

การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**DEVELOPMENT OF PRESSURE SENSORS BASED ON  
POLYMERIC SENSING MEMBRANE**

**Kamonrat Boonprakong**



**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 2010**

## การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

---

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล)

กรรมการ

---

(อ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ

---

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

---

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กมลรัตน์ บุญประคอง : การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์เป็นแผ่นรับรู้  
ปริมาณอินพุต (DEVELOPMENT OF PRESSURE SENSORS BASED ON  
POLYMERIC SENSING MEMBRANE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง,  
124 หน้า.

ในปัจจุบันตัวตรวจรู้ความดันมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ควบคุมเครื่องมือใน  
โรงงานอุตสาหกรรม ระบบรถยนต์ เครื่องบิน และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ตัวตรวจรู้ความ  
ดันในปัจจุบันมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาต่ำลงเรื่อย ๆ โดยทั่วไป  
ตัวตรวจรู้ความดันจะสร้างบนซิลิคอน โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้น  
การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบวัดความดันเกจในช่วงความดันต่ำ โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์หรือ  
สารไวแสง SU-8 เป็นตัวรับรู้ปริมาณอินพุต เพราะสารไวแสง SU-8 นั้นมีค่ามอดูลัสของยังที่น้อยกว่า  
ซิลิคอน ดังนั้นสารไวแสง SU-8 จึงมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากกว่าซิลิคอน และมีราคา  
ถูกกว่าด้วย ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีแผ่นรับรู้ความดันเป็น  
วัสดุพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต กระบวนการสร้างที่ได้  
พัฒนาขึ้นเริ่มจากการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ในแผ่นวงจรพิมพ์แล้วฉาบที่เจาะ  
นั้นด้วยทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นวัสดุชั่วคราวจากนั้นจึงหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 ทับลงบน  
ฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าว แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้สารไวแสงเกิดการแข็งตัว  
เมื่อสกัดทองแดงออกจะได้แผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างตัวต้านทานไฟฟ้าที่  
เป็นโลหะทับลงบนแผ่นรับรู้ความดัน ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแผ่นรับรู้  
ความดันเกิดการโก่งตัว ตัวต้านทานไฟฟ้างดกล่าวเป็นแผ่นฟิล์มของโลหะนิโครม สร้างเป็น  
ลวดลายรูปตัวยูพาดผ่านเข้าไปบริเวณแผ่นรับรู้ความดันวงกลมจากขอบทั้งสี่ทิศ ตัวตรวจรู้ความดัน  
ที่สร้างเสร็จแล้วมีแผ่นรับรู้ความดันเป็นแผ่นพอลิเมอร์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$ หนา 40  $\mu\text{m}$   
และมีตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจที่สร้างด้วยโลหะนิโครมอยู่บริเวณด้านบน มีค่าความต้านทาน  
ไฟฟ้า 4.404 k $\Omega$  สามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-180 kPa ที่อุณหภูมิ 25-60  $^{\circ}\text{C}$  เวลาในการ  
ตอบสนอง 2.3 วินาที และค่าความแม่นยำ  $\pm 10\%$  เมื่อเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์  
เบอร์ MPX 5700 ของ Motorola

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

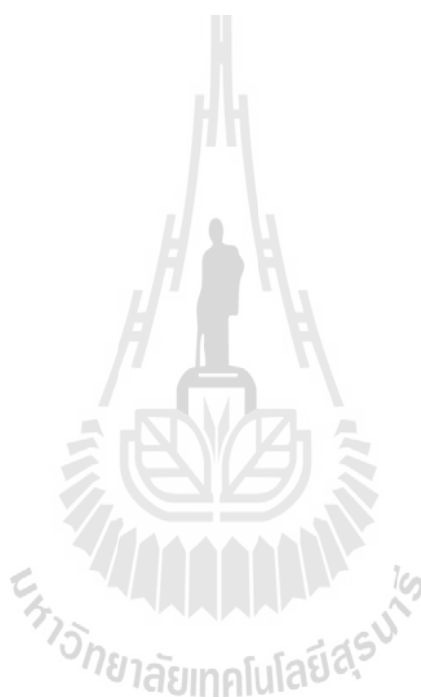


KAMONRAT BOONPRAKONG : DEVELOPMENT OF PRESSURE  
SENSORS BASED ON POLYMERIC SENSING MEMBRANE. THESIS  
ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 124 PP.

MEMS/PRESSURE SENSOR/STRAIN GAUGE

In recent days, pressure sensors were widely used in many applications such as control equipment in factory, the system of vehicles, plane and medical tools. The pressure sensors are in micro-scale, consume less power while produce high efficiency and the cost is therefore, continuously decreased. The pressure sensor was generally fabricated using micro-electro mechanical system on silicon substrate. The aim of this thesis is to fabricate SU-8 based pressure sensors. Due to the fact that , SU-8 photoresist has lower Young's modulus and lower cost than silicon, it is used in this thesis as a detecting membrane in pressure sensors. Fabrication of an SU-8 polymeric detecting membrane was done by UV-lithography. Starting with drilling a hole with a diameter of 1 mm into a printed circuit board. This hole was then filled with sacrificial electroplated copper. After planarization of excessive electroplated copper, SU-8 photoresist was spun on the substrate, followed by UV light exposure to form a layer of SU-8 detecting membrane. On this SU-8 membrane layer, a series of four U-shape resistors made of Ni-Chrome thin film was formed. The sacrificial copper in the drilled hole of the printed circuit board was then removed by chemical etching. A pressure sensor with a 40  $\mu\text{m}$ -thick free standing SU-8 detecting membrane and a strain gauge resistor of 4.404 k $\Omega$  was finally obtained. Testing of the fabricated sensor showed that it can measure input pressures in a range of 0-180 kPa at 25-60°C

with a rise time of 2.3 seconds and an accuracy of  $\pm 10\%$  when calibrated against the Motorola's MPX 5700 reference pressure sensor.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัยรวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและการดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุณศิริไฉย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ และ อาจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัยและสถานที่เพื่อการวิจัยนี้ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโท รุ่นพี่ทุกท่านในห้องทดลองที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรักความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งตลอดมา รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมาและตลอดไป

กมลรัตน์ บุญประคอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 ความดัน.....	5
2.2 การวัดความดันและชนิดของตัวตรวจรู้ความดัน.....	6
2.3 การสร้างตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน.....	9
<b>3 ทฤษฎีและการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน</b> .....	<b>17</b>
3.1 การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน.....	18
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผลการโก่งตัวของไดอะแฟรม ที่ความดันต่าง ๆ.....	19
3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความยาวรัศมีของไดอะแฟรม.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความหนาของไดอะแฟรม	22
3.2	ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive effect)	25
3.3	การเลือกชนิดโลหะเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจ	27
3.4	การออกแบบตัวต้านทานไฟฟ้าของสเตรนเกจ	28
3.4.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความยาว ของตัวต้านทานขณะโก่งตัว	28
3.4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาชนิดของโลหะ ของตัวต้านทานสเตรนเกจ	31
3.4.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความหนา ของตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจ	35
3.4.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความกว้าง ของตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจ	36
4	กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค	40
4.1	กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process)	40
4.2	การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	42
4.3	การเคลือบโลหะ (Metallization)	46
4.3.1	การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ	46
4.3.2	การสปัตเตอร์ริง	46
4.4	กระบวนการสกัด (Etching)	49
4.3.2	การสกัดแบบแห้ง (Dry etching)	49
4.3.2	การสกัดแบบเปียก (Wet etching)	49
5	กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน	50
5.1	การวาดแบบสวดลาย	51
5.2	กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน	52
5.2.1	การสร้างไดอะแฟรมโดยใช้สารไวแสง ชนิดลบ SU-8 เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว	52
5.2.2	การสร้างไดอะแฟรมโดยใช้ทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราว	55

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3	การสร้างไดอะแฟรมโดยใช้ AZ เป็นวัสดุชั่วคราว.....	59
5.2.4	การสร้างตัวตรวจรู้โดยนำไดอะแฟรมมาประกบติดกับฐาน .....	61
5.2.5	การสร้างตัวตรวจรู้โดยนำไดอะแฟรมมาประกบติดกับฐาน ที่มีที่เชื่อมต่อสาย .....	66
5.2.6	การสร้างตัวตรวจรู้โดยใช้โลหะ निकิล เป็นวัสดุฐาน.....	69
5.2.7	การสร้างตัวตรวจรู้โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์เจาะรู เป็นวัสดุฐาน.....	74
5.3	หน้ากากแข็ง (Hard mask).....	76
5.3.1	หน้ากากแข็งแบบโลหะ.....	76
5.3.2	หน้ากากแข็งแบบสารไวแสง SU-8.....	78
6	การทดสอบและผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	80
6.1	ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	80
6.2	การวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้.....	84
6.3	การวิเคราะห์การโค้งตัวบริเวณจุดศูนย์กลาง ของไดอะแฟรมเมื่อให้ความดัน.....	85
6.4	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน.....	88
6.4.1	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานของโลหะ.....	88
6.4.2	ความร้อนจูล (Joule heating) .....	90
6.5	เสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดัน.....	92
6.6	การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์.....	92
6.6.1	การสอบเทียบกับตัวตรวจรู้ MPX 5700.....	92
6.6.2	การวัดผลตอบสนองทางเวลา.....	94
6.6.3	ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) .....	97
6.6.4	การเปรียบเทียบ $\Delta R / R$ ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ.....	98
7	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
7.1	บทสรุปงานวิจัย.....	102
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	103

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายงานอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์.....	108
ภาคผนวก ข. โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	111
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการ.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	124



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน..... 15
3.1	ผลการจำลองระยะ โกงตัว ณ จุดศูนย์กลาง ของไดอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง..... 19
3.2	ผลการจำลองระยะ โกงตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม เมื่อความยาวรัศมีมีค่าต่างกัน..... 21
3.3	ผลการจำลองระยะ โกงตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม เมื่อความหนาที่แตกต่างกัน..... 24
3.4	คุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด..... 28
3.5	ผลการจำลองความยาวที่เพิ่มขึ้นของไดอะแฟรมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากจุดศูนย์กลางตามความดันที่เปลี่ยนแปลง..... 30
3.6	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด..... 33
3.7	คุณสมบัติของนิโครม..... 34
3.8	ผลการจำลองความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง..... 35
3.9	ผลการจำลองค่าความต้านทานเมื่อตัวต้านทานมีความกว้างต่างกัน..... 36
4.1	สารเคมีที่ใช้ในการสกัด..... 49
6.1	ผลการวัดระยะการ โกงตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่าง ๆ..... 85
6.2	ค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 88
6.3	ผลการวัดค่าเลขดิจิตอล 10 บิต ที่ความดันต่าง ๆ..... 93
6.4	ผลการคำนวณค่า $\Delta R / R$ ที่ความดันต่าง..... 100



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะของไดอะแฟรม.....3
2.1	เปรียบเทียบการวัดความดันลักษณะต่าง ๆ.....6
2.2	อ่างปรอท.....7
2.3	ท่อบูร์ดอง.....9
2.4	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Lin (1999).....10
2.5	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Mohan (2004).....11
2.6	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Cermen (2005).....12
2.7	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Lim (2005).....12
2.8	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Ko (2007).....13
2.9	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Chen (2009).....14
2.10	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Kim (2009).....15
2.11	เปรียบเทียบขนาดไดอะแฟรมและความดันสูงสุดในงานวิจัยต่าง ๆ.....16
3.1	ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรม.....17
3.2	กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่าง ๆ.....20
3.3	กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีต่างกัน.....21
3.4	กราฟเปรียบเทียบระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางที่ความยาวรัศมีต่าง ๆ.....22
3.5	กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีความหนาต่างกัน.....23
3.6	กราฟเปรียบเทียบระยะการโค้งตัวมากที่สุดเมื่อไดอะแฟรมมีความหนาต่างกัน.....24
3.7	กราฟแสดงค่าระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันและตำแหน่งต่าง ๆ.....25
3.8	ลักษณะการยืดยาวของตัวต้านทาน.....26
3.9	กราฟผลการจำลองความยาวของไดอะแฟรมขณะโค้งตัวเนื่องจากความดัน.....29
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลในตารางที่ 3.5.....32
3.11	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด.....34
3.12	กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานเมื่อตัวต้านทานมีความหนาต่างกัน.....37
3.13	กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานเมื่อตัวต้านทานมีความกว้างต่างกัน.....37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ขนาดตัวต้านทานในงานวิจัยนี้.....	38
3.15 ลักษณะตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้.....	39
4.1 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบในกระบวนการลิโธกราฟี.....	41
4.2 การหมุนเคลือบสารไวแสง.....	41
4.3 วงจรการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	43
4.4 ภาพถ่ายชุดชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	44
4.5 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ.....	47
4.6 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอร์ริง.....	48
5.1 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้.....	50
5.2 ลักษณะ โปรแกรม Layout editor.....	51
5.3 ขั้นตอนการสร้างไดอะแฟรมโดยใช้ SU-8 เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว.....	53
5.4 ภาพถ่ายลวดลายที่เกิดหลังฉายแสงอัลตราไวโอเลต.....	54
5.5 ภาพถ่ายบริเวณตรงกลางเกิดรอยย่นเมื่อถูกความร้อนสูงจากการเคลือบโลหะ.....	54
5.6 ขั้นตอนการสร้างไดอะแฟรมโดยใช้ทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราว.....	56
5.7 ภาพถ่ายลวดลายเพื่อใช้ในการชุบโลหะทองแดง.....	57
5.8 ภาพถ่ายทองแดงถูกขัดให้เรียบ.....	57
5.9 ภาพถ่ายสารไวแสงชั้นไดอะแฟรม.....	58
5.10 ภาพถ่ายการกัดทองแดง.....	58
5.11 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างของตัวตรวจรู้.....	59
5.12 ภาพถ่ายสารไวแสง AZ เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว.....	60
5.13 ภาพถ่ายแสดงบริเวณผิวหน้าสารไวแสงเกิดฟองอากาศ.....	61
5.14 ภาพถ่ายแผ่นไดอะแฟรมหนา 30 $\mu\text{m}$ .....	63
5.15 ภาพถ่ายสารไวแสงชั้นที่สองที่เป็นฐาน.....	63
5.16 ภาพถ่ายไดอะแฟรมที่ยึดติดกับฐาน.....	64
5.17 ภาพถ่ายหน้าฉากโลหะลายตัวต้านทาน.....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

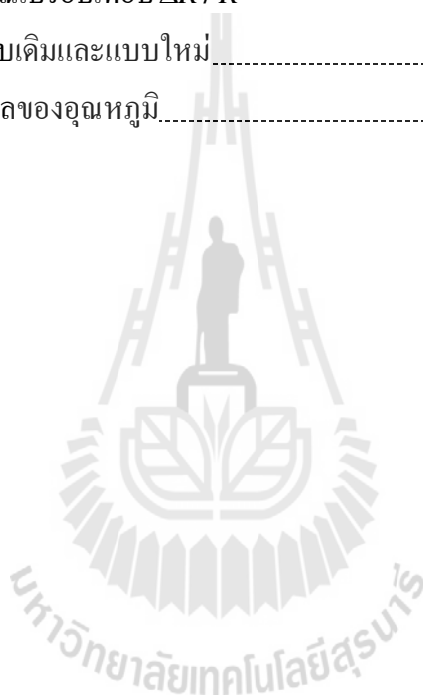
รูปที่	หน้า
5.18 ภาพถ่ายตัวด้านทานบน ไดอะแฟรม.....	65
5.19 ภาพถ่ายบริเวณที่เชื่อมต่อสายถูกชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....	65
5.20 ภาพถ่ายแผ่นวงจรพิมพ์ถูกกัดลายเพื่อเชื่อมต่อสาย.....	67
5.21 ภาพถ่ายไดอะแฟรมบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	67
5.22 ภาพถ่ายแสดงบริเวณที่เชื่อมต่อสาย.....	68
5.23 ภาพถ่ายชิ้นงานถูกสปีดเตอร์ริงเพื่อเชื่อมต่อตัวด้านทานและแผ่นวงจรพิมพ์.....	68
5.24 ภาพถ่ายสารไวแสงเพื่อเตรียมชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....	70
5.25 ภาพถ่ายเมื่อเติมโลหะทองแดงด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	70
5.26 ภาพถ่ายแสดงแท่งโลหะทองแดงเมื่อทำการสกัดสารไวแสงทิ้ง.....	71
5.27 ภาพถ่ายโลหะ निकิลเกิดและทองแดง.....	71
5.28 ภาพถ่าย SU-8 ไดอะแฟรมบนฐาน निकิลเกิด.....	72
5.29 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ด้วยแผ่นวงจรพิมพ์.....	73
5.30 ภาพถ่าย SU-8 บนแผ่นวงจรพิมพ์.....	74
5.31 ภาพถ่ายไดอะแฟรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 $\mu\text{m}$ .....	75
5.32 ภาพถ่ายตัวด้านทานสเตรนเกจบน ไดอะแฟรม.....	75
5.33 ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างได้ในงานวิจัยนี้.....	76
5.34 ภาพถ่ายหน้ากากแข็งแบบโลหะ निकิลเกิด.....	77
5.35 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากโลหะ.....	78
5.36 ภาพถ่ายหน้ากากแข็งแบบสารไวแสง SU-8.....	79
5.37 ตัวด้านทานโลหะที่สร้างโดยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศผ่านหน้ากากแข็ง.....	79
6.1 ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	81
6.2 ทิศทางการป้อนก๊าซให้กับตัวตรวจรู้ความดัน.....	81
6.3 ภาพถ่ายชุดทดสอบการวัดค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้.....	82
6.4 ภาพถ่ายชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	82
6.5 วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน.....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6	ภาพถ่ายลักษณะตัวตรวจรู้ความดัน..... 84
6.7	กราฟแสดงผลการวัด $\Delta R / R$ กับค่าความดัน..... 84
6.8	กราฟเปรียบเทียบระยะ โกงตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ระหว่างคำนวณและวัดได้..... 86
6.9	ภาพการวัดจากเครื่องวัดความหนาแสดงการ โกงตัว ของไดอะแฟรมที่ความดัน 110 kPa..... 86
6.10	ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงลักษณะไดอะแฟรมเมื่อไม่มีความดันก๊าซ..... 87
6.11	ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงลักษณะไดอะแฟรมเมื่อให้ความดันก๊าซ 110 kPa..... 87
6.12	กราฟแสดงการตอบสนองที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 89
6.13	กราฟแรงดันเอาท์พุทจากวงจรบริดจ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 90
6.14	กราฟแสดงค่าความต้านทานเมื่อแรงดันวงจรเท่ากับ 5 V ที่เวลาต่าง ๆ..... 91
6.15	กราฟแสดงค่าความต้านทานเมื่อแรงดันวงจรเท่ากับ 1 V ที่เวลาต่าง ๆ..... 91
6.16	กราฟแรงดันไฟฟ้าจากวงจรบริดจ์ที่ความดัน 0 kPa และ 180 kPa..... 92
6.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซและเลขดิจิตอล 10 บิต..... 94
6.18	ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบการหาผลตอบสนองทางเวลา..... 95
6.19	ภาพถ่ายชุดทดสอบการหาผลตอบสนองทางเวลา..... 95
6.20	กราฟแรงดันเอาท์พุทเมื่อป้อนความดันก๊าซแบบขั้นบันได..... 96
6.21	กราฟผลตอบสนองทางเวลาเมื่อป้อนความดันก๊าซแบบขั้นบันได..... 96
6.22	กราฟผลตอบสนองทางเวลาเมื่อลดความดันก๊าซ..... 97
6.23	กราฟฮิสเตอรีซิสของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น..... 98
6.24	ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงการวัดขนาดตัวต้านทาน..... 99
6.25	ลักษณะการแบ่งตัวต้านทานตามแนวรัศมีของไดอะแฟรม..... 99
6.26	การแบ่งตัวต้านทานเพื่อคำนวณหาความต้านทานที่สร้างในงานวิจัยนี้..... 100
6.27	กราฟเปรียบเทียบค่า $\Delta R / R$ ที่ได้จากการวัดและคำนวณ..... 101
7.1	เปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับงานวิจัยอื่น ๆ..... 103

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2	ตัวต้านทานอยู่ทั่วทั้งแผ่นไดอะแฟรม.....104
7.3	การหา $\Delta R$ ตามจุดต่าง ๆ ของตัวต้านทาน โดยคิดจากระยะห่างระหว่าง ตัวต้านทานบริเวณต่าง ๆ ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม.....104
7.4	กราฟจากการคำนวณเปรียบเทียบ $\Delta R / R$ ของตัวต้านทานแบบเดิมและแบบใหม่.....105
7.5	วงจรบริดจ์เพื่อลดผลของอุณหภูมิ.....105



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	คือ ความยาวรัศมีของไดอะแฟรม
$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทาน
$A_p$	คือ พื้นที่การชุบโลหะ
$A_o$	คือ มวลอะตอม (Atomic weight) ของโลหะที่ชุบ
$ADC_{op}$	คือ เลขดิจิตอลขนาด 10 บิต
$dR$	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง
$d\rho$	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง
$D$	คือ ความแข็งเชิงคด (Flexural rigidity)
$E$	คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของวัสดุที่เป็นไดอะแฟรม
$F$	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96487 คูลอมบ์ต่อโมล
$GF$	คือ เกจเฟคเตอร์ (Gauge factor)
$h$	คือ ความหนาของไดอะแฟรม
$H$	คือ ความสูงของโลหะก่อตัวขึ้น
$I$	คือ กระแสไฟฟ้า
$J$	คือ ความหนาแน่นกระแส ( $A/cm^2$ )
$k$	คือ ค่าคงที่ของเครื่องเคลือบหมุน
$l$	คือ ความยาวของวัสดุตัวต้านทาน
$m$	คือ มวลของโลหะที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือที่หลุดออกจากขั้วบวก (g)
$M$	คือ วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
$M^{n+}$	คือ จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
$ne^-$	คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
$n_{el}$	คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
$p$	คือ อัตราส่วนของสารไวแสงที่ผสมกับสารประกอบ (%)
$P$	คือ ความดันก๊าซ (Pa)
$Q$	คือ ค่าความร้อนจุล
$R$	คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะ
$r$	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไดอะแฟรม

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$t$	คือ เวลาในการชุบโลหะ (วินาที)
$T$	คือ ความหนาหรือความสูงของตัวต้านทาน
$w$	คือ ระยะการ โกงตัวของไดอะแฟรมในแนวตั้งฉากกับระนาบ
$W$	คือ ความกว้างของตัวต้านทาน
$\alpha$	คือ Temperature Coefficient
$\varepsilon$	คือ ความเครียด
$\eta$	คือ ประสิทธิภาพในการชุบโลหะ (Plating efficiency)
$\nu$	คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุ
$\rho$	คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)
$\rho_1$	คือ ความหนาแน่นของโลหะ
$\omega$	คือ ความเร็วในการหมุนเคลือบ (rpm)



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical system : MEMS) คือ เทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่มีส่วนของไฟฟ้าและเครื่องจักรกลขนาดเล็กมากทำงานทำงานร่วมกัน มีขนาดระดับไมโครเมตร ถึงระดับมิลลิเมตร (1-1000  $\mu\text{m}$ ) สร้างโดยเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated circuits หรือ IC) องค์ประกอบของระบบกลไฟฟ้าจุลภาคแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ตัวตรวจรู้จุลภาคหรือเซนเซอร์ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่รับรู้ปริมาณทางกายภาพ และตัวขับเคลื่อนจุลภาค (Actuator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลเพื่อใช้ขับระบบทางกายภาพ อุปกรณ์มีความสามารถในการรับรู้ คำนวณประมวลผล มีแหล่งพลังงานรวมอยู่ในตัว และมีความขนาดเล็ก กระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (Microfabrication) สามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องมือควบคุม มอเตอร์ วาล์ว สวิตช์ เกียร์ ตัวตรวจรู้ชนิดต่าง ๆ เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เริ่มเข้ามามีบทบาทที่สำคัญทั้งทางด้านงานวิจัย และอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น ในการเกษตรและในทางการแพทย์ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงและสิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการดำรงความเป็นอยู่ของมนุษย์ในโลกปัจจุบัน และในปัจจุบันอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและเป็นที่นิยมนำมาใช้ และมีการพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่สามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านี้เพิ่มมากขึ้น

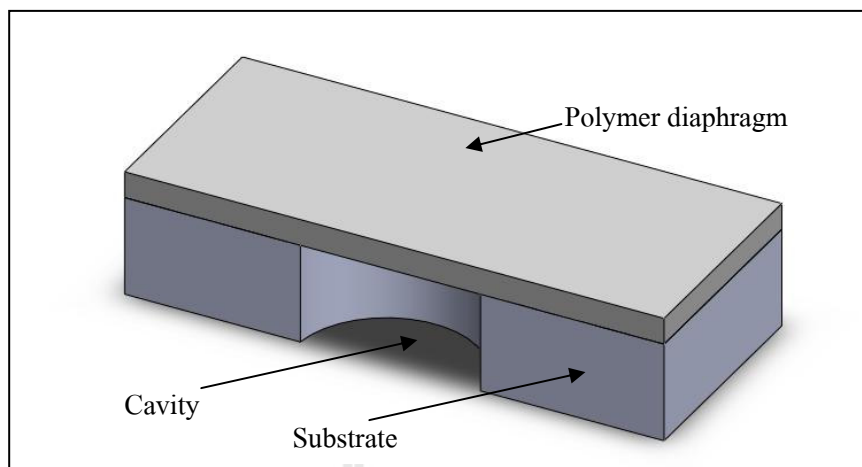
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ที่ใช้วัดความดัน ด้วยกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานตัวตรวจรู้ความดันกันอย่างกว้างขวาง เช่น อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบวัดเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม อุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบในรถยนต์ และระบบขนส่ง ตัวอย่างการใช้งานตัวตรวจรู้ความดัน เช่น ระบบในเครื่องบินจะใช้ตัวตรวจรู้ความดันเป็นตัวควบคุมส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ใช้วัดความดันน้ำมัน ความดันคอมเพรสเซอร์ ความดันของปั๊ม เป็นต้น โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันจะมีโครงสร้างเป็นช่องว่างข้างใต้แผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า ไดอะแฟรม (Diaphragm) หรือเมมเบรน (Membrane) ดังรูปที่



เทคโนโลยีของตัวตรวจรู้ความดันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาค้นคว้ารูปแบบที่หลากหลายเพื่อใช้วัดระดับความดันที่แตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันจะใช้ซิลิคอน ไดอะแฟรม อีกทั้งยังมีการใช้ไดอะแฟรมที่เป็นเซรามิก เพื่อความแข็งแรงและเหมาะกับการใช้งาน ในส่วนของไดอะแฟรม มีเทคนิคและวัสดุที่ใช้ในการสร้างหลายลักษณะ เช่น ไดอะแฟรม ที่สร้างด้วยกระบวนการอิพิแทกเซียล (Epitaxial process) การสร้างด้วยวิธี LPCVD (Low pressure chemical vapor deposition) และวิธีอื่น ๆ เป็นต้น

ตัวตรวจรู้ที่นิยมสร้างในกระบวนการระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมี 2 แบบ คือตัวตรวจรู้แบบตัวเก็บประจุ และแบบตัวต้านทาน ตัวตรวจรู้แบบตัวเก็บประจุจะใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความดันอินพุต ส่วนตัวตรวจรู้แบบตัวต้านทานจะใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินพุต ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวต้านทาน หรือที่เรียกว่า สเตรนเกจ (Strain gauge) เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันแบบนี้มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง มีขนาดเล็ก ใช้กำลังน้อย และมีประสิทธิภาพสูง ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวต้านทานนั้นใช้ค่าความต้านทานในการวัดปริมาณอินพุต ดังนั้นค่าความต้านทานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อตัวตรวจรู้ความดัน และต้องสร้างให้เหมาะสมกับตัวตรวจรู้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับงานในแต่ละชนิด เช่น ใช้การหาค่าความต้านด้วยวิธีไฟไนท์อิเลิเมนต์ โดยทำการจำลองการกระจายของแรงที่ให้กับตัวต้านทานแต่ละแบบ แล้ววัดแรงดันเอาท์พุตและความไวที่ตอบสนอง

โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแผ่นรับรู้ความดันหรือไดอะแฟรมที่เป็นพอลิเมอร์ โดยมีแนวคิดในการใช้วัดปริมาณความดันต่ำ โดยใช้โลหะแบบฟิล์ม (Metal film) เป็นตัวต้านทาน ซึ่งเมื่อให้ความดันกับตัวตรวจรู้ ไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัว ทำให้ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทานที่อยู่บนไดอะแฟรมมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน



รูปที่ 1.1 ลักษณะของไดอะแฟรม

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

สร้างตัวตรวจรู้ที่ใช้สารไวแสง SU-8 เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุตและศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่มีผลต่อการวัดความดัน

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

ตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นรับรู้ความดันสร้างจากสารไวแสง SU-8 และความดันใต้แผ่นรับรู้ความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นใช้ตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์เบอร์ MPX 5700 ของบริษัท MOTOROLA เป็นมาตรฐานการวัด

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

สร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุตผลิตจากสารไวแสง SU-8 โดยใช้หลักการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสำหรับย่านความดันต่ำในช่วงไม่เกิน 20 psi เทียบกับบรรยากาศ และทำการสอบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สำรวจและศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- ศึกษากระบวนการผลิตโครงสร้างระบบกลไฟฟ้าจุลภาค
- ออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันและวงจรควบคุมเพื่อใช้ในการวัดผล
- ทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเพื่อปรับปรุงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน
- วิเคราะห์ สรุปผลและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการสร้างและทดสอบการทำงาน

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วยพอลิเมอร์เป็นไดอะแฟรมรับปริมาณอินพุตและตัวตรวจรู้นี้สามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการวัดปริมาณอื่น ๆ

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

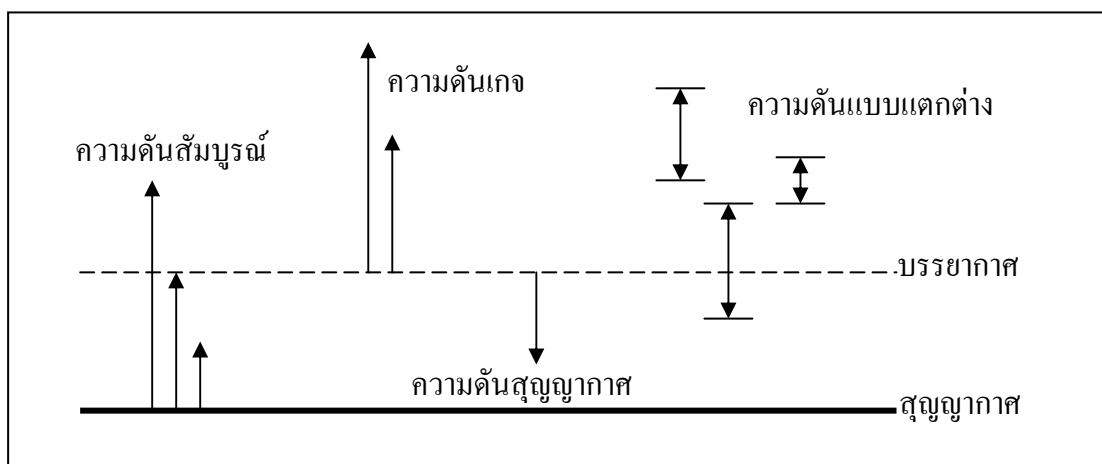
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหา 7 บท ได้แก่ บทที่ 1 บทนำ ได้กล่าวถึงความ เป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างตัวตรวจรู้ความดันชนิดต่าง ๆ ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค บทที่ 3 ทฤษฎีและการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน บทที่ 4 กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้า จุลภาค ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเช่น กระบวนการลิโธกราฟี กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และ กระบวนการเตรียมสารไวแสง บทที่ 5 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน บทที่ 6 การทดสอบ และผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน บทที่ 7 เป็นบทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความดัน

ความดันเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับระบบในอุตสาหกรรม ในการวัดและควบคุมค่าของความดันสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวัดที่เป็นอุปกรณ์ตัวตรวจรู้ความดัน โดยโครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพของอุปกรณ์แต่ละตัว จะพิจารณาจากการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญดังนี้คือ ย่านวัดความดัน (Range of pressure) รูปแบบหรือชนิดของความดัน (Type of pressure) ตลอดจนตัวกลางที่ทำให้เกิดค่าความดันเช่น ความดันที่เกิดจากของเหลว ก๊าซ อากาศ เป็นต้น อีกทั้งยังต้องพิจารณาให้ลึกลงไปถึงลักษณะชนิดของของเหลว และชนิดของก๊าซอีกด้วย ชนิดของความดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก โดย วิศรุต ศรีรัตนะ (2550) ได้แก่ ความดันแบบเกจ (Gauge pressure) จุดเริ่มต้นของความดันเกจอยู่ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ซึ่งเทียบกับระดับความสูงของน้ำทะเล โดยความดันเกจจะสูงขึ้นไปจากความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็น bar pa psi หรือ  $\text{kg/cm}^2$  ซึ่งตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจจะอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ที่ความดันบรรยากาศ ความดันแบบสุญญากาศ (Vacuum pressure) จุดเริ่มต้นของการวัดความดันมีจุดเดียวกับการวัดความดันแบบความดันเกจ คือเริ่มที่ระดับน้ำทะเลหรือที่ความดันบรรยากาศ แต่มีทิศทางที่ตรงกันข้ามคือสุญญากาศจะต่ำลงมาจากความดันบรรยากาศ ความดันแบบสัมบูรณ์ (Absolute pressure) ความดันแบบสัมบูรณ์เป็นการวัดเทียบกับความดันที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (Perfect vacuum) ความดันบรรยากาศมีค่า 101.325 kPa หรือ 14.7 psi ที่ความสูงระดับน้ำทะเลซึ่งเทียบกับความดันมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งความดันสัมบูรณ์คือค่าความดันจริงทั้งหมด ของการรวมค่าความดันเกจและค่าความดันบรรยากาศ และความดันแบบแตกต่าง (Differential pressure) การวัดความดันแบบแตกต่างนี้จะใช้ในการอ่านค่าผลต่างของความดัน 2 ค่า ลักษณะการวัดความดันในรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1

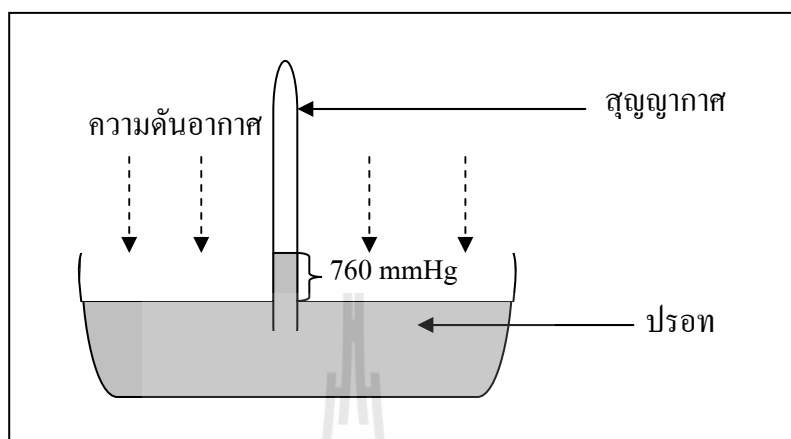


รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบการวัดความดันลักษณะต่าง ๆ

## 2.2 การวัดความดันและชนิดของตัวตรวจรู้ความดัน

นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี Evangelista Torricelli (1644) ได้ทดลองนำหลอดขนาด 1 เมตร ที่ปลายด้านหนึ่งได้ปิดผนึกอย่างแน่นหนา โดยนำหลอดนี้ไปจุ่มลงในอ่างปรอทในแนวตั้งทำให้ระดับของปรอทที่อยู่ในหลอดเท่ากับ 760 มิลลิเมตร และมีที่ว่างด้านบนเป็นสุญญากาศ ลักษณะของหลอดปรอทแสดงดังรูปที่ 2.2 ทอริเชลลิได้บันทึกปรากฏการณ์นี้ไว้ว่า เป็นแรงบนพื้นผิวของโลก แต่ไม่ทราบสาเหตุที่มาของแรงนี้ และกล่าวสรุปว่า ช่องว่างที่บริเวณด้านบนของหลอดนั้นเป็นที่ว่างซึ่งเรียกว่า สุญญากาศ (Vacuum) ต่อมา Pascal (1648) นักปรัชญา นักฟิสิกส์ และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้ทราบถึงการทดลองของทอริเชลลิ ทำให้เชื่อว่าแรงที่พบนั้นเป็นแรงของอากาศที่อยู่ด้านบนบริเวณเหนืออ่างปรอททำให้ปรอทมีระดับสูงขึ้นในหลอดทดลอง และได้คาดการณ์ว่าที่ความสูงเพิ่มขึ้นระดับของของเหลวจะลดลง และจากการทดลองของปาสกาล ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของอากาศที่เรียกว่า ความดัน จากนั้น Gottfried (1700) ได้คิดค้นวิธีทำมาตรวัดความดัน (Barometer) ที่ไม่ใช่ของเหลว แต่ใช้โลหะและสปริงแทน ซึ่งเรียกว่า บารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ (Aneroid barometer) จนกระทั่ง Lucien (1843) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ประดิษฐ์คิดค้นสร้างบารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ขึ้นมาใช้จริงและเป็นที่มาของหลอดบัวร์ดอง (Bourdon tube) ในปี ค.ศ. 1849 ซึ่งเหมาะกับการวัดความดันที่สูง ๆ ต่อมาปี ค.ศ. 1856 ได้มีการค้นพบการเปลี่ยนค่าความดันทานของโลหะเนื่องจากแรงทางกลโดย William Thomson (Lord Kelvin) และในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการสร้างทรานสดิวเซอร์ความดันตัวแรก โดยอาศัยกลไกของการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรม และหลอดบัวร์ดอง ต่อมา Simmons and Ruge (1938)

ได้ประดิษฐ์สเตรนเกจ (Strain gauge) ขึ้นซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าความเครียดในวัสดุเป็นค่าความต้านทานได้



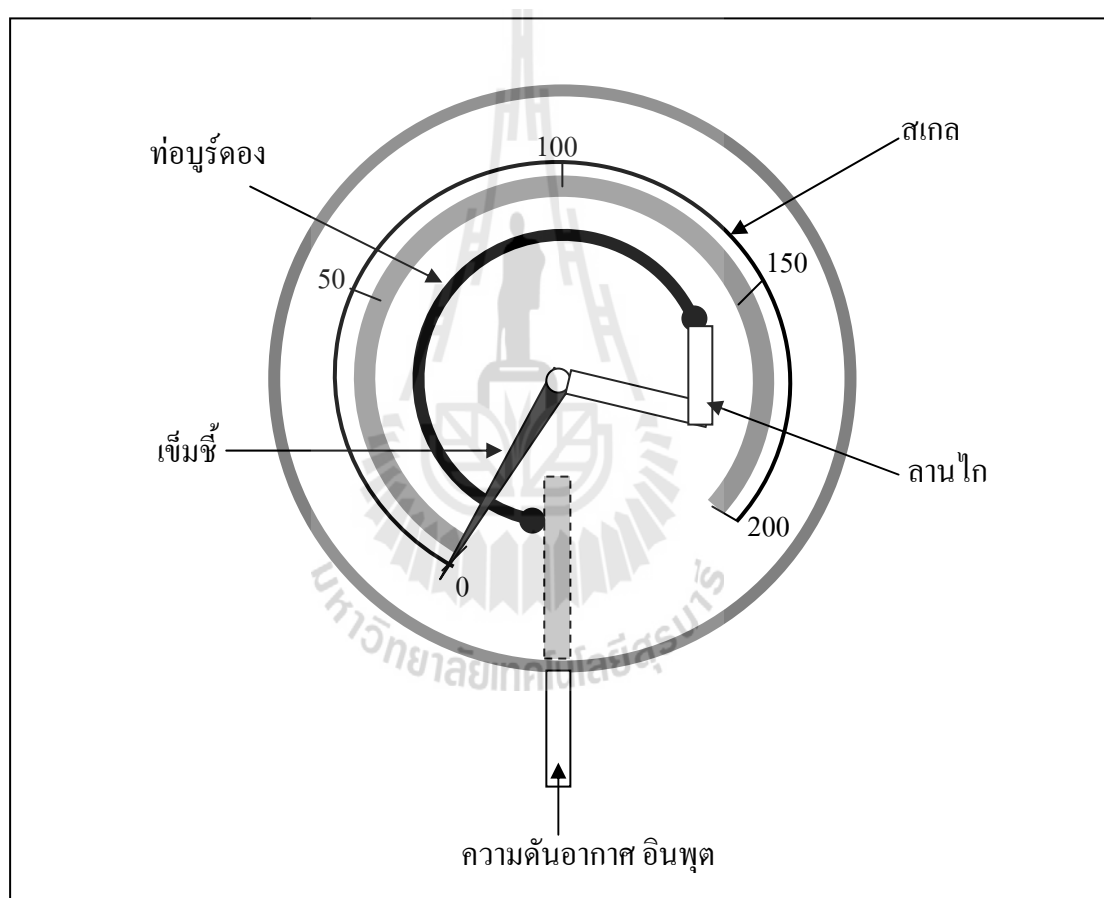
รูปที่ 2.2 อ่างปรอท

นักวิจัย Smith (1954) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ เพียโซรีซิสทีฟ ในซิลิคอนและเจอร์เมเนียม ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวัสดุเมื่อมีความเครียด (Strain) ทางกลมากระทำ และได้ทำการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ ในปี ค.ศ. 1958 โดยบริษัท Kulite Semiconductor Products Honeywell และ Microsystem Kulite (1961) ได้นำซิลิคอนสเตรนเกจซึ่งเป็นตัวต้านทานสร้างด้วยวิธีการการแพร่กระจาย (Diffused) ไว้บนซิลิคอนแบบบางที่ทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ต่อมาปี ค.ศ. 1966 บริษัท Honeywell พัฒนาวิธีการสร้างไดอะแฟรมซิลิคอนโดยการสกัดซิลิคอน (Si etching) เพื่อให้ซิลิคอนเกิดช่องว่าง (Cavity) เพื่อทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ปี ค.ศ. 1971 ตัวตรวจรู้ความดันที่ให้สัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิทัลได้ถูกออกแบบและทดสอบที่สถาบัน CWRU ด้วยซิลิคอนที่มีขนาดเล็กและตัวต้านทานแบบบริดจ์ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ในระหว่างการทดสอบและประเมินผลพบว่าบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจรู้ด้วย ซึ่งตัวตรวจรู้แบบเพียโซรีซิสทีฟ มีความไวต่อสิ่งรบกวนมาก ทำให้ไม่มีความถูกต้อง สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ทั้งหลาย เพื่อให้ได้ความไวและความเสถียรภาพที่ดีขึ้น ได้มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันความจุไฟฟ้าขึ้นในปี ค.ศ. 1977 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความจุไฟฟ้า (Capacitive pressure sensor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford university) และในเวลาอีกไม่นานที่สถาบัน CWRU ตัวตรวจรู้ความดันได้มี

การพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยใช้ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถทำซ้ำได้ มีความน่าเชื่อถือ และให้ผลผลิตสูง

ในปัจจุบันตัวตรวจรู้ความดันมีมากมายหลากหลายชนิดแตกต่างกันไป เพราะเมื่อทำการวัดความดันเนื่องจากของเหลวแล้วจะได้ค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ แต่เมื่อวัดความดันก๊าซแล้วพบว่าอาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าความดันบรรยากาศ ซึ่งมีย่านในการวัดที่แตกต่างกัน รวมทั้งคุณสมบัติของของเหลวและก๊าซอีกด้วย จึงทำให้ตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้งานทั่วไปสามารถทำการตรวจวัดได้เพียงย่านใดย่านหนึ่งเท่านั้น ชนิดตัวตรวจรู้มีดังต่อไปนี้ มาโนมิเตอร์ของเหลว (Liquid manometer) ใช้ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในท่อที่มีของเหลวบรรจุอยู่ ดังนั้นมาโนมิเตอร์จึงเป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบผลต่าง โดยจะทำการตรวจสอบผลต่างระหว่างความดันที่ต้องการวัดกับความดันอ้างอิง ซึ่งปกติความดันที่ใช้อ้างอิงคือ ความดันบรรยากาศ ตัวตรวจรู้ความดันแบบยืดหยุ่น (Elastic pressure sensor) การตรวจวัดความดันจะอาศัยคุณสมบัติการทำงานของแผ่นไดอะแฟรมหรือเมมเบรน ที่มีความยืดหยุ่นไปตามแรงจากความดันอากาศที่มากระทำกับตัวตรวจรู้ เช่น เกจความดันแบบท่อบูร์ดอง (Bourdon tube pressure gauge) ส่วนของท่อบูร์ดองจะมาจากวัสดุจำพวกโลหะผสม เช่น เหล็กสแตนเลส หรือทองเหลือง เป็นต้น ลักษณะเป็นท่อที่มีรูปทรงหน้าตัดเป็นวงรีหรือเป็นวงไข่ โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อจะถูกปิดไว้ รูปแบบของท่อบูร์ดองมีหลากหลายลักษณะ เช่น ขดเป็นวงกันหอย ขดเป็นวงและขดเป็นเกลียว เป็นต้น หลักการทำงานของท่อบูร์ดอง คือ หากมีการเพิ่มความดันอากาศเข้าไปในท่อที่เปิดอยู่ จะทำให้ท่อบูร์ดองมีการยืดตัวขึ้นมีค่าเป็นสัดส่วนกับความดันที่เพิ่มเข้าไป โดยความดันบรรยากาศภายนอกท่อยังเป็นความดันบรรยากาศ และเมื่อความดันลดลงจะทำให้ท่อหดตัวลงกลับสู่สภาพเดิม ลักษณะของท่อบูร์ดองแสดงดังรูปที่ 2.3 เบลโลว์ (Bellow) เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบผลต่างอีกชนิดหนึ่งที่ใช้วัดในย่านต่ำ ๆ ในช่วง 0-1 kPa ส่วนมากจะใช้งานควบคุมสัญญาณทางด้านนิวเมติก โครงสร้างของเบลโลว์จะมีลักษณะคล้ายกับลูกฟูกที่ภายในกลวงสามารถยืดหยุ่นตัวได้ หลักการทำงานโดยทั่วไปจะคล้ายคลึงกับเกจวัดความดันแบบท่อบูร์ดอง คือ ปลายด้านหนึ่งปิด ส่วนปลายอีกด้านใช้สำหรับป้อนความดันที่ต้องการวัด เมื่อความดันภายในเบลโลว์สูงขึ้นจะทำให้เบลโลว์เกิดการยืดตัวออกในทิศทางเดียวกับความดันที่ป้อนเข้าไป ตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric pressure sensor) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันทำให้ไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวขึ้น และส่งแรงไปกระทำกับผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่เชื่อมต่อกัน ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้น โดยมีสัดส่วนแปรไปตามค่าของแรงที่มากระทำหรือค่าความดัน ตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive pressure sensor) ลักษณะของตัวตรวจรู้นี้จะใช้แผ่นไดอะแฟรมซิลิกอนที่มีตัวต้านทานแบบเพียโซรีซิสทีฟอยู่ด้านบน เมื่อมีความดันมากระทำแผ่นไดอะแฟรม จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นบนตัวต้านทานแบบเพียโซรีซิสทีฟ และเป็นผลให้ค่าความ

ด้านทานภายในเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของความเครียดที่เกิดขึ้น หรือแปรไปตามความดันที่มากระทำนั่นเอง ตัวตรวจรู้ความดันแบบค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive pressure sensor) อาศัยการทำงาน of ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในการตรวจวัดระยะขจัดที่เกิดขึ้นของแผ่นไดอะแฟรม หลักการตรวจวัดความดันคือ เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตตัวนำกับแผ่นไดอะแฟรมเป็นตัวแปรค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อมีความดันมากระทำจะทำให้ระยะห่างของไดอะแฟรมและแผ่นเพลตเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตาม และบารอมิเตอร์ (Barometer) เป็นตัวตรวจรู้ความดันบรรยากาศ ใช้ในการพยากรณ์อากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา



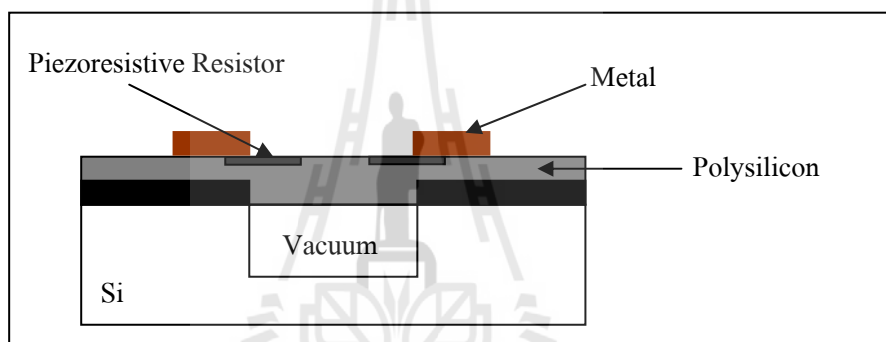
รูปที่ 2.3 ท่อบูร์ดอง

### 2.3 การสร้างตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการสร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น ได้มีการจำลองความไวและความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟโดย Lin (1999) ซึ่งใช้เทคโนโลยี Surface micromachined



สร้างตัวตรวจรู้แบบความดันสัมบูรณ์ โดยวัดเทียบกับช่องว่างที่เป็นสุญญากาศ สร้างขึ้นด้วยกระบวนการ Low pressure chemical vapor deposition ไดอะแฟรมเป็น โพลีซิลิกอน ตัวต้านทานเป็นโบรอนสร้างด้วยวิธีการอิมพลาน (Implanted) ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 2.4 มีความไวเท่ากับ  $0.24 \text{ mV/V}/(\text{lbf/in})$  ไดอะแฟรมมีลักษณะสี่เหลี่ยม มีความหนาเท่ากับ  $2 \text{ }\mu\text{m}$  และยังพบว่าความไวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นไดอะแฟรมลดลง เมื่อทำการจำลองและสร้างตัวตรวจรู้ขึ้นจริงแล้ว ตัวตรวจรู้ที่ให้ค่าที่ดีที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น (Linearity error) เท่ากับ  $\pm 0.1\%$  ค่าฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)  $0.02\%$  FSS ที่ความหนาของไดอะแฟรมเท่ากับ  $2.2 \text{ }\mu\text{m}$  แต่ถึงแม้ไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อย ๆ จะให้ความไวที่สูงแล้ว แต่ก็ยังให้ค่าฮิสเตอร์รีซิสที่สูงด้วยเช่นกันและยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความไว

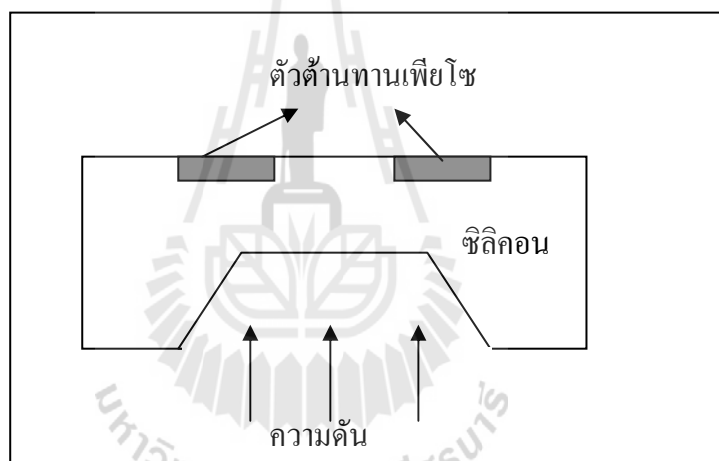


รูปที่ 2.4 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Lin (1999)

Armbruster (2003) สร้างตรวจรู้ความดัน โดยใช้ซิลิกอน เทคนิคการสร้างไดอะแฟรมคือกระบวนการอีพิแทกเซียล (Epitaxial process) ซิลิกอนไดอะแฟรมมีขนาด  $550 \times 550 \times 9 \text{ }\mu\text{m}$  ช่องว่างที่ขังอากาศ (Cavity) เท่ากับ  $4 \text{ }\mu\text{m}$  เมื่อทำการทดสอบ ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นดีมาก ให้สัญญาณเอาต์พุตระหว่างความดัน  $200\text{-}1000 \text{ mbar}$  และให้ค่าคงที่ตลอดที่อุณหภูมิ  $-40\text{-}125^\circ\text{C}$  Janovsky (2003) ใช้เซรามิกเป็นไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้และเซอร์เมท (CERMET) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างเซรามิกและโลหะ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์หรืออื่น ๆ ตัวตรวจรู้นี้เป็นแบบวัดความดันสัมบูรณ์ สามารถวัดความดันในช่วง  $1\text{-}2 \text{ bar}$  และที่อุณหภูมิระหว่าง  $-30\text{-}120^\circ\text{C}$  ข้อดีของตัวตรวจรู้แบบเซรามิกคือมีความแข็งแรงกว่าแบบอื่น

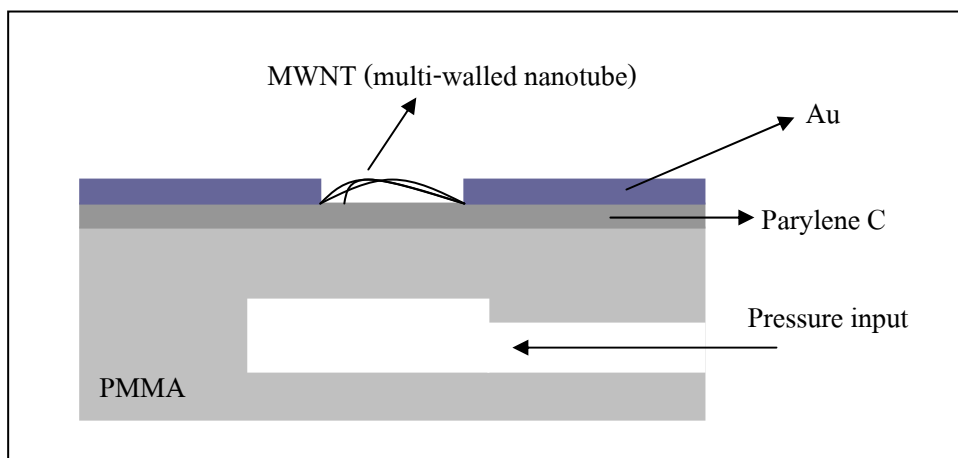
Mohan (2004) ได้ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟที่สามารถนำไปใช้งานทางทะเลต่าง ๆ เช่น วัดคลื่น น้ำขึ้นน้ำลง ตรวจสอบสึนามิ แทนวัดระดับ วัดความลึกของน้ำและอื่น ๆ ตัวตรวจรู้มีไดอะแฟรมเป็นซิลิกอนหนา  $45 \text{ }\mu\text{m}$  ตัวต้านทานเพียโซสร้างด้วย

ขบวนการแพร่ (Diffusion) โบรอน โครงสร้างของตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยชุดทดสอบใช้น้ำทะเล ทดสอบโดยการเติมน้ำทะเลลงในกระบอกทดสอบแล้วดูความดันลงระหว่าง 0-1500 psi เมื่อทำการทดสอบเสร็จนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ได้ภาพที่แสดงว่าไม่มีรอยของน้ำที่เข้าไปในบรรจุภัณฑ์ (Package) หรือความเสียหายบริเวณที่เชื่อมต่อ Cermen (2005) นำเสนอเทคนิคกระบวนการสร้างโดยใช้ คาร์บอนนาโนทิว (CNTs) ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดันบนไคอะแฟรม PMMA โดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานระหว่าง Gold wire และ CNT-gold electrodes ได้ผลคือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ CNT-electrodes จะเปลี่ยนแปลงมากกว่าแบบ Gold wire เมื่อให้ความดันตั้งแต่ 0-100 kPa ที่ไคอะแฟรมเดียวกัน และจำลองการโก่งตัวของไคอะแฟรม PMMA โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ลักษณะตัวตรวจรู้ของงานวิจัยดังรูปที่ 2.6

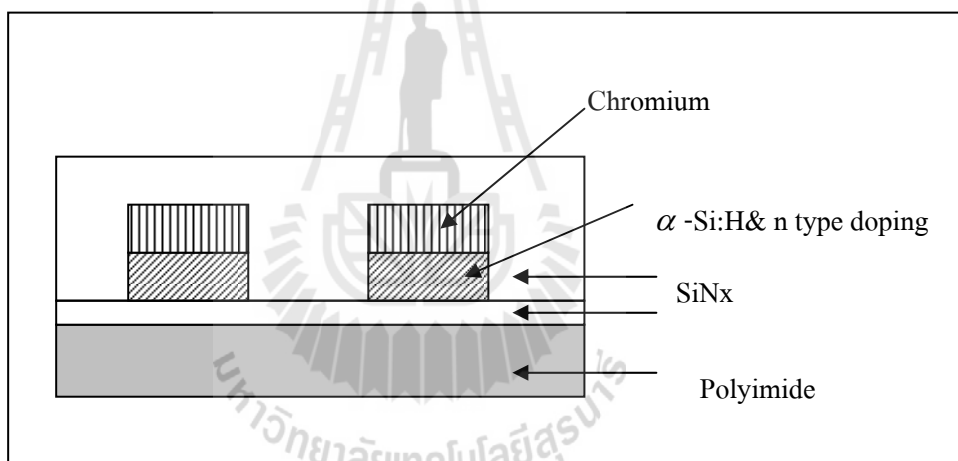


รูปที่ 2.5 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Mohan (2004)

Pramanik (2005) ได้ใช้ซิลิคอนพรุน (Porous silicon) เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ มีความไว 27.5 mV/V/bar ความละเอียด (Resolution) 0.01 bar สามารถวัดความดันในช่วง 0-1 bar ที่อุณหภูมิ 25-80°C และ Lim (2005) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้ไคอะแฟรมที่เป็น Polyimide ทำการวัดความดันได้ช่วง 0-2 psi มีวิธีการสร้างคือใช้วัสดุฐานเป็น polyimide ที่มีความหนา 51  $\mu\text{m}$  ทับด้วย SiNx หนา 380 nm  $\alpha$ -Si : H หนา 200 nm และ n-type doped หนา 65 nm จากนั้นทับด้วยโครเมียม หนา 100 nm และชั้นสุดท้ายทับด้วย SiNx หนา 350 nm แสดงดังรูปที่ 2.7



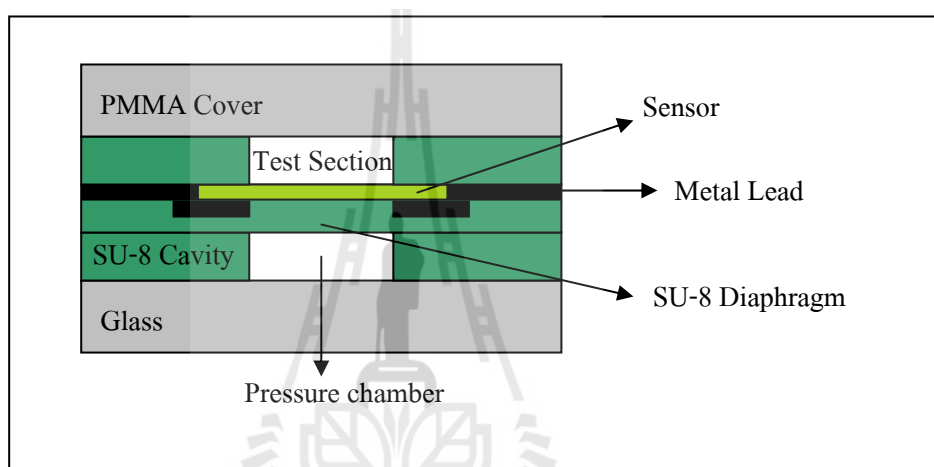
รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Cermen (2005)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Lim (2005)

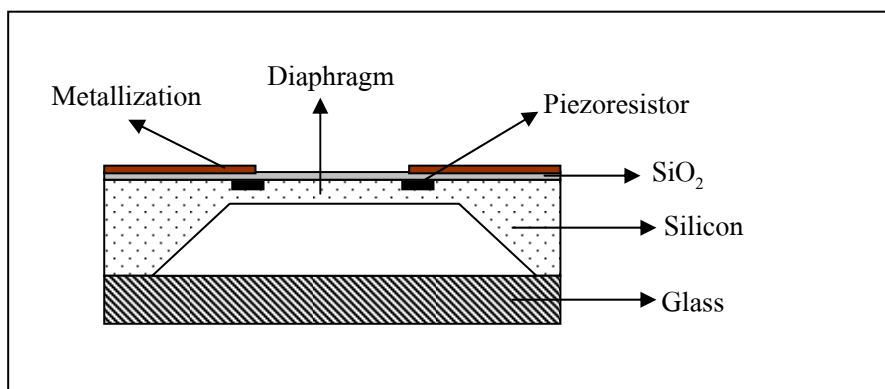
Firtat (2007) นำเสนอตัวตรวจรู้ความดันที่เป็นซิลิกอนไดอะแฟรมแบบบาง และมีตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีฟเป็นโบรอนด้วยขบวนการอิมพลานเตชัน (Implantation) โดยสามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-40 mbar โดยค่าความต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ 675  $\Omega$  และเมื่อให้ความดันกับตัวตรวจรู้ ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลง 1  $\Omega$  หรือคิดเป็น 0.14% ทำการออกแบบและจำลองผลด้วยโปรแกรม CoventorWare Version 2006 ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งค่าที่ได้แสดงว่าตัวตรวจรู้นี้มีผลตอบสนองที่ดีสำหรับการวัดค่าความดันต่ำ Ko (2007) สร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรม และสร้างตัว

ต้านทานเพียโซรีซิสทีฟด้วยขบวนการอิมพลานโดยใช้โบรอนเป็นตัวต้านทานมีค่าความต้านทาน 57 k $\Omega$  เมื่อทำการทดสอบไคอะแพรม SU-8 ตัวตรวจรู้ให้ความไวที่สูงกว่าตัวตรวจรู้ที่เป็นซิลิกอน เนื่องจากมีค่ามอดูลัสของยังที่น้อยกว่า และให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่า และผลของอุณหภูมิมีค่าคงที่ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 2.8 Stoetaler (2007) สร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยสแตนเลส โดยมีตัวต้านทานสเตรนเกจแบบฟิล์มบางโลหะ (Metal thin film) ที่สร้างด้วย NiCr(Si) จากการสปัตเตอริง ข้อดีของฟิล์มบางโลหะคือให้ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นและไม่มีผลของอุณหภูมิ ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างนี้สามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-180 MPa



รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Ko (2007)

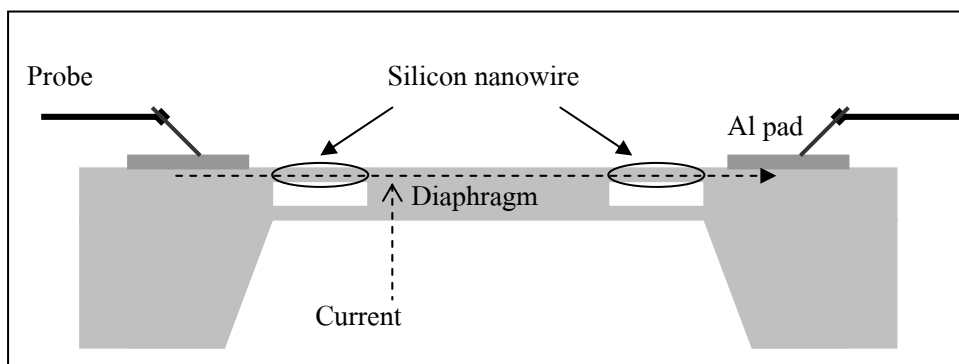
Chen (2008) ได้ศึกษาถึงการออกแบบโครงสร้างและความเหมาะสมของตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟ เพื่อปรับปรุงความไวและความเป็นเชิงเส้นให้ดีขึ้น ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ เช่น ตำแหน่งและจำนวนขดของตัวต้านทาน ตัวตรวจรู้ที่สร้างด้วยกระบวนการ Bulk micromachined ไคอะแพรมขนาด  $1150 \times 1150 \times 30 \mu\text{m}$  เมื่อทำการทดสอบได้ความไว 2.3 mV/V/10kPa ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเท่ากับ 0.57% ความคลาดเคลื่อนฮิสเตอร์รีซิสเท่ากับ 0.04% ความคลาดเคลื่อนในการทำซ้ำ (Repetitive error) เท่ากับ 0.15% ตัวตรวจรู้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Chen (2008)

Kim (2009) เสนอตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟ ที่ปรับปรุงความไวโดยใช้ Silicon nanowire โดยการสร้าง Silicon nanowire ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $250 \times 250 \text{ nm}^2$  เชื่อมต่อเป็นสะพานระหว่าง Bossed silicon diaphragm และบริเวณขอบของฐานซิลิกอน กระบวนการนี้สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟที่มีค่าความไว  $337.5 \text{ mV/V.MPa}$  และตอบสนองที่ช่วง 150 ถึง 300 kPa ขนาดของตัวตรวจรูน้อยกว่า  $1 \text{ mm}^2$  โดยไดอะแฟรมมีขนาด  $200 \times 200 \text{ }\mu\text{m}^2$  โครงสร้างเป็นดังรูปที่ 2.10 เมื่อให้ความดันบริเวณไดอะแฟรม Silicon nanowire จะได้รับความเครียดทำให้ค่าความต้านทานของ Silicon nanowire เปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความไวของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ คือแบบ Silicon nanowire มีความไวเท่ากับ  $337.5 \text{ mV/V.MPa}$  และแบบ Silicon wire มีความไว  $38.1 \text{ mV/V.MPa}$  และแบบ Bulk silicon มีความไว  $8.5 \text{ mV/V.MPa}$

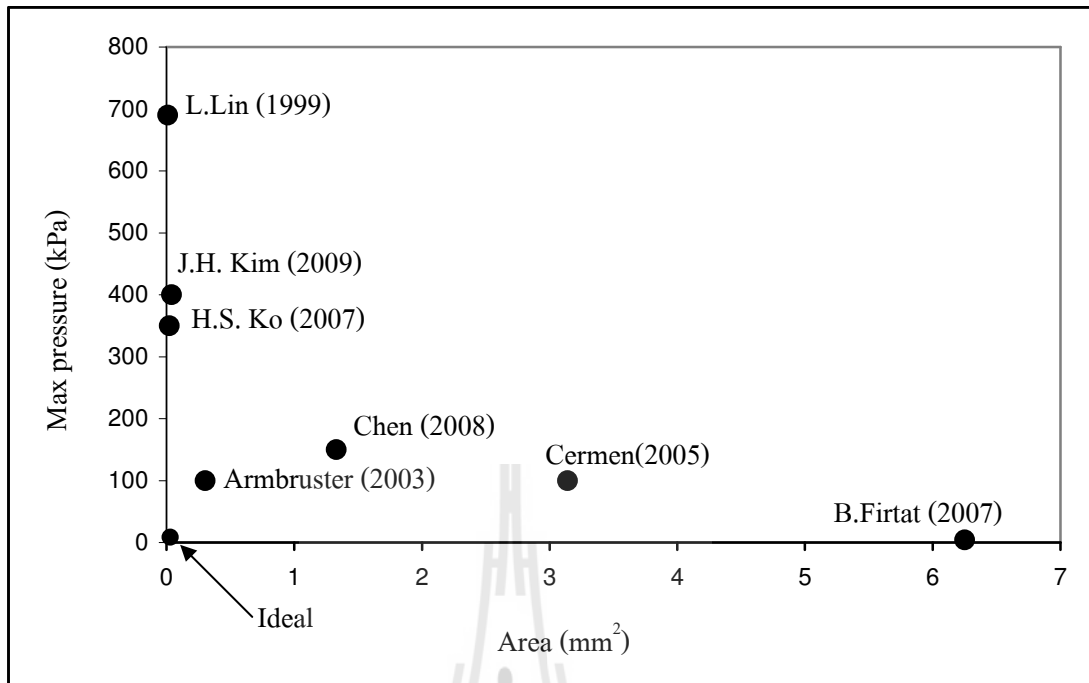
จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้กล่าวมา นำมาสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 และนำไปวาดกราฟเปรียบเทียบพื้นที่ไดอะแฟรมและความดันมากที่สุดในการวัดของแต่ละงานวิจัย ซึ่งตัวตรวจรู้ความดันที่ต้องวัดความดันต่ำนั้นจะมีขนาดไดอะแฟรมที่ใหญ่ เพื่อให้เกิดไดอะแฟรมโก่งตัวได้มากที่ความดันต่ำและเพื่อให้เห็นพัฒนาการของตัวตรวจรู้ความดันได้ชัดเจนยิ่งขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.11 จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษานั้นกระบวนการที่ใช้สร้างตัวตรวจรู้ความดันในนั้นมีราคาสูงและยังเป็นกระบวนการที่ทำที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีราคาต่ำและใช้กระบวนการที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก



รูปที่ 2.10 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันของ Kim (2009)

ตารางที่ 2.1 สรุปการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ปี	นักวิจัย	ชนิด ไดอะแฟรม	ขนาดพื้นที่ ไดอะแฟรม (mm <sup>2</sup> )	ความหนา ไดอะแฟรม (μm)	ความดัน สูงสุด (kPa)
1999	Lin et al.,	Si	0.01	2	690
2003	Armbruster et al.,	Si	0.30	9	100
2005	Cermen et al.,	PMMA	3.14	300	100
2005	Lim et al.,	polyimide	-	51	0.69
2007	Firtat et al.,	Si	6.25	1000	4
2007	Ko et al.,	SU-8	0.02	9	350
2007	Stoetzler et al.,	Stainless	-	-	180000
2008	Chen et al.,	Si	1.32	30	150
2009	Kim et al.,	Si	0.04	20	400



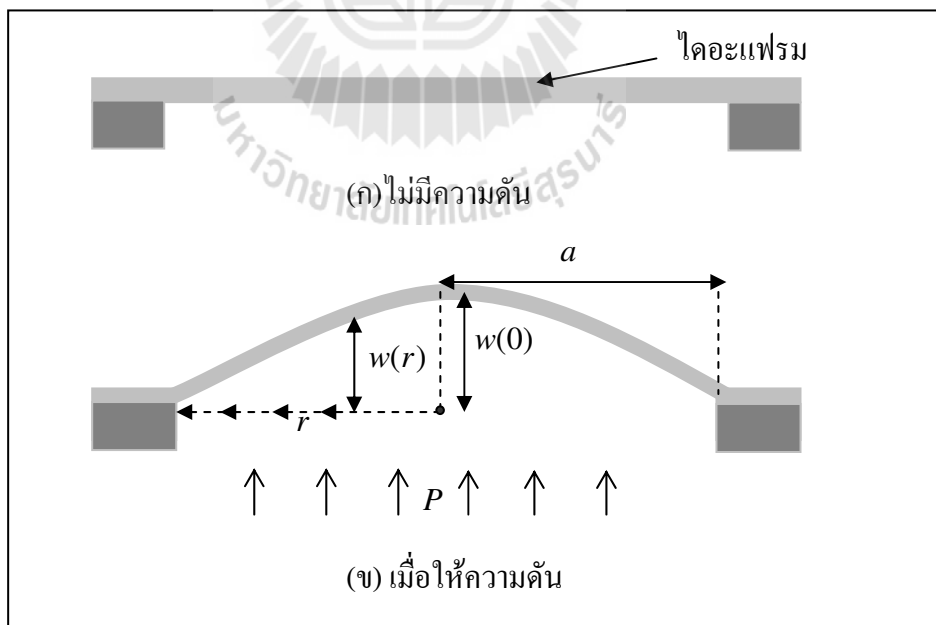
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดไดอะแฟรมและความดันสูงสุดในงานวิจัยต่าง ๆ



### บทที่ 3

#### ทฤษฎีและการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน

ตัวตรวจรู้ความดัน คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันอากาศหรือความดันก๊าซ หลักการวัดความดันคือใช้การเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือคุณสมบัติเมื่อมีความดันอากาศหรือความดันก๊าซมากระทำ ลักษณะที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การบิดงอ การโค้งตัว การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น ตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบสเตรนเกจ ซึ่งใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันคือ มีตัวต้านทานอยู่บริเวณด้านบนของไดอะแฟรม ตัวต้านทานสเตรนเกจนี้สร้างด้วยฟิล์มโลหะ (Metal film) เมื่อให้ความดันกับตัวตรวจรู้ ความดันจะทำให้ไดอะแฟรมเกิดการโค้งตัวขึ้น ซึ่งทำให้ตัวต้านทานที่อยู่บริเวณด้านบนมีการเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ในบทนี้จะทำการจำลองผลเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของตัวตรวจรู้ความดัน โดยแบ่งหัวข้อในการจำลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ลักษณะการ โค้งตัวของไดอะแฟรม



### 3.1 การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน

ไดอะแฟรมที่ใช้จำลองผลทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม พื้นผิวมีความเรียบ มีความหนาเท่ากันทั้งแผ่นและเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน มีความหนาไม่มาก (ความหนาไม่เกิน 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของไดอะแฟรม) มีความยืดหยุ่นไม่มาก การให้ความดันจะให้ที่ระนาบของแผ่นไดอะแฟรมทั้งแผ่น แผ่นไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวขึ้นดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะสมมาตรกัน การโก่งตัวของไดอะแฟรมเนื่องจากความดันก๊าซอธิบายได้ตามสมการที่ (3.1) ที่มา Timoshenko (1959)

$$w(r) = \frac{Pa^4}{64D} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (3.1)$$

โดยที่  $w$  คือ ระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมในแนวตั้งฉากกับระนาบ

$P$  คือ ความดันก๊าซ (Pa)

$a$  คือ ความยาวรัศมีของไดอะแฟรม

$r$  คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไดอะแฟรม

$D$  คือ ความแข็งเชิงคด (Flexural rigidity) กำหนดได้โดยสมการที่ (3.2)

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.2)$$

โดยที่  $E$  คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของวัสดุที่เป็นไดอะแฟรม

$h$  คือ ความหนาของไดอะแฟรม

$\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุที่เป็นไดอะแฟรม

เมื่อนำค่า  $D$  จากสมการที่ (3.2) มาแทนในสมการที่ (3.1) จะได้ดังสมการที่ (3.3)

$$w(r) = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Eh^3} (a^2 - r^2)^2 \quad (3.3)$$

โดยทั่วไประยะการโก่งตัวของแผ่นไดอะแฟรมจะมีค่ามากที่สุด ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นไดอะแฟรม นั่นคือค่า  $r=0$  และบริเวณห่างจากจุดศูนย์กลางออกไปทั้งสองข้างลักษณะสมมาตรกัน

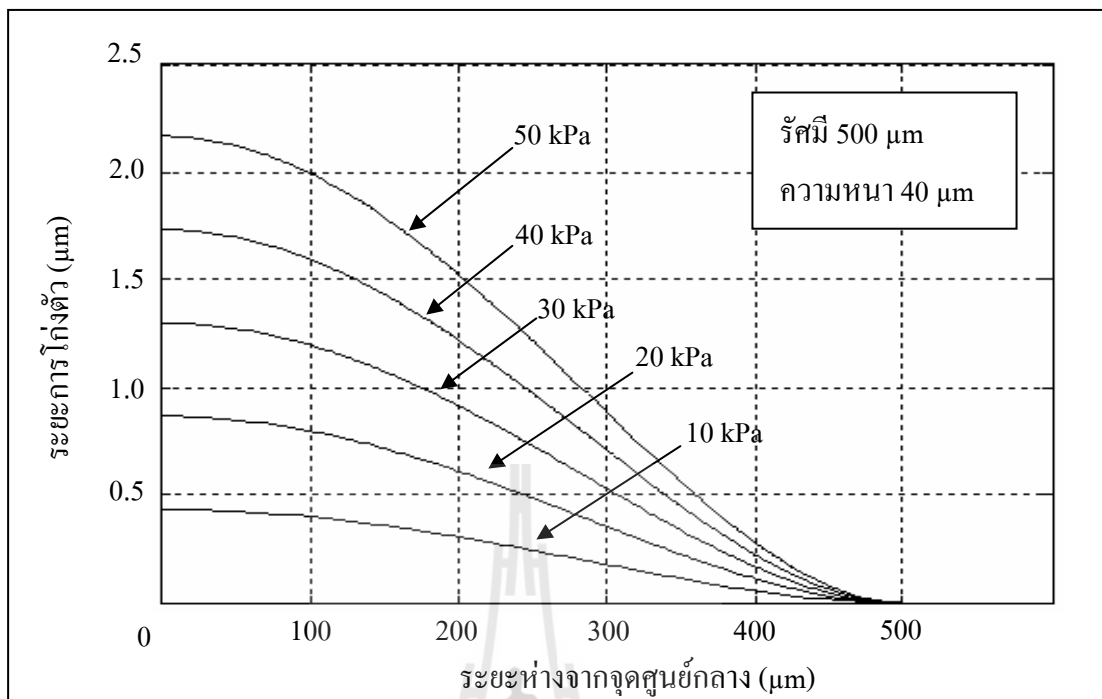
จากสมการที่ (3.3) ตัวแปรที่มีผลต่อการโก่งตัวของไดอะแฟรมคือ ความดัน ( $P$ ) ความยาวรัศมีของไดอะแฟรม ( $a$ ) และความหนาของไดอะแฟรม ( $h$ ) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้พอลิเมอร์เป็นตัวรับปริมาณอินพุตจึงเลือกสารไวแสงชนิดลบหรือ SU-8 ใช้เป็นวัสดุในการสร้างไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค จึงได้ทำการจำลองเพื่อหาขนาดของไดอะแฟรมที่เป็นสารไวแสง SU-8 ให้เหมาะสมกับการใช้วัดความดันซึ่ง SU-8 มีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 4.02 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.22 ที่มา Hsu, Tai-Ran (2008) โดยแบ่งพิจารณาตามหัวข้อต่อไปนี้

### 3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผลการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้ศึกษาผลของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ค่าความดันต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งพิจารณาไดอะแฟรมเพียงครึ่งส่วนได้ เนื่องจากมีลักษณะสมมาตรกันทั้งแผ่นแบบจำลองได้ทำการจำลองโดยกำหนดให้ความยาวรัศมีของไดอะแฟรมมีค่า 500  $\mu\text{m}$  และความหนาของไดอะแฟรมเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  จำลองที่ความดันตั้งแต่ 10-130 kPa ทำการคำนวณตามสมการที่ (3.1) ได้ค่าดังตารางที่ 3.1 และวาดกราฟแสดงการโก่งตัวได้ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

ความดันก๊าซ (kPa)	ระยะโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )
10	0.43
20	0.87
30	1.30
40	1.73
50	2.17
60	2.60
70	3.03
80	3.47
90	3.90
100	4.33
110	4.77
120	5.20
130	5.63

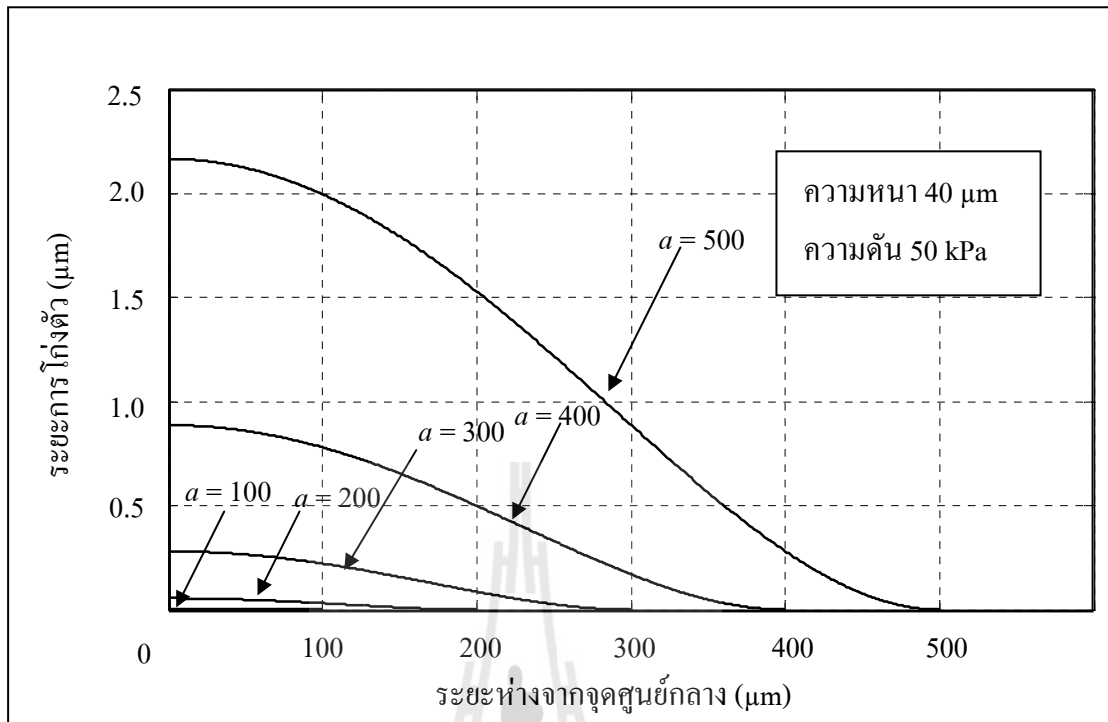


รูปที่ 3.2 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่าง ๆ

จากผลการศึกษาการหาระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมคือเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ไดอะแฟรมมีการโค้งตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน และระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น

### 3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความยาวรัศมีของไดอะแฟรม

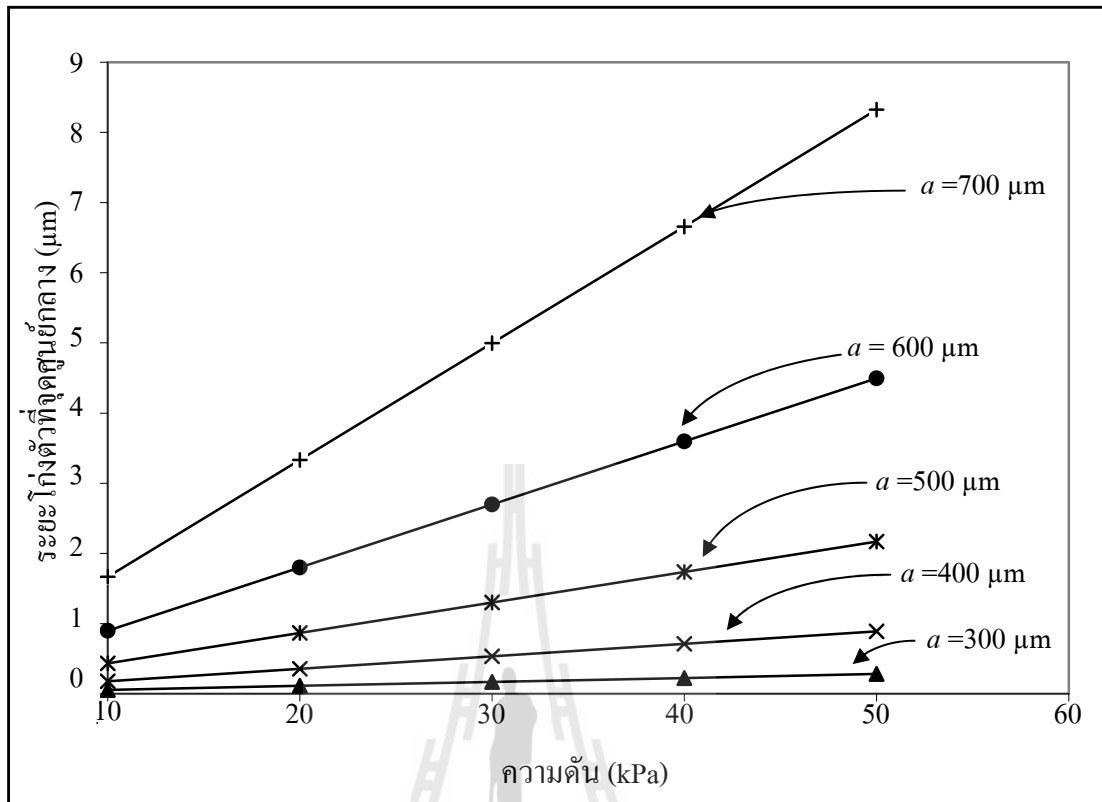
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีที่แตกต่างกัน เพื่อหาขนาดของไดอะแฟรมที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจรู้ โดยแบบจำลองได้กำหนดให้ความหนาของไดอะแฟรมมีค่า 40 μm ความดันเท่ากับ 10-50 kPa เปลี่ยนแปลงค่าความยาวของรัศมีตั้งแต่ 100-800 μm ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ค่ารัศมีต่าง ๆ ที่ความดัน 50 kPa หนา 40 μm แสดงดังรูปที่ 3.3 และเมื่อทำการคำนวณค่าระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมด้วยสมการที่ (3.1) ได้ค่าดังตารางที่ 3.2 นำไปวาดกราฟเปรียบเทียบระยะโค้งตัวที่บริเวณจุดศูนย์กลางที่ความดันต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 กราฟผลการจำลองการ โกงตัวของไดอะแฟรมที่มีความยาวของรัศมีต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองระยะ โกงตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีมีค่าต่างกัน

รัศมีไดอะแฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ระยะ โกงตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม (nm) ที่ความดันต่าง ๆ				
	10 kPa	20 kPa	30 kPa	40 kPa	50 kPa
100	0.7	1.4	2.1	2.7	3.5
200	11.1	22.2	33.3	44.4	55.5
300	56.2	112.0	168.5	224.5	280.9
400	177.5	355.1	532.6	710.1	887.7
500	433.4	866.9	1300.3	1733.8	2167.2
600	898.8	1797.6	2696.3	3595.1	4493.9
700	1665.1	3330.2	4995.3	6660.4	8325.5
800	2840.6	5681.2	8521.8	11362.4	14203.0

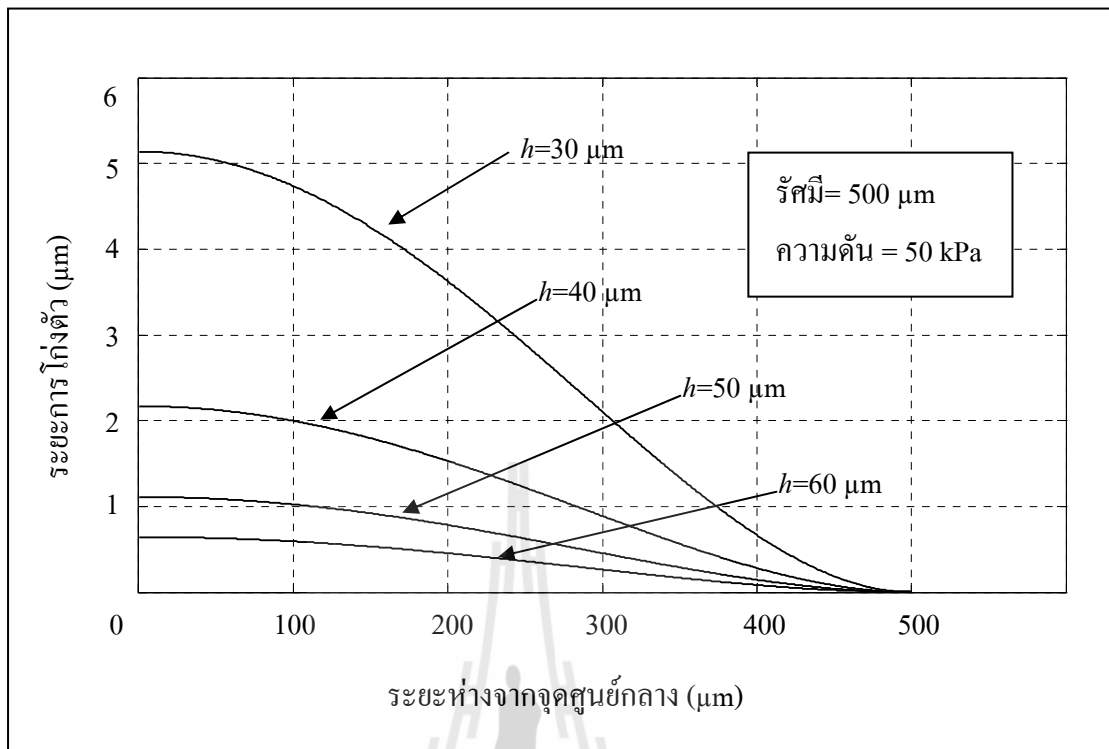


รูปที่ 3.4 กราฟเปรียบเทียบระยะการ โ่งตัวที่จุดศูนย์กลางที่ความยาวรัศมีต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.4 สรุปได้ว่าลักษณะการ โ่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันเดียวกัน ไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีมากจะมีระยะการ โ่งตัวที่มากกว่าไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีน้อย จึงเลือกสร้างไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีเท่ากับ 500 µm ซึ่งมีการตอบสนองต่อแรงดันที่มากและเป็นขนาดที่ทำไม่ใหญ่จนเกินไป

### 3.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความหนาของไดอะแฟรม

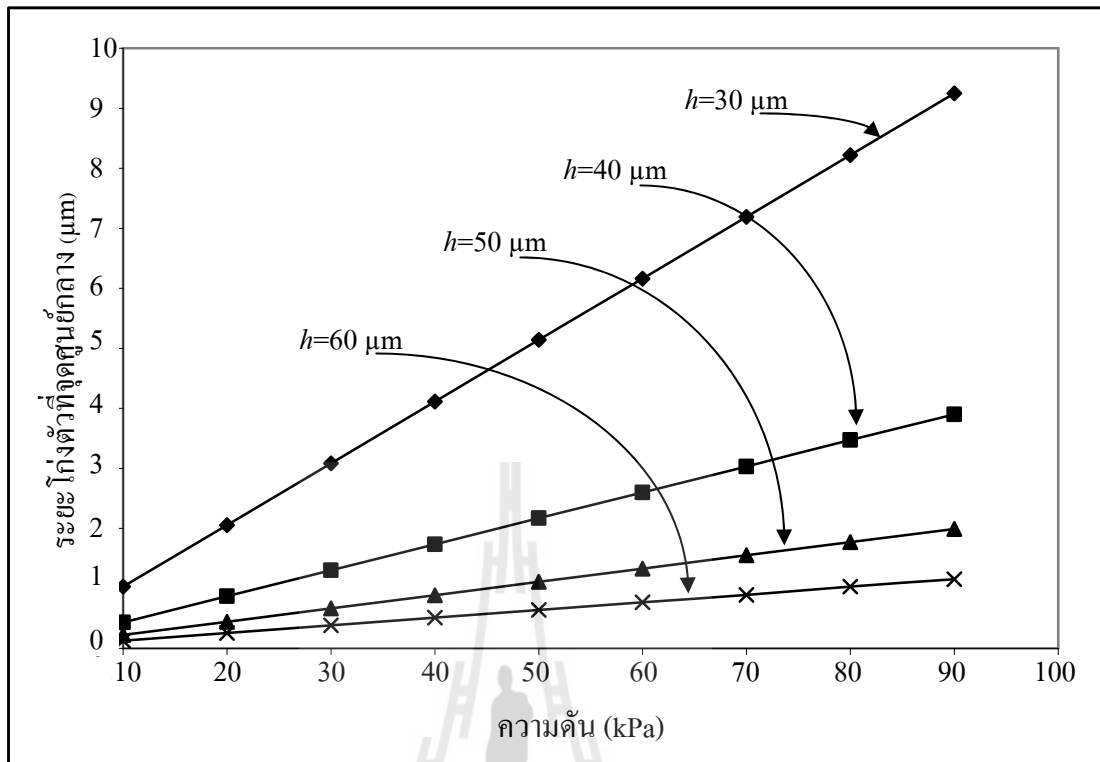
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลการ โ่งตัวของไดอะแฟรมที่มีความหนาแตกต่างกันเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของไดอะแฟรมในการสร้างตัวตรวจรู้ โดยแบบจำลองได้ศึกษาที่ความหนาของไดอะแฟรมตั้งแต่ 10-80 µm ลักษณะการ โ่งของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีกับ 500 µm ที่ความดัน 50 kPa แสดงดังรูปที่ 3.5 และเมื่อทำการคำนวณด้วยสมการที่ (3.1) ได้ค่าดังตารางที่ 3.3 นำค่าที่ได้วาดกราฟเปรียบเทียบระยะ โ่งตัวที่จุดศูนย์กลางที่ความดันต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไออะเฟรมที่มีความหนาต่างกัน

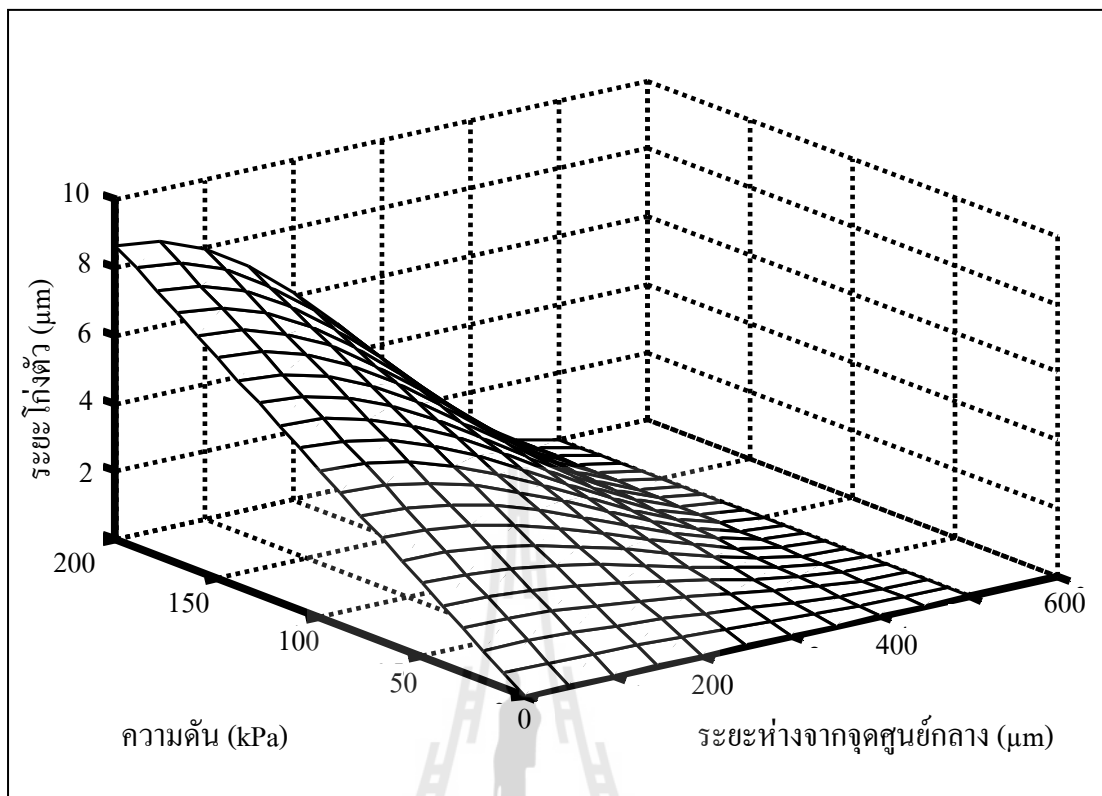
ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองระยะโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไออะเฟรมเมื่อมีความหนาที่แตกต่างกัน

ความหนา ไออะเฟรม ( $\mu\text{m}$ )	ระยะโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไออะเฟรม ( $\mu\text{m}$ ) ที่ความดันต่าง ๆ				
	10 kPa	20 kPa	30 kPa	40 kPa	50 kPa
10	27.74	55.48	83.22	110.96	138.70
20	3.47	6.94	10.40	13.87	17.34
30	1.03	2.05	3.08	4.11	5.14
40	0.43	0.87	1.30	1.73	2.17
50	0.22	0.44	0.67	0.89	1.11
60	0.13	0.26	0.39	0.51	0.64
70	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40
80	0.05	0.11	0.16	0.22	0.27



รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบระยะการ โคงตัวมากที่สุดเมื่อ ไคอะแฟรมมีความหนาต่างกัน

จากรูปที่ 3.6 เห็นได้ว่าลักษณะการ โคงตัวของไคอะแฟรมที่ความดันเดียวกัน ไคอะแฟรมที่มีความหนามากกว่าจะมีระยะการ โคงตัวที่น้อยกว่าไคอะแฟรมที่มีความหนาน้อยกว่า ระยะการ โคงตัวของไคอะแฟรมมากหรือน้อยนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อความไวของตัวตรวจรู้ด้วย จึงเลือกสร้างไคอะแฟรมที่มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  เพราะถ้าหากบางจนเกินไปอาจทำให้ไคอะแฟรมรับ ความดันได้ไม่มาก ความดันอาจทำให้ไคอะแฟรมเกิดความเสียหาย จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มี ผลต่อการ โคงตัวของไคอะแฟรม เพื่อที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณา ได้ทำ การเลือกสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมความยาวรัศมีเท่ากับ 500  $\mu\text{m}$  หรือเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการนี้ และทำให้ตัวตรวจ รู้มีขนาดไม่ใหญ่เกินไป ความหนาของไคอะแฟรมมีขนาดเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีความหนาที่ไม่น้อย เกินไป เพราะหากไคอะแฟรมมีความหนาที่น้อยนั้น ไคอะแฟรมจะสามารถทนความดันได้น้อย ทำให้ไคอะแฟรมเกิดความเสียหาย และทำให้ช่วงของความดันที่สามารถวัดได้มีค่าน้อย ในงานวิจัย นี้ทำการวัดความดันในช่วง 0-180 kPa สรุปการจำลองผลของความดันต่าง ๆ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ ไคอะแฟรมได้ระยะการ โคงตัวของไคอะแฟรมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันและตำแหน่งต่าง ๆ

### 3.2 ปราบกฎการณ้เพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive effect)

ปราบกฎการณ้เพียโซรีซิสทีฟ หรือสเตรนเกจ (Strain gauge) คือปราบกฎาร์ทีมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อมีความเค้นเกิดขึ้น ดังเช่นเมื่อมีความดันมากระทำกับแผ่นไดอะแฟรมที่มีตัวต้านทานอยู่ด้านบน จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นบนตัวต้านทานส่งผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามขนาดของความดันที่มากระทำ การวัดผลนั้นวัด โดยการนำตัวต้านทานไปต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ได้จากวงจรมีค่าแปรผันตามความดันที่ให้แก่ตัวตรวจรู้ ตัวตรวจรู้ความดันแบบสเตรนเกจจะมีย่านในการวัดค่อนข้างต่ำ สูงสุดประมาณ 0-200 kPa

เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวจะทำให้ตัวต้านทานที่อยู่บริเวณด้านบนไดอะแฟรมมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าโลหะจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสามารถหาได้จากสมการ



$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{(TW)} \quad (3.4)$$

โดยที่  $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ

$l$  คือ ความยาวของวัสดุตัวต้านทาน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

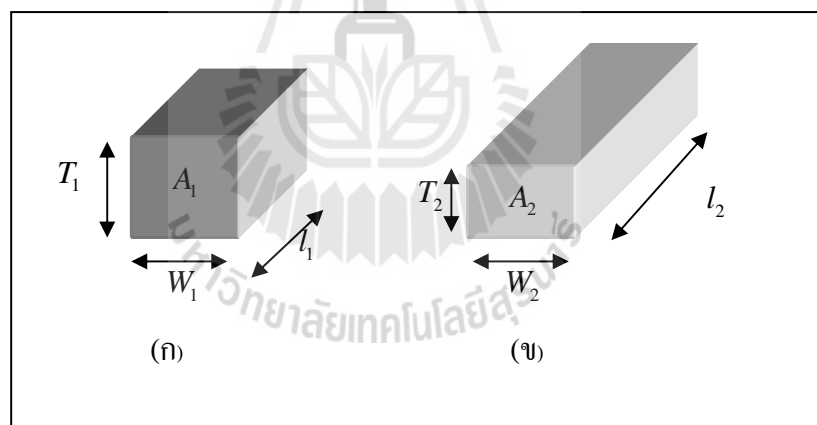
$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทาน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m<sup>2</sup>)

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร ( $\Omega$ -m)

$T$  คือ ความหนาหรือความสูงของตัวต้านทาน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

$W$  คือ ความกว้างของตัวต้านทาน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

เมื่อยังไม่มีแรงกระทำต่อตัวต้านทาน ตัวต้านทานจะมีความยาว และพื้นที่หน้าตัด ดังรูปที่ 3.8 (ก) แต่เมื่อมีแรงกระทำ ทำให้ตัวต้านทานมีความยาวเพิ่มขึ้นและพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงดังรูปที่ 3.8 (ข) จึงเป็นเหตุให้ตัวต้านทานสเตรนเกจมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำ



รูปที่ 3.8 ลักษณะการยืดตัวของตัวต้านทาน

ปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.5)

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ความเครียด

$\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง

$dR$  คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง

$d\rho$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

ตัวต้านทานที่สร้างขึ้นนี้เป็นแบบโลหะ พจน์ของ  $\frac{d\rho}{\rho}$  มีค่าน้อยมาก ถือได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ จึงได้สมการเป็น

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu)\varepsilon \quad (3.6)$$

ซึ่งค่า Gauge factor มีค่าเท่ากับ

$$GF = 1 + 2\nu = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6) เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของตัวต้านทาน เมื่อตัวต้านทานมีความยาวเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้า จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และ โดยทั่วไป โลหะฟิล์มบาง (Thin film metal) จะมีค่า  $GF = 2$  ที่มา Engel (2006)

### 3.3 การเลือกชนิดโลหะเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าของสเตรนเกจ

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับค่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (เมื่อกำหนดให้ตัวต้านทานมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดและความยาวเท่ากัน) ซึ่งถ้าเป็นโลหะบริสุทธิ์ที่เป็นตัวนำ เช่น เงิน ทองแดง และอะลูมิเนียม จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่น้อยมาก เพื่อเป็นตัวนำที่ดี สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันได้ดี แต่เมื่อต้องการตัวต้านทานจึงต้องเลือกโลหะที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่ามาก เพื่อเป็นตัวต้านทานที่ดี ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะเลือกมาเป็นตัวต้านทานจะประมาณ  $10^{-7} \Omega\text{-m}$  ซึ่งที่นิยมใช้จะเป็น โลหะผสมนิโครม ถ้าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของโลหะมีค่ามาก จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามาก ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.4 และแสดงให้เห็นว่า

นิโครมมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุดจึงเหมาะจะนำมาใช้ทำเป็นตัวต้านทานสเตรนเกจในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด

ชนิดโลหะ	Resistivity ( $\rho$ ) ( $m\Omega \cdot \mu m$ )	Temperature Coefficient ( $\alpha$ ) (ppm/ $^{\circ}C$ )
เงิน	16	3800
ทองแดง	17	3900
ทอง	22	3400
อะลูมิเนียม	27	3900
นิกเกิล	69	6000
โครเมียม	132	3000
ไทเทเนียม	420	2600
นิโครม	1100	400

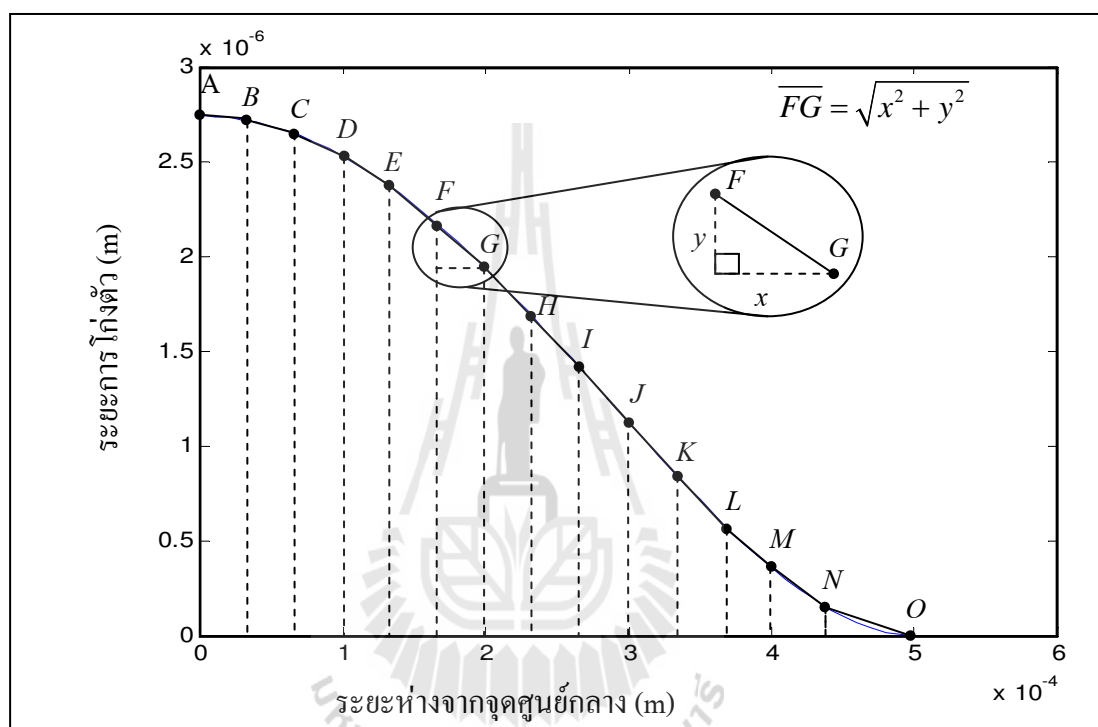
### 3.4 การออกแบบตัวต้านทานไฟฟ้าของสเตรนเกจ

ตัวต้านทานสเตรนเกจจะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งขนาดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่มากระทำด้วย เพื่อให้ได้ตัวต้านทานที่เหมาะสมกับการใช้วัดความดันจึงได้ทำการจำลองเพื่อหาขนาดตัวต้านทานที่เหมาะสม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความยาวของตัวต้านทานขณะโก่งตัว

เมื่อให้ความดันกับไออะแพรม ไออะแพรมจะเกิดการโก่ง ซึ่งจะทำให้ความยาวของไออะแพรมมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความยาวของตัวต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน การหาความยาวของความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป สามารถคำนวณโดยหาความยาวของไออะแพรมที่เปลี่ยนแปลงขณะโก่งตัว มีขั้นตอนการหาดังนี้ ลักษณะการโก่งตัวของไออะแพรมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) แล้วนำมาวาดกราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 จากนั้นแบ่งจุดออกเป็นจุดย่อยตั้งแต่จุด A ถึงจุด O ซึ่งค่าของแต่ละจุดนั้นสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.1) เช่นกัน จากนั้นทำการหาความยาวจากจุด A ไปยังจุด B และจากจุด B ไปยังจุด C โดยทำไปเรื่อย ๆ จนถึงจุด O โดยใช้ทฤษฎีของพีทาโกรัสเพื่อหาความยาวของแต่ละเส้น ตัวอย่างการคำนวณพีทาโกรัส หาความยาวจากจุด F ไปจุด G แสดงในรูปที่ 3.9 หากแบ่งจุดให้ละเอียดมากจะได้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ความยาว

ของไดอะแฟรมขณะ โกงตัวจึงมีค่าเท่ากับความยาวจากจุด A ไปยังจุด O คำนวณหาความยาวที่แต่ละตำแหน่งของไดอะแฟรมที่มีรัศมี 500  $\mu\text{m}$  โดยใช้สมการที่ (3.1) ร่วมกับการคำนวณพีทาโกรัส ได้ผลดังตารางที่ 3.5 นำไปวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.10 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าคือ ความกว้าง ( $w$ ) และความหนา ( $t$ ) จึงได้แบ่งพิจารณาตามหัวข้อต่อไป ทำการคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปที่ความดันต่าง ๆ



รูปที่ 3.9 กราฟผลการจำลองความยาวของไดอะแฟรมขณะ โกงตัวขึ้นเนื่องจากความดัน

ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองความยาวที่เพิ่มขึ้นของไดอะแฟรมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากจุดศูนย์กลางตามความดันที่เปลี่ยนแปลง

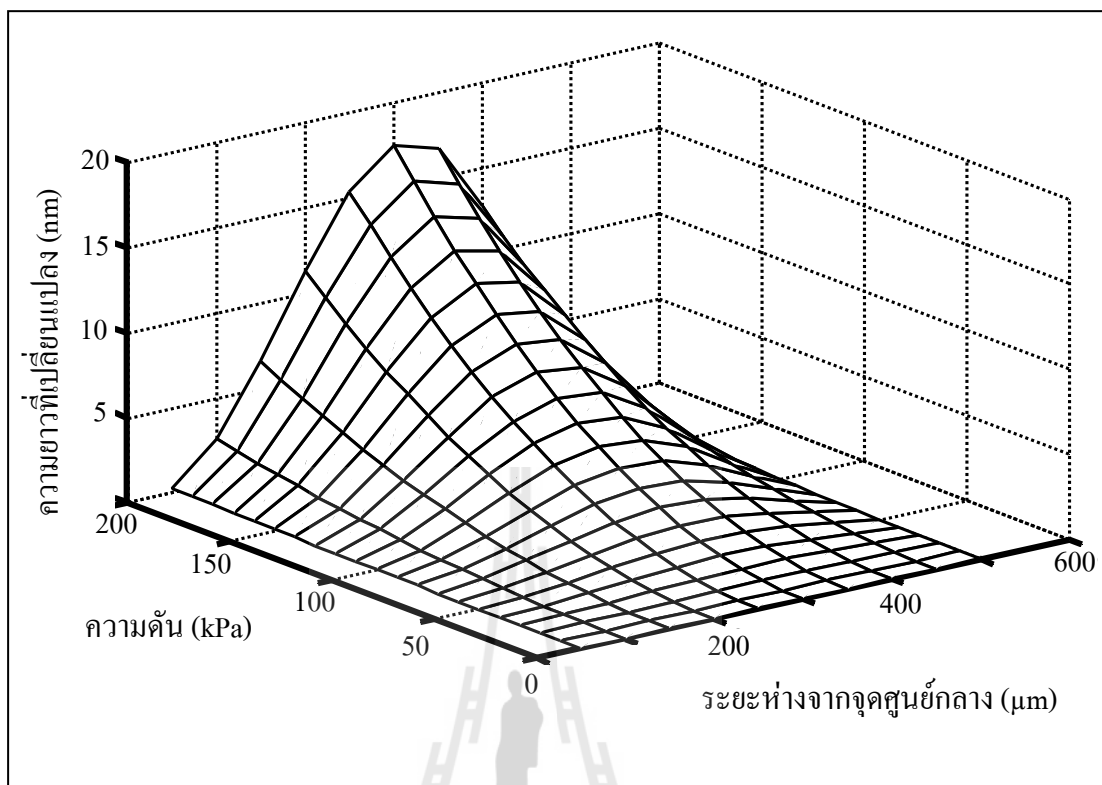
$r$ Pressure (kPa)	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$	400 $\mu\text{m}$	450 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	ความยาวทั้งหมด (nm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	$7.44 \times 10^{-13}$	$6.43 \times 10^{-12}$	$1.64 \times 10^{-11}$	$2.82 \times 10^{-11}$	$3.85 \times 10^{-11}$	$4.39 \times 10^{-11}$	$4.20 \times 10^{-11}$	$3.20 \times 10^{-11}$	$1.64 \times 10^{-11}$	$2.45 \times 10^{-12}$	0.22
20	$2.98 \times 10^{-12}$	$2.57 \times 10^{-11}$	$6.57 \times 10^{-11}$	$1.13 \times 10^{-10}$	$1.54 \times 10^{-10}$	$1.76 \times 10^{-10}$	$1.68 \times 10^{-10}$	$1.28 \times 10^{-10}$	$6.57 \times 10^{-11}$	$9.79 \times 10^{-12}$	0.90
30	$6.70 \times 10^{-12}$	$5.79 \times 10^{-11}$	$1.48 \times 10^{-10}$	$2.54 \times 10^{-10}$	$3.46 \times 10^{-10}$	$3.95 \times 10^{-10}$	$3.78 \times 10^{-10}$	$2.88 \times 10^{-10}$	$1.48 \times 10^{-10}$	$2.20 \times 10^{-11}$	2.04
40	$1.19 \times 10^{-11}$	$1.03 \times 10^{-10}$	$2.63 \times 10^{-10}$	$4.51 \times 10^{-10}$	$6.16 \times 10^{-10}$	$7.03 \times 10^{-10}$	$6.72 \times 10^{-10}$	$5.12 \times 10^{-10}$	$2.63 \times 10^{-10}$	$3.92 \times 10^{-11}$	3.63
50	$1.86 \times 10^{-11}$	$1.61 \times 10^{-10}$	$4.11 \times 10^{-10}$	$7.05 \times 10^{-10}$	$9.62 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-9}$	$1.05 \times 10^{-9}$	$8.00 \times 10^{-10}$	$4.11 \times 10^{-10}$	$6.12 \times 10^{-11}$	5.68
60	$2.68 \times 10^{-11}$	$2.31 \times 10^{-10}$	$5.91 \times 10^{-10}$	$1.01 \times 10^{-9}$	$1.38 \times 10^{-9}$	$1.58 \times 10^{-9}$	$1.51 \times 10^{-9}$	$1.15 \times 10^{-9}$	$5.91 \times 10^{-10}$	$8.81 \times 10^{-11}$	8.17
70	$3.65 \times 10^{-11}$	$3.15 \times 10^{-10}$	$8.05 \times 10^{-10}$	$1.38 \times 10^{-9}$	$1.89 \times 10^{-9}$	$2.15 \times 10^{-9}$	$2.06 \times 10^{-9}$	$1.57 \times 10^{-9}$	$8.05 \times 10^{-10}$	$1.20 \times 10^{-10}$	11.1
80	$4.76 \times 10^{-11}$	$4.11 \times 10^{-10}$	$1.05 \times 10^{-9}$	$1.80 \times 10^{-9}$	$2.46 \times 10^{-9}$	$2.81 \times 10^{-9}$	$2.69 \times 10^{-9}$	$2.05 \times 10^{-9}$	$1.05 \times 10^{-9}$	$1.57 \times 10^{-10}$	14.5
90	$6.03 \times 10^{-11}$	$5.21 \times 10^{-10}$	$1.33 \times 10^{-9}$	$2.28 \times 10^{-9}$	$3.12 \times 10^{-9}$	$3.56 \times 10^{-9}$	$3.40 \times 10^{-9}$	$2.59 \times 10^{-9}$	$1.33 \times 10^{-9}$	$1.98 \times 10^{-10}$	18.4
100	$7.44 \times 10^{-11}$	$6.43 \times 10^{-10}$	$1.64 \times 10^{-9}$	$2.82 \times 10^{-9}$	$3.85 \times 10^{-9}$	$4.39 \times 10^{-9}$	$4.20 \times 10^{-9}$	$3.20 \times 10^{-9}$	$1.64 \times 10^{-9}$	$2.45 \times 10^{-10}$	22.7

หมายเหตุ :  $r$  คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม

ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองความยาวที่เพิ่มขึ้นของไดอะแฟรมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากจุดศูนย์กลางตามความดันที่เปลี่ยนแปลง (ต่อ)

$r$ Pressure (kPa)	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$	400 $\mu\text{m}$	450 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	ความยาวทั้งหมด (nm)
110	$9.00 \times 10^{-11}$	$7.78 \times 10^{-10}$	$1.99 \times 10^{-9}$	$3.41 \times 10^{-9}$	$4.65 \times 10^{-9}$	$5.31 \times 10^{-9}$	$5.08 \times 10^{-9}$	$3.87 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-9}$	$2.96 \times 10^{-10}$	27.5
120	$1.07 \times 10^{-10}$	$9.26 \times 10^{-10}$	$2.37 \times 10^{-9}$	$4.06 \times 10^{-9}$	$5.54 \times 10^{-9}$	$6.32 \times 10^{-9}$	$6.05 \times 10^{-9}$	$4.61 \times 10^{-9}$	$2.37 \times 10^{-9}$	$3.53 \times 10^{-10}$	32.7
130	$1.26 \times 10^{-10}$	$1.09 \times 10^{-9}$	$2.78 \times 10^{-9}$	$4.76 \times 10^{-9}$	$6.50 \times 10^{-9}$	$7.42 \times 10^{-9}$	$7.10 \times 10^{-9}$	$5.41 \times 10^{-9}$	$2.78 \times 10^{-9}$	$4.14 \times 10^{-10}$	38.4
140	$1.46 \times 10^{-10}$	$1.26 \times 10^{-9}$	$3.22 \times 10^{-9}$	$5.53 \times 10^{-9}$	$7.54 \times 10^{-9}$	$8.61 \times 10^{-9}$	$8.23 \times 10^{-9}$	$6.27 \times 10^{-9}$	$3.22 \times 10^{-9}$	$4.80 \times 10^{-10}$	44.5
150	$1.67 \times 10^{-10}$	$1.45 \times 10^{-9}$	$3.70 \times 10^{-9}$	$6.34 \times 10^{-9}$	$8.66 \times 10^{-9}$	$9.88 \times 10^{-9}$	$9.45 \times 10^{-9}$	$7.20 \times 10^{-10}$	$3.70 \times 10^{-10}$	$5.51 \times 10^{-10}$	51.1
160	$1.90 \times 10^{-10}$	$1.65 \times 10^{-9}$	$4.20 \times 10^{-9}$	$7.22 \times 10^{-9}$	$9.85 \times 10^{-9}$	$1.12 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-8}$	$8.19 \times 10^{-9}$	$4.20 \times 10^{-9}$	$6.27 \times 10^{-10}$	58.1
170	$2.15 \times 10^{-10}$	$1.86 \times 10^{-9}$	$4.75 \times 10^{-9}$	$8.15 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-8}$	$1.27 \times 10^{-8}$	$1.21 \times 10^{-8}$	$9.25 \times 10^{-9}$	$4.75 \times 10^{-9}$	$7.08 \times 10^{-10}$	65.6
180	$2.41 \times 10^{-10}$	$2.08 \times 10^{-9}$	$5.32 \times 10^{-9}$	$9.13 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-8}$	$1.42 \times 10^{-8}$	$1.36 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-8}$	$5.32 \times 10^{-9}$	$7.93 \times 10^{-10}$	73.6
190	$2.69 \times 10^{-10}$	$2.32 \times 10^{-9}$	$5.93 \times 10^{-9}$	$1.02 \times 10^{-8}$	$1.39 \times 10^{-8}$	$1.59 \times 10^{-8}$	$1.52 \times 10^{-8}$	$1.15 \times 10^{-8}$	$5.93 \times 10^{-9}$	$8.84 \times 10^{-10}$	82.0
200	$2.98 \times 10^{-10}$	$2.57 \times 10^{-9}$	$6.57 \times 10^{-9}$	$1.13 \times 10^{-8}$	$1.54 \times 10^{-8}$	$1.76 \times 10^{-8}$	$1.68 \times 10^{-8}$	$1.28 \times 10^{-8}$	$6.57 \times 10^{-9}$	$9.79 \times 10^{-10}$	90.8

หมายเหตุ :  $r$  คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลในตารางที่ 3.5

### 3.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาชนิดของโลหะในการทำตัวต้านทานสเตรนเกจ

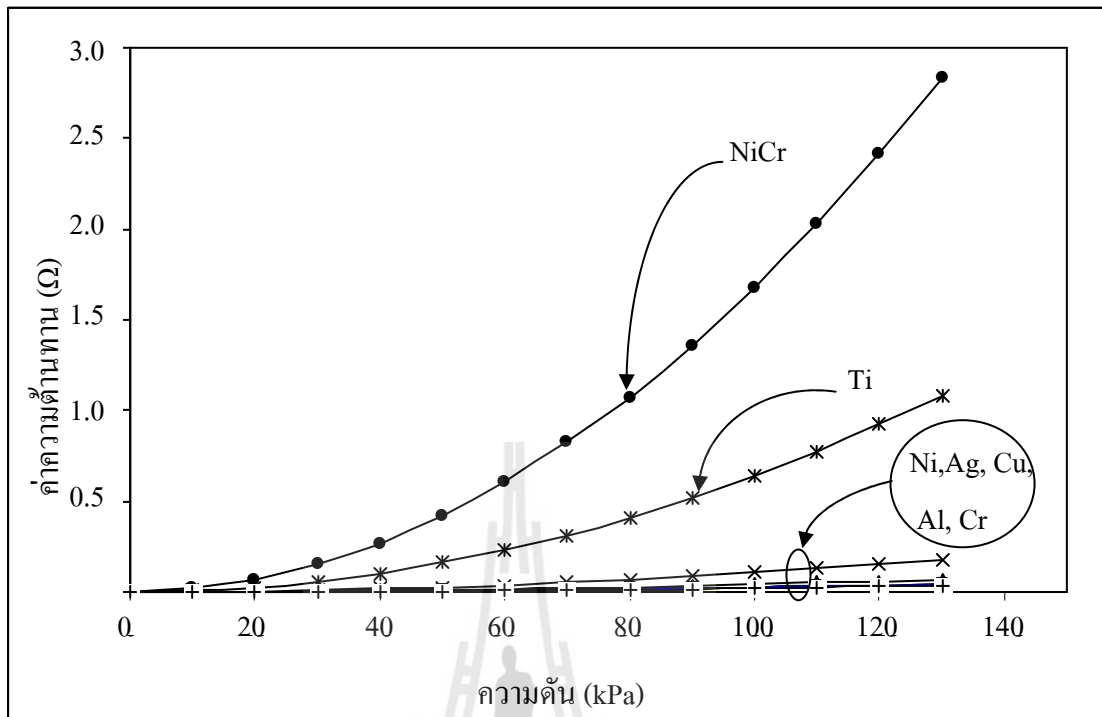
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดเมื่อไดอะแฟรมมีการโก่งตัว โดยใช้ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในหัวข้อที่ 3.4.1 มาทำการคำนวณเป็นความยาวของตัวต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจำลองให้ตัวต้านทานมีความกว้าง  $40\ \mu\text{m}$  หนา  $30\text{\AA}$  ส่วนพื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่ เมื่อทำการคำนวณตามสมการที่ (3.4) ได้ค่าดังตารางที่ 3.6 และวาดกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3.11 เมื่อพิจารณาจากรูปแล้ว เห็นได้ว่าที่ความดันเดียวกันโลหะนิโครมให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ จึงได้เลือกที่จะใช้โลหะนิโครมในการสร้างตัวต้านทาน

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด

Pressure (kPa)	ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของโลหะแต่ละชนิด (mΩ)						
	Ag	Cu	Al	Ni	Ti	Cr	NiCr
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.2	0.3	0.4	1.1	6.4	0.2	16.8
20	1.0	1.0	1.6	4.2	25.7	0.8	67.2
30	2.2	2.3	3.7	9.5	57.7	1.8	151.2
40	3.9	4.2	6.6	16.9	102.6	3.2	268.7
50	6.1	6.5	10.3	26.3	160.3	5.0	419.9
60	8.8	9.3	14.8	37.9	230.9	7.3	604.6
70	12.0	12.7	20.2	51.6	314.2	9.9	822.9
80	15.6	16.6	26.4	67.4	410.4	12.9	1074.9
90	19.8	21.0	33.4	85.3	519.4	16.3	1360.4
100	24.4	26.0	41.2	105.3	641.2	20.2	1679.4
110	29.6	31.4	49.9	127.5	775.9	24.4	2032.1
120	35.2	37.4	59.4	151.7	923.4	29.0	2418.4
130	41.3	43.9	69.7	178.0	1083.7	34.1	2838.2

ในงานวิจัยนี้เลือกนิโครมซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากที่สุดและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ามีมากกว่าโลหะชนิดอื่น นิโครมเป็นโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 80% และโครเมียม 20% ซึ่งข้อดีของนิโครมคือ เป็นวัสดุที่หาง่ายมีราคาถูก สามารถนำมาทำเป็นตัวต้านทานได้ด้วยกระบวนการที่มีเครื่องมือในห้องทดลอง นอกจากนี้แล้วนิโครมยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่น้อยมากเมื่อมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องดูได้จากค่า Temperature coefficient จากตารางที่ 3.4 ซึ่งในปัจจุบันนิยมนำมาเป็นตัวต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน คุณสมบัติทั่วไปของนิโครมแสดงดังตารางที่ 3.7





รูปที่ 3.11 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของนิโครม

คุณสมบัติ	หน่วย
Electrical resistivity (25 °C)	1.0-1.5 $\mu\Omega\cdot\text{m}$
Thermal Conductivity	11.3 kW/°C
Magnetic Attraction	-
Thermal Expansion Coefficient (25-100 °C)	13.4 ppm/°C
Temperature Coefficient of Resistivity (25-100 °C)	400 ppm/°C
Specific Gravity	8.4
Density	8400 kg/m <sup>3</sup>
Melting point	1400 °C
Specific Heat	450 J/kg °C
Modulus of elasticity	220 GPa

### 3.4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความหนาของตัวต้านทานไฟฟ้าสตรนเกอ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาความหนาของตัวต้านทานที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อตัวต้านทานเป็นโลหะนิโครมที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 20-1000Å โดยกำหนดให้ความกว้างของตัวต้านทานเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  และจำลองที่ความดันตั้งแต่ 0-130 kPa (กำหนดให้ความหนามีค่าคงที่) ได้ผลดังตารางที่ 3.8 ผลการจำลอง ที่ความดันเดียวกันตัวต้านทานที่มีความหนาที่น้อยกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มากกว่าและให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มากกว่าตัวต้านทานที่มีความหนามากกว่า นำข้อมูลในตารางที่ 3.8 วาดกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

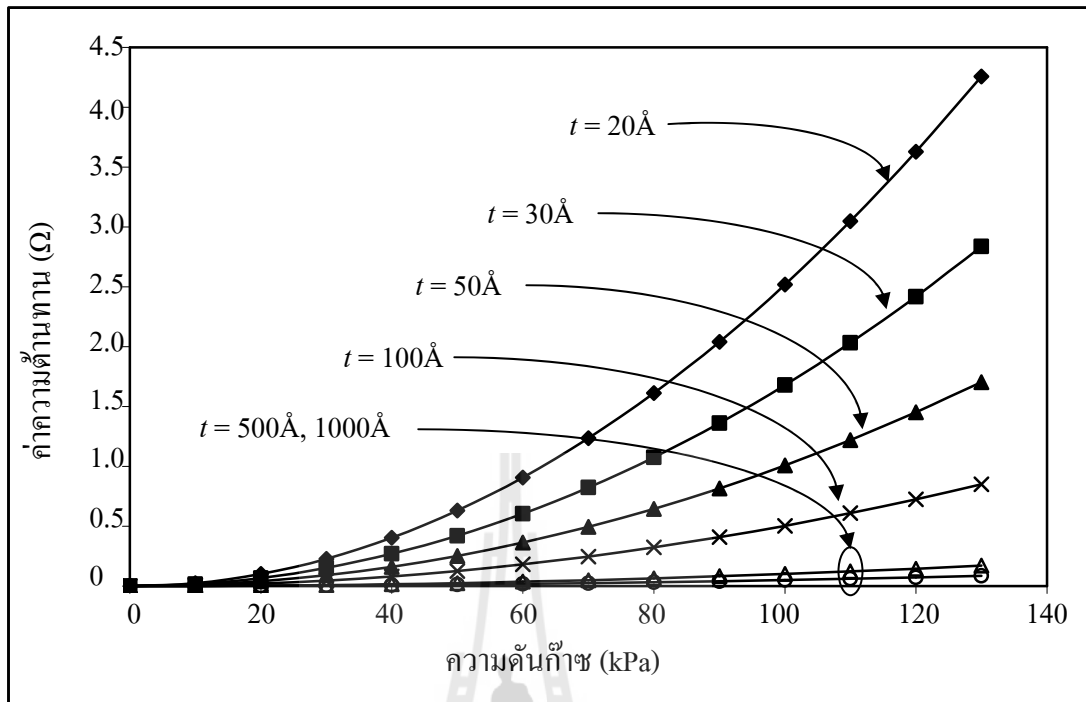
ความดัน (kPa)	ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่ความหนาของตัวต้านทานต่าง ๆ ( $\text{m}\Omega$ )					
	20Å	30Å	50Å	100Å	500Å	1000Å
0	0	0	0	0	0	0
10	25.2	16.8	10.1	5.0	1.0	0.5
20	100.8	67.2	40.3	20.2	4.0	2.0
30	226.7	151.2	90.7	45.3	9.1	4.5
40	403.1	268.7	161.2	80.6	16.1	8.1
50	629.8	419.9	251.9	126.0	25.2	12.6
60	906.9	604.6	362.8	181.4	36.3	18.1
70	1234.4	822.9	493.8	246.9	49.4	24.7
80	1612.3	1074.9	644.9	322.5	64.5	32.2
90	2040.5	1360.4	816.2	408.1	81.6	40.8
100	2519.2	1679.4	1007.7	503.8	100.8	50.4
110	3048.2	2032.1	1219.3	609.6	121.9	61.0
120	3627.6	2418.4	1451.0	725.5	145.1	72.6
130	4257.3	2838.2	1702.9	851.5	170.3	85.1

### 3.4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความกว้างของตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจ

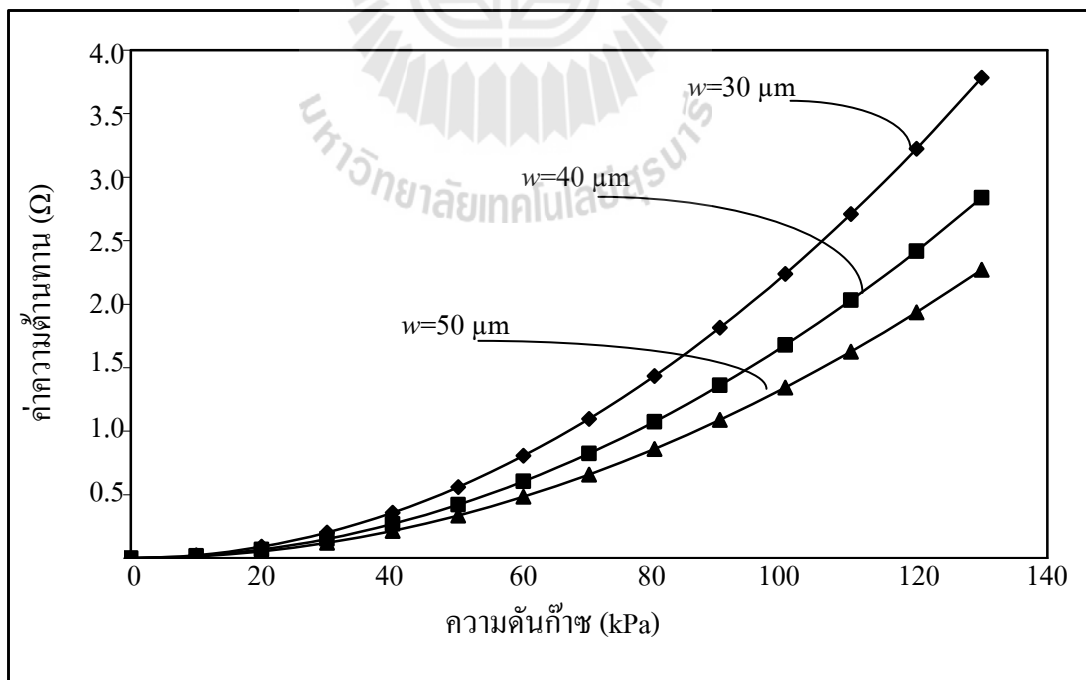
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาขนาดความกว้างของตัวต้านทานที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อตัวต้านทานเป็นโลหะนิโครมมีความกว้างที่ต่างกันคือ 30-50  $\mu\text{m}$  โดยกำหนดให้ความหนาของตัวต้านทานเท่ากับ 30Å และจำลองที่ความดันตั้งแต่ 0-130 kPa (กำหนดให้ความหนามีค่าคงที่) ได้ผลดังตารางที่ 3.9 จากผลการจำลอง ที่ความดันเดียวกันตัวต้านทานที่มีความกว้างน้อยกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าและให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มากกว่าตัวต้านทานที่มีความกว้างมากกว่า นำข้อมูลในตารางที่ 3.9 วาดกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.9 ผลการจำลองค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อตัวต้านทานไฟฟ้ามีความกว้างต่างกัน

ความดัน (kPa)	ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ( $\text{m}\Omega$ )		
	ความกว้างตัวต้านทานไฟฟ้า 30 $\mu\text{m}$	ความกว้างตัวต้านทานไฟฟ้า 40 $\mu\text{m}$	ความกว้างตัวต้านทานไฟฟ้า 50 $\mu\text{m}$
0	0	0	0
10	22	17	13
20	90	67	54
30	202	151	121
40	358	269	215
50	560	420	336
60	806	605	484
70	1097	823	658
80	1433	1075	860
90	1814	1360	1088
100	2239	1679	1344
110	2709	2032	1626
120	3224	2418	1935
130	3784	2838	2271

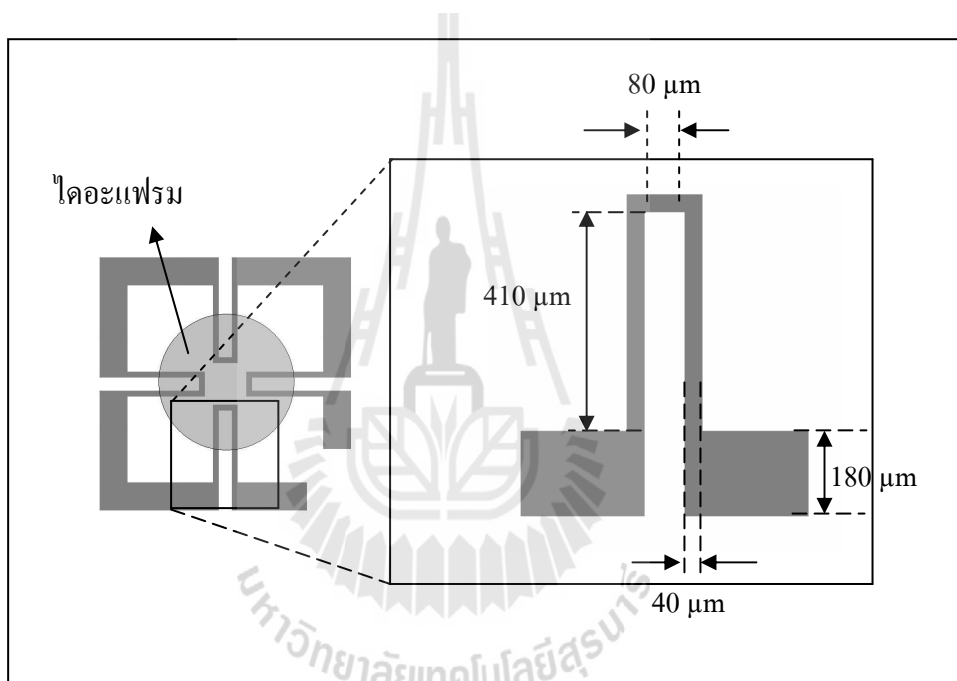


รูปที่ 3.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อตัวต้านทานมีความหนาต่างกัน

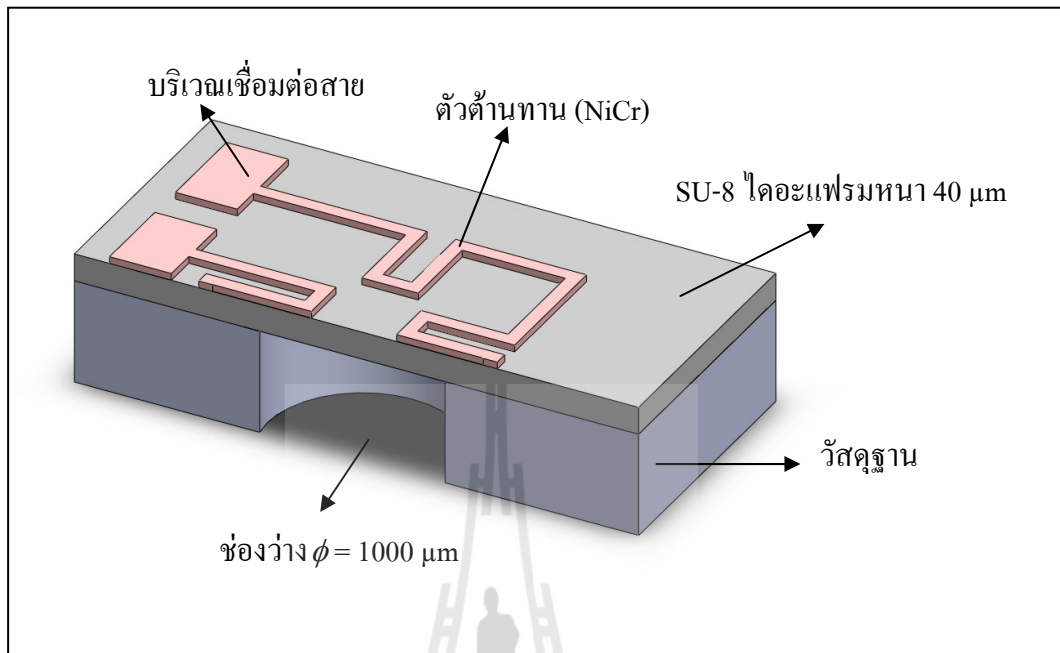


รูปที่ 3.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อตัวต้านทานมีความกว้างต่างกัน

จากการศึกษาปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อการโค้งตัวของไดอะแฟรมและการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่าจะทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีตัวต้านทานสเตรนเกจที่สร้างด้วยโลหะนิโครมมีความหนา 500Å ขนาดของตัวต้านทานสเตรนเกจดังรูปที่ 3.14 ซึ่งมีตัวต้านทานสเตรนเกจทั้งหมด 4 ตัว เชื่อมต่อกันทั้งหมดวางอยู่บนไดอะแฟรม ขนาดความกว้างของตัวต้านทานเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  และมีบริเวณที่ต่อเชื่อมสาย (Bonding pad) 2 ด้าน โครงสร้างตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันสร้างโดยใช้สารไวแสง SU-8 มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1000  $\mu\text{m}$



รูปที่ 3.14 ขนาดตัวต้านทานในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.15 ลักษณะตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้

## บทที่ 4

### กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค กระบวนการที่ใช้คือ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี การเคลือบโลหะ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และการสกัดทิ้งรายละเอียดของกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

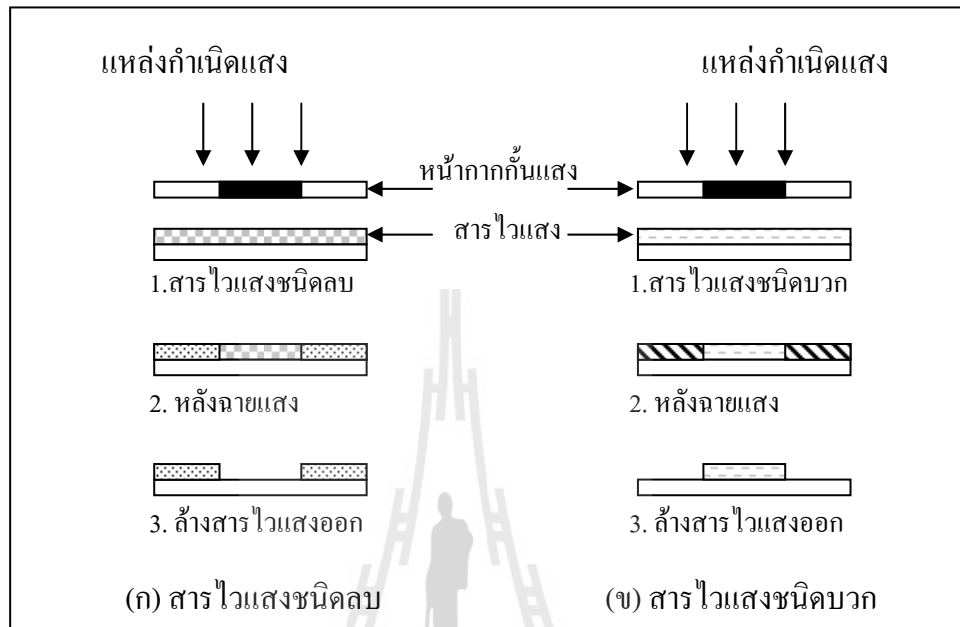
#### 4.1 กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process)

กระบวนการลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายทอดลวดลายด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากกันแสง (Mask) ลงบนสารไวแสง (Photoresist) สารไวแสงแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) เช่น AZ เป็นต้นและสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เช่น SU-8 เป็นต้น มีขั้นตอนคือนำสารไวแสงไปฉายแสง เมื่อสารไวแสงถูกฉายแสงจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดลวดลายขึ้นมาในเนื้อสารไวแสง จากนั้นนำไปให้พลังงานหรือความร้อนแก่สารไวแสง จะปรากฏลวดลายที่ฉายแสงขึ้นมา แล้วนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer) จะได้ชิ้นงานที่มีลวดลายที่ต้องการ ซึ่งจะเหมือนหรือตรงกันข้ามกับหน้ากานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสง ข้อดีของสารไวแสงแต่ละชนิดต่างกันคือ สารไวแสงชนิดบวก สามารถล้างออกได้ง่าย แต่มีความหนาของสารไวแสงไม่มากนัก สารไวแสงชนิดลบ สามารถสร้างความหนาได้มากกว่า แต่การสกัดทิ้งทำได้ยากกว่า

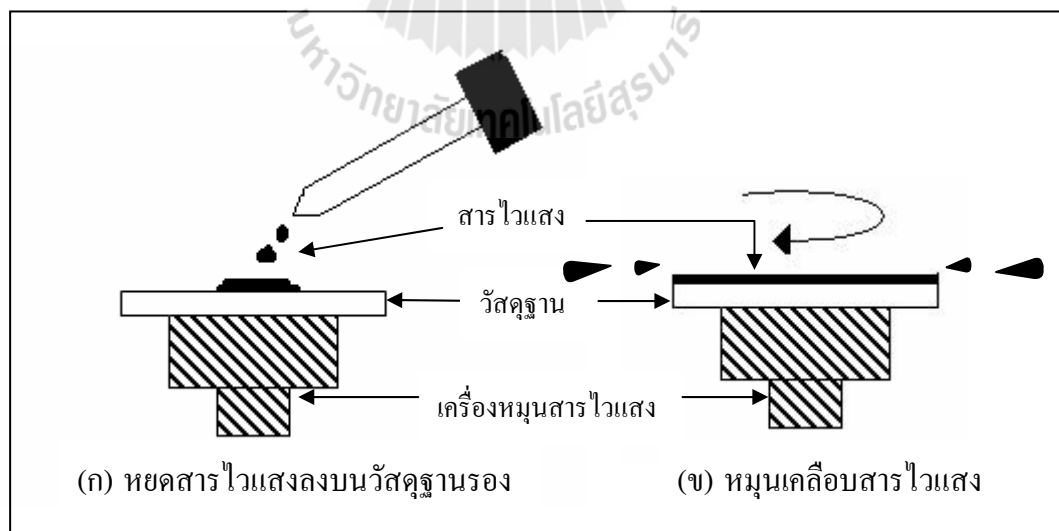
ในรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบเมื่อผ่านกระบวนการลิโธกราฟี รูปที่ 4.1 (ก) สารไวแสงชนิดลบ บริเวณที่ถูกแสงจะทำปฏิกิริยากับเนื้อสารไวแสงทำให้แข็งตัว ไม่สามารถล้าง (Develop) ออกได้ด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer) รูปที่ 4.1 (ข) เป็นสารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง

การเตรียมสารไวแสงสำหรับใช้ในกระบวนการลิโธกราฟี สามารถเตรียมได้ด้วยการหมุนเคลือบสารไวแสงดังในรูปที่ 4.2 การหมุนเคลือบสารไวแสงทำได้โดยการนำวัสดุฐานที่ต้องการหมุนเคลือบสารไวแสงใส่ในเครื่องหมุนสารไวแสง (Spinner) จากนั้นหยดสารไวแสงลงบนวัสดุฐาน แล้วเปิดเครื่องให้ทำการหมุน โดยสามารถตั้งระดับความเร็วรอบของการหมุนได้ ความเร็วรอบในการหมุนมีผลต่อความหนาของชั้นสารไวแสง จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อให้

สารไวแสงแห้งเพื่อที่จะนำไปฉายแสงต่อไป ในงานวิจัยนี้ใช้สารไวแสง SU-8 ในกระบวนการลิโธกราฟีเพื่อสร้างโคอะเฟรมที่เป็นสารไวแสง SU-8 ของตัวตรวจรู้ความดัน



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบในกระบวนการลิโธกราฟี



รูปที่ 4.2 การหมุนเคลือบสารไวแสง



ปัจจัยในการกำหนดความหนาของสารไวแสงในการหมุนเคลือบนั้น มีด้วยกันสองปัจจัยหลักคือ ความเหนียวของสารไวแสง และความเร็วรอบในการหมุนเคลือบ โดยความหนาสุดท้ายหลังจากการหมุนเคลือบสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.1)

$$Thickness = \frac{kp^2}{\sqrt{\omega}} \quad (4.1)$$

โดยที่	$k$	คือ ค่าคงที่ของเครื่องเคลือบหมุน (ปกติมีค่า 80–100)
	$p$	คือ อัตราส่วนของสารไวแสงที่ผสมกับสารประกอบ (%)
	$\omega$	คือ ความเร็วในการหมุนเคลือบ (rpm)

#### 4.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นโลหะ ทำให้ชิ้นงานมีความคงทนแข็งแรง และนำไฟฟ้า เพื่อที่จะได้นำไปใช้ต่อเข้ากับวงจรวัดผลหรือการควบคุม ข้อดีของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือ ง่ายต่อการสร้างชิ้นงาน และมีราคาถูก โลหะที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง เงิน และทองคำ เป็นต้น การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีหลักการคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการชุบโลหะเพราะต้องการให้อิเล็กตรอนไหลไปทางเดียว ขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วบวกเป็นโลหะที่ใช้ในการชุบ ขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบเป็นวัสดุที่ต้องการชุบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีไอออนของโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะใช้ชุบหรือเป็นไอออนของโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่เป็นแอโนด ในรูปที่ 4.3 คือตัวอย่างวงจรที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ไอออนที่ขั้วแอโนดจะผ่านสารละลายมาเคลือบบนชิ้นงานให้เป็นโลหะที่เป็นขั้วแคโทด ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จะต้องป้อนกระแสให้มีความคงที่เพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ ในรูปที่ 4.4 แสดงการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในทางปฏิบัติอาจใช้อุปกรณ์ทำความร้อนให้สารละลายเพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม และใช้ที่กวนสารละลายเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย ในงานวิจัยนี้ ใช้การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างชั้นวัสดุชั่วคราวในการสร้างไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นั้นเป็นกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว โดยผ่านสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเกลือของโลหะที่ต้องการ โดยกระแสจะไหลผ่านสารละลายในทิศทางการไหลของไอออนบวก (อิเล็กตรอนไหลในทิศทางตรงกันข้าม) ซึ่งสามารถใช้อัตราการไหลดังกล่าวเพื่อวัดอัตราการเกิดของปฏิกิริยาได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิด ณ ขั้วบวกจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 4.2



ส่วนขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 4.3

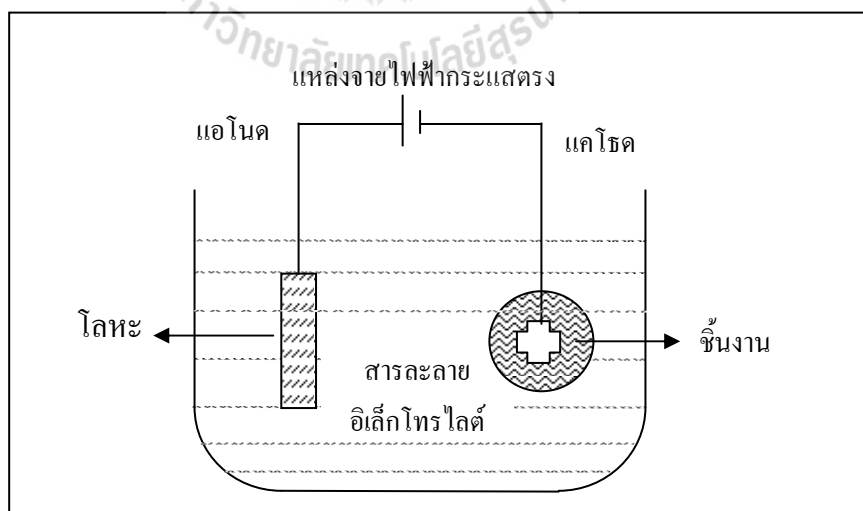


โดยที่  $M$  คือ วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

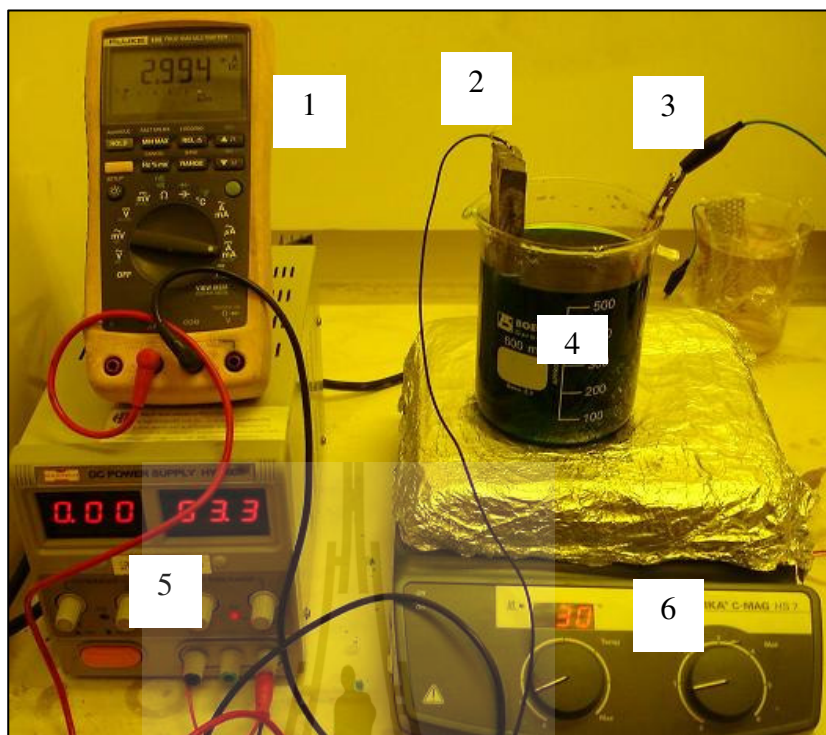
$M^{n+}$  คือ จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

$ne^-$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา

ถ้าสมมุติให้กระแสของทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีค่าเท่ากันจะได้ว่า มวลของไอออนของโลหะในสารละลายจะมีค่าคงที่



รูปที่ 4.3 วงจรการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชุดชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (1) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (2) แท่งโลหะนิกเกิล (3) ชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปโลหะ (4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (5) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (6) อุปกรณ์ให้ความร้อนและกวนสารละลาย

อัตราการเกิดของโลหะบนชิ้นงานคำนวณได้โดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

$$m = \frac{A_w}{(F)(n_{el})}(I)(t) \quad (4.4)$$

โดยที่	$m$	คือ มวลของโลหะที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือที่หลุดออกจากขั้วบวก (g)
	$A_w$	คือ มวลอะตอม (Atomic weight) ของโลหะที่ชุบ
	$n_{el}$	คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
	$F$	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96487 คูลอมบ์ต่อโมล
	$I$	คือ กระแสที่ไหลผ่านสารละลายในภาชนะ (mA)
	$t$	คือ เวลาในการชุบโลหะ (วินาที)

ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ เช่นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจน (Reduction of hydrogen) ใช้กระแสในอัตราที่น้อยมาก จะได้สมการเป็นดังนี้

$$\omega_{practical} = \eta \frac{A_{\omega}}{(F)(n_{el})} (I)(t) \quad (4.5)$$

โดยที่  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพในการชุบโลหะ (Plating efficiency)

ความหนาของโลหะที่ก่อตัวขึ้นสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาจากปริมาณและความหนาแน่นของโลหะที่ใช้ในการชุบดังกล่าว

$$\omega = \rho_1 A_p H \quad (4.6)$$

โดยที่  $\rho_1$  คือ ความหนาแน่นของโลหะ

$A_p$  คือ พื้นที่การชุบโลหะ

$H$  คือ ความสูงของโลหะก่อตัวขึ้น

ดังนั้นความสูงของโลหะที่ก่อตัวขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H = \eta \frac{(A_{\omega})(I)(t)}{\rho_1 A F (n_{el})} \quad (4.7)$$

และอัตราในการชุบโลหะ (Electroplating rate) สามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{dH}{dt} = \eta \frac{A_{\omega} J}{\rho_1 F (n_{el})} \quad (4.8)$$

โดยที่  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแส ( $A/cm^2$ )

### 4.3 การเคลือบโลหะ (Metallization)

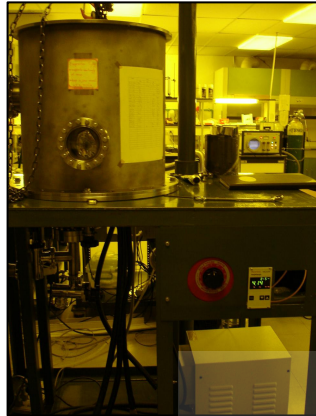
การเคลือบโลหะส่วนใหญ่เคลือบเพื่อให้พื้นผิวของวัสดุที่เป็นฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์หรือชิ้นงานต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ใช้การเคลือบโลหะสร้างตัวต้านทานทางไฟฟ้าจากโลหะนิโครมโดยมีด้วยกัน 2 วิธีคือ การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Vacuum thermal evaporation) และการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) รายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ

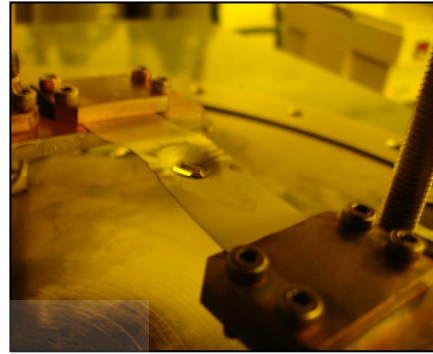
เป็นการเคลือบโลหะโดยให้ความร้อนแก่โลหะหลอมเหลวระเหยเป็นไอกลายเป็นชั้นฟิล์มบางไปเคลือบชิ้นงานภายในห้องสุญญากาศ ปกติจะทำการเคลือบโลหะที่ความดันต่ำประมาณ  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  torr เพื่อให้ระยะทางของอนุภาคโลหะตรงจากโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน ภายในเครื่องเคลือบโลหะนี้จะมีโบท (Boat) หรือเบ้าหลอมโลหะ เมื่อให้พลังงานที่เบ้าหลอมจะเกิดความร้อนทำให้โลหะหลอมเหลวระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปติดที่ชิ้นงาน และมีตัวตรวจรู้ความหนาของชั้นฟิล์มโลหะที่เคลือบติดที่ชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.5 ข้อดีของเครื่องเคลือบโลหะแบบนี้คือใช้งานได้ง่าย ข้อเสียคือเกิดความร้อนมากระหว่างการหลอมเหลวอาจทำให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลือบโลหะเกิดความเสียหายได้ และทิศทางการเคลือบเป็นไปในทิศทางเดียว (Anisotropic) ทำให้ไม่สามารถเคลือบชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง

#### 4.3.2 การสปัตเตอร์ริง

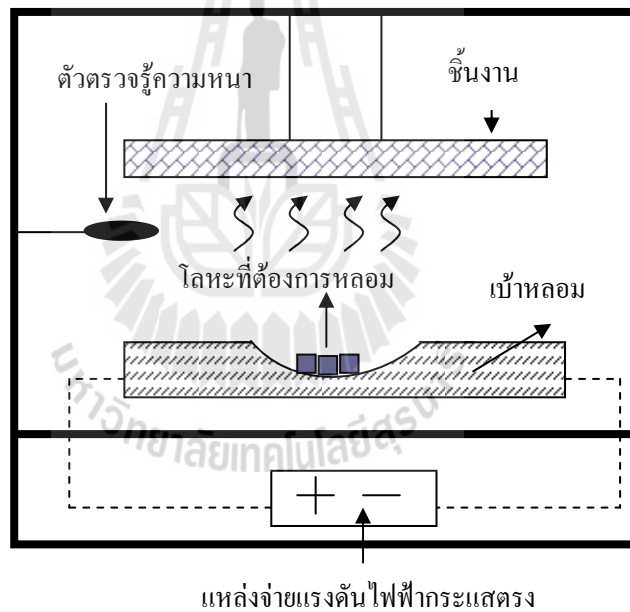
วิธีนี้อาศัยการพลาสมาของก๊าซเฉื่อยของก๊าซอาร์กอน และเหนี่ยวนำให้พุ่งชนโลหะเป้าหมาย (Target) ทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาติดที่ชิ้นงานดังรูปที่ 4.6 การสปัตเตอร์ริงแบบออกได้เป็น 2 ชนิดคือ การสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC sputtering) ซึ่งเหมาะกับวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นโลหะ และการสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (RF sputtering) ซึ่งเหมาะกับวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นตัวนำหรือฉนวน



(ก) เครื่องเคลือบโลหะ

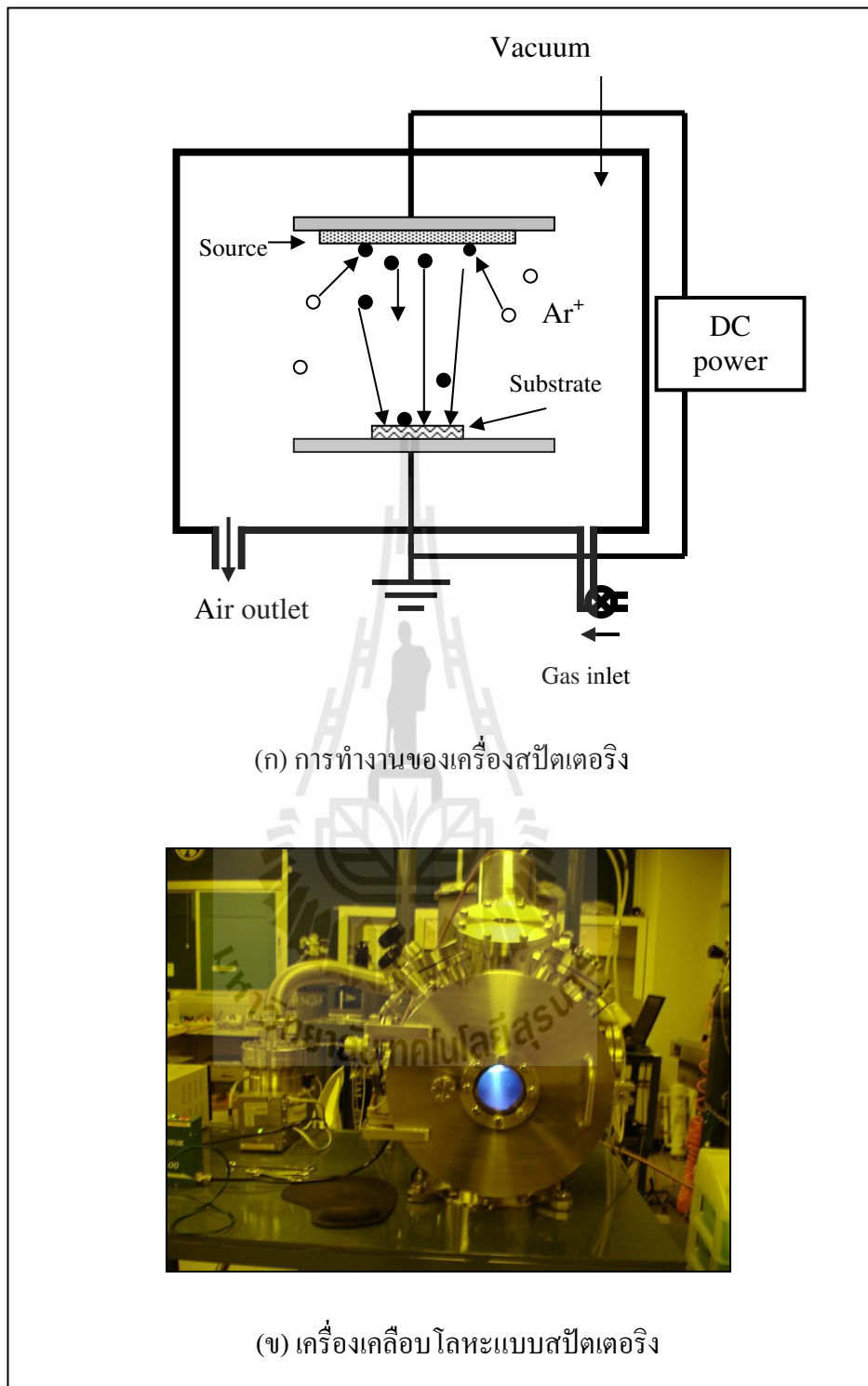


(ข) เบ้าหลอมโลหะ



(ค) วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ

รูปที่ 4.5 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ



รูปที่ 4.6 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอร์

#### 4.4 กระบวนการสกัด (Etching)

กระบวนการสกัดในงานวิจัยนี้ใช้เพื่อสร้างตัวต้านทานจากโลหะนิโครมซึ่งมี 2 แบบคือ

##### 4.4.1 การสกัดแบบแห้ง (Dry etching)

เป็นการสกัดออกด้วยการใช้ไอออนของธาตุ (ส่วนมากใช้ก๊าซ) มาทำปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุเช่นการพลาสมาด้วยก๊าซไนโตรเจน อาร์กอน ฮีเลียมหรือ ฟลูโอคาร์บอน ( $CF_4$ ) เป็นต้น เป็นการสกัดออกได้ทิศทางเดียว (Anisotropic) หรือทุกทิศทาง (Isotropic) มี 2 แบบ คือ

1. Physical dry etching เป็นการเร่งอนุภาคไอออนของก๊าซให้พุ่งชนเนื้อสาร
2. Chemical dry etching เป็นการเร่งอนุภาคให้พุ่งชนเนื้อสารและทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร (Reactive)

##### 4.4.2 การสกัดแบบเปียก (Wet etching)

ใช้สารละลายทำปฏิกิริยากับเนื้อสารและหลุดออกจากเนื้อชิ้นงาน การสกัดแบบเปียก จะใช้สารละลายเป็นตัวกัดกร่อนชิ้นงาน บริเวณที่ไม่ต้องการออก สารละลายที่ใช้ในการสกัดโลหะในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สารเคมีที่ใช้ในการสกัด

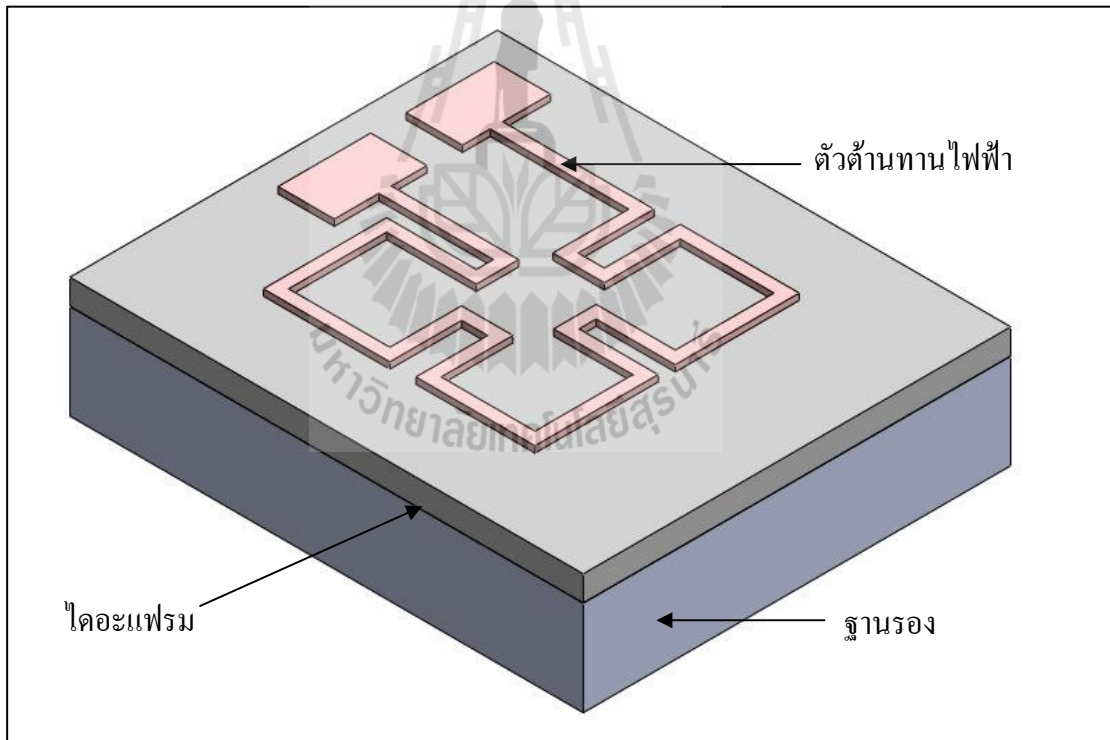
สารละลาย	โลหะ
$H_2O_2 : NH_4OH$ (1 : 10)	เงิน, ทองแดง
$(NH_4)_2S_2O_8$ 20% wt	ทองแดง
$HCL : HNO_3 : DI$ (1 : 1 : 3)	นิโครม
HF 5%	ไทเทเนียม
KOH : Fe	สารไวแสง AZ



## บทที่ 5

### กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

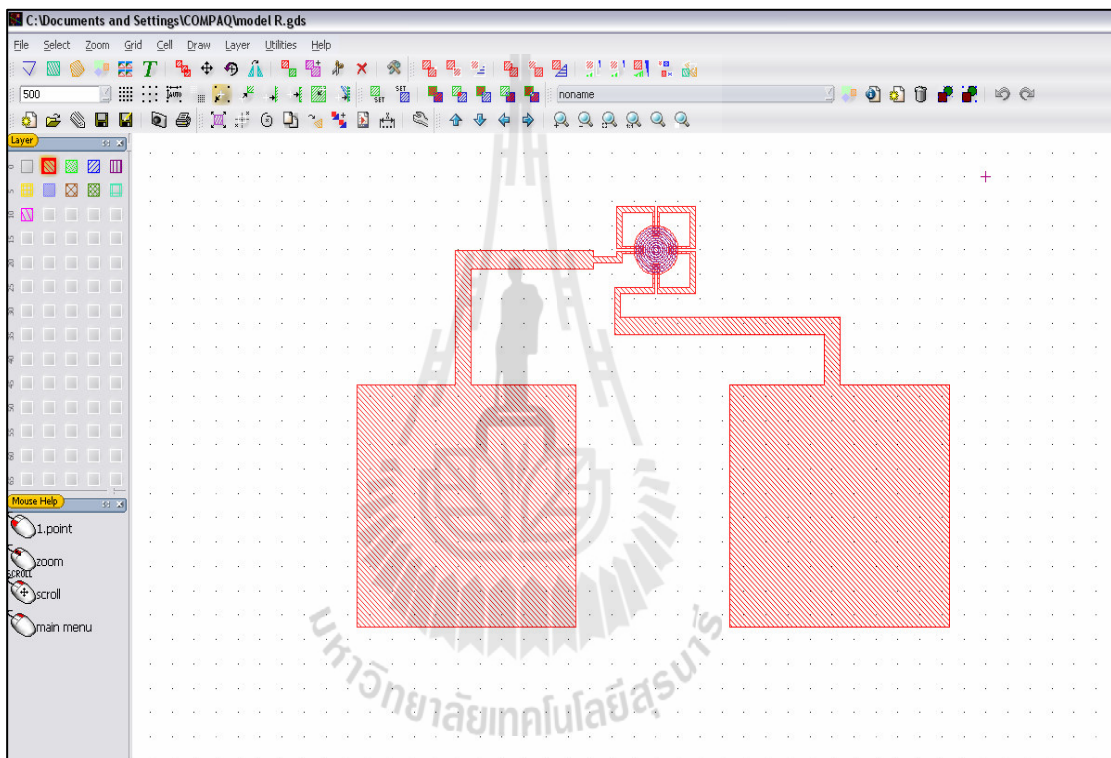
ในบทนี้แนะนำการสร้าง การพัฒนาและการแก้ปัญหาระหว่างการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ มีวิธีการสร้างและการพัฒนา 7 รูปแบบ เพื่อให้ได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ที่มีความแข็งแรง และเหมาะสมในการใช้งานตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวต้านทานที่ออกแบบมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งขนาดของไดอะแฟรมและตัวต้านทานมีขนาดตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 5.1 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้

## 5.1 การวาดค้นแบบลวดลาย

ในการวาดแบบโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดันนี้ใช้โปรแกรม Layout editor แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งโปรแกรมนี้ใช้ออกแบบงานในระดับไมโครเมตรและออกแบบงานลักษณะงานเป็นชั้นซ้อนทับกันได้ โดยตัวตรวจรู้ความดันที่ออกแบบนี้ ออกแบบด้วยกันหลายแบบ มีขนาดนั้นไปอะแพรมที่ต่าง ๆ กันและตัวต้านทาน เมื่อทำการออกแบบเสร็จทำการส่งแบบเพื่อนำไปสร้างฟิล์มบนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นหน้ากากบังแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 5.2 ลักษณะ โปรแกรม Layout editor

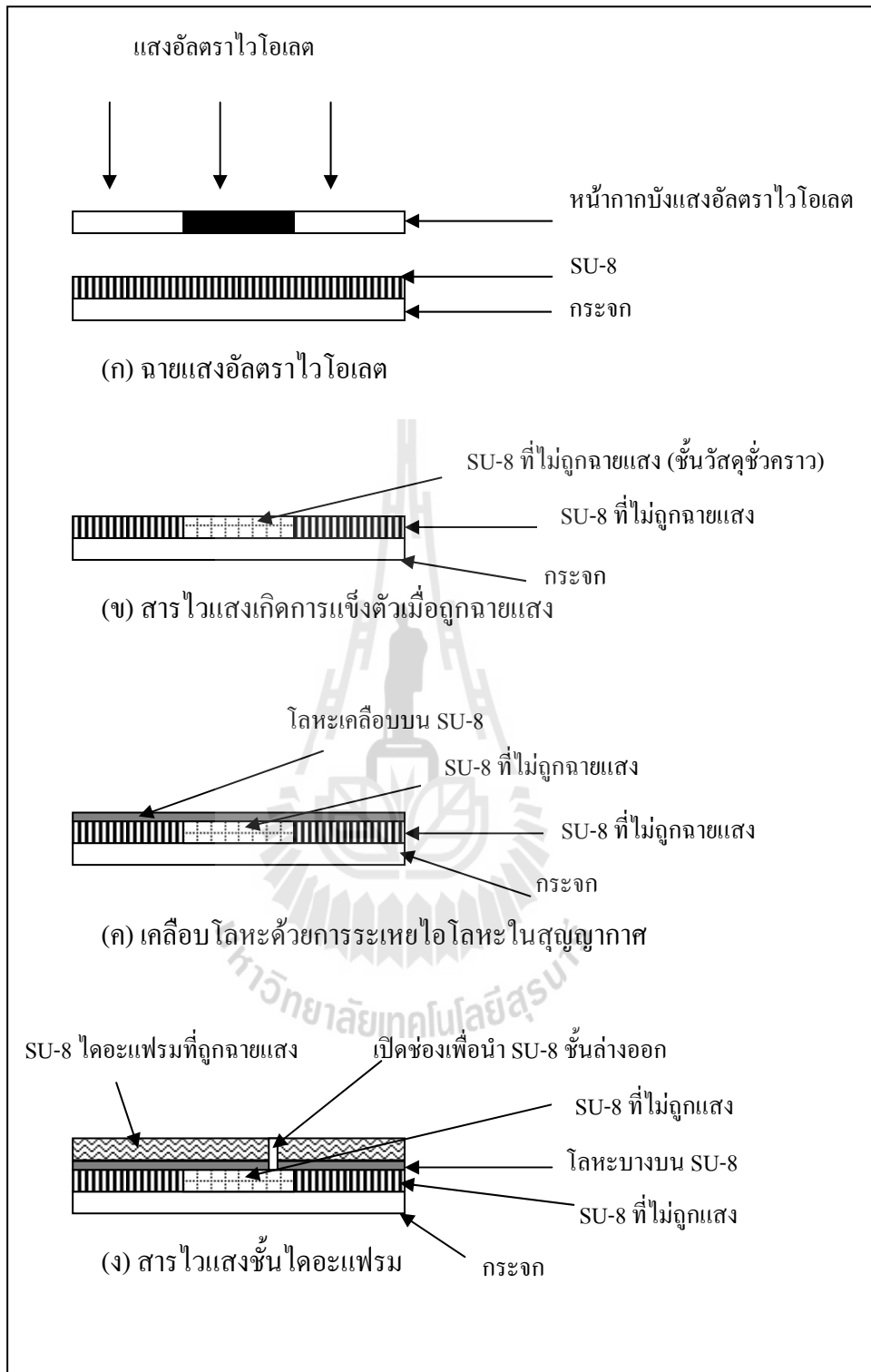
## 5.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันนี้ใช้สารไวแสงชนิดลบหรือ SU-8 ซึ่งเมื่อสารไวแสงชนิดนี้ถูกแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วจะเกิดการแข็งตัว มีลักษณะยื่นหยุ่นเหมือนพอลิเมอร์ จึงนำมาใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุต มีวิธีการสร้างและพัฒนาการสร้างด้วยกันหลายวิธีรายละเอียดดังต่อไปนี้

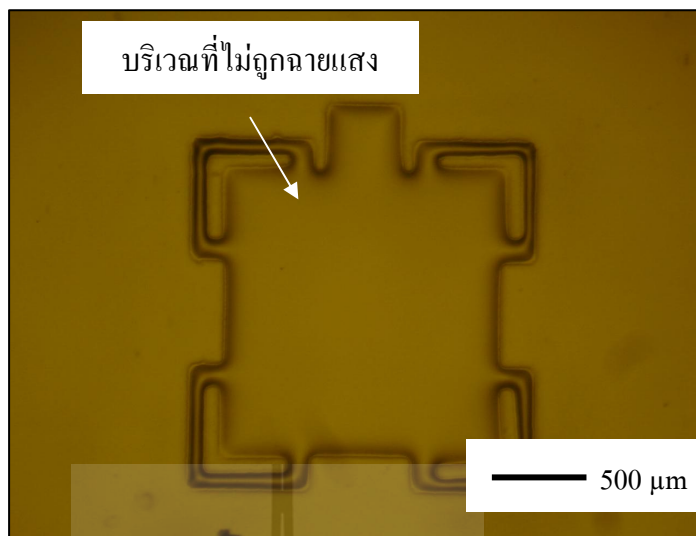
### 5.2.1 การสร้างโคอะเฟรมโดยใช้สารไวแสงชนิดลบ SU-8 เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว

วิธีการสร้างตัวตรวจรู้แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยวิธีนี้จะง่ายต่อการสร้างโคอะเฟรมมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้

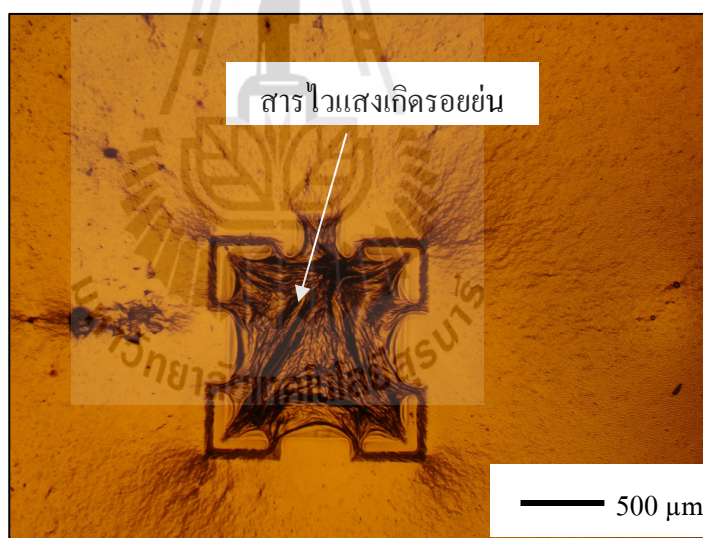
1. ทำความสะอาดกระจก โดยนำสำลีชุบไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ถูบนกระจกให้สะอาด จากนั้นฉีดด้วยอะซิโตน (Acetone) และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง ล้างด้วยน้ำสะอาด (DI Water) แล้วนำไปอัลตราโซนิก 10 นาที จากนั้นเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง นำไปอบที่ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำกระจกหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2050 ความเร็วรอบ 4000 rpm
3. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยค่าพลังงาน 40 mJ/cm<sup>2</sup>
5. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.4
6. นำชิ้นงานหลังจากอบไปเคลือบโลหะด้วยวิธีการระเหยโลหะในสุญญากาศ โดยเคลือบโลหะ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และทองแดง ได้ความหนาเท่ากับ 1006.8Å 371.3Å และ 1111.1Å ตามลำดับ ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างไคอะเฟรมโดยใช้ SU-8 เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายลวดลายที่เกิดหลังฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต



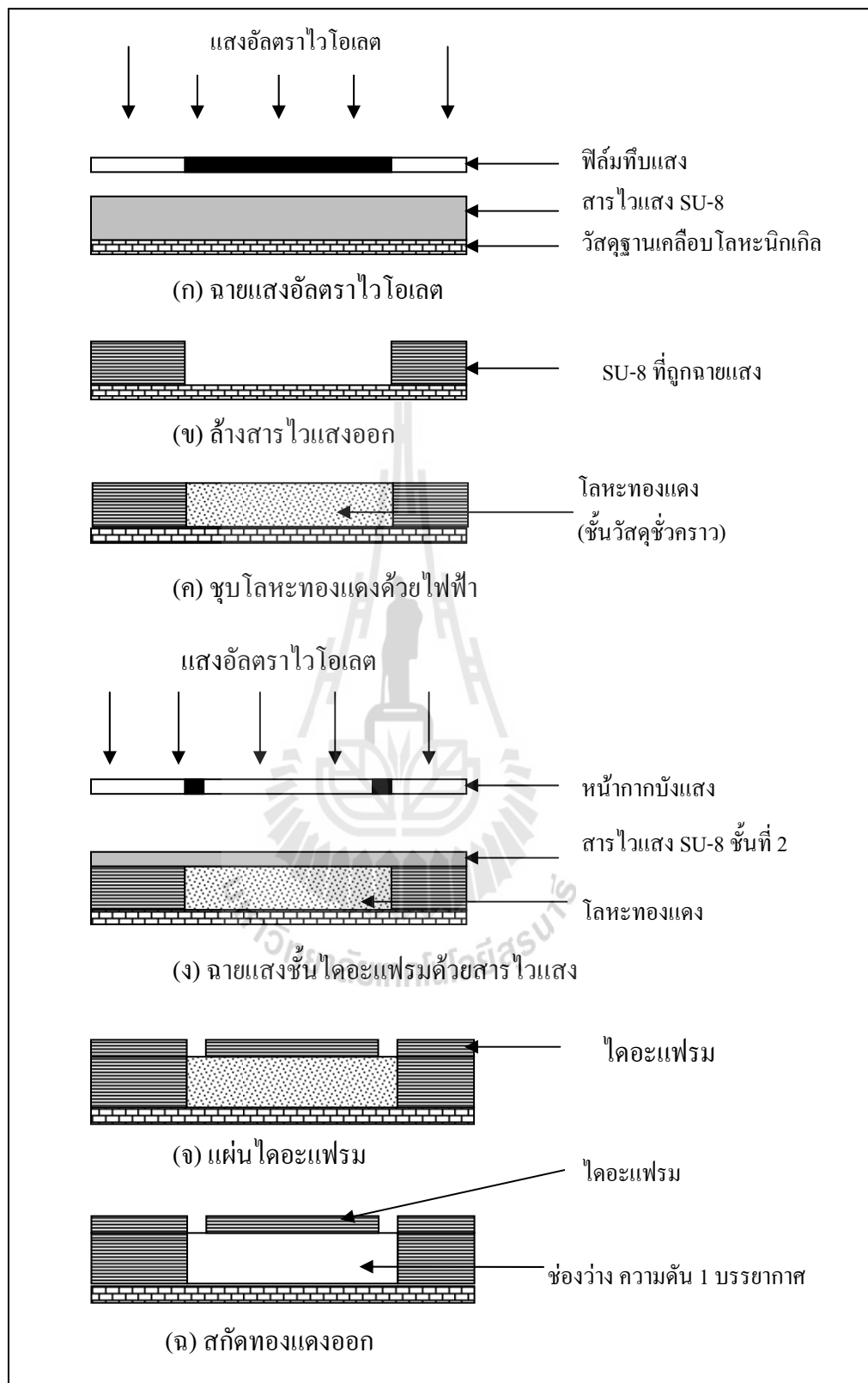
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายบริเวณตรงกลางเกิดรอยร่นเมื่อถูกความร้อนสูงจากการเคลือบโลหะ

จากรูปที่ 5.5 เมื่อทำการเคลือบโลหะในสุญญากาศ เกิดรอยร่นบริเวณที่สารไวแสงไม่ถูกฉายแสง หรือบริเวณตรงกลาง เนื่องจากถูกความร้อน วิธีนี้จึงทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานไปใช้ต่อได้ จึงเปลี่ยนวิธีการสร้างชิ้นงานใหม่โดยใช้ทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราว เมื่อสกัดทองแดงออกแล้วจะได้ไคอะแพรมภายใต้ไคอะแพรมที่อากาศเท่ากับความดัน 1 บรรยากาศ มีวิธีดังต่อไปนี้

### 5.2.2 การสร้างโคอะเฟรมโดยใช้ทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราว

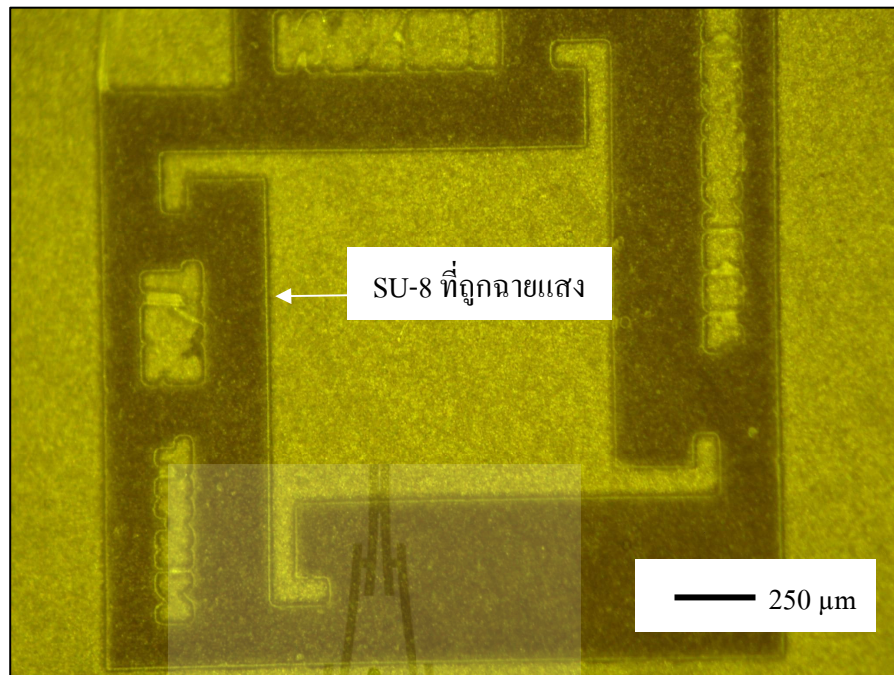
วิธีนี้จะใช้เวลามากขึ้นเนื่องจากการชุบโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า แต่ข้อดีคือได้แผ่นโคอะเฟรมที่มีความเรียบ แข็งแรง คงทน ขั้นตอนการสร้างดังรูปที่ 5.6 มีวิธีการสร้างดังต่อไปนี้

1. นำแผ่นวงจรพิมพ์ยกรายเพื่อให้พื้นผิวขรุขระยี่ดัดได้ดีขึ้น
2. แผ่นวงจรพิมพ์ไปชุบโลหะนิกเกิลเพื่อป้องกันพื้นผิวทองแดงจากสารเคมี
3. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2050 ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm
4. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีหน้ากากลวดลายที่ใช้เดิมโลหะทองแดงด้วยค่าพลังงาน 147.91 mJ/cm<sup>2</sup>
6. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ล้างสารไวแสงได้ชิ้นงานที่เป็นลวดลายดังรูปที่ 5.7 วัดความหนาได้ 40 μm
8. อบด้วยอุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที
9. พลาสมา ด้วยค่าพลังงาน 100 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว
10. จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปชุบโลหะทองแดงด้วยค่ากระแสไฟฟ้า 5 mA เป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมงจึงเต็ม จากนั้นนำไปขัดเรียบได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.8
11. หมุนเคลือบสารไวแสงชั้นที่สองเพื่อทำเป็นโคอะเฟรม โดยหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2050 ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm
12. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
13. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีหน้ากากลวดลายโคอะเฟรม ด้วยค่าพลังงาน 147.91 mJ/cm<sup>2</sup>
14. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
15. ล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงจึงได้ชิ้นงานที่เป็นโคอะเฟรมดังรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นช่องเปิดไว้สำหรับการสกัดทองแดงออก
16. อบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที
17. สกัดทองแดงออกด้วยสารเคมี (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 20%(wt) เมื่อเวลาผ่านไป 27 ชั่วโมง จึงทำสกัดทองแดงหมดได้โคอะเฟรม ดังรูปที่ 5.10

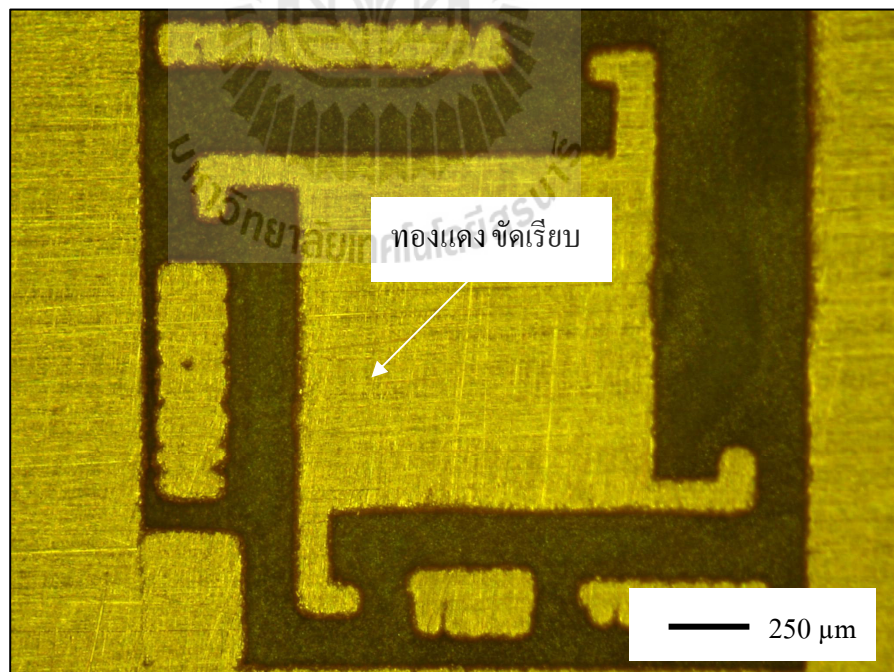


รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการสร้างไดอะแฟรมโดยใช้ทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราว



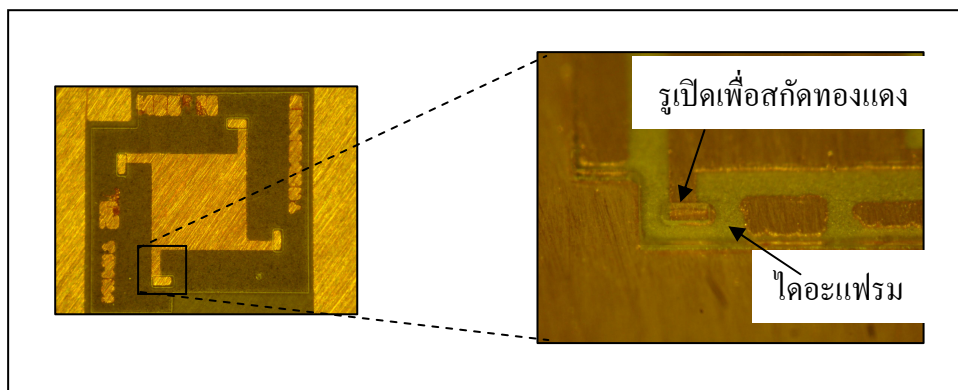


รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายลวดลายเพื่อใช้ในการชุบโลหะทองแดง



รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายทองแดงถูกชุบให้เรียบ

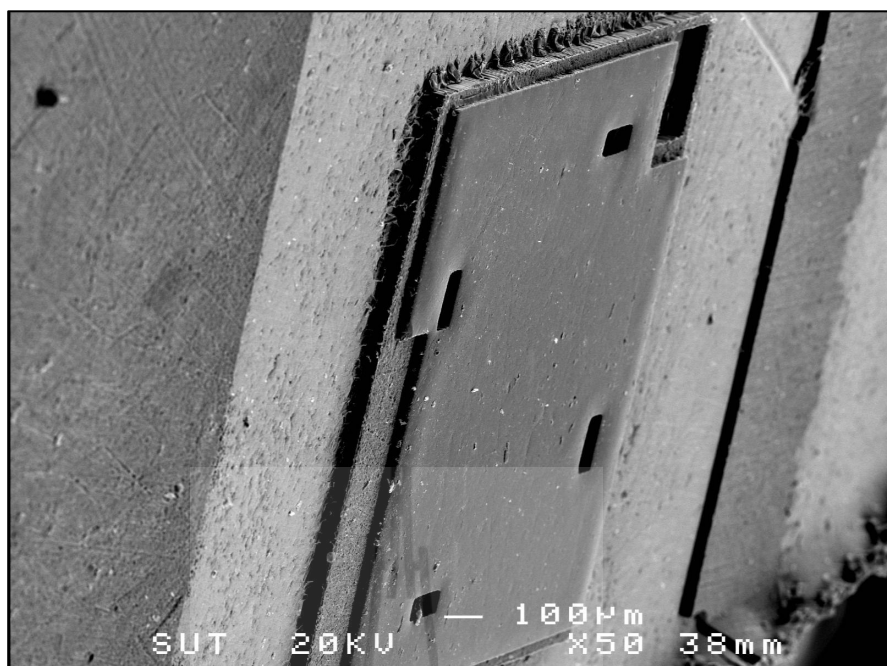




รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายสารไวแสงชั้นไดอะแฟรม



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายการกัดทองแดง (ก) เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง  
(ข) เวลาผ่านไป 27 ชั่วโมงจึงกัดทองแดงได้หมด



รูปที่ 5.11 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างของตัวตรวจรู้

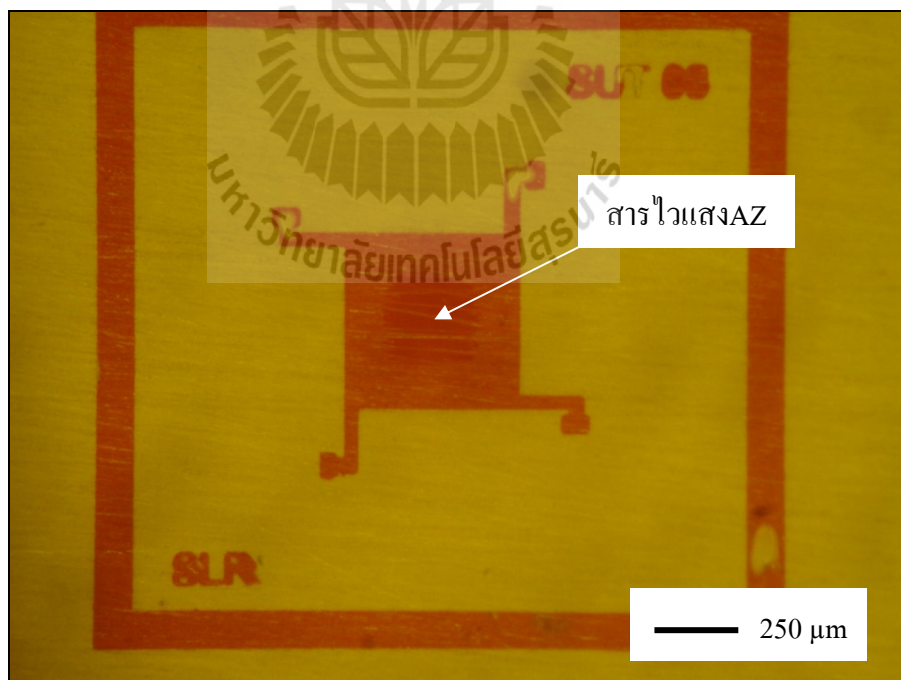
เมื่อทำการกัดทองแดงหมด นำชิ้นงานไปแช่ในแอลทานอลเพื่อให้แอลทานอลเข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ใต้โคอะแพรม จากนั้นนำชิ้นมาทิ้งไว้ในอากาศ ทิ้งให้แห้งไม่มีฟองอากาศภายใน โครงสร้างที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังภาพถ่าย SEM รูปที่ 5.11 ซึ่งจากการสร้างด้วยวิธีนี้ใช้เวลาในการกัดทองแดงเป็นเวลานานเกินไป จึงได้พัฒนากระบวนการสร้างวิธีใหม่คือ เปลี่ยนจากการใช้โลหะทองแดงเป็นชั้นวัสดุชั่วคราวมาเป็นสารไวแสงชนิดบวกหรือ AZ แทนเพื่อลดเวลาในการสกัดทองแดง รายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

### 5.2.3 การสร้างโคอะแพรมโดยใช้ AZ เป็นวัสดุชั่วคราว

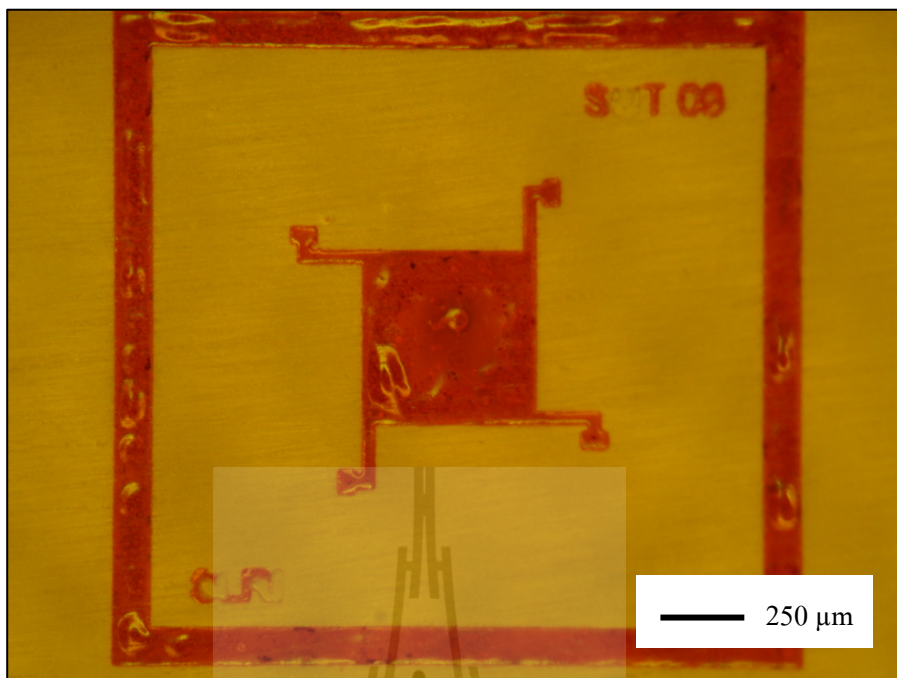
วิธีนี้จะเติมสารไวแสงชนิดบวกลงไปแทนการเติมโลหะทองแดง ดังขั้นตอนที่ 5.2.2 เพื่อจะได้ลดระยะเวลาให้น้อยลง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดกระจกด้วยอะซิโตน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และ น้ำสะอาด จากนั้นอบให้แห้ง
2. นำแผ่นกระจกหมุนเคลือบสาร ไวแสง SU-8 2050 ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm
3. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีหน้ากากลวดลายที่เป็นแม่พิมพ์เพื่อเติมสารไวแสง ด้วยค่าพลังงาน  $120.9 \text{ mJ/cm}^2$
5. อบที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาทีจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง
7. อบที่อุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที
8. ชั่งงานที่ได้นำไปพลาสมาด้วยค่าพลังงาน 100 วัตต์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว
9. นำไปเติมสารไวแสงในแม่พิมพ์ที่ได้ โดยการหมุนเคลือบสารไวแสง AZ 4620 ด้วยความเร็ว 4000 rpm จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องจากนั้นนำไปขัดเรียบด้วยกระดาษทราย ดังรูปที่ 5.12
10. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยค่าพลังงาน  $740.25 \text{ mJ/cm}^2$  และอบด้วยอุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 60 นาที ปรากฏว่าบริเวณผิวหน้าของสารไวแสง AZ ไม่เรียบ เนื่องจากถูกความร้อน ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายสารไวแสง AZ เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว



รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายแสดงบริเวณผิวหน้าสารไวแสงเกิดฟองอากาศ

จากรูปที่ 5.13 บริเวณผิวหน้าของสารไวแสง AZ ไม่เรียบ เกิดฟองอากาศเนื่องจากการถูกความร้อน ไม่สามารถนำไปใช้งานต่อไป จึงได้พัฒนาการสร้างตัวตรวจรู้ต่อไปโดยเปลี่ยนวิธีการสร้างเป็นการนำไดอะแฟรมมาประกบติดกับวัสดุฐาน ซึ่งใช้เวลาในการสร้างที่น้อยกว่าเดิม มีรายละเอียดดังนี้

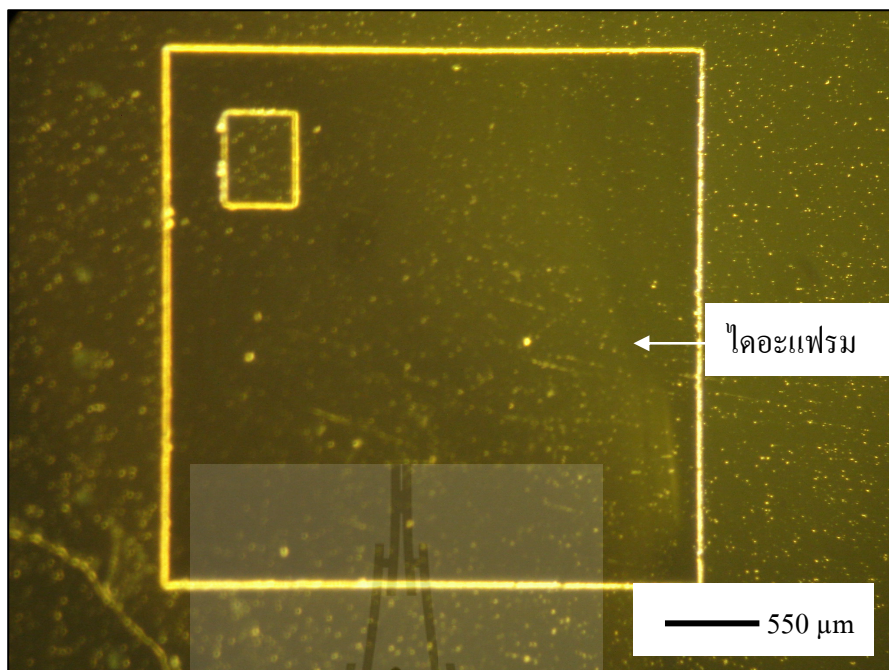
#### 5.2.4 การสร้างตัวตรวจรู้โดยนำไดอะแฟรมมาประกบติดกับวัสดุฐาน

จากวิธีทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วมีความยุ่งยากในการเติมสารไวแสงหรือโลหะให้เต็ม จึงได้เปลี่ยนวิธีการสร้างตัวตรวจรู้ และ โครงสร้างของตัวตรวจรู้ เพื่อให้ง่ายขึ้น รายละเอียดต่อไปนี้

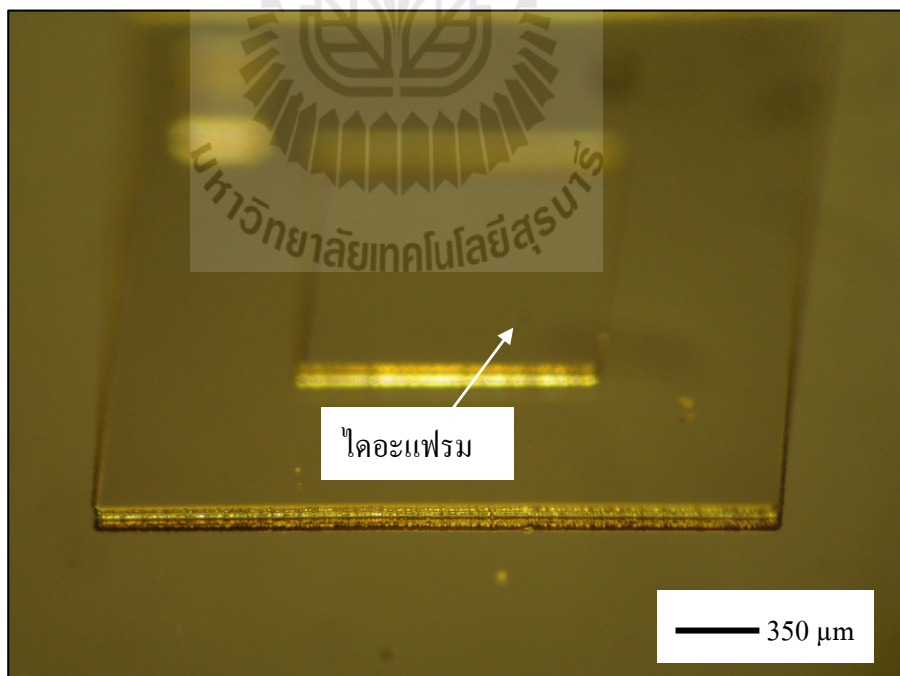
1. นำกระจกที่เคลือบโลหะไทเทเนียมและทองแดงหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2050 ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm
2. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเพิ่มเป็น 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีหน้ากากลายนแผ่นไดอะแฟรม ด้วยค่าพลังงาน 102.55 mJ/cm<sup>2</sup>

4. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีและ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น  
ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง
6. อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 30 นาที ได้แผ่นไดอะแฟรมดังรูปที่ 5.14
7. นำไดอะแฟรมที่ได้หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 ชั้นที่สอง ด้วยความเร็วรอบ  
2000 rpm
8. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีและ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น  
ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
9. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีหน้ากากลยส่วนที่เป็นฐานด้วยค่าพลังงาน  
200 mJ/cm<sup>2</sup>
10. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีและ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น  
ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
11. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง
12. อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 30 นาที ได้แผ่นส่วนที่เป็นไดอะแฟรมและฐาน
13. นำไดอะแฟรมและฐานที่ได้ไปกัดในสารเคมีที่กัดโลหะ เพื่อให้แผ่น  
ไดอะแฟรม หลุดออกมาจากระจกดังรูปที่ 5.15
14. นำกระจกสะอาดหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2002 ด้วยความเร็วรอบ  
5000 rpm
15. นำแผ่นไดอะแฟรมที่ได้จากขั้นตอนที่ 13 มาประกบติดบนกระจกที่หมุน  
เคลือบสารไวแสง
16. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาทีและ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นรอ  
ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง
17. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตทั่วทั้งชิ้นงานเพื่อให้ SU-8 2002 แข็งตัวจะยึดติดกับ  
ไดอะแฟรมที่นำไปประกบดังรูปที่ 5.16
18. นำหน้ากากลยแบบโลหะ निकเกิดที่เป็นลวดลายตัวด้านทานมาประกบติด  
ชิ้นงาน เพื่อนำไปเคลือบโลหะนิโครมในสุญญากาศ ซึ่งลายของตัวด้านทานแสดงดังรูปที่ 5.17  
และเมื่อนำไปเคลือบโลหะในสุญญากาศได้ตัวด้านทานอยู่บนโครงสร้างของตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 5.18

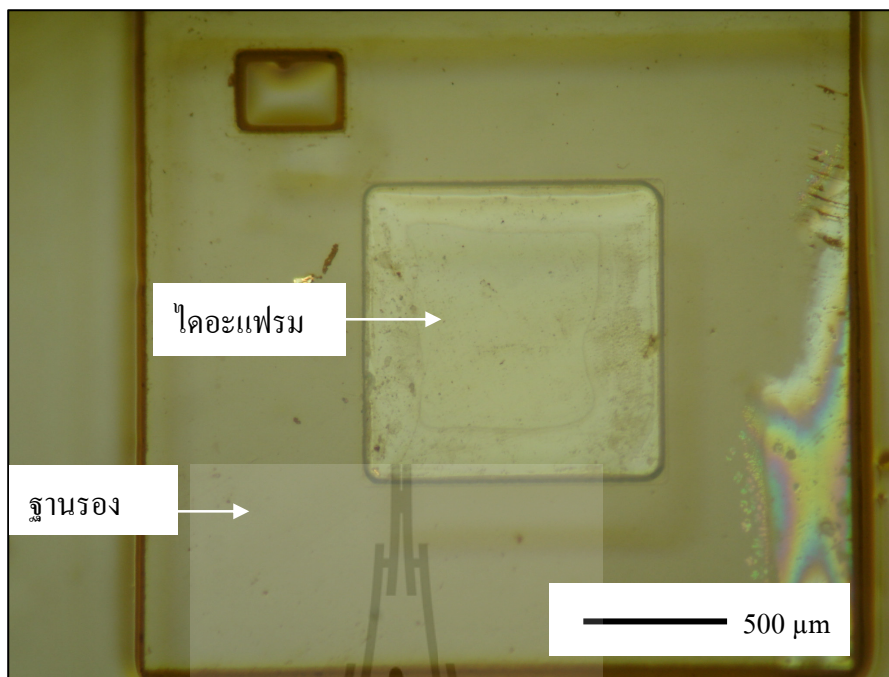




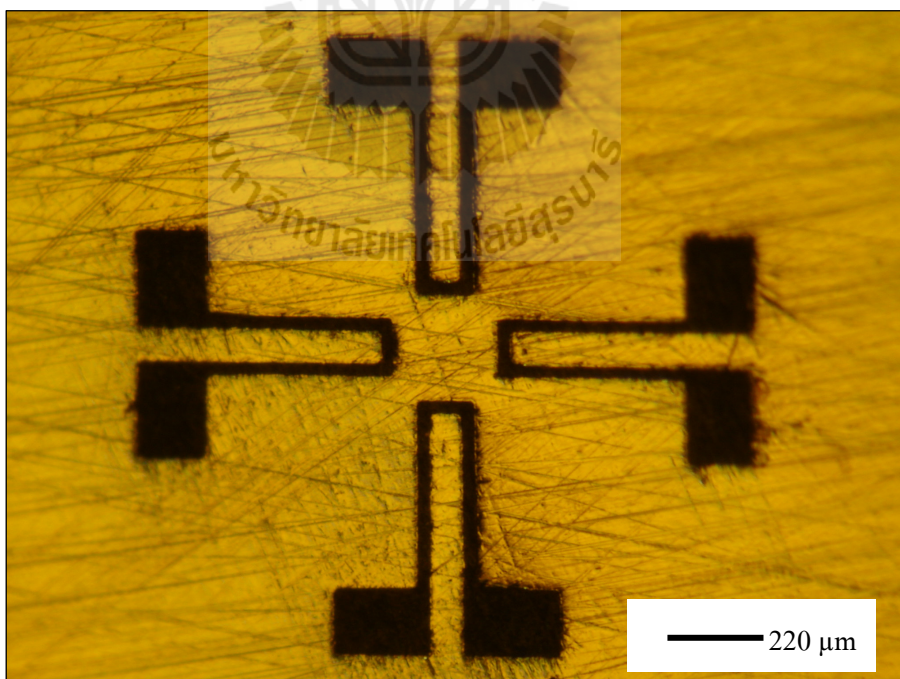
รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายแผ่นไดอะแฟรมหนา 30  $\mu\text{m}$



รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายสารไวแสงชั้นที่สองที่เป็นฐาน

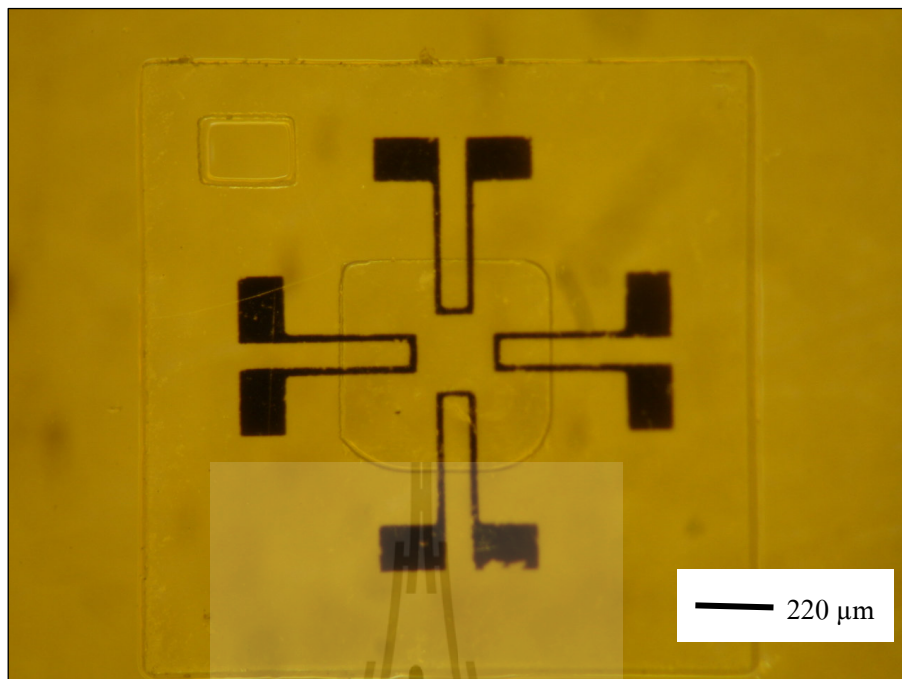


รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายไดอะแฟรมที่ยึดติดกับฐาน

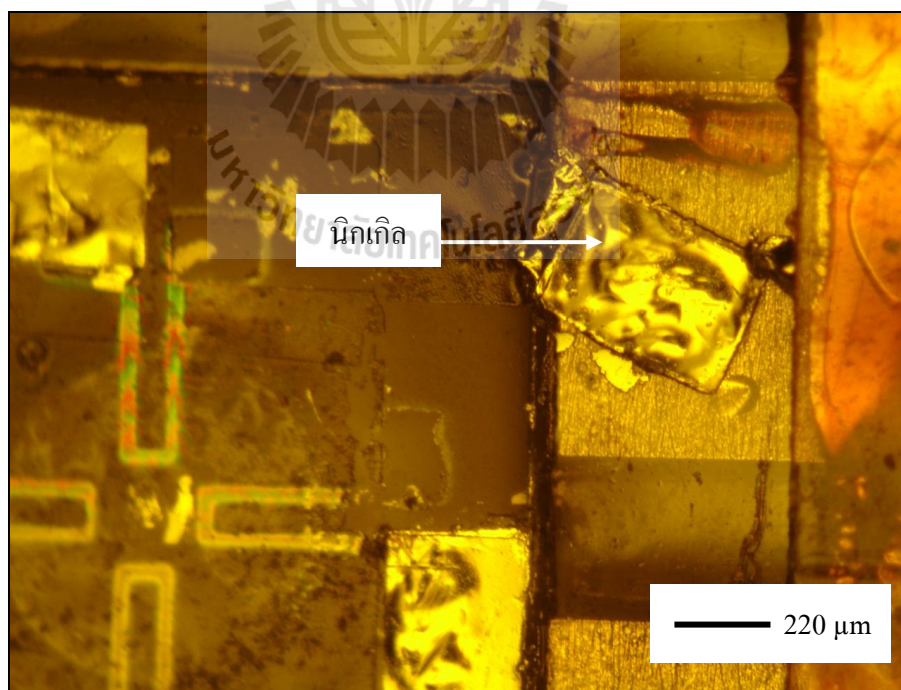


รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายหน้ากากแข็งแบบโลหะนิกเกิลละลายตัวด้านทาน





รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายตัวต้านทานบนโอะอะเฟรม



รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายบริเวณที่เชื่อมต่อสายถูกชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

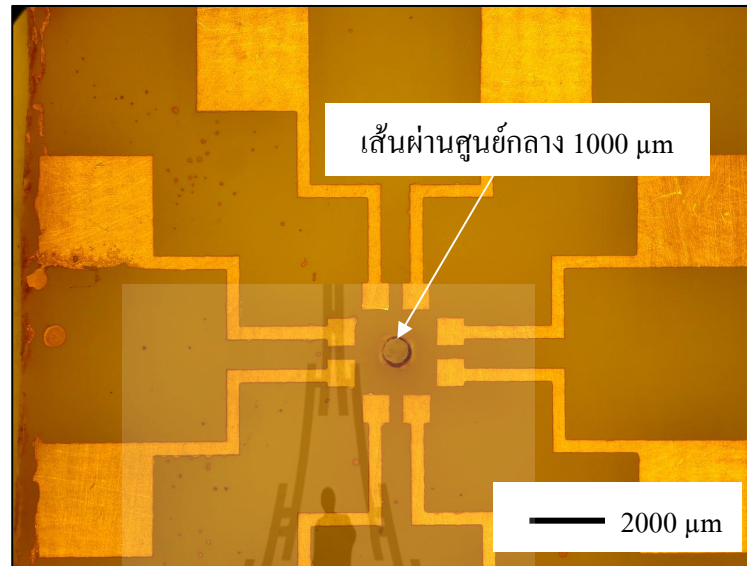


จากรูปที่ 5.18 ตัวตรวจรู้ที่ได้จะนำไปต่อเชื่อมสายด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย (Wire Bonding) ปรากฏว่าไม่สามารถต่อเชื่อมสายบริเวณที่ต่อสายได้ เนื่องจากบริเวณที่ต่อสายนี้อยู่บนแผ่นไคอะแพรมที่เป็นสารไวแสง SU-8 ซึ่งมีความอ่อนตัว ยืดหยุ่นไม่สามารถใช้เครื่องต่อเชื่อมสายนี้ได้ จึงได้นำไปชุบโลหะนิกเกิลบริเวณที่ต่อสายเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แต่เมื่อชุบโลหะนิกเกิลแล้ว บริเวณที่ต่อสายนี้หลุดออกจาก SU-8 ไคอะแพรมดังรูปที่ 5.19 ไม่สามารถนำไปใช้ต่อได้ จึงได้เปลี่ยนการสร้างตัวตรวจรู้โดยการนำแผ่นไคอะแพรมมาประกบติดบนแผ่นฐานวงจรพิมพ์ที่มีลายที่เชื่อมต่อสายแล้ว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

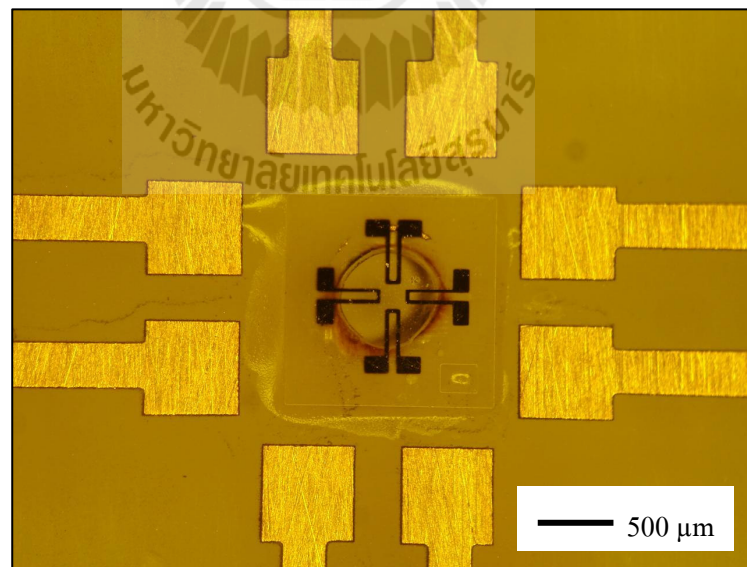
### 5.2.5 การสร้างตัวตรวจรู้โดยนำไคอะแพรมมาประกบติดบนวัสดุฐานที่มีที่เชื่อมต่อสาย

1. นำแผ่นวงจรพิมพ์เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  กัดลายเพื่อที่ต่อวงจรเข้ากับตัวตรวจรู้ ลักษณะดังรูปที่ 5.20
2. นำแผ่นไคอะแพรมมาประกบติดบริเวณรูบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวอีพ็อกซี จากนั้นนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 95 °C เพื่อให้กาวอีพ็อกซีแห้งเร็วขึ้น
3. นำน้ำกากแห้งมาปิดทับบริเวณไคอะแพรมเพื่อนำไปเคลือบโลหะนิกโครมในสุญญากาศ
4. ทำการเคลือบโลหะนิกโครมด้วยการระเหยในสุญญากาศ ได้ดังรูปที่ 5.21
5. นำชิ้นงานที่ได้หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2002 ด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm
6. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มเป็น 95 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีหน้ากากลากเปิดเฉพาะบริเวณที่เชื่อมต่อสาย ด้วยค่าพลังงาน 110.52  $\text{mJ}/\text{cm}^2$
8. อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มเป็น 95 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
9. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง SU-8
10. อบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 20 นาที ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.22
11. นำไปเคลือบโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง โดยสปัตเตอร์ริงโลหะเงินด้วยค่าพลังงาน 200 วัตต์ 45 นาที ได้ความหนาของเงินเท่ากับ 0.6  $\mu\text{m}$
12. หมุนเคลือบสารไวแสง AZ 1512 ด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm อบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
13. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยค่าพลังงาน 110  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  ด้วยหน้ากากลากลายที่เชื่อมต่อสายจากตัวด้านทานยังที่แผ่นวงจรพิมพ์

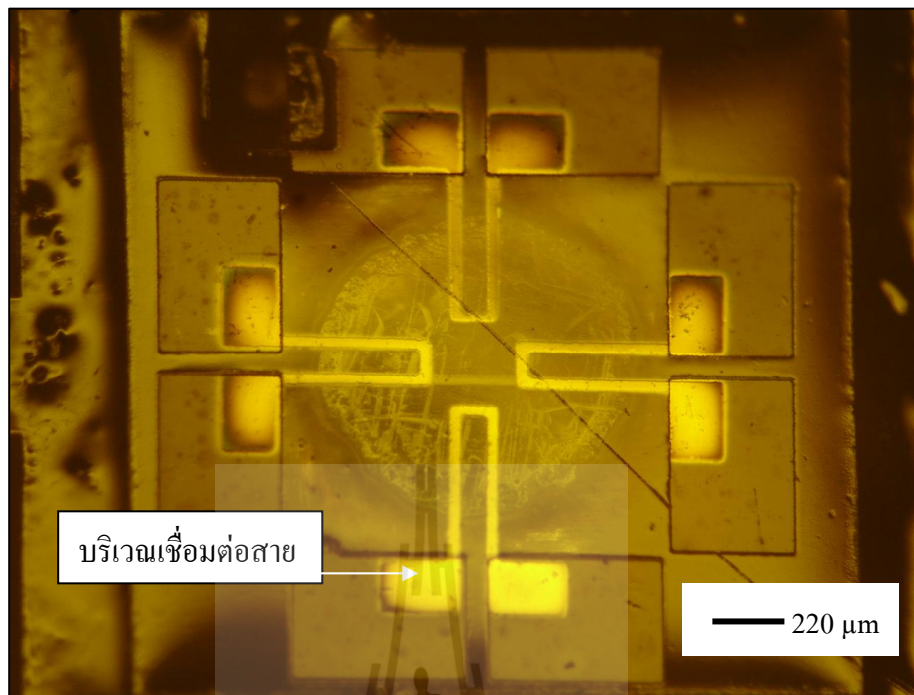
14. นำไปกัดด้วยสารละลายกัดเงิน จากนั้นล้างสารไวแสง AZ ออก ด้วยอะซิโตน  
ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.23



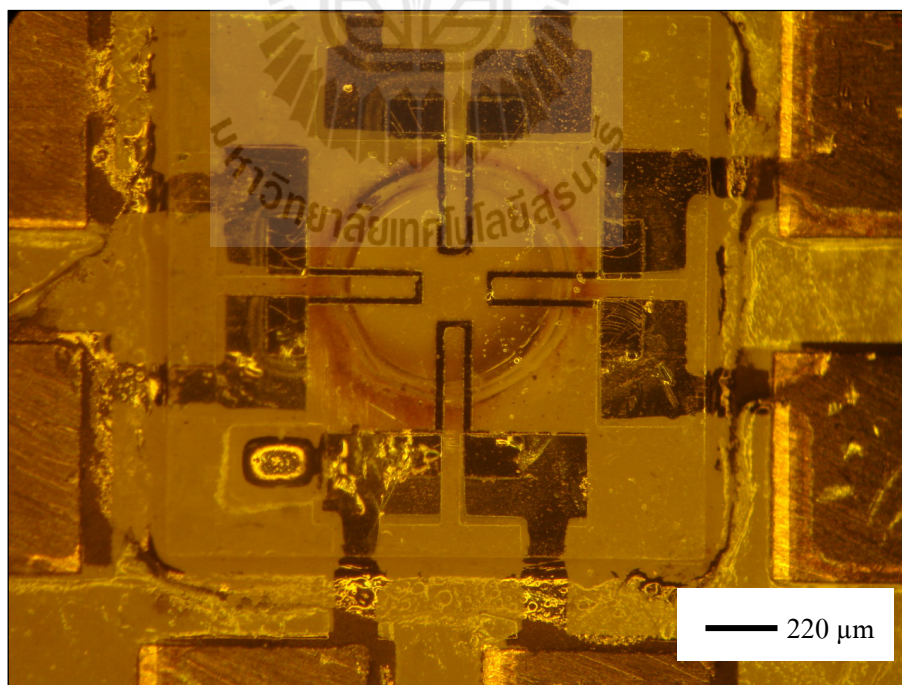
รูปที่ 5.20 ภาพถ่ายแผ่นวงจรพิมพ์ที่ถูกกัดลายเพื่อเชื่อมต่อสาย



รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายไดอะแฟรมบนแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายแสดงบริเวณที่เชื่อมต่อสาย



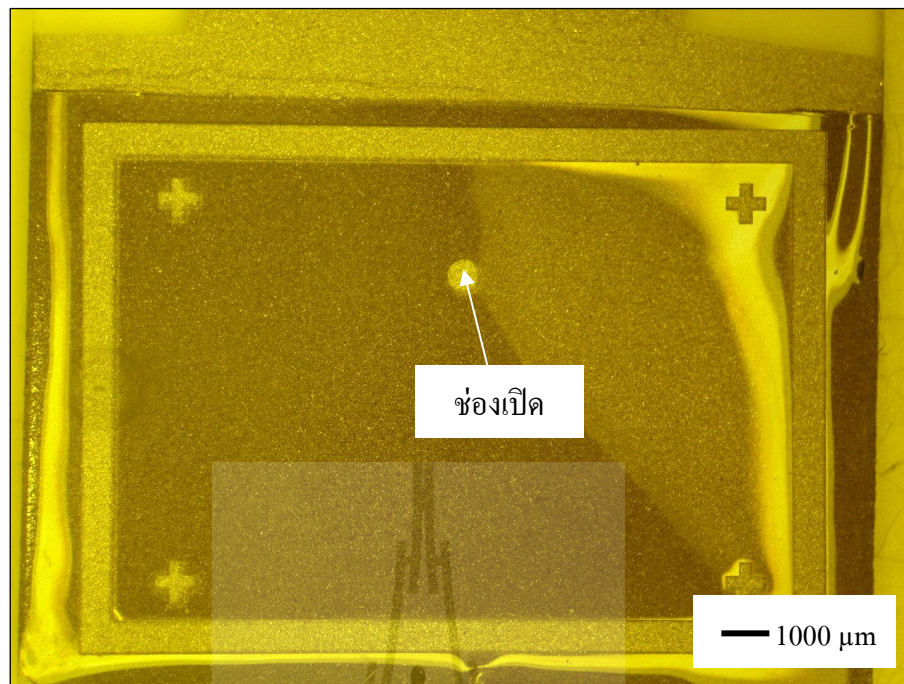
รูปที่ 5.23 ภาพถ่ายชิ้นงานถูกสปีดเตอรริงเพื่อเชื่อมต่อตัวต้านทานและแผ่นวงจรพิมพ์

จากรูปที่ 5.23 เนื่องจากไดอะแฟรมมีความต่างระดับกับวัสดุฐาน ทำให้การเชื่อมต่อสายนี้ไม่ดีนัก ไม่สามารถเชื่อมต่อได้ทั้งหมด จึงได้เปลี่ยนโครงสร้างของตัวตรวจรู้ใหม่ ดังนี้เพื่อให้ไม่มีความต่างระดับของบริเวณเชื่อมต่อสายไฟและไดอะแฟรม

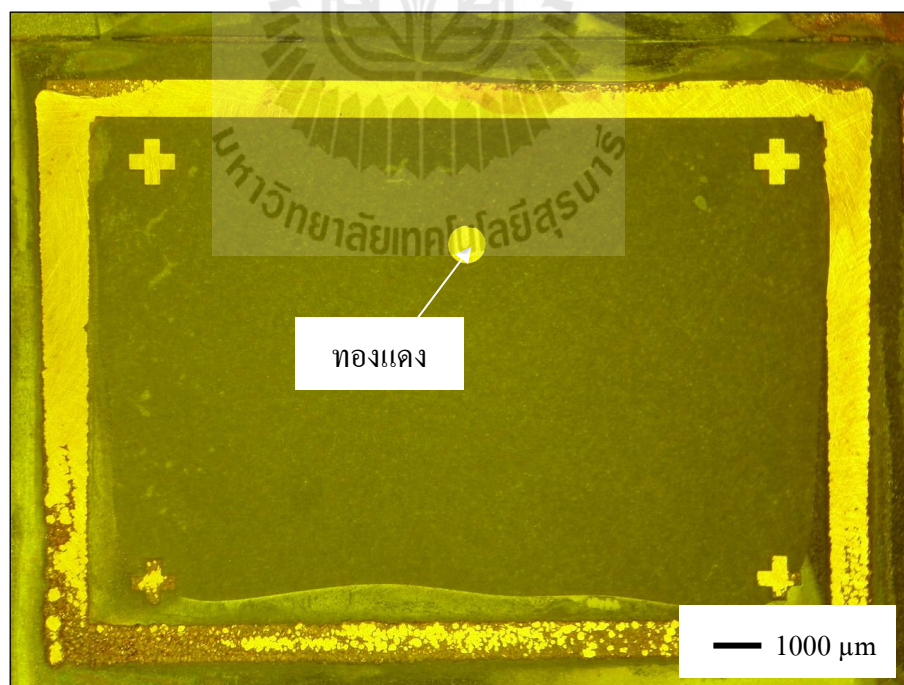
#### 5.2.6 การสร้างตัวตรวจรู้โดยใช้โลหะนิเกิลเป็นวัสดุฐาน

1. นำกระจกยิงทรายเคลือบโลหะไทเทเนียมและนิเกิลด้วยการระเหยโลหะในสุญญากาศ
2. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2100 ให้ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 65 °C นาน 10 นาที และ 95 °C นาน 6 ชั่วโมง
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยค่าพลังงาน 998.4  $\text{mJ}/\text{cm}^2$
4. อบหลังฉายแสงด้วยอุณหภูมิ 65 °C นาน 10 นาที และ 95 °C นาน 20 นาที
5. ล้างสารไวแสงออกจะได้ลวดลายดังรูปที่ 5.24
6. อบหลังฉายแสงด้วยอุณหภูมิ 120 °C นาน 45 นาที
7. นำไปเติมโลหะทองแดงลงในรู ด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้เต็มแล้วนำไปขัดให้เรียบได้ดังรูปที่ 5.25
8. นำไปต้มในสารละลายเพื่อสกัดสารไวแสง SU-8 ที่แข็งตัวออกได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.26
9. ทำการชุบโลหะด้วยนิเกิลให้ทั่วทั้งแผ่น แล้วขัดให้เรียบ ได้รูปดังชิ้นที่ 5.27
10. นำไปยังทรายบริเวณกระจกที่เป็นฐานด้านล่าง เพื่อกำจัดกระจกออกให้หมด
11. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อสร้างเป็นไดอะแฟรมที่มีความหนา 40  $\mu\text{m}$
12. นำไปสกัดทองแดงออก เพื่อให้ได้ไดอะแฟรมที่ลอยในอากาศดังรูปที่ 5.28

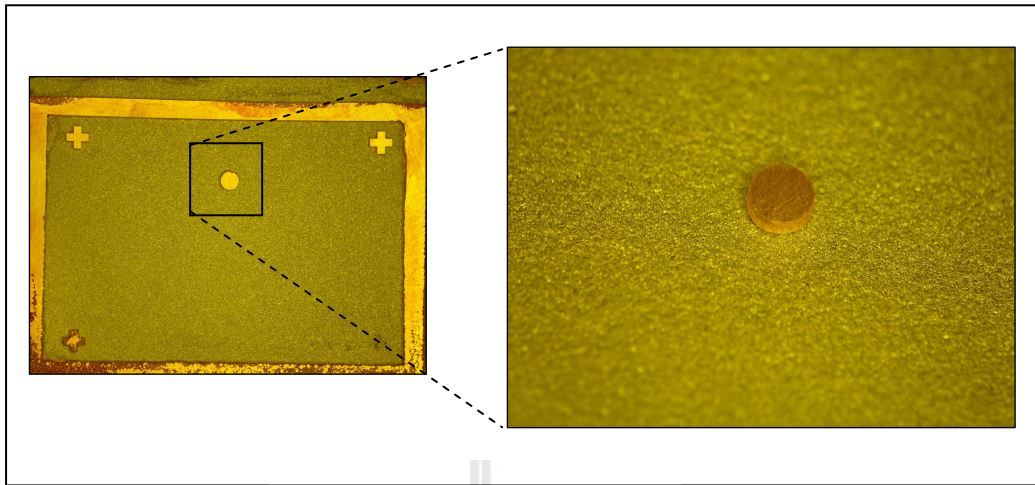




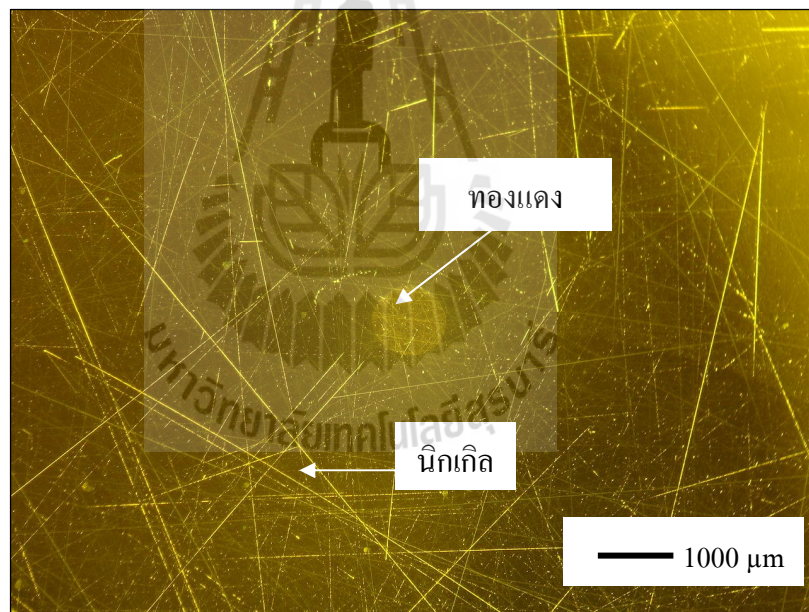
รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายสารไวแสงเพื่อเตรียมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายเมื่อเติมโลหะทองแดงด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

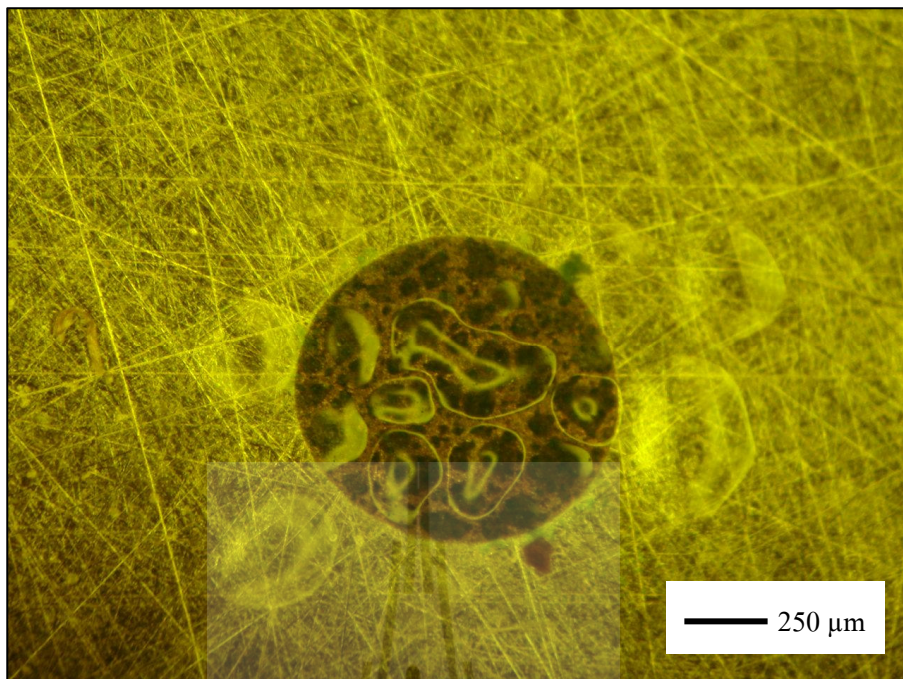


รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายแสดงแท่งโลหะทองแดงเมื่อทำการสกัดสารไวแสงทิ้ง



รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายโลหะนิกเกิลและทองแดง

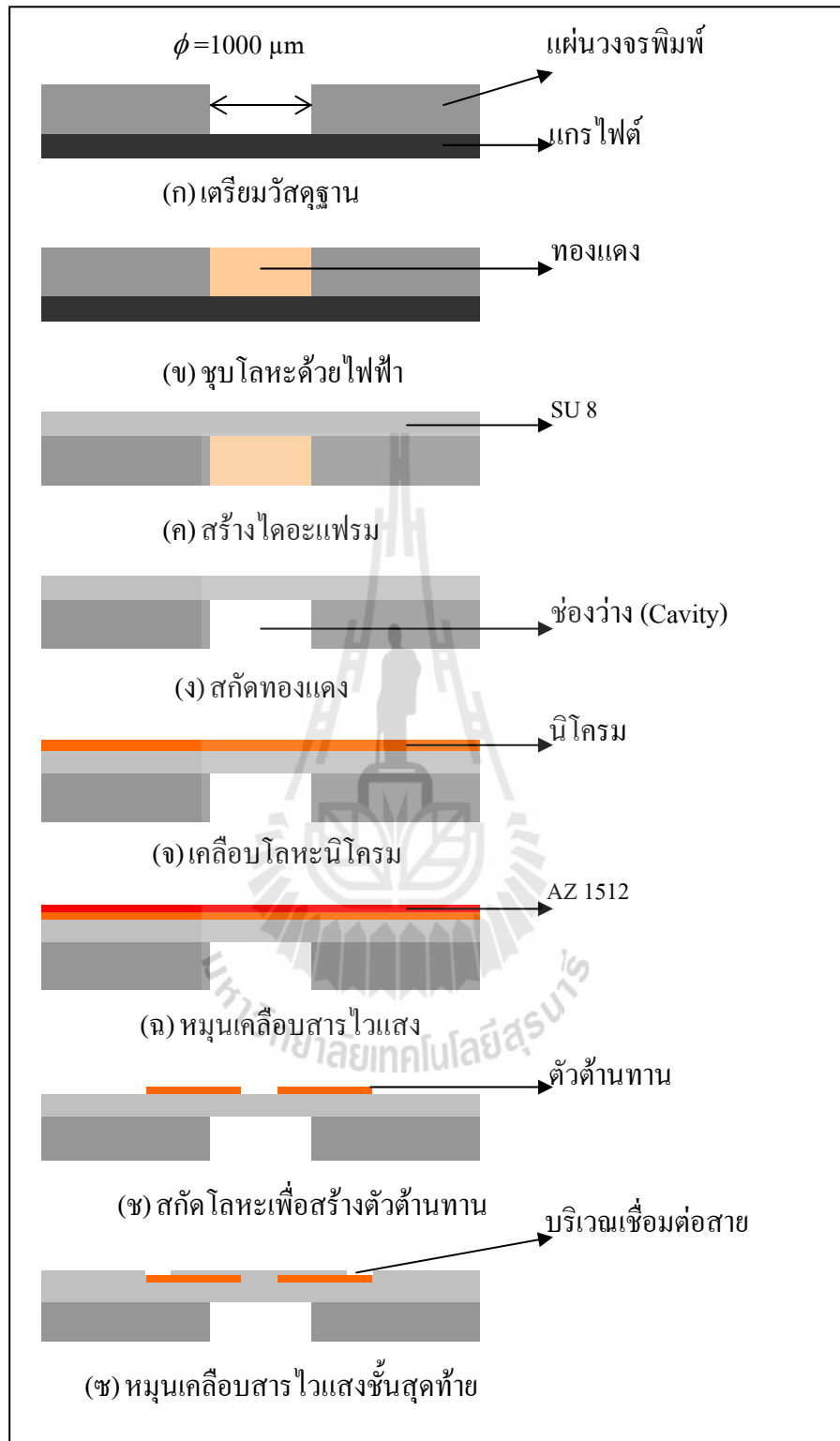




รูปที่ 5.28 ภาพถ่าย SU-8 ไลอะเฟรมบนฐานนิกเกิล

จากรูปที่ 5.28 บริเวณพื้นผิวของนิกเกิลและ SU-8 นั้นยึดเกาะกันไม่ดีพอ จึงทำให้ SU-8 หลุดลอกออกจากนิกเกิล อาจเนื่องมาจากการแช่ในสารละลายสกัดทองแดงนานเกินไป จึงได้พัฒนาการสร้างตัวตรวจรู้ใหม่โดยการใช้ฐานเป็นแผ่นวงจรพิมพ์แทน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการสร้างดังรูปที่ 5.29

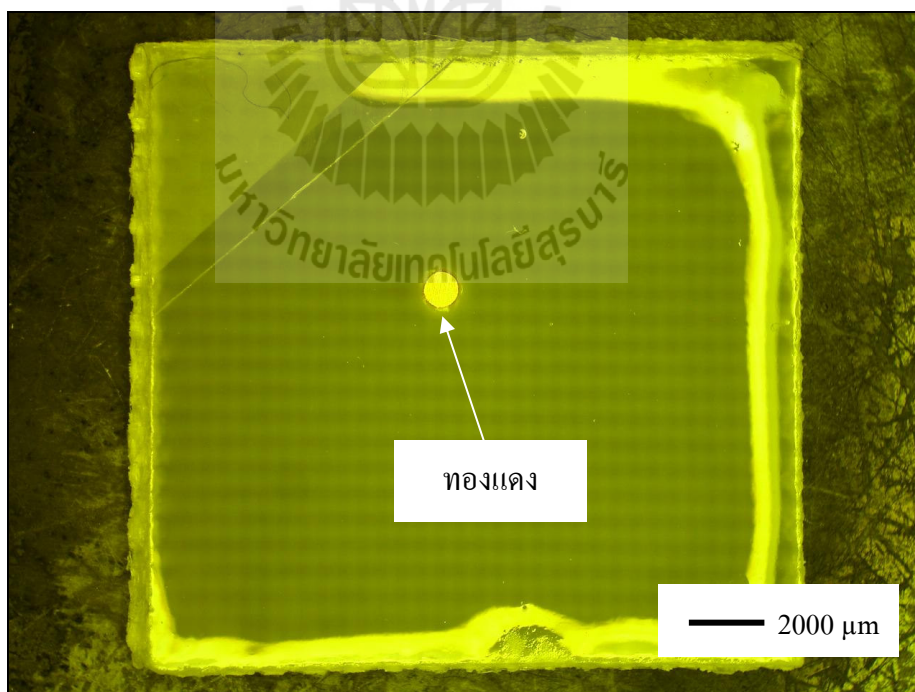


รูปที่ 5.29 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ด้วยแผ่นวงจรพิมพ์

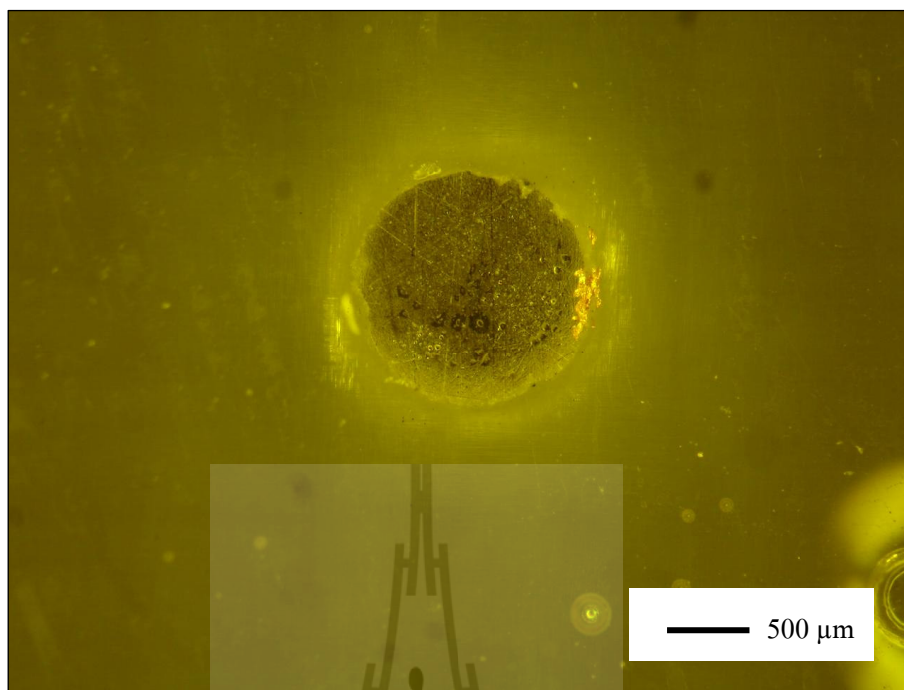


### 5.2.7 การสร้างตัวตรวจรู้โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์เจาะรูเป็นวัสดุฐาน

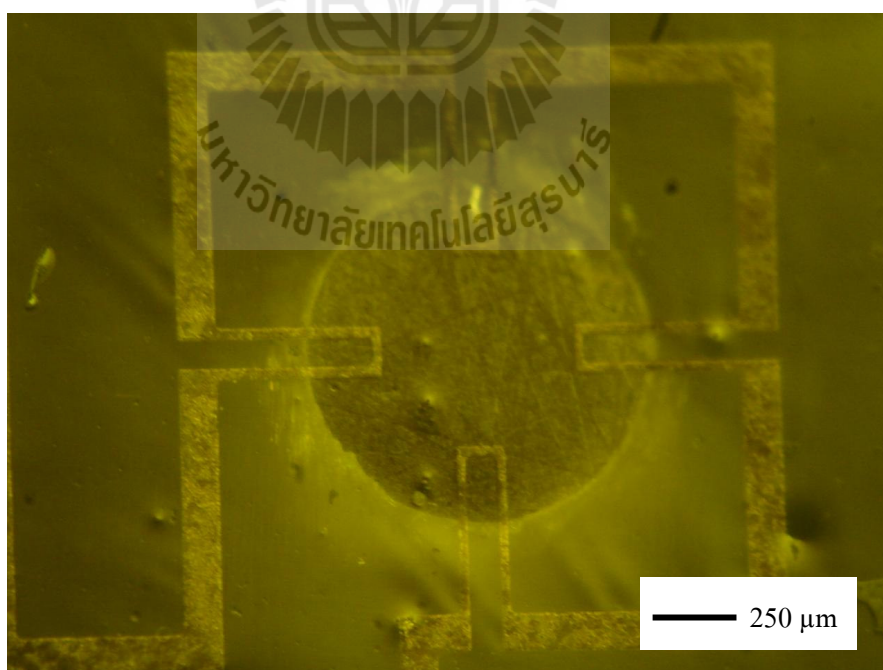
1. นำแผ่นแกรไฟต์ประกบติดด้านหลังของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีรูขนาด 1 mm เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปชุบโลหะทองแดงให้เต็มรู แล้วขัดทองแดงให้เรียบ
2. นำไปหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยค่าพลังงาน  $285 \text{ mJ/cm}^2$  ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.30  
ชั้นของสารไวแสง SU-8 มีความหนา  $40 \mu\text{m}$
4. นำไปสกัดทองแดงออกด้วยสารเคมี โดยแช่ในสารเคมีและใส่ในเครื่องเมกะโซนิกช่วยในการสกัด เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการสกัดทองแดงให้น้อยลง จะได้โคอะเฟรม SU-8 ดังรูปที่ 5.31
5. นำชิ้นงานมาเคลือบโลหะนิโครมด้วยการเคลือบโลหะในสุญญากาศผ่านหน้ากากแข็งเพื่อสร้างตัวต้านทาน ได้ดังรูปที่ 5.32
6. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2002 ด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm เพื่อให้ได้ความหนาที่บางที่สุดประมาณ  $1\text{-}2 \mu\text{m}$  นำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตให้แข็งทั้งหมด เปิดเฉพาะบริเวณต่อสายได้ชิ้นงาน



รูปที่ 5.30 ภาพถ่าย SU-8 บนแผ่นวงจรพิมพ์

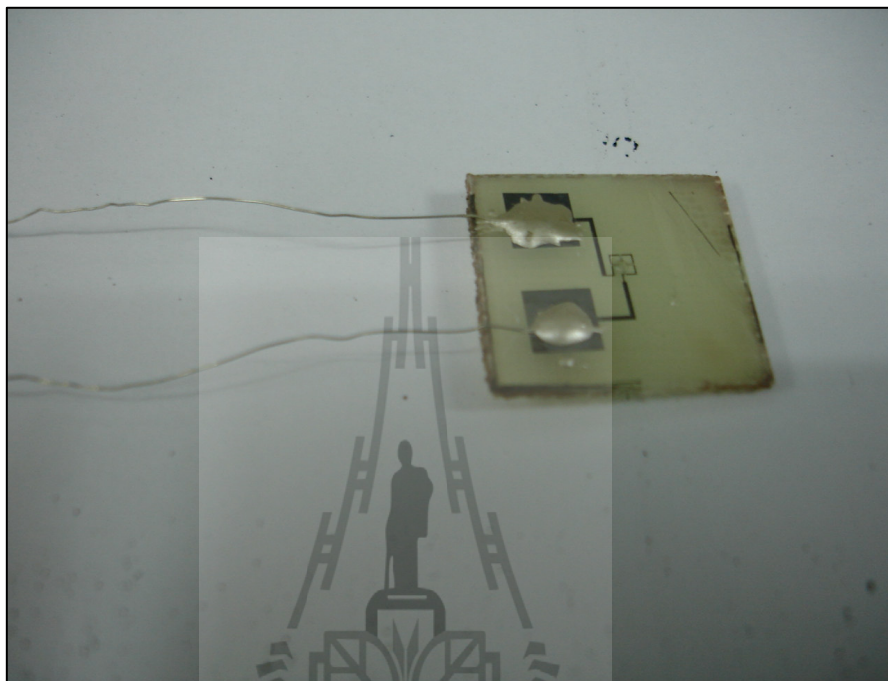


รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายโคอะเฟรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 μm



รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายตัวด้านทานสเตรนเกจบนโคอะเฟรม

วิธีนี้ช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของความต่างระดับที่เกิดขึ้นในหัวข้อที่ 5.2.5 ทำให้เชื่อมต่อสายได้ง่าย แต่วิธีนี้ยังไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องการเชื่อมต่อสายด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย จึงใช้กาวเงินแทน ทำให้ได้ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างได้ในงานวิจัยนี้

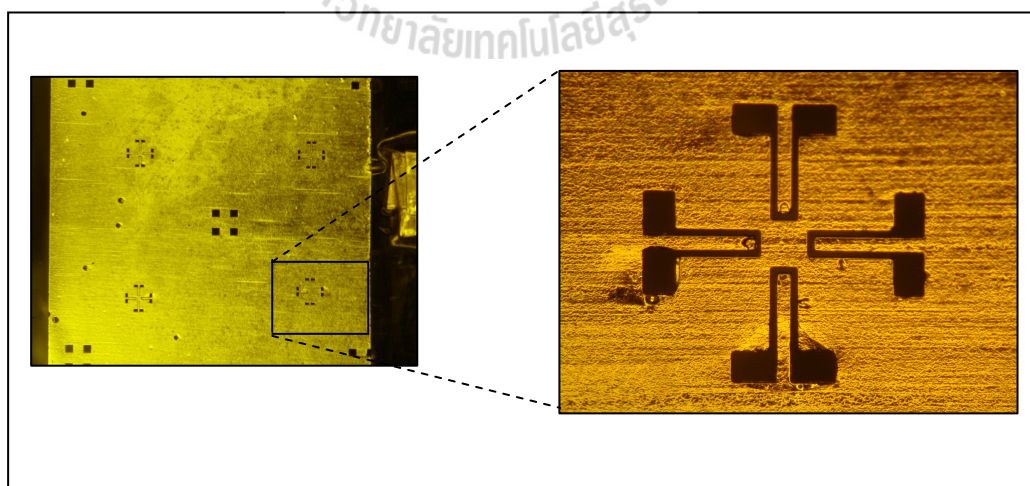
### 5.3 หน้ากากแข็ง (Hard mask)

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้หน้ากากแข็งในการสร้างลวดลายตัวต้านทานนิโครมบนไดอะแฟรม วิธีการใช้งานคือ นำหน้ากากแข็งมาปิดทับบนไดอะแฟรม แล้วนำไปเคลือบโลหะในสุญญากาศ เพื่อให้ได้ตัวต้านทานตามลายของหน้ากากแข็ง หน้ากากแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 แบบ คือ หน้ากากแข็งแบบโลหะและหน้ากากแข็งแบบสารไวแสง SU-8

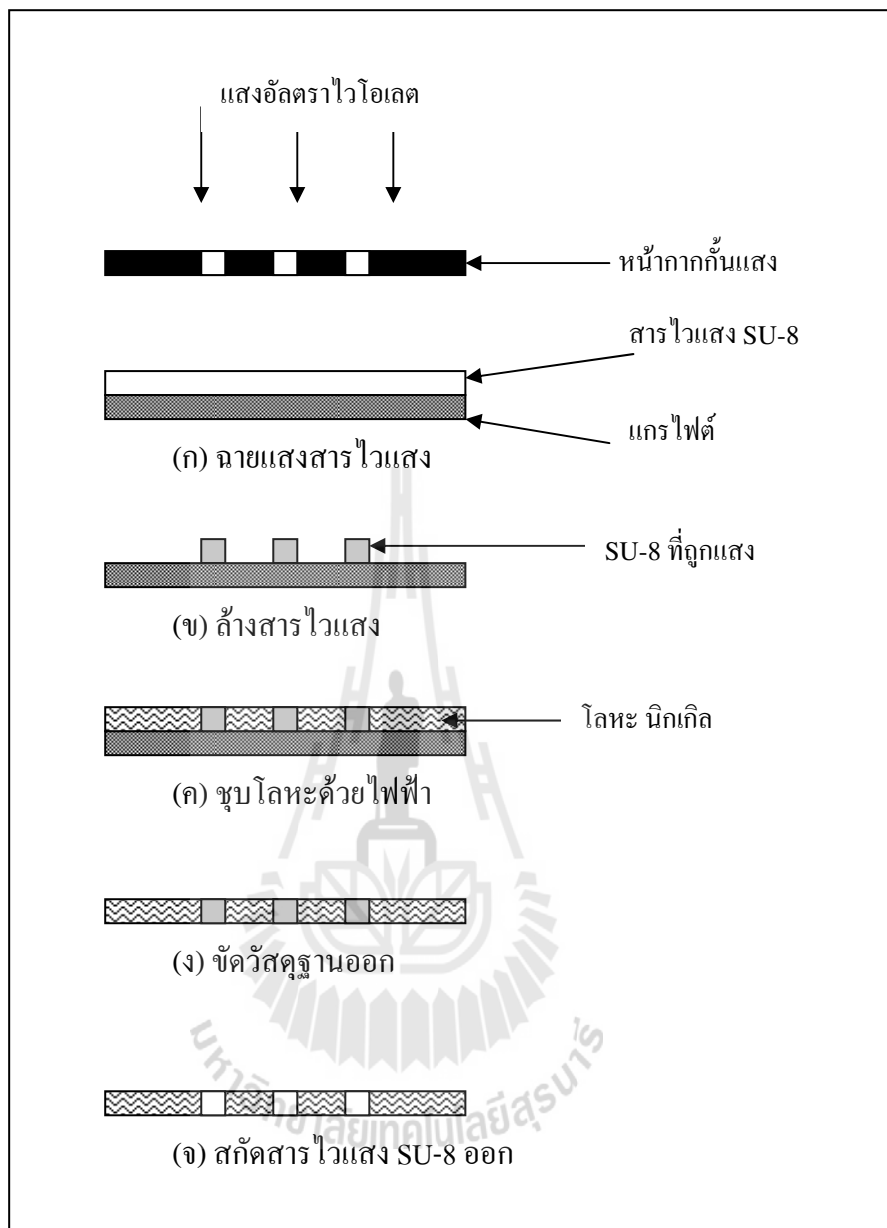
#### 5.3.1 หน้ากากแข็งแบบโลหะ

หน้ากากแข็งแบบโลหะ มีข้อดีคือ มีความแข็งแรงคงทน ไม่แตกหักง่าย ข้อเสียคือ ใช้เวลาในการสร้างนาน ขั้นตอนการสร้างหน้ากากแข็งแบบโลหะมักเกิดแสดงดังรูปที่ 5.34 และมีวิธีการสร้างดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแกรไฟต์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุฐานรอง โดยการอัลตราโซนิกในน้ำสะอาดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้งแล้วอบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 20 นาที
2. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2050 บนแกรไฟต์ ด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm
3. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C 10 นาที แล้วเพิ่มเป็น 95 °C 20 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีหน้ากากลายตัวด้านทานค่าพลังงาน 216 mJ/cm<sup>2</sup> ดังรูปที่ 5.35 (ก)
5. อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C 10 นาที แล้วเพิ่มเป็น 95 °C 20 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
6. ล้างสารไวแสงออก จะได้ลายตัวด้านทานดังรูปที่ 5.35 (ข)
7. อบด้วยอุณหภูมิ 120 °C นาน 30 นาทีแล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
8. นำชิ้นงานที่ได้ไปพลาสติกมาเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของแกรไฟต์ พลาสติกด้วยก๊าซออกซิเจน 200 วัตต์ 5 นาที
9. ชุบโลหะไฟฟ้าด้วยโลหะนิกเกิล จัดเรียงด้วยกระดาษทราย ดังรูปที่ 5.35 (ค)
10. ขัดแกรไฟต์ให้หมด ด้วยกระดาษทราย ดังรูปที่ 5.35 (ง)
11. นำไปสกัดสารไวแสง SU-8 ที่แข็งตัวออกให้หมดโดยการพลาสติกด้วยก๊าซออกซิเจนและฟลูโอโรคาร์บอน ดังรูปที่ 5.35 (จ) แล้วจะได้หน้ากากลโลหะดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายหน้ากากลแข็งแบบ โลหะนิกเกิล



รูปที่ 5.35 ขั้นตอนการสร้างหน้ากาลโลหะ

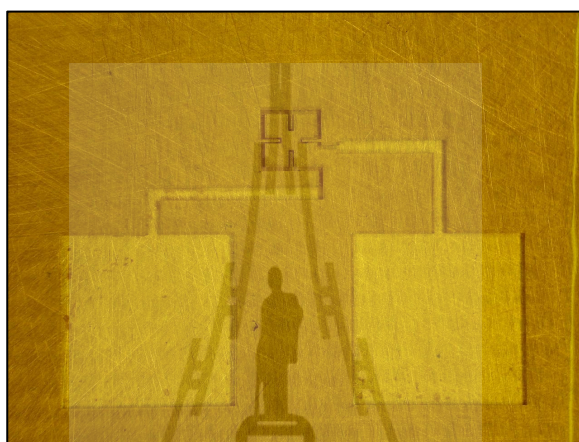
### 5.3.2 หน้ากาลแข็งแบบสารไวแสง SU-8

หน้ากาลแข็งแบบสารไวแสง SU-8 ข้อดีคือใช้ระยะเวลาในการสร้างน้อยกว่า หน้ากาลแข็งแบบโลหะ ข้อเสียคือสารไวแสงเมื่อแข็งตัวแล้วอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

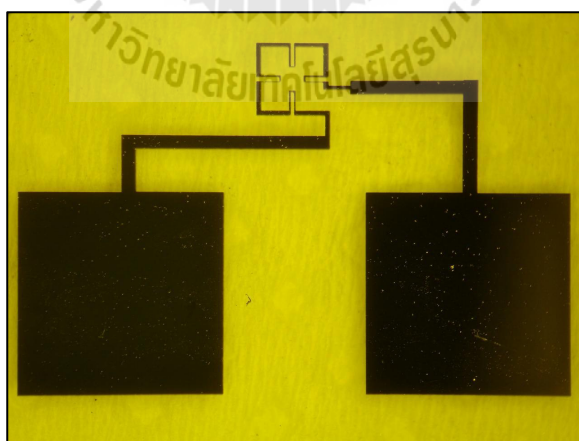
1. เตรียมสารไวแสงด้วยการหล่อสารไวแสง โดยใช้แผ่นวงจรมพิมพ์เป็นวัสดุฐานรองสารไวแสงโดยเตรียมสารไวแสงให้มีความหนา 500  $\mu\text{m}$



2. นำสารไวแสงไปฉายแสงด้วยรังสีเอ็กซ์ด้วยค่าพลังงาน 15000 Dose โดยใช้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นลวดลายตัวด้านทาน เพื่อให้ได้ลวดลายตัวด้านทานที่ต้องการลงบนสารไวแสง SU-8
3. ล้างสารไวแสงส่วนที่ยังไม่แข็งตัวออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง
4. นำไปสกัดทองแดงบริเวณแผ่นวงจรพิมพ์ออกด้วยสารละลายเคมี จะได้ชิ้นงานที่เป็นหน้ากากแข็งหลุดออกมา ดังรูปที่ 5.36 และตัวด้านทานไฟฟ้าที่สร้างได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายหน้ากากแข็งแบบสารไวแสง SU-8



รูปที่ 5.37 ตัวด้านทานโลหะที่สร้างโดยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศผ่านหน้ากากแข็ง

## บทที่ 6

### การทดสอบและผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

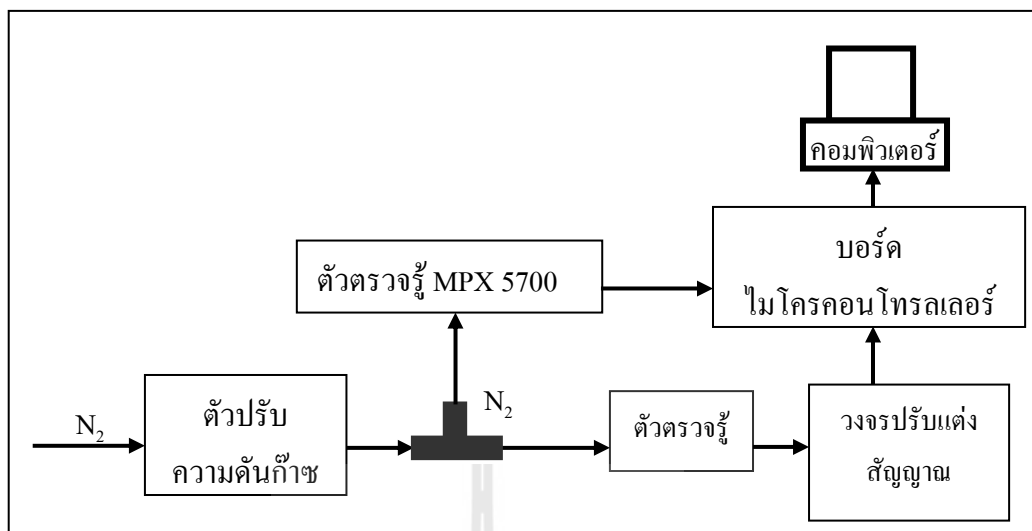
ในบทนี้จะนำตัวตรวจรู้ที่สร้างได้นั้นมาศึกษาถึงระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมเมื่อให้ความดัน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นและนำตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นไปเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ของบริษัท Motorola รุ่น MPX5700 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 6.1 ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

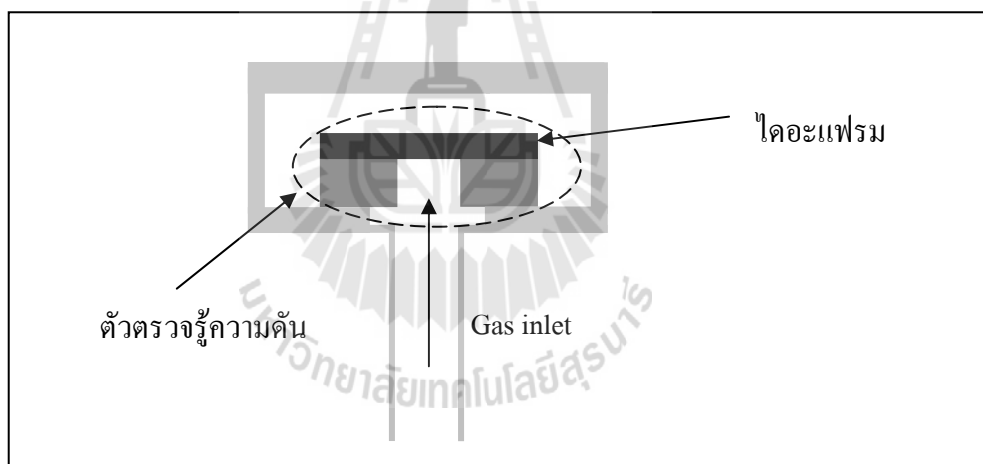
ชุดทดสอบประกอบด้วยตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น ตัวปรับความดันก๊าซ (Pressure regulator) ตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ของบริษัท Motorola รุ่น MPX5700 มัลติมิเตอร์ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นและคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผล ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.1 หลักการทดสอบคือ ให้ก๊าซแก่ตัวตรวจรู้โดยปรับค่าความดันก๊าซจากตัวปรับความดันก๊าซ ให้ก๊าซไหลผ่านไปยังตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น โดยตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นนั้นต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ และวงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณ โดยต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital) หรือ ADC แล้วส่งไปประมวลผลและแสดงผลยังคอมพิวเตอร์

ลักษณะการให้ความดันแก่ตัวตรวจรู้แสดงดังรูปที่ 6.2 จากรูปมีทางให้ก๊าซเข้าคือ Gas inlet โดยให้ก๊าซเข้าทางด้านล่างของตัวตรวจรู้ เมื่อให้ก๊าซกับไดอะแฟรมจะเกิดการโค้งตัวขึ้น ซึ่งจะใช้เพื่อศึกษาผลของความดันและการโค้งตัวของไดอะแฟรม และการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้

ชุดทดสอบเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้เมื่อให้ความดันก๊าซแสดงดังรูปที่ 6.3 โดยใช้มัลติมิเตอร์ต่อกับตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น เมื่อให้ก๊าซกับตัวตรวจรู้ที่ค่าความดันต่างกัน ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ชุดทดสอบเพื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ แสดงดังรูปที่ 6.4 และวงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.5

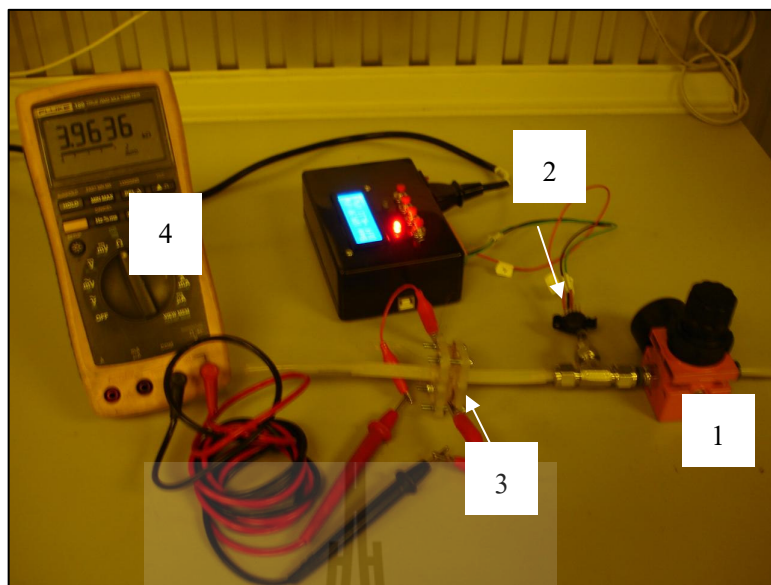


รูปที่ 6.1 ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

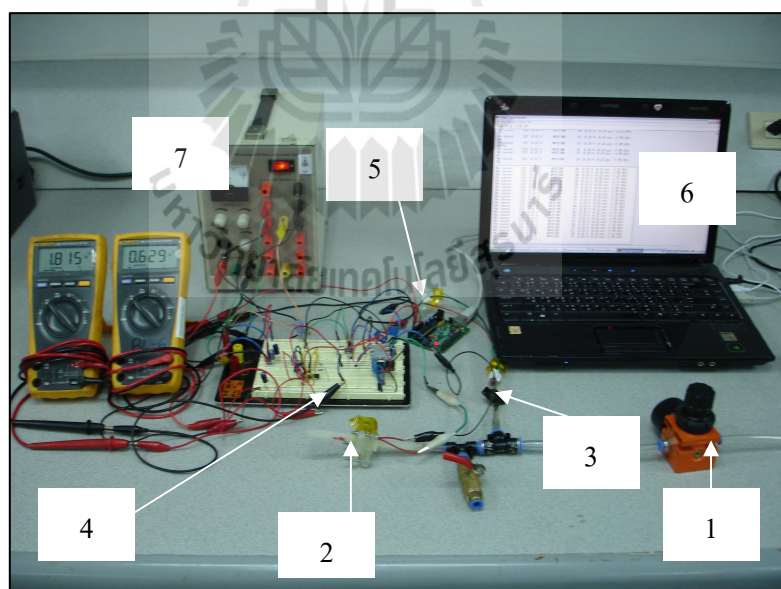


รูปที่ 6.2 ทิศทางการป้อนก๊าซให้กับตัวตรวจรู้ความดัน

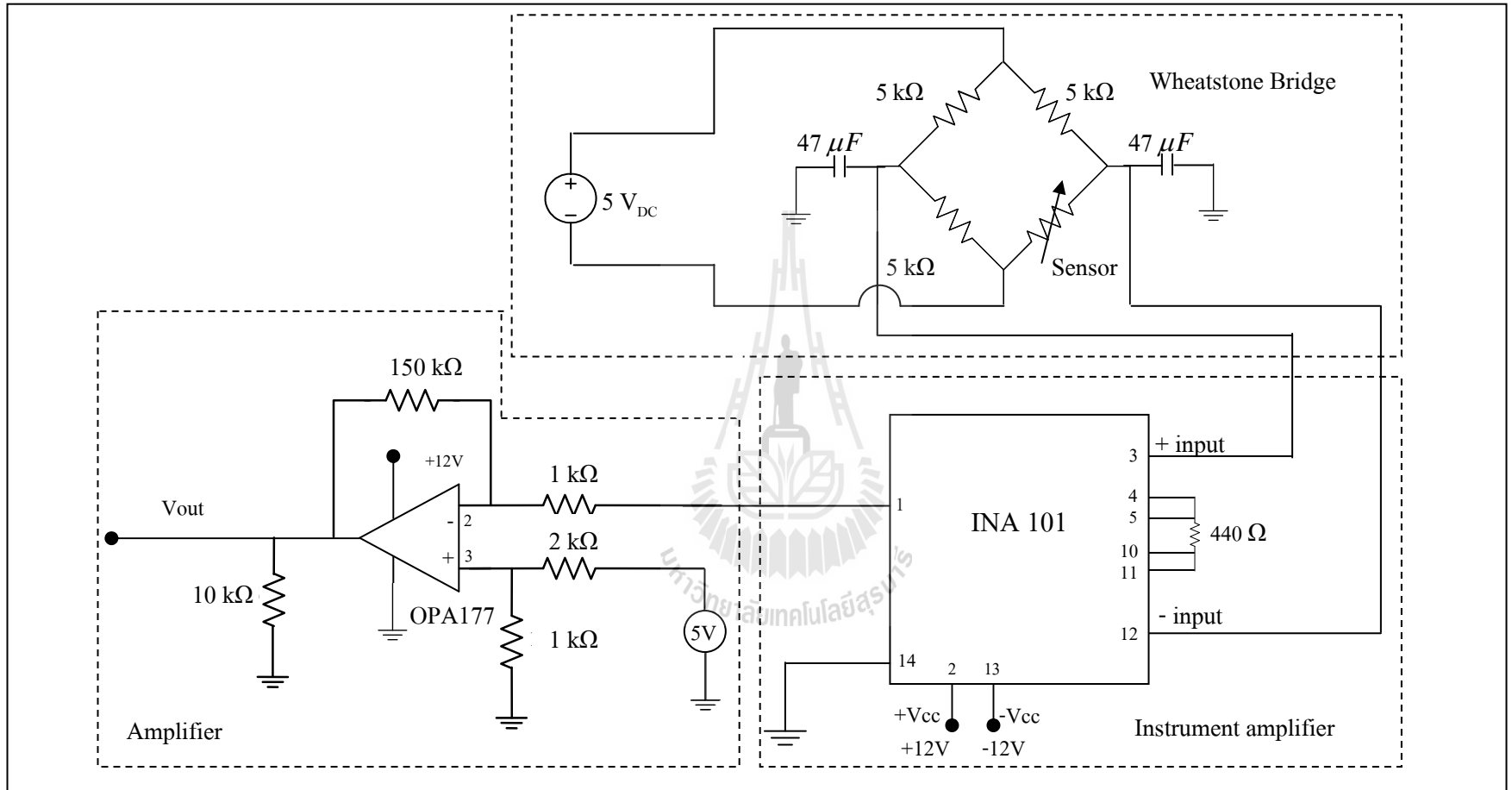




รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายการวัดค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้ (1) ตัวปรับความดันก๊าซ (2) ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ (3) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างในงานวิจัยนี้ (4) มัลติมิเตอร์



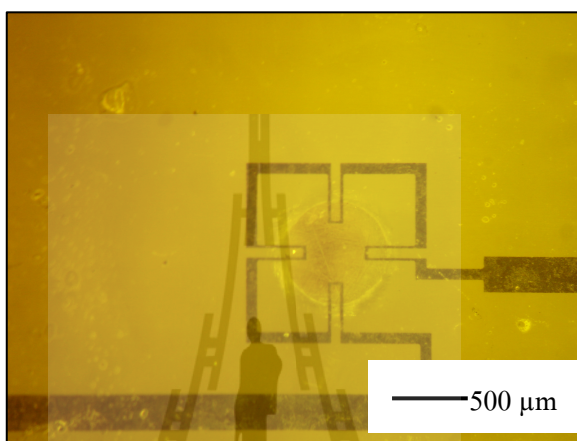
รูปที่ 6.4 ภาพถ่ายชุดทดสอบตัวตรวจรู้วัดความดันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (1) ตัวปรับความดันก๊าซ (2) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างในงานวิจัยนี้ (3) ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ (4) วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดัน (5) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (6) คอมพิวเตอร์ (7) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



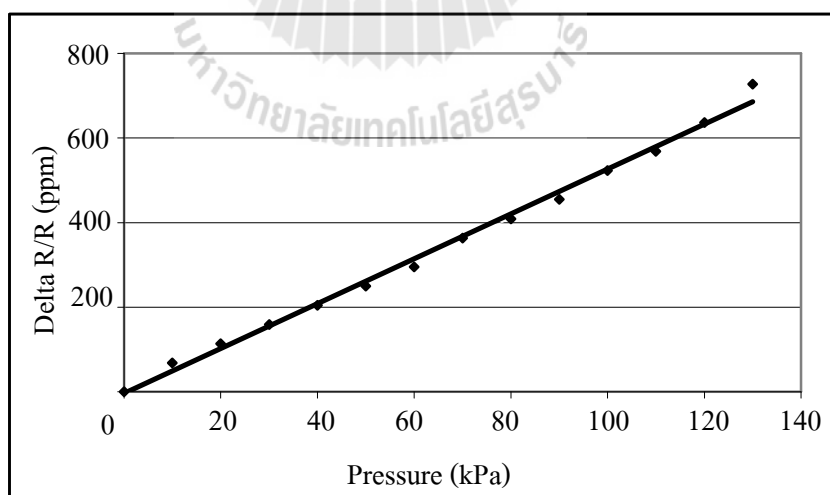
รูปที่ 6.5 วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน

## 6.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้

ตัวตรวจรู้ความดันที่ออกแบบมานี้มีจำนวนตัวต้านทานทั้งหมดจำนวน 4 ขด ซึ่งอยู่บนไดอะแฟรมที่มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 6.6 โดยมีค่าความต้านทานเท่ากับ 4.40  $\text{k}\Omega$  ทำการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบดังรูปที่ 6.3 โดยบันทึกค่าที่ความดัน 0-130  $\text{kPa}$  ได้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $\Delta R/R$  ดังรูปที่ 6.7 เมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายลักษณะตัวตรวจรู้ความดัน



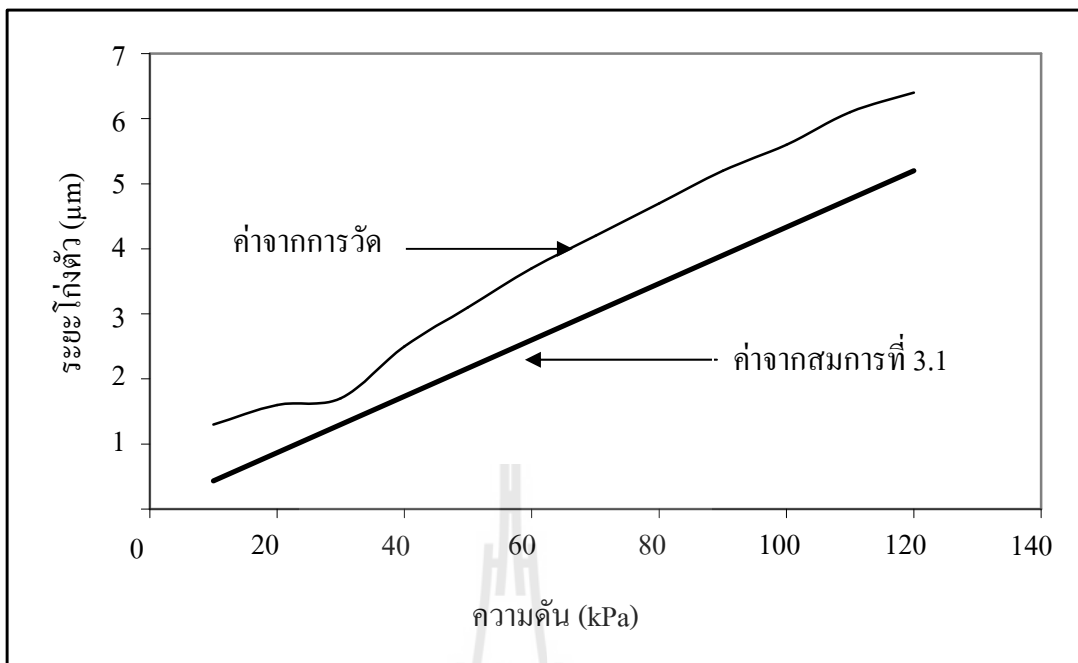
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงผลการวัด  $\Delta R/R$  กับค่าความดัน

### 6.3 การวัดระยะการโก่งตัวบริเวณจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อให้ความดัน

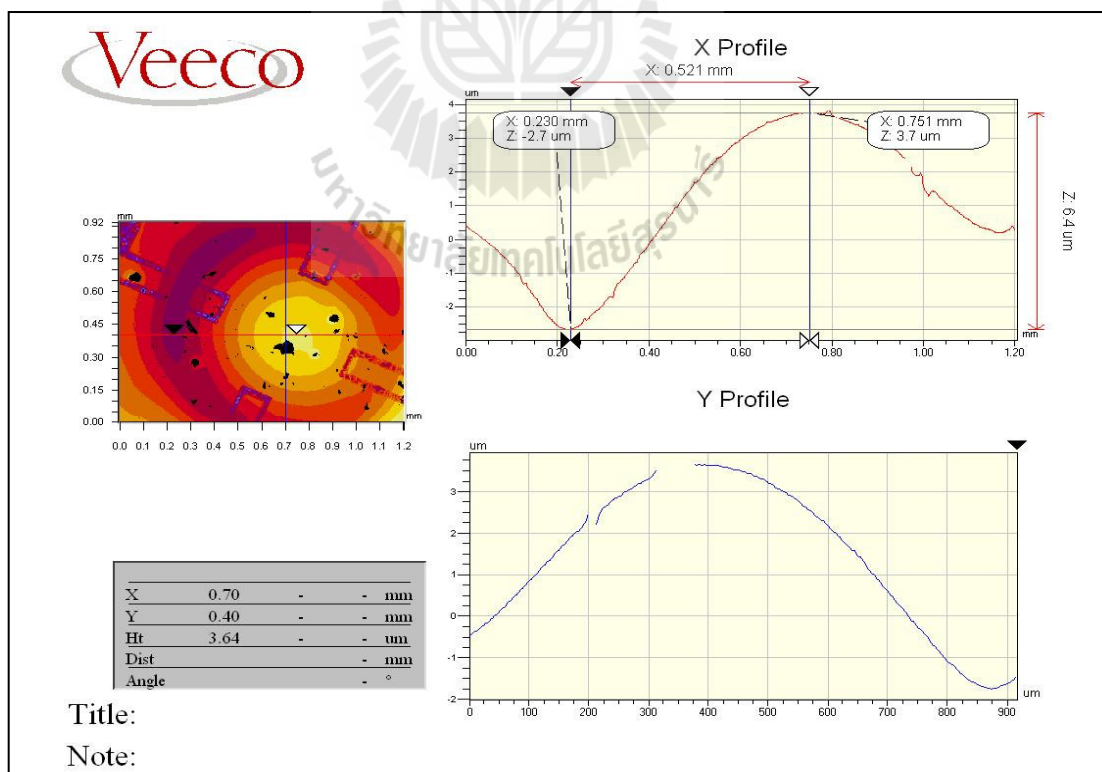
ลักษณะตัวตรวจรู้ที่นำมาทำการวัดระยะการโก่งตัว มีไดอะแฟรมหนา 40  $\mu\text{m}$  ลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  เมื่อให้ความดันกับไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตามสมการที่ (3.1) ซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า  $r = 0$  ไดอะแฟรมหนา 40  $\mu\text{m}$  โดยการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมใช้เครื่องวัดความหนา (Optical Profiler) ทำการวัดระยะการโก่งตัวที่ความดัน 10-120 kPa ทำการวัดที่ความดันเดียวกัน เป็นจำนวน 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังตารางที่ 6.1 นำไปวาดกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎีได้ดังรูปที่ 6.8 ซึ่งค่าที่วัดได้มีค่าไม่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี อาจเนื่องมาจาก ความหนาของไดอะแฟรมที่สร้างได้จริงนั้นอาจมีความหนาไม่ถึง 40  $\mu\text{m}$  จึงทำให้มีการโก่งตัวที่มากกว่าค่าที่คำนวณได้ มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.06 ภาพตัวอย่างที่ได้จากเครื่องวัดความหนาแสดงการวัดการโก่งตัวดังรูปที่ 6.9-6.11

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่าง ๆ

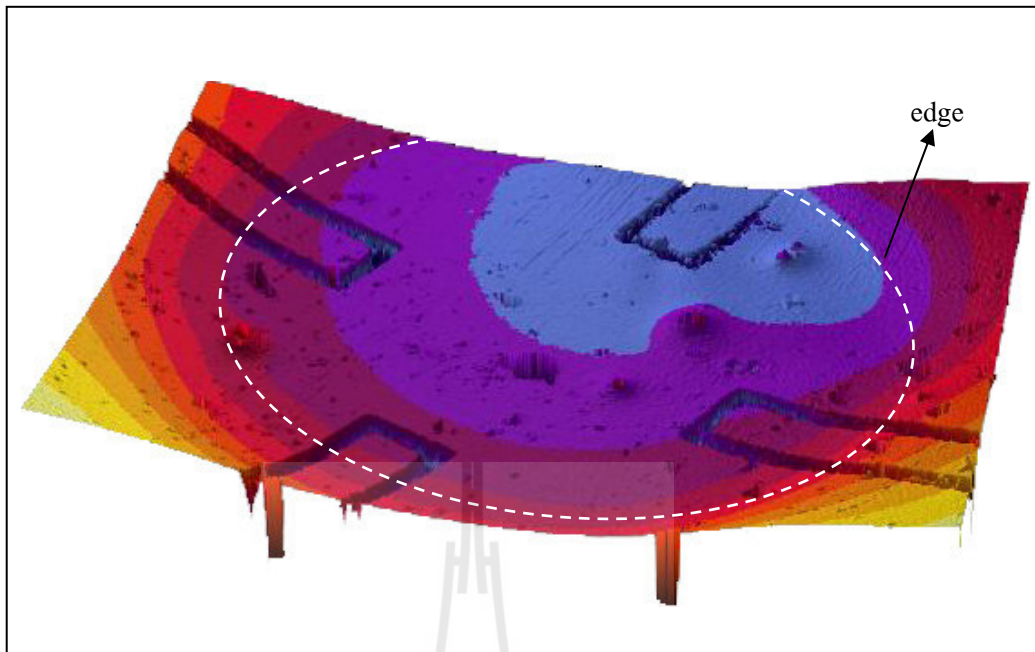
Pressure (kPa)	ครั้งที่ 1 ( $\mu\text{m}$ )	ครั้งที่ 2 ( $\mu\text{m}$ )	ครั้งที่ 3 ( $\mu\text{m}$ )	เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
10	1.4	1.2	1.3	1.3
20	1.5	1.8	1.6	1.6
30	1.7	1.6	1.7	1.7
40	2.6	2.4	2.5	2.5
50	3.4	3.0	3.0	3.1
60	3.9	3.6	3.5	3.7
70	4.7	3.9	4.0	4.2
80	5.1	4.5	4.5	4.7
90	5.6	5.0	4.9	5.2
100	6.1	5.3	5.4	5.6
110	6.4	5.9	5.9	6.1
120	6.6	6.2	6.3	6.4



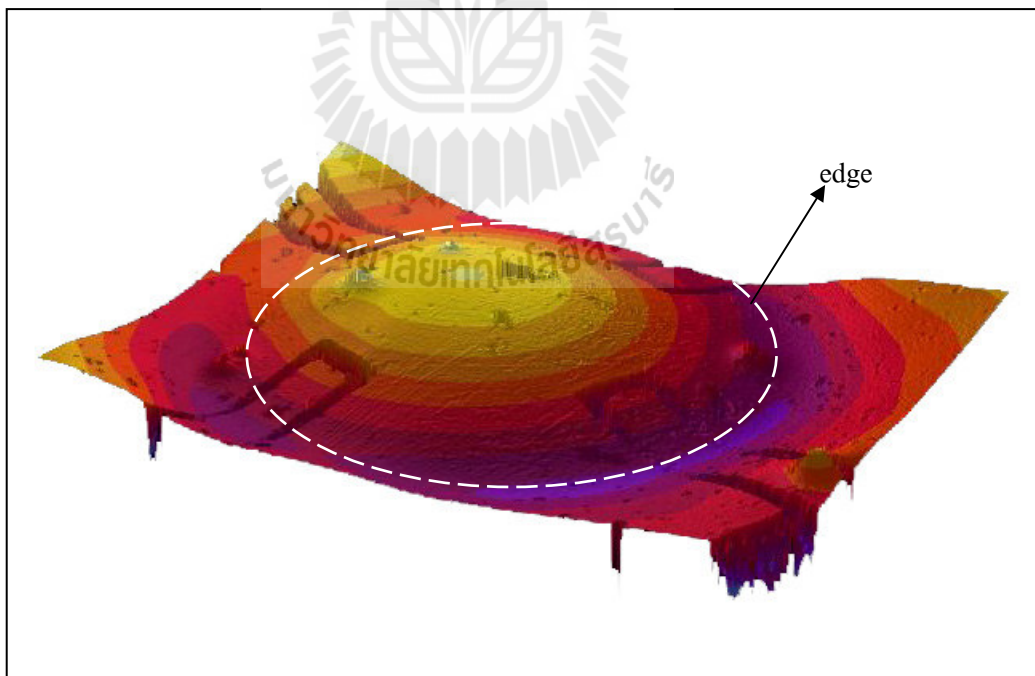
รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบระยะ โ่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมระหว่างคำนวณและวัดได้



รูปที่ 6.9 ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงการ โ่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดัน 110 kPa



รูปที่ 6.10 ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงลักษณะไคอะแฟรมเมื่อไม่มีความดันก้ำซ



รูปที่ 6.11 ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงลักษณะไคอะแฟรมเมื่อให้ความดันก้ำซ 110 kPa

## 6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน

ตัวตรวจรู้ความดันที่ดีจะต้องตอบสนองต่อความดันเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการวัดความดันนั้นคือ ความร้อนหรืออุณหภูมิ เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างจึ้นมีตัวต้านทานไฟฟ้าเป็นโลหะ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ค่าความต้านทานของตัวตรวจรู้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รายละเอียดในการศึกษาเรื่องของอุณหภูมิได้แบ่งหัวข้อดังต่อไปนี้

### 6.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานของโลหะ

อุณหภูมิมิผลต่อค่าความต้านทานของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6.1) ตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้สร้างจึ้นด้วยโลหะนิโครม ซึ่งโลหะนิโครมมีค่า Temperature coefficient ( $\alpha$ ) ของนิโครมมีค่า 400 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  ตัวตรวจรู้ความดันมีค่าความต้านทาน 4.40 k $\Omega$  ที่อุณหภูมิห้อง (25  $^{\circ}\text{C}$ ) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป 1  $^{\circ}\text{C}$  ค่าความต้านทานจะมีค่าเท่ากับ 4401.8  $\Omega$  หรือมีการเปลี่ยนแปลงไป 1.8  $\Omega$  ทำการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 6.2

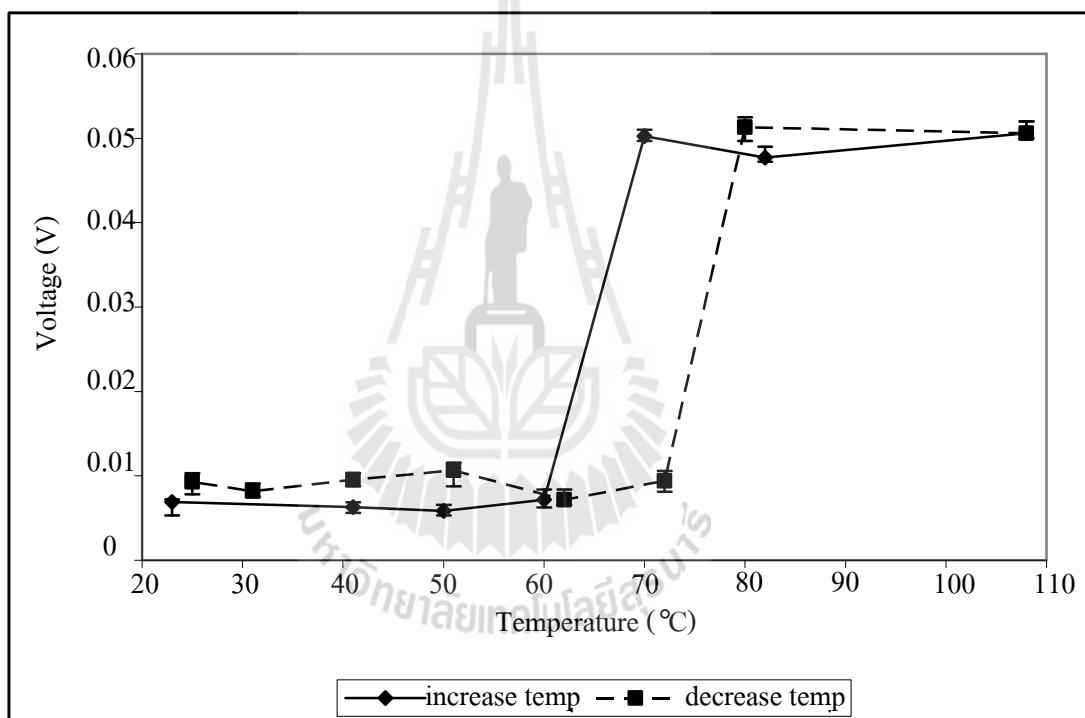
$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (6.1)$$

เมื่อ  $R_1$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $T_1$   
 $R_2$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $T_2$   
 $T_1, T_2$  คือ อุณหภูมิ  
 $\alpha$  คือ Temperature coefficient

ตารางที่ 6.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\Omega$ )	$\Delta R$ (%)
25	4400.0	0	0
30	4408.8	8.8	0.2
40	4426.4	26.4	0.6
50	4444.0	44.0	1.0
60	4461.6	61.6	1.4
70	4479.2	79.2	1.8
80	4496.8	96.8	2.1
90	4514.4	114.4	2.5
100	4532.0	132.0	2.9

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจรู้ความดัน ได้ทำการทดสอบโดยนำตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นใส่ในเตาอบ (ไม่มีความดันก๊าซ) แล้วต่อสายออกมาเข้าวงจรบริดจ์ที่อยู่ภายนอกเตาอบ โดยจ่ายไฟให้วงจรบริดจ์ 1 V วัดแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทจากวงจรบริดจ์ ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ จาก 25-100 °C โดยเริ่มที่อุณหภูมิห้อง 25 °C แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 30 °C จากนั้นรอให้อุณหภูมิคงที่ แล้วจึงทำการวัดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรบริดจ์ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าทุก 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 10 °C รอให้อุณหภูมิคงที่จึงทำการวัด ทำเช่นเดิมซ้ำจนครบ 100 °C เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึง 100 °C ให้ลดอุณหภูมิลงทีละ 10 °C รอให้อุณหภูมิคงที่แล้วจึงบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ทุก 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที ผลการวัดได้ดังรูปที่ 6.12

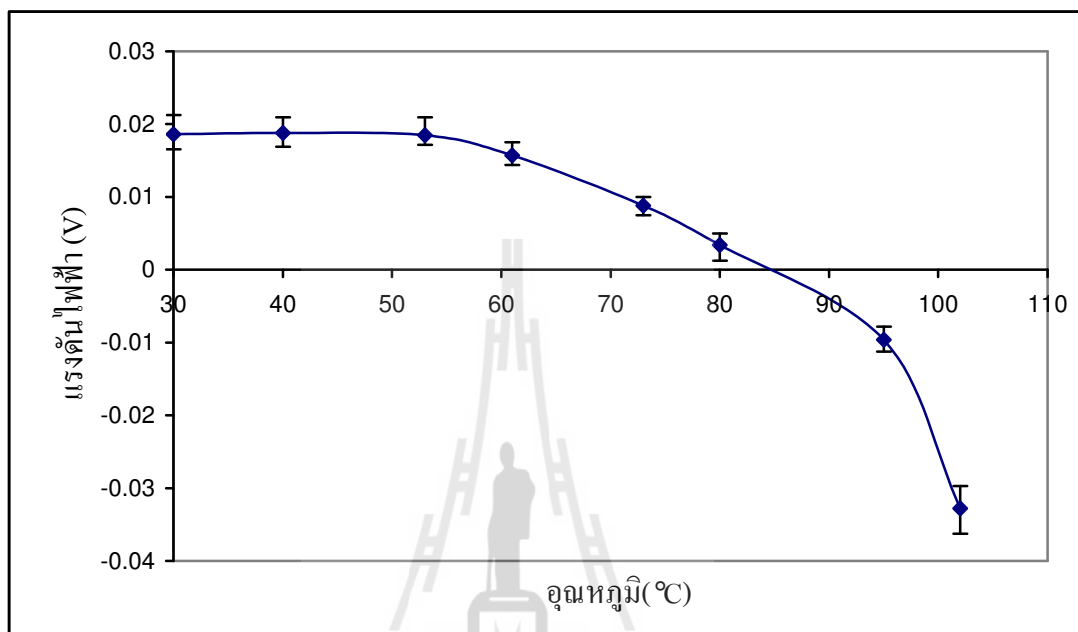


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงการตอบสนองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.12 การตอบสนองของตัวตรวจรู้ความดันที่อุณหภูมิ 25-60 °C มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60 °C ขึ้นไปมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก อาจเป็นผลเนื่องจากความแตกต่างของค่า Thermal coefficient expansion (CTE) ของสารไวแสง SU-8 และแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นวัสดุฐานมีค่าแตกต่างกันมาก ที่มา Ko, H.S. (2007) ซึ่งค่า CTE ของ SU-8 เท่ากับ 52 ppm/°C และค่า CTE ของแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าเท่ากับ 14 ppm/°C ดังนั้นตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นนี้มีการตอบสนองที่ดีในช่วงอุณหภูมิ 25-60 °C และได้ทดสอบโดยการนำวงจรบริดจ์



(ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ 3 ตัวและเซนเซอร์ 1 ตัว) เข้าเตาอบทั้งหมดแล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ผลได้ดังรูปที่ 6.13 จากกราฟแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ที่ 0-50 °C แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 °C ขึ้นไป แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลง จนถึง 100 °C



รูปที่ 6.13 กราฟแรงดันเอาต์พุตจากวงจรบริดจ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

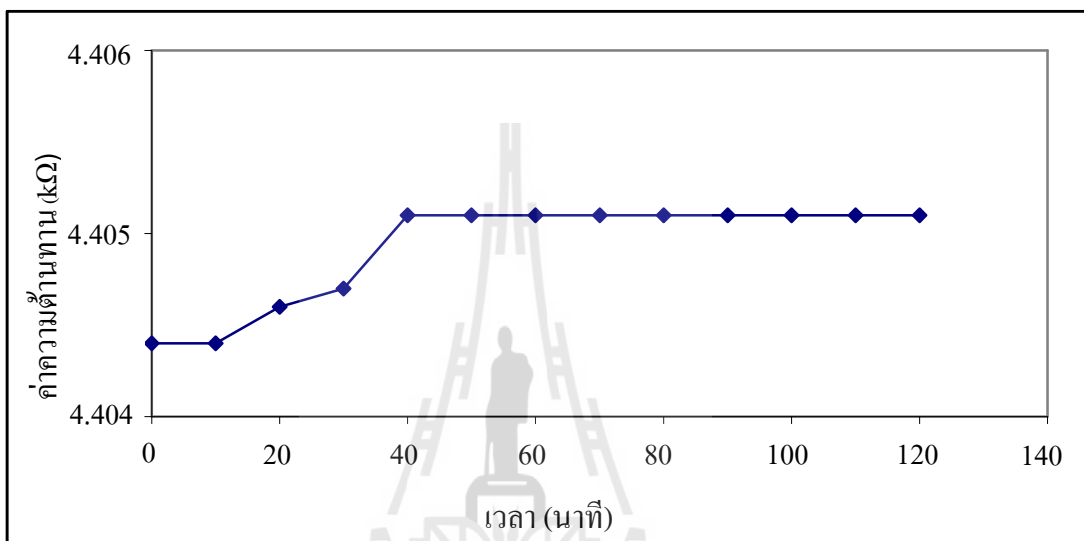
#### 6.4.2 ความร้อนจูล (Joule heating)

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความร้อนภายในตัวต้านทานไฟฟ้า เรียกค่าพลังงานนี้ว่า ความร้อนจูล โดยค่าความร้อนจูลนิยามได้ด้วยสมการ

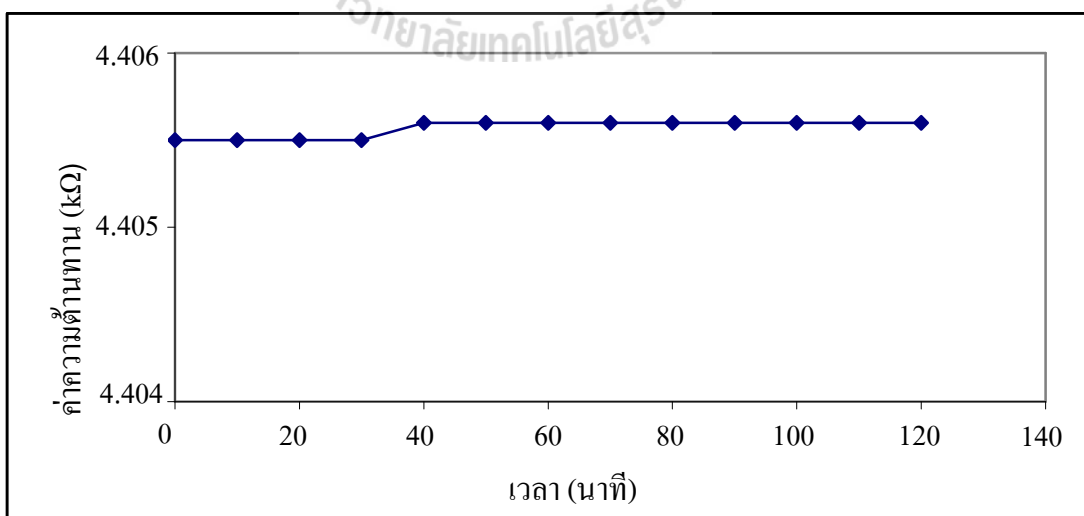
$$Q = I^2 R \quad (6.2)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ความร้อนจูล  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้เมื่อต้องการวัดความดันก๊าซต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวตรวจรู้ที่ต่อกับวงจรวัดผล ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวตรวจรู้ที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานไฟฟ้าบางส่วนนั้นจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นจะทำให้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยทำการทดลองโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ให้กับวงจรบริดจ์ 5 V ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานไฟฟ้า 0.626 mA เมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 6.14 แต่เมื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่ให้อุปกรณ์เป็น 1 V กระแสไหลผ่านตัวต้านทานไฟฟ้า 0.144 mA มีผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ไฟฟ้าดังรูปที่ 6.15 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลง ทำให้เกิดความร้อนจูลน้อยลงด้วย ดังนั้นเพื่อลดผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานไฟฟ้าจึงควรให้แรงดันไฟฟ้าให้อุปกรณ์เป็น 1 V



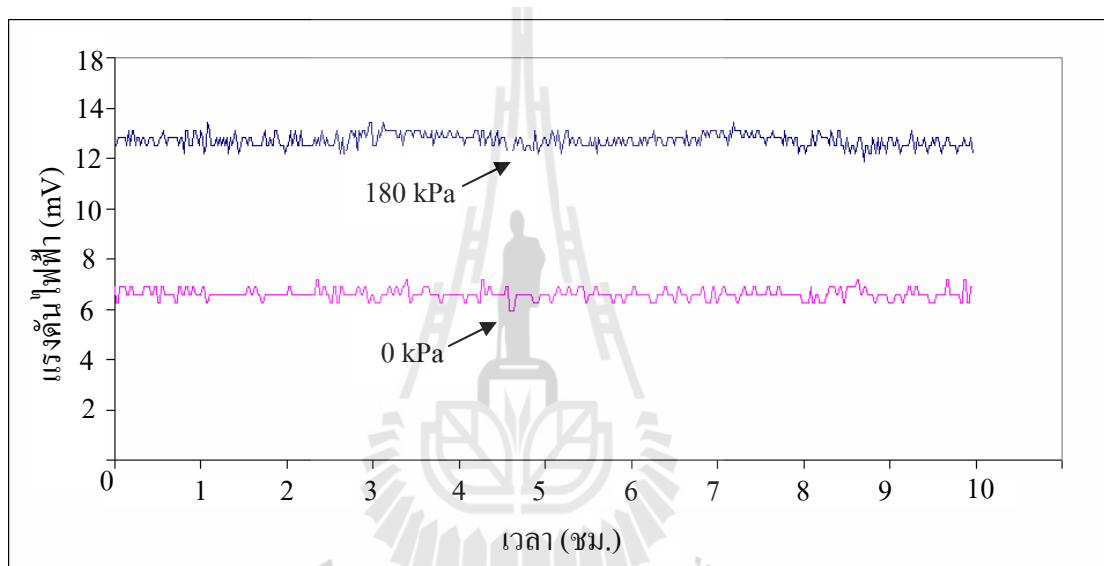
รูปที่ 6.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานเมื่อแรงดันวงจรบริดจ์เท่ากับ 5 V ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าความต้านทานเมื่อแรงดันวงจรบริดจ์เท่ากับ 1 V ที่เวลาต่าง ๆ

## 6.5 เสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดัน

การทดสอบการใช้งานตัวตรวจรู้ความดันเป็นระยะเวลานาน ทำการทดสอบโดยนำตัวตรวจรู้ต่อเข้ากับวงจรมัดแรงดัน แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรมัดแรงดัน ที่ความดันก๊าซ 0 และ 180 kPa (อุณหภูมิ 25 °C) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรมัดแรงดันได้ค่าดังรูปที่ 6.16 วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรมัดแรงดันที่ความดันก๊าซ 0 kPa ได้แรงดันเฉลี่ยเท่ากับ 6.6 mV และที่ความดันก๊าซ 180 kPa แรงดันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 12.7 mV ทั้งสองความดันก๊าซมีค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ตลอด 10 ชม. ที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 6.16 กราฟแรงดันไฟฟ้าจากวงจรมัดแรงดันที่ความดัน 0 kPa และ 180 kPa

## 6.6 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์

เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแล้ว นำตัวตรวจรู้ที่สร้างได้มาสอบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์เพื่งให้สามารถใช้ในการวัดความดันได้จริง รายละเอียดและวิธีการทดสอบมีดังหัวข้อต่อไปนี้

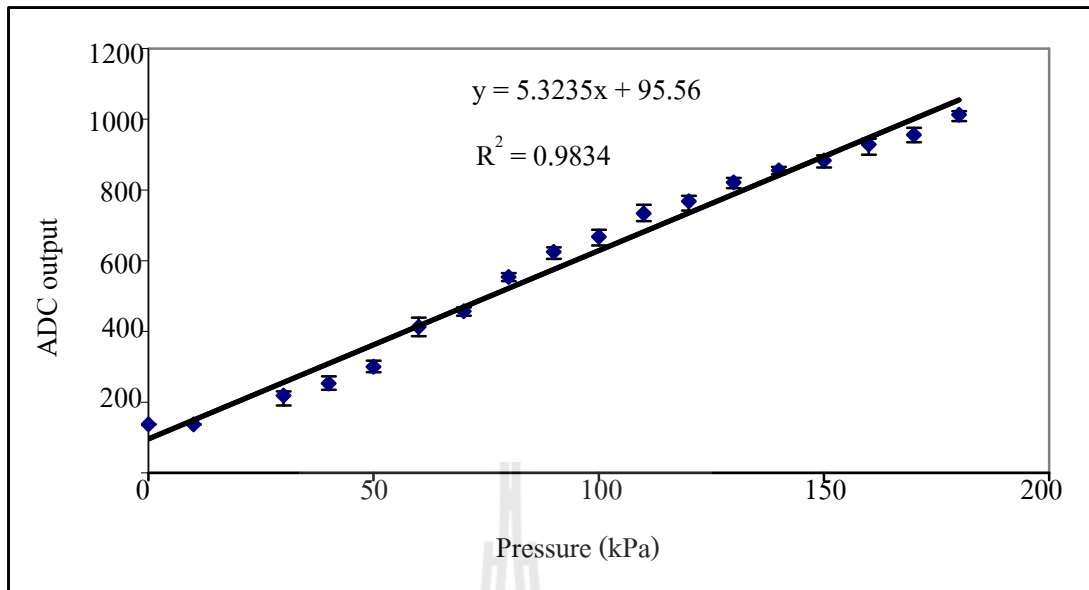
### 6.6.1 การสอบเทียบกับตัวตรวจรู้ MPX 5700

ทำการสอบเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX 5700 ของ Motorola เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบวัดความดันเกจ (วัดเทียบกับความดันบรรยากาศ) วัดความดันได้ในช่วง 0-700 kPa มีค่าความไว 6.4 mV/kPa และช่วงเวลาตอบสนอง (Response time) 1 ms ทำการทดสอบโดยต่อตัวตรวจรู้เข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 6.4 ทำการวัดผล

ได้ดังตารางที่ 6.3 ตัวตรวจรู้ความดันเริ่มมีการตอบสนองที่ความดัน 10 kPa และทำการวัดถึงความดัน 180 kPa นำข้อมูลในตารางที่ 6.3 มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.17

ตารางที่ 6.3 ผลการวัดค่าเลขดิจิตอล 10 บิต ที่ความดันต่าง ๆ

ความดัน (kPa)	ค่าเลขดิจิตอล 10 บิต ของตัวตรวจรู้ความดัน				
	ค่ามากที่สุด (max)	ค่าน้อยสุด (min)	ค่าเฉลี่ย (average)	ค่าคลาดเคลื่อน มากที่สุด	ค่าคลาดเคลื่อน น้อยสุด
0	137	137	137	0	0
10	137	137	137	0	0
30	230	191	219	11	28
40	273	235	253	20	18
50	317	285	300	17	15
60	439	387	413	26	26
70	468	445	457	11	12
80	565	542	554	11	12
90	638	605	625	13	20
100	688	643	668	20	25
110	758	712	734	24	22
120	783	742	768	15	26
130	834	805	821	13	16
140	866	845	856	10	11
150	898	864	884	14	20
160	945	900	929	16	29
170	976	935	956	20	21
180	1023	995	1013	10	18



รูปที่ 6.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซและเลขดิจิทัลขนาด 10 บิต

จากรูปที่ 6.17 ทำให้ได้สมการของตัวตรวจรู้ความดันดังสมการที่ (6.3) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นมีค่าคลาดเคลื่อนจากสมการนี้เท่ากับ 7.25% และมีความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 10\%$  เมื่อเทียบกับตัวตรวจรู้เซิงพาณิชย์ MPX 5700

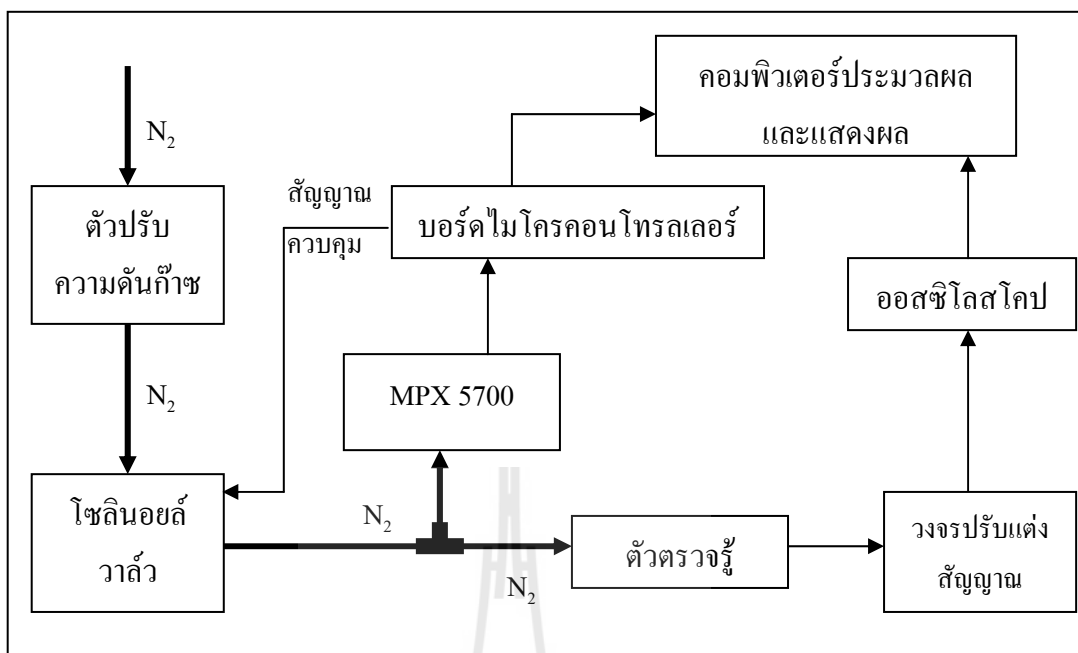
$$P = 0.1878(\text{ADC}_{\text{op}}) - 18.025 \quad (6.3)$$

โดยที่ P คือ ความดัน (kPa)

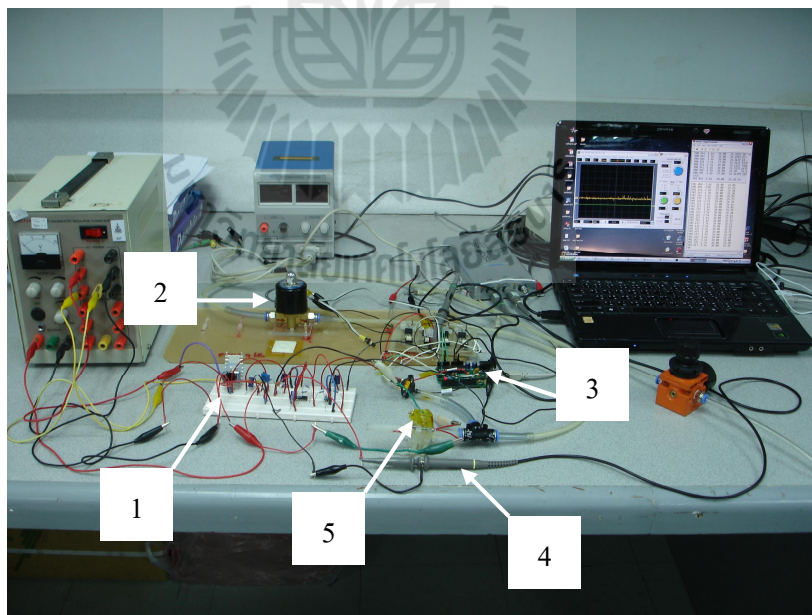
$\text{ADC}_{\text{op}}$  คือ เลขดิจิทัลขนาด 10 บิต

### 6.6.2 การวัดผลตอบสนองทางเวลา

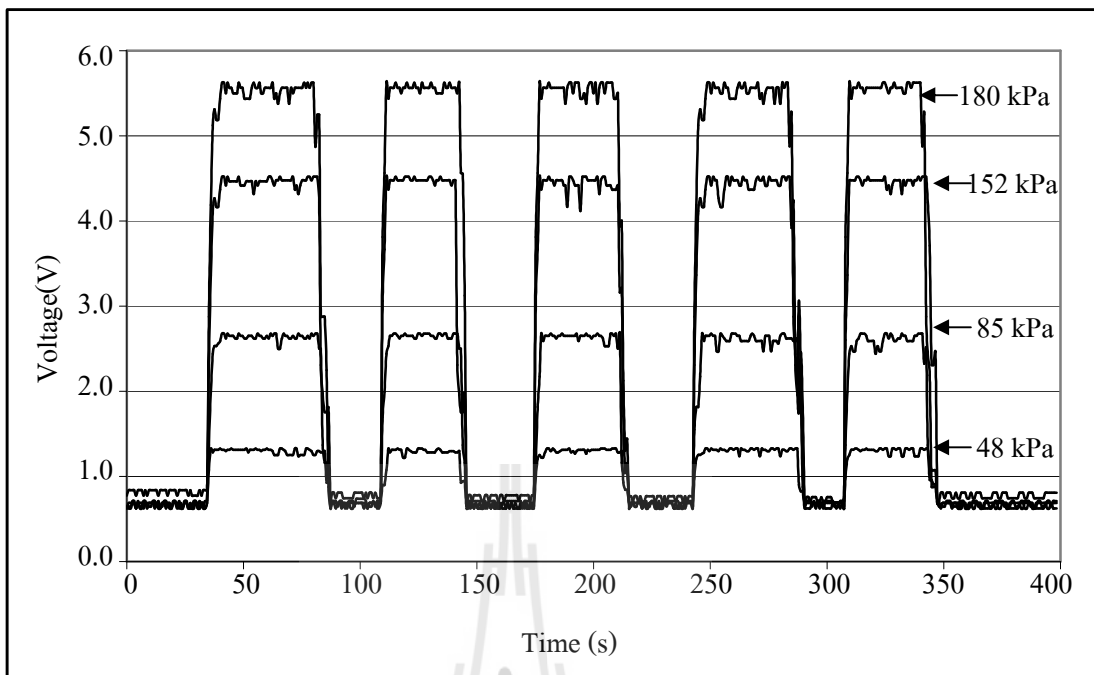
ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบดังรูปที่ 6.18 และชุดทดสอบและวงจรที่ใช้จริงดังรูปที่ 6.19 เริ่มทำทดสอบโดยใช้โซลินอยวาล์วเป็นตัวเปิด-ปิดก๊าซที่ให้กับตัวตรวจรู้เซิงพาณิชย์และตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น จากนั้นวัดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ออสซิลโคป วัดที่ความดัน 48 kPa 52 kPa 152 kPa และ 180 kPa โดยการป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้จะป้อนก๊าซเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได ผลการวัดแรงดันเอาท์พุทได้จากวงจรแสดงดังรูปที่ 6.20 จากกราฟนำข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเวลาในการตอบสนอง ซึ่งได้เวลาในการตอบสนองเมื่อป้อนก๊าซหรือ Rise time เท่ากับ 2.3 วินาที แสดงดังรูปที่ 6.21 และเวลาในการตอบสนองเมื่อปล่อยก๊าซหรือ Fall time เท่ากับ 4.5 วินาที แสดงดังรูปที่ 6.22



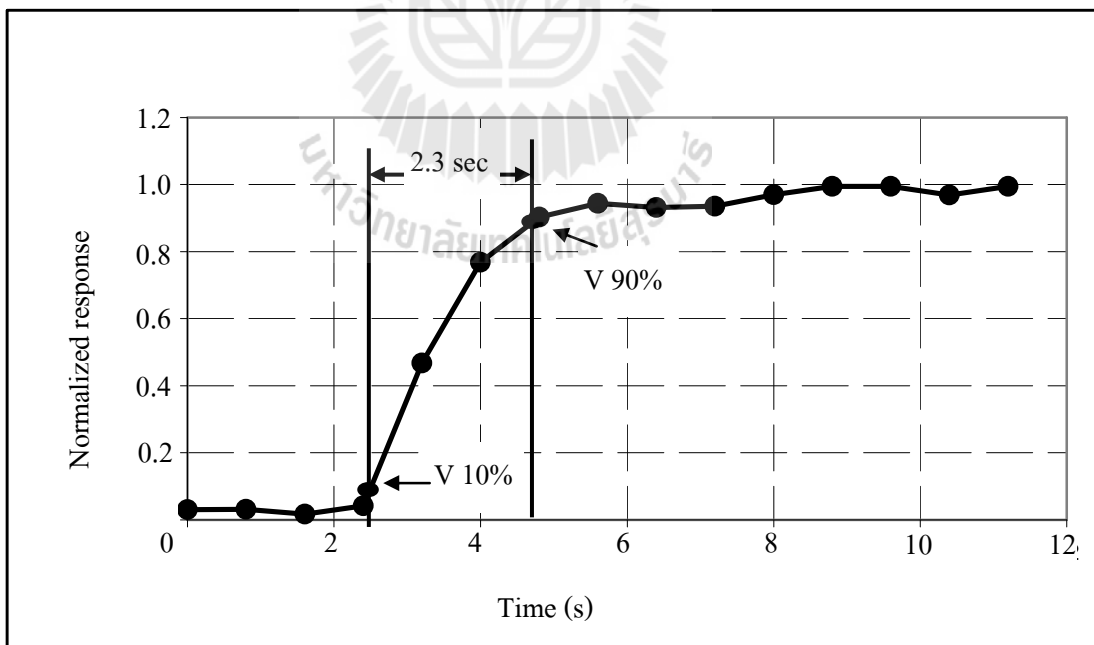
รูปที่ 6.18 ลักษณะการทำงานของชุดทดสอบการหาผลตอบสนองทางเวลา



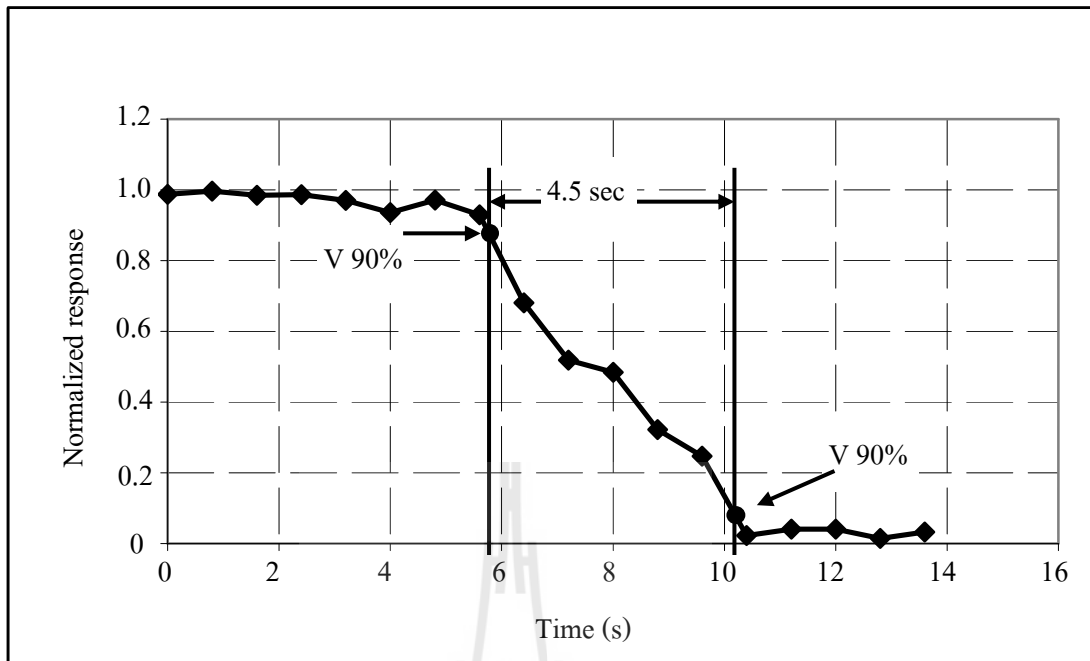
รูปที่ 6.19 ภาพถ่ายชุดทดสอบการหาผลตอบสนองทางเวลา (1) วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (2) โซลินอยด์วาล์ว (3) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (4) ออสซิลโลสโคป (5) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น



รูปที่ 6.20 กราฟแรงดันเอาต์พุตเมื่อป้อนความดันก๊าซแบบขั้นบันได



รูปที่ 6.21 กราฟผลตอบสนองเมื่อป้อนความดันก๊าซแบบขั้นบันได

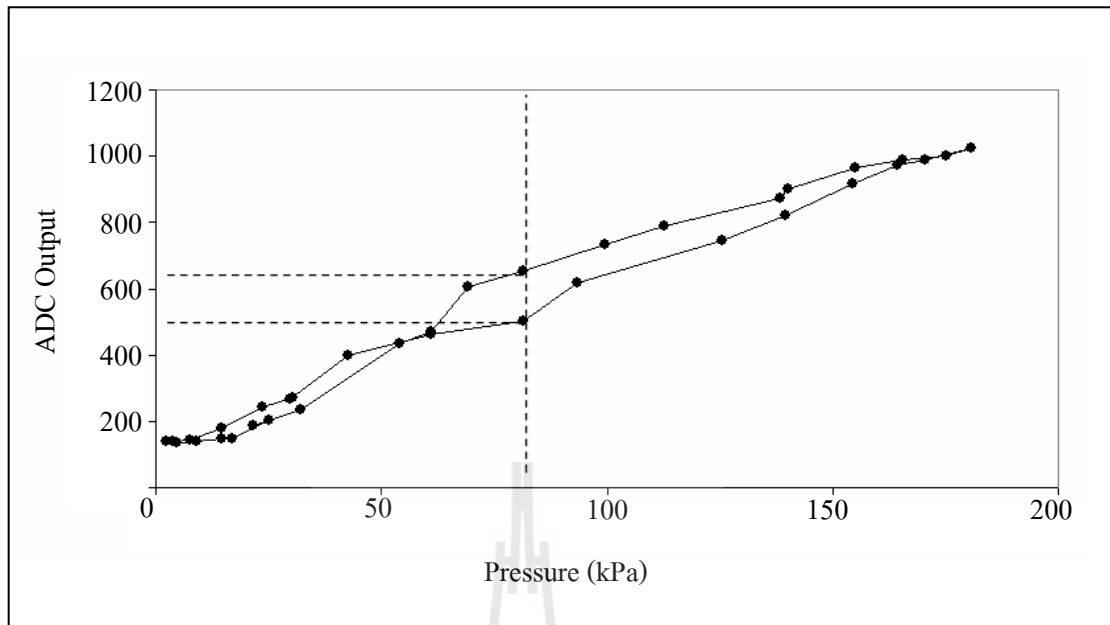


รูปที่ 6.22 กราฟผลตอบสนองเมื่อลดความดันก๊าซ

### 6.6.3 ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

ฮิสเตอร์รีซิส คือความผิดพลาดทางเอาต์พุตของตัวตรวจรู้ที่อินพุตค่าใดค่าหนึ่งเมื่อทำการวัดในทิศทางตรงกันข้าม เป็นผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจรู้เมื่อทำการวัด โดยปรับค่าอินพุตจากค่าน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย ทำการทดสอบโดยการปรับค่าความดันก๊าซที่ป้อนให้ตัวตรวจรู้จาก 0-180 kPa และปรับลดค่าความดันก๊าซจาก 180-0 kPa ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.23 จากรูปช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ความดัน 76 kPa มีความคลาดเคลื่อนของเลขดิจิตอล 10 บิต เท่ากับ 160 หรือ 15.64% นั่นคือเมื่อทำการวัดความดันก๊าซในช่วงนี้อาจทำให้ตัวตรวจรู้อ่านค่าได้คลาดเคลื่อนมากที่สุด



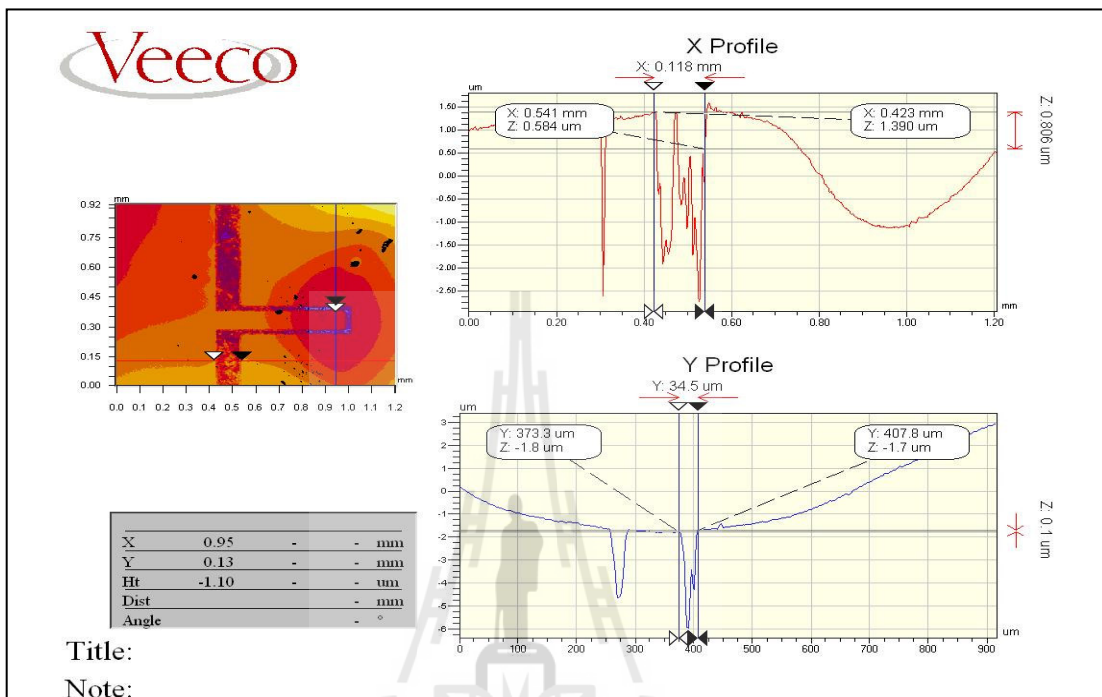


รูปที่ 6.23 กราฟฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น

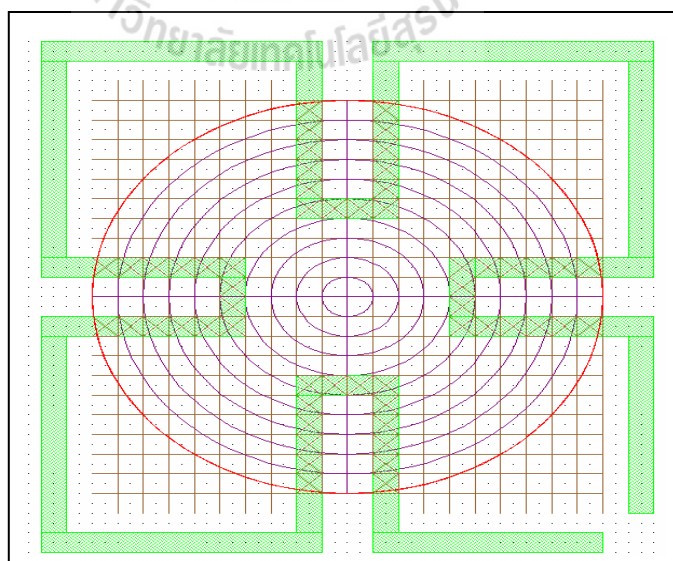
#### 6.6.4 เปรียบเทียบ $\Delta R/R$ ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ

ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างได้ในงานวิจัยนี้มีค่าความต้านทานเท่ากับ 4.400 kΩ และเมื่อนำมาวัดขนาดของตัวต้านทานด้วยเครื่องวัดความหนา ขนาดของตัวต้านทานมีความกว้าง 34.5 μm หนา 0.01 μm ภาพการวัดขนาดตัวต้านทานแสดงดังรูปที่ 6.24 นำขนาดที่วัดได้นี้มาคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่ง การคำนวณค่าความต้านทานขณะไดอะแฟรมโก่งตัว ทำโดยการแบ่งตัวต้านทานเป็นช่อง ๆ ดังรูปที่ 6.25 แล้วหาค่าความยาวที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่อง โดยใช้จุดกึ่งกลางของแต่ละช่องเป็นตัวกำหนดให้ตัวต้านทานอยู่ในรัศมีโคของไดอะแฟรม ซึ่งที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเดียวกันจะมีค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงเท่ากัน จากนั้นนำค่าความยาวของตัวต้านทานทุกช่องมารวมกันจะได้ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานทั้งหมดที่ความดันนั้น ๆ ตัวอย่างการคำนวณ แบ่งตัวต้านทานที่สร้างได้จริงเป็นช่อง ๆ ดังรูปที่ 6.26 ที่ช่อง a เป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางไดอะแฟรม 500 μm จากตารางที่ 3.5 ความยาวมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $2.45 \times 10^{-10}$  m ที่ 100 kPa มีตัวต้านทานที่อยู่ระยะนี้ทั้งหมด 8 ช่องจึงรวมเป็น  $1.96 \times 10^{-9}$  m ทำเช่นเดียวกับช่อง b-e แล้วนำมารวมกันที่แต่ละความดัน ได้ผลดังตารางที่ 6.4 นำมาวาดกราฟเปรียบกับค่าที่วัดได้จริงจากหัวข้อที่ 6.2 ได้ดังรูปที่ 6.27 ค่าที่คำนวณและค่าที่วัดได้จริงนั้นมีความแตกต่างกันมาก อาจเนื่องมาจากความหนาของตัวต้านทานที่วัดได้นั้นไม่ถูกต้อง

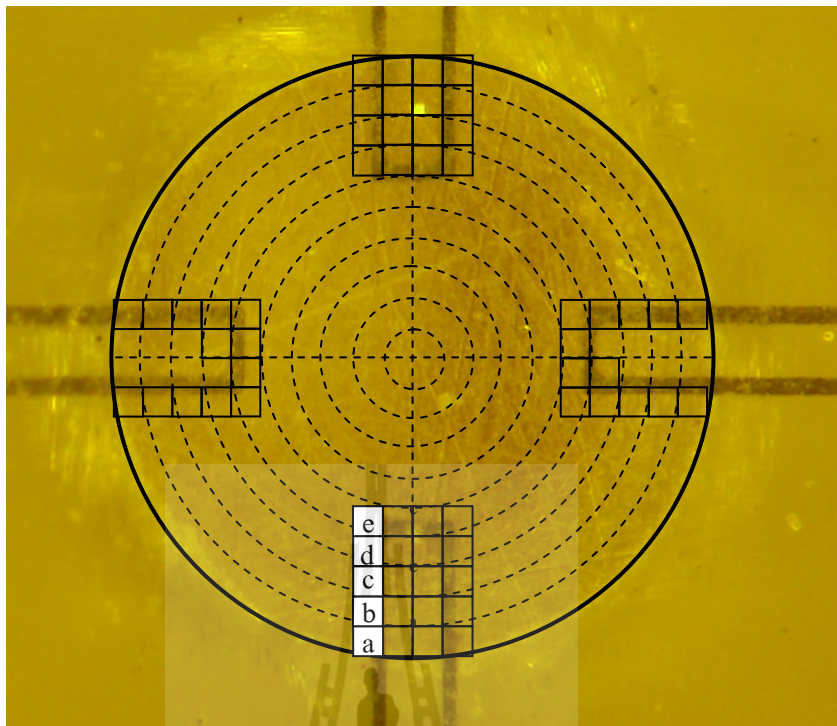
และในการคำนวณคิดเฉพาะความยาวที่เปลี่ยนไป ไม่ได้คิดความกว้างของตัวด้านทานที่เปลี่ยนไป จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 6.24 ภาพจากเครื่องวัดความหนาแสดงการวัดขนาดของตัวด้านทาน



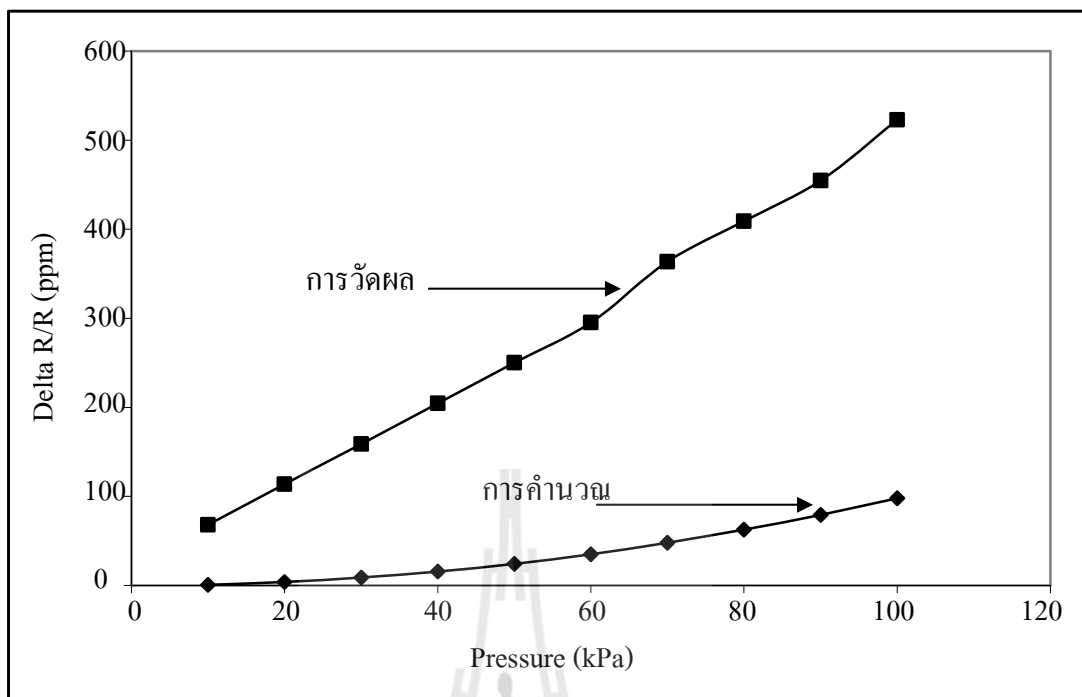
รูปที่ 6.25 ลักษณะการแบ่งตัวด้านทานตามแนวรัศมีของไดอะเฟรม



รูปที่ 6.26 การแบ่งตัวต้านทานเพื่อคำนวณหาความต้านทานที่สร้างในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 6.4 ผลการคำนวณค่า  $\Delta R / R$  ที่ความดันต่าง

Pressure (kPa)	$\Delta R / R$ (ppm) คำนวณ	$\Delta R / R$ (ppm) จากการวัด
10	0.9	68.2
20	3.9	113.6
30	8.8	159.1
40	15.7	204.54
50	24.5	249.9
60	35.3	295.4
70	48.1	363.6
80	62.8	409.1
90	79.5	454.5
100	98.1	522.7



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงค่า  $\Delta R/R$  ที่ได้จากการวัดและการคำนวณด้วยแบบจำลองอย่างง่าย

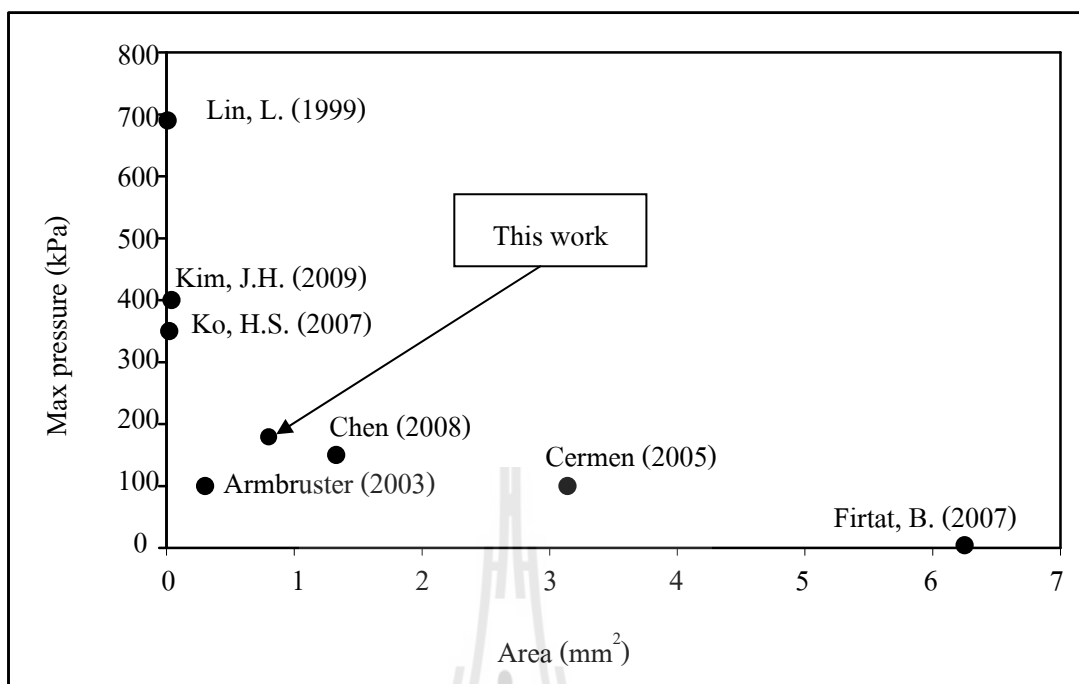


## บทที่ 7

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุปงานวิจัย

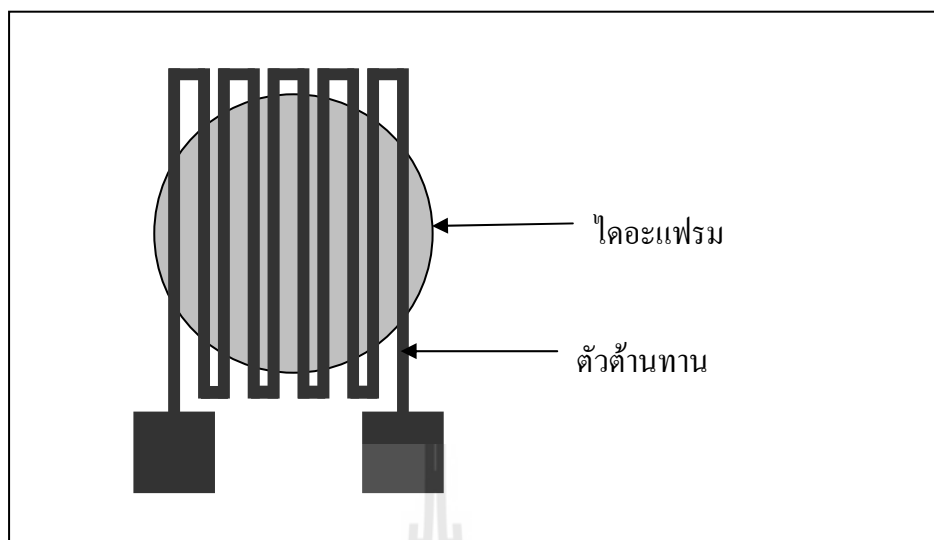
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรมในการรับปริมาณอินพุต (ความดันก๊าซ) ลักษณะของสารไวแสง SU-8 ที่ถูกฉายแสงแล้วจะมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นได้เมื่อมีแรงมากระทำ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจรู้ ได้ลักษณะของตัวตรวจรู้ที่มีไดอะแฟรมหนา 40  $\mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  และตัวต้านทานสร้างด้วยโลหะนิโครมมีทั้งหมด 4 ตัวเชื่อมต่อกันทั้งหมดอยู่ด้านบนของสารไวแสงขนาดความกว้าง 40  $\mu\text{m}$  โดยจะทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันในช่วง 0-180 kPa ในขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ได้ผลดีที่สุดคือ ใช้แผ่นวงจรมพิมพ์เจาะรูขนาด 1000  $\mu\text{m}$  จากนั้นเติมโลหะทองแดงลงในรู ด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จากนั้นขัดผิวหน้าให้เรียบเสมอกันทั่วทั้งแผ่น นำไปหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 ให้ได้ความหนา 40  $\mu\text{m}$  และนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเลตให้เกิดการแข็งตัว นำไปสกัดทองแดงในรูออกด้วยสารละลายเคมี จะได้ไดอะแฟรม จากนั้นสร้างตัวต้านทานโลหะ ด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ ผ่านหน้ากากโลหะที่มีลวดลายตัวต้านทานไฟฟ้า จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 ทับบาง ๆ อีกชั้น แล้วนำไปเชื่อมต่อสายเพื่อนำไปวัดผล การทดสอบนั้นได้ทำการสอบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700 โดยต่อตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นเข้ากับวงจรที่ออกแบบไว้แล้ว ต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผล และตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นสามารถวัดความดันได้ในช่วงอุณหภูมิ 25-60  $^{\circ}\text{C}$  นำงานในวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้ดังรูปที่ 7.1



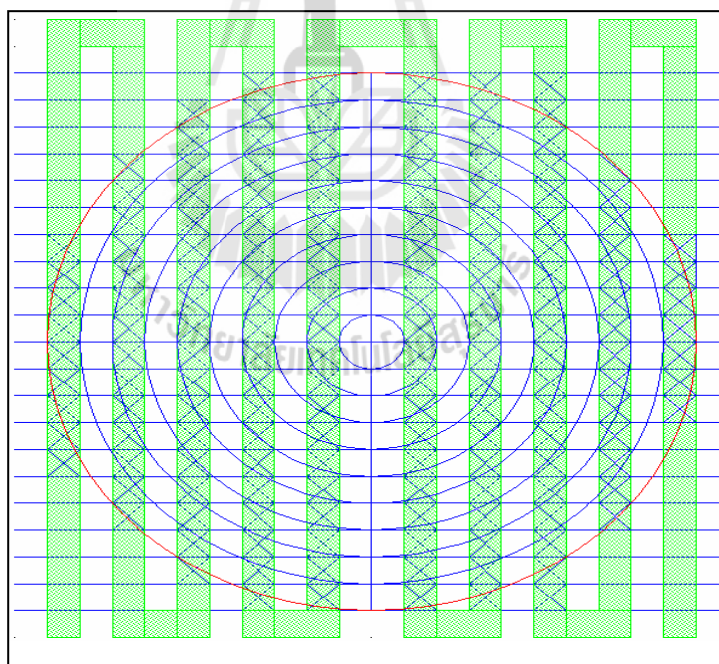
รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับงานวิจัยอื่น ๆ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

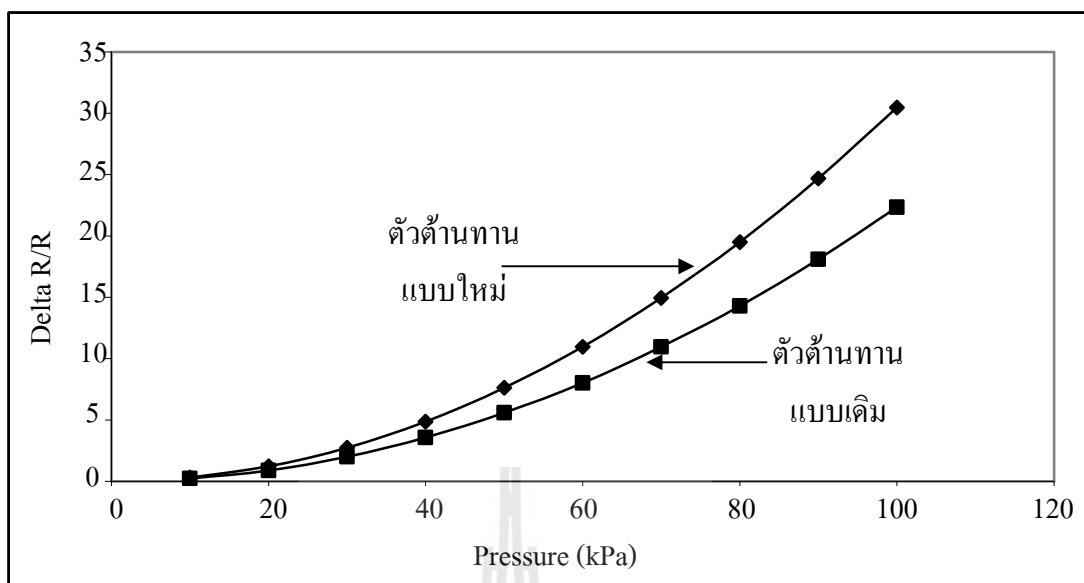
ลักษณะของตัวต้านทานที่วางบนไดอะแฟรมควรจะอยู่ที่บริเวณไดอะแฟรมดังรูปที่ 7.2 เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงมาก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับความยาวของตัวต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น โดยได้ทำการคำนวณความยาวเปรียบเทียบระหว่างตัวต้านทานแบบใหม่และตัวต้านทานแบบเดิมที่ได้สร้างในงานวิจัยนี้ โดยใช้วิธีเดียวกับหัวข้อที่ 6.6.4 โดยกำหนดให้ตัวต้านทานทั้งแบบใหม่และแบบเดิมมีความกว้าง  $50\ \mu\text{m}$  และหนา  $1000\text{\AA}$  เท่ากัน จากรูปที่ 6.24 ตัวต้านทานแบบเดิมที่สร้างในงานวิจัยนี้ คำนวณแล้วได้ค่าความต้านทานที่  $0\ \text{kPa}$  เท่ากับ  $1683\ \Omega$  เมื่อให้ความดัน  $100\ \text{kPa}$  มีความยาวเพิ่มขึ้น  $0.171\ \mu\text{m}$  ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป  $0.42\ \Omega$  มีค่า  $\Delta R/R = 22.3\ \text{ppm}$  จากรูปที่ 7.3 เป็นตัวต้านทานแบบใหม่ทำการคำนวณแบบเดียวกับตัวต้านทานแบบเดิมที่ความดัน  $0\ \text{kPa}$  ตัวต้านทานมีค่า  $2640\ \Omega$  เมื่อให้ความดัน  $100\ \text{kPa}$  มีความยาวเพิ่มขึ้น  $0.366\ \mu\text{m}$  ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป  $0.81\ \Omega$  มีค่า  $\Delta R/R = 30.6\ \text{ppm}$  เห็นได้ว่าตัวต้านทานแบบใหม่นี้ให้ค่า  $\Delta R/R$  ที่มากกว่าแบบเดิม  $37.2\%$  คำนวณค่า  $\Delta R/R$  ที่ค่าความดันอื่น ๆ ได้ดังรูปที่ 7.4



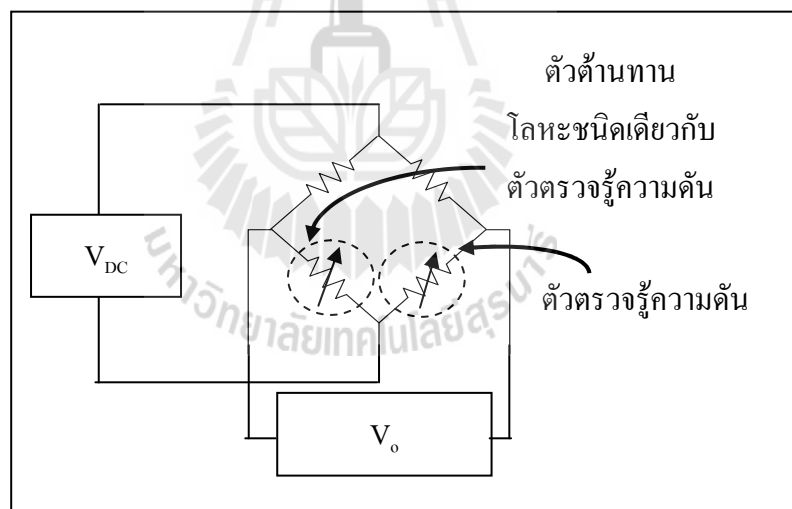
รูปที่ 7.2 ตัวค้ำทานทั่วทั้งไดอะแฟรม (แบบใหม่)



รูปที่ 7.3 การหา  $\Delta R$  ตามจุดต่างๆ ของตัวค้ำทานโดยคิดจากระยะห่างระหว่างตัวค้ำทานบริเวณต่างๆ ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม



รูปที่ 7.4 กราฟจากการคำนวณเปรียบเทียบ  $\Delta R/R$  ของตัวต้านทานแบบเดิมและแบบใหม่



รูปที่ 7.5 วงจรบริดจ์เพื่อวัดผลของอุณหภูมิ

เพื่อวัดผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการวัด ในวงจรบริดจ์ควรมีตัวต้านทานไฟฟ้าที่เป็นโลหะชนิดเดียวกับตัวตรวจรู้ความดัน แสดงการต่อวงจรบริดจ์ดังรูปที่ 7.5 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานทั้งสองจะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากันส่งผลให้แรงดันที่ออกมาจากวงจรบริดจ์ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ



## รายการอ้างอิง

- วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์. (2548). เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและระบบควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ศ.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- วิศรุต ศรีรัตน์. (2550). เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน)
- Armbruster, S., Schiifer, F., Lammell, G., Artmanu, H., Schelling, C., Benzel, H., Finkbeinerl, S., Liirme, F., Ruther, P., and Paul, O. (2003). A Novel micromaching process for the fabrication of monocrystalline Si-membrane using porous silicon. **The 12<sup>th</sup> International Conference on Solid State Sensors. Actuators and Microsystems.** Boston, June 8-12, 2003 : 246-249
- Carmen, K. M. F., Maggie, Q. H. Z. , Dong, Z., and Li, W.J. (2005). Fabrication of CNT Based MEMS Piezoresistive Pressure Sensors Using DEP Nanoassembly. **Proceedings of 2005 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Nanotechnology** , July 2005
- Chen, S., Zhu, M., Ma, B., and Yuan, W. (2008). Design and Optimization of a Micro Piezoresistive Pressure Sensor. **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems** : 351-356
- Engel, J., Chen, J., and Liu, C. (2006). Strain sensitivity enhancement of thin metal flim strain gauges on polymer microscale structures. **Applied Physics Letters 89.**
- Firtat, B., Moldovan, C., Iosub, R., Necula, D., Nisulescu, M. (2007). Differential piezoresistive pressure sensor. **IEEE** : 87-90
- Fraden, J. (2004). **Handbook of modern sensor : physics, designs and application.** 3<sup>rd</sup> edition. 1996 Springer Science+Business Media, Inc.
- Hsu, T. (2008). **MEMS and microsystems : design, manufacture, and nanoscale engineering,** 2<sup>nd</sup> edition, Hoboken, N.J. : John Wiley
- Janovsky, L., and Bauer, R. (2003). Absolute Pressure Sensors in CERMET Thick Film Technology. **26th International Spring Seminar on Electronics Technology** : 448-451

- Kim, J. H., Park, K. T., Kim, H. C., and Chun, K. (2009). Fabrication of a piezoresistive pressure sensor for enhancing sensitivity using silicon nanowire. **IEEE Transducers 2009**, USA, June 21-25 : 1936-1939
- Ko, H.S., Liu, C.W., and Gau, C.W. (2007). Novel fabrication of a pressure sensor with polymer material and evaluation of its performance. **J. Micromech. Microeng.** : 1640–1648
- Lim, H.C., Schulkin, B., Pulickal M.J., Liu, S., Petrova, R., Thomas, G., Wagner, S., Sidhu, K. and Federici, J.F. (2005), Flexible membrane pressure sensor. **Sensors and Actuator A** **119** : 332-335
- Lin, L. (1999). A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors. **Journal of microelectromechanical systems**, Vol.8, No.4, December 1999 : 514-522
- Mohan, A., Malshe, A. P., Aravamudhan, S., and Bhansali, S. (2004). Piezoresistive MEMS pressure sensor and packaging for harsh oceanic environment. **Electronic component and technology conference** : 948-950
- Pramanik, C., and Saha, H. (2006). Piezoresistive pressure sensing by porous silicon membrane. **IEEE sensors journal**, Vol.6, No. 2, April. : 301-309
- Stoetzler, A., Dittmann, D., Henn, N., Jasenek, A., Klopff, F., Scharping, A., and Frey, W. (2007). A small size high pressure sensor based on metal thin film technology. **IEEE SENSORS 2007 Conference** : 825-827
- Timoshenko, S., and Woinosky-Krieger, S. (1959) .**Theory of Plates and Shells**. McGraw-Hill.



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### โปรแกรมคำนวณและวาดกราฟการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่มีความดันและความหนาต่าง ๆ

```
%SU-8 Diaphragm Deflectio
```

```
clear all ;clc
```

```
a = 1e-6*input('Enter diaphragm radius in um:');
```

```
h = 1e-6*input('Enter diaphragm thickness in um:');
```

```
P = input('Enter applied pressure in Pa:');
```

```
b = 1e-6;
```

```
r = 0:b:a;
```

```
E = 4.02e9; %Young's modulus
```

```
v = 0.22; %Poisson's ratio
```

```
w = ((3*(1-v^2)*P)*(a^2-r.^2).^2)/(16*E*h^3);
```

```
figure(1) %Diaphragm deflection
```

```
plot(r,w)
```

```
xlabel('radial coordinate')
```

```
ylabel('Deflection')
```

```
L=0;
```

```
X=b;
```

```
for i=1:(a/b);
```

```
    H=(w(i)-w(i+1));
```

```
    W=(X^2+H^2)^(1/2);
```

```
    L=L+W;
```

```
End
```

```
disp('Max deflection = ');
```

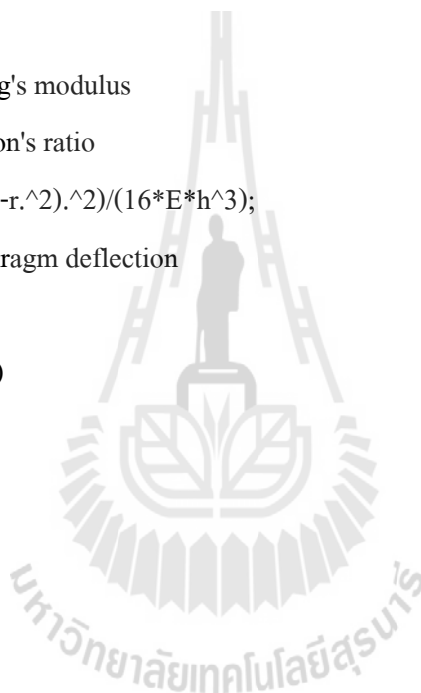
```
format long
```

```
disp(w(1));
```

```
disp('length = ');
```

```
format long
```

```
disp(L)
```



โปรแกรมคำนวณระยะการโก่งตัวและความยาวที่เปลี่ยนไปของไดอะแฟรม เมื่อไดอะแฟรมมี

ความยาวรัศมี 500  $\mu\text{m}$  หน้า 40  $\mu\text{m}$

%SU-8 Diaphragm Deflection

clear all ;clc

a=500e-6; %Diaphragm radius

h=40e-6; %Diaphragm thickness

P=0:10e3:100e3; %Pressure in Pa

b = 50e-6;

r = 0:b:a;

E = 4.02e9; %Young's modulus

v = 0.22; %Poisson's ratio

[x,y]=meshgrid(r,P);

w = (y.\*(3\*(1-v^2)).\*(a^2-x.^2).^2)/(16\*E\*h^3);

figure(1)

surf(x,y,w)

L=[0,0]; DL=[0,0]; X=b;

for i=1:11;

for j=1:(a/b);

H =(w(i,j)-w(i,j+1));

W=(X^2+H^2)^(1/2);

L(i,j)=W;

DL(i,j)=L(i,j)-b;

end

end

PP=0:10e3:100e3;

rr =b:b:a;

[X,Y]=meshgrid(rr,PP);

figure(2)

surf(X,Y,DL)



ภาคนวค ข

โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันและการอ่านค่าความดันจากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น

```
// MPX5700
int Volume0 = 0,Volume1=1; //Volume = Analog Pin-0
float Vs=5.00;
float sum_ADC0,sum_ADC1,ADC0,ADC1,P;
int i,n=20;
long previousMillis=0;
void setup()
{
Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
if(micros() - previousMillis > 1*1000000) //1sec
{
previousMillis = micros();
cal_Kpa();
}
}
void cal_Kpa(void)
{
sum_ADC0=0,sum_ADC1=0;
// ADC
for(i=1;i<=n;i++)
{
ADC0 = analogRead(Volume0);
sum_ADC0=sum_ADC0+ADC0;
ADC1 = analogRead(Volume1);
sum_ADC1=sum_ADC1+ADC1;
}
}
```

```

float Vout0;
Vout0 = ((float)(sum_ADC0/n)/1023)*5;
float Vout1;
Vout1 = ((float)(sum_ADC1/n)/1023)*5;
//Commercial sensor MPX5700
float P_kPa0;
float P_psi0 ;
P_kPa0 = (Vout0/Vs-0.04)/0.0012858 ;
P_psi0 = P_kPa0*0.1431392 ;
Serial.print("MPX5700");
//Serial.print(" ");
//Serial.print(sum_ADC0/n);
Serial.print(" ");
Serial.print(P_kPa0 );
Serial.println(" kPa ");
//New pressure sensor
//P=((Vout1-0.1004)/0.0324)-13;
P=(((sum_ADC1/n)-133.44)/1.6942);
Serial.print("New sensor");
Serial.print(" ");
Serial.print(sum_ADC1/n);
Serial.print(" ");
Serial.print(P);
Serial.print(" kPa ");
Serial.print(" ");
}

```



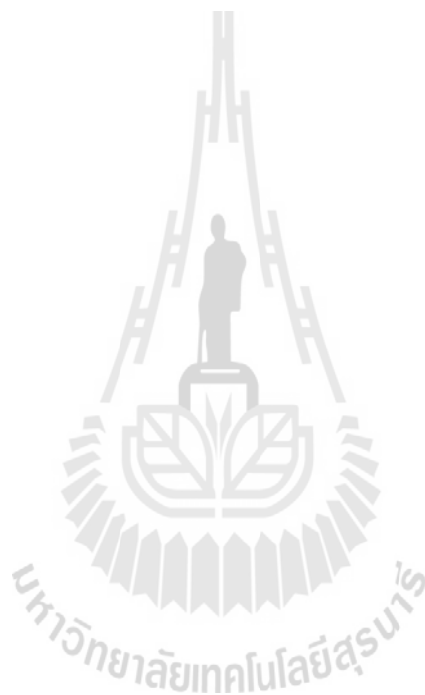


ภาคผนวก ค

บทความวิชาการ

## บทความวิชาการ

Boonprakong, K., Pantong, C., Mapato, M., Deekla, P., and Chomnawang, N. "**A low-cost pressure sensor based on a NiCr piezoresistor on SU-8 photoresist membrane**", กำลังเตรียมต้นฉบับ เพื่อทำการส่งตีพิมพ์



## ตัวตรวจรู้ความดันต้นทุนต่ำแบบเพียโซด้วยเมมเบรนสารไวแสง SU-8

### A low cost pressure sensors based on a NiCr piezoresistor on SU-8 photoresist membrane

กมลรัตน์ บุญประกอบ\* เฉลิมชัย ป้านทอง มาโนทย์ มาปะโท พิทยา ตีกล้า และ นิมิต ชมนาวัง

Kamonrat Boonprakong, Chalermchai Pantong, Manot Mapato, Pittaya Deekla and Nimit chomnawang

\*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ค.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร.044-224400

E-mail: b.kamonrat@gmail.com

#### บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการสร้างตัวตรวจรู้ความดันในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคจะสร้างด้วยซิลิคอน ซึ่งมีราคาสูง ในบทความนี้จึงนำเสนอการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจที่สร้างด้วยสารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ มีลักษณะยืดหยุ่น มีค่ามอดุลัสของยังที่น้อยกว่าซิลิคอน จึงมีความยืดหยุ่นสูงกว่าซิลิคอน ทำให้มีการตอบสนองต่อความดันที่ต่ำกว่า อีกทั้งยังมีราคาที่ถูกกว่าซิลิคอนหลายเท่า ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าสเตรนเกจ เพื่อเป็นตัววัดปริมาณความดัน ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้าสร้างจากโลหะนิโครม เมื่อตัวต้านทานไฟฟ้าเป็นโลหะ อุณหภูมิจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโลหะชนิดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ และมีราคาถูก หางซื้อได้ง่าย

#### Abstract

This article aims to a fabricate a gauge pressure sensor. In general, Pressure sensor is fabricated on a silicon substrate. This article proposes a fabricated gauge pressure sensor with polymer material, such as SU-8. SU-8 has a Young's modulus lower than silicon, also SU-8 has a good deflection and flexibility more than silicon and cost of it is lower than silicon. This pressure sensor is change resistance to measure pressure. Resistors are nichrome. Nichrome has

TCR (Temperature coefficient of resistivity) less than other metal.

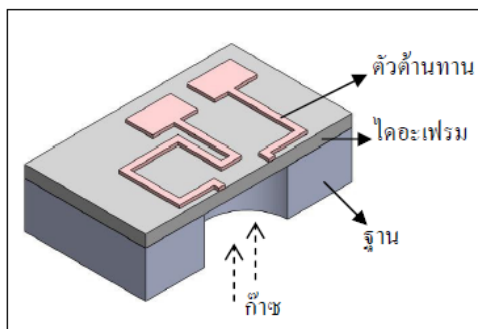
#### 1. บทนำ

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical System) คือระบบที่รวมศาสตร์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมเครื่องกลเข้าด้วยกัน มีขนาดเล็ก ในระดับไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร สามารถแบ่งออกได้สองประเภทหลักคือ ตัวตรวจรู้จุลภาค (Micro sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหรือปริมาณกายภาพต่างๆ เช่น ความดัน ความร้อน ความชื้น เป็นต้น และตัวขับเคลื่อนจุลภาค (Micro actuator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล เช่น ไมโครวาล์ว ไมโครมอเตอร์ ไมโครปั๊ม เป็นต้น ปัจจุบันอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และยังมีการพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีการสร้างอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ทำการได้ศึกษาและสร้างตัวตรวจรู้ความดัน (Pressure sensor) ด้วยกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งจะนำเสนอกระบวนการสร้างในหัวข้อถัดไป ปัจจุบันตัวตรวจรู้ความดันมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ควบคุมเครื่องมือในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบรถยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น ลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันก๊าซแสดงดังรูปที่ 1 โดยโครงสร้างนี้มีไดอะแฟรม (Diaphragm) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าเมมเบรน (Membrane) ทำหน้าที่เป็นตัวรับปริมาณอินพุต

หรือก๊าซ และมีตัวต้านทานไฟฟ้า หรือ สเตรนเกจ (strain gauge) วางอยู่บริเวณด้านบนโคอะเฟรมอีกชั้น มีหลักการวัดความดันก๊าซคือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของโคอะเฟรมเมื่อมีความดันก๊าซมากระทำ โคอะเฟรมจะเกิดการโก่งตัวขึ้นส่งผลให้ความเครียดเกิดขึ้นที่โคอะเฟรมและตัวต้านทานสเตรนเกจที่อยู่บริเวณด้านบนโคอะเฟรม ทำให้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยขนาดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของความดันก๊าซที่มากระทำ

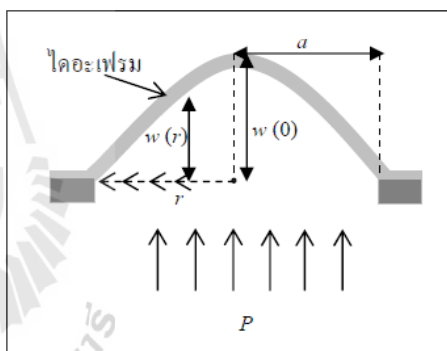
ตัวตรวจรู้ความดันนั้นมีการพัฒนาลักษณะโครงสร้างและวิธีการสร้างอย่างมากมาย เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความดันนั้นสามารถวัดความดันที่ระดับต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วตัวตรวจรู้ความดันในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค จะมีโคอะเฟรมที่สร้างด้วยซิลิคอน [1] อีกทั้งยังมีการใช้โลหะ พอลิเมอร์ [2] และเซรามิก [3] เพื่อความแข็งแรงและเหมาะกับการใช้งาน กระบวนการสร้าง เทคนิคหรือวัสดุที่ใช้ในการสร้างมีหลายรูปแบบ เช่น โคอะเฟรมที่สร้างด้วยกระบวนการอีพิแทกเซียล [4] (Epitaxial Process) หรือการสร้างด้วยวิธี Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) เป็นต้น นอกจากนี้ในส่วนของตัวต้านทานไฟฟ้าที่อยู่บริเวณด้านบนโคอะเฟรมนั้นก็มีวิธีการสร้างได้หลายวิธีเช่นกัน



รูปที่ 1 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

## 2. การออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน

สิ่งสำคัญสำหรับตัวตรวจรู้ความดันคือ ขนาดของโคอะเฟรม เนื่องจากเป็นตัวกำหนดระดับย่านความดันที่ตัวตรวจรู้สามารถวัดได้ ความเครียดสูงสุดที่โคอะเฟรมสามารถรับได้ และเป็นตัวกำหนดความไวในการวัดความดันอีกด้วย [5] โคอะเฟรมในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม พื้นผิวมีความเรียบ มีความหนาเท่ากันทั้งแผ่นและเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน มีความหนาไม่มาก (ความหนาไม่เกิน 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของโคอะเฟรม) มีความยืดหยุ่นเล็กน้อย การให้ความดันจะให้ที่ระนาบของแผ่นโคอะเฟรมทั้งแผ่น ซึ่งทำให้แผ่นโคอะเฟรมจะเกิดการโก่งตัวขึ้นดังรูปที่ 2 การโก่งตัวของโคอะเฟรมเนื่องจากความดันก๊าซอธิบายได้ตามสมการที่ (1) [6]



รูปที่ 2 ลักษณะการโก่งตัวของโคอะเฟรม

$$w = \frac{Pa^4}{64D} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 \tag{1}$$

- เมื่อ  $w$  คือ ระยะโก่งตัวของโคอะเฟรม  
 $P$  คือ ความดันก๊าซ (kPa)  
 $a$  คือ ความยาวรัศมีของโคอะเฟรม  
 $r$  คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของโคอะเฟรม  
 $D$  คือ ความแข็งเชิงคด (Flexural rigidity)  
 กำหนดได้โดยสมการที่ (2)

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

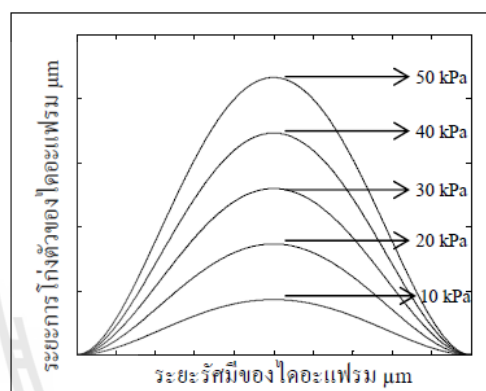
เมื่อ  $E$  คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus)  
 $h$  คือ ความหนาของไคอะแพรม  
 $\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

เมื่อนำค่า  $D$  จากสมการที่ (2) มาแทนในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3)

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

จากสมการที่ (3) ระยะ โกงตัวของไคอะแพรมจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะ  $r = 0$  หรือที่จุดศูนย์กลางนั่นเอง ปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวของไคอะแพรมคือ ความดัน ( $P$ ) ความยาวรัศมีของไคอะแพรม ( $a$ ) และความหนาของไคอะแพรม ( $h$ ) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยการใช้พอลิเมอร์เป็นตัวรับปริมาณอินพุตโดยใช้สารไวแสงชนิดลบหรือ SU-8 ในการสร้างไคอะแพรมของตัวตรวจรู้ความดันซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยทำการจำลองหาขนาดของไคอะแพรมให้เหมาะกับการใช้วัดความดันซึ่งสารไวแสง SU-8 มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 4.02 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.22 [7] กำหนดให้ความหนาของไคอะแพรมเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  และทดลองที่ความดันเท่ากับ 10kPa 20kPa 30kPa 40kPa และ 50kPa ทำการคำนวณและวาดกราฟได้ดังรูปที่ 3 เมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นไคอะแพรมจะโก่งตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาจากสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่าไคอะแพรมจะโก่งตัวสูงมากขึ้น เมื่อความดันก๊าซที่มากกระทำและความยาวรัศมีของไคอะแพรมมีค่ามากส่วนความหนาของไคอะแพรมนั้นต้องมีค่าน้อยๆ ในงานวิจัยนี้ต้องการวัดความดันที่ไม่สูงมากนักคือ 0-180 kPa ทำให้ไคอะแพรมต้องมีความยาวรัศมีที่มีค่า

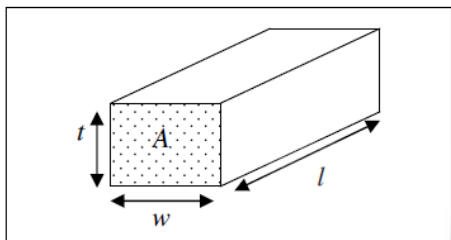
มากๆ จึงทำให้ตัวตรวจรู้สามารถวัดความดันต่ำได้ดีจากการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆทำให้ได้ขนาดไคอะแพรมของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างโดยใช้สารไวแสง SU-8 มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  ซึ่งหากมีความหนาน้อยกว่านี้อาจทำให้ไคอะแพรมไม่สามารถรับระดับความดันได้มากนักที่ความดันสูงๆอาจทำให้ไคอะแพรมเกิดความเสียหายได้ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1000  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป



รูปที่ 3 การจำลองการโก่งตัวของไคอะแพรมที่มีความดันระดับต่างๆ

สเตรนเกจ (Strain gauge) คือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเครียดของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อมีความดันมากกระทำกับแผ่นไคอะแพรมที่มีสเตรนเกจอยู่ด้านบน จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นบนสเตรนเกจด้วยเช่นกัน ส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามขนาดความเครียดที่เกิดขึ้น หรือขนาดของความดันที่มากกระทำ การวัดผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีความดัน สามารถทำได้ด้วยการนำตัวตรวจรู้ความดันต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ ซึ่งเมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ได้จากวงจรมีค่าแปรผันตามความดันที่ให้แก่ตัวตรวจรู้

เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวจะทำให้สเตรนเกจที่อยู่บริเวณด้านบนไดอะแฟรมมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะจะแปรค่าผันตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด สามารถหาได้จากสมการที่ (4) ซึ่งลักษณะของตัวต้านทานไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ (4)



รูปที่ 4 ลักษณะตัวต้านทานไฟฟ้า

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{4}$$

เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ

$l$  คือ ความยาวของตัวต้านทานไฟฟ้า

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทานไฟฟ้า

$\rho$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

จากสมการที่ (4) เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวและพื้นที่หน้าตัด เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวทำให้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีความยาวเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่หน้าตัดมีค่าลดลง จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งขนาดของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของความดันที่มากระทำ

### 3. กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

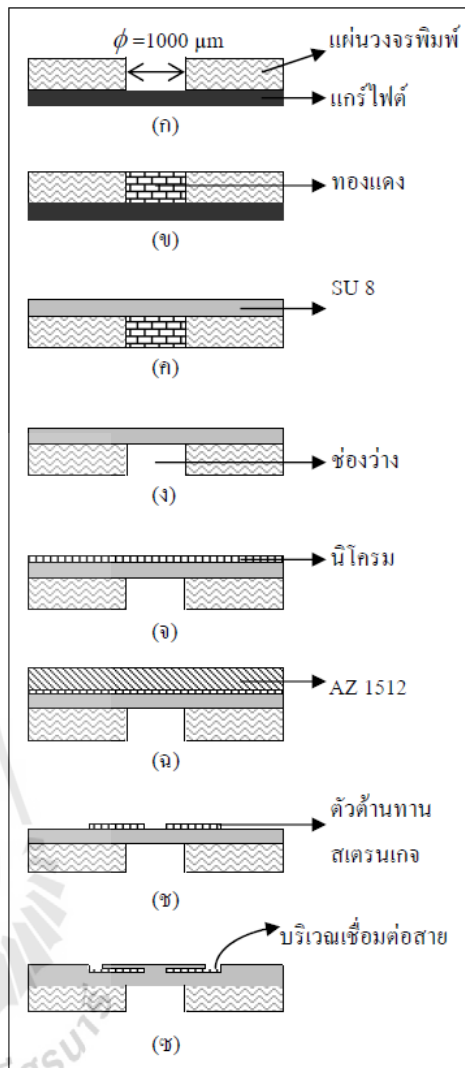
โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วยซิลิคอน จะสร้างด้วยกระบวนการกัด (Etching) เนื้อซิลิคอนเพื่อให้เกิดแผ่นไดอะแฟรม จากนั้นจึงสร้างตัวต้านทานไฟฟ้าลงบนไดอะแฟรม โดยการเจือสาร

เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีราคาสูงและใช้อุณหภูมิที่สูงในการสร้าง การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นสร้างไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ด้วยกระบวนการที่มีราคาถูก โดยการใช้สารไวแสงชนิดลบหรือ SU-8 ดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้น เมื่อสารไวแสงชนิดนี้ถูกแสงอัลตราไวโอเลตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะเกิดการแข็งตัว มีลักษณะยื่นหยุ่นเหมือนพอลิเมอร์ จึงนำมาใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุต กระบวนการที่ใช้สร้างตัวตรวจรู้ความดันคือกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography) หรือการสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) และการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) มีขั้นตอนดังรูปที่ 5 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) นำแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) สกัดทองแดงให้หมด จากนั้นเจาะรูทะลุทั้งแผ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  นำแกรไฟต์ประกบติดด้านหลังของแผ่นพิมพ์วงจร ลักษณะดังรูปที่ 5 (ก)
- 2) นำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เพื่อเติมโลหะทองแดงลงในรูที่เจาะ จากนั้นนำแผ่นแกรไฟต์ออกจัดบริเวณผิวหน้าของทองแดงให้เรียบเสมอกับแผ่นวงจรพิมพ์ ดังรูปที่ 5 (ข)
- 3) หมุนเคลือบ (Spin) สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2050 หมุนด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm จะให้ความหนาของชั้นสารไวแสง 40  $\mu\text{m}$  (ข้อมูลจากความเร็วรอบในการหมุนเคลือบสารไวแสง) [8] อบด้วยอุณหภูมิ 65°C นาน 5 นาที และ 95°C นาน 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงอัลตราไวโอเลตด้วยค่าพลังงาน 285  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  และอบด้วยอุณหภูมิ 110°C นาน 20 นาทีเพื่อให้สารไวแสงเกิดการแข็งตัวทั่วทั้งแผ่น สารไวแสงที่ได้ในขั้นตอนนี้จะเป็นไดอะแฟรม ของตัวตรวจรู้เพื่อรับปริมาณอินพุตที่ต้องการวัด ดังรูปที่ 5 (ค)

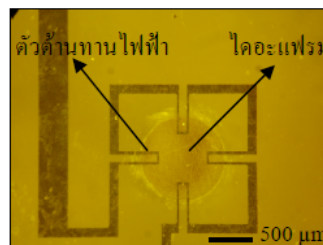


- 4) ทำการสกัด (Etching) ทองแดงด้วยสารละลายเคมี บริเวณในรูออกให้หมดจะได้ไดอะแฟรม SU-8 ดังรูปที่ 5 (ง)
- 5) นำชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบโลหะนิโครมด้วยการระเหยไอโลหะ ในสุญญากาศ (Evaporation) เพื่อใช้สร้างเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน ดังรูปที่ 5 (จ)
- 6) หมุนเคลือบสารไวแสง AZ 1512 ด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm อบด้วยอุณหภูมิ 95 °C นาน 20 นาทีฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้เกิดลวดลายตัวต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจรู้แล้วล้างสารไวแสง (Develop) ด้วยสารละลายเคมี สารไวแสงขั้นนี้ใช้เป็นหน้ากากในการสกัดโลหะนิโครมให้เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (ฉ)
- 7) สกัดโลหะนิโครมเป็นลายตัวต้านทานไฟฟ้าด้วยสารละลายเคมี HCl:HNO<sub>3</sub>:DI Water (1:1:3) แล้วล้างสารไวแสง AZ ออกให้หมด จะได้ตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่า 4.4 kΩ ดังรูปที่ 5 (ช)
- 8) หมุนเคลือบสารไวแสง SU 8 เบอร์ 2002 ด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm อบด้วยอุณหภูมิ 65 °C นาน 3 นาที และ 95°C นาน 5 นาทีแล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเปิดลายเฉพาะเวลาที่เชื่อมคอสายไฟ เพื่อนำไปต่อในการวัดผล สารไวแสงขั้นนี้ใช้เป็นชั้นป้องกันตัวต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (ซ)

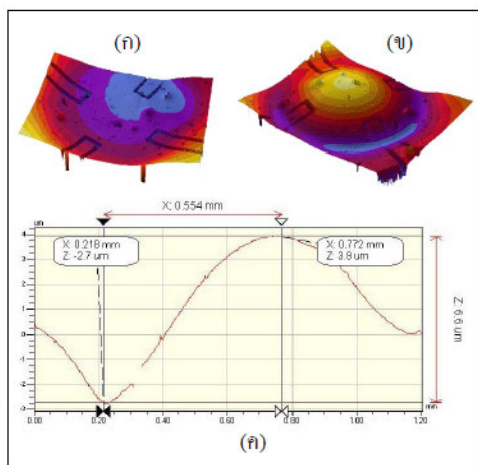


รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันจะได้ลักษณะชิ้นงานที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 โครงสร้างตัวตรวจรู้เป็นแผ่นวงจรมิติจะขนาด 1000 ไมโครเมตร มีไดอะแฟรมที่สร้างด้วยสารไวแสง SU-8 มีหนา 40 ไมโครเมตร ตัวต้านทานสเตรนเกจพาดผ่านเข้าไปบริเวณไดอะแฟรมทั้งหมดสี่ตัว ซึ่งตัวต้านทานสเตรนเกจสร้างจากโลหะนิโครมด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ มีค่าความต้านทาน 4.400 kΩ เมื่อได้ตัวตรวจรู้ความดันแล้วจะนำไปทดสอบวัดความดันโดยมีรายละเอียดทดสอบในหัวข้อต่อไป



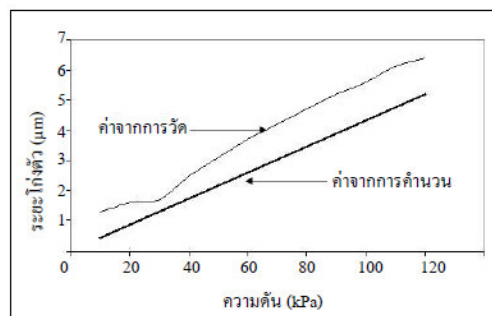
รูปที่ 6 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



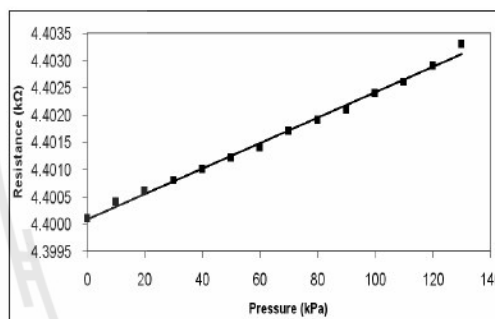
รูปที่ 7 ลักษณะการโค้งตัวของไคอะแพรมที่ความดัน  
ก๊าซ (ก) 0 kPa (ข) 120 kPa (ค) การวัดระยะโค้งตัว

#### 4. การทดสอบและผลการทดสอบ

ทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่ได้จากการสร้างโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้กับตัวตรวจรู้ความดันทางด้านล่างของตัวตรวจรู้ไคอะแพรมจะเกิดการโค้งตัวซึ่งระยะโค้งตัวของไคอะแพรมสามารถคำนวณได้ตามในหัวข้อที่ผ่านมา และในการทดลองนี้ได้ทำการวัดระยะการโค้งตัวของไคอะแพรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างได้ไคอะแพรมที่สร้างขึ้นนี้มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  นำมาวัดระยะโค้งตัวโดยเครื่อง Optical profiler (เครื่องวัดความหนา) ได้ภาพลักษณะของไคอะแพรมโค้งตัวแสดงดังรูปที่ 7 และผลของการวัดที่ความดันต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 8 ซึ่งได้นำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการที่ (1) เห็นได้ว่ามีค่าแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นระยะโค้งตัวของไคอะแพรมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ค่าที่วัดได้จริงนั้นมีค่ามากกว่าค่าจากการคำนวณ อาจเป็นผลเนื่องมาจากความหนาของไคอะแพรมที่สร้างได้นั้นมีความหนาไม่เท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  ซึ่งอาจเกิดจากการกำหนดค่าความเร็วรอบในการหมุนเคลือบสารไวแสงได้ความหนาของสารไวแสงที่หมุนเคลือบไม่ตรงตามข้อมูลที่กำหนดไว้



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะโค้งตัวของ  
ไคอะแพรมและความดันก๊าซ



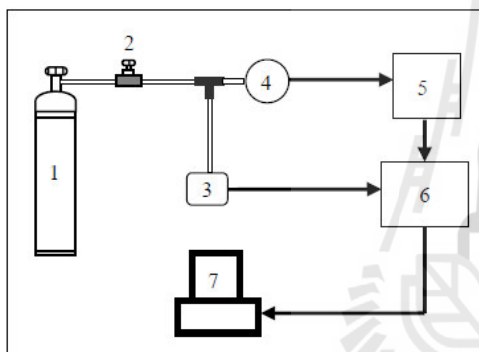
รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า  
และความดันก๊าซ

ไคอะแพรมของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นเป็นสารไวแสง SU-8 ซึ่งมีค่ามอดูลัสของยังที่น้อยกว่าซิลิคอน เมื่อมีความดันมากกระทำที่ไคอะแพรมทำให้ไคอะแพรมเกิดการโค้งตัวที่มากกว่าและเกิดความเครียดที่มากกว่าด้วย ดังนั้นเมื่อไคอะแพรมเกิดการโค้งตัวจะทำให้เกิดความเครียดที่ตัวด้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจ จึงเป็นผลให้ตัวด้านทานไฟฟ้า สเตรนเกจมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น ความเครียดบริเวณตัวด้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ตัวด้านทานไฟฟ้าที่มีความต้านทานเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานได้ผลดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีค่า



น้อยมาก มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเพียง  $3.5 \Omega$  ที่ความดัน 130 kPa

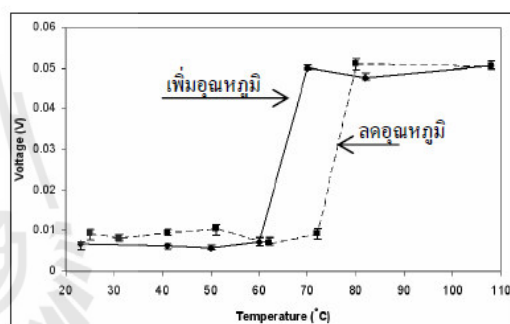
ทำการปรับเทียบ (Calibration) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ MPX 5700 ลักษณะชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 โดยปรับความดันก๊าซไนโตรเจนให้ก๊าซไหลไปยังตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นและ MPX 5700 ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นต่อกับวงจรปรับแต่งสัญญาณ และตัวตรวจรู้ทั้งสองต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่ออ่านค่าความดัน เมื่อทำการปรับเทียบแล้วนำตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นมาใช้วัดความดัน มีค่าความแม่นยำ 10% เมื่อเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700



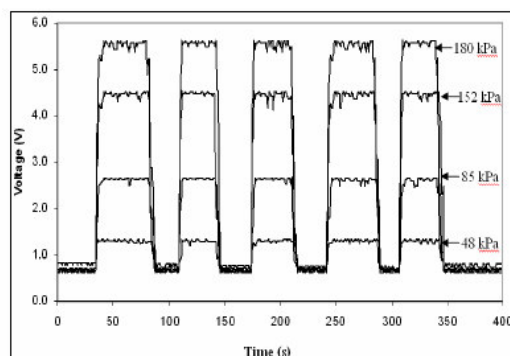
รูปที่ 10 (1) ถังก๊าซไนโตรเจน (2) ตัวปรับความดันก๊าซ (3) ตัวตรวจรู้ความดัน MPX 5700 (4) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น (5) วงจรปรับแต่งสัญญาณ (6) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (7) คอมพิวเตอร์

ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นมีตัวต้านทานไฟฟ้าที่สร้างด้วยโลหะนิโครม จึงทำให้อุณหภูมิมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า ทำการทดสอบผลของอุณหภูมิโดยการนำตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นใส่ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยไม่ป้อนความดันก๊าซให้กับตัวตรวจรู้ความดัน (ยังไม่มีผลของความดันเข้ามาเกี่ยวข้อง) แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร เริ่มที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ  $10^\circ\text{C}$  ทิ้งไว้ 30 นาทีที่แต่ละอุณหภูมิ

จนถึง  $100^\circ\text{C}$  จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำซ้ำเช่นเดียวกันที่แต่ละอุณหภูมิ ผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความดันที่แต่ละอุณหภูมิแสดงผลดังรูปที่ 11 จากรูปแรงดันที่คงที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$ - $60^\circ\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $60^\circ\text{C}$  แรงดันที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal coefficient expansion (CTE)) [5] ของสารไวแสง SU-8 และแผ่นวงจรพิมพ์ที่เป็นวัสดุฐานที่เกาะยึดติดกับโคอะแพรมสารไวแสง SU-8 ซึ่งค่า CTE ของสารไวแสง SU-8 เท่ากับ  $52 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  และแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าเท่ากับ  $14 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  ซึ่งอาจลดผลของอุณหภูมิได้ด้วยการเพิ่มตัวต้านทานไฟฟ้า (Dummy gauge) ต่อเข้าไปในวงจร



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ



รูปที่ 12 กราฟผลการตอบสนองทางเวลา

ทำการวัดผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความดัน โดยการป้อนความดันก๊าซที่ความดันต่างๆในรูปแบบขั้นบันได แล้วจับสัญญาณแรงดันเอาท์พุทโดยใช้ออสซิลอ스코ปบันทึกลักษณะสัญญาณและค่าแรงดันดังรูปที่ 12 ได้เวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที

## 5. สรุป

ในบทความนี้ได้ทำเสนอตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรม กระบวนการที่ใช้สร้างนั้นเป็นกระบวนการที่ง่ายและมีราคาต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิคอนหลายเท่า และตัวตรวจรู้ความดันที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพในการวัดความดันที่ดีเช่นกัน โดยตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 1000  $\mu\text{m}$  ตัวด้านทานไฟฟ้าสร้างด้วยโลหะ นิกโครม สามารถวัดความดันช่วง 0-180 kPa ที่อุณหภูมิ 25°C-60°C มีเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที และค่าความแม่นยำ 10% เมื่อเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700

## คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Lin, L.(1999).A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors. **Journal of Microelectromechanical systems**, Vol.8, No.4,December 1999:514-522
- [2] Carmen, K. M. F, Maggie, Q. H. Z. , Dong, Z. and Wen J., Li .(2005).Fabrication of CNT-Based MEMS Piezoresistive Pressure Sensors Using DEP Nanoassembly. **Proceedings of 2005 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Nanotechnology** , July 2005

[3] Janovsky, L. and Bauer, R.(2003).Absolute Pressure Sensors in CERMET Thick Film Technology.**26th International Spring Seminar on Electronics Technology** :448-451

[4] Armbruster, S., Schiifer, F. , Lammell, G. , Artmanu, H. , Schelling, C. , Benzel, H. , Finkbeinerl, S. , Liirme, F., Ruther, P. and Paul3, O.(2003). A Novel micromaching process for the fabrication of monocrystalline Si-membrane using porous silicon. **The 12<sup>th</sup> International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems**. Boston, June 8-12, 2003:246-249

[5] Ko, H S., Liu, C W. and Gau., C. W. (2007). Novel fabrication of a pressure sensor with polymer material and evaluation of its performance. **J. Micromech. Microeng.** : 1640–1648

[6] Timoshenko, S. and Woinosky-Krieger ,S. (1959) .**Theory of Plates and Shells**. McGraw-Hill.

[7] Hsu, T. (2008), **MEMS and microsystems : design, manufacture, and nanoscale engineering**, 2<sup>nd</sup> edition, Hoboken, N.J. : John Wiley

[8] Microchem Corporation. [www.microchem.com](http://www.microchem.com)

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมลรัตน์ บุญประคอง เกิดวันที่ 6 กรกฎาคม 2528 ที่อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนประสารวิทยา อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนสีคิ้ว“สวัสดิ์ผดุงวิทยา” อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสุนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2550 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาปริญญาโทได้ทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัยที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 3 รายวิชาดังนี้ (1) Power systems laboratory (2) Circuit and device laboratory และ (3) Engineering electronic laboratory ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม