

# การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมด้วย สารไวแสงชนิด SU-8

## Development of A Gauge Pressure Sensors Based on SU-8 Photoresist Diaphragm

กมลรัตน์ บุญประคอง พิทยา ดิกล้ำ นิमित ชมนาวัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจด้วยกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันบนพื้นฐานของไดอะแฟรมที่เป็นสารไวแสงชนิด SU-8 เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์ มีค่า Young's modulus ต่ำกว่าและราคาถูกกว่าซิลิกอน เหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุตของตัวตรวจรู้ความดัน โดยลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันมีไดอะแฟรมเป็นแผ่นวงกลมมีขนาดรัศมี  $500\ \mu\text{m}$  และมีความหนา  $38\ \mu\text{m}$  ซึ่งมีตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรจเกจอยู่ด้านบนไดอะแฟรม ในส่วนของสเตรจเกจนั้น ทำจากโลหะนิโครม (นิกเกิลผสมโครเมียม) มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง สร้างด้วยกระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ ลิโธกราฟี และกระบวนการลิฟออฟ มีค่าความต้านทานไฟฟ้า  $4.404\ \text{k}\Omega$  ตัวตรวจรู้ความดันนี้สามารถวัดความดันในช่วง  $30\text{-}180\ \text{kPa}$  ที่อุณหภูมิ  $25\text{-}60^\circ\text{C}$  มีความไว  $26\ \text{mV/kPa}$  ค่าความแม่นยำ  $\pm 10\%$  และเวลาในการตอบสนองเท่ากับ  $2.3$  วินาที

**คำสำคัญ :** ไดอะแฟรม ตัวตรวจรู้ความดัน ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค กระบวนการลิโธกราฟี

### Abstract

This paper presents a design and fabrication of a gauge pressure sensor by using MEMS processes. The sensor was developed base on SU-8 photoresist diaphragm. Since SU-8 photoresist is polymer material which is lower Young's modulus and manufacturing cost of fabrication than silicon, it must to be used as a material for polymeric detecting diaphragm in this work. The diaphragm is a circular shape which is under a strain gauge resistor. The strain gauge resistor made from NiCr (nickel-chromium) thin film via thermal evaporation, UV lithography, and lift-off process is resistance of  $4.404\ \text{k}\Omega$  on a SU-8 diaphragm which is with a radius of  $500\ \mu\text{m}$  and a thickness of  $38\ \mu\text{m}$ . This low cost sensor can measure gas pressure between  $30\text{-}180\ \text{kPa}$  at  $25\text{-}60^\circ\text{C}$ . Furthermore, this sensor has sensitivity of  $26\ \text{mV/kPa}$ , accuracy  $\pm 10\%$ , and rise time in  $2.3$  second.

**Keywords :** diaphragm, pressure sensor, photolithography, MEMS

## 1. บทนำ

โดยทั่วไปตัวตรวจรู้ความดันในระบบกลไฟฟ้า จุลภาคนิยมสร้างด้วยซิลิกอน [1] แต่ยังมีวัสดุอื่นที่สามารถใช้ได้เช่น เซรามิก [2] หรือ พอลิเมอร์ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยในกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้พอลิเมอร์มากขึ้น ซึ่งโคอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างด้วยพอลิเมอร์นั้นมีการ โกงตัว (deflection) ที่มากกว่าซิลิกอน เพราะค่า Young's modulus ที่น้อยกว่าและราคาต้นทุนในการสร้างนั้นต่ำกว่าซิลิกอน ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาตัวตรวจรู้ความดันที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น การใช้สาร polydimethylsiloxane (PDMS) และ polyethylene terephthalate (PET) เป็นโคอะแฟรม และมีสเตรจเกจแบบฟิล์มบางในโคอะแฟรม [3] ตัวตรวจรู้ความดันที่มีโคอะแฟรมสร้างด้วย PDMS โดยมีคาร์บอนไฟเบอร์เป็นสเตรจเกจ [4] ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย PMMA และมีคาร์บอนนาโนทิว (carbon nanotube) เป็นตัวต้านทานเพียโซ (Piezoresistive) [5] และตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างด้วย SU-8 เป็นโคอะแฟรมที่มีตัวต้านทานแบบเพียโซ [6]

SU-8 เป็นสารไวแสงชนิดลบมีลักษณะเป็นของเหลวเมื่อทำปฏิกิริยากับแสงแล้วจะมีลักษณะแข็งตัวขึ้น มีความยืดหยุ่นคล้ายวัสดุพอลิเมอร์ มีความทนต่อกรดเบสและความร้อนได้ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์อื่น เช่น PDMS และ PET และยังเป็นวัสดุที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เพราะมีราคาถูกกว่าทั้งซิลิกอน มีความสะดวกในการใช้งานและสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (วัสดุ PMMA ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นของรังสีเอ็กซ์)

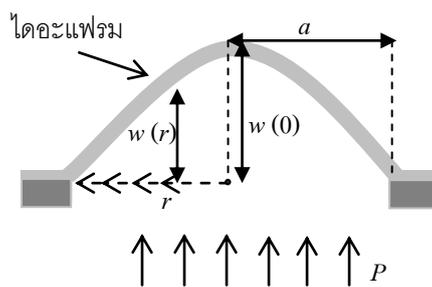
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจรู้ความดันก๊าซ ต้นทุนต่ำที่ใช้วัดความดันก๊าซทั่วไป เช่น วัดความดันจากถังก๊าซ โดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นโคอะแฟรมรูปวงกลม เนื่องจากโคอะแฟรมรูปวงกลมมีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับโคอะแฟรมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส [7] มีขนาดไม่เกิน 1,000  $\mu\text{m}$  สามารถวัด

ความดันก๊าซในช่วงไม่เกิน 30 psi (206 kPa) เทียบกับบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง

## 2. การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

### 2.1 การออกแบบ

ขนาดของโคอะแฟรมเป็นตัวกำหนดระดับย่านความดันที่วัดและความเครียดสูงสุดที่โคอะแฟรมสามารถรับได้ และยังกำหนดความไวของตัวตรวจรู้อีกด้วย เมื่อให้ความดันที่ระนาบของแผ่นโคอะแฟรม โคอะแฟรมเกิดการ โกงตัวขึ้นดังรูปที่ 1 อธิบายได้ตามสมการที่ (1) [8] เมื่อ  $w$  คือ ระยะโก่งตัวของโคอะแฟรม (m)  $P$  คือ ความดันก๊าซ (Pa)  $a$  คือ ความยาวรัศมีของโคอะแฟรม (m)  $r$  คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของโคอะแฟรม (m) และ  $D$  คือความแข็งเชิงดัด (Flexural rigidity) กำหนดได้โดยสมการที่ (2)



รูปที่ 1 ลักษณะการ โกงตัวของโคอะแฟรม

$$w(r) = \frac{P}{64D} [a^2 - r^2]^2 \quad (1)$$

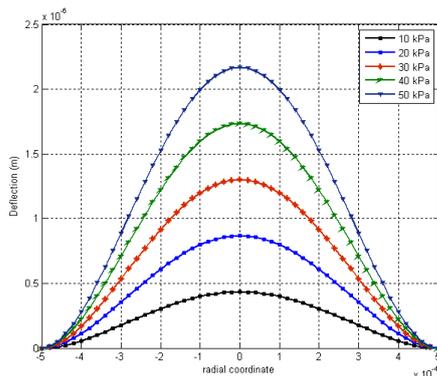
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

เมื่อ  $E$  คือ ยังมอดูลัส (Young's modulus) (Pa)  $h$  คือ ความหนาของโคอะแฟรม (m) และ  $\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) เมื่อนำค่า  $D$  จากสมการที่ (2) มาแทนในสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (3)

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

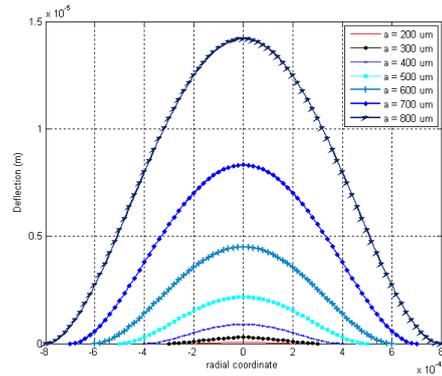
ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยสารไวแสง SU-8 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 4.02 GPa และ อัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.22 [9] จากสมการที่ (3) สามารถทำแบบจำลองโคอะแฟรมเพื่อศึกษาผลของ

ความดันในช่วง 10-50 kPa ต่อการโค้งตัวของไดอะแฟรม โดยกำหนดให้ไดอะแฟรมหนา 40  $\mu\text{m}$  รัศมี 500  $\mu\text{m}$  ได้กราฟลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรมดังรูปที่ 2 คือเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ไดอะแฟรมจะโค้งตัวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อหาขนาดรัศมีไดอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองให้ไดอะแฟรมหนา 40  $\mu\text{m}$  รัศมีตั้งแต่ 200-800  $\mu\text{m}$  ที่ความดัน 50 kPa จะได้ผลดังรูปที่ 3 ไดอะแฟรมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะโค้งตัวได้มากกว่าขนาดเล็ก และเพื่อหาความหนาของไดอะแฟรมที่เหมาะสม ทำการจำลองไดอะแฟรมที่ความหนาต่างๆ โดยมีขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  ที่ความดัน 50 kPa ได้ผลกราฟดังรูปที่ 4 คือไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อยกว่าจะสามารถโค้งตัวได้มากกว่า จากผลการจำลองทั้ง 3 สรุปได้ว่าขนาดไดอะแฟรมควรจะมี ความหนาน้อย และมีขนาดรัศมีที่ใหญ่ จึงจะตอบสนองความดันได้ดี

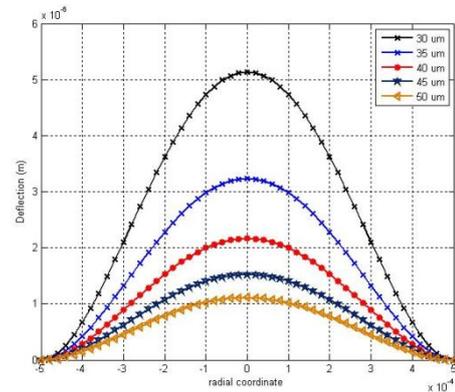


รูปที่ 2 การจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลม ขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  ที่ความดันระดับต่าง ๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขนาดไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันเป็นรูปวงกลมมีขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปและสร้างได้ง่าย มีความหนา 40  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นความหนาที่สามารถสร้างได้ในห้องปฏิบัติการ ถ้าหากความหนาน้อยกว่านี้อาจทำให้ไดอะแฟรมรับระดับแรงดันก๊าซได้ไม่มาก อาจทำให้ไดอะแฟรมเกิดความเสียหายได้



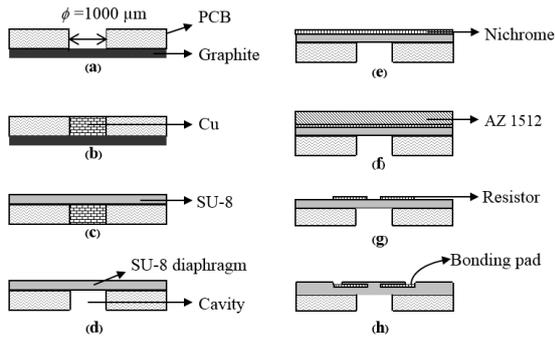
รูปที่ 3 การจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลม ที่มีขนาดรัศมีต่างกัน



รูปที่ 4 การจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลม ขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  ที่ความหนาต่าง ๆ

## 2.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

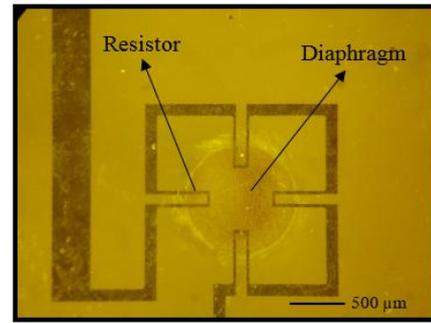
การสร้างตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างในห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี มีขั้นตอนดังรูปที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไดอะแฟรม ได้แก่ สารไวแสง SU-8 เครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (Spinner) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เพื่อทำการอบสารไวแสง เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต สารละลายทองแดง และชุดชุบโลหะ ส่วนในการสร้างตัวต้านทานไฟฟ้า ใช้โลหะนิโครมและเครื่องระเหยไอโชนะในสุญญากาศ สารไวแสงชนิดบวก AZ เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันในการสกัดโลหะ และสารละลายเพื่อทำการสกัดโลหะนิโครมให้เกิดตัวต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันในห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

- 1) นำแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) สกัดทองแดงให้หมด แล้วเจาะรูขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  นำแกรไฟต์ประกบติดด้านหลังของแผ่นพิมพ์วงจรดังรูปที่ 5 (a)
- 2) นำไปชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อเติมโลหะทองแดงลงในรู จากนั้นนำแผ่นแกรไฟต์ออกจัดบริเวณทองแดงให้เรียบเสมอ ดังรูปที่ 5 (b)
- 3) หมุนเคลือบ (Spin) สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2050 [10] ฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้สารไวแสงแข็งตัวเป็นพอลิเมอร์ สารไวแสงชั้นนี้จะเป็นไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ ดังรูปที่ 5 (c)
- 4) ทำการสกัดทองแดงด้วยสารละลายเคมี จะได้ไดอะแฟรม SU-8 ดังรูปที่ 5 (d)
- 5) นำไปเคลือบโลหะนิโครมด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ เพื่อเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 5 (e)
- 6) หมุนเคลือบสารไวแสง AZ 1512 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้เกิดลวดลายตัวต้านทานไฟฟ้า จากนั้นล้างสารไวแสง (Develop) ด้วยสารละลายเคมีจะเกิดลายตัวต้านทานขึ้น รูปที่ 5 (f)
- 7) สกัดโลหะนิโครมเป็นลายตัวต้านทานไฟฟ้าด้วยสารละลายเคมี  $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{DI Water}$  (1:1:3) แล้วล้างสารไวแสง AZ ออกให้หมด ได้ตัวต้านทานไฟฟ้ามีค่า 4.404  $\text{k}\Omega$  ดังรูปที่ 5 (g)
- 8) หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2002 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเลตให้แข็งตัวทั้งแผ่น แต่เปิดฉายเฉพาะบริเวณที่ใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟเพื่อใช้ในการวัดผล สารไวแสงชั้นนี้ใช้เป็นชั้นป้องกันตัวต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 (h)

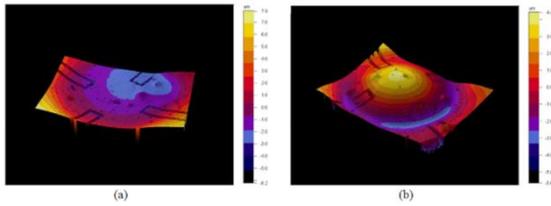
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันเสร็จสิ้นแล้วจะได้ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 6 โครงสร้างตัวตรวจรู้เป็นไดอะแฟรมรูปวงกลมที่สร้างด้วยสารไวแสง SU-8 ขนาดรัศมี 500  $\mu\text{m}$  หนา 38  $\mu\text{m}$  มีตัวต้านทานไฟฟ้าพาดผ่านเข้าไปบริเวณไดอะแฟรมทั้งหมดสี่ตัว มีค่าความต้านทานไฟฟ้า 4.404  $\text{k}\Omega$



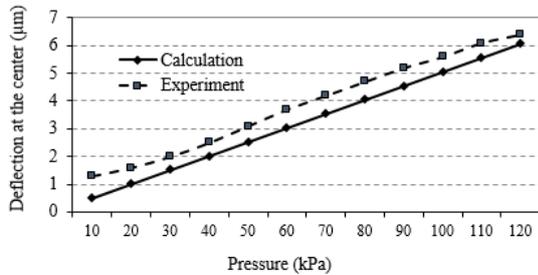
รูปที่ 6 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

### 3. การทดสอบและผลการทดสอบ

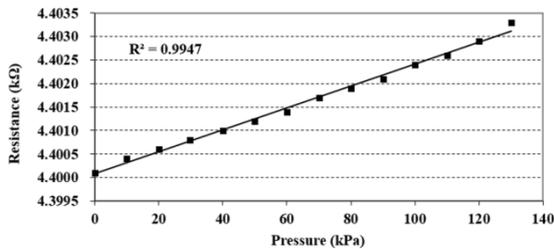
ทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนทางด้านล่างของตัวตรวจรู้ ไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นจะเกิดการโก่งตัวดังรูปที่ 7 ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความหนา และเปรียบเทียบการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมจากการคำนวณและตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นที่มีความหนา 38  $\mu\text{m}$  ได้กราฟดังรูปที่ 8 เห็นได้เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นระยะโก่งตัวของไดอะแฟรมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ค่าที่วัดได้นั้นมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 0.58  $\mu\text{m}$  และเมื่อไดอะแฟรมโก่งตัวสูงขึ้นจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ตัวต้านทานไฟฟ้าสเตรนเกจที่อยู่บนไดอะแฟรม จึงเป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดที่เกิดขึ้น ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ได้รับ แสดงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 0.0269  $\Omega/\text{kPa}$



รูปที่ 7 ภาพการวัดโก่งตัวของไดอะแฟรมรูปวงกลมจากเครื่องวัดความหนา (a) 0 kPa (b) 120 kPa



รูปที่ 8 กราฟค่าการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นและค่าจากการคำนวณ

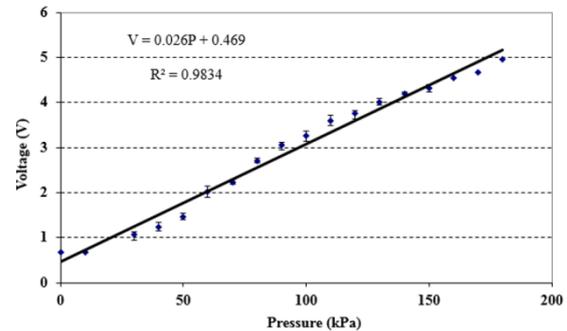


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าและความดันก๊าซ

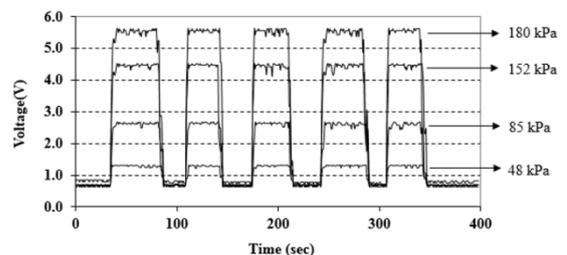
ทำการสอบเทียบ (Calibration) ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ MPX 5700 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-700 kPa ค่าความไว 6.4 mV/kPa ช่วงเวลาในการตอบสนอง 1 ms ค่าความแม่นยำ  $\pm 2.5\%$  ค่า Full scale output 4.7 V และค่า Full scale span 4.5 V ที่อุณหภูมิ 0-85°C โดยเริ่มจากการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ก๊าซไหลไปยังตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นและ MPX 5700 พร้อมกัน ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นได้ทำการต่อกับวงจรวิศโคเนบรีคส์และวงจรขยายสัญญาณ และต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์เพื่ออ่านค่าความดันก๊าซพร้อมกันทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง ได้กราฟรูปที่ 10 ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นนั้นเริ่มตอบสนองที่ความดันก๊าซ 30 kPa ค่าความแม่นยำ  $\pm 10\%$  ค่า Full scale output 4.95 V Full scale span 4.28 V ความไว 26 mV/kPa ค่าคลาดเคลื่อน

$\pm 7.3\text{kPa}$  เมื่อเทียบกับ MPX5700 ซึ่งค่าความไวขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ทำเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ซึ่งตรงเจอนิยมใช้โลหะนิโครม เนื่องจากมีความไวของตรงเจอสสูงและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำ

เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) เช่น ผลตอบสนอง (Response) การกลับคืนสภาพเดิม (Recovery) หรือ ความล้า (Fatigue) ของตัวตรวจรู้ความดัน ทำการทดสอบโดยป้อนความดันก๊าซที่ระดับความดันต่างๆ ในรูปแบบขั้นบันได ทำซ้ำ 4 ครั้ง แล้วจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตโดยใช้ออสซิลอโคปบันที่กัลกษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 11 เวลาในการตอบสนองเท่ากับ (Rise time) 2.3 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $\pm 0.5$  วินาที ชนิดโลหะของตัวต้านทานไฟฟ้าและความหนาของไดอะแฟรมมีผลต่อการตอบสนอง หากไดอะแฟรมมีความหนาน้อยจะทำให้ตอบสนองทางเวลาน้อยด้วย



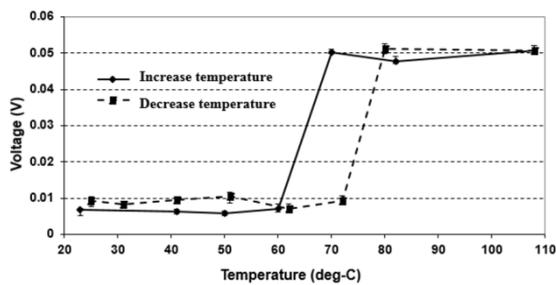
รูปที่ 10 กราฟแรงดันเอาต์พุตและความดันก๊าซ



รูปที่ 11 กราฟผลการตอบสนองทางเวลา

อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะผสม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โลหะผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิโดยการนำตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นมาทดสอบโดยใส่ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการวัด

แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยไม่ป้อนก๊าซ เริ่มวัดที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ  $10^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $100^{\circ}\text{C}$  จากนั้นลดอุณหภูมิลง ทำซ้ำเช่นเดียวกันที่แต่ละอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่แต่ละอุณหภูมิแสดงผลดังรูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าคงที่ในช่วง  $25-60^{\circ}\text{C}$  และเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ตัวตรวจรู้สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วงอุณหภูมิ  $25-60^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ

#### 4. สรุป

ในบทความนี้ได้ทำเสนอตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นไดอะแฟรม โดยตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดครึ่งไมครอน  $500\ \mu\text{m}$  ตัวต้านทานไฟฟ้าสร้างด้วยโลหะนิโครม สามารถวัดความดันก๊าซได้ในช่วง  $30-180\ \text{kPa}$  ที่อุณหภูมิ  $25-60^{\circ}\text{C}$  มีเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 2.3 วินาที ค่าความแม่นยำ  $\pm 10\%$  และค่า Full scale output 4.95 V, full scale span 4.28 V ซึ่งค่าความไวนี้เหมาะสมกับการวัดความดันในช่วงไม่สูงมากนักและเวลาในการตอบสนองนั้นมีค่ามากกว่าของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ Motorola MPX 5700 แต่ยังสามารถนำไปใช้งานได้จริง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] L. Lin, A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors,

Journal of MEMS Systems, Vol.8, No.4, pp. 514-522, December 1999.

- [2] L. Janovsky and R. Bauer, Absolute Pressure Sensors in CERMET Thick Film Technology, 26th International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 448-451, 2003.
- [3] J. Kim, J. Lee, and B. Choi, Fabrication and Characterization of Strain Gauge Integrated Polymeric Diaphragm Pressure Sensors, International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 14, No. 11, pp. 2003-2008, Nov 2013.
- [4] D. Lee and Y. Choi, A novel pressure sensor with a PDMS diaphragm, Microelectronic Engineering 85 pp. 1054-1058, 2008.
- [5] C.K.M. Fung, M.Q.H. Zhang, R.H.M. Chan and W.J. Li, A PMMA-based micro pressure sensor chip using carbon nanotubes as sensing elements, IEEE, 2005.
- [6] H.S. Ko, C.W. Liu, and C.W. Gau, Novel Fabrication of a Pressure Sensor with Polymer Material and Evaluation of its Performance, J. Micromech. Microeng, pp. 1640-1648, 2007.
- [7] R. Khakpour, Solmaz R. M. Mansouri and A.R. Bahadorimehr, Analytical Comparison for Square, Rectangular and Circular Diaphragms in MEMS Applications, International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, pp 297-299. 2010
- [8] S. Timoshenko, and S.W. Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- [9] T. Hsu, MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley, 2008.
- [10] Microchem Corporation. www.microchem.com