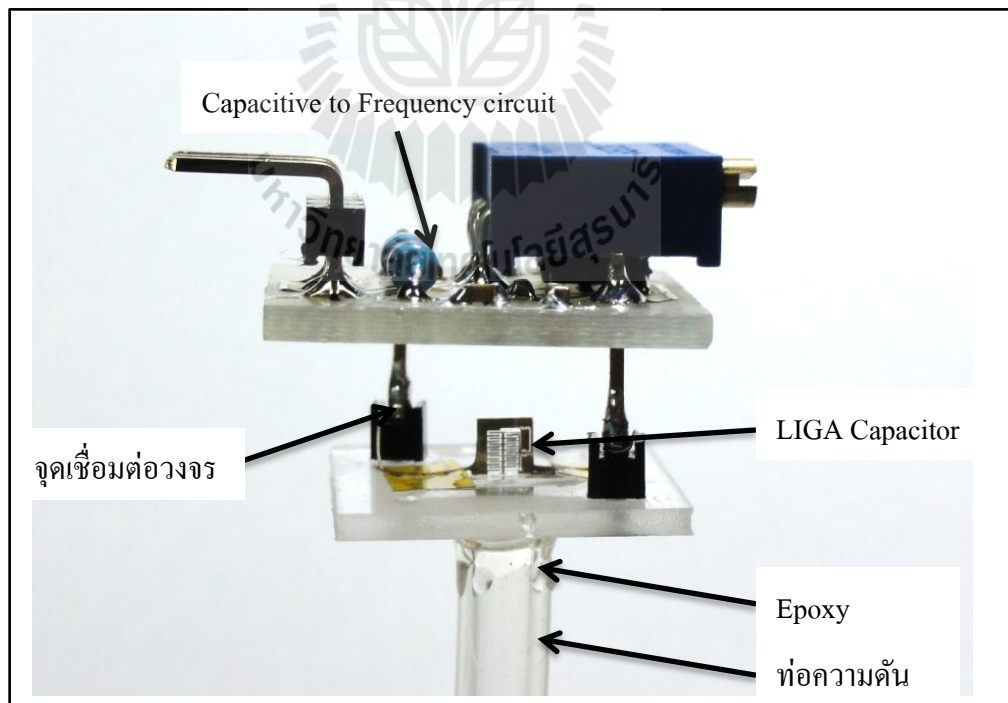
รูปที่ 5.48 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม (ก) ลักษณะการติดโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม (ข) การวางลวดเพื่อเชื่อมต่อกับขั้วของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.49 การเชื่อมต่อสายสายเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ (ก) การเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ (ข) การต่อสายออกไปยังจุดเชื่อมต่อวงจร



รูปที่ 5.50 การเชื่อมต่อท่อความดันเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันด้วยกาวอีพอกซี



รูปที่ 5.51 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

5.6 สรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่กระบวนการวาดลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน และแผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน ซึ่งการใช้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่ใช้แผ่นใสเป็นวัสดุฐานไม่สามารถใช้ฉายรังสีบนสารไวแสงที่มีความหนาแน่นมากกว่า 500 ไมโครเมตรได้เนื่องจากโลหะเงินที่ได้จากการชุบโลหะในบริเวณช่องขนาดเล็กมีความหนาไม่มากพอ จึงไม่สามารถดูดซับรังสีเอกซ์ได้หมดทำให้สารไวแสงบริเวณช่องขนาดเล็กแข็งตัวไม่สามารถล้างออกได้ จึงเลือกใช้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่ใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐานซึ่งสามารถชุบโลหะได้หนาแน่นกว่าแผ่นใสเคลือบโลหะ หลังจากสร้างโครงสร้างด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี จะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์ จากนั้นนำโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ได้ไปเคลือบโลหะโครเมียมและโลหะเงินด้วยกระบวนการสปีดเทอริงและถมสารไวแสงลงไปบนโครงสร้างอีกครั้งเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเชื่อมต่อโครงสร้างของขั้วตัวเก็บประจุให้ติดกันก่อนที่จะขัดฐานกราฟไฟต์ทิ้งไป ล้างสารไวแสงออกจะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุ จากนั้นตัดโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมทั้งสองแบบ เชื่อมต่อสายไฟเข้ากับวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ส่วนของการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะเฉพาะของตัวตรวจรู้ในบทที่ 6 ต่อไป



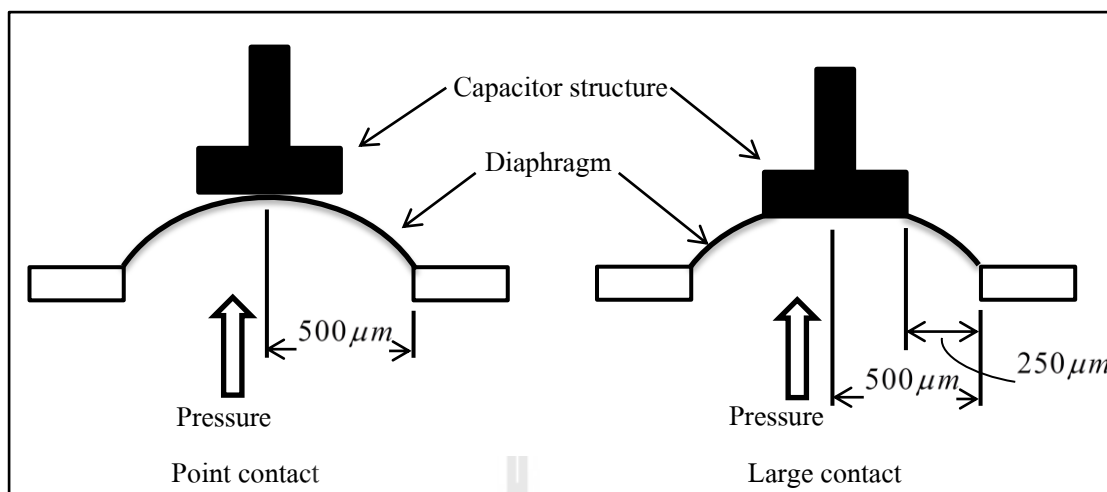
บทที่ 6

การทดสอบคุณลักษณะสมบัติตัวตรวจรู้ความดัน

ในบทนี้จะกล่าวถึง การนำตัวตรวจรู้ความดันที่ได้ออกแบบและสร้าง มาทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งจะทำการทดสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 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 $\nu = 0.55$ $E = 4.3\text{MPa}$ $h = 120\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 0\mu\text{m}$ ส่วนไดอะแฟรม 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 ไม่สามารถติดตัวเก็บประจุเป็นจุดสัมผัสขนาดเล็กได้ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ออกแบบมีจุดสัมผัสขนาดใหญ่ ในการติดตั้งจึงใช้พื้นที่ในการติดตั้งขนาดใหญ่ (Large contact) ดังรูปที่ 6.1

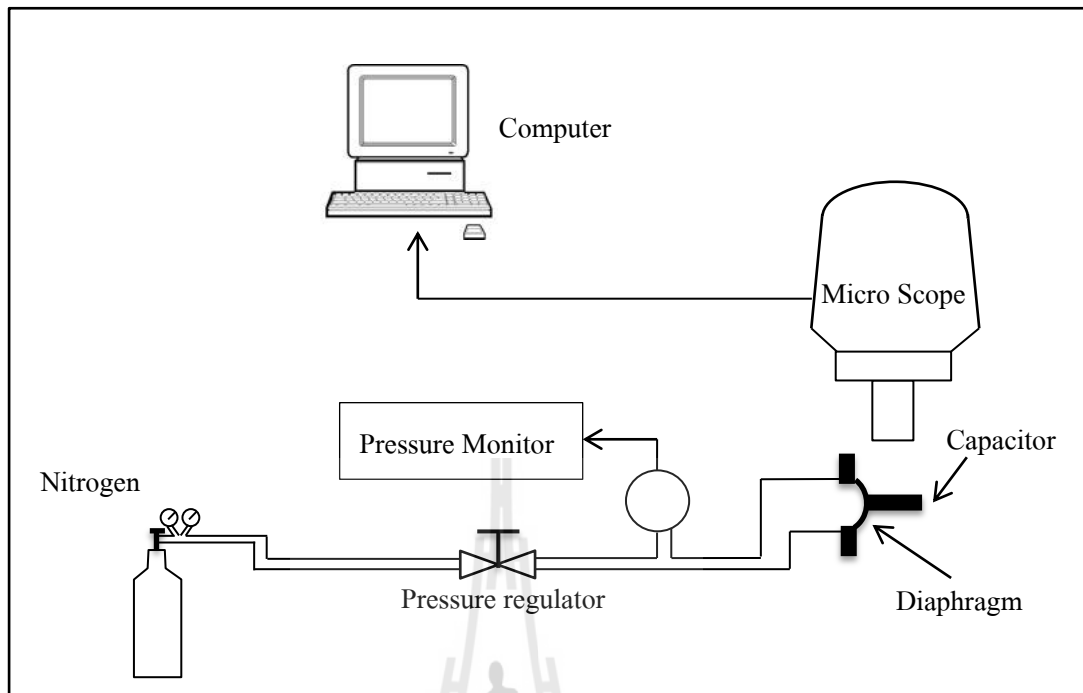


รูปที่ 6.1 ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรมแบบ Point contact (ซ้าย)
และแบบ Large contact (ขวา)

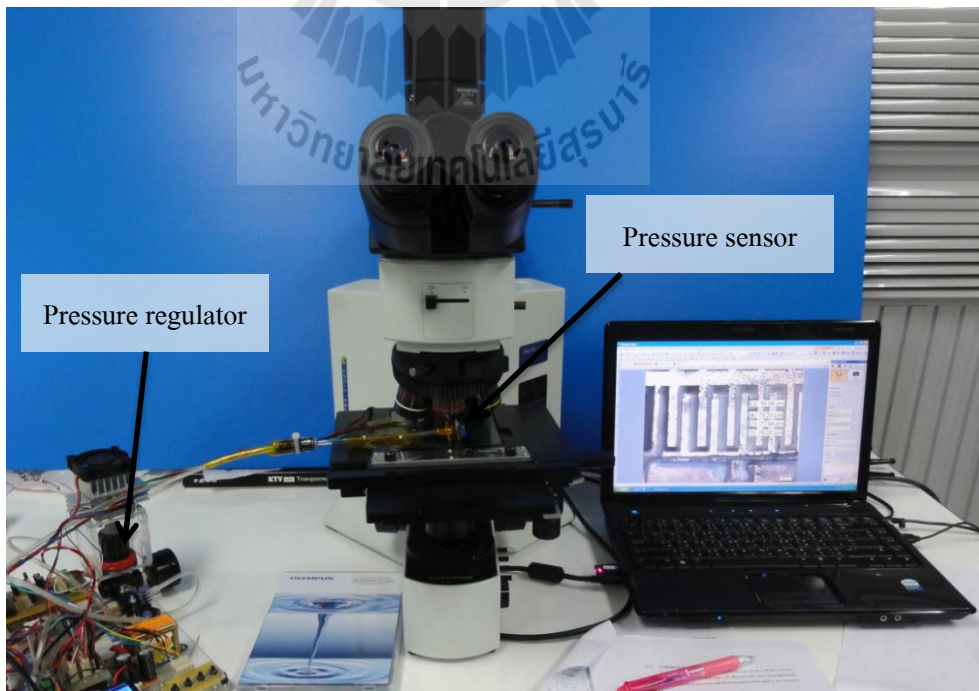
ในรูปที่ 6.1 เป็นลักษณะของการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีพื้นที่การติดตั้งตัวเก็บประจุ การโค้งตัวสูงสุดของไดอะแฟรมจึงไม่ใช่จุดกึ่งกลาง แต่การโค้งตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $r = 250 \mu\text{m}$ ดังนั้นการคำนวณการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีพื้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีดังรูปที่ 6.1(ข) จะใช้สมการการโค้งตัว 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 $\nu = 0.35$ $E = 6.12 \text{ GPa}$ $h = 25 \mu\text{m}$ $a = 500 \mu\text{m}$ $r = 250 \mu\text{m}$ ผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมทั้งสองชนิดเป็นดังรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 เส้นที่เป็น Large contact

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

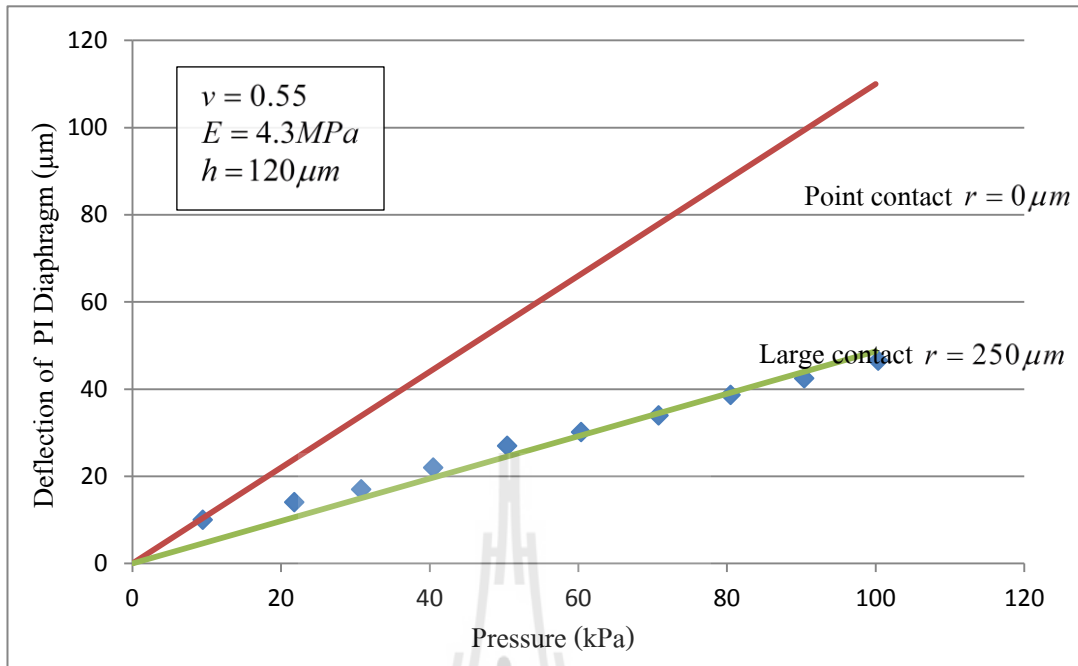
ผลการทดสอบการโค้งตัวของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS มีผลการทดสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโค้งตัวทั้งสองกรณี เป็นดังรูปที่ 6.4 และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโค้งตัวทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 6.5



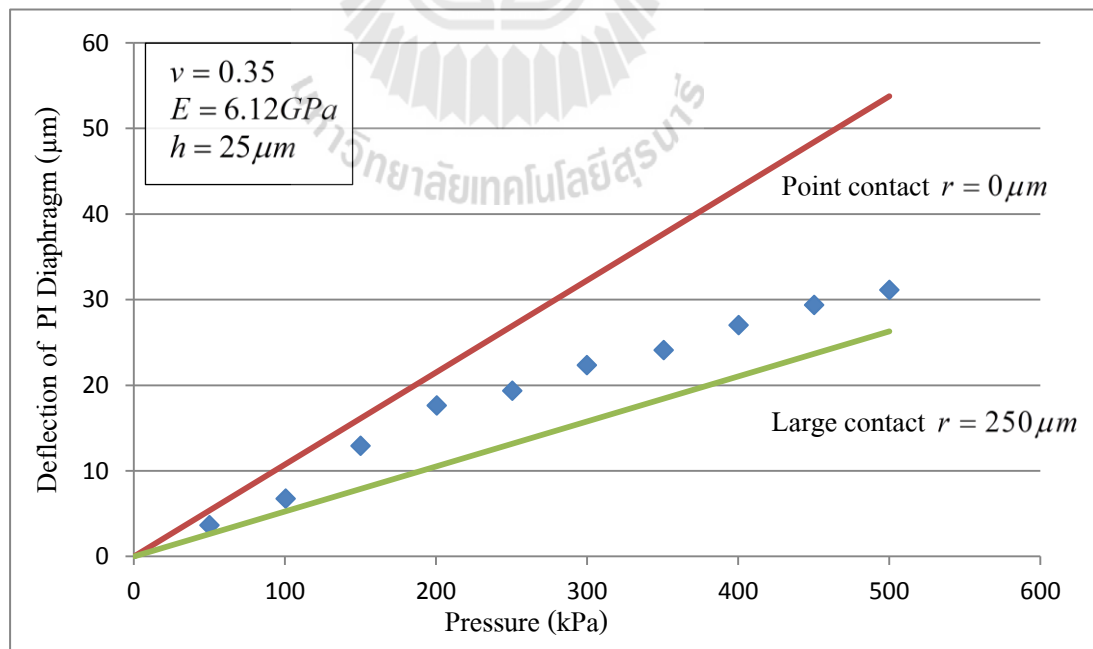
รูปที่ 6.2 ไคอะแกรมการทดสอบวัตรยะการโก่งตัวของไคอะแฟรมที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไคอะแฟรม



รูปที่ 6.3 ภาพขณะทำการทดสอบการวัตรยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS
เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI
เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

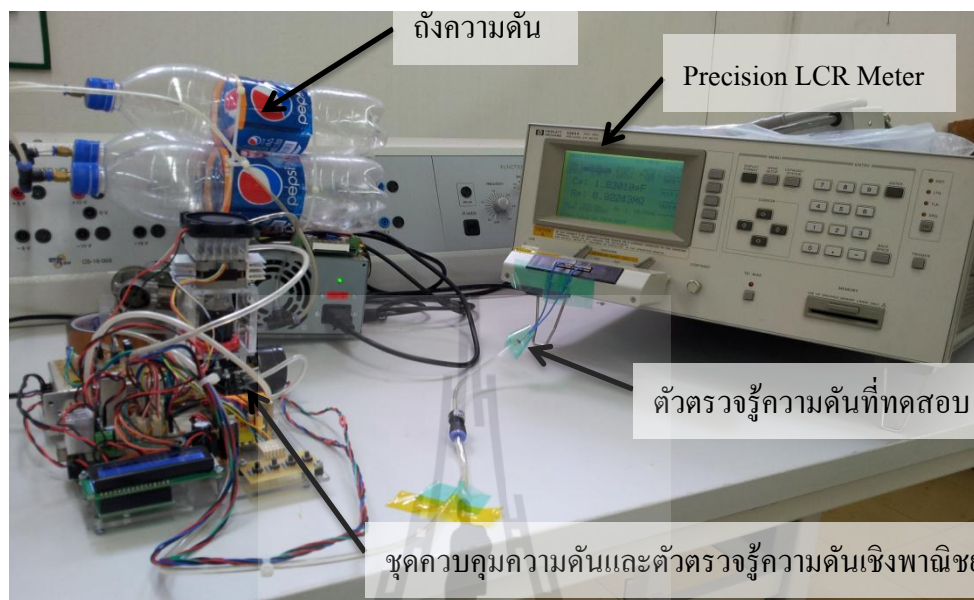
จากรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 การทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสอบแบบ ผลการทดสอบพบว่า ไดอะแฟรมเป็น PDMS มีผลการทดสอบใกล้เคียงกับทางคณิตศาสตร์ ส่วนไดอะแฟรมเป็น PI ผลการทดสอบใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ความดัน 0 – 200 kPa ส่วนที่ความดันค่าสูงกว่า 200 kPa ระยะเวลาการโก่งตัวจะห่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พอสมควร ซึ่งเกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมมีพื้นที่ในการติดกาวแต่ในการคำนวณจะกำหนดให้พื้นที่การติดกาวเป็นจุดขนาดเล็กไม่มีผลต่อการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม จึงทำให้การโก่งตัวของไดอะแฟรมมีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังผลการทดสอบ

6.2 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า

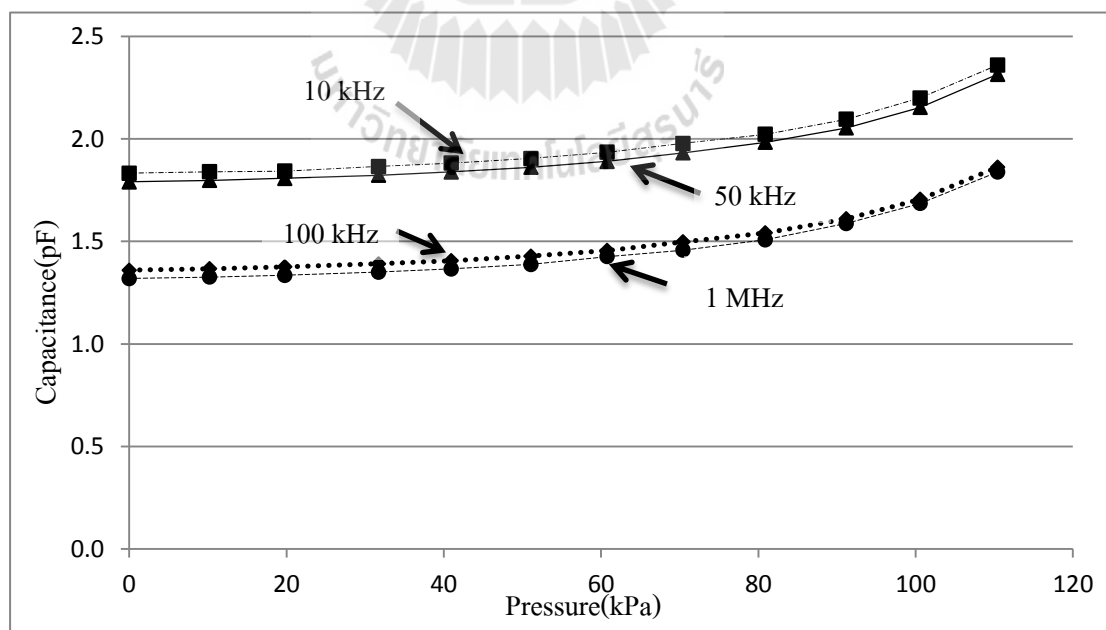
การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่บนไดอะแฟรม ซึ่งจะใช้ Precision LCR Meter ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 4284A ซึ่งสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆได้ตั้งแต่ 20 Hz – 1 MHz และเนื่องจากตัวเก็บประจุมีความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะมีค่าแปรผันกับความถี่เช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ใช้งานต่างๆจึงมีค่าไม่เท่ากัน 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 เป็นตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานในการวัด ซึ่งการอ่านความดันจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านสัญญาณอนาล็อกผ่านวงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต และคำนวณค่าความดันจากสัญญาณที่อ่านได้โดยอ่านสัญญาณ 100 ครั้งระยะเวลาห่างในการอ่าน 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 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันในทุกๆความถี่ ในการนำตัวตรวจรู้ความดันไปใช้งานที่

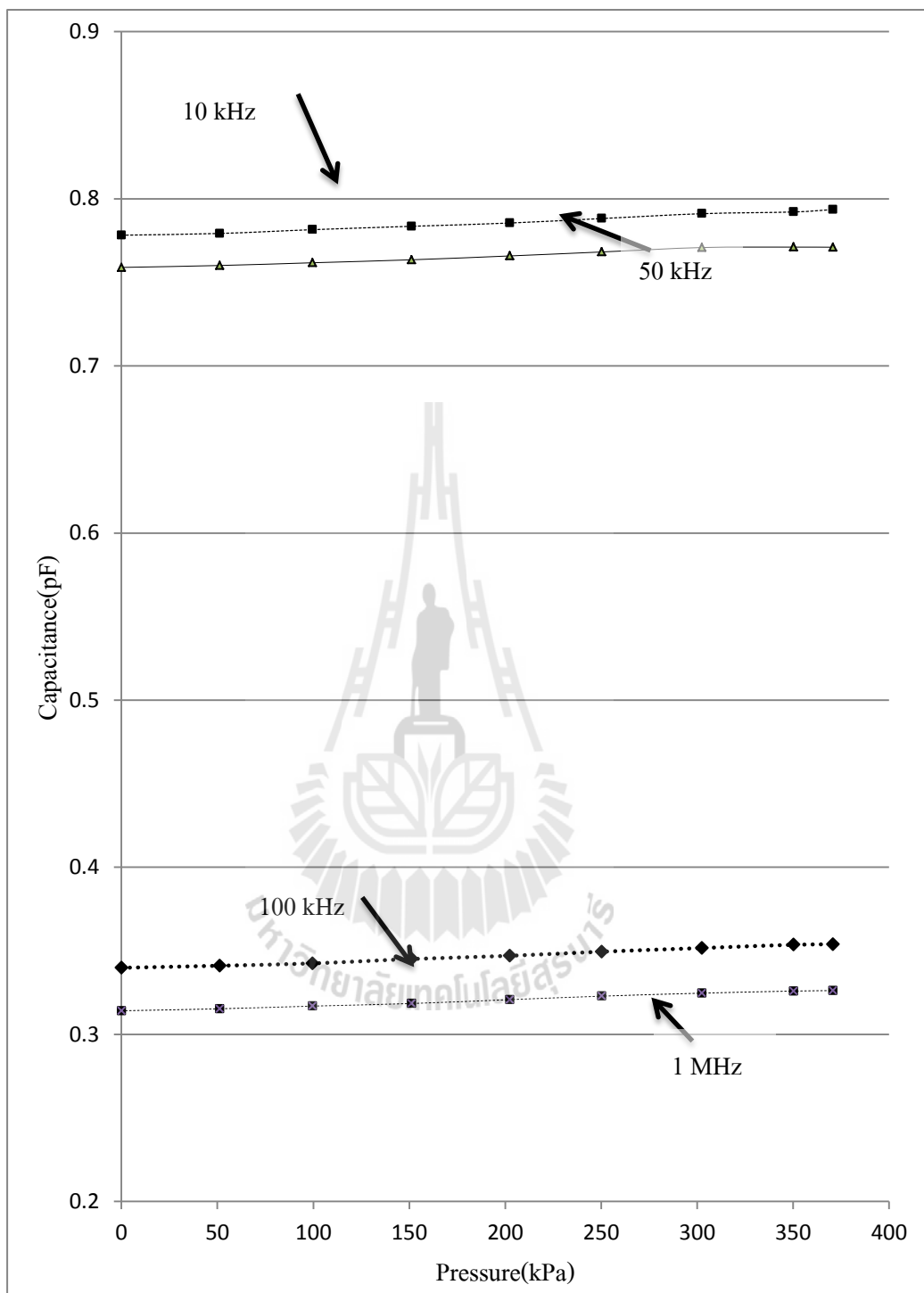
ความถี่อื่นๆนอกเหนือจากการทดสอบ สามารถใช้สมการร่วมกันได้โดยการลบค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นออกไป



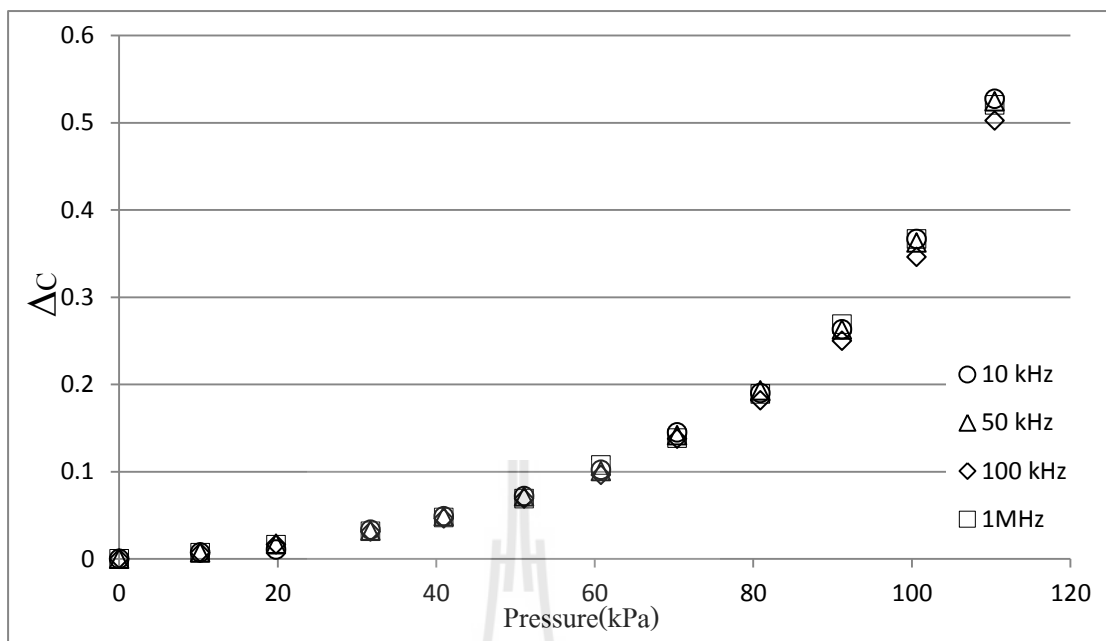
รูปที่ 6.6 ชุดทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง Precision LCR Meter



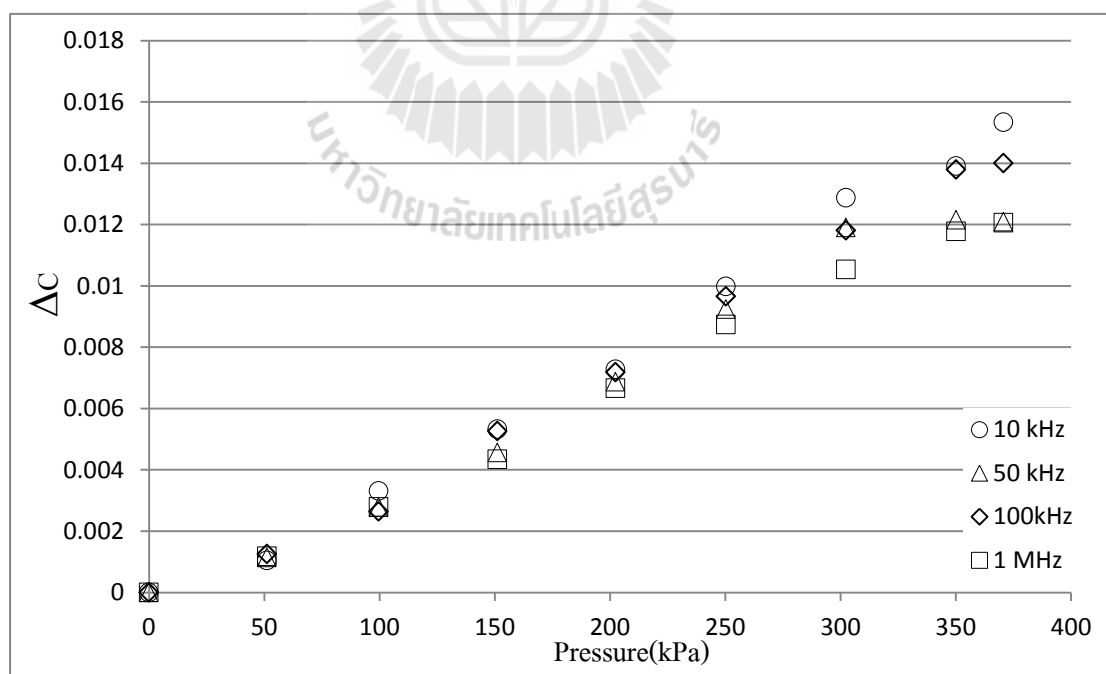
รูปที่ 6.7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



รูปที่ 6.8 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้
ความดัน SUT-I ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



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



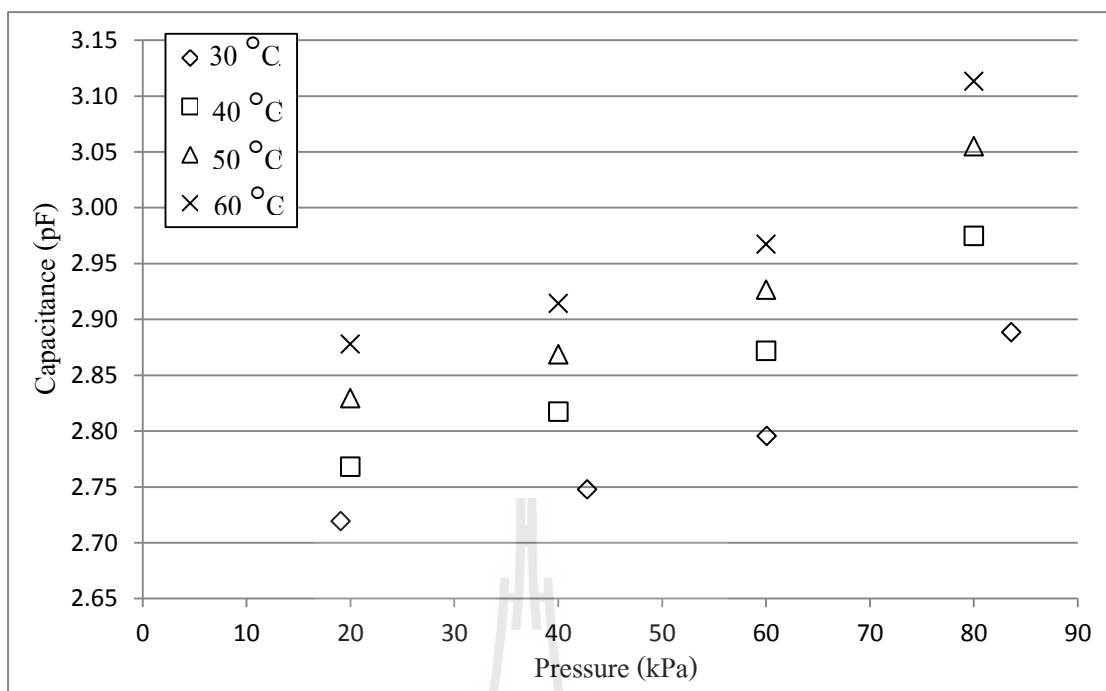
รูปที่ 6.10 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ
เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz

6.3 การทดสอบผลของอุณหภูมิ

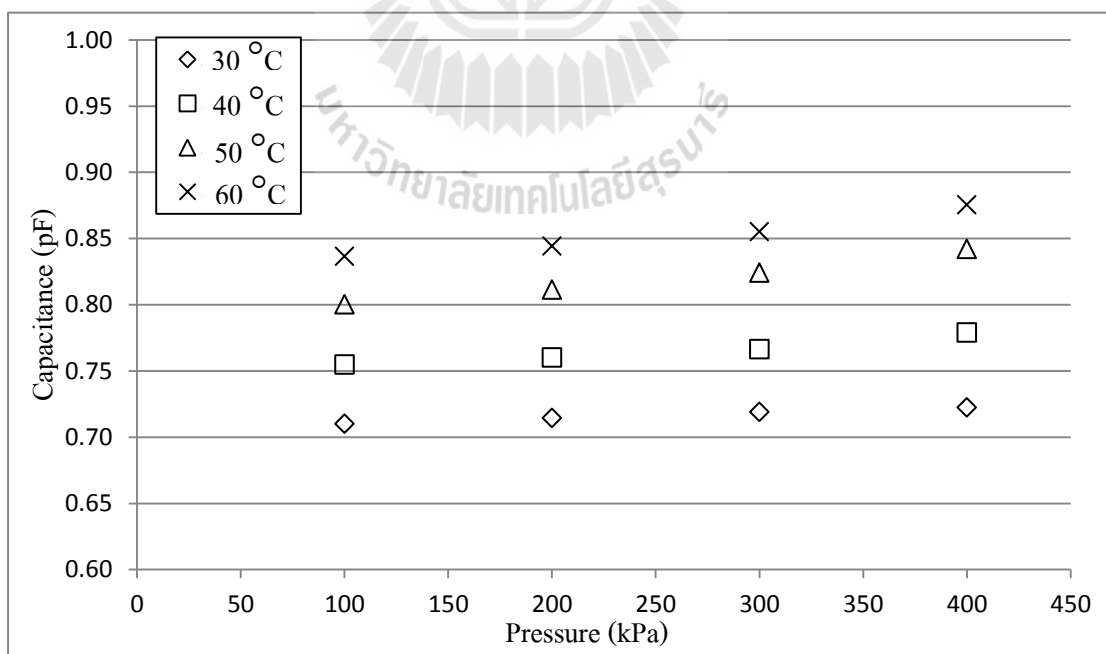
การใช้งานตัวตรวจรู้ความดันในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ตัวตรวจรู้ความดันที่ดีจะต้องตอบสนองต่อความดันเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติผลของสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างก็มีผลต่อการตอบสนองของตัวตรวจรู้ โดยปัจจัยหลักๆ ที่ให้ความสำคัญมากที่สุดคือ ผลของอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อค่ามอดูลัสของยังของวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นไคอะแพรม ในการทดสอบผลของอุณหภูมิของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นนี้ จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงสุด 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัสดุที่ใช้ประกอบตัวตรวจรู้ซึ่งเป็นแผ่น PMMA หรือ Acrylic สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 83 องศาเซลเซียส ในส่วนของวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับตัวตรวจรู้ในการใช้งานจริงซึ่งไม่สามารถแยกออกมาได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสายเชื่อมต่อดังนั้นในการทดสอบผลของอุณหภูมิ จะต้องทดสอบพร้อมกับวงจรด้วยเช่นกัน

ในส่วนของการทดสอบ จะทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบคือ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น 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 และลดอุณหภูมิลงมาจนถึงอุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.11 ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น PI จะทำการทดสอบที่ความดัน 100 kPa 200 kPa 300 kPa และ 400 kPa ตามลำดับในแต่ละความดันจะทำการทดสอบในเงื่อนไขเดียวกับการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น PI ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.12

จากการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบ จากรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลที่มีความดันเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกันระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้า ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น PDMS ที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป 10 องศาเซลเซียส ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเฉลี่ยเท่ากับ 0.0672 pF หรือเท่ากับ $0.00672 \text{ pF}/^{\circ}\text{C}$ ส่วนตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น PI มีค่าเท่ากับ $0.00448 \text{ pF}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิของไคอะแพรม PI ดีกว่าไคอะแพรม PDMS เนื่องจาก PI มีผลของอุณหภูมิน้อยกว่า PDMS



รูปที่ 6.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆด้วย
เครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz



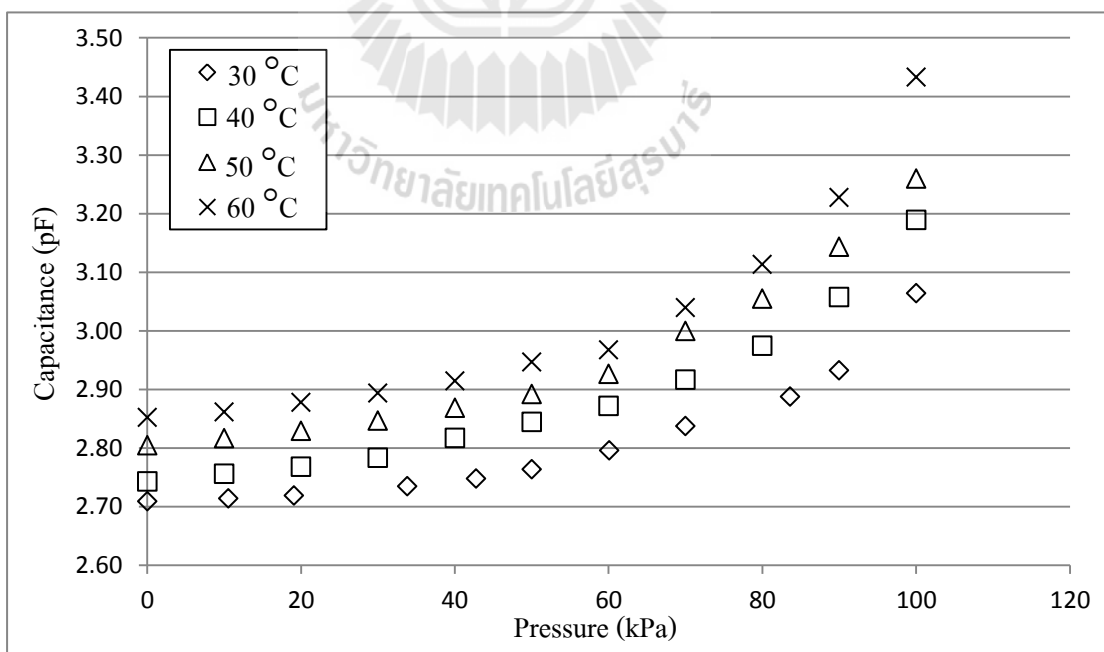
รูปที่ 6.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความดันต่างๆด้วย
เครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100k Hz

6.4 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์

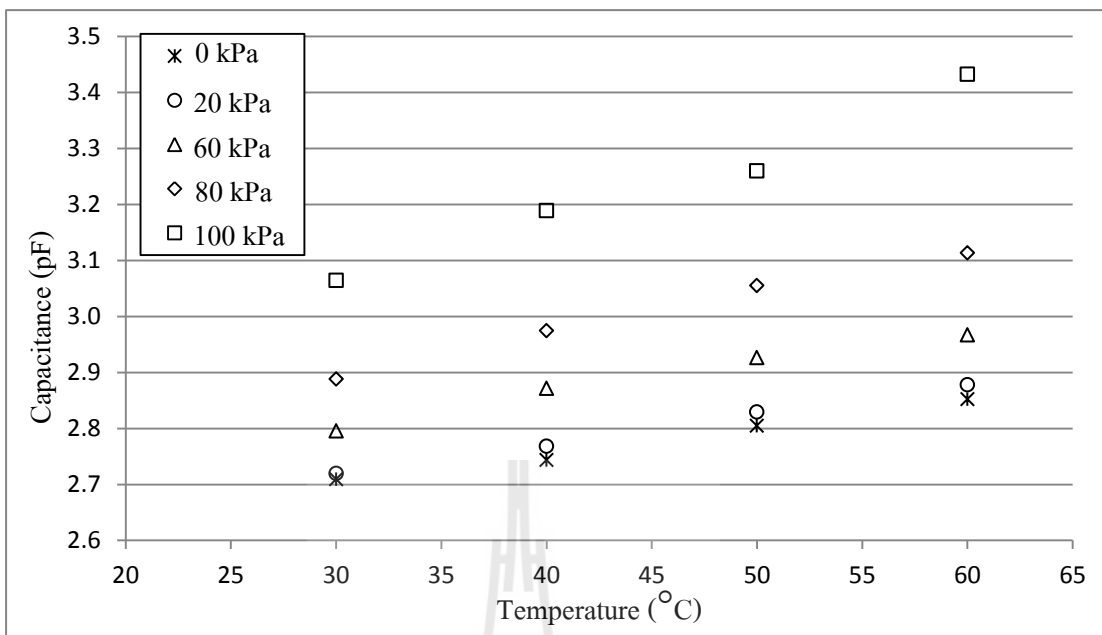
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันและทำการทดสอบผลของอุณหภูมิแล้ว ขั้นตอนที่สำคัญต่อไปคือ การสอบเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์เพื่อให้สามารถวัดความดันได้จริง ซึ่งวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.4.1 การทดสอบตัวตรวจรู้ SUT-S กับตัวตรวจรู้ MPX4250

การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันจะทำการทดสอบความดันของอากาศอัดด้วยปั๊มอัดอากาศโดยกำหนดความดันสูงสุดที่ 100 kPa จากการทดสอบผลของอุณหภูมิมพบว่า 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 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6.14 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆ

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 ความดันก้ำซมีหน่วยเป็น kPa

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

C คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น pF

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

ความดัน ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวตรวจจึงอยู่ในรูปความดัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความจุไฟฟ้า จากข้อมูลการวัดความจุไฟฟ้าด้วย เครื่อง LCR meter ที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคล้ายสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ดังนั้นจึงกำหนดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง $ax^2 + bx + c = 0$ โดยที่ x คือค่าความดันซึ่งอ่านได้จากตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐาน ดังนั้นสามารถหาค่า x ได้โดยการหารากของสมการดังกล่าวโดย

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

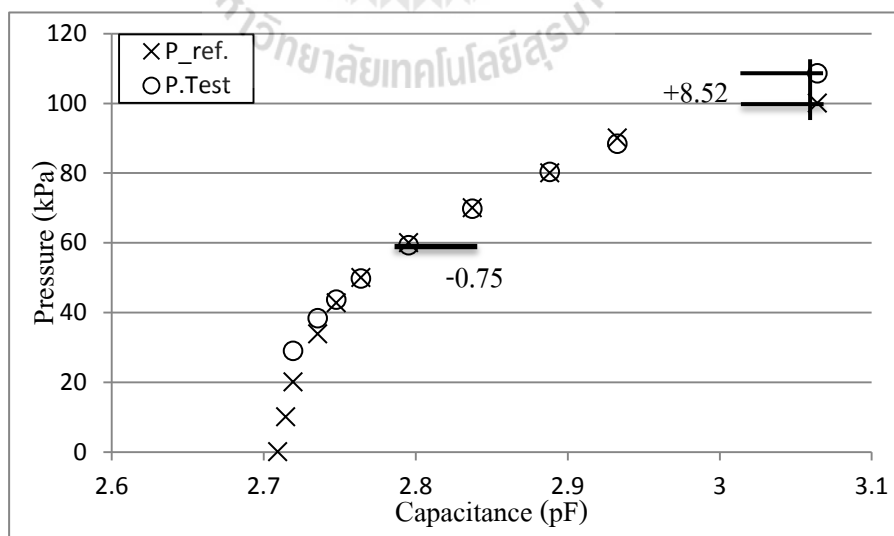
เมื่อสมการที่ (6.1) อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียลกำลังสองจะได้

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

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

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

เมื่อนำค่าจากสมการที่ 6.2 มาวาดกราฟเทียบกับค่าความดันจริงจากผลทดสอบเพื่อหาค่าความความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดันที่อุณหภูมิใช้งาน 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 6.15

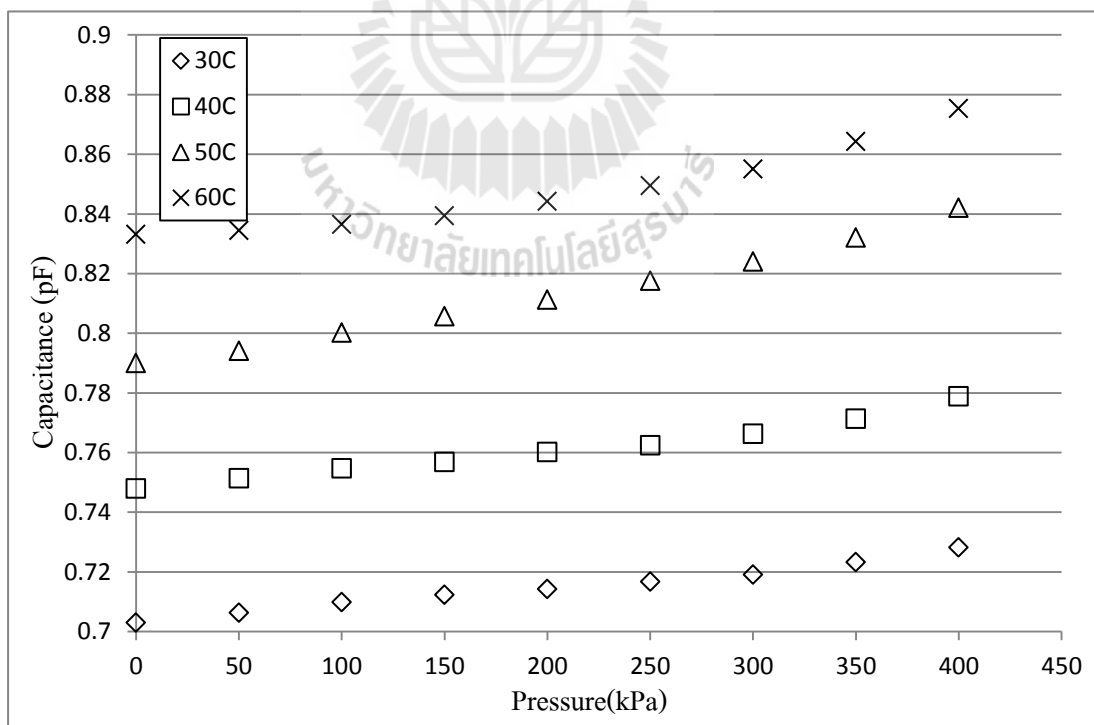


รูปที่ 6.15 ค่าความดันที่ได้จากสมการเปรียบเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

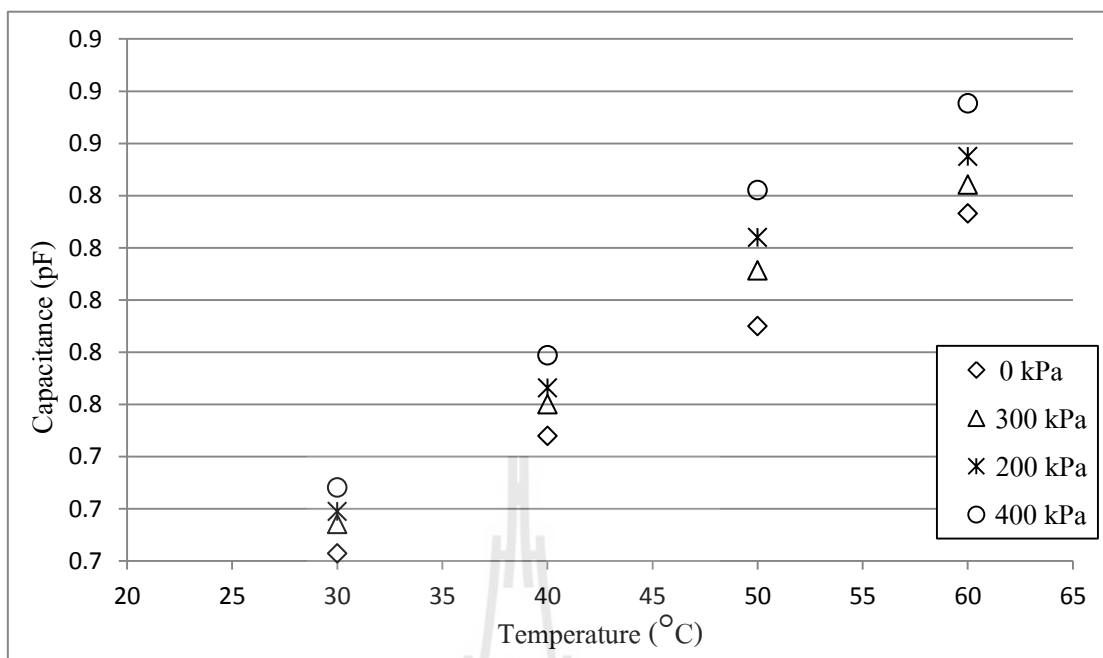
จากรูปที่ 6.14 ในการแสดงผลคำนวณจากสมการปรับเทียบกับและค่าความดันจริงจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ในช่วงความดัน 20kPa – 100 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนด้านบวกสูงสุด 9 % และค่าความคลาดเคลื่อนด้านลบสูงสุด 0.75 % สามารถสรุปได้ว่าสามารถสรุปได้ว่า ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S มีค่าความแม่นยำ (accuracy) เท่ากับ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

6.4.2 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ SUT-I กับตัวตรวจรู้ MPX5700

การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันจะทำการทดสอบความดันอากาศอัดโดยกำหนดความดันสูงสุดที่ 400 kPa โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ เช่นเดียวกับตัวตรวจรู้ไดอะแฟรม 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 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6.17 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆ

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

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

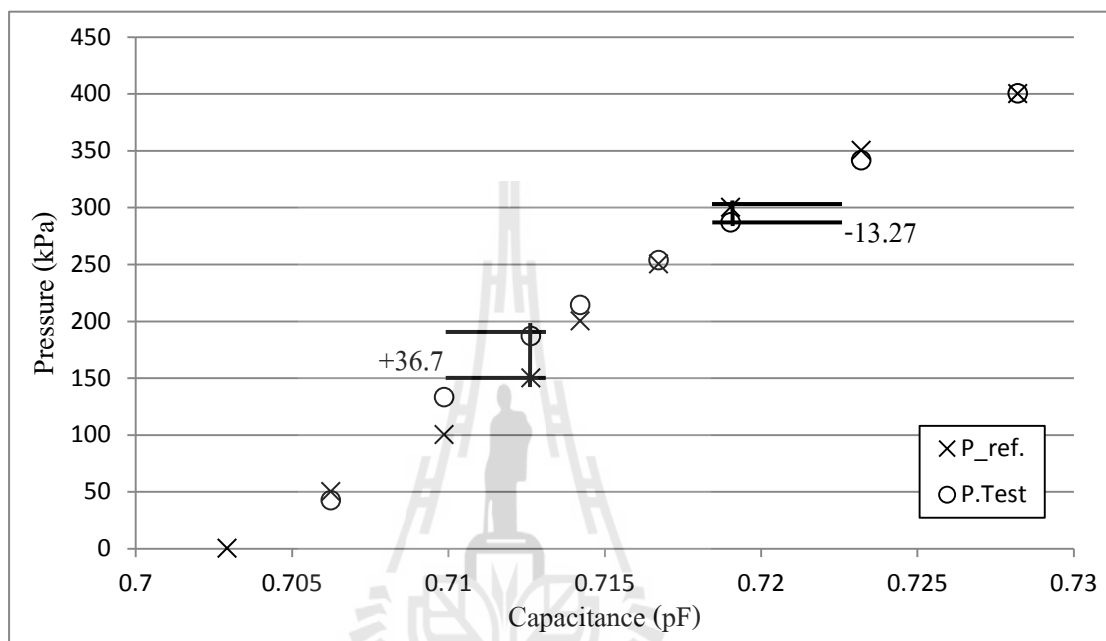
จากการทดสอบตัวตรวจรู้มีค่าความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.03343 fF/kPa ความไวสูงสุดอยู่ที่ 0.04811 fF/kPa จากสมการที่ (6.3) เป็นสมการการปรับเทียบตัวตรวจรู้ความดันไม่สามารถใช้เป็นสมการการใช้งานได้ สมการใช้งานจะใช้สมการที่ 6.2 โดยมีค่าตัวแปรในสมการดังนี้

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

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

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

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

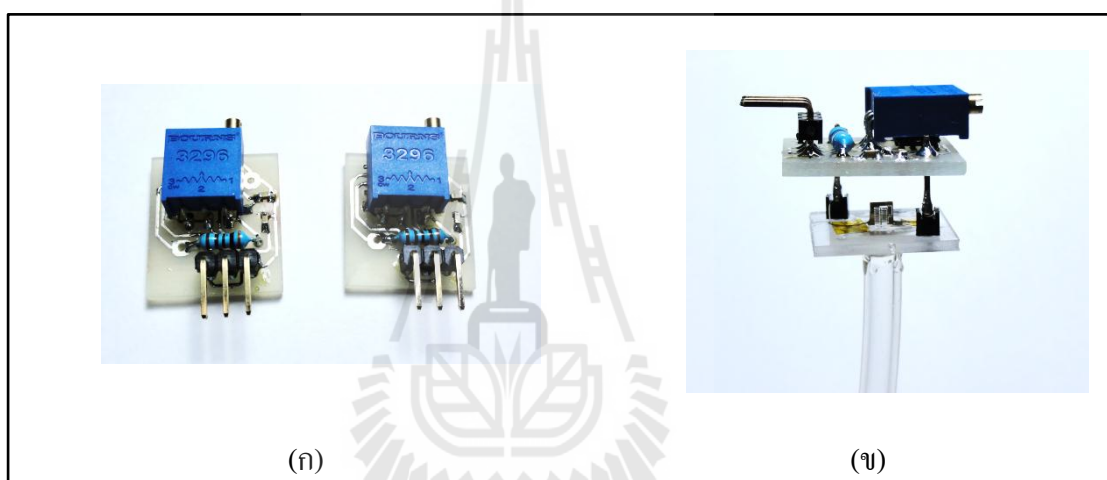
6.5 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าและชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

หลังจากสร้างตัวตรวจรู้ความดันและเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ในการนำตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นค่าความจุไฟฟ้า จะต้องใช้วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปมีให้เลือกใช้หลายรูปแบบ เช่น วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล (Capacitance to digital converter) ใช้ไอซี AD7746 AD7150 หรือ LC717A วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน (Capacitance to voltage converter) ใช้ไอซีเบอร์ CAV444 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ (Capacitance to frequency converter) ใช้ไอซีกำเนิดสัญญาณนาฬิกาทั่วไป ซึ่งวงจรทั้งสามแบบที่กล่าวมาข้างต้น สองแบบแรกเป็นวงจรที่ใช้อ่านค่าความจุไฟฟ้าของจอสัมผัสแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive touch screen) ซึ่งมีราคาสูง ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาก

โดยทั่วไปจะใช้วงจรถ่ายค่าความถี่ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ เป็นหลัก ซึ่งค่าความถี่ที่ได้จากวงจรถ่ายค่าความถี่ ขึ้นอยู่กับ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ในวงจร ซึ่งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าง่ายๆนี้ สามารถสร้างขึ้นมาเอง หรือใช้ไอซีที่ตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบสำเร็จรูปซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าน้อยได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซีเป็นตัวกำเนิดความถี่แบบที่ใช้ในงานในวงจรทั่วไป ซึ่งมีราคาถูก เพราะโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ทำการออกแบบขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มากพอสมควร ซึ่งสามารถใช้ไอซีกำเนิดความถี่ทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดได้ โดยจะเลือกใช้ Precision timer เบอร์ 555 เป็นไอซีกำเนิดความถี่ที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่โดยมีสมการการคำนวณค่าความถี่ดังสมการที่ (6.4) ในการต่อใช้งานแบบ Astable ดังรูปที่ 6.20(ก) โดยออกแบบใช้ค่าความต้านทาน R_A เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ และ R_B เท่ากับ 330 kΩ ส่วนวงจรที่ติดตั้งเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันจะออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ให้มีขนาดเท่ากับ อะคริลิกที่เป็นฐานของตัวตรวจรู้ความดันขนาด 1×1 เซนติเมตรดังรูปที่ 6.19(ก) เพื่อเชื่อมต่อกับขั้วของตัวตรวจรู้ความดันได้โดยตรงรูปที่ 6.19 (ข) การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าไว้กับตัวตรวจรู้ความดัน เพื่อลดความยาวของสายไฟเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ ซึ่งจะช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายเชื่อมต่อ และลดสัญญาณรบกวนได้ และสามารถเชื่อมต่อกับสัญญาณความถี่เข้ากับชุดทดสอบความดันได้โดยตรง

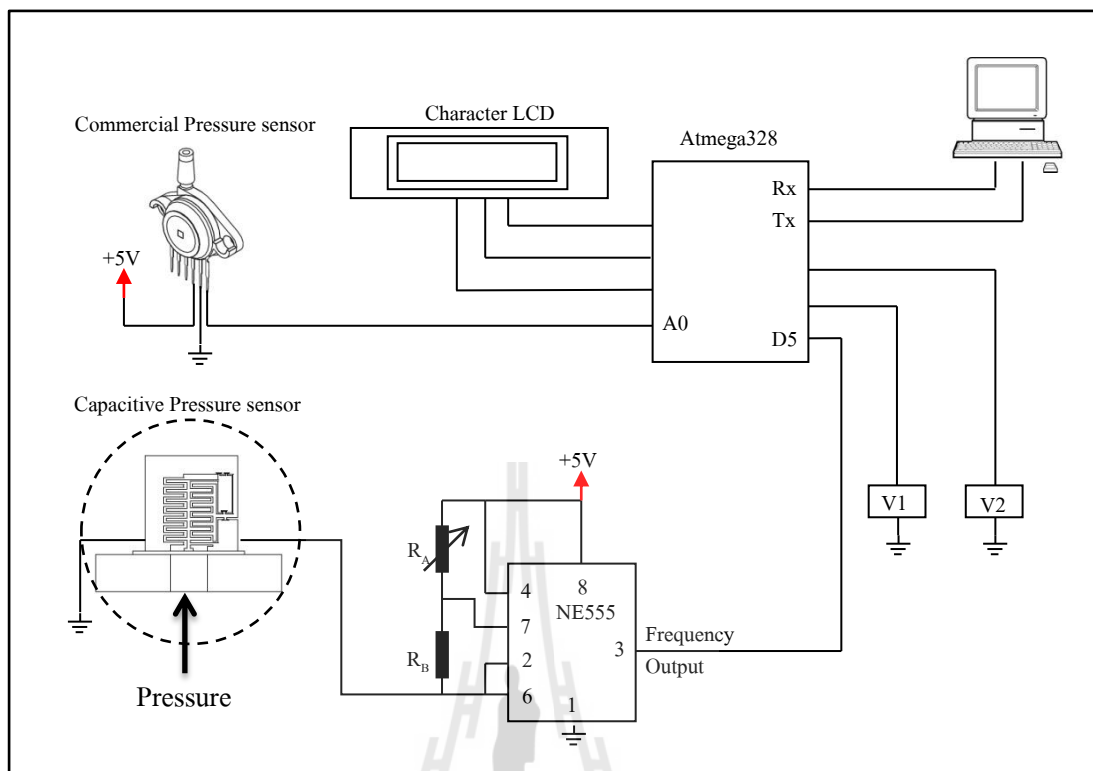
$$f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (6.4)$$

ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าความถี่ที่ได้จาก วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า และมีตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการสอบเทียบจะใช้ตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 ของบริษัท Freescale Semiconductor สำหรับสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่มี ไดอะแฟรมเป็น PI สำหรับวัดความดันในช่วง 0-500 kPa และ MPX4250 สำหรับสอบเทียบตัว ตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS วัดความดันในช่วง 0-100 kPa ในการอ่านค่าจากตัว ตรวจรู้ความดันนี้ ใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ขนาด 10 บิต ภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วคำนวณค่าดิจิทัลเป็นความดัน ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็น ตระกูล AVR Atmega 168 ของบริษัท Atmel และใช้โปรแกรมพัฒนาของ Arduino

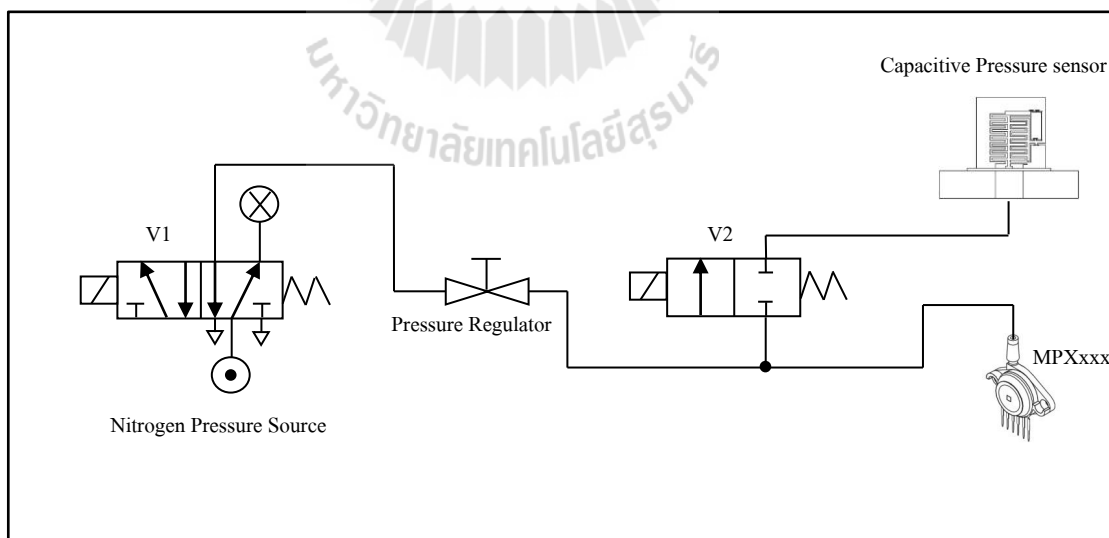


รูปที่ 6.19 การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า
(ข) ตัวตรวจรู้ความดัน

จากนั้นส่งข้อมูลที่อ่านได้จากวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้า เข้าคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยมีวงจรดังรูป 6.20(ก) ในส่วนของ ความดันที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ก๊าซไนโตรเจนผ่านวาล์วนิวเมติกแบบ 2-Position, 4-way, 5-port (V1) ซึ่งสามารถปล่อยความดันในระบบทดสอบให้เท่ากับความดันบรรยากาศในขณะที่วาล์วไม่ ทำงาน จากนั้นจะผ่านตัวควบคุมความดัน(Pressure regulator) และต่อเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันเชิง พาณิชย์ เพื่อวัดความดันที่ออกจากตัวควบคุมความดันเพื่อปรับความดันให้ได้ตามต้องการ เมื่อได้ ความดันที่ต้องการแล้วจะมีวาล์วนิวเมติกแบบ 2-position, 2-way (V2) สำหรับจ่ายความดันให้กับ ตัวตรวจรู้ความดันที่ต้องการทดสอบ โดยมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 6.20(ข) และชุดทดสอบที่ เสร็จสมบูรณ์มีลักษณะดังรูปที่ 6.21

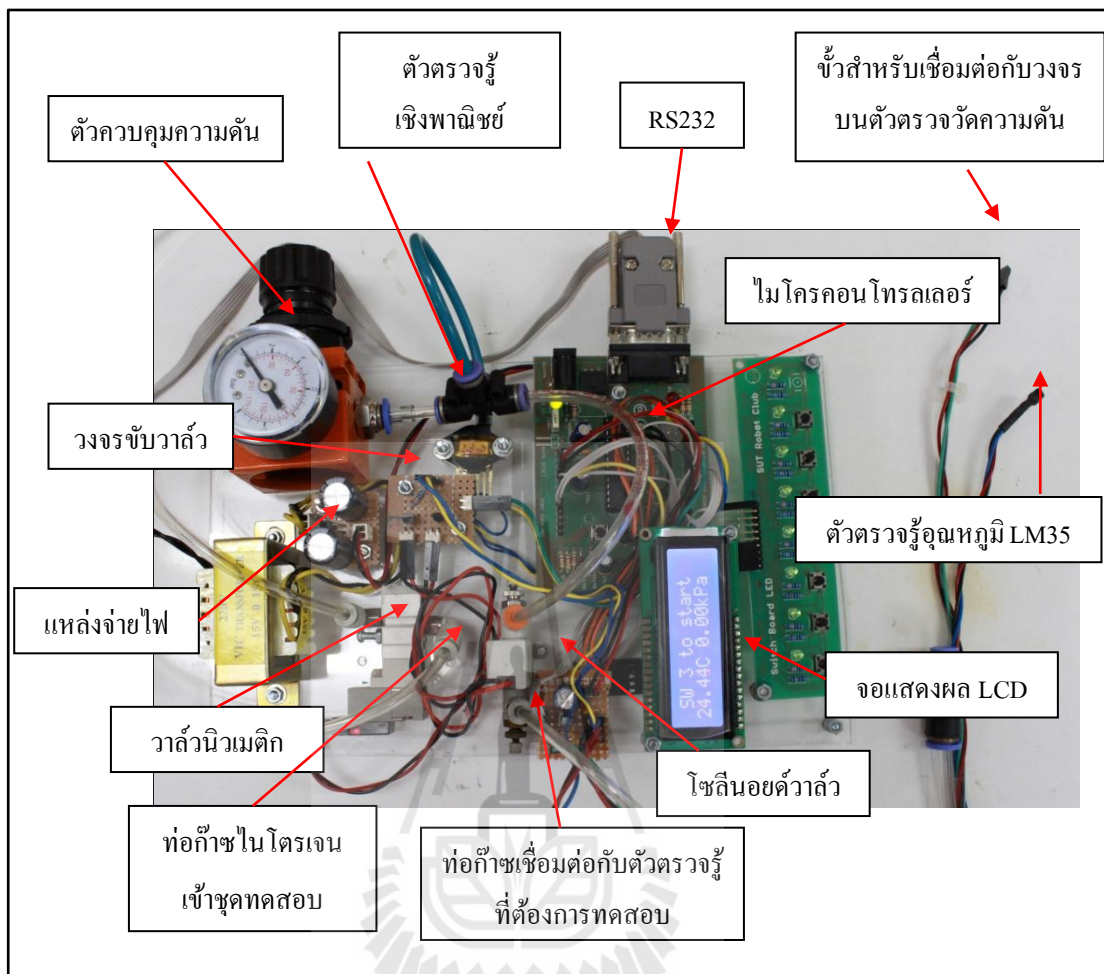


(ก)



(ข)

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 (6.4) โดยกำหนดค่า $R_1=232.4 \text{ k}\Omega$ $R_2=330 \text{ k}\Omega$ ซึ่ง R_1 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อให้สามารถปรับความถี่

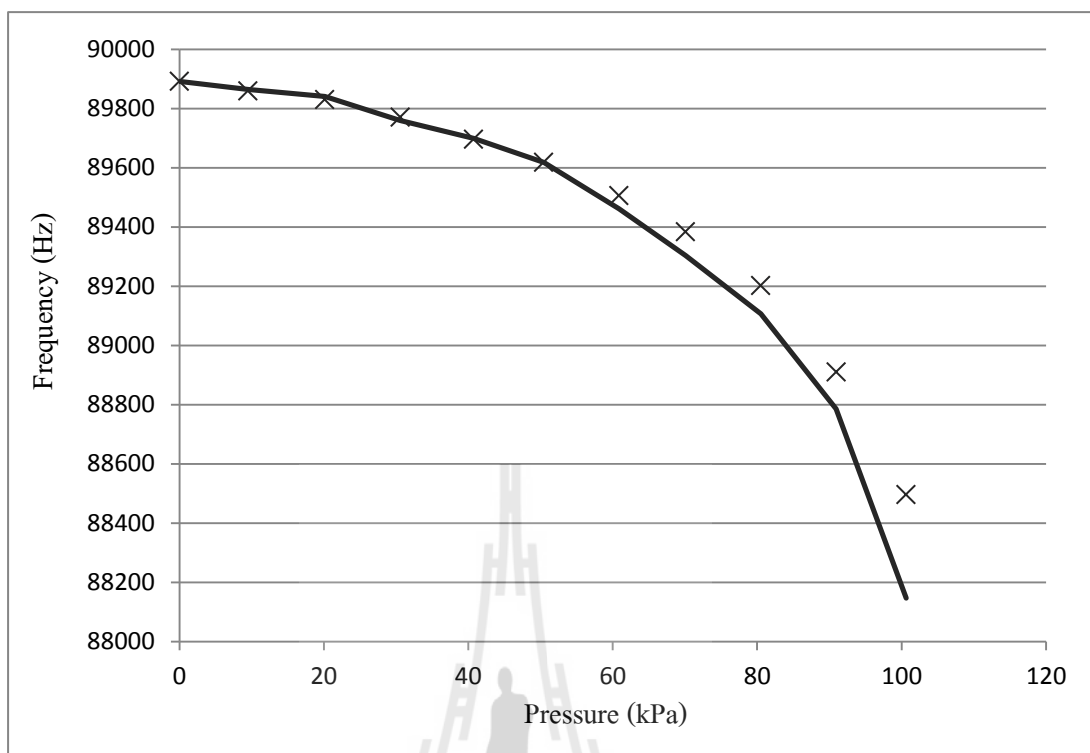
เริ่มต้นตามที่ต้องการได้ ค่าดังกล่าวนี้ได้จากการวัดความต้านทานด้วยมัลติมิเตอร์ ส่วน R_2 เป็นตัวต้านทานค่าคงที่ จากการคำนวณค่าความถี่จากสมการที่ (6.4) ได้ผลดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วยสมการที่(6.4) เทียบกับเทียบกับการทดลองที่ความถี่ต่างๆ โดยกำหนด

$$R_1 = 232.4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 330 \text{ k}\Omega$$

ความดัน (kPa)	ค่าความจุไฟฟ้าจากการวัด (pF)	ความถี่จากการคำนวณ (Hz)	ความถี่จากการวัด (Hz)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
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 (6.4) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแล้วลบกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่วัดจาก LCR meter ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่คำนวณได้เท่ากับ 15.241pF จากตารางการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าความถี่ของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.34 % ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย สามารถนำไปใช้งานได้ กราฟผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดเป็นดังรูปที่ 6.22

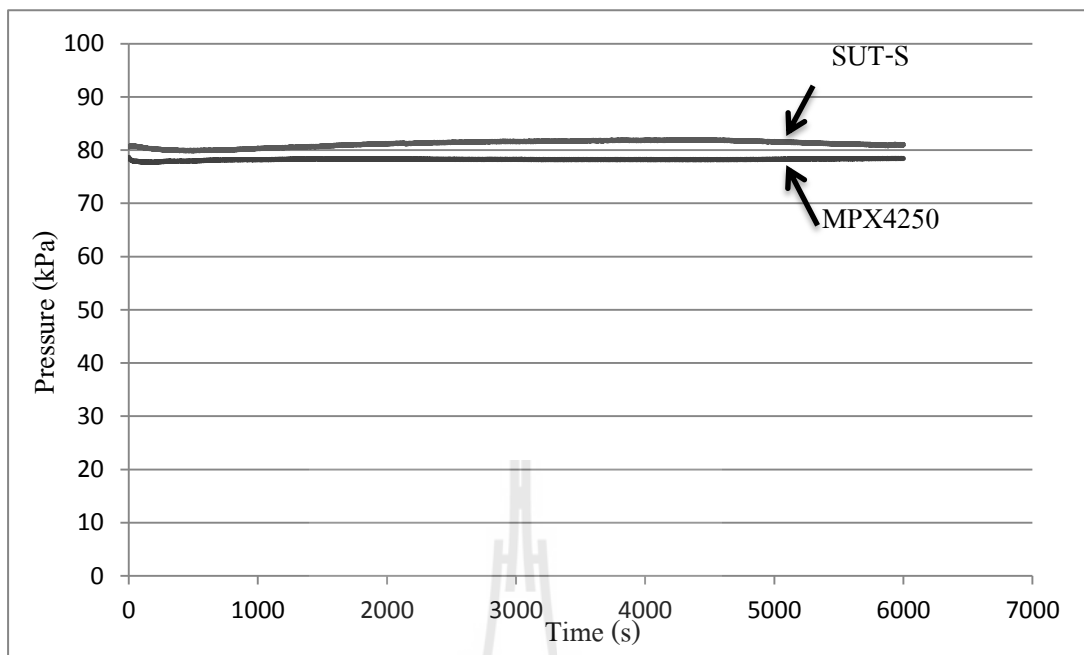


รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วยสมการที่(6.4) เทียบกับการทดลองที่ความดันต่างๆ

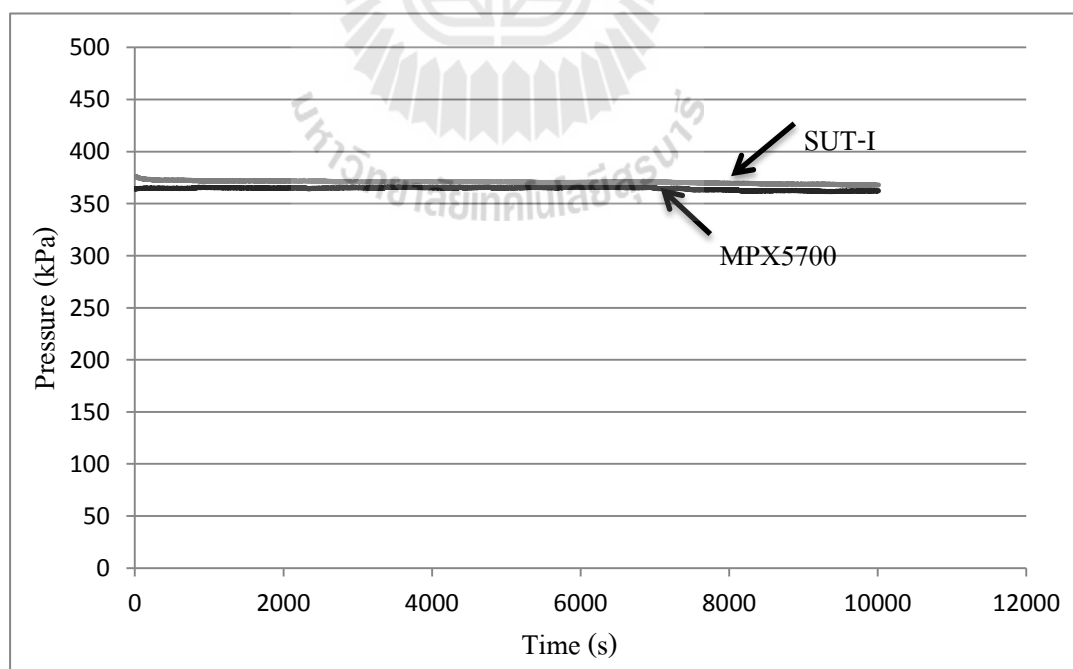
6.7 เสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดัน

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 (6.5) โดยกำหนด $R_1 = 232.4 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$ และคำนวณค่าความดันโดยใช้สมการที่ (6.2)

$$C = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)f} \quad (6.5)$$



รูปที่ 6.23 ค่าความดันของตัวตรวจรู้ MPX4250 เทียบกับตัวตรวจรู้ SUT-S ที่ความดัน 80 kPa และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

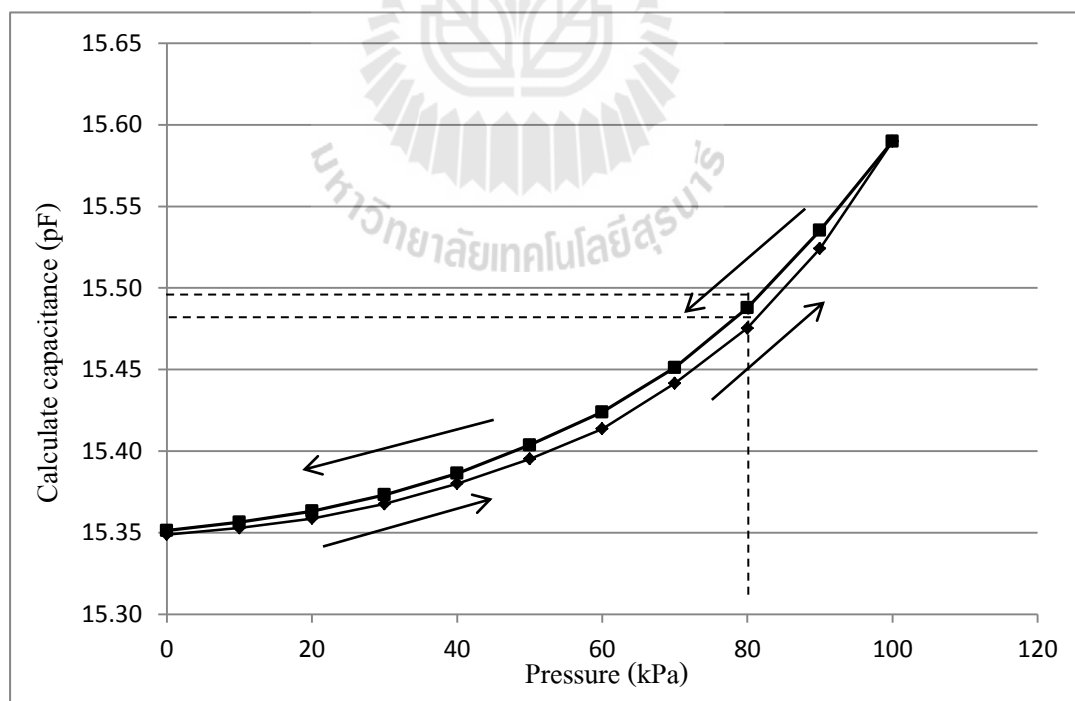


รูปที่ 6.24 ค่าความดันของตัวตรวจรู้ MPX5700 เทียบกับตัวตรวจรู้ SUT-I ที่ความดัน 370 kPa และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ทั้งสองตัวเป็นดังรูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 จากการทดสอบตัวตรวจรู้ SUT-S ที่ความดัน 80 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.81 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบ 6000 วินาที เท่ากับ 0.61 เทียบกับตัวตรวจรู้ MPX4250 ที่มีค่าเท่ากับ 0.128 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวตรวจรู้ SUT-S มีค่าสูงกว่า ซึ่งสรุปได้ว่าตัวตรวจรู้ SUT-S มีเสถียรภาพทางเวลาด้อยกว่า MPX4250 เล็กน้อย ซึ่งค่าที่วัดได้ ยังมีความถูกต้องและไม่ขาดเสถียรภาพ ส่วนตัวตรวจรู้ SUT-I ที่ความดัน 360 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.32 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบ 10000 วินาที เท่ากับ 1.270 เทียบกับตัวตรวจรู้ MPX5700 ที่มีค่าเท่ากับ 1.253 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวตรวจรู้ SUT-I มีค่าใกล้เคียงกับตัวตรวจรู้ MPX5700 ซึ่งสรุปได้ว่าตัวตรวจรู้ SUT-I มีเสถียรภาพทางเวลาใกล้เคียงกับ MPX5700

6.8 ฮีสเตอร์ซิซของตัวตรวจรู้ความดัน

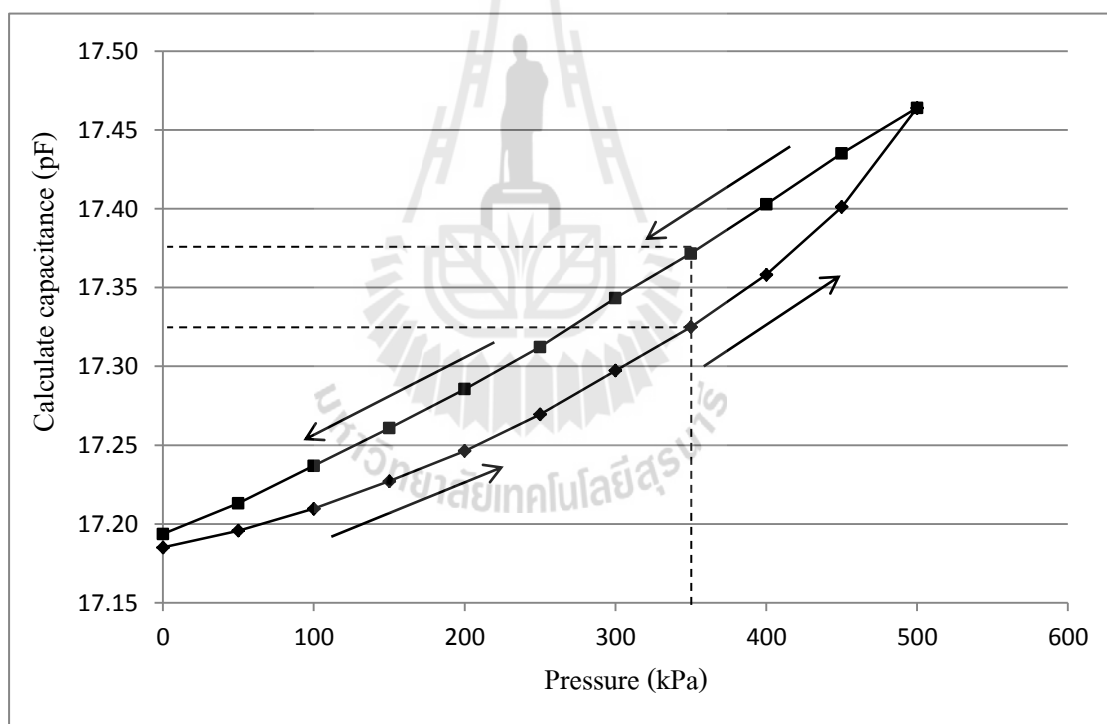
ฮีสเตอร์ซิซ คือความผิดพลาดทางเอาต์พุตของตัวตรวจรู้ความดันที่อินพุตค่าใดค่าหนึ่งเมื่อทำการวัดในทิศทางตรงข้าม ซึ่งจะออกมาในรูปผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่อินพุตค่าเดิม สำหรับตัวตรวจรู้ SUT-S มีผลการทดสอบดังแสดงรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 ผลการทดสอบฮีสเตอร์ซิซของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

ในการทดสอบฮิสเตอร์ีซิสของตัวตรวจรู้ SUT-S ได้ทำการทดสอบโดยการป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้โดยเริ่มจาก 0 kPa เพิ่มครั้งละ 10 kPa ไปจนถึง 110 kPa และปรับลดค่าความดันจาก 100 kPa ลงมาจนถึง 0 kPa โดยแต่ละจุดข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลตัวอย่าง 60 ตัวอย่าง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจะอยู่ในรูปของความถี่ ทำการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้สมการที่ (6.1) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.25 จากการทดสอบฮิสเตอร์ีซิสของตัวตรวจรู้ SUT-S จากรูปที่ 6.20 ช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ความดัน 80 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 72.1 Hz หรือ 0.0108 pF มีค่าความคลาดเคลื่อนฮิสเตอร์ีซิสของค่าความจุไฟฟ้าเต็มสเกลเท่ากับ 5.7 %

การทดสอบฮิสเตอร์ีซิสของตัวตรวจรู้ SUT-I ได้ทำการทดสอบเหมือนกับตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S แต่จะป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้โดยเริ่มจาก 0 kPa เพิ่มครั้งละ 50 kPa ไปจนถึง 500 kPa และปรับลดค่าความดันจาก 500 kPa ลงมาจนถึง 0 kPa ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.26

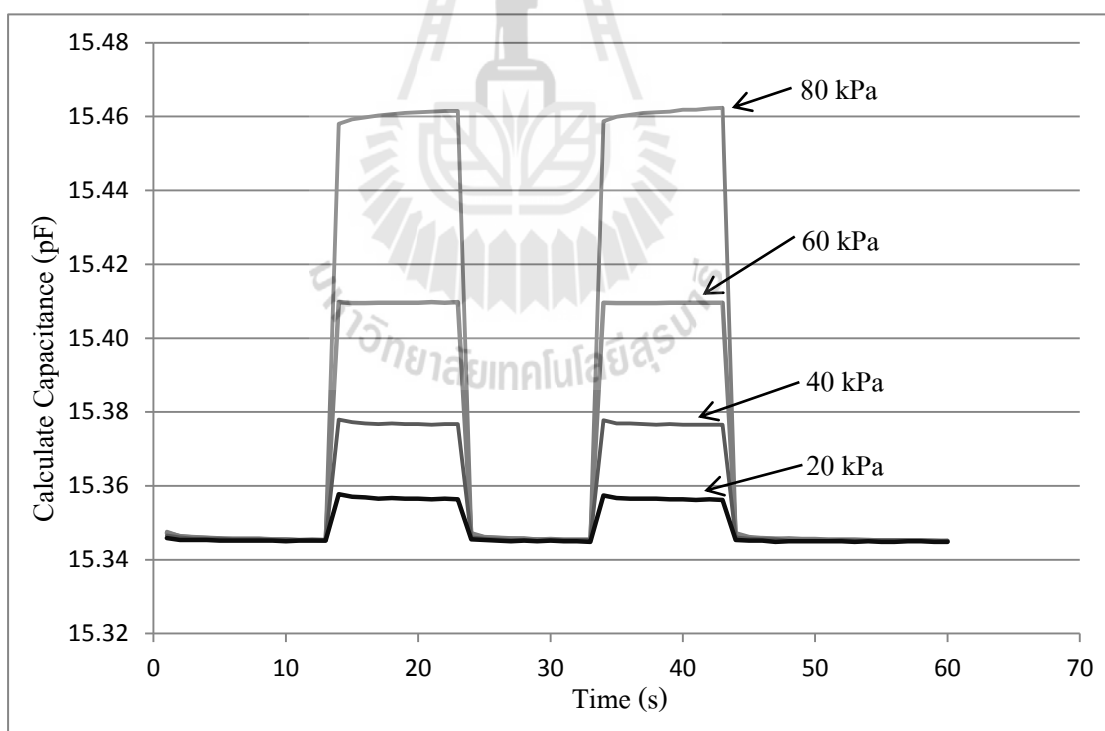


รูปที่ 6.26 ผลการทดสอบฮิสเตอร์ีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

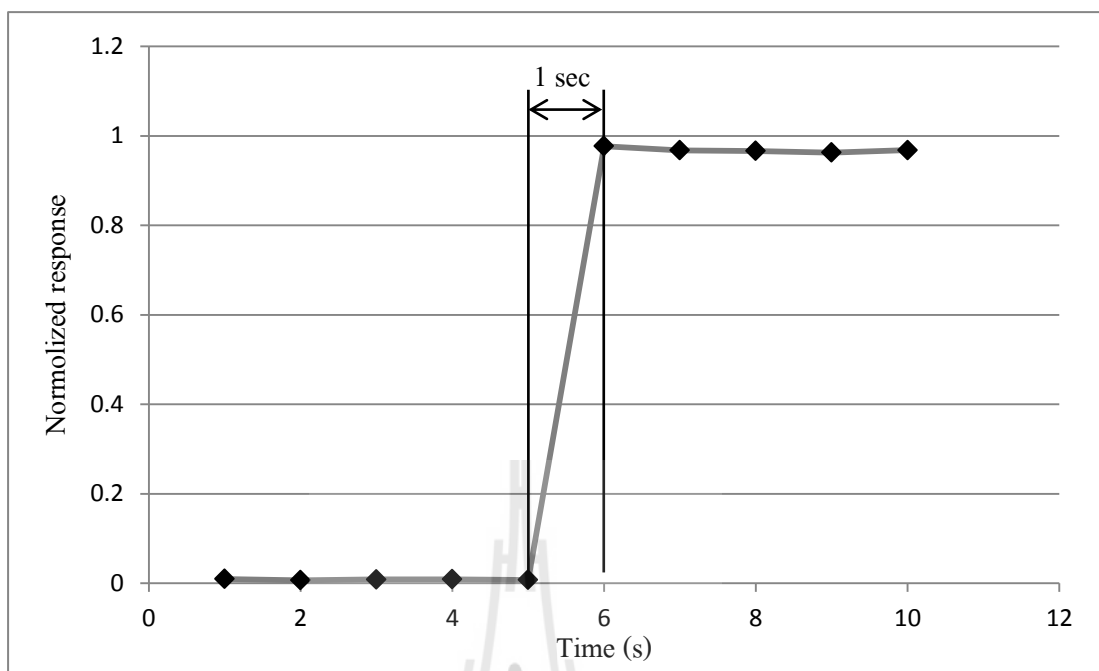
จากการทดสอบฮิสเตอร์ีซิสของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI จากรูปที่ 6.24 ช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ความดัน 350 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 240.2 Hz หรือ 0.0467 pF ค่าความคลาดเคลื่อนฮิสเตอร์ีซิสของค่าความจุไฟฟ้าเต็มสเกลเท่ากับ 16.67 %

6.9 การทดสอบผลตอบสนองทางเวลา

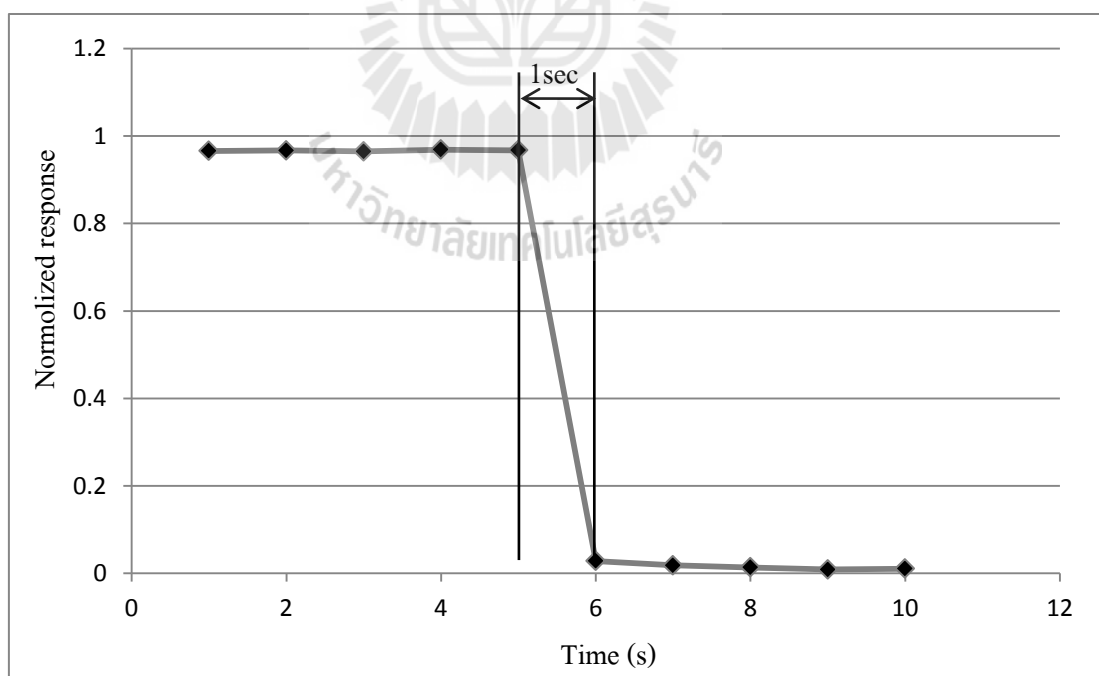
ผลการตอบสนองทางเวลา เป็นตัวบ่งชี้ความไวต่อการตอบสนองต่ออินพุตของตัวตรวจรู้ ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการป้อนความดันอินพุตลักษณะต่างๆ เช่น อินพุตแบบ Step อินพุตแบบ Ramp หรือแบบอื่นๆที่ต้องการทดสอบ สำหรับการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น จะทำการทดสอบการป้อนความดันแบบขั้นบันได (Step) และแบบลาดเอียง (Ramp) โดยชุดทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.15(จ) ในการป้อนความดันแบบ Step จะใช้วาล์วนิวเมติกส์ (V1) เป็นตัวเปิด-ปิดก๊าซที่จ่ายให้กับตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได 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 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S



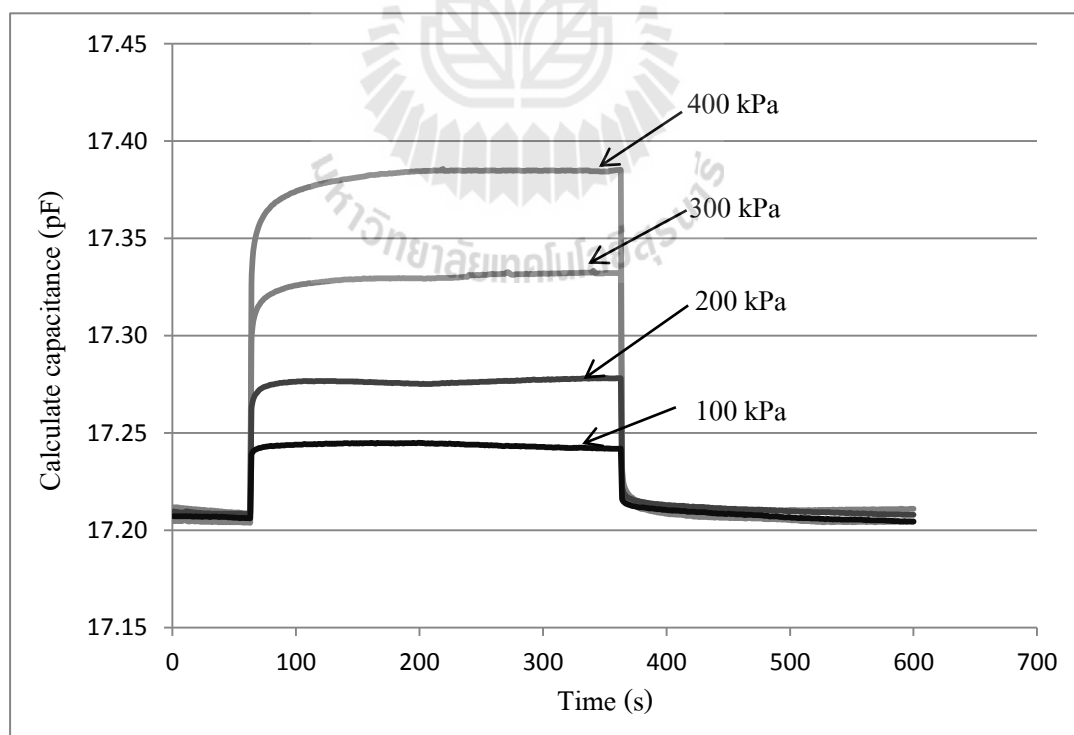
รูปที่ 6.28 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S



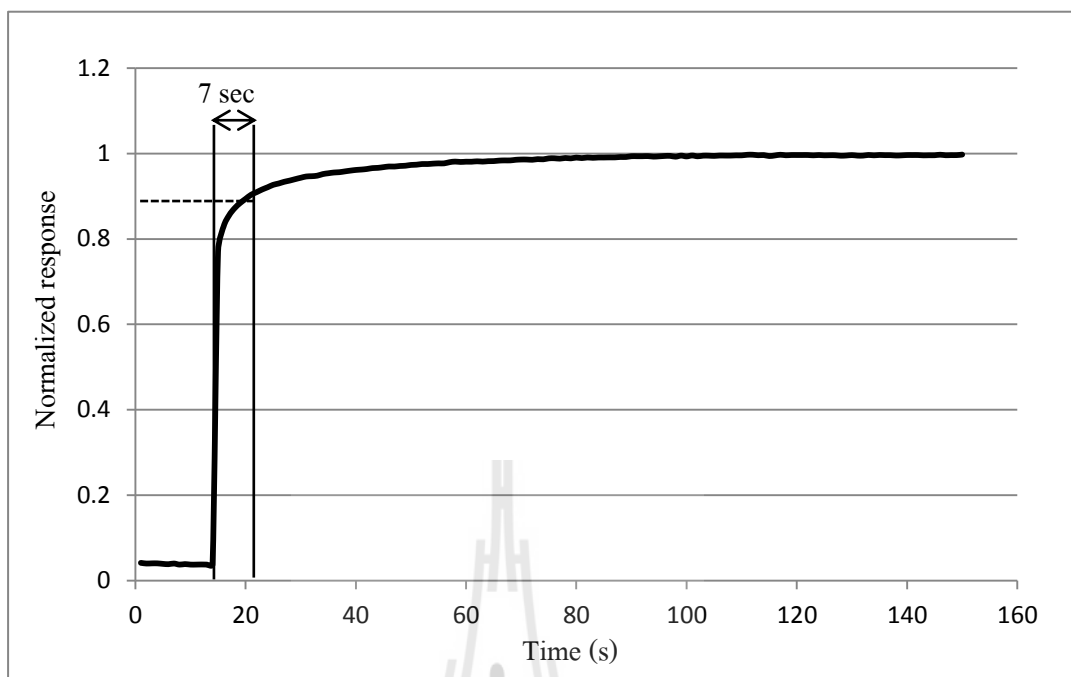
รูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

จากรูปที่ 6.27 แสดงการทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรม PDMS ในแต่ละช่วงความดันพบว่ามีการตอบสนองต่อความดันแบบขั้นบันไดได้ดี จากรูปจะพบว่ากราฟช่วงขาขึ้นจะมีความดันพุ่งเกินเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมความดัน ไม่ได้เกิดจากตัวตรวจรู้ความดันที่ทดสอบ รูปที่ 6.28 แสดงกราฟค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาขาขึ้น หรือ Rise time คือช่วงเวลาที่ผลการตอบสนอง 10 % - 90 % ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความดันแบบขั้นบันได จากการทดสอบ พบว่าช่วงเวลาขาขึ้น ค่าน้อยกว่า 1 วินาที แต่เนื่องจากการอ่านค่าความถี่จะต้องใช้เวลาในการอ่านอย่างน้อย 1 วินาที ตัวตรวจรู้ความดันจึงมีเวลาในการตอบสนองเร็วที่สุดที่ 1 วินาทีเช่นกัน ส่วนรูปที่ 6.29 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยช่วงเวลาลงหรือ Fall time ในการตอบสนอง สัญญาณแบบขั้นบันได มีช่วงเวลาลงเท่ากับ 1 วินาที

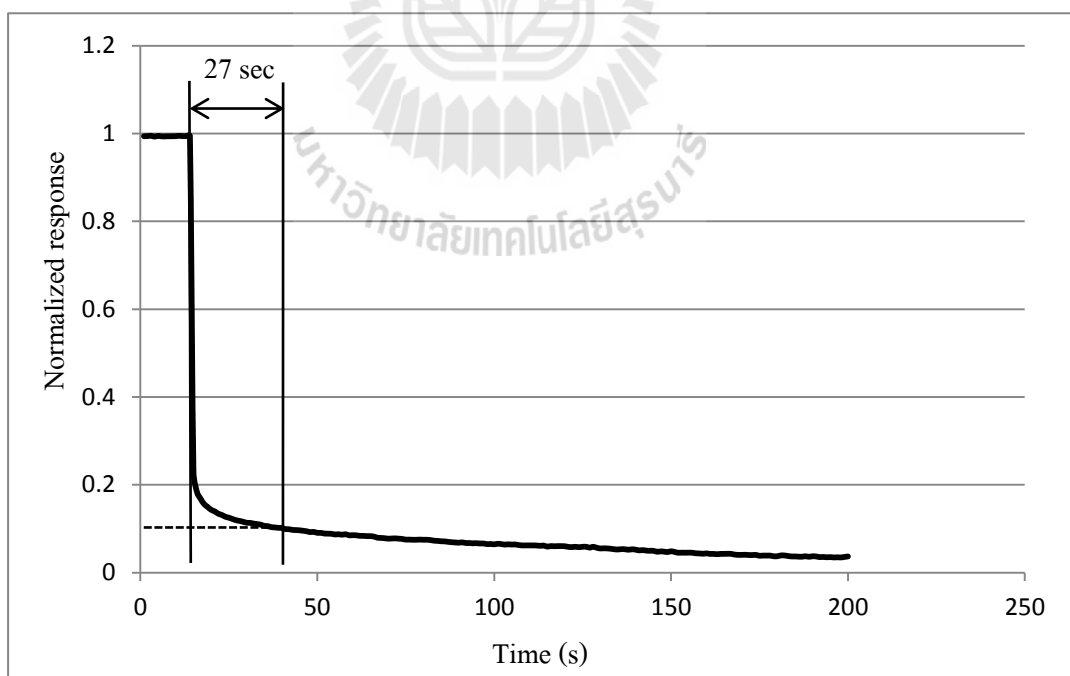
ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแพรมเป็น PI จะทำการทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ความดัน 100 kPa 200 kPa 300 kPa และ 400 kPa ทำการวัดค่าความถี่จากวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าทุก 1 วินาที และคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเป็นดังรูปที่ 6.30 จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยผลการตอบสนองดังรูปที่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



รูปที่ 6.30 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I



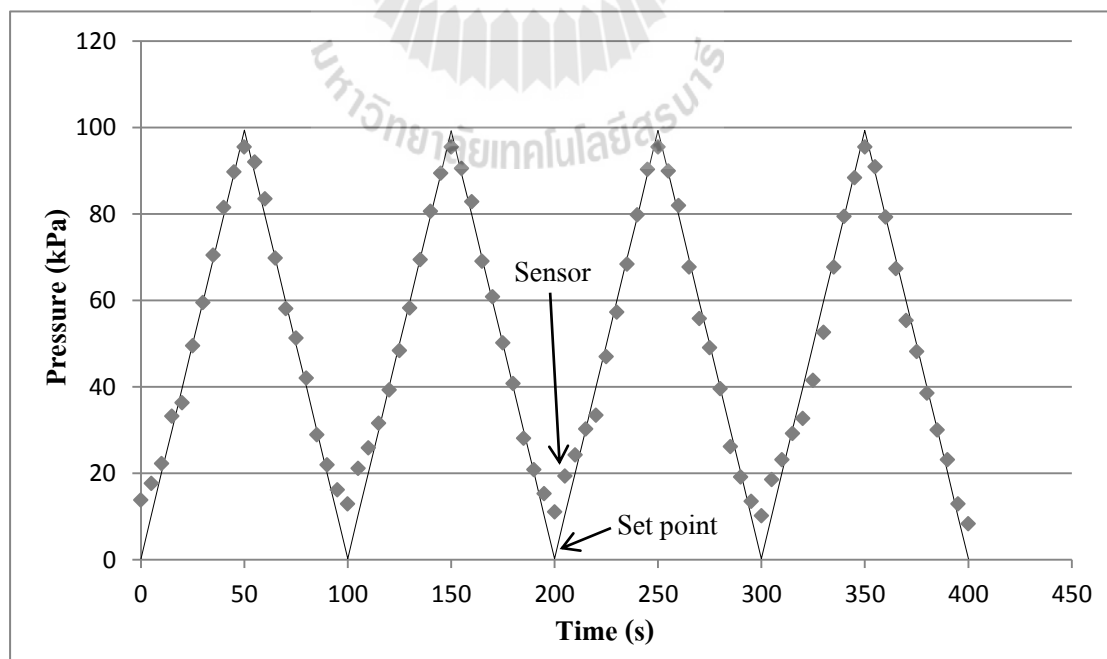
รูปที่ 6.31 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I



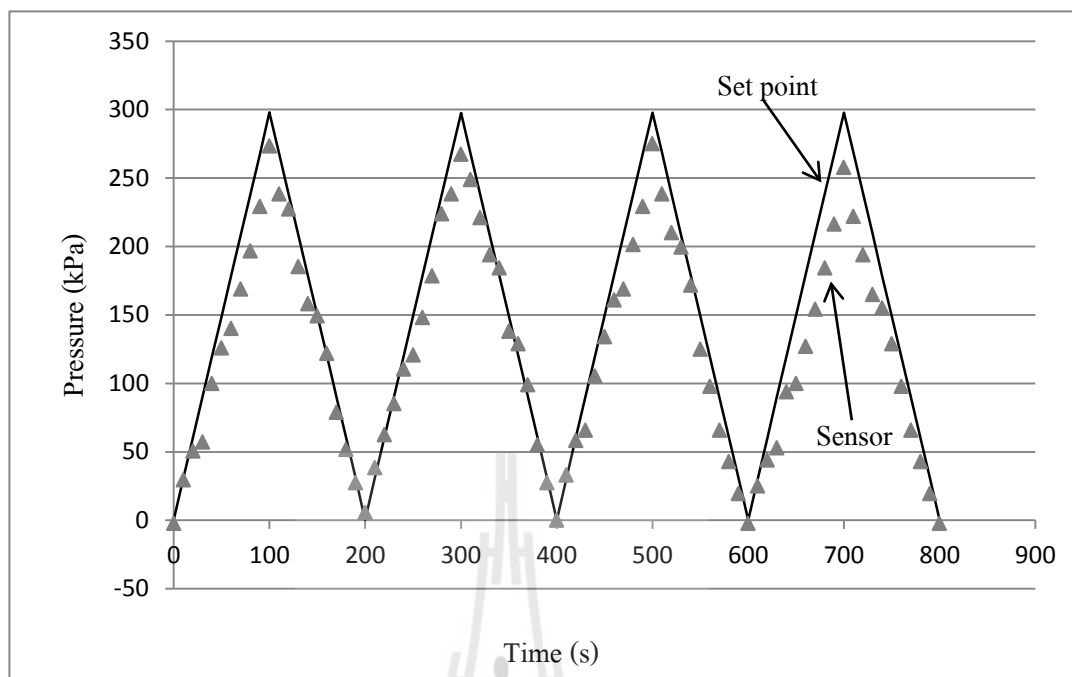
รูปที่ 6.32 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ SUT-I

จากรูปที่ 6.30 การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรม PI ในแต่ละช่วงความดันพบว่ามีการตอบสนองต่อความดันแบบขั้นบันไดช้ากว่าตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS อย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 6.31 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาขาขึ้น หรือ Rise time มีในการตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันได จากการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเวลาขาขึ้น 7 วินาที ส่วนรูปที่ 6.32 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยช่วงเวลาขาลงหรือ Fall time ในการตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันได มีช่วงเวลาขาลงเท่ากับ 27 วินาที

หลังจากการเป็นการทดสอบโดยการป้อนแรงดันแบบลาดเอียงความชัน 2 kPa/s ทั้งขาขึ้นและขาลง โดยทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาโดยการป้อนแรงดันแบบขั้นบันไดเพื่อหาผลการตอบสนองช่วงเวลาขาขึ้นและขาลง 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 ก็คือตัวตรวจรู้ความดัน 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 temperture	-	0.00672	-	pF/°C
Hysteresis error	-	-	±5.7	%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	-	-	±16.67	%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) ในปัจจุบันใช้ตัวตรวจรู้ความดันแบบไร้สายติดตั้งในยางรถยนต์และส่งข้อมูลไปยังตัวรับสัญญาณเพื่อแสดงผล ตัวตรวจวัดความดันในยางรถยนต์ที่มีขายทั่วไปมีลักษณะและการติดตั้งดังรูปที่ 7.1



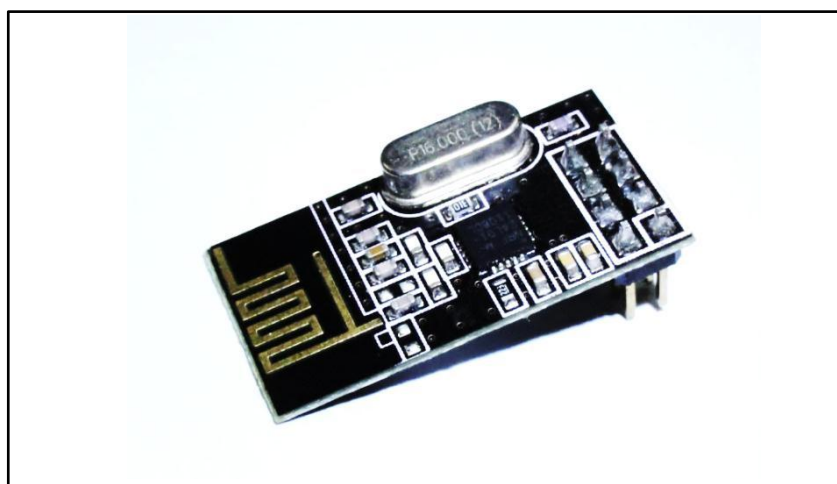
รูปที่ 7.1 ตัวตรวจรู้ความดันในยางรถยนต์แบบไร้สาย

TPMS คืออุปกรณ์เตือนภัยล่วงหน้าที่ทำกรตรวจสอบ แรงดันลมยาง และ อุณหภูมิ ซึ่งจะเตือนผู้ขับขี่ให้ทราบทันที (Real Time)และ ตลอดเวลา (Full Time) เมื่อแรงดันลมยาง หรืออุณหภูมิ เปลี่ยนไป ไม่ว่าจะจจะเร็วช้าทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ล่วงหน้าทันทีและยังช่วย ผู้ใช้รถยนต์ หลีกเลียง จากอุบัติเหตุยางระเบิดเนื่องจากความดันไม่เหมาะสมขณะขับขี่ ซึ่งทำให้รถเสียการทรง

ตัว และยังช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงจากการขับขี่ขณะที่ยางอ่อนเกินไป ช่วยรักษาอายุการใช้งานของยางได้นานมากขึ้นจากการเติมแรงดันลมยางที่ถูกต้องอุปกรณ์วัดความดันลมยางนี้ มีความสำคัญต่อผู้ใช้รถยนต์ ร่วมกับบนถนนสาธารณะ ซึ่งรัฐบาลของประเทศสหรัฐอเมริกาบังคับใช้ เป็นอุปกรณ์มาตรฐานของรถยนต์ที่จำหน่ายในประเทศตั้งแต่ปี ค.ศ.2008 สืบเนื่องจากเกิดอุบัติเหตุ พลิกคว่ำของรถยนต์หลายครั้ง มีผลทำให้ มีผู้เสียชีวิต หลายราย จากการ ค้นหาสาเหตุ จึงได้ ทราบ ว่า ส่วนมากมาจากสาเหตุ ของยางรถยนต์ เนื่องจาก ยางมีข้อบกพร่องจากการผลิต และ การ บำรุงรักษาดูแลของผู้ใช้รถยนต์ที่ละเลย ตรวจสอบสภาพยางให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จากการ ผลทดสอบวิจัยของ กระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกา (US Department of Transportation, DOT) และสำนักงานดูแลความปลอดภัยการจราจรบนถนน (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) พบว่าแรงดันลมยาง มีผล ต่อการบังคับรถ ชัดเจนจากการทดสอบเมื่อ แรงดันลมยาง อ่อนเกินไปทำให้การบังคับควบคุมรถ ไม่สามารถทำได้ ตามปกติ ทำให้รถเสียการ ทรงตัวได้

7.1.1 การออกแบบชุดรับส่งข้อมูลไร้สายและการติดตั้งตัวตรวจรู้ความดันภายในยาง รถจักรยานยนต์

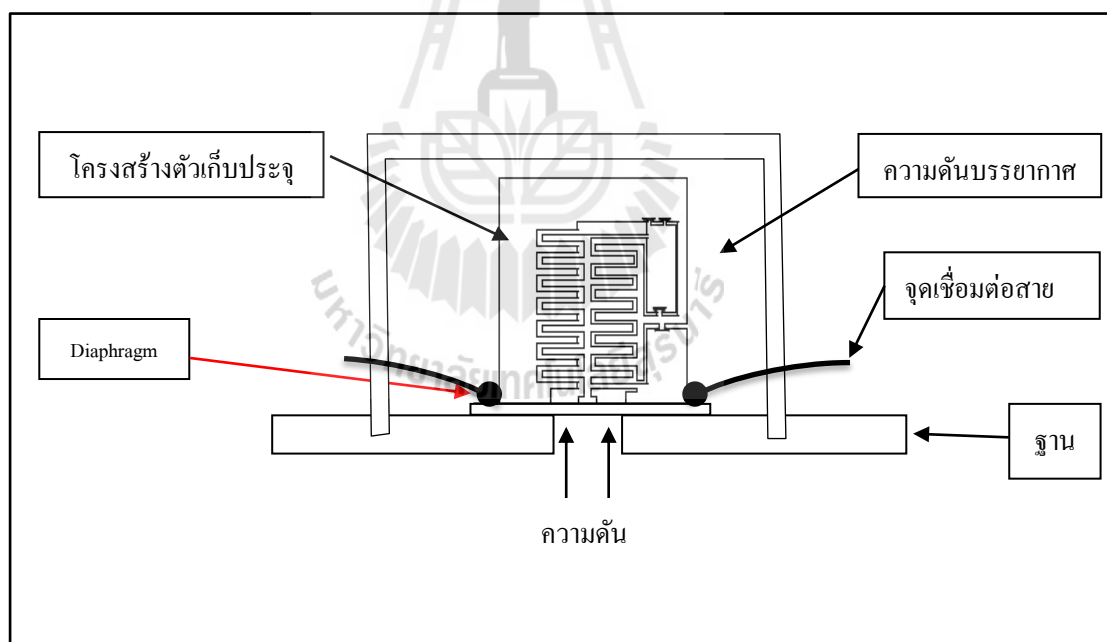
ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบวัดความดันในยางแบบไร้สาย ซึ่งใช้ยางรถจักรยานยนต์ในการทดสอบ โดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX5700 และตัวตรวจรู้ความดันแบบ ตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้น แล้วส่งข้อมูลค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองตัวออกมาแสดงผล ผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ ในการส่งข้อมูลไร้สายออกมาจากยางรถจักรยานยนต์ จะส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ Wireless 2.4 GHz. ใช้โมดูล Wireless เบอร์ nRF24L01 ดังรูปที่ 7.2



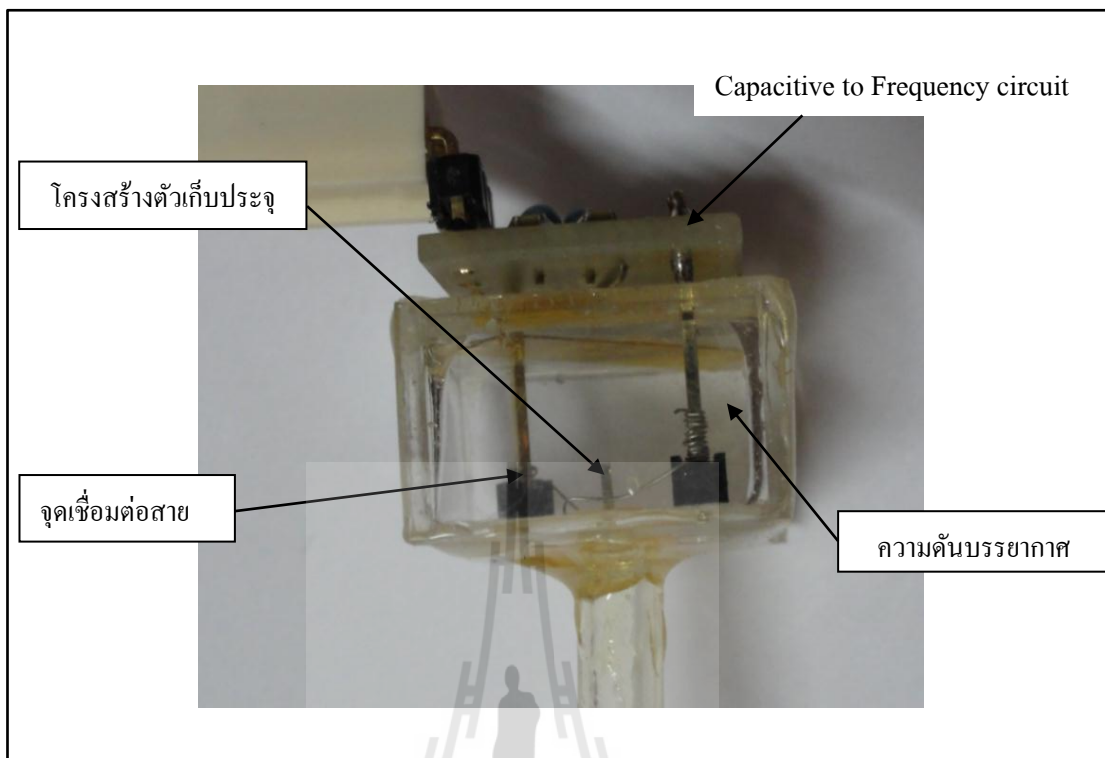
รูปที่ 7.2 โมดูลรับ-ส่งสัญญาณ ไร้สาย nRF24L01

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 สามารถกำหนดการทำงานได้ทุกโหมดโดยการกำหนดครีจิสเตอร์ภายใน สามารถจัดการข้อมูลได้ด้วยตัวเอง มีการส่งข้อมูลแบบ FIFOs หรือ First in first out ทำให้การส่งข้อมูลมีความเร็วสูงและความถูกต้อง และแม่นยำในการส่งข้อมูลสูง

ส่วนของตัวตรวจรู้ความดันที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นทั้งสองตัวคือ SUT-S และ SUT-I เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจ คือวัดความดันเทียบกับความดันบรรยากาศ ดังนั้นในการวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ ต้องทำชุดครอบตัวตรวจรู้ความดันด้านที่เป็นโครงสร้างตัวเก็บประจุรูปที่ 7.3 เพื่อให้มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ตัวตรวจรู้ความดันที่ประกอบสมบูรณ์พร้อมทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 7.4

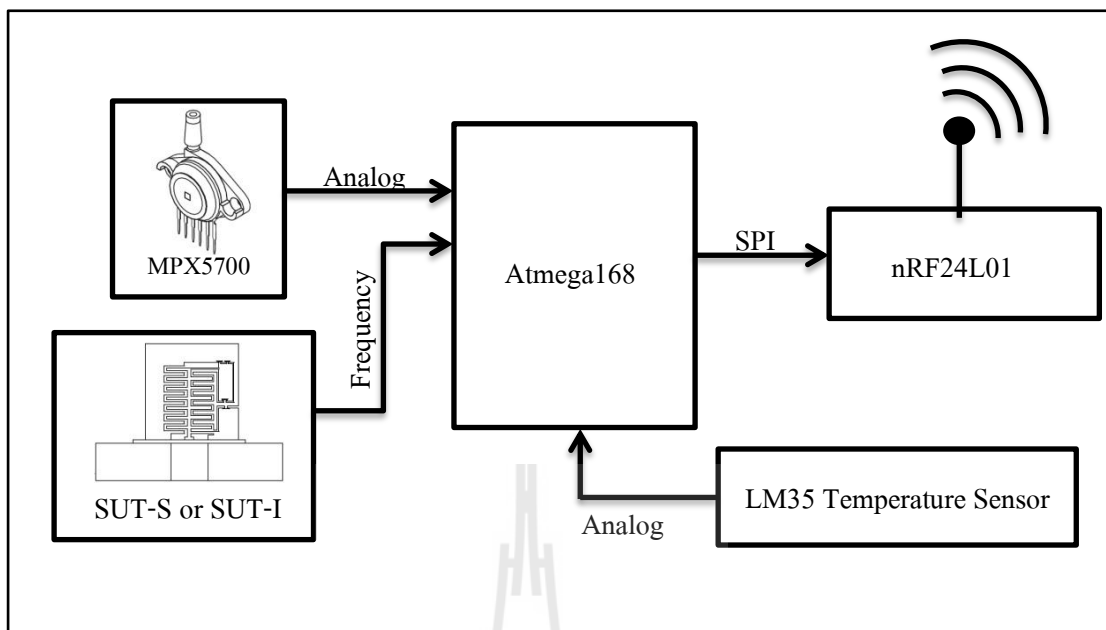


รูปที่ 7.3 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I ที่ใช้ในการทดสอบความดันในยางรถจักรยานยนต์

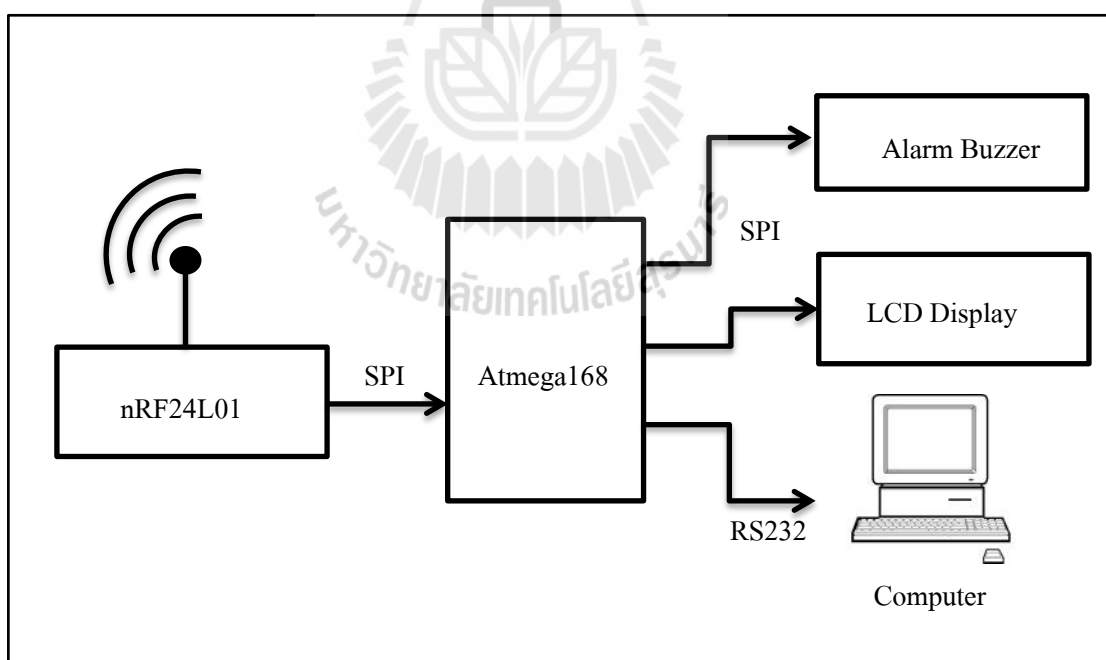


รูปที่ 7.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่พร้อมทดสอบวัดความดันขงรถจักรยานยนต์

ในการส่งข้อมูลไร้สายจากภายในขงรถยนต์จะใช้โมดูลส่งสัญญาณที่กล่าวมาข้างต้นร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ Atmega168 และอ่านสัญญาณจากตัวตรวจรู้ความดันและอุณหภูมิ เพื่อให้ขงต่อการแก้ไขสมการในช่วงขงการทดสอบ ค่าที่ส่งออกมาจะเป็นข้อมูลดิบ คือ ความถี่ และแรงดัน และขงวงจรรับข้อมูลจะรับข้อมูลดิบมาเพื่อกำหนดค่าความดันด้วยสมการความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น และแสดงผลค่าความดันขงทางจอแสดงผล LCD และคอมพิวเตอร์ขงทาง RS232 ขงจรวัดความดันและส่งข้อมูลมีแผนผังขงรูปที่ 7.5 และขงจรรับข้อมูลประมวลผลข้อมูลและแสดงผลข้อมูลมีแผนผังขงรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.5 แผนผังอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล



รูปที่ 7.6 แผนผังอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล

7.1.2 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในส่วนของการอ่านค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S จากการปรับเทียบ กับตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานในบทที่ 6 ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าความดัน อุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันซึ่งสมการอยู่ในรูปของสมการที่ (7.1)

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

โดยที่ $a = 4 \times 10^{-5}$

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

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

และ P_{out} คือ ความดันก๊าซที่วัดได้ มีหน่วยเป็น kPa

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ มีหน่วยเป็น pF

แม้สมการที่ (7.1) จะให้เอาต์พุตเป็นค่าความดันที่ตัวตรวจรู้วัดได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานจริงตัวตรวจรู้ความดันจะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุปรับค่าได้เท่านั้น และต้องมีการแปลงความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความดันอินพุตให้เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ตามชนิดของวงจรเชื่อมต่อไปใช้งานของการประยุกต์นั้นๆ 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 ที่ตรงกับความถี่ที่วัดได้จากความถี่ f_{555} จึงมีค่าเท่ากับ

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

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

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

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

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

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 $C_{555} = 17.95$ pF - 2.71 pF = 15.24 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

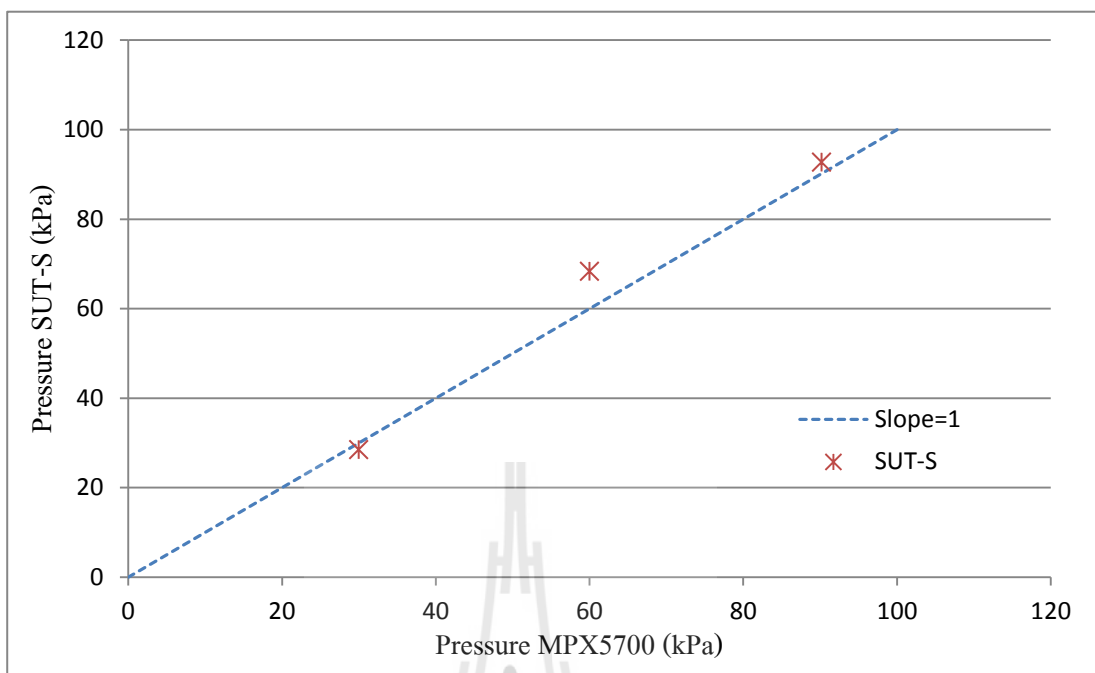
ส่วนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในยางรถยนต์จะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเบอร์ LM 35 มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณแอนะล็อก แรงดันของแหล่งจ่าย 5 V มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันดังสมการที่ (7.6)

$$T = 100V_0 \quad (7.6)$$

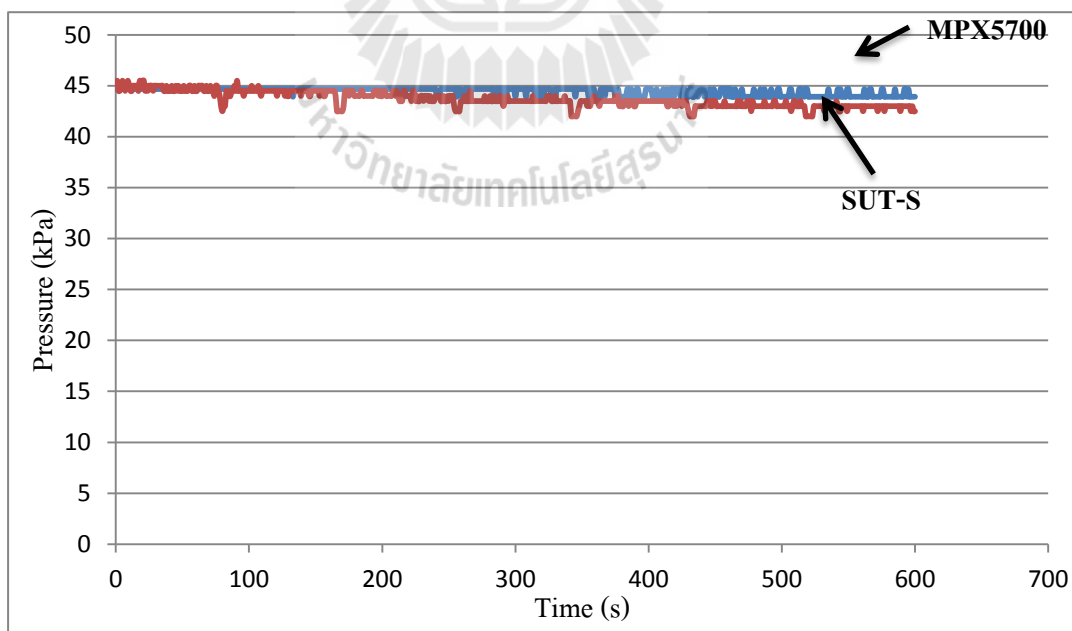
เมื่อ T คือ อุณหภูมิ
 V_0 คือ แรงดันที่อ่านได้จาก LM35

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

ในการทดสอบวัดความดันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ภายในยางรถจักรยานยนต์ จะทำการทดสอบวัดความดัน 3 ค่า ที่ความดัน 30 kPa (4.35 PSI) 60 kPa (8.7 PSI) และ 90 kPa (13.5 PSI) ตามลำดับ เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ถูกออกแบบให้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 110 kPa (15.95 PSI) จึงไม่สามารถทดสอบความดันสูงกว่าที่กำหนดได้ ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ตัวตรวจรู้ MPX5700 เป็นมาตรฐานความดัน ดังรูปที่ 7.7 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa และการทดสอบที่จำเป็นอีกประการคือการทดสอบเสถียรภาพที่ความดันคงที่ เนื่องจากความดันภายในยางรถยนต์โดยทั่วไปมีความดันคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เปลี่ยนแปลงมากนักรซึ่งผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองตัวเทียบกันเป็นเวลา 600 วินาที เก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ที่ความดัน 45 kPa ได้ผลดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.7 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐานในการวัด



รูปที่ 7.8 กราฟผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ภายในยางรถจักรยานยนต์ ทดสอบเป็นเวลา 600 วินาที

7.1.3 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในการอ่านค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I จากการปรับเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานในบทที่ 6 ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าความดัน อุณหภูมิและค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันซึ่งสมการอยู่ในรูปของสมการที่ (7.7) ซึ่งเหมือนกับตัวตรวจรู้ SUT-S

$$P_{out} = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } a &= 8 \times 10^{-8} \\ b &= 2.2 \times 10^{-6} T - 4 \times 10^{-5} \\ c &= 0.0042 T + 0.579 - C \end{aligned}$$

และ P_{out} คือ ความดันก๊าซที่วัดได้ มีหน่วยเป็น kPa

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ มีหน่วยเป็น pF

แม้สมการที่ (7.7) จะให้เอาต์พุตเป็นค่าความดันที่ตัวตรวจรู้วัดได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานจริงตัวตรวจรู้ความดันจะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุปรับค่าได้เท่านั้น และต้องมีการแปลงความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความดันอินพุตให้เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ตามชนิดของวงจรเชื่อมต่อไปใช้งานของการประยุกต์นั้นๆ ในที่นี้จะแปลงความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ และอ่านค่าความถี่ด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ก่อนที่จะคำนวณเป็นความดันที่อ่านได้นำออกแสดงผลต่อไป ในการประยุกต์ใช้งานนี้ได้แปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่โดยใช้ วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณที่เป็นความถี่ f_{555} แปรผกผันกับความจุไฟฟ้า C_{sensor} มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความถี่ดังสมการที่ 7.8

$$f_{555} = 1.613 \times 10^{-6} / (C_{sensor} + C_{555}) \quad (7.8)$$

โดยที่ C_{sensor} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ มีหน่วยเป็น ฟารัด

f_{555} คือ ค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรรวม Timer NE555

C_{555} คือ ค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจร NE555 มีหน่วยเป็น ฟารัด

ดังนั้น ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ SUT-S ที่ตรงกับความถี่ที่วัดได้จากความถี่ f_{555} จึงมีค่าเท่ากับ

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

$$C_{sensor} = 1.613 \times 10^{-6} / f_{555} - C_{555} \quad (7.9)$$

เมื่อแทนค่า C_{sensor} ลงในสมการที่ (7.7) จะได้สมการที่ (7.10) ซึ่งมีการเพิ่มพจน์ที่สามารถปรับแก้ ซึ่งสามารถบรรจุลงในโปรแกรมที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำไปคำนวณหาค่าความดันก๊าซที่วัดได้เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

$$P_{out} = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a \quad (7.10)$$

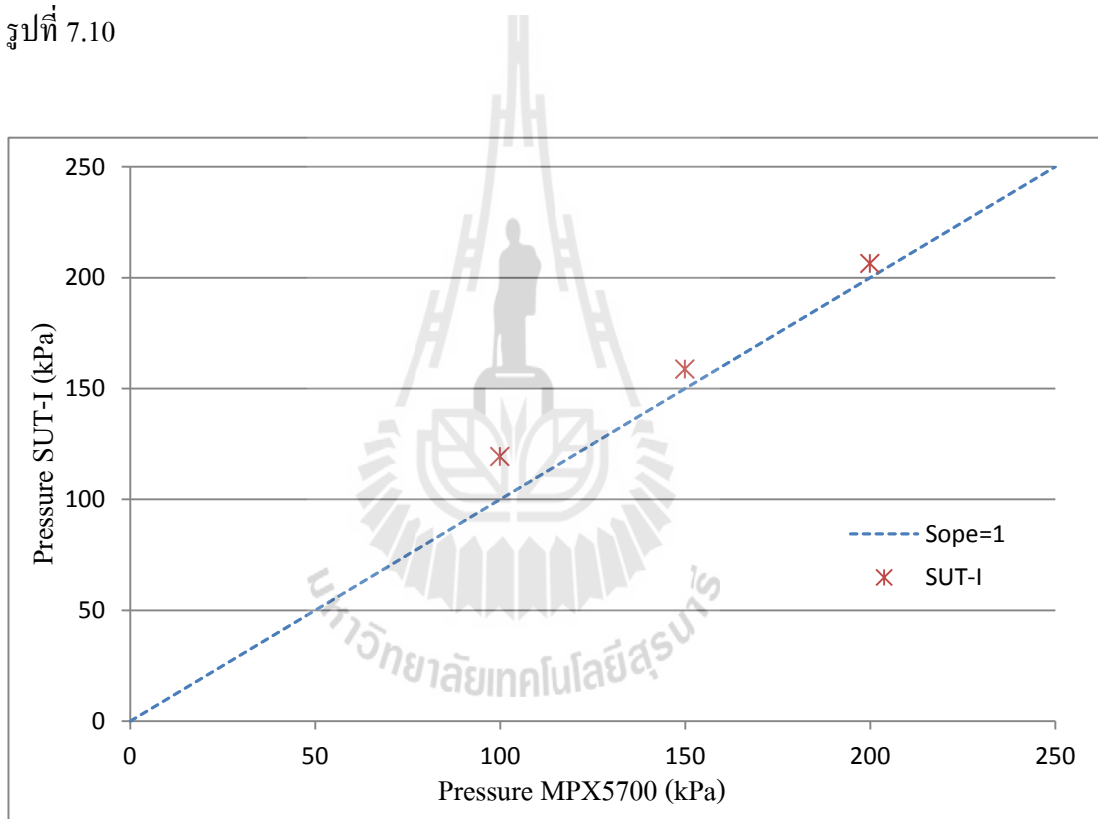
$$\text{โดยที่ } a = 8 \times 10^{-8}$$

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

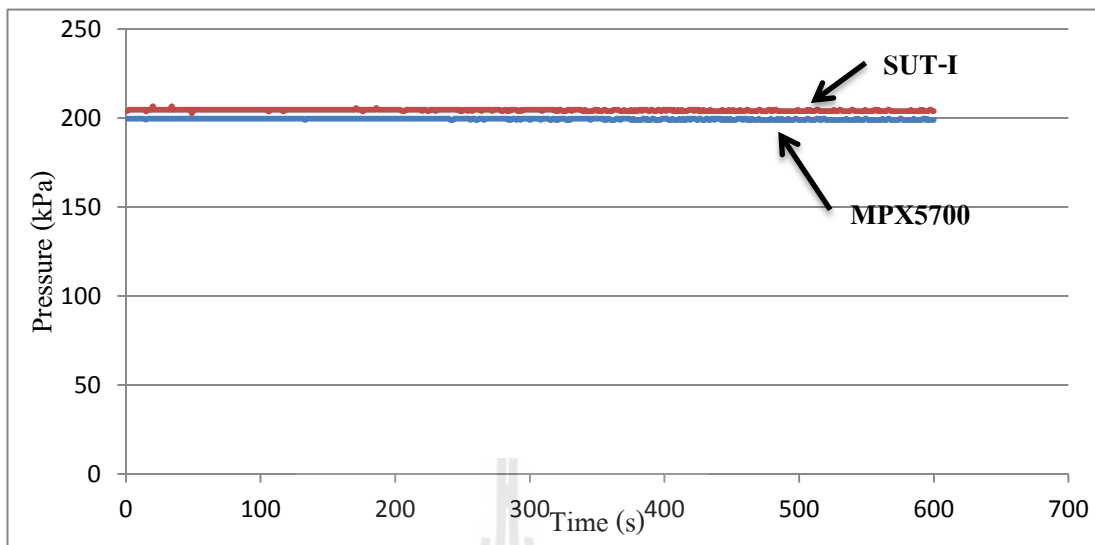
$$c = 0.0042T + 0.579 - (1.613 \times 10^{-6} / f_{555} - C_{555})$$

ค่า C_{555} หรือค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจร NE555 ได้จากการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยการทดสอบวัดค่าความดันที่ความดันต่างๆ ตามข้อมูลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าในบทที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.4 ที่ความดัน 0 kPa จะสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันได้คือ $C_{sensor} = 0.71$ pF และวัดค่าความถี่จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ที่ความดัน 0 kPa คำนวณค่าความจุไฟฟ้า $C_{555} + C_{sensor}$ ด้วยสมการที่ 7.2 ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 17.95 pF ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้า $C_{555} = 17.95$ pF - 0.71 pF = 17.24 pF ส่วนของตัวตรวจรู้ความดัน MPX 5700 จะส่งสัญญาณออกมาเป็นแอนะล็อกในช่วงแรงดัน 0 - 5V มีสมการความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความถี่ดังสมการที่ (7.4) ดังที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ ส่วนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในยางรถยนต์จะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเบอร์ LM 35 มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณแอนะล็อกแรงดันของแหล่งจ่าย 5 V มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันดังสมการที่ (7.6) ในการอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ MPX5700 และ LM35 ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นแอนะล็อกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR Atmega168 อ่านค่าสัญญาณแอนะล็อกด้วยวงจร 10-bit ADC ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์และคำนวณออกมาเป็นแรงดันก่อนที่จะใช้สมการคำนวณค่าความดันและอุณหภูมิ

ในการทดสอบวัดความดันตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I จะทำการทดสอบวัดความดัน 3 ค่า ที่ความดัน 100 kPa (4.35 PSI) 150 kPa (8.7 PSI) และ 200 kPa (13.5 PSI) ตามลำดับ ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ถูกออกแบบให้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 500 kPa (72.5 PSI) ซึ่งเพียงพอกับการนำไปวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์หรือรถยนต์ โดยทั่วไปจะมีความดันในช่วง 30 – 40 PSI ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ตัวตรวจรู้ MPX5700 เป็นมาตรฐานความดัน ดังรูปที่ 7.9 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 3.9 % จากเต็มสเกล 500 kPa และการทดสอบที่จำเป็นอีกประการคือการทดสอบเสถียรภาพที่ความดันคงที่ ซึ่งผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองตัวเทียบกันเป็นเวลา 600 วินาที เก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ที่ความดัน 200 kPa ได้ผลดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.9 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐานในการวัด



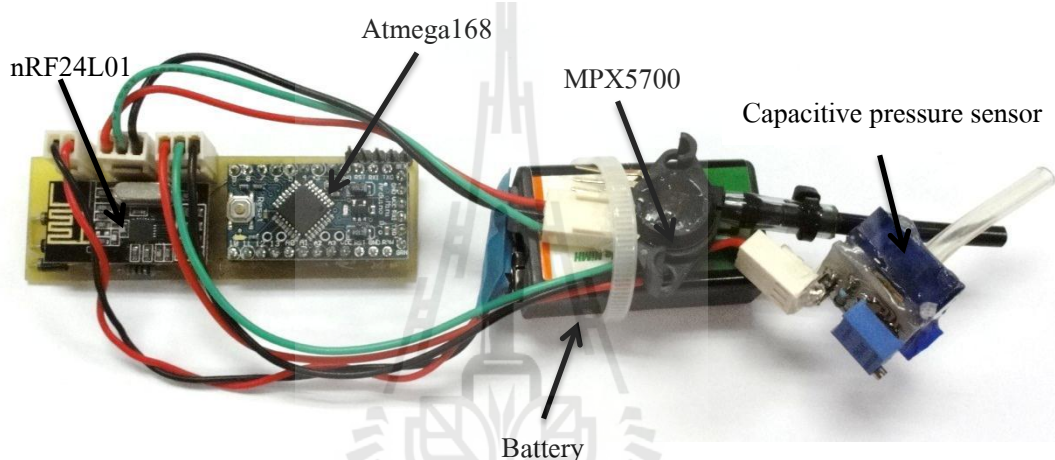
รูปที่ 7.10 กราฟผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ภายในยางรถจักรยานยนต์ ทดสอบเป็นเวลา 600 วินาที

ผลการทดสอบวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ของตัวตรวจรู้ทั้งสองตัว พบว่าตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้น สามารถวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ได้ มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX 5700 สูงสุด 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.743 ซึ่งมีค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับ MPX5700 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.351 ส่วนตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX5700 สูงสุด 3.9 % จากเต็มสเกล 500 kPa ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.403 ซึ่งมีค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับ MPX5700 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0351 สำหรับตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 110 kPa (15.9 PSI) ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำกว่ามาตรฐานของความดันภายในยางรถยนต์ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์ ส่วนตัวตรวจรู้ SUT-I ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 500 kPa (72.5 PSI) ซึ่งอยู่ในย่านที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์ และจากผลการทดสอบตัวตรวจรู้ SUT-I มีเสถียรภาพทางเวลาที่ดีกว่าตัวตรวจรู้ SUT-S

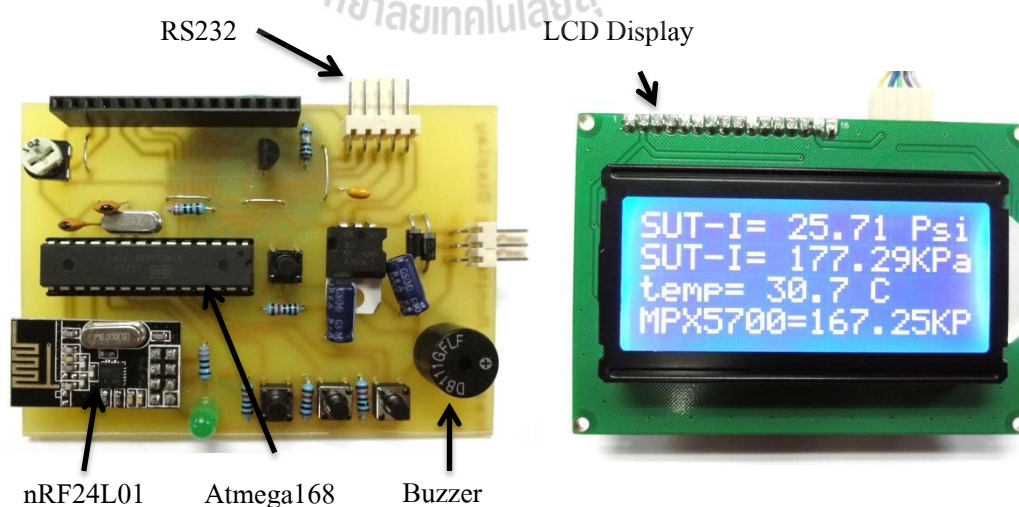
7.2 การทดสอบใช้งานและผลการทดสอบการส่งข้อมูล

ในการส่งข้อมูลไร้สายจากภายในยางรถยนต์จะใช้โมดูลส่งสัญญาณที่กล่าวในหัวข้อที่ 7.1.1 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ Atmega168 และอ่านสัญญาณจากตัวตรวจรู้

ความดันและอุณหภูมิ เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขสมการในช่วงของการทดสอบ ค่าที่ส่งออกมาจะเป็นข้อมูลดิบ คือ ความถี่ และแรงดัน และชุดวงจรรับข้อมูลจะรับข้อมูลดิบมาเพื่อคำนวณค่าความดันด้วยสมการความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น และแสดงผลค่าความดันผ่านทางจอแสดงผล LCD และคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 โดยมีชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ดังรูปที่ 7.11 ซึ่งประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวส่งสัญญาณไร้สาย ตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ ตัวตรวจรู้ SUT-I ตัวตรวจรู้อุณหภูมิ และ แบตเตอรี่ ส่วนของชุดรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผลข้อมูลซึ่งวงจรทั้งหมดจะถูกออกแบบให้ติดตั้งอยู่ด้านหลังของจอแสดงผล ดังรูปที่ 7.12

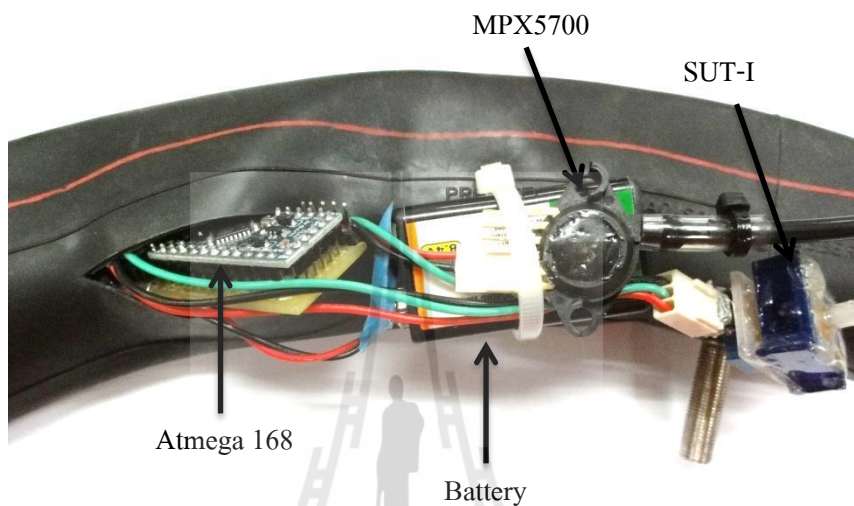


รูปที่ 7.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล



รูปที่ 7.12 ภาพชุดอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล

เมื่อทำการสร้างอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ และทำการทดสอบการส่งสัญญาณเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำชุดอุปกรณ์ส่งสัญญาณและตัวตรวจวัดความดันใส่เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ โดยการตัดยางในให้เป็นช่องแล้วใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางจากนั้นทำการปะยางบริเวณที่ตัดดังรูปที่ 7.13 และรูปที่ 7.14

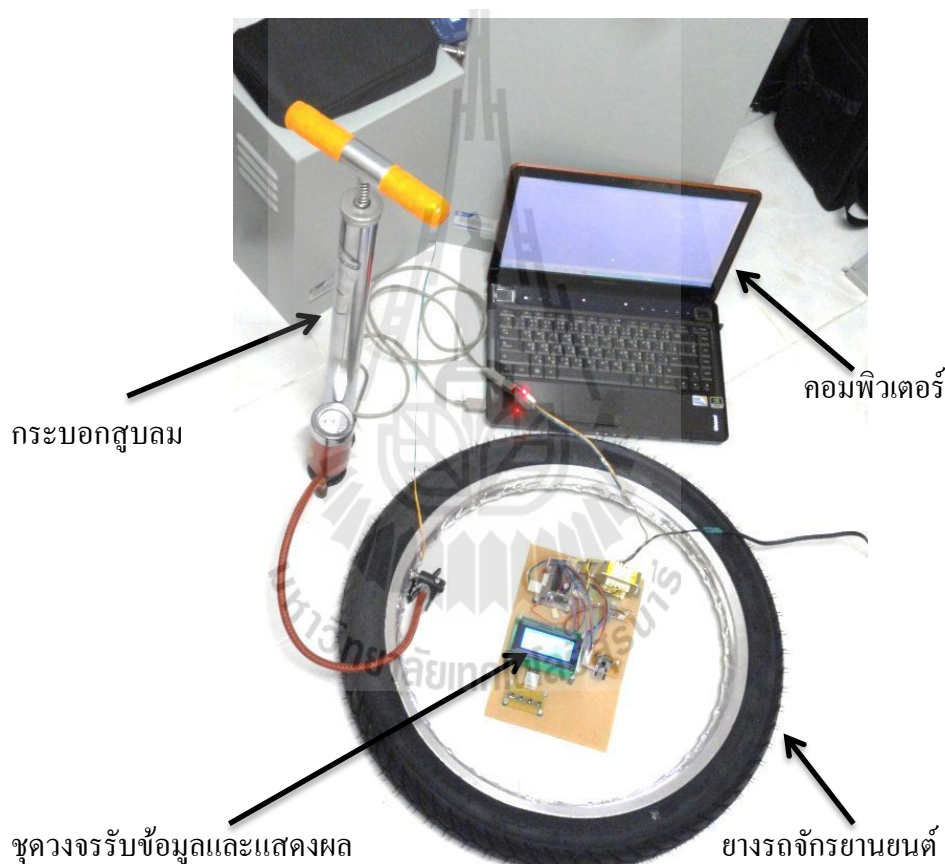


รูปที่ 7.13 การใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ก่อนประกอบเข้ากับยางชั้นนอก

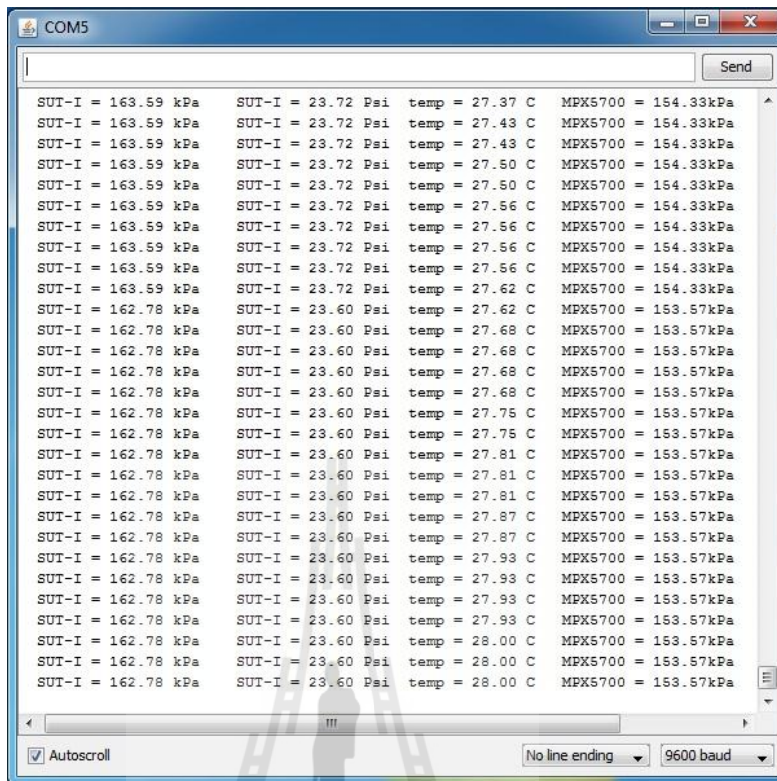


รูปที่ 7.14 การปะยางบริเวณที่ถูกตัด

หลังจากทำการปะยางในเรียบร้อยแล้ว ประกอบยางเข้ากับล้อ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบ โดยเปิดชุดรับสัญญาณเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังคอมพิวเตอร์ผ่าน RS232 จะส่งทุกๆ 1 วินาที ค่าที่ส่งมาจะประกอบด้วย ค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ค่าความถี่ที่วัดจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I และค่าความดันที่คำนวณจากสมการปรับเทียบ ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ส่งมามีลักษณะดังรูปที่ 7.15 และชุดอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 7.16 ชุดส่งสัญญาณที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ สามารถส่งสัญญาณมายังตัวรับสัญญาณได้ระยะห่างมากที่สุด 40 เมตร ซึ่งเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 7.15 แสดงภาพอุปกรณ์ในการทดสอบ ตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยาง



รูปที่ 7.16 ค่าที่ถูกส่งออกมาจากตัวตรวจรู้ความดันภายในยางมายังตัวรับและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

และในส่วนของการแสดงผล LCD จะแสดงผล ค่าความดันจาก MPX5700 และ SUT-I และความถี่จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ ดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.17 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I และ MPX5700 ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยางและแสดงผลผ่านจอ LCD ของชุดรับสัญญาณ

7.3 สรุป

การทดสอบการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์โดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ และตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นทั้งสองตัว ส่งข้อมูลไร้สายแบบ Wireless 2.4 GHz. โดยใช้โมดูล Wireless เบอร์ nRF24L01 ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S หรือ SUT-I ตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 และตัวตรวจรู้อุณหภูมิ LM35 จะถูกใส่เข้าไปในยางเพื่อวัดความดันลมภายใน สำหรับตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I เป็นเพียงตัวเก็บประจุปรับค่าได้ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามความดันอินพุตเป็นปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ตามชนิดของวงจรเชื่อมต่อ ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานนี้จะใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ โดยใช้วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณความถี่แปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้า และอ่านค่าความถี่ด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อได้ค่าความถี่จากตัวตรวจรู้ SUT-S และ SUT-I อุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ LM35 และ ความดันจากตัวตรวจรู้ MPX5700 ข้อมูลที่อ่านได้จะถูกส่งออกไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นตัวรับข้อมูลผ่านโมดูล nRF24L01 ข้อมูลที่ได้รับผ่านระบบไร้สายถูกนำมาคำนวณค่าความดันโดยใช้สมการการปรับเทียบค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 โดยการชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจรกำเนิดความถี่ สุดท้ายข้อมูลค่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ LM35 ค่าความดันจาก SUT-S หรือ SUT-I และ MPX5700 ได้ถูกนำไปแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 และแสดงผล LCD ในการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้น สามารถวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ได้ มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX 5700 สูงสุด 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa ส่วนตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX 5700 สูงสุด 3.9 % จากเต็มสเกล 500 kPa และตัวส่งสัญญาณ ไร้สาย สามารถส่งสัญญาณได้อย่างแม่นยำในระยะห่างไม่เกิน 40 เมตร สำหรับตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 110 kPa (15.9 PSD) ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำกว่ามาตรฐานของความดันภายในยางรถยนต์ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์ ส่วนตัวตรวจรู้ SUT-I ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 500 kPa (72.5 PSI) ซึ่งอยู่ในย่านที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์

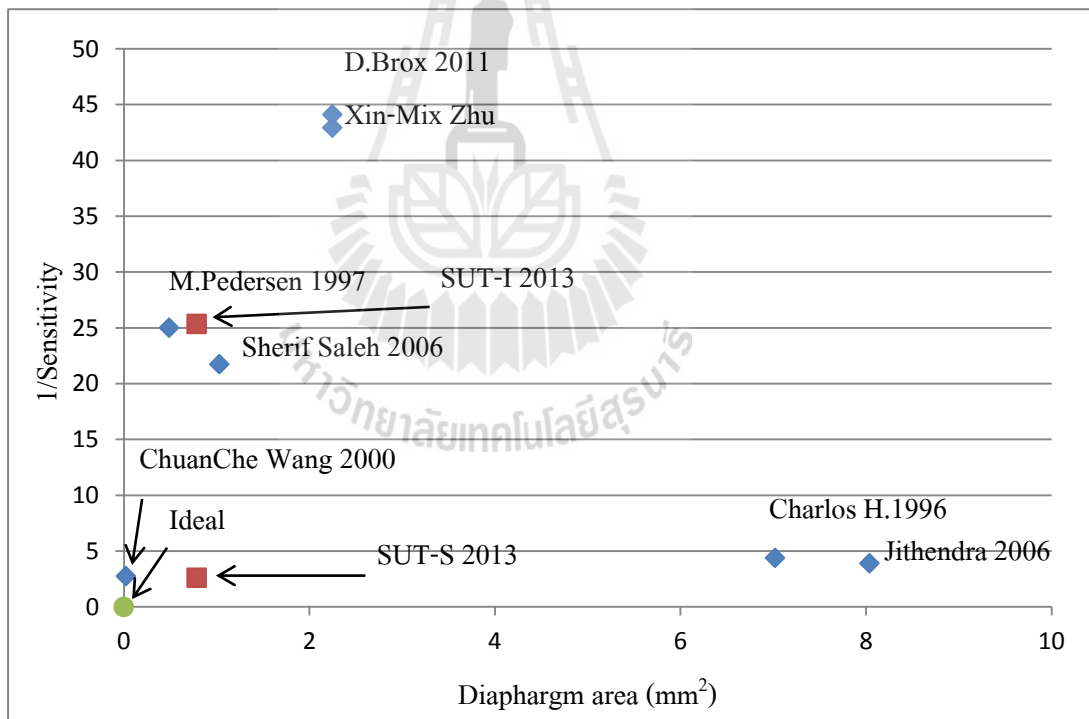
บทที่ 8

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุมีไดอะแฟรมเป็นตัวรับรู้ปริมาณอินพุต ส่วนของโครงสร้างตัวเก็บประจุเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สร้างด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี โดยการฉายแสงเอกซ์เรย์ผ่านหน้ากาคูดูดซับรังสี บนสารไวแสงชนิดบวกความหนา 500 μm ล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงออก จากนั้นเคลือบโลหะบนโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้โครงสร้างที่นำไฟฟ้า และฉนวนสารไวแสงลงไปอีกครั้งเพื่อเชื่อมต่อโครงสร้างที่เป็นขั้วไฟฟ้าโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านฟิล์มที่บวมบริเวณที่ต้องการเชื่อมต่อ จากนั้นขัดฐานกราไฟต์ทิ้งไปและล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายออกไป 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 โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะจะถูกนำมาติดตั้งบนไดอะแฟรมซึ่งเมื่อไดอะแฟรมดัดเกิดการโก่งตัวเนื่องจากความดันจะส่งผลให้แกนของโครงสร้างตัวเก็บประจุเคลื่อนที่ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนไปเท่ากับระยะการโก่งตัว ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PDMS (SUT-S) และ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PI (SUT-I) ถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่เป็นตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250 และ MPX5700 ตามลำดับจากการทดสอบคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าตลอดย่านการวัดเท่ากับ 0.51851 pF หรือมีค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 38.23 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.004714 pF/kPa ค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ $\pm 9 \%$ 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

ส่วนของการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจวัดความดันที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบ ได้ทำการทดสอบ วัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ที่สามารถรายงานค่าความดันแบบไร้สาย โดยติดตั้งตัวตรวจวัดความดัน SUT-S หรือ SUT-I ตัวตรวจวัดความดันเชิงพาณิชย์ MPX 5700 และตัวตรวจวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ พร้อมทั้งแบตเตอรี่และวงจรส่งข้อมูลไร้สายเข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ เนื่องจากตัวตรวจวัดความดัน SUT-S และ SUT-I เป็นตัวเก็บประจุปรับค่าได้ตามความดันอินพุตที่เข้ามา ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นปริมาณทางไฟฟ้าอื่น เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการประยุกต์ใช้งานนี้ได้แปลงค่าความจุไฟฟ้าจากตัวตรวจวัด SUT-S และ SUT-I ไปเป็นความถี่ โดยใช้วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณความถี่แปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้า ความถี่ดังกล่าวถูกนับค่าด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์ MPX5700 และ LM35 ซึ่งรายงานค่าความดันเอาท์พุตและค่าอุณหภูมิออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า นั้นได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจร 10-bit ADC ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลตัวแปรได้แก่ค่าความถี่จากตัวตรวจวัด SUT-S ค่าอุณหภูมิจากตัวตรวจวัด LM35 และค่าความดันก๊าซจากตัวตรวจวัดความดัน MPX5700 ได้ถูกส่งผ่านโมดูลส่งข้อมูลไร้สาย nRF24L01 ภายในยางรถจักรยานยนต์ไปยังโมดูลรับข้อมูลไร้สาย nRF24L01 ที่เชื่อมต่ออยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้แสดงผลการวัดซึ่งอยู่ภายนอกยางรถจักรยานยนต์ สำหรับข้อมูลความถี่ที่ได้รับมาจากตัวตรวจวัด SUT-S ผ่านระบบไร้สายได้ถูกแปลงเป็นค่าความดันก๊าซในหน่วย kPa ด้วยสมการที่ได้จากการปรับเทียบกับค่าความดันจากตัวตรวจวัด MPX5700 โดยการชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจรกำเนิดความถี่ สุดท้ายข้อมูลความดันก๊าซที่วัดได้จากตัวตรวจวัด SUT-S หรือ SUT-I และ MPX5700 ในหน่วย kPa พร้อมทั้งค่าอุณหภูมิที่ได้จากตัวตรวจวัด LM35 ในหน่วยของเซลเซียส ได้ถูกส่งไปแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านระบบรับส่งข้อมูลอนุกรม RS-232 จากการทดสอบพบว่าตัวตรวจวัดความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้น สามารถวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX5700 สูงสุด 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa ส่วนตัวตรวจวัดความดัน SUT-I มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX5700 สูงสุด 3.9 % จากเต็มสเกล 500 kPa สำหรับตัวตรวจวัดความดัน SUT-S ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 110 kPa (15.9 PSI) ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำกว่ามาตรฐานของความดันภายในยางรถยนต์ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์ ส่วนตัวตรวจวัด SUT-I ถูกออกแบบมาใช้ใช้งานที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 500 kPa (72.5 PSI) ซึ่งอยู่ในย่านที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์ สำหรับชุดวงจรส่งสัญญาณแบบไร้สายสามารถส่งข้อมูลผ่านยางชั้นในและยางชั้นนอกของรถจักรยานยนต์ ไปยังตัวรับที่อยู่ภายนอกได้อย่างถูกต้อง แม่นยำที่ระยะห่างไม่เกิน 40 เมตร ซึ่งแนวคิดในการทดสอบนี้สามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

8.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นยังมีปัญหาในเรื่องของพื้นที่ในการติดกาวบริเวณจุดเชื่อมต่อ ไดอะแฟรมตัวเก็บประจุเนื่องจากพื้นที่ในการติดกาวจะมีผลต่อระยะเวลาการโค้งตัวสูงสุดของ ไดอะแฟรม ทำให้ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอาจจะมีความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งซึ่งจะมีปัญหาในการควบคุมการผลิตในกรณีที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก แนวทางการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการออกแบบให้จุดสัมผัสมีขนาดเล็กติดอยู่กึ่งกลางของ ไดอะแฟรม

ในส่วนของการออกแบบให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความไวสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการ ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุมีค่าน้อยๆ จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในกระบวนการสร้างฟิล์มดินแบบจึงไม่สามารถสร้างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่ำกว่า 50 ไมโครเมตรในการพัฒนางานวิจัยในขั้นต่อไป จึงทำ เป็นต้องออกแบบและสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้มีขนาด เล็กลง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความไวและลดขนาดของตัวตรวจรู้ความดันให้มีขนาดเล็กลงได้อีกเช่นกัน

การนำตัวตรวจรู้ความดันไปประยุกต์ใช้งาน จะต้องมีการตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าซึ่งการ ทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้โอซีสำเร็จรูปในการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ และใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวัด ปัญหาที่พบคือสัญญาณรบกวนจากภายนอกทำให้ความจุไฟฟ้าที่ อ่านได้มีค่าเปลี่ยนไปเนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นไม่มีบรรจุภัณฑ์ที่สามารถกันสัญญาณ รบกวนจากสนามไฟฟ้าภายนอกได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนจะส่งผลทำให้การรายงานค่าความดัน ผิดพลาดจากความเป็นจริง ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่ กันสัญญาณรบกวนได้เช่น บรรจุภัณฑ์ที่เป็น โลหะ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- 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 5thIEEE 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. Elsemary, **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

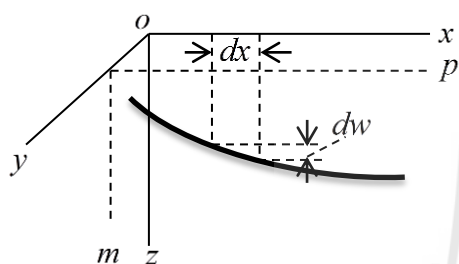


ภาคผนวก ก

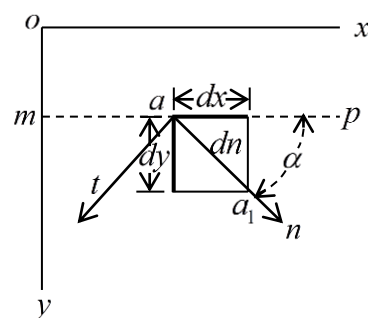
การประดิษฐ์สมการการโค้งตัว

ความชันและความโค้งของการโก่งตัว

ในการอธิบายการโก่งตัวเพียงเล็กน้อยของแผ่น เราจะกำหนด กึ่งกลางแผ่น (middle plane) ของแผ่นก่อนที่จะเกิดการโก่งตัวที่ระนาบ xy ระหว่างการโก่งตัวในระนาบ xy ระยะการเคลื่อนที่ w จะตั้งฉากกับระนาบ xy และพื้นผิวของแผ่น (middle surface) ระยะการเคลื่อนที่บริเวณจุดกึ่งกลางแผ่นนี้เรียกว่า การโก่งตัว (deflection) ของแผ่น การตัดระนาบของแผ่นให้ขนานกับระนาบ xz ดังรูปที่ 1a



รูปที่ 1a



รูปที่ 1b

จากรูปที่ 1a สามารถหาความชันของพื้นผิวในทิศทาง x ได้ คือ $i_x = dw/dx$ เช่นเดียวกัน ความชันในทิศทาง y คือ $i_y = dw/dy$ ถ้ากำหนดความชันในทิศทางใดๆ กำหนดเป็น an บนระนาบ xy และมีมุม α กระทำกับแกน x สามารถหาความแตกต่างของการโก่งตัวของจุดสองจุดที่อยู่ติดกันที่จุด a และ a_1 ในทิศทาง a_n คือ

$$dw = \frac{dw}{dx} dx + \frac{dw}{dy} dy$$

และมีความสัมพันธ์กับความชันคือ

$$\frac{dw}{dn} = \frac{dw}{dx} \frac{dx}{dn} + \frac{dw}{dy} \frac{dy}{dn} = \frac{dw}{dx} \cos \alpha + \frac{dw}{dy} \sin \alpha \quad (a)$$

ในการหามุม α_1 ซึ่งเป็นความชันสูงสุดสามารถหาค่าได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการ (a) เทียบกับตัวแปร α กำหนดเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{d}{d\alpha} \left(\frac{dw}{dx} \cos \alpha + \frac{dw}{dy} \sin \alpha \right) = 0$$

$$-\frac{dw}{dx} \sin \alpha + \frac{dw}{dy} \cos \alpha = 0$$

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\frac{dw}{dy}}{\frac{dw}{dx}} \quad (b)$$

แทนค่าความสัมพันธ์ของ $\sin \alpha$ และ $\cos \alpha$ ในสมการ (a) จะได้ความชันสูงสุดดังสมการ

$$\frac{dw}{dn} = \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dy} \right)^2$$

กำหนดสมการ(a)เท่ากับศูนย์เราจะได้ทิศทางความชันของพื้นผิวเท่ากับศูนย์ จะได้ความสัมพันธ์ของมุม α_2 หาได้จากสมการ

$$\tan \alpha_2 = \frac{-\frac{dw}{dx}}{\frac{dw}{dy}}$$

จากสมการ (b) และ (d) สามารถสรุปได้ว่า

$$\tan \alpha_1 \tan \alpha_2 = -1$$

แสดงให้เห็นว่าทิศทางที่ความชันเป็นศูนย์และที่ความชันสูงสุดจะตั้งฉากกันเสมอ

ในการหาค่าความโค้งของแผ่น (middle surface) สังเกตว่าการโค้งตัวของแผ่นมีค่าน้อยมาก ในกรณีนี้ค่าความชันของพื้นผิวในทิศทางใดๆจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับมุม ซึ่งคือค่า tangent ของพื้นผิวในทิศทางที่กำหนดขึ้นบนระนาบ xy และค่าความชันยกกำลังสองสามารถประมาณเป็นศูนย์ ค่าความโค้งของพื้นผิวของแผ่นที่ขนานกับระนาบ xz ในรูปที่ 1 สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{1}{r_x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (c)$$

จะเห็นว่าค่าความโค้งในสมการ (c) จะเป็นบวกถ้าเป็นการโค้งตัวในลักษณะนูนขึ้น สำหรับการโค้งตัวในลักษณะนูนลงดังรูปตัวอย่างที่กล่าวมา สมการอนุพันธ์อันดับสอง $\partial^2 w / \partial^2 x$ จะเป็นลบ

ในลักษณะเดียวกันเราจะได้ค่าความโค้งที่ขนานกับระนาบ yz คือ

$$\frac{1}{r_y} = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (f)$$

พิจารณาค่าความโค้งของแผ่นในทิศทาง an ในรูปที่ 1b จะได้

$$\frac{1}{r_n} = -\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right) = -\frac{\partial^2 w}{\partial n^2}$$

จากสมการ (a)

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial y} \sin \alpha$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่า

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_n} &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial y} \sin \alpha \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial w}{\partial y} \sin \alpha \right) \\ &= -\left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \cos^2 \alpha + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \cos \alpha \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \sin^2 \alpha \right] \\ &= -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cos^2 \alpha + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \cos \alpha \sin \alpha + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \sin^2 \alpha \right) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{r_x} \cos^2 \alpha - \frac{1}{r_{xy}} \sin 2\alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha \quad (g)$$

จะเห็นว่าค่าความโค้งทิศทาง an ใดๆของพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากสมการ (g) ถ้าทราบค่า $1/r_x$ และ $1/r_y$ ที่จุดนั้นๆ และมีอีกค่าคือ

$$\frac{1}{r_{xy}} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (h)$$

ซึ่งค่านี้เรียกว่า การบิดของพื้นผิว (twist of surface) ที่พิจารณาตามแกน x และแกน y

ถ้าแทนค่าทิศทาง an ในรูปที่ 16a กำหนดทิศทาง at ตั้งฉากกับทิศทาง an ค่าความโค้งในทิศทางใหม่สามารถหาได้จากสมการ (g) โดยการแทนค่า α ด้วย $\frac{\pi}{2} + \alpha$ จะได้ an

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_t} &= \frac{1}{r_x} \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) - \frac{1}{r_{xy}} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) + \frac{1}{r_y} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) \\ &= \frac{1}{r_x} \sin^2 \alpha - \frac{1}{r_{xy}} \cos 2\alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (i)$$

นำสมการ (g) + (i) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_t} &= \frac{1}{r_x} \cos^2 \alpha - \frac{1}{r_{xy}} \sin 2\alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha + \frac{1}{r_x} \sin^2 \alpha + \frac{1}{r_{xy}} \sin 2\alpha + \frac{1}{r_y} \cos^2 \alpha \\ &= \frac{1}{r_x} (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) + \frac{1}{r_y} (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y}$$

จะเห็นว่าที่จุดใดๆของพื้นผิวผลรวมค่าความโค้งในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน an เช่น และ at ที่เป็นอิสระตามมุม α ผลรวมนี้เรียกว่าค่าความโค้งเฉลี่ย (Average curvature) ของพื้นผิวที่จุด a

และค่าความบิดของพื้นผิวที่จุด a ที่ขึ้นกับทิศทาง an และ at คือ

$$\frac{1}{r_{nt}} = \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial n}$$

ในการคำนวณหาค่าอนุพันธ์เทียบกับตัวแปร t ในสมการดังกล่าวจะสังเกตว่าทิศทาง at ตั้งฉากกับ an ดังนั้นจะต้องแทนค่า α ด้วย $\frac{\pi}{2} + \alpha$ ในสมการ(a)จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_{nt}} &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial}{\partial y} \sin \alpha\right) \left(\frac{dw}{dx} \sin \alpha + \frac{dw}{dy} \cos \alpha\right) \\ &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cos \alpha \sin \alpha + \frac{\partial^2 w}{\partial xy} \cos^2 \alpha - \frac{\partial^2 w}{\partial xy} \sin^2 \alpha + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \cos \alpha \sin \alpha \\ &= \cos \alpha \sin \alpha \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial^2 w}{\partial xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) + \cos 2\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial xy} \\ \frac{1}{r_{nt}} &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y}\right) + \cos 2\alpha \frac{1}{r_{xy}} \end{aligned} \quad (j)$$

ขั้นตอนต่อไปจะให้ความสำคัญกับค่า α ซึ่งเป็นทิศทางในค่าความโค้งของพื้นผิวสูงสุดหรือต่ำสุด และมีความสัมพันธ์กับค่าความโค้ง สมการที่จำเป็นกับการหาค่า α หาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ(j) เทียบกับ α และกำหนดเท่ากับศูนย์

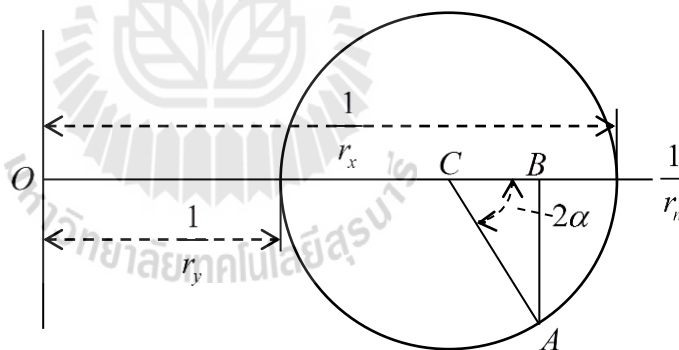
$$\begin{aligned} \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{1}{r_x} \cos^2 \alpha - \frac{1}{r_{xy}} \sin 2\alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha \right) &= 0 \\ -\frac{1}{r_x} \cos 2\alpha - \frac{2}{r_{xy}} \cos 2\alpha + \frac{1}{r_y} \sin 2\alpha &= 0 \end{aligned} \quad (k)$$

ดังนั้นจะได้

$$\tan 2\alpha = -\frac{\frac{2}{r_{xy}}}{\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y}}$$

จากสมการจะหาค่า α ได้สองค่า ทั้งสองค่าต่างกัน $\pi/2$ แทนค่า α ที่ได้จากสมการ (g) จะได้ค่า $1/r_n$ มาสองค่า โดยสองค่านี้คือค่าสูงสุดและต่ำสุดของผิวโค้งบนระนาบ a ที่จุด a สองค่านี้เรียกว่า ความโค้งหลัก (Principal curvature) ของพื้นผิว และมีความสัมพันธ์กับระนาบ nax และ taz ซึ่งเป็นระนาบหลักของความโค้ง (Principal plane of curvature)

เราสามารถใช่วงกลมคล้ายกับวงกลมของ Mohr ที่ใช้สำหรับการรวมแรงเพื่อแสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งและการบิดของพื้นผิวแตกต่างกันไปตามมุม α เพื่อลดความซับซ้อนในการอธิบาย จะสมมติว่าพิกัดของระนาบ xy และ yz ขนานกับระนาบหลักของความโค้ง แล้ว $\frac{1}{r_{xy}} = 0$



รูปที่ 2 วงกลมของ Mohr

และจากสมการ (g) และ (j) ที่มุม α ใดๆ

$$\frac{1}{r_n} = \frac{1}{r_x} \cos^2 \alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha$$

$$\frac{1}{r_{nt}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y} \right) \sin 2\alpha \quad (1)$$

ความโค้งและการบิดของพื้นผิวจะเป็นฟังก์ชันของวงกลม และสร้างวงกลมบนเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y}$ ดังรูปที่ 2 จะเห็นจุด A ที่กำหนดโดยมุม 2α มีฟังก์ชัน \overline{OB} คือ

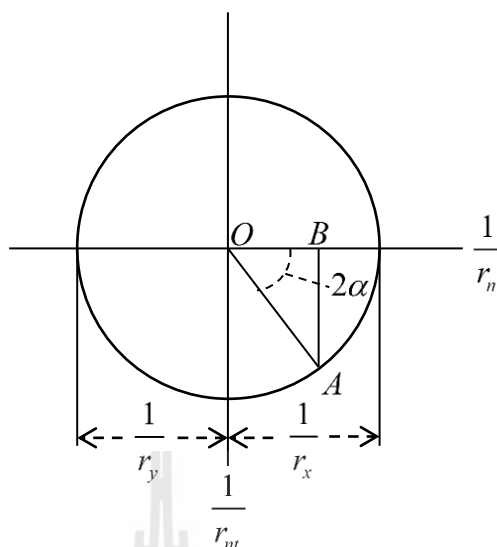
$$\begin{aligned} \overline{OB} &= \overline{OC} + \overline{CB} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y} \right) \cos 2\alpha \\ &= \frac{1}{r_x} \cos^2 \alpha + \frac{1}{r_y} \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

และฟังก์ชัน \overline{AB} คือ

$$\overline{AB} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y} \right) \sin 2\alpha$$

เปรียบเทียบผลลัพธ์นี้กับสมการ(1) สามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันของจุด A จะกำหนดความโค้งและความบิดของพื้นผิวสำหรับมุม α ใดๆจะเห็นว่าค่าการบิดสูงสุด (maximum twist) มีค่าเท่ากับรัศมีของวงกลม จะเกิดขึ้นเมื่อ $\alpha = \pi/4$ เมื่อกำหนดทิศทางสองทิศทางที่ตั้งฉากกันตัดกับมุมระหว่างระนาบหลัก

ในตัวอย่างที่กำหนดมาข้างต้นค่าความโค้งในทิศทางใดๆจะเป็นบวก เนื่องจากมีการโค้งตัวแบบนูนลง ถ้ามีการโค้งตัวแบบนูนขึ้น ค่าความโค้ง $1/r_x$ และ $1/r_y$ เป็นลบ นั่นคือความโค้งในทิศทางใดๆก็เป็นลบเช่นกัน พื้นผิวทั้งหมดโค้งตัวไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่า synclastic ในบางกรณีความโค้งหลักทั้งสองค่ามีเครื่องหมายตรงกันข้าม ตัวอย่างที่ชัดเจนที่สุดคือ อานม้า พื้นผิวลักษณะนี้เรียกว่า anticlastic วงกลมรูปที่ 3 อธิบายกรณีเฉพาะของพื้นผิวดังกล่าวนี้

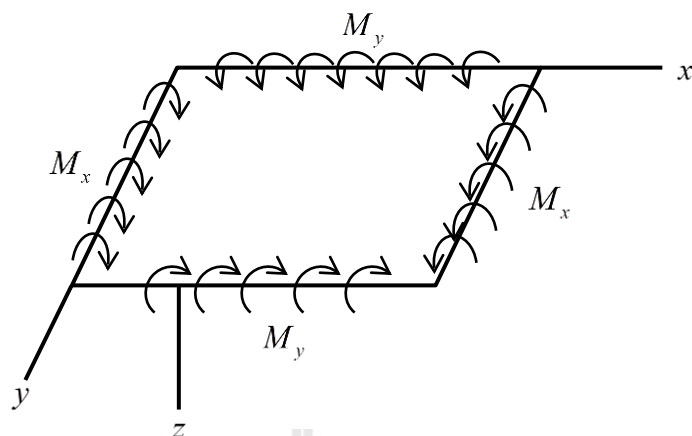


รูปที่ 3 วงกลมของ Mohr ในกรณี anticlastic

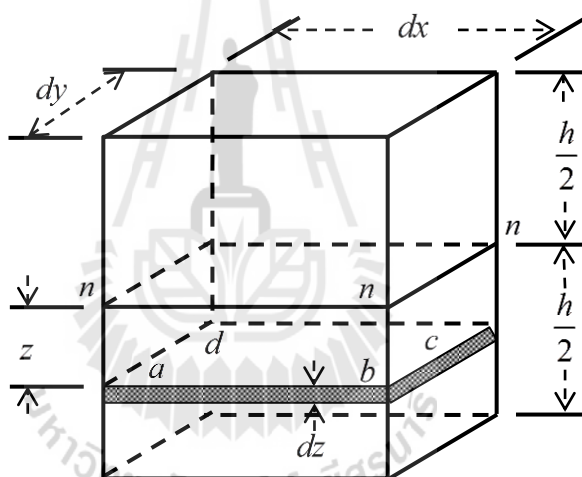
เมื่อ $1/r_x = -1/r_y$ จะเห็นว่ากรณีนี้ค่าความโค้งจะเป็นศูนย์ที่ $\alpha = \pi/4$ และ $\alpha = 3\pi/4$ และค่าการบิดเท่ากับ $\pm 1/r_x$

-ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของแผ่น

ในกรณีการโค้งตัวของแท่งปริซึมยาว ในการแก้ปัญหาสำหรับการกระจายความเครียดได้ โดยการสมมติว่า หน้าตัดของแท่งยังคงอยู่บนระนาบความโค้งและหมุนเทียบกับแกนกลาง (neutral axes) ซึ่งจะอยู่บนพื้นผิวส่วนโค้งของการโค้งตัวปกติเสมอ การรวมกันของการดัดดังกล่าวในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน เรียกว่า ความโค้งบริสุทธิ์ (Pure bending) ในการวิเคราะห์จะเริ่มด้วยการตัดส่วนโค้งเป็นสี่เหลี่ยมโดยการกำหนดแรงโมเมนต์กระจายไปตามขอบของแผ่นดังรูปที่ 19 เราจะกำหนดระนาบ xy ให้ตรงกับระนาบกลางของแผ่น (Middle plane) ก่อนที่แผ่นจะโค้งตัวไปตามแกน x และแกน y ตามขอบของแผ่นดังแสดงในรูป และแกน z ตั้งฉากกับระนาบกลางของแผ่น และจะกำหนดให้แผ่นมีการโค้งตัวในทิศทางลง แสดงว่า M_x เป็นโมเมนต์การดัดต่อหน่วยความยาวที่กระทำขนานกับขอบตามแนวแกน y และ M_y เป็นโมเมนต์การดัดต่อหน่วยความยาวที่กระทำขนานกับขอบตามแนวแกน x โมเมนต์เหล่านี้จะพิจารณาเป็นบวกเมื่อมีทิศทางดังแสดงในรูป เมื่อมีแรงกดด้านบนของแผ่นก็จะเกิดความเครียดด้านล่างของแผ่นเช่นกัน ความหนาของแผ่นจะกำหนดเป็น h



รูปที่ 4



รูปที่ 5

เราจะพิจารณาการตัดองค์ประกอบของแผ่นเป็นระนาบคู่ขนานกับระนาบ xz และ yz ดังรูปที่ 20 ในตัวอย่างรูปที่ 4 แสดงให้เห็นการรวมกันของความโค้งสองส่วน ในกรณีนี้จะมียอดโค้งประกอบเหมือนรูปที่ 5 สมมติว่าการโค้งตัวหรือการตัดของแผ่นด้านข้างของชิ้นส่วนที่พิจารณา ซึ่งยังคงอยู่ในระนาบและหมุนรอบแกนกลาง mn และอยู่ในระนาบกึ่งกลางของแผ่นเช่นกัน สามารถสรุปได้ว่าระนาบกึ่งกลางของแผ่นไม่มีการขยายตัวเนื่องจากการตัด หรือโก่งตัว เรียกว่าพื้นผิวกลาง (neutral surface) กำหนด $1/r_x$ และ $1/r_y$ คือค่าความโค้งของพื้นผิวกลาง ในส่วนที่ขนานกับระนาบ xz และ yz ตามลำดับ หน่วยของการยึดตัวในทิศทาง x และ y ของชิ้นส่วนที่เป็นแผ่น $abcd$ ดังรูปที่ 5 ระยะห่าง z จากผิวกลางซึ่งจะพบในกรณีของคานซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon_x = \frac{z}{r_x}, \varepsilon_y = \frac{z}{r_y}$$

จากกฎของฮุก (hooke's law) ซึ่งสอดคล้องกับความเครียดในชิ้นส่วน abcd คือ

$$\sigma_x = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right)$$

$$\sigma_x = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_y} + \nu \frac{1}{r_x} \right) \quad (b)$$

ความเครียดเหล่านี้เป็นสัดส่วนกับระยะห่าง z ของชิ้นส่วน abcd จากผิวกลางและขึ้นกับขนาดของค่าความโค้งของแผ่นด้วยเช่นกัน

ปกติความเครียดจะกระจายตัวไปตามพิกัดข้างของชิ้นส่วนในรูปที่ 5 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นภายในซึ่งเป็นขนาดต่อหน่วยความยาวจะเท่ากับโมเมนต์ภายนอก M_x และ M_y ในที่นี้เราจะได้สมการ

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dy dz = M_x dy$$

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z dx dz = M_y dx \quad (c)$$

แทนค่าสมการ (b) ในสมการ (c) สำหรับ σ_x และ σ_y

$$M_x = D \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right) = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$M_x = D \left(\frac{1}{r_y} + \nu \frac{1}{r_x} \right) = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

เมื่อ w คือ ระยะการโก่งตัวในทิศทางแกน z

D คือ ความแข็งเชิงค้ำกำหนดโดย

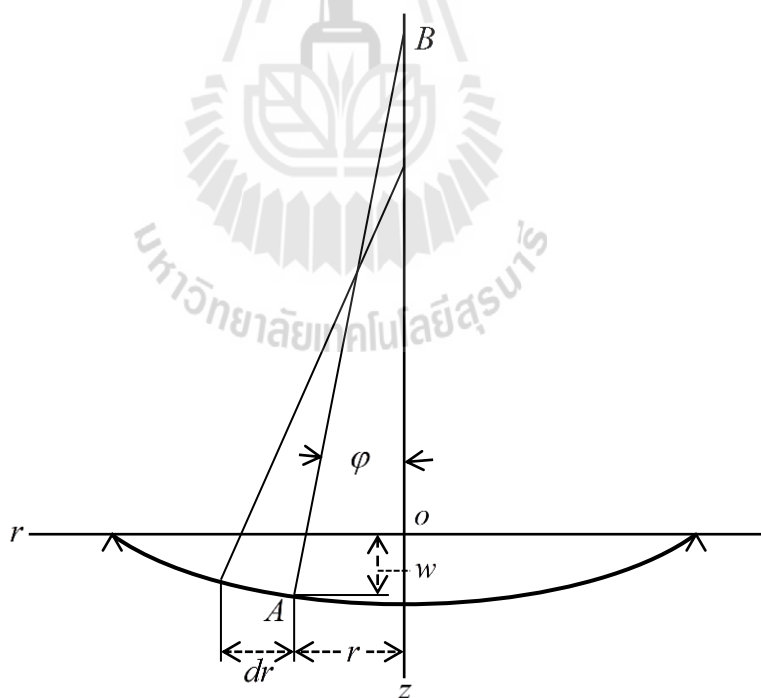
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

เมื่อ E คือ ค่ามอดูลัสของยัง

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

-สมการเชิงอนุพันธ์การโก่งตัวของแผ่นวงกลมสมมาตร

ถ้าให้แรงกับแผ่นวงกลมที่มีความสมมาตรกระจายอย่างทั่วถึงในแนวตั้งฉาก การโก่งตัวสูงสุดจะเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลาง และมีการโก่งตัวแบบสมมาตร การโก่งตัวในแต่ละจุดที่ห่างจากจุดกึ่งกลางตามแนวรัศมีก็มีลักษณะสมมาตรเช่นกัน ดังนั้นในการพิจารณาการโก่งตัวสามารถตัดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเป็นแกนสมมาตรได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การโก่งตัวของแผ่นวงกลมแบบสมมาตร

จากรูป จุด O เป็นจุดกึ่งกลางของแผ่นขณะที่ไม่มีแรงโก่งตัว r คือ ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่น และ w คือ ระยะการโก่งตัวของแผ่นในทิศทางต่ำลง ที่ค่าความชันสูงสุดของพื้นผิวที่จุด

A ใดๆกำหนดเป็น $-dw/dr$ และผิวของส่วนโค้งของจุดกึ่งกลางของแผ่นในระนาบ rz สำหรับการโก่งตัวที่มีค่าน้อยๆ จะได้

$$\frac{1}{r_n} = -\frac{d^2w}{dr^2} = \frac{d\varphi}{dr} \quad (a)$$

เมื่อ φ คือมุมขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ปกติของพื้นผิวที่จุด A บนแกนสมมาตร OB จากแกนสมมาตรสามารถสรุปได้ว่า $1/r_n$ คือค่าความโค้งซึ่งเป็นหลักการของความโค้ง และหลักการที่สองของความโค้ง จะทำการตัดตามเส้น AB และตั้งฉากกับระนาบ rz สังเกตว่าจุดทุกจุดของ AB ที่อยู่บนพื้นผิวกลางของแผ่นตามระยะห่างรัศมี r จากผิวทรงกรวยที่มีจุดปลายอยู่ที่ B ดังนั้น สรุปได้ว่า ความยาว AB คือรัศมีของหลักการที่สองของความโค้งซึ่งกำหนดโดย r ดังนั้นจากรูปที่ 7 จะได้

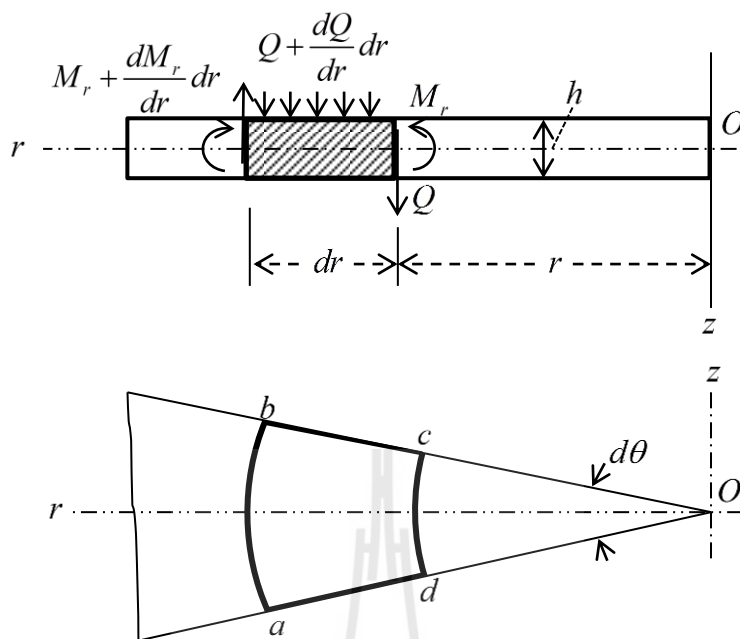
$$\frac{1}{r_t} = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} = \frac{\varphi}{r} \quad (b)$$

สมการ (a) และ (b) เป็นสมการที่เป็นหลักการความโค้ง และมีสมการที่เป็นความสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์การดัด ความสัมพันธ์ของสมการ (3) และ (4) มาจากการวิเคราะห์การโก่งตัวของคานปกติ ถ้าพิจารณาการโก่งตัวของแผ่นวงกลม จะได้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์การดัดและค่าความโค้งดังนี้

$$M_r = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) = D \left(\frac{d\varphi}{dr} + \frac{\nu}{r} \varphi \right) \quad (5)$$

$$M_t = -D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) = D \left(\frac{\varphi}{r} + \nu \frac{d\varphi}{dr} \right) \quad (6)$$

เมื่อ M_r และ M_t คือโมเมนต์ตามหน่วยความยาว โมเมนต์ M_r เป็นโมเมนต์ตามแนวเส้นรอบวงของแผ่น เช่นการดัดผิวที่เกิดจากรายที่มีปลายที่จุด B และ M_t เป็นโมเมนต์ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 7

จากสมการที่ (5) และ (6) มีตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ w หรือ ϕ ซึ่งสามารถหาค่าได้ โดยการพิจารณาองค์ประกอบที่สมดุลของแผ่น เช่น ส่วน abcd ในรูปที่ 7 ที่ตัดจากแผ่นวงกลมตามแนวเส้นรอบวง ab และ cd และตัดตามแนวรัศมีมีอีกสองส่วนคือ ad และ bc ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในส่วน cd จะเป็น

$$M_r r d\theta \quad (c)$$

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่สอดคล้องกับด้าน ab คือ

$$\left(M_r + \frac{dM_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta \quad (d)$$

โมเมนต์ที่สัมพันธ์กับด้าน ad และ bc คือ $M_r dr$ และมีผลลัพธ์ในระนาบ rOz จะเท่ากับ

$$M_r dr d\theta \quad (e)$$

จากระบบสมมาตร สรุปได้ว่าแรงเฉือนของส่วนที่อยู่บนแนวรัศมีจะหักล้างกันไป แต่โดยปกติแรงภายนอกที่กระทำจะกระทำกับด้าน cd กำหนดโดย θ คือแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวของกราฟในภาพตัดกรวยของรัศมี r แรงเฉือนทั้งหมดบนด้าน cd คือ $Q_r d\theta$ และมีความสัมพันธ์กับแรงด้าน ab คือ

$$\left[Q + \left(\frac{dQ}{dr} \right) dr \right] (r + dr) d\theta$$

ประมาณค่าผลต่างระหว่างแรงเฉือนบนสองด้านของชิ้นส่วนที่พิจารณามีค่าเป็นศูนย์ จะได้แรงที่มีความสัมพันธ์กับระนาบ rz คือ

$$Q_r d\theta dr \tag{f}$$

ผลรวมของแรง (c), (d), (e), และ (f) เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นจะไม่คิดผลแรงภายนอกเช่น และพจน์ที่เป็นผลต่างอันดับสูง จะได้สมการสมดุลแรงภายในชิ้นส่วนที่พิจารณา abcd คือ

$$\left(M_r + \frac{dM_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta - M_r r d\theta - M_t dr d\theta + Q_r d\theta dr = 0$$

จากสมการ สามารถลดรูปสมการได้ โดยไม่คิดพจน์ที่เป็นผลต่างอันดับสูง จะได้

$$M_r + \frac{dM_r}{dr} r - M_t + Qr = 0 \tag{g}$$

แทนค่าสมการที่ (5) และ (6) สำหรับ M_r และ M_t ในสมการ (g) จะได้

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} - \frac{\varphi}{r^2} = -\frac{Q}{D} \tag{7}$$

และสามารถเขียนได้ในรูป

$$\frac{d^3 w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} = \frac{Q}{D} \quad (8)$$

ในกรณีเฉพาะของโหลดแบบสมมาตรของแผ่นวงกลม แรงเฉือน Q สามารถคำนวณอย่างง่ายได้โดยการหารด้วยการกระจายโหลดของแผ่นวงกลมตามรัศมี r ด้วย $2\pi r$ แล้วสมการที่ 7 หรือ 8 สามารถใช้หาความชัน φ และการโก่งตัว w ของแผ่น อินทิเกรตของสมการนี้ สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\varphi) \right] = -\frac{Q}{D} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad (10)$$

ถ้า Q อธิบายโดยฟังก์ชันของ r สมการเหล่านี้จะสามารถอินทิเกรตได้ไม่ยากในกรณีนี้ ทางด้านขวาของสมการที่ 10 เป็นฟังก์ชันของความเข้ม q ของโหลดที่กระจายไปทั่วแผ่น ในกรณีนี้จะคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย $2\pi r$ จะได้ว่า

$$Q2\pi r = \int_0^r q2\pi r dr$$

จะได้

$$r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{1}{D} \int_0^r q r dr$$

หารทั้งสองข้างของสมการด้วย r จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{q}{D} \quad (11)$$

สมการนี้สามารถอินทิเกรตได้ง่าย ถ้าโหลด q เป็นฟังก์ชันของ r

-โหลดแบบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแผ่นวงกลม

ถ้าแผ่นวงกลมรัศมี a ประกอบด้วยโหลดมีความเข้ม q กระจายตัวทั่วทั้งพื้นผิวของแผ่น และขนาดของแรงเฉือน Q ที่ระยะห่าง r จากจุดศูนย์กลางของแผ่น สามารถหาได้จากสมการ

$$2\pi rQ = \pi r^2 q$$

จาก

$$Q = \frac{qr}{2} \tag{a}$$

แทนค่าในสมการ (57) จะได้

$$r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{qr}{2D} \tag{b}$$

อินทิเกรตสมการ 1 ครั้ง จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) = \frac{qr^2}{4D} + C_1 \tag{c}$$

เมื่อ C_1 คือค่าคงที่จากการอินทิเกรต จากนั้นคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย r และอินทิเกรตอีกครั้งจะได้

$$r \frac{dw}{dr} = \frac{qr^4}{16D} + \frac{C_1 r^2}{2} + C_2$$

และ

$$\frac{dw}{dr} = \frac{qr^4}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \tag{12}$$

อินทิเกรตอีกครั้ง จะได้

$$w = \frac{qr^4}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \log \frac{r}{a} + C_3 \quad (13)$$

เราจะได้สมการการโก่งตัว w และค่าคงที่การอินทิเกรต ซึ่งค่าคงที่ที่สามารถหาได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นในกรณีต่างๆ

-กรณีแผ่นวงกลมที่มีขอบแบบยึด ในกรณีนี้ค่าความชันของการเบี่ยงเบนของพื้นผิวตามแนวรัศมีต้องเป็นศูนย์ ที่ $r=0$ และ $r=a$ ดังนั้นจากสมการที่ 12

$$\left(\frac{qr^4}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \right)_{r=0} = 0$$

$$\left(\frac{qr^4}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \right)_{r=a} = 0$$

จากสมการแรกสามารถสรุปได้ว่า $C_2 = 0$ แทนในสมการที่สอง จะได้

$$C_1 = -\frac{qa^2}{8D}$$

ค่าเหล่านี้เป็นค่าคงที่ของสมการที่ (12) จะได้สมการสำหรับความชันคือ

$$\varphi = -\frac{dw}{dr} = \frac{qr}{16D}(a^2 - r^2) \quad (14)$$

แทนค่า C_1 และ C_2 ในสมการที่ (13) จะได้

$$w = \frac{qr^4}{64D} - \frac{qa^2 r^2}{32D} + C_3 \quad (d)$$

ที่ขอบของแผ่น การโก่งตัวจะเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{qa^4}{64D} - \frac{qa^4}{32D} + C_3 = 0$$

ดังนั้น จะได้

$$C_3 = \frac{qa^4}{64D}$$

แทนค่าสมการ (d) จะได้สมการการโก่งตัวของแผ่นวงกลมที่มีโหลดกระจายทั่วทั้งแผ่น

$$w(r) = \frac{q}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad (15)$$



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing on a platform, with a large 'S' and 'R' on either side, all enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดสอบผลของอุณหภูมิและการทดสอบผลเพื่อเปรียบเทียบ

ตารางผลการทดสอบการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS

P(kPa)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
100k	0	10.23	19.79	31.7	40.95	51.08	60.8	70.41	80.9	91.2	100.58	110.45
1	1.36015	1.36682	1.37642	1.39048	1.40523	1.42776	1.45575	1.49709	1.53852	1.60612	1.68435	1.86754
2	1.35998	1.3667	1.37658	1.39087	1.40562	1.42812	1.45549	1.49736	1.53919	1.6075	1.68714	1.8689
3	1.35987	1.36671	1.37642	1.39088	1.40568	1.42856	1.45531	1.49755	1.5398	1.60812	1.68849	1.87045
4	1.35981	1.36683	1.37654	1.39071	1.40572	1.42878	1.45565	1.49768	1.54021	1.60872	1.7115	1.8653
5	1.36011	1.36661	1.37647	1.39002	1.40621	1.4289	1.45587	1.49781	1.54094	1.60935	1.71142	1.85412
6	1.35997	1.36658	1.37649	1.39029	1.40631	1.42892	1.45619	1.49701	1.54148	1.60992	1.71168	1.85607
8	1.36001	1.36662	1.37658	1.39136	1.40641	1.42863	1.45613	1.4973	1.54218	1.61054	1.71182	1.85734
7	1.35994	1.36705	1.3765	1.39146	1.40624	1.42871	1.45649	1.49756	1.54273	1.61155	1.71203	1.85808
8	1.36006	1.36689	1.37639	1.39152	1.40632	1.4291	1.45668	1.49712	1.54315	1.61202	1.71249	1.86039
9	1.35989	1.36702	1.37652	1.39133	1.40661	1.42912	1.45649	1.4981	1.54372	1.61288	1.71998	1.86144
10	1.36003	1.36705	1.37649	1.39129	1.4066	1.42953	1.45663	1.49844	1.5445	1.61252	1.7134	1.86372
10k	1.83265	1.83975	1.84307	1.86577	1.88145	1.90463	1.93457	1.97761	2.02248	2.09573	2.19918	2.35987
50k	1.79045	1.79765	1.80768	1.82271	1.83906	1.86175	1.89077	1.93216	1.98321	2.053252	2.15307	2.31482
1M	1.3189	1.3259	1.33509	1.35021	1.36609	1.38771	1.42627	1.45708	1.50773	1.58773	1.68543	1.83925
max	1.36015	1.36705	1.37658	1.39152	1.40661	1.42953	1.45668	1.49844	1.5445	1.61288	1.71998	1.87045
min	1.35981	1.36658	1.37639	1.39002	1.40523	1.42776	1.45531	1.49701	1.53852	1.60612	1.68435	1.85412
average	1.359983	1.366807	1.376499	1.390922	1.406084	1.428731	1.456068	1.497547	1.541492	1.609930	1.705845	1.862122
max-ave	0.000166	0.000242	8.909E-05	0.000591	0.000523	0.000790	0.000618	0.000892	0.003007	0.002949	0.014134	0.008327
ave-min	0.0001736	0.0002273	0.0001009	0.0009082	0.0008564	0.0009791	0.0007518	0.0005373	0.0029727	0.0038109	0.0214955	0.0080027

ตารางผลการทดสอบการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI

P(kPa)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
real@100k	0	51.25	99.62	151.25	202.4	250.3	302.44	350.2	370.8
1	0.33985	0.34107	0.34262	0.34494	0.34718	0.34964	0.35188	0.35378	0.35386
2	0.33981	0.34116	0.34265	0.3448	0.34703	0.34968	0.35124	0.3539	0.35388
3	0.33992	0.34107	0.3425	0.34487	0.34704	0.34964	0.35144	0.35392	0.35391
4	0.33995	0.34111	0.34243	0.34493	0.34708	0.34961	0.35149	0.35382	0.35375
5	0.33997	0.34103	0.34248	0.34491	0.34701	0.34957	0.35163	0.35386	0.35362
6	0.33981	0.34106	0.34255	0.34485	0.34709	0.34952	0.35167	0.35387	0.35404
8	0.3395	0.341	0.34253	0.34494	0.34706	0.34951	0.35164	0.35361	0.35381
7	0.33985	0.34102	0.34241	0.34491	0.34703	0.3495	0.35178	0.35352	0.35392
8	0.33977	0.34116	0.34233	0.34509	0.3469	0.34937	0.35187	0.35345	0.35387
9	0.33999	0.34117	0.34246	0.34598	0.34695	0.34924	0.35178	0.35324	0.35398
10	0.33992	0.34125	0.34247	0.34597	0.34701	0.34928	0.35187	0.35311	0.35374
10k	0.77823	0.77928	0.78154	0.78356	0.78551	0.78821	0.7911	0.79214	0.79357
50k	0.75896	0.7601	0.76174	0.76352	0.76583	0.7682	0.77086	0.77111	0.77105
1M	0.31414	0.31532	0.31693	0.31848	0.3208	0.32288	0.32468	0.32592	0.3262
max	0.33999	0.34125	0.34265	0.34598	0.34718	0.34968	0.35188	0.35392	0.35404
min	0.3395	0.341	0.34233	0.3448	0.3469	0.34924	0.35124	0.35311	0.35362
average	0.33985	0.34110	0.34249	0.34511	0.34703	0.34951	0.35166	0.35364	0.35385
max-ave	0.00014	0.00015	0.00016	0.00087	0.00015	0.00017	0.00022	0.00028	0.00019
ave-min	0.00035	0.00010	0.00016	0.00031	0.00013	0.00027	0.00042	0.00053	0.00023

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PDMS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	10.55	19.06	33.8	42.78	50	60.07	70	83.6	90	100
1	2.70911	2.71403	2.71903	2.73466	2.74807	2.76342	2.79614	2.83724	2.8874	2.93234	3.06429
2	2.70868	2.71466	2.71891	2.73523	2.74792	2.76396	2.79569	2.83796	2.88867	2.93256	3.06432
3	2.70962	2.71452	2.71943	2.73569	2.74842	2.76439	2.79504	2.83698	2.88857	2.93312	3.06417
4	2.70983	2.71502	2.71982	2.73641	2.74857	2.76403	2.79515	2.8373	2.8886	2.93264	3.06426
5	2.70942	2.71512	2.71961	2.73596	2.74603	2.76445	2.79526	2.83754	2.88842	2.93297	3.06472
average	2.709332	2.71467	2.71936	2.73559	2.747802	2.76405	2.795456	2.837404	2.888332	2.932726	3.064352

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PDMS ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2.74307	2.7559	2.76826	2.78342	2.81729	2.84472	2.87197	2.91682	2.97462	3.05762	3.18926
2	2.74326	2.75562	2.76854	2.78325	2.81745	2.8446	2.87152	2.91672	2.97482	3.05785	3.18937
3	2.74283	2.75609	2.76804	2.78338	2.81712	2.84482	2.87124	2.91695	2.97474	3.05794	3.18942
4	2.74342	2.75517	2.76789	2.78368	2.81767	2.84497	2.87204	2.91714	2.97441	3.05752	3.18901
5	2.74362	2.7554	2.76801	2.78371	2.81701	2.84476	2.87221	2.91703	2.97475	3.05747	3.18894
average	2.74324	2.755636	2.768148	2.783488	2.817308	2.844774	2.871796	2.916932	2.974668	3.05768	3.1892

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PDMS ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	10.55	19.06	33.8	42.78	50	60.07	70	83.6	90	100
1	2.80472	2.81672	2.82948	2.8469	2.86872	2.89217	2.92631	2.99976	3.05501	3.14329	3.25967
2	2.80465	2.81664	2.82934	2.84652	2.86901	2.89264	2.92676	3.00012	3.05546	3.14289	3.25924
3	2.80442	2.81667	2.82927	2.84704	2.86846	2.89272	2.9261	3.00007	3.05475	3.14354	3.25941
4	2.80483	2.81684	2.82952	2.84672	2.86834	2.89195	2.92655	2.99941	3.05492	3.14296	3.25997
5	2.80491	2.81705	2.82977	2.84724	2.86921	2.89242	2.92692	2.99957	3.0553	3.14342	3.25982
average	2.804706	2.816784	2.829476	2.846884	2.868748	2.89238	2.926528	2.999786	3.055088	3.14322	3.259622

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PDMS ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2.85212	2.8612	2.87784	2.89344	2.91427	2.94642	2.9674	3.03972	3.11327	3.2276	3.43279
2	2.85256	2.86172	2.87742	2.89372	2.91477	2.94642	2.96743	3.03924	3.11292	3.22747	3.43262
3	2.85187	2.86087	2.87824	2.89384	2.91405	2.94642	2.96721	3.04022	3.11286	3.22704	3.43255
4	2.85196	2.86151	2.87732	2.89313	2.91397	2.94642	2.96773	3.03942	3.11362	3.22786	3.43243
5	2.85257	2.86102	2.87796	2.89307	2.91422	2.94642	2.967	3.03991	3.11341	3.22792	3.43292
average	2.852216	2.861264	2.877756	2.89344	2.914256	2.94642	2.967354	3.039702	3.113216	3.227578	3.432662

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PI ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
1	0.70297	0.70624	0.70987	0.71232	0.7142	0.71674	0.71902	0.72021	0.72219
2	0.70271	0.70642	0.7096	0.71252	0.71432	0.71666	0.71889	0.72011	0.72236
3	0.70305	0.7064	0.71024	0.714243	0.71447	0.71651	0.71907	0.72024	0.72241
4	0.70312	0.7061	0.71004	0.7121	0.7141	0.71682	0.71921	0.72045	0.72212
5	0.70281	0.70606	0.70962	0.71204	0.71404	0.71694	0.71897	0.72003	0.72202
average	0.702932	0.706244	0.709874	0.712644	0.714226	0.716734	0.719032	0.720208	0.72222

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PI ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
1	0.74797	0.75132	0.75474	0.75683	0.76012	0.76243	0.76629	0.77127	0.77882
2	0.74784	0.75146	0.75472	0.75671	0.76027	0.76254	0.76616	0.77134	0.77857
3	0.74812	0.75157	0.75462	0.75692	0.76031	0.76223	0.76645	0.77106	0.77899
4	0.74804	0.75104	0.75491	0.75689	0.75993	0.76242	0.76624	0.77155	0.77894
5	0.74791	0.75127	0.75452	0.75685	0.76004	0.76261	0.7665	0.77138	0.77878
average	0.747976	0.751332	0.754702	0.75684	0.760134	0.762446	0.766328	0.77132	0.77882



ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PI ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
1	0.78997	0.79411	0.80021	0.80569	0.81123	0.81763	0.82404	0.83205	0.84203
2	0.78984	0.79425	0.80007	0.80549	0.81132	0.81747	0.82407	0.83219	0.84207
3	0.78992	0.79432	0.80024	0.80557	0.81121	0.81762	0.82415	0.83201	0.84189
4	0.79012	0.79397	0.80028	0.80573	0.81137	0.81754	0.82396	0.83197	0.84215
5	0.790013	0.79401	0.80032	0.80584	0.81141	0.81771	0.82378	0.83211	0.84219
average	0.789972	0.794132	0.800224	0.805664	0.811308	0.817594	0.824	0.832066	0.842066

ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของตัวตรวจรู้ความดัน PI ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

P(kPa)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
1	0.83309	0.83438	0.83651	0.83934	0.84416	0.84946	0.85501	0.86424	0.87528
2	0.83311	0.83421	0.83649	0.83942	0.84411	0.84937	0.85521	0.86427	0.87534
3	0.83302	0.83442	0.83637	0.83937	0.84403	0.84978	0.85487	0.86415	0.87517
4	0.83321	0.83432	0.83664	0.83921	0.84424	0.8492	0.85513	0.86436	0.87542
5	0.8331	0.83451	0.83659	0.8393	0.84427	0.84955	0.85494	0.86441	0.87537
average	0.833106	0.834368	0.83652	0.839328	0.844162	0.849472	0.855032	0.864286	0.875316



ภาคผนวก ก

โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเก็บข้อมูลและรับส่งข้อมูล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


```

โปรแกรมสำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ และอ่านค่าความถี่
//-----
#include <FreqCounter.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับอ่านค่าความถี่
#include <LCDHC595.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับจอแสดงผล
LCD
//-----LCD-----
#define SIN_PIN 11 //กำหนดพอร์ตเชื่อมต่อ LCD
#define STR_PIN 10
#define CLK_PIN 9
LCDHC595 lcd = LCDHC595(SIN_PIN, STR_PIN, CLK_PIN);
int sw1=8; //กำหนดพอร์ตสวิตช์อินพุท
int sw2=7;
int sw3=6;
int sw4=4;
int v1=12; //กำหนดพอร์ตสำหรับเปิด-ปิด วาล์ว
int v2=13;
int analog0=0; //กำหนดพอร์ตอ่านสัญญาณอนาล็อกของตัวตรวจรู้
int analog1=1; //ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้อุณหภูมิ
int analog2=2;
int stat1=0;
int stat2=0;
float temp; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าอุณหภูมิ
float P_initial; //ตัวแปรเก็บค่าความดันเริ่มต้นสำหรับ MPX4250
float analog=0;
float Vin=0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าแรงดันที่อ่านจากอนาล็อก
long int frq; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าความถี่
int n=0;
int i;
void setup() //ประกาศฟังก์ชันสำหรับการกำหนดค่าโปรแกรม
{

```

```

Serial.begin(115200);

lcd.Initial(); //เรียกฟังก์ชันค่าเริ่มต้น LCD
lcd.Backlight(1); // เรียกฟังก์ชันเปิด back light
lcd.ClearScreen(); // เรียกฟังก์ชันสำหรับการล้างหน้าจอ
pinMode(sw1, INPUT); //กำหนดสถานะพอร์ตอินพุท เอ้าพุท
pinMode(sw2, INPUT);
pinMode(sw3, INPUT);
pinMode(sw4, INPUT);
analog=analogRead(analog1); //อ่านค่าความดันเริ่มต้นสำหรับตัวตรวจรู้ MPX4250
  Vin=(analog/1023)*5;
  P_initial=(Vin+0.04*5)/(0.004*5);
}
void loop() //ประกาศฟังก์ชันการทำงานหลักหรือ ฟังก์ชัน main
{
  lcd.ClearScreen(); // เรียกฟังก์ชันสำหรับการล้างหน้าจอ
  float analog=0;
  float Vin=0; //ประกาศตัวแปรเก็บค่าแรงดัน
  float P=0; //ประกาศตัวแปรเก็บค่าความดัน
  char vin[10],pre[10];
  a:
  n=0;
  lcd.SetCursor(0x00);
  lcd.Print(" SW 3 to start ");
  if(digitalRead(sw3)==0){
    //-----Run-----
    lcd.Print("Start");
  while(1){
    FreqCounter::f_comp= 8; //กำหนดค่าสำหรับการอ่านค่าความถี่
    FreqCounter::start(1000); //กำหนดเวลาในการนับสัญญาณ
    while (FreqCounter::f_ready == 0) //รอสถานะของไทม์เมอร์

```

```

    frq=FreqCounter::f_freq;           //เก็บค่าความถี่ในตัวแปร frq
    delay(50);
    digitalWrite(v2,HIGH);
    if(n >= 2)
        Serial.println(frq);           //แสดงค่าความถี่ผ่าน RS232
    lcd.SetCursor(0x00);               //แสดงผลค่าความถี่ LCD
    lcd.Print("f = ");
    lcd.Print(frq);
    lcd.Print(" Hz ");
    analog=0;
    for(i=0;i<100;i++){                //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
        analog=analog+analogRead(analog2);
    }
    analog=analog/100;
    Vin=(analog/1023)*5;                //คำนวณแรงดันจากค่าอนาล็อก
    temp=Vin*100;                       //คำนวณค่าอุณหภูมิ
    lcd.SetCursor(0x40);                //แสดงผลอุณหภูมิ
    dtostrf(temp,4,2,vin);
    lcd.Print(vin);
    lcd.Print("C");
    analog=0;
    for(i=0;i<100;i++){                //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
        analog=analog+analogRead(analog1);
    }
    analog=analog/100;
    Vin=(analog/1023)*5
    lcd.SetCursor(0x47);
    P=(Vin+0.04*5)/(0.004*5)-P_initial; ; //คำนวณค่าความดันสำหรับ
MPX4250
    // P=((Vin/5-0.04)/0.0012858)+1.46; //คำนวณค่าความดันสำหรับ

```

MPX5700

```
    dtostrf(P,4,2,pre);                //แสดงค่าความดันทางหน้าจอ LCD
    lcd.Print(pre);
    lcd.Print("kPa");
    lcd.Print(" ");
    //delay(100);
    n++;                                //ตัวแปรสำหรับเก็บค่าจำนวนรอบ
}
}
}
}
```



```

โปรแกรมควบคุมการเปิดและปิดวาล์วสำหรับการทดสอบผลตอบแทนองทางเวลา และอ่าน
ค่าความถี่
//-----
#include <FreqCounter.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับอ่านค่าความถี่
#include <LCDHC595.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับจอแสดงผล
LCD
//-----LCD-----
#define SIN_PIN 11 //กำหนดพอร์ตเชื่อมต่อ LCD
#define STR_PIN 10
#define CLK_PIN 9
LCDHC595 lcd = LCDHC595(SIN_PIN, STR_PIN, CLK_PIN);
int sw4=4; //กำหนดพอร์ตสวิตช์อินพุท
int sw3=7;
int sw2=6;
int sw1=8;
int v1=12; //กำหนดพอร์ตสำหรับเปิด-ปิด วาล์ว
int v2=13;
int analog0=0; //กำหนดพอร์ตอ่านสัญญาณอนาล็อกของตัวตรวจรู้
int analog1=1; //ความดันเชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้อุณหภูมิ
int analog2=2;
int stat1=0;
int stat2=0;
float temp; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าอุณหภูมิ
float P_initial; //ตัวแปรเก็บค่าความดันเริ่มต้นสำหรับ MPX4250
float analog=0;
float Vin=0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าแรงดันที่อ่านจากอนาล็อก
long int frq; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าความถี่
int n=0;
int i;
void setup() //ประกาศฟังก์ชันสำหรับการกำหนดค่าโปรแกรม

```

```

{
  Serial.begin(115200);           //กำหนดความเร็วการส่งข้อมูล RS232
  lcd.Initial();                 //เรียกฟังก์ชันค่าเริ่มต้น LCD
  lcd.Backlight(1);             // เรียกฟังก์ชันเปิด back light
  lcd.ClearScreen();            // เรียกฟังก์ชันสำหรับการล้างหน้าจอ
  pinMode(sw1, INPUT);          //กำหนดสถานะพอร์ตอินพุท เอ้าพุท
  pinMode(sw2, INPUT);
  pinMode(sw3, INPUT);
  pinMode(sw4, INPUT);
  pinMode(v1, OUTPUT);
  pinMode(v2, OUTPUT);

  analog=analogRead(analog1);   //อ่านค่าความดันเริ่มต้นสำหรับตัวตรวจรู้ MPX4250
  Vin=(analog/1023)*5;
  P_initial=(Vin+0.04*5)/(0.004*5);
}

void loop()                      //ประกาศฟังก์ชันการทำงานหลักหรือ ฟังก์ชัน main
{
  lcd.ClearScreen();             // เรียกฟังก์ชันสำหรับการล้างหน้าจอ
  lcd.Print("Start");
  digitalWrite(v2,HIGH);
  float analog=0;
  float Vin=0;                   //ประกาศตัวแปรเก็บค่าแรงดัน
  float P=0;                     //ประกาศตัวแปรเก็บค่าความดัน
  char vin[10],pre[10];
  a:
  n=0;
  lcd.SetCursor(0x00);
  lcd.Print(" SW 3 to start ");
  while(1){                      //ลูปสำหรับอ่านค่าสวิตช์เพื่อเปิด-ปิด วาล์ว
    if(digitalRead(sw1)==0){

```

```

delay(250);
if(stat1==0) //เงื่อนไขสถานะวาล์ว
    stat1=1;
else
    stat1=0;
}
if(digitalRead(sw3)==0){ //เงื่อนไขเปิด-ปิด วาล์ว
    delay(250);
    if(stat2==0)
        stat2=1;
    else
        stat2=0;
}
analog=0;
for(i=0;i<100;i++){ //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
    analog=analog+analogRead(analog2);
}
analog=analog/100;
Vin=(analog/1023)*5; //คำนวณแรงดันจากค่าอนาล็อก
temp=Vin*100; //คำนวณค่าอุณหภูมิ
lcd.SetCursor(0x40); //แสดงผลอุณหภูมิทาง LCD
dtostrf(temp,4,2,vin);
lcd.Print(vin);
lcd.Print("C");
    analog=0;
    for(i=0;i<100;i++){ //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
        analog=analog+analogRead(analog1);
    }
    analog=analog/100;
    Vin=(analog/1023)*5;

```

```

lcd.SetCursor(0x47);

P=(Vin+0.04*5)/(0.004*5)-P_initial;           //คำนวณค่าความดันสำหรับ MPX4250
// P=((Vin/5-0.04)/0.0012858)+1.46;           //คำนวณค่าความดันสำหรับ MPX5700
dtostrf(P,4,2,pre);                           //แสดงค่าความดันทางหน้าจอ LCD
lcd.Print(pre);
lcd.Print("kPa");
lcd.Print(" ");
if(digitalRead(sw2)==0){
//-----Run-----
while(1){
    FreqCounter::f_comp= 8;                    //กำหนดค่าสำหรับการอ่านค่าความถี่
    FreqCounter::start(1000);                 //กำหนดเวลาในการนับสัญญาณ
    while (FreqCounter::f_ready == 0)        //รอสถานะของไมโครเมตร
    frq=FreqCounter::f_freq;                 //เก็บค่าความถี่ในตัวแปร frq
        delay(50);
        if(n >= 2)
            Serial.println(frq);             //แสดงผลความถี่ทาง RS232
    if(n<=12)digitalWrite(v1,LOW);           //เงื่อนไขเปรียบเทียบเวลาสำหรับสร้าง
    else if(n>12&&n<=22)digitalWrite(v1,HIGH); //สัญญาณขึ้นบันได
    else if(n>22&&n<=32)digitalWrite(v1,LOW);
    else if(n>32&&n<=42)digitalWrite(v1,HIGH);
    else if(n>42&&n<=52)digitalWrite(v1,LOW);
    lcd.SetCursor(0x00);                     //แสดงผลความถี่ทาง จอ LCD
    lcd.Print("f = ");
    lcd.Print(frq);
    lcd.Print(" Hz ");
    analog=0;
    for(i=0;i<100;i++){                      //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
        analog=analog+analogRead(analog2);
    }
}

```



```

analog=analog/100;
  Vin=(analog/1023)*5;           //คำนวณแรงดันจากค่าอนาล็อก
  temp=Vin*100;                 //คำนวณค่าอุณหภูมิ
  lcd.SetCursor(0x40);          //แสดงผลอุณหภูมิทาง LCD
  dtostrf(temp,4,2,vin);
  lcd.Print(vin);
  lcd.Print("C");
  analog=0;
  for(i=0;i<100;i++){           //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 100 ค่า
    analog=analog+analogRead(analog1);
  }
  analog=analog/100;
  Vin=(analog/1023)*5           //คำนวณแรงดันจากค่าอนาล็อก
  lcd.SetCursor(0x47);
  P=(Vin+0.04*5)/(0.004*5)-P_initial; //คำนวณค่าความดันสำหรับ MPX4250
// P=((Vin/5-0.04)/0.0012858)+1.46; //คำนวณค่าความดันสำหรับ MPX5700
  dtostrf(P,4,2,pre);          //แสดงผลความดันทาง LCD
  lcd.Print(pre);
  lcd.Print("kPa");
  lcd.Print(" ");
  n++;                           //ตัวแปรสำหรับเก็บค่าจำนวนรอบ
  if(n==62){                     //เงื่อนไขหยุดการทำงาน
    Serial.println("finish");
    goto a;
  }
}}}}

```

โปรแกรมสำหรับส่งข้อมูลค่าความถี่ที่อ่านจากตัวตรวจรู้ความดัน และค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ผ่านตัวส่งสัญญาณ NRF24L01

```

/*****
** SPI-compatible **
** CS - to digital pin 8 **
** CSN - to digital pin 9 (SS pin) **
** MOSI - to digital pin 11 (MOSI pin) **
** MISO - to digital pin 12 (MISO pin) **
** CLK - to digital pin 13 (SCK pin) **
*****/

#include <FreqCounter.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับอ่านค่าความถี่
int analog=0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าแรงดันที่อ่านจากอนาล็อก
float val; //และตัวแปรเก็บค่าสำหรับการคำนวณ
int i;
float Vin;
float frq2;
float MPX5700;
float pressure;
long int Zero;
long int frq;
float Frq;

#include <SPI.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ SPI
#include "API.h" //กำหนดไบเบอร์รี่API
#include "nRF24L01.h" //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับ nRF24L01

/*****
#define TX_ADR_WIDTH 5 // กำหนดความกว้างของตำแหน่งในการรับ-ส่งข้อมูล
#define TX_PLOAD_WIDTH 16 // กำหนดจำนวน Byte ในการส่งข้อมูล
long int data1;
long int data2;
int k = 0;

```

```

unsigned char TX_ADDRESS[TX_ADR_WIDTH] =
{
  0x34,0x43,0x10,0x10,0x01
};
// กำหนดตำแหน่งหน่วยความจำในการส่งข้อมูล
unsigned char rx_buf[TX_PLOAD_WIDTH] = {0}; // กำหนดค่าเริ่มต้น
unsigned char tx_buf[TX_PLOAD_WIDTH] = {0};
//*****

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(CE, OUTPUT);
  pinMode(CSN, OUTPUT);
  pinMode(IRQ, INPUT);
  SPI.begin();
  delay(50);
  init_io(); // กำหนดค่าพอร์ตอินพุท-เอาพุทของ SPI
  unsigned char sstatus=SPI_Read(STATUS); //อ่านค่าสถานะของ nRF24L01
  Serial.println("*****TX_Mode Start*****");
  Serial.print("status = ");
  Serial.println(sstatus,HEX); // แสดงค่ารีจิสเตอร์สถานะ 'E'
  TX_Mode(); // กำหนดเป็น โหมดส่งข้อมูล
}

void loop()
{
  val=0;
  pressure=0;
  FreqCounter::f_comp= 8; // ชุดคำสั่งสำหรับอ่านค่าความถี่
  FreqCounter::start(1000); // Start counting with gatetime of 1000ms
  while (FreqCounter::f_ready == 0) // wait until counter ready
  frq=FreqCounter::f_freq; // read result

```

```

Frq=frq;
frq2=Frq/1000;
for(i=0;i<10;i++){ //อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกเฉลี่ย 10ค่า
    val=val+analogRead(analog);
}
val=val/10;
Vin=(val*5/1023);
MPX5700=((Vin/5-0.04)/0.0012858)+1.46;
pressure=((118072*frq2)-(703.42*frq2*frq2)-4954712+90); //คำนวณค่าความดันสำหรับ
data1=val; //MPX5700
data2=Frq;
sent_data(); //เรียกฟังก์ชันส่งข้อมูล
}
void sent_data(){ //ฟังก์ชันสำหรับการจัดการและส่งข้อมูล
    tx_buf[0]=data1/10000000; //ชุดคำสั่งสำหรับการแยกตัวเลขเก็บในตัวแปร
    tx_buf[1]=(data1%10000000)/1000000; //อาร์เรย์เพื่อส่งข้อมูล
    tx_buf[2]=(data1%1000000)/100000;
    tx_buf[3]=(data1%100000)/10000;
    tx_buf[4]=(data1%10000)/1000;
    tx_buf[5]=(data1%1000)/100;
    tx_buf[6]=(data1%100)/10;
    tx_buf[7]=data1%10;
    tx_buf[8]=data2/10000000;
    tx_buf[9]=(data2%10000000)/1000000;
    tx_buf[10]=(data2%1000000)/100000;
    tx_buf[11]=(data2%100000)/10000;
    tx_buf[12]=(data2%10000)/1000;
    tx_buf[13]=(data2%1000)/100;
    tx_buf[14]=(data2%100)/10;
    tx_buf[15]=data2%10;
}

```

```

unsigned char sstatus = SPI_Read(STATUS); //อ่านค่าสถานะ nRF24L01
if(sstatus&TX_DS) //ตรวจสอบสถานะความพร้อม
{
    SPI_RW_Reg(FLUSH_TX,0); //เขียนตำแหน่งรีจิสเตอร์สำหรับการส่งข้อมูล
    SPI_Write_Buf(WR_TX_PLOAD,tx_buf,TX_PLOAD_WIDTH); //ส่งข้อมูลไปยัง
nRF24L01
}
if(sstatus&MAX_RT)
{
    SPI_RW_Reg(FLUSH_TX,0);
    SPI_Write_Buf(WR_TX_PLOAD,tx_buf,TX_PLOAD_WIDTH);
}
SPI_RW_Reg(WRITE_REG+STATUS,sstatus);
}
void init_io(void) //ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้น SPI
{
    digitalWrite(IRQ, 0);
    digitalWrite(CE, 0); // chip enable
    digitalWrite(CSN, 1); // Spi disable
}
unsigned char SPI_RW(unsigned char Byte) //ฟังก์ชันสำหรับส่งข้อมูล SPI
{
    return SPI.transfer(Byte);
}
unsigned char SPI_RW_Reg(unsigned char reg, unsigned char value) //ฟังก์ชันสำหรับเขียน
//รีจิสเตอร์
{
    unsigned char status;
    digitalWrite(CSN, 0); // CSN low, init SPI transaction
    SPI_RW(reg); // select register
    SPI_RW(value); // ..and write value to it..
}

```

```

digitalWrite(CSN, 1);          // CSN high again
return(status);                // return nRF24L01 status unsigned char
}

unsigned char SPI_Read(unsigned char reg)          //ฟังก์ชันสำหรับการอ่านค่าจาก SPI
{
    unsigned char reg_val;
    digitalWrite(CSN, 0);          // CSN low, initialize SPI communication...
    SPI_RW(reg);                   // Select register to read from..
    reg_val = SPI_RW(0);           // ..then read register value
    digitalWrite(CSN, 1);         // CSN high, terminate SPI communication
    return(reg_val);              // return register value
}

unsigned char SPI_Read_Buf(unsigned char reg, unsigned char *pBuf, unsigned char bytes)
{
    //ฟังก์ชันสำหรับการอ่านข้อมูลจากบัฟเฟอร์ของ
nRF24L01
    unsigned char sstatus,i;
    digitalWrite(CSN, 0);          // Set CSN low, init SPI tranaction
    sstatus = SPI_RW(reg);         // Select register to write to and read status unsigned char
    for(i=0;i<bytes;i++)
    {
        pBuf[i] = SPI_RW(0);       // Perform SPI_RW to read unsigned char from
nRF24L01
    }
    digitalWrite(CSN, 1);         // Set CSN high again
    return(sstatus);              // return nRF24L01 status unsigned char
}

unsigned char SPI_Write_Buf(unsigned char reg, unsigned char *pBuf, unsigned char bytes)
{
    //ฟังก์ชันสำหรับการส่งข้อมูลไปยังบัฟเฟอร์
    unsigned char sstatus,i;
    digitalWrite(CSN, 0);         // Set CSN low, init SPI tranaction

```

```

sstatus = SPI_RW(reg);          // Select register to write to and read status unsigned char
for(i=0;i<bytes; i++)          // then write all unsigned char in buffer(*pBuf)
{
    SPI_RW(*pBuf++);
}
digitalWrite(CSN, 1);          // Set CSN high again
return(sstatus);               // return nRF24L01 status unsigned char
}

void TX_Mode(void)              // ฟังก์ชันกำหนดค่ารีจิสเตอร์สำหรับโหมดส่งข้อมูล
{
    digitalWrite(CE, 0);
    SPI_Write_Buf(WRITE_REG + TX_ADDR, TX_ADDRESS, TX_ADR_WIDTH);
    SPI_Write_Buf(WRITE_REG + RX_ADDR_P0, TX_ADDRESS, TX_ADR_WIDTH);
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + EN_AA, 0x01);          // Enable Auto.Ack:Pipe0
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + EN_RXADDR, 0x01);     // Enable Pipe0
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + SETUP_RETR, 0x1a);    // 500us + 86us, 10 retrans...
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + RF_CH, 40);           // Select RF channel 40
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + RF_SETUP, 0x07);
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + CONFIG, 0x0e);
    SPI_Write_Buf(WR_TX_PLOAD,tx_buf,TX_PLOAD_WIDTH);
    digitalWrite(CE, 1);
}

```

โปรแกรมสำหรับรับข้อมูลค่าความถี่ที่ส่งจากตัวอ่านข้อมูลตัวตรวจรู้ความดัน และค่าความดัน จากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ผ่านตัวส่งสัญญาณ NRF24L01

```

/*****
** SPI-compatible                **
** CS - to digital pin 8        **
** CSN - to digital pin 9 (SS pin) **
** MOSI - to digital pin 11 (MOSI pin) **
** MISO - to digital pin 12 (MISO pin) **
** CLK - to digital pin 13 (SCK pin) **
*****/

#include <LCDHC595.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับจอแสดงผล LCD
#define SIN_PIN 2 //กำหนดพอร์ตเชื่อมต่อ LCD
#define STR_PIN 3
#define CLK_PIN 4
LCDHC595 lcd = LCDHC595(SIN_PIN, STR_PIN, CLK_PIN);
#include <SPI.h> //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ SPI
#include "API.h" //กำหนดไบเบอร์รี่API
#include "nRF24L01.h" //กำหนดไบเบอร์รี่สำหรับ nRF24L01
int sw1=5; //กำหนดพอร์ตสวิตช์อินพุท
int sw2=6;
int sw3=7;
float val; //กำหนดตัวแปรสำหรับเก็บค่า
float Vin;
float frq2;
float MPX5700;
float pressure;
long int Zero;
long int frq;
float Frq;

```



```

char text[10];

#define TX_ADR_WIDTH 5 // กำหนดความกว้างของตำแหน่งในการรับ-ส่งข้อมูล
#define TX_PLOAD_WIDTH 16 // กำหนดจำนวน Byte ในการส่งข้อมูล

long int data1;
long int data2;

unsigned char TX_ADDRESS[TX_ADR_WIDTH] =
{
    0x34,0x43,0x10,0x10,0x01
}; // กำหนดตำแหน่งหน่วยความจำในการส่งข้อมูล

long int rx[TX_PLOAD_WIDTH];
unsigned char rx_buf[TX_PLOAD_WIDTH] = {0}; // กำหนดค่าเริ่มต้น
unsigned char tx_buf[TX_PLOAD_WIDTH] = {0};
//*****
void setup() // ฟังก์ชันสำหรับกำหนดสถานะของพอร์ต
{
    Serial.begin(9600); // กำหนดความเร็วในการส่งข้อมูล
    RS232
    pinMode(CE, OUTPUT);
    pinMode(CSN, OUTPUT);
    pinMode(IRQ, INPUT);
    pinMode(sw1, OUTPUT);
    pinMode(sw2, OUTPUT);
    pinMode(sw3, OUTPUT);

    lcd.Initial(); // เรียกฟังก์ชันค่าเริ่มต้น LCD
    lcd.Backlight(1); // เรียกฟังก์ชันเปิด back light
    lcd.ClearScreen(); // เรียกฟังก์ชันล้างหน้าจอ LCD
    lcd.Print("WirelessPressure");
    SPI.begin(); // เรียกฟังก์ชันค่าเริ่มต้น SPI
    delay(50);
    init_io(); // กำหนดค่าพอร์ตอินพุต-เอาพุตของ SPI

```

```

unsigned char sstatus=SPI_Read(STATUS); //อ่านค่าสถานะของ nRF24L01
Serial.println("*****RX_Mode Start*****");
Serial.print("status = ");
Serial.println(sstatus,HEX); // แสดงค่ารีจิสเตอร์สถานะ
RX_Mode(); // กำหนดเป็นโหมดรับข้อมูล
}
void loop()
{
for(;;)
{
reseive_data(); //เรียกฟังก์ชันรับข้อมูลจาก nRF24101
val=data1; //ชุดคำสั่งสำหรับคำนวณค่าความดัน
Vin=(val*5/1023);
Frq=data2;
frq2=Frq/1000;
MPX5700=((Vin/5-0.04)/0.0012858)+1.46;
pressure=(((118072*frq2)-(703.42*frq2*frq2)-4954712)+10);
data1=val;
data2=Frq;
Serial.print(MPX5700); //ชุดคำสั่งสำหรับแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD
Serial.print(" ");
Serial.print(frq2);
Serial.print(" ");
Serial.print(pressure);
Serial.println(" ");
lcd.SetCursor(0x40);
lcd.Print("P1 = ");
dtostrf(MPX5700,4,2,text);
lcd.Print(text);
lcd.Print(" ");
}
}

```

```

    lcd.SetCursor(0x10);

    lcd.Print("P2 = ");

    dtostrf(pressure,4,2,text);

    lcd.Print(text);

    lcd.Print("  ");

    delay(1000);                //หน่วงเวลาแสดงผลและอ่านข้อมูล ครั้งละ 1 วินาที
}
}

void reseive_data(){           // ฟังก์ชันสำหรับรับข้อมูลและอ่านข้อมูลจาก nRF24L01
    unsigned char status = SPI_Read(STATUS);           // read register STATUS's value
    if(status&RX_DR)                                   // if receive data ready (TX_DS)
    interrupt
    {
        SPI_Read_Buf(RD_RX_PLOAD, rx_buf, TX_PLOAD_WIDTH); // read payload to
rx_buf
        SPI_RW_Reg(FLUSH_RX,0);                        // clear RX_FIFO
        for(int i=0; i<16; i++) {
            rx[i]=rx_buf[i];
        }
        data1=rx[0]*10000000+rx[1]*1000000+rx[2]*100000+rx[3]*10000+rx[4]*1000+rx[5]*100+rx[6]*10+rx[7];
        data2=rx[8]*10000000+rx[9]*1000000+rx[10]*100000+rx[11]*10000+rx[12]*1000+rx[13]*100+rx[14]*10+rx[15];
    }                                                    //คำนวณค่าตัวเลขที่แยกมาเป็นอาเรย์
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG+STATUS,status ); //ให้เป็นจำนวนเต็ม
}

void init_io(void)                //ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าเริ่มต้น SPI
{
    digitalWrite(IRQ, 0);

    digitalWrite(CE, 0);          // chip enable

    digitalWrite(CSN, 1);        // Spi disable
}

unsigned char SPI_RW(unsigned char Byte) //ฟังก์ชันสำหรับส่งข้อมูล SPI

```

```

{
    return SPI.transfer(Byte);
}

unsigned char SPI_RW_Reg(unsigned char reg, unsigned char value) //ฟังก์ชันสำหรับเขียน
                                                                    //รีจิสเตอร์
{
    unsigned char status;
    digitalWrite(CSN, 0);          // CSN low, init SPI transaction
    SPI_RW(reg);                   // select register
    SPI_RW(value);                 // ..and write value to it..
    digitalWrite(CSN, 1);         // CSN high again
    return(status);                // return nRF24L01 status unsigned char
}

unsigned char SPI_Read(unsigned char reg) //ฟังก์ชันสำหรับการอ่านค่าจาก SPI
{
    unsigned char reg_val;
    digitalWrite(CSN, 0);          // CSN low, initialize SPI communication...
    SPI_RW(reg);                   // Select register to read from..
    reg_val = SPI_RW(0);           // ..then read register value
    digitalWrite(CSN, 1);         // CSN high, terminate SPI communication
    return(reg_val);               // return register value
}

unsigned char SPI_Read_Buf(unsigned char reg, unsigned char *pBuf, unsigned char bytes){
    unsigned char sstatus,i;
    digitalWrite(CSN, 0);          // Set CSN low, init SPI tranaction
    sstatus = SPI_RW(reg);         // Select register to write to and read status unsigned char
    for(i=0;i<bytes;i++)
    {
        pBuf[i] = SPI_RW(0);       // Perform SPI_RW to read unsigned char from nRF24L01
    }
    digitalWrite(CSN, 1);         // Set CSN high again
}

```

```

return(sstatus);          // return nRF24L01 status unsigned char
}

unsigned char SPI_Write_Buf(unsigned char reg, unsigned char *pBuf, unsigned char bytes)
{
    //ฟังก์ชันสำหรับการอ่านข้อมูลจากบัฟเฟอร์ของ nRF24L01
    unsigned char sstatus,i;
    digitalWrite(CSN, 0);    // Set CSN low, init SPI transaction
    sstatus = SPI_RW(reg);   // Select register to write to and read status unsigned char
    for(i=0;i<bytes; i++)    // then write all unsigned char in buffer(*pBuf)
    {
        SPI_RW(*pBuf++);
    }
    digitalWrite(CSN, 1);   // Set CSN high again
    return(sstatus);        // return nRF24L01 status unsigned char
}

void RX_Mode(void){
    digitalWrite(CE, 0);
    SPI_Write_Buf(WRITE_REG + RX_ADDR_P0, TX_ADDRESS, TX_ADR_WIDTH); //
    Use the same address on the RX device as the TX device
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + EN_AA, 0x01); // Enable Auto.Ack:Pipe0
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + EN_RXADDR, 0x01); // Enable Pipe0
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + RF_CH, 40); // Select RF channel 40
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + RX_PW_P0, TX_PLOAD_WIDTH);
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + RF_SETUP, 0x07); // TX_PWR:0dBm,
    Datarate:2Mbps, LNA:HCURR
    SPI_RW_Reg(WRITE_REG + CONFIG, 0x0f);
    digitalWrite(CE, 1); // Set CE pin high to enable RX
    device
}

```

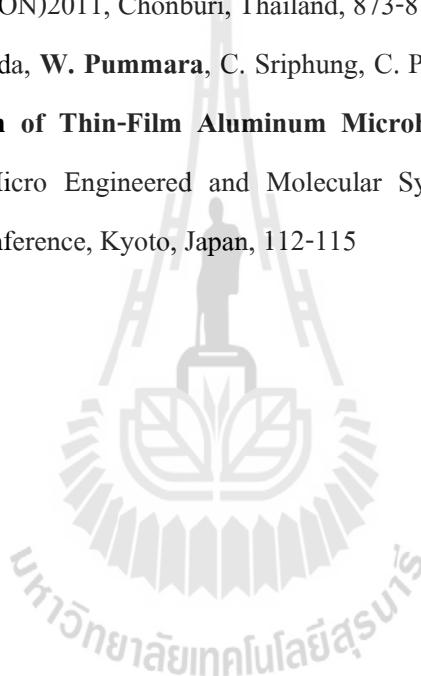


ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- R. Phatthanakun, C. Pantong, C. Sriphung, **W. Pummara**, **N. Chomnawang**, **Reproduction of Microparts based on Standard X-ray LIGA Processes for Mass Production**, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012 9th International Conference, Phetchaburi, Thailand, 1-4
- R. Phatthanakun, S. Khosinklang, **W. Pummara**, C. Pantong, **Fabrication of X-ray Absorber Patterns by using Pulse Electroplating Technique**, Electrical Engineering Conference (EECON) 2011, Chonburi, Thailand, 873-876
- R. Phatthanakun, P. Deelda, **W. Pummara**, C. Sriphung, C. Pantong, **N. Chomnawang**, **Design and Fabrication of Thin-Film Aluminum Microheater and Nickel Temperature Sensor**, Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2012 7th IEEE International Conference, Kyoto, Japan, 112-115



Reproduction of Microparts based on Standard X-ray LIGA Processes for Mass Production

R. Phatthanakun*, C. Pantong**, C. Sriphung*, W. Pummara** and N. Chomnawang**

*Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Email: rungrueang@slri.or.th

** School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Email: sut.mems@gmail.com

Abstract- This paper presents a rapid reproduction method of microparts based on the standard X-ray LIGA processes. The SU-8 master mold of microparts is fabricated by X-ray lithography which offers the high aspect ratio microstructure with vertical sidewall for high precision microparts. A 10:1 mixture of pre-polymer PDMS is cast onto the master mold and peeled off to create the replicated PDMS. It is pressed on the substrate coated with chromium seed layer, resulting in the temporary bonding between them. Nickel is then grown inside the replicated PDMS to create another metallic micropart by electroplating. After the replicated PDMS is removed from the sample, the over-electroplated microparts are covered with unexposed SU-8 photoresist and planarized to achieve the final thickness, followed by photoresist removal. The metallic microparts are finally released from the substrate by the mechanical force, resulting in the massive reproduced metallic microparts. The key geometric dimensional changes throughout the process were less than 1% which obviously confirmed the reliability of the reproduction using X-ray LIGA technology. The proposed method offers the rapid replication of micromolds and microparts in low-cost mass production without further X-ray lithography process.

cost mass production because it is limited by synchrotron radiation source. To overcome this limitation, a process of rapid replication using metallic micromold fabricated by X-ray lithography combine with electroplating has been proposed in LIGA process [3].

LIGA is the German acronym for the replication process which consists of X-ray lithography (X-ray lithographie), electroplating (galvanoformung), and molding (abformung). Figure 1 demonstrates the basic LIGA process which starts by X-ray exposure onto thick photoresist film as shown in Fig. 1(a). After development to arrive at three-dimensional photoresist structure as shown in Fig. 1(b), the metal is subsequently filled by electroplating as shown in Fig. 1(c). Photoresist is then removed, resulting in freestanding metallic microstructures as shown in Fig. 1(d). Output of this step can be both microparts and micromold insert which are employed as a master mold in rapid replication process of hot embossing, injection molding [4], and polymer casting.

Keywords- X-ray lithography; synchrotron light; microparts; replicated PDMS; micromolding; mass production

I. INTRODUCTION

Nowadays, smart electronic devices comprise of various mechanical function which is a result of miniature microparts assembled together in a unit. The dimensional microstructures have been decreased to correspond with complex mechanical system. They have to be quickly fabricated with high precision in low-cost mass production which can be both plastic and metal. For the polymeric microstructures, the effective techniques which have been directly used for mass production are hot embossing or injection molding. In these techniques, microstructures metallic molding tools or mold inserts are required to be the template [1]-[2]. Because of extremely high resolution of structures containing specific small sidewall roughness and high aspect ratios, these molds are typically fabricated by lithography procedures followed by electroplating. The most suitable technique which provides these requirements is X-ray lithography generated by synchrotron light source. This technique is also used to fabricate the metallic microparts which are utilized in complicated mechanism system such as micromotor and watch. However, X-ray lithography is not appropriate for low

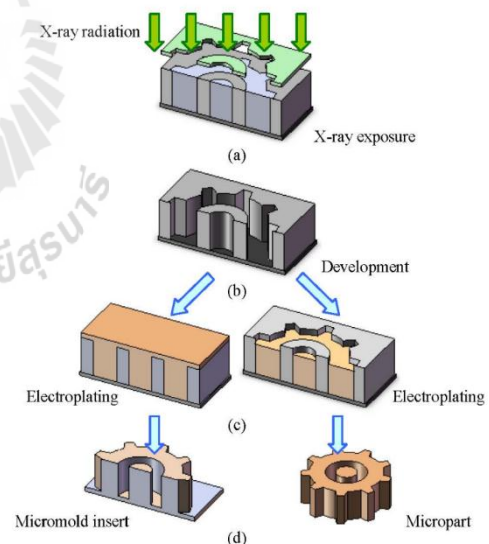


Figure 1. X-ray LIGA fabrication process.

In this research, the reproduced metallic microparts using the replicated PDMS are demonstrated based on the standard X-ray LIGA process. A 725 μm -thick SU-8 photoresist is formed as microgears by using deep X-ray lithography. They are used as the master mold in replication of PDMS which is mixed with 10:1 weight ratio. After casting to create a solid polymer, it is peeled off from the master mold and softly pressed on the substrate coated with chromium seed layer. Metal is then filled inside the replicated PDMS by electroplating. After obtaining the sufficient thickness, the replicated PDMS is removed and unexposed SU-8 photoresist is covered to hold the metallic microstructures. The over-electroplated metallic structures are planarized to achieve the final thickness, followed by photoresist removal. The metallic microparts are finally released from the substrate by mechanical force, resulting in the reproduced metallic microparts. The key geometric dimensions are investigated throughout the process to find the dimensional error of the replicated PDMS and the reproduced metallic microparts from the SU-8 master mold. The rapid massive reproduction of microstructures can be fabricated in low-cost mass production without further using X-ray lithography.

II. MICROMOLD BY X-RAY LIGA PROCESS

The standard X-ray LIGA process was performed by using synchrotron radiation source at the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand. Beamline 6a: Deep X-ray Lithography (DXL) provides synchrotron light in low energy X-ray range to users who use X-ray in lithography of ultrathick photoresists to fabricate high-aspect-ratio microstructures. Both micromold and micropart can be directly fabricated by electroplating. Figure 2(a) shows the microgears which were released from conductive substrate after lapping. However, the direct micropart fabrication by X-ray LIGA is not as significant as the micromold which can be used to replicate other microstructures. Figure 2(b) shows a simple micromold made from 725 μm -thick SU-8 photoresist which is used for PDMS casting.

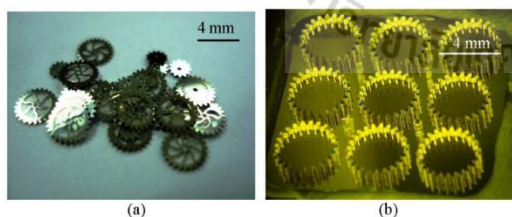


Figure 2. (a) Metallic microgears fabricated by X-ray LIGA and (b) Micromolds of thick film photoresist for PDMS casting.

The SU-8 master mold is measured the key geometric dimensions for 5 positions by using the Olympus Stream Digital Image Solutions as shown in Fig. 3(a). Table I displays the measured values of the SU-8 master mold which are the standard dimension used to investigate errors of the replicated PDMS and the reproduced metallic microgears.

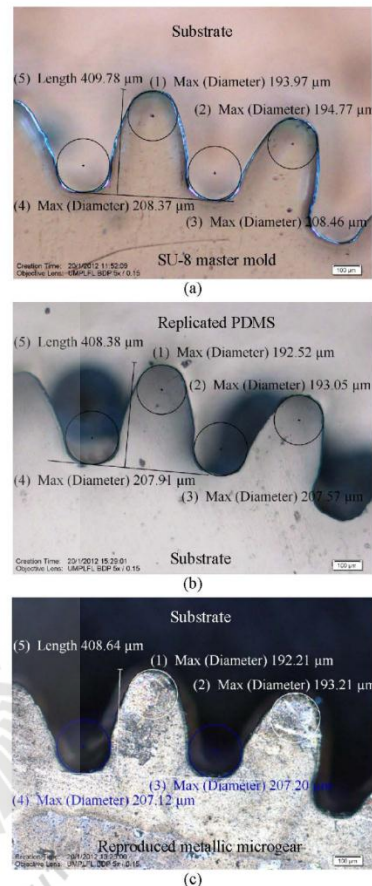


Figure 3. Photomicrographs of key geometric dimensions (a) master mold (b) replicated PDMS and (c) reproduced metallic microgear.

III. MICROPARTS REPRODUCTION USING REPLICATED PDMS

Reproduced metallic microparts can be duplicated from the master mold using commercial PDMS (polydimethylsiloxane). Fabrication sequence used in the reproduced metallic microparts is shown in Fig. 4. A set of pre-polymer was mixed with 10:1 weight ratio. After vacuuming to remove gas pebbles entrapped during mixing, it was slowly poured onto the master mold and baked on a hotplate at 90°C for 15 minutes to create a solid polymer. The replicated PDMS was then peeled off from the master mold as shown in Fig. 4(a). Dimensional changes of the replicated PDMS were observed as shown in Fig. 3(b) and compared to the master mold in Table I. The percentages of error from the master mold are displayed in brackets. There are no significant changes because the volume shrinkage of PDMS after curing is less than 1%.

TABLE I. COMPARISON OF REPRODUCED MICROGEAR AND MASTER MICROMOLD SIZES

Sample	Key geometric dimensions				
	(1) μm	(2) μm	(3) μm	(4) μm	(5) μm
Master mold	193.97	194.77	208.46	208.37	409.78
Replicated PDMS	192.52 (0.75%)	193.05 (0.88%)	207.57 (0.43%)	207.91 (0.22%)	408.38 (0.34%)
Reproduced metallic gears	192.21 (0.91%)	193.21 (0.80%)	207.20 (0.60%)	207.12 (0.60%)	408.64 (0.23%)
Used replicated PDMS	184.03 (5.12%)	184.11 (5.47%)	217.75 (4.46%)	215.63 (3.48%)	370.27 (9.64%)

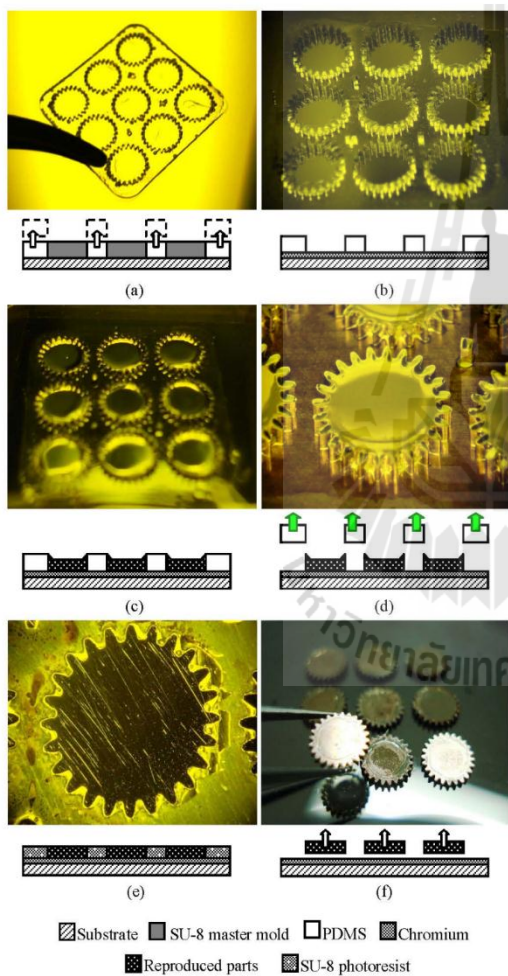


Figure 4. The fabrication sequence for the microparts replication.

The replicated PDMS was suddenly placed on a chromium seed layer coated on a glass slide substrate as shown in Fig.

4(b). Temporary bonding between them was formed for the reproduced mold by gently pressing them together. Metals, such as copper and nickel, were electrodeposited on the chromium seed layer to form microparts inside the replicated PDMS as shown in Fig. 4(c). The electroplated metal which was slowly grown could fit into the mold until its thickness reached to the same level of the PDMS mold. After the electroplating, the PDMS mold was removed and left only the reproduced metallic microparts on the substrate as shown in Fig. 4(d).

To achieve the final microparts thickness, SU-8 photoresist or resin was covered over the metallic microstructures and the over-electroplated microstructures was planarized to obtain the final thickness as shown in Fig. 4(e). Finally, the metallic microparts were removed from the substrate by mechanical force. Wet chemical etching of the metallic seed layer is not necessary because the electroplated metal cannot create permanent bond between them. By using tweezers, the metallic microparts can be released easily from the chromium layer as shown in Fig. 4(f). Dimensional changes of the metallic microparts were investigated for 5 positions as illustrated in Fig. 3(c) and compared to the master mold and the replicated PDMS in Table I. Figure 5 shows the reproduced metallic microparts fabricated by the standard X-ray LIGA process. Rapid metallic microparts reproduction using this method can be realized to deliver the low-cost mass production without further using X-ray lithography process.



Figure 5. The reproduced metallic microparts released from the chromium layer.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The reproduced metallic microparts could be successfully fabricated by the standard X-ray LIGA process. The sidewalls of metallic parts are vertical as shown in Fig. 6 which is very important for high precision microstructures. The key geometric dimensional changes of the replicated PDMS and the reproduced metallic microparts as reported in Table I are less than 1% which obviously confirm the reliability of the rapid reproduction using X-ray LIGA technology. The fabrication process of this method does not complicate and is simply complemented in a non-clean room environment.

Although the reproduced metallic microparts can be realized by using the replicated PDMS, it cannot confirm for the

second reproduced metallic microparts by using the same replicated PDMS. After the replicated PDMS is used in electroforming process and released from the substrate, the key geometric dimensions are changed more than 4% as reported in Table I. This phenomenon also happens to the old replicated PDMS which was cast for a long time as shown in Fig. 7. To maintain these dimensions, the replicated PDMS has to be attached on a planar surface, such as glass and silicon, and kept in humidity control unit.

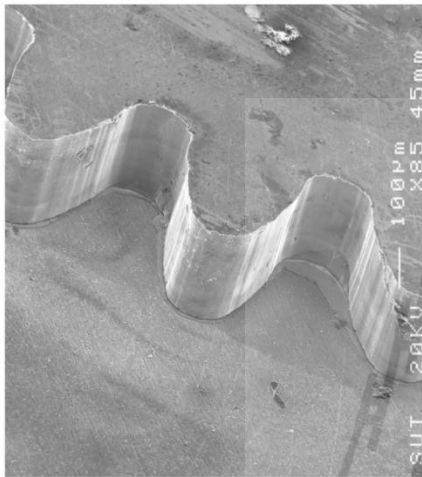


Figure 6. Vertical sidewall of the reproduced metallic micropart.

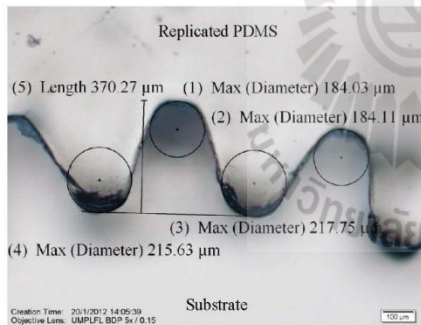


Figure 7. Key geometric dimensional changes of the used replicated PDMS.

V. CONCLUSION

The reproduced metallic microparts using the replicated PDMS were demonstrated based on the standard X-ray LIGA process for mass production. The SU-8 master mold was constructed by X-ray lithography providing high aspect ratio microstructures with vertical sidewall for high precision microparts. A 10:1 mixture of pre-polymer PDMS was cast onto the SU-8 master mold and peeled off to create the electroforming mold. It was gently pressed on the chromium

seed layer to create the temporary bonding. After filling the metal inside the PDMS mold, the over electroplating metallic microparts were planarized as needed. Finally, the reproduced metallic microparts were simply released from the substrate by mechanical force. The key geometric dimensional changes throughout the process were less than 1% which obviously confirms the reliability of the rapid reproduction using X-ray LIGA technology for low-cost mass production.

ACKNOWLEDGMENT

We are grateful to the Beamline 6a: Deep X-ray lithography (DXL) of the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) for the help in the processing of the X-ray LIGA technology.

REFERENCES

- [1] Y. Su, J. Shah, and L. Lin, "Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding," *J. Micromech. Microeng.* 14, 2004, pp. 415-422.
- [2] M. Wissmann, M. Guttman, J. Mohr, M. Hartmann, S. Wilson, C.-J. Moran-Iglesias, J. Van Erps, R. Krajewski, O. Parriaux, and S. Tonchev, "Replication of micro-optical components and nano-structures for mass production," *Proc. Of SPIE*, vol. 6992 (699208), 2008.
- [3] K. Kim, S. Park, J.-B. Lee, H. Manohara, Y. Desta, M. Murphy, C.H. Ahn, "Rapid replication of polymeric and metallic high aspect ratio microstructures using PDMS and LIGA technology," *Microsystem technologies*, vol. 9, 2002, pp. 5-10.
- [4] M.T. Gale, C.Gimkiewicz, S.Obi, M. Schnieper, J. Sochtig, H. Thiele, and S. Westenhofer, "Replication technology for optical microsystems" *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 43, 2005, pp. 373-386.

Fabrication of X-ray Absorber Patterns by using Pulse Electroplating Technique

Rungrueng Phatthanakun¹ Sittisak Khosinklang^{1,2} Watcharapon Pummara^{1,2} and Chalermchai Pantong^{1,2}

¹Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima Thailand, 30000, Tel. 044-217-040 Ext. 1410, E-Mail: rungrueng@slri.or.th

²School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Thailand, 30000, Tel. 08-0480-1470, E-Mail: sittisak.kh@gmail.com

Abstract

This paper presents pulse electroplating technique for electro-deposition of X-ray mask absorber patterns which has been conventionally fabricated by direct current electroplating. Surface roughness and morphology of deposited metal film are reported based on the duty cycle with a constant frequency and an average current density. Five values of duty cycles are experimented and their results are analyzed by concentrating on electroplated metal distribution profile. Uniform thickness and smooth surface of absorber film can be achieved by pulse electroplating with the duty cycle lower than 60%. This technique can be simply used to control the absorber thickness of X-ray mask which is very important for X-ray lithography process in synchrotron light application.

Keywords– X-ray mask, pulse electroplating, duty cycle, synchrotron light.

1. Introduction

The X-ray mask is fundamental component of X-ray lithography which has been utilized to create high-aspect-ratio-microstructure by synchrotron light application. X-ray lithography is a process which employs X-ray photon from synchrotron light for patterning microstructure similar to the use of UV light. The key component of high-resolution X-ray microstructural fabrication is photoresist which is a X-ray-sensitive material. It can be affected by X-ray irradiation filtered from synchrotron light. High collimation and direct penetration of this light are the most capable technology to construct thick photoresist microstructures with vertical sidewalls. Consequently, high resolution microparts can be realized due to these properties of the X-rays. Figure 1(a) illustrates schematic of an X-ray beamline attached to an electron ring and Figure 1(b) shows Beamline 6a: Deep X-ray Lithography (DXL) at the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), SLRI, Nakhon Ratchasima, Thailand, where has been utilized to fabricate high-aspect-ratio microstructure for LIGA applications. The X-ray mask is placed on substrate coated with photoresist. Both are periodically scanned across the synchrotron light, resulting in the mask patterns into the sensitive X-ray photoresist.

Micropart production which has millimeter or micrometer scale can be simply fabricated by defining high-resolution structures through absorber patterns on the X-ray mask. The components of the X-ray mask are shown in Fig. 2. Three main parts which consist of absorber pattern, pattern carrier and handle ring are assembled for

the X-ray mask. The pattern carrier must be transparent to X-ray irradiation, and it should have dimension stability and mechanical strength for handling. Material with low atomic number and low densities such as silicon (Si), silicon nitride (SiN), silicon carbide (SiC), titanium (Ti), beryllium (Be), polyamine (PI), graphite (C), and Mylar (PET) are frequently used to make X-ray mask membrane. For the absorber pattern, the material must efficiently absorb X-ray irradiation to provide image contrast on the photoresist. Materials with high atomic number and high density such as gold (Au), silver (Ag), tantalum (Ta), tungsten (W), and lead (Pb) are employed in this role [1].

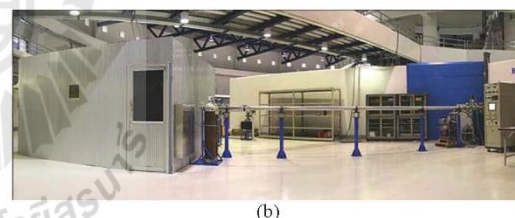
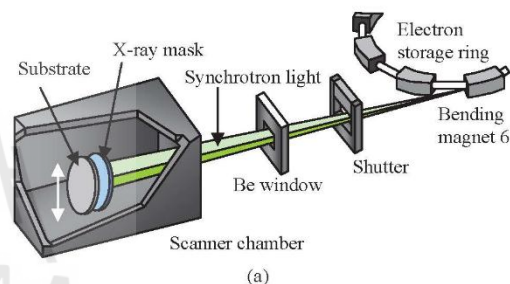


Fig. 1 (a) Schematic of an X-ray beamline attached to an electron ring and (b) BL6a: DXL at SLRI

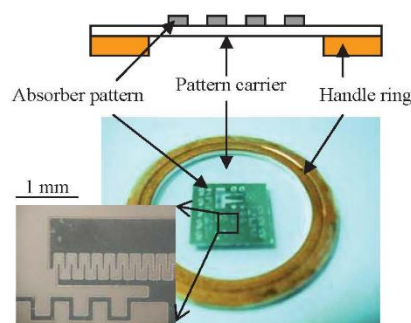


Fig. 2 Components of an X-ray mask.

Generally, X-ray mask has been fabricated by using UV lithography which is fundamental process for photoresist patterning. This process is used to create the X-ray absorber patterns photoresist mold on the pattern carrier. Conventional method which has been presented to form the absorber material is direct current (DC) electroplating as shown in Fig. 3.

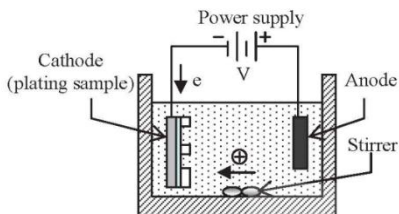


Fig. 3 Schematic setup of an direct current electroplating

Electroplating is basically electrochemical reaction which is induced by the current applied between two electrodes, anode and cathode. Positive ions flow through the electroplating solution or electrolyte while electrons transfer in opposite direction. After the metal ions in the electrolyte obtain electron from the cathode, they are reduced to nano-sized particles and deposited on the surface of metal film of cathode [2]. Although DC electroplating is simply method for deposition of metal, non-uniform and rough surface usually form on seed layer, resulting from a negative charge layer formed around the cathode as the process continues [3]. Non-uniform surface also creates high residual stress, resulting in peeling of electroplated metal layer from the seed layer as shown in Fig. 4(a). Moreover, over-current density during electroplating generates the rough surface of an electroplated layer as shown in Fig. 4(b).

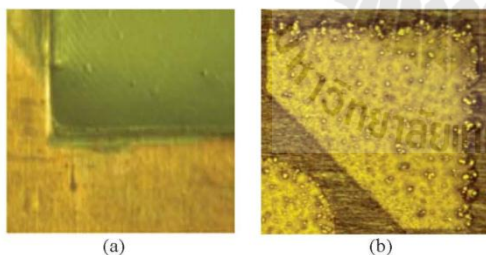


Fig. 4 Effect of non-appropriate DC electroplating process

As the absorber thickness is a very important factor for X-ray lithography to absorb X-ray irradiation before exposing of photoresist, non-uniform and rough surface of X-ray mask absorber can cause to undesired contrast microstructures. Consequently, the X-ray mask must be remade. It causes high operating cost and time consumption. To reduce these problems, another electroplating technique has been invented by focusing on electroplated uniform deposition. In 1972, Permaloy Corporation studied pulses current (PC) for anodizing aluminum and its alloys [4]. Another material which can be formed by electrochemical deposition then has gradually

utilized this technique to improve uniform deposition and crystal structure.

This paper presents the utilizing of the pulse electroplating for the absorber material formed on the X-ray mask. By controlling of duty cycle with the constant frequency and the average current density, the absorber thickness profiles can be investigated and considered for the optimum duty cycle. Uniform and smooth surface of absorber film can be achieved by pulse electroplating with the duty cycle lower than 60%. This technique can be simply used to control the absorber thickness of X-ray mask which is very important for X-ray lithography process in synchrotron light application.

2. Concept of Pulse Electroplating Technique

The waveform of current shown in Fig. 5 is applied between two electrodes based on pulse electroplating. It is a series of pulses of equal amplitude, duration and polarity separated by zero current. Film thickness and deposition rate can be controlled by the pulse amplitude and width regulating.

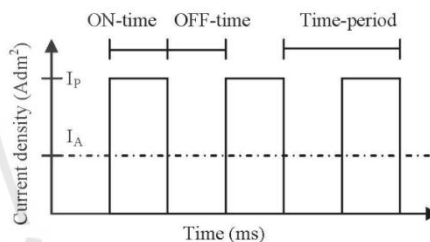


Fig. 5 Typical pulse current waveform

For the conventional DC electroplating, the current density (I) is only one parameter which has to be considered. But in the pulse electroplating, three variables comprise ON-time (T_{ON}), OFF-time (T_{OFF}) and peak current (I_P) have to be regarded. The duty cycle (γ) which is the percentage of ON-time of a time-period (T) is given by [5]:

$$\gamma = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = T_{ON} f \tag{1}$$

where f is frequency of pulse waveform defined by:

$$f = \frac{1}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{1}{T} \tag{2}$$

The ON-time can be varied in range of μs to ms to change the duty cycle. The rate of metal deposition of PC will be same as DC by considering the average pulse current density (I_A) equals the current density (I).

$$I_A = \gamma \times I_P \tag{3}$$

By fixing of I_P , increasing of the duty cycle will result in higher I_A and metal deposition rate. To observe the optimum duty cycle for the uniform deposited metal,

the negative charge layer which is formed around the cathode in ON-time will be discharged by OFF-time adjustment, resulting in uniform ions distribution on the cathode area. Uniform thickness with smooth surface of metal layer can be achieved under suitable condition.

3. Experimental Setup

X-ray mask which provides photoresist mold for the absorber forming is prepared by UV lithography process. By transferring through UV mask, micro-patterns with 10 μm-thick photoresist on seed layer as shown in Fig. 6 can be investigated for PC electroplating results. In this experiment, silver which is one of the X-ray absorber is selected to be the tested material. Electroplating area is 1.45 cm² and the average pulse current density fixed at 20 mA is estimated by DC electroplating results that give the smoothest surface and fair thickness.

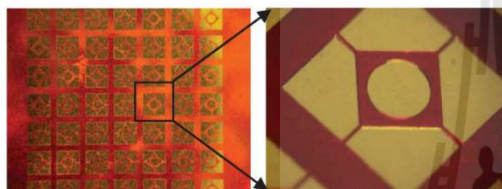


Fig. 6 Micro-patterns fabricated by UV lithography for PC electroplating experiment

Figure 7 illustrates the PC electroplating setup at Micromachining Laboratory of SLRI. The system comprises of 3 parts, silver electrolyte, pulse current supply and electrodes. The duty cycles are adjusted for five values, 20% 40% 60% 80% and 100%, with a frequency of 160 Hz or 6.25 ms of the time period. Based on equation (3), low duty cycle requires higher peak current to constrain the average pulse current density. Uniform thickness and smooth surface of absorber layer will be observed by mean of average cross section profile of metal film.

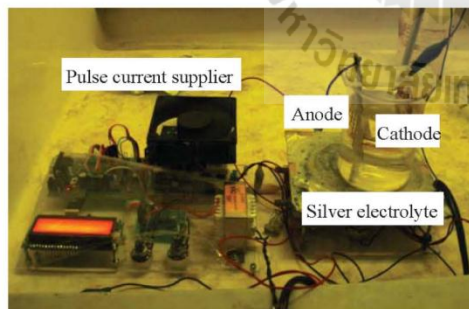


Fig. 7 Pulse electroplating set of silver absorber

4. Experimental Results and Discussion

While the pulse electroplating was performing, the thickness of electroplated metal layer was always measured by Veeco Optical Profiler. The target thickness of the absorber film is 10 μm by considering on the lowest thickness, especially at the center of large area where has minimum thickness resulting from non-uniform current

distribution, the geometric factor, and throwing power of the plating solution [2]. The pulse electroplating characteristics of this practice are displayed in Table I.

TABLE I
PULSE ELECTROPLATING CHARACTERISTICS

DUTY CYCLE (γ)	I _A (mA)	I _P (mA)	TIME (min)
100%	20	20	40
80%		25	40
60%		33.33	45
40%		50	45
20%		100	50

The observation section of thickness profile is shown at the upper figure of Fig. 8, while the 3D image of electroplated absorber patterns is shown at the lower figure. The average width of x-axis line for thickness observation is 130 μm. The thickness profile results of each duty cycles are illustrate in Fig. 9 which the thicknesses slope up to the edge of the pattern. The target of absorber thickness is 10 μm for the lowest area where is the center of the pattern.

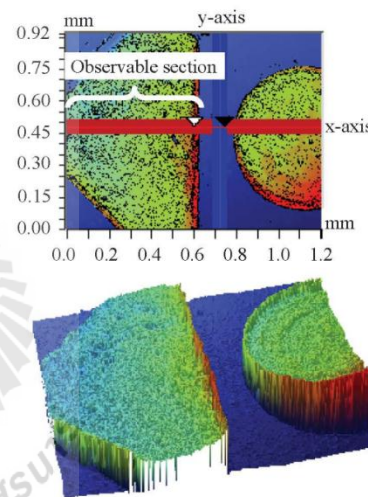


Fig. 8 Cross section measuring by Veeco Optical Profiler

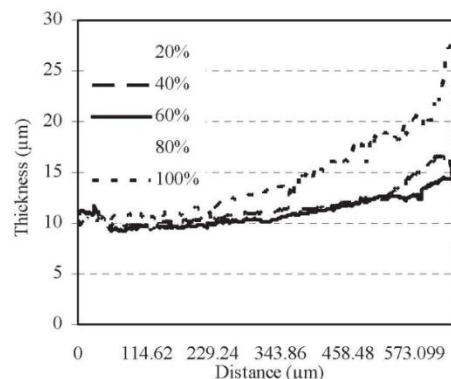


Fig. 9 Thickness profiles of the absorber layers

The experimental results are obviously proved that the absorber slopes are decreased when the duty cycles are lower than 60%, especially at the edge of the electroplated patterns. Figure 9(a) shows the electroplated metal layer with 100% of duty cycle (DC electroplating) which creates thick-metal film at the edge of patterns. But this effect can be reduced by using pulse electroplating that provides the uniform current distribution across the seed layer as shown in Fig. 10(b). The uniform current density can be achieved by discharging of the negative charge layer between OFF-time periods, resulting in easier passage of the ions onto the deposited part.

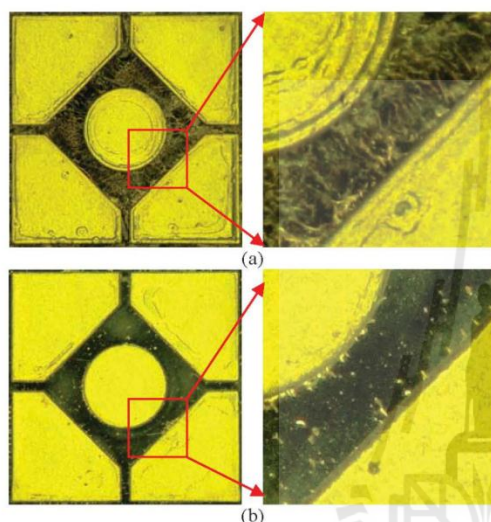


Fig. 10 Electroplated metal layer (a) $\gamma = 100\%$ and (b) $\gamma = 20\%$

The other of factors that should be included in experimental consideration is electroplating time as shown in Table I. Although the smooth surface with uniform thickness can be obtained at the low duty cycle, it has to pay for more electroplating time to achieve the sufficient absorber thickness. However, the high-aspect-ratio microstructures of $300\ \mu\text{m}$ are simply constructed by using $18\ \mu\text{m}$ -thick X-ray absorber patterns [6]. The pulse electroplating technique with 60% of duty cycle which is the optimal value in this practice can be sped up the deposited process by increasing of the average pulse current density. The acceptable X-ray mask can be attained and also reduce number of damaged X-ray masks during absorber electroplating process.

5. Conclusion

Based on the thickness of X-rays microstructures, a good X-ray mask with sufficient absorber thickness can be achieved by optimization of pulse electroplating parameters. The negative charge layer which is a barrier for the ions reaching onto deposited area is discharged in OFF-time period, resulting in the uniform current distribution. By studying the duty cycle, uniform thickness and smooth surface of X-ray absorber film can be achieved by pulse electroplating with the duty cycle lower than 60%. This

value can be used to improve X-ray electroplating process and reduced the number of damaged X-ray mask during X-ray absorber electroplating process.

6. Acknowledgment

Gratitude are due to Dr. Nimit Chomnawang from Suranaree University of Technology for providing the knowledge of X-ray mask fabrication and Beamline 6a Deep X-ray Lithography (DXL) of the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) for the help in the X-ray lithography process.

References

- [1] Y. Desta and J. Goettert, "X-ray Mask for LIGA Microfabrication" in *Advanced Micro & Nanosystems Volume 7 LIGA and its applications*, ed. V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata and J.G. Korvink, (the Federal Republic of Germany, 2009), pp. 11-50.
- [2] W. Wang and S.A. Soper, "Bio-MEMS Technologies and Applications," Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 59-66.
- [3] M.S. Chandrasekar and M. Pushpavanam, "Pulse and pulse reverse plating – conceptual, advantages and applications," *Electrochimica Acta* 53, 2008, pp. 3313-3322.
- [4] Permaloy Corporation, Ogden, Utah, US Patent, 3,857,766 (1972).
- [5] S. D. Beattie and J. R. Dahn, "Single Bath, Pulsed Electrodeposition of Copper-Tin Alloy Negative Electrodes for Lithium-ion Batteries," *J. Electrochem Soc.* 150, 2003, A894.
- [6] R. Phattanakun, M. Mapato, W. Wanburee, S. Promwikorn, N. Chathirat, P. Songsiriritthigul, P. Klysubun, and N. Chomnawang, "Copier Transparency As A Transparent Support for X-ray Mask Absorber", Abstract presentation at the International Conference on Materials for Advanced Technologies 2007 (ICMAT 2007), Symposium N Synchrotron Radiation for Making and Measuring Materials, 2007, # N-13-OR39.



Rungrueang Phatthanakun is a beamline scientist at the Beamline 6a: Deep X-ray Lithography (DXL), Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), THAILAND. He received his master and doctor degree from Suranaree University of Technology, Thailand, in 2006 and 2009, respectively. His research interests include X-ray LIGA application, MEMS fabrication and simulation.

Design and Fabrication of Thin-Film Aluminum Microheater and Nickel Temperature Sensor

R. Phatthanakun*, P. Deekla**, W. Pummara**, C. Sriphung*, C. Pantong**, N. Chomnawang**

*Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand
rungrueang@slri.or.th

**School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
sut.mems@gmail.com

Abstract— This paper presents development of a thin film aluminum microheater and a nickel temperature sensor for low temperature applications by using Micro-Electro-Mechanical Systems. Both of them are fabricated onto a glass substrate and protected by thin PDMS membrane. The microheater is energized to find sensor characteristic. As linearity and accuracy of nickel sensor give a wide temperature range, its electrical resistance variations are calibrated directly by temperatures of energized microheater. Variations of resistance signal are transformed and fed back to control temperature of microheater in PI closed-loop feedback control. K_p and K_i values are adjusted to obtain the optimal time response. Experimental testing of controlled temperature ranges from 40°C to 140°C is presented for their integration in stability system.

Keywords—microheater; sensor; MEMS; PI controller

I. INTRODUCTION

Microheater and temperature sensor have been widely used in many applications such as micro explosive boiling, micropump, pressure sensor, flow rate sensor and microvalve [1-3]. Advance in Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) made it possible for thin-film microheater to be applied for smart devices because of their extensive applications. Generally, materials which provide wide temperature range, accuracy, and stability are selected to fabricate as microheater such as platinum and gold. In low temperature system, however, aluminum has been chosen to work as actuators instead because it offers good properties with lower price. To control these microheaters in integrated systems, thin-film sensors have been used as resistance temperature detectors (RTDs) which give a linear positive change in resistance with respect to temperature. Platinum still supports this requirement with expensive cost and operates from -200°C to +800°C. Like as many applications in low temperature system, nickel can be chosen to be sensor to operate from -100°C to +260°C with low cost and the best sensitivity.

In this paper, a thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor are developed by MEMS technology for actuator and sensor applications. They are constructed on a glass substrate because of its low thermal conductivity and high electrical resistance. Thin film PDMS membrane is then coated to protect them from environmental hazards. Nickel resistance is calibrated directly by temperature of microheater

to estimate its characteristic using FLIR infrared camera. These resistance signals are transformed and fed back to control microheater temperatures through PI closed-loop feedback control. The variations of the microheater temperature with time and a linear function of metal sensor are investigated. Controlled temperature ranges from 40°C to 140°C are displayed to show the capability in application of low temperature electronic device.

II. DESIGN AND FABRICATION

Aluminum and nickel are selected to use as the metal of microheater and temperature sensor, respectively, because of its good linearity, low cost, and chemical stability. The pattern of microheater is designed to encompass sensor as shown in Fig. 1, resulting in fast response of RTDs material.

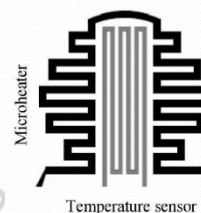


Fig. 1. Schematic of microheater and temperature sensor.

By applying a voltage (V) across the two end of a resistor with a resistance (R), the heating power (P) of a microheater can be generated. Equation (1) is a heating power calculation which implies that the smaller resistance results in the larger heating power with the fast temperature rise.

$$P = V^2 / R \quad (1)$$

A resistance of thin-film microheater appeared in (1) can be calculated by (2).

$$R = \frac{\rho L}{wt} \quad (2)$$

where ρ is the resistivity of material, L is the length, w and t are the width and the thickness of thin-film, respectively.

For a RTDs thin-film sensor, the relationship between the resistance and temperature ($> 0^\circ\text{C}$) can be calculated over its operating temperature range by (3) [4].

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (3)$$

where $R(t)$ is resistance at temperature t , R_0 is base resistance at 0°C , A and B are constant coefficient of equation resulting from experimental results.

To achieve a large heating power with small voltage source, the microheater is designed to obtain a small resistance about 100Ω , while nickel temperature sensor is considered a resistance around 1000Ω . The characteristics of them are displayed in Table I. After fabrication, their resistances (R_{meas}) are measured and compared with the required resistances (R_{req}) which are calculated by (2).

TABLE I. CHARACTERISTICS OF MICROHEATER AND SENSOR

Materials	L (μm)	w (μm)	t (\AA)	P ($\Omega\text{-m}$)	R_{req} (Ω)	R_{meas} (Ω)	Err (%)
Al	8703	50	450	2.6×10^4	100	94.5	5.5
Ni	7030	30	163.8	6.9×10^6	1000	1195	19.5

Microheater and sensor are fabricated on a microscope glass slide by using UV lithography and lift-off process as illustrated in Fig. 2. The glass slide is first deposited with aluminum thin film using thermal evaporation and coated by AZ 1512 photoresist to create protective layer by UV exposure as shown in Fig. 2(a) and (b), respectively. Aluminum microheater is left on the substrate by etching in HF solution, followed by photoresist removal as shown in Fig. 2(c). The layer of AZ photoresist is coated again to cover all patterns and exposed to create the sensor mold as shown in Fig. 2(d) and (e), respectively. Nickel is filled into the resist mold by evaporation as shown in Fig. 2(f) and acetone is used to lift-off photoresist as shown in Fig. 2(g). Finally, thin-film PDMS is spin-coated to perform as a protective layer as shown in Fig. 2(h). A complete microheater and temperature sensor are displayed in Fig. 3.

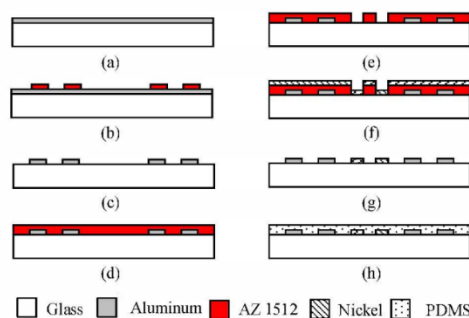


Fig. 2. Fabrication sequence of microheater and temperature sensor.

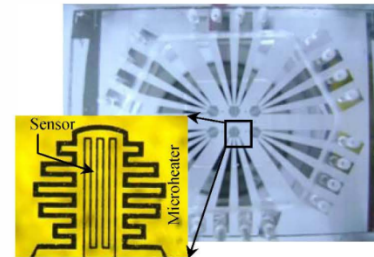


Fig. 3. Aluminum microheater with nickel temperature sensor on a glass substrate covered by thin PDMS membrane.

III. ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SENSOR

The DC voltage source is applied across the two ends of the microheater. Its temperature is detected to find the temperature relationship as a function of the applied power presented in Fig. 4. The temperature is measured by a FLIR infrared camera as shown in Fig. 5.

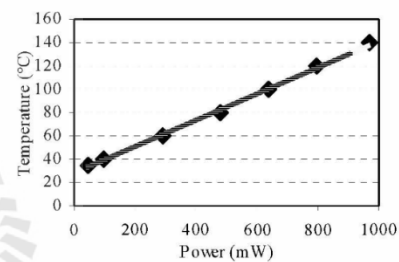


Fig. 4. Temperature of microheater as a function of the applied power.

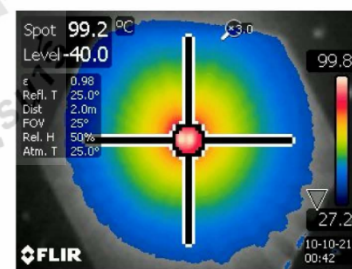


Fig. 5. Temperature distribution measured by a FLIR infrared camera.

Nickel sensor is characterized as a function of the resistance-temperature (R-T) curve as shown in Fig. 6. Its resistance is checked by applying of DC voltage to microheater and adjusted its temperature. The R-T result is then fitted by a second order regression curve and arranged to form the relationship of R-T as in (4). The 0°C resistance of nickel sensor is 1133.2Ω with constant coefficients of A and B are $1, 2.091 \times 10^{-3}$ and 2.294×10^{-6} , respectively.

$$R(t) = 1133.2(1 + 2.091 \times 10^{-3} t + 2.294 \times 10^{-6} t^2) \quad (4)$$

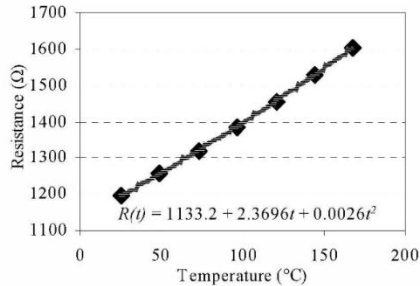


Fig. 6. Resistance of RTD nickel sensor as a function of temperature.

IV. TEMPERATURE CONTROL

To control the process or the parameter (temperature, flow, or speed), the principle of control is similar. Signals of input and output have to be appropriate to the application. The simplest and cheapest control system is closed-loop feedback control with On/Off function. However, controlled temperatures using this method have output oscillations as shown in Fig. 7. Although it provides fast responses, the stability systems that require high accuracy temperature output cannot utilize this method.

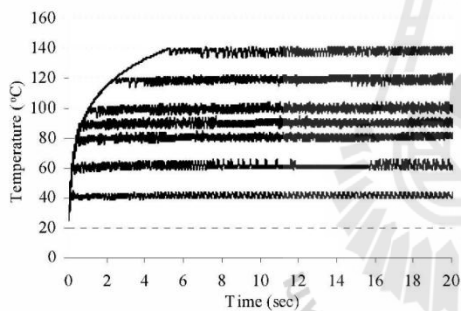


Fig. 7. Time responses of closed-loop feedback control with On/Off function.

Another of control function which can be used to avoid oscillation output problem is PI function. Microheater is controlled by PI closed-loop feedback control which observes real-time temperatures via the sensor [5]. The block diagram is illustrated in Fig. 8 and a picture of the completed temperature control kit with PI controller is illustrated in Fig. 9.

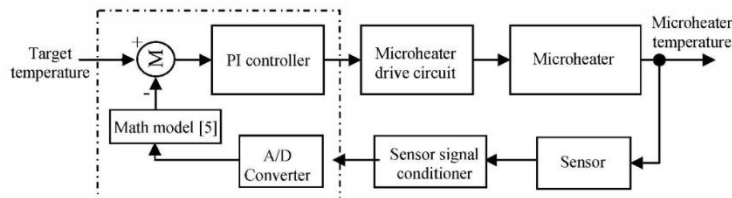


Fig. 8. Block diagram of PI closed-loop feedback control for microheater.

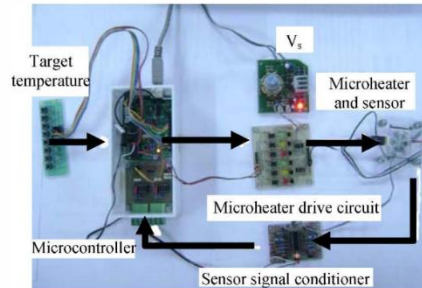


Fig. 9. The completed temperature control kit for microheater.

Figure 10 shows a comparison of time response between On/Off and PI closed-loop feed back control. The On/Off control offers a rise time of 1.5 sec faster than PI control that requires 7.6 sec. Temperature oscillation of On/Off control, however, is about 8°C while the PI control gives the slow temperature rise when approaching set-point. The On/Off control energizes the microheater at maximum energy to increase the temperature when the output lower than the set-point, and stops current flow when the output higher than the set-point, resulting in temperature oscillation in dead band. Meanwhile, variation of PI control is more smoothly because it calculates an error value as the difference between a target temperature set-point and a measured temperature from sensor.

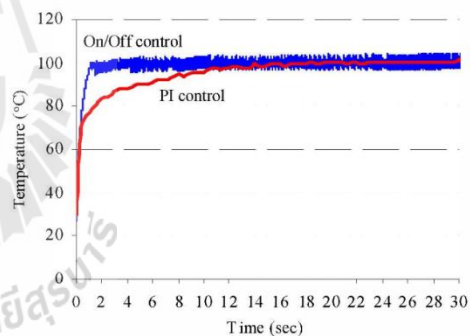


Fig. 10. A comparison between On/Off and PI function at 100°C.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

A PI controller which has been widely used in control system is selected to be a control loop feedback mechanism. It calculates an error value as the difference between a target temperature set-point and a measured temperature from sensor. K_p and K_i values are adjusted by considering overshoot and rise time of step response. The K_p value is first adjusted to get rid of overshoot with minimum rise time (t_r). Then, the K_i value is tuned to obtain the minimum steady state error (ess) of 6 degree temperatures for 40 60 80 100 120 and 140°C, respectively. The rise times of each temperature which are defined as the time to go from 10% to 90% of its final value are observed and presented in Fig. 11. Furthermore, the temperature variations between 40°C to 120°C are varied to estimate the performance of the temperature control kit as shown in Fig. 12. It can be observed that the temperature quickly responded when the system was actuating to high temperature. In the other hand, the responses of cool down states do not provide suitable variations, especially a change of temperature from 60°C to 40°C. To solve these problems, the PI controller has to be adjusted for both step-up and step-down procedures to achieve the optimum values.

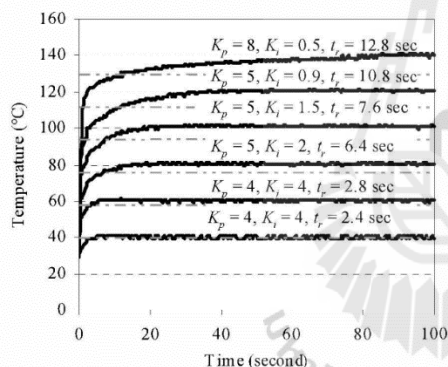


Fig. 11. Step response of microheater by adjusting PI controller.

VI. CONCLUSIONS

Thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor were designed and fabricated by MEMS technology. Aluminum which is low cost material and linear response was selected to be microheater. Nickel which provides the best sensitivity and linear resistance was chosen to act as temperature sensor, and placed inside microheater pattern to attain fast temperature variation. The characteristics of microheater and sensor were characterized and applied to the PI closed-loop feedback temperature control kit. The PI controller was adjusted to achieve the optimum time response of temperature between 40°C to 140°C. The impressive results can obtain for step up, but the PI values have to be adjusted for step down. However, the thin-film microheater which can be controlled its temperature is

suitable to apply in many low temperature electronic device applications.

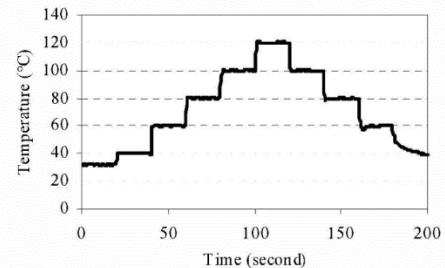


Fig. 12. The temperature variation based on 5 target temperatures.

ACKNOWLEDGMENT

We are grateful to the Accelerator Technology Division and Beamline 6a (DXL) of the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) for the help in the FLIR infrared camera and the processing of the devices.

REFERENCES

- [1] K.L. Zhang, S.K. Chou, and S.S. Ang, "Fabrication, modeling and testing of a thin film Au/Ti microheater," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46(6), pp 580-588, June 2006.
- [2] M.A. Gajda, and H. Ahmed, "Application of thermal silicon sensors on membranes," *Sensor and Actuators A* vol. 49 (1-2), pp. 1-9, 1995.
- [3] J. Puigcorbe, D. Vogel, B. Michel, A. Vila, I. Gracia, C. Cane, and J.R. Morante, "Thermal and mechanical analysis of micromachined gas sensors," *Journal of Micromechanics and Microengineering* vol. 13 (5), pp. 548-556, 2003.
- [4] E.J.P. Santos, and I.B. Vasconcelos, "RTD-based smart temperature sensor: Process development and circuit design," *26th International Conference on Microelectronics*, pp. 333-336, May 2008.
- [5] R. Phattanakun, P. Deekla, W. Pummara, C. Pantong and N. Chomnawang, "Fabrication and Control of Thin-Film Aluminum Microheater and Nickel Temperature Sensor," *Proceedings of The 8th international conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 14-17, 2011.

ประวัติผู้เขียน

นายวัชรพล ภูมรา เกิดเมื่อวันที่ 17 เมษายน 2532 ที่อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาโรงเรียนวัดจันทนาราม มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนชุมพวงศึกษา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2553 ระหว่างศึกษาระดับปริญญาตรีได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์และระบบควบคุมอัตโนมัติ และทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิชาเดียวกัน ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยทำการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดัง ภาควิชา ก.

