

การพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ Development of a Paper-Based Pressure Sensor

เนตรชนก จิรานุสรณ์กุล, นศนันท์ นิลทวัช, ศตวรรษ กระเดื่องเดช, ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์,
อลงกรณ์ พิมพ์พิณ และ วีระยุทธ ศรีธรรวานิช*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2218-6586 โทรสาร: 0-2252-2889 อีเมล: werayut.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้มักถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิกอน แต่อุปกรณ์ดังกล่าวเมื่อเลิกใช้งานก็จะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันโดยใช้แผ่นกระดาษเป็นส่วนในการรับแรงภายในเซนเซอร์วัดความดัน ซึ่งนับว่าเป็นครั้งแรกที่มีการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษขึ้น เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นเซนเซอร์วัดความดันประเภทเพียโซรีซิสทีฟ (piezoresistive) ซึ่งเมื่อมีความดันมากกระทำที่แผ่นรับแรงดันทำให้เกิดการโก่งตัวและทำให้ความต้านทานของตัวต้านทาน (resistor) ที่อยู่ที่ขอบของแผ่นรับแรงดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ทำให้สามารถทราบความดันที่กระทำได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปตัวต้านทานด้วยสารละลายแกรไฟต์เพื่อใช้สร้างเซนเซอร์วัดความดันโดยได้ทำการศึกษาวิธีการในการขึ้นรูป 3 วิธี คือ วิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท วิธีการพิมพ์สกรีน (screen print) และวิธีการสร้างโดยใช้หน้ากากน้ำที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้น ซึ่งพบว่าวิธีการสร้างโดยใช้หน้ากากน้ำสามารถสร้างตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานในช่วงที่ต้องการได้ ภายหลังจากที่ได้สร้างเซนเซอร์วัดความดันแล้วได้ทำการวิเคราะห์การโก่งตัวของแผ่นรับแรงดันภายใต้ความดันต่างๆด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ แบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สุดท้ายได้ทำการทดสอบการใช้งานเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยพบว่าเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความไว (sensitivity) ที่ดีเหมาะสำหรับใช้งานที่ความดันต่ำในช่วง 0 - 1,200 Pa

คำหลัก: เซนเซอร์วัดความดัน, เพียโซรีซิสทีฟ, การพิมพ์สกรีน, หน้ากากน้ำ

Abstract

Nowadays, electronic devices have become the necessary parts of our daily life. Generally, these devices are fabricated on silicon substrates. However, if they are no longer in use, they will become electronic waste causing some environmental issues. Therefore, a new concept to develop environmental-friendly electronic devices has emerged. This work aims to develop a new pressure sensor using a paper substrate as the diaphragm so-called a paper-based pressure sensor for the first time. The developed pressure sensor is piezoresistive type where the deflection of the diaphragm causes a change in the resistance of the resistors located at the edges of the diaphragm. Therefore, the pressure can be

AMM-209

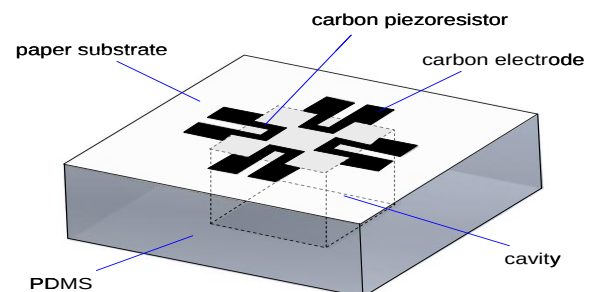
determined by reading from the resistance change. In this work, 3 fabrication methods of graphite resistors including inkjet-printing, screen printing and our proposed method using water mask were studied. The results showed that our proposed method was capable of fabricating resistors with the desired resistance. After the fabrication of the paper-based pressure sensor, the deflection of the diaphragm due to pressures was analyzed using an analytical method and a simulation by ANSYS and compared to the experimental results. Finally, the fabricated pressure sensors were tested and the results showed high sensitivities of the developed paper-based pressure sensors which are suitable for use at low pressures.

Keywords: pressure sensor, piezoresistive, screen print, water mask

1. บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นกลายเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ที่เราเลิกใช้ก็ก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นการ พัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงกลายเป็นประเด็นสำคัญ ในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมา ได้เริ่มมีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดสารเคมี [1-3] เซนเซอร์วัดแรง [4] ชิปสำหรับเครื่องตรวจวัดน้ำตาลในเลือด (glucometer) [5] โดยใช้กระดาษเป็นวัสดุฐานของอุปกรณ์ เนื่องจาก กระดาษมีราคาถูก น้ำหนักเบา และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษซึ่งครอบคลุม กระบวนการสร้าง การทำแบบจำลอง (simulation) การโก่งตัวของแผ่นรับแรงดันภายใต้ความดันต่างๆ และการทดสอบการใช้งาน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีจุดเด่นคือ ต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา วิธีการสร้างไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์โดยใช้เป็นเซนเซอร์วัดความดันประเภทใช้แล้วทิ้ง เช่น การวัดความดันในเส้นเลือด เป็นต้น

เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนประกอบแรกคือฐานของเซนเซอร์วัดความดันมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำจากโพลีเมอร์ polydimethylsiloxane (PDMS) และมีช่องว่างตรงกลาง ส่วนประกอบที่สอง คือกระดาษที่อยู่บนฐานของเซนเซอร์วัดความดัน ซึ่งมีหน้าที่รับแรงดัน โดยบนกระดาษจะมีตัวต้านทานที่ทำจากวัสดุประเภทเพียโซรีซิสทีฟเพื่อใช้วัดความดัน ซึ่งเมื่อตัวต้านทานได้รับความเค้นทางกลจากการที่มีแรงดันมากระทำบนแผ่นรับแรงดันแล้ว จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป โดยตัวต้านทานมีลักษณะเป็นตัว U อยู่ทีปลายทั้ง 4 ด้านของแผ่นรับแรงดันและที่ปลายของตัวต้านทานจะมีขั้วไฟฟ้า (electrodes) สำหรับต่อกับสายไฟเพื่อวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทาน



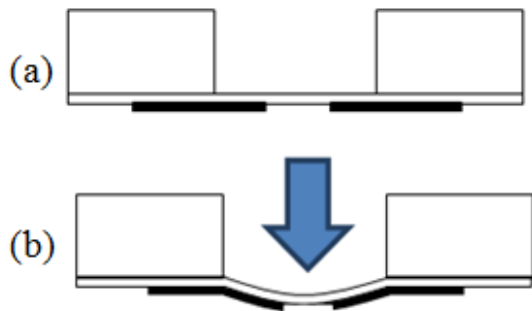
รูปที่ 1 แบบจำลองของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนั้นเมื่อมีความดันมากระทำกับแผ่น

2. ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

AMM-209

รับแรงดันผ่านช่องว่างตรงกลางของฐานเซนเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่งผลให้แผ่นรับแรงดันเกิดการโก่งงอ (deflection) และทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่อยู่ขอบของแผ่นรับแรงดันเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเราจึงสามารถวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อหาค่าความดันที่มากระทำได้



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์ในสภาวะต่างๆ (a) เซนเซอร์ในสภาวะปกติ (b) เซนเซอร์ในสภาวะที่ได้รับความดัน

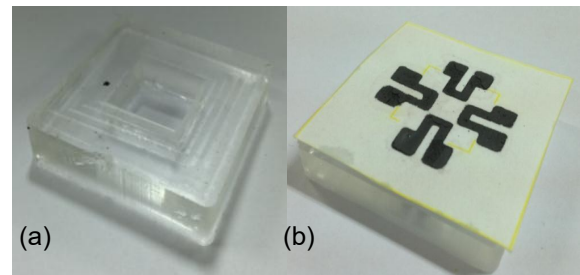
3. การสร้างเซนเซอร์วัดความดัน

เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ฐานที่ทำจากโพลีเมอร์และแผ่นรับแรงดันที่มีตัวต้านทาน โดยทางคณะวิจัยได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปตัวต้านทาน 3 วิธี คือ วิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท วิธีการพิมพ์สกรีน (screen print) และวิธีการใช้หน้ากากน้ำที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้น

ฐานของเซนเซอร์วัดความดันทำจากวัสดุประเภท polydimethylsiloxane (PDMS) เนื่องจากสามารถรับแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความชื้นและขึ้นรูปได้ง่าย โดยนำ PDMS ผสมกับ curing agent ในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนักแล้วเทใส่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโดยจะได้ฐานที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 cm X 5 cm มีช่องว่างตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm X 2 cm และมีความสูง 1 cm ดังแสดงในรูปที่ 3(a)

กระดาษที่นำมาทำเป็นตัวรับแรงดันคือกระดาษ

กรอง Whatman เกรด 1 และใช้แกรไฟต์ (colloidal graphite paste, Ted Pella) เป็นวัสดุเพียโซรีซิสทีฟในการสร้างตัวต้านทาน เนื่องจากแกรไฟต์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี โดยนำมาเจือจางในสารละลายน้ำและเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เพื่อใช้ในการสร้างตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 3(b) โดยทาง



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดความดัน (a) ฐานของเซนเซอร์ทำจากวัสดุ PDMS (b) กระดาษกรองที่มีตัวต้านทานสร้างอยู่ด้านบน

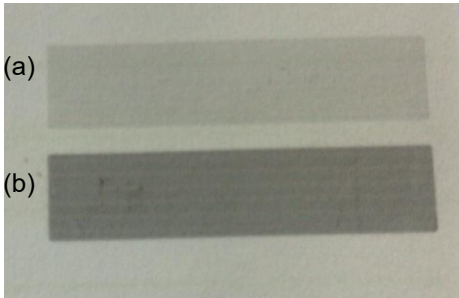
คณะวิจัยได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปตัวต้านทาน 3 วิธีคือ วิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท วิธีการพิมพ์สกรีน (screen print) และวิธีการสร้างโดยใช้หน้ากากน้ำที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้นเพื่อให้ได้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานที่เหมาะสมและมีความแตกต่างของความต้านทานน้อยในแต่ละชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการสร้างเดียวกัน

3.1 กระบวนการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

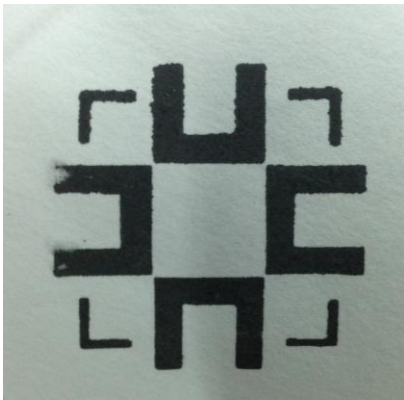
กระบวนการนี้ทำได้โดยการใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Epson รุ่น ME-101) ที่มีหลักการ piezoelectric technology ในการพิมพ์สารละลายแกรไฟต์ลงบนกระดาษกรองเพื่อสร้างตัวต้านทาน โดยสารละลายแกรไฟต์เตรียมโดยการผสมสาร colloidal graphite paste กับตัวทำละลายที่อัตราส่วน 1:200 ซึ่งตัวทำละลายคือสารละลายน้ำและเอทิลีนไกลคอลที่อัตราส่วน 1 : 1 โดยควบคุมค่าความต้านทานจากจำนวนครั้งที่พิมพ์แต่เมื่อทำการทดลองพิมพ์เป็นแถบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าแถบการพิมพ์ที่สร้างขึ้นโดยวิธีนี้ไม่นำไฟฟ้า ทำให้ไม่

AMM-209

สามารถวัดค่าความต้านทานได้ เพราะความเข้มข้นของ colloidal graphite paste น้อยเกินไปจึงทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแต่คุณภาพของ colloidal graphite paste ทำให้หัวพิมพ์ของเครื่องพิมพ์อุตสาหกรรม จึงไม่เหมาะในการนำมาสร้างตัวต้านทาน



รูปที่ 4 แถบ colloidal graphite paste ที่สร้างขึ้นจากการพิมพ์ (a) พิมพ์จำนวน 1 ครั้ง (b) พิมพ์จำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 5 ตัวต้านทานที่สร้างจากกระบวนการพิมพ์สกรีน

3.2 กระบวนการพิมพ์สกรีน (Screen Printing)

การพิมพ์สกรีนเป็นกระบวนการสร้างลวดลายโดยการสกรีน colloidal graphite paste ผ่านแม่พิมพ์ (stencil) [4] วิธีนี้สามารถทำได้โดยง่ายอีกทั้งยังใช้เวลาน้อย และเหมาะสำหรับการทำจำนวนมาก ทั้งนี้ได้ทำการสร้างตัวต้านทานที่ขนาดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5 และวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานดังแสดงในตารางที่ 1

จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่สร้างได้มีค่าความต้านทานอยู่ในระดับ

MΩ ซึ่งมีค่าสูงเกินไปสำหรับการใช้งานในเซนเซอร์วัดความดัน ทั้งนี้เนื่องจากมีแกรไฟต์ปริมาณมากที่ค้างอยู่บนแม่พิมพ์ ไม่สามารถผ่านทะลุแม่พิมพ์ลงมาจนถึงกระดาษกรองได้ ทำให้ตัวต้านทานที่สร้างได้มีความต้านทานสูงมาก ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการสร้างตัวต้านทาน

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานของวงจรขนาดต่างๆ ที่ได้จากการพิมพ์แบบสกรีน

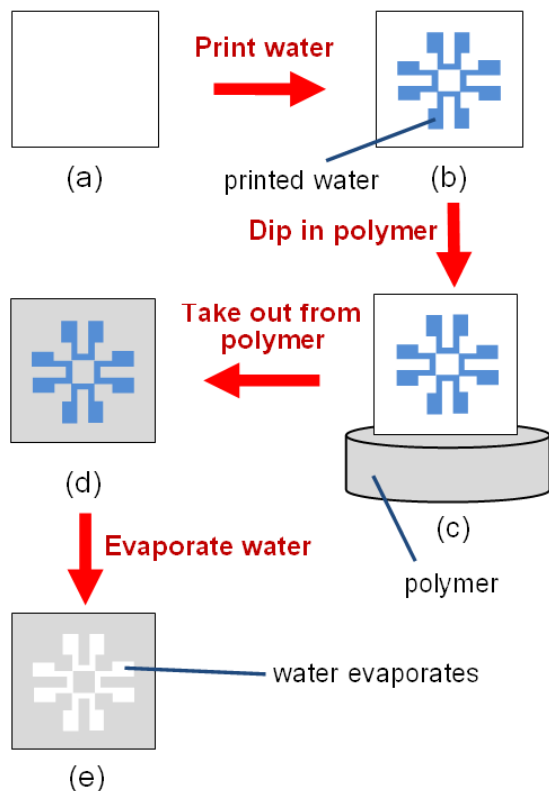
ขนาด กว้าง*ยาว (mm×mm)	ความต้านทาน (MΩ)
6×6	0.434
5×5	0.421
5×7	2.653
7×5	2.762
8×5	0.280
8×4	0.178
5×6	1.212
6×5	1.197

3.3 กระบวนการสร้างโดยใช้หน้ากากน้ำ [6]

วิธีการนี้ประยุกต์น้ำเป็นหน้ากากในการสร้างลวดลายโดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเริ่มจากการพิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรอง whatman เกรด 1 หลังจากนั้นนำกระดาษไปจุ่มลงในสารละลายของโพลีสไตรีน (polystyrene) 3%ในโทลูอีน (toluene) โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีขั้วในขณะที่น้ำเป็นสารมีขั้วจึงไม่ผสมกันทำให้โพลีสไตรีนเกาะบริเวณที่ไม่มีน้ำเท่านั้น เมื่อปล่อยให้แห้งจะเหลือเฉพาะโพลีสไตรีนในบริเวณที่ต้องการซึ่งโพลีสไตรีนมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงใช้ในการขึ้นรูปของสารละลายประเภทน้ำได้ หลังจากนั้นจึงหยดสารละลาย colloidal graphite paste ลงบนลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการสร้างโดยใช้หน้ากากน้ำ โดยสารละลายจะสามารถซึมลงในบริเวณที่ไม่ถูกเคลือบด้วยโพลีสไตรีนทำให้ได้รูปร่างตัวต้านทานตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถควบคุมค่าความต้านทานของตัวต้านทานได้จากปริมาณและความเข้มข้นของ

AMM-209

สารละลาย colloidal graphite paste ซึ่งใช้ส่วนผสมของน้ำและเอททิลีนไกลคอลเป็นตัวทำละลาย โดยเอททิลีนไกลคอลมีส่วนช่วยในการลดแรงตึงผิวของสารละลายทำให้สารละลายกระจายตัวบนลวดลายที่สร้างขึ้นได้ดียิ่งขึ้น โดยอัตราส่วนที่ใช้คือ น้ำ : เอททิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 : 9 และทำการทดลองเปลี่ยนค่า



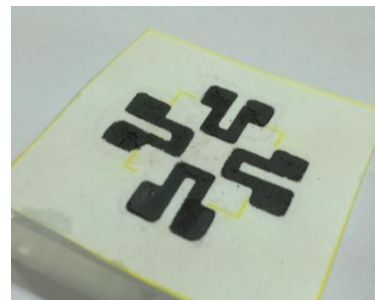
รูปที่ 6 ขั้นตอนของวิธีการสร้างโดยใช้หมึกน้ำ (a) กระดาษกรอง (b) พิมพ์น้ำลงบนกระดาษ (c) นำไปจุ่มลงในสารละลายโพลีไธลีน (d) โพลีเมอร์เกาะบริเวณที่ไม่มีหมึกน้ำ (e) ปล่อยให้แห้งจะได้ลวดลายของโพลีไธลีนในบริเวณที่ต้องการ

ความเข้มข้น (colloidal graphite paste : สารละลายน้ำและเอททิลีนไกลคอล) และปริมาณของสารละลาย เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานในแต่ละกรณี โดยใช้หลอดหยดสารละลายลงบนบริเวณที่เป็นตัวต้านทานแต่ละตัวตามปริมาณที่กำหนด หลังจากนั้นวางชิ้นงานบนเตาให้ความร้อนเพื่อให้สารละลายแห้งได้เร็วขึ้น ซึ่งผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแสดงในตารางที่ 2

จากการทดลองพบว่าวิธีนี้สามารถสร้างตัวต้านทานที่มีรูปร่างตามที่ต้องการได้ดังแสดงในรูปที่ 7 และสามารถควบคุมค่าความต้านทานของตัวต้านทานได้ด้วยการเพิ่มปริมาณหรือความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานลดลง

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานของวงจร (Ω) ที่ความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณต่างๆ

ความเข้มข้น ปริมาณ (μ l)	1:6	1:8	1:10
40	424.97	781.54	2298.01
80	233.15	351.61	657.30
120	134.20	251.69	320.97



รูปที่ 7 ตัวต้านทานที่สร้างขึ้นจากวิธีการสร้างโดยใช้หมึกน้ำ

4. การวิเคราะห์ระยะการโค้งตัวของแผ่นรับแรงและการทดลอง

ทางคณะวิจัยได้ทำการวิเคราะห์การโค้งตัวของแผ่นรับแรงซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซนเซอร์วัดความดันด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

ระยะการโค้งตัวของแผ่นรับแรงที่จุดกึ่งกลางของแผ่นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate) ซึ่งมีแรงภายนอกกระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นที่จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์สามารถหาได้จากสมการ (1) [7]

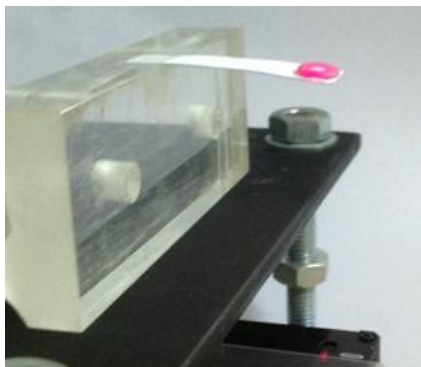
AMM-209

$$\delta_{X=0}^{Y=0} = \frac{C(1-\nu^2)pb^4}{Eh^3} \quad (1)$$

เมื่อ	$\delta_{X=0}^{Y=0}$	คือระยะการโก่งตัวที่กลางแผ่น
	C	คือค่าคงตัวสำหรับการโก่งงอ
	ν	คืออัตราส่วนปัวซอง
	p	คือแรงที่กระทำสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น (N/m^2)
	b	คือความกว้างของแผ่นชิ้นงาน (m)
	E	คือมอดูลัสของยัง (N/m^2)
	h	คือความหนาของแผ่นชิ้นงาน (m)

ทั้งนี้ในการคำนวณดังกล่าวจำเป็นต้องทราบค่ามอดูลัสของยังของกระดาษ ซึ่งค่ามอดูลัสของยังสามารถหาได้จากการทดลองการโก่งตัวของคานโดยใส่น้ำหนักที่ปลายคานแล้ววัดระยะโก่งตัวที่ปลายคานแล้วคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง [8] ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยได้ค่ามอดูลัสของยัง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เป็นดังนี้

$$E = 1.808 \times 10^8 \pm 0.244 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

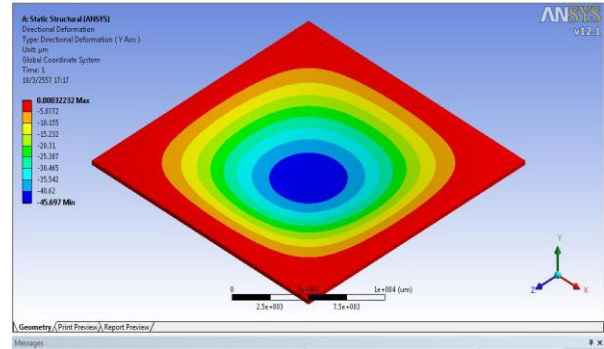


รูปที่ 8 คานปลายยื่นที่จำลองขึ้น

4.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS

ในการสร้างแบบจำลองของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษโดยใช้โปรแกรม ANSYS นั้นสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน Static Structural (ANSYS) ที่มีการจับยึดเป็นแบบปลายยึดติดทั้งสี่ด้านสำหรับแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate)

หลังจากนั้นจึงทำการใส่ความดันเข้าไปที่แผ่นรับแรงดันที่ความดันในช่วง 0 – 1,500 Pa แล้วทำการเก็บข้อมูลระยะของการโก่งตัวที่เปลี่ยนไปที่จุดกึ่งกลางแผ่นรับแรงดัน ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS แสดงในรูปที่ 9

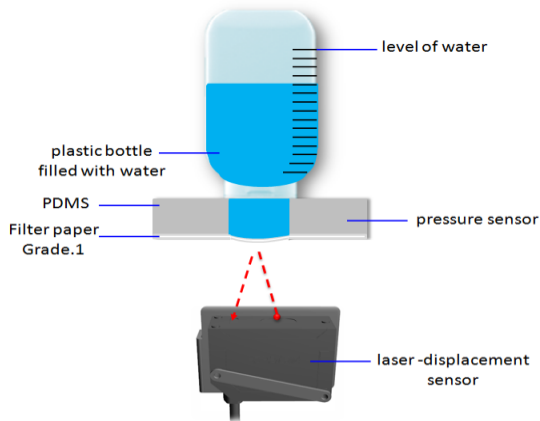


รูปที่ 9 ผลการจำลองการโก่งตัวของแผ่นรับแรงดันด้วยโปรแกรม ANSYS

4.3 การทดลองวัดระยะการโก่งตัวของแผ่นรับแรงที่ความดันต่าง ๆ

ในการทดลองนี้ ทางคณะวิจัยได้ประยุกต์ใช้ความดันน้ำที่เกิดจากระดับความสูงของน้ำภายในขวดพลาสติกที่ติดอยู่ด้านบนของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษดังแสดงในรูปที่ 10 ทั้งนี้เพื่อให้แผ่นรับแรงสามารถกันน้ำได้จึงเคลือบผิวกระดาษด้วยพาราฟิล์ม หลังจากนั้นจึงเติมน้ำลงในขวดพลาสติกและใช้เซนเซอร์วัดระยะประเภทเลเซอร์ (laser displacement sensor) ในการเก็บค่าระยะการโก่งตัวของกระดาษที่จุดกึ่งกลางแผ่นและที่ขอบของแผ่นรับแรง เนื่องจากฐานของเซนเซอร์ที่ทำจาก PDMS อาจเกิดการยุบตัวเมื่อได้รับความดัน เมื่อเสร็จแล้วจึงเติมน้ำเพิ่มเพื่อเปลี่ยนความดันของน้ำและเก็บค่าระยะการโก่งตัวในช่วงความดัน 0 – 1,500 Pa

AMM-209



รูปที่ 10 แบบจำลองการทดลองวัดระยะการโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

4.4 ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งตัวของแผ่นรับแรงด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม ANSYS โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งผลทั้ง 3 มีค่าที่สอดคล้องกันโดยเฉพาะระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม ANSYS ส่วนผลการทดลองนั้นมีระยะการโก่งตัวที่น้อยกว่า ทั้งนี้อาจมาจากการคลาดเคลื่อนในการหาค่ามอดูลัสของยัง ความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าระยะที่ 2 ตำแหน่ง

และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลือบผิวของแผ่นรับแรงด้วยพาราฟิล์ม

5. การทดสอบการใช้งานเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

การทดสอบการใช้งานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนั้นทำโดยการให้ความดันที่ค่าต่างๆ บนเซนเซอร์และวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานซึ่งได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 12 โดยค่าความต้านทานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันที่กระทำกับเซนเซอร์มีค่ามากขึ้น ค่าความไวของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนี้มีค่า 100.72 mΩ/Pa ในช่วงความดันที่น้อยกว่า 750 Pa และมีค่าความไว 32.58 mΩ/Pa ในช่วงความดันที่มากกว่า 750 Pa โดยมีความไวที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ประเภทใช้แล้วทิ้งที่ใช้ในทางการแพทย์ พบว่าเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่พัฒนาขึ้นมีค่าความไวที่สูงกว่าหลายร้อยเท่า และยังมีราคาถูกกว่ามาก แต่ยังมีช่วงความดันในช่วงที่ใช้ใช้งานที่ไม่กว้าง และยัง มี output ที่ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นตรง (non-linearity) จึงต้องการการออกแบบใหม่เพื่อให้ได้คุณลักษณะตามที่ต้องการ

6. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซนเซอร์ประเภทกระดาษ (Paper-based pressure sensor) และเซนเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Commercial silicon-based MEMS sensor)

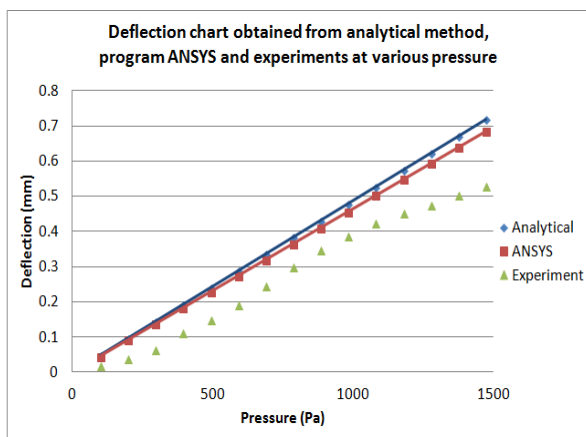
Specifications	Paper-based pressure sensor	Commercial silicon-based MEMS pressure sensor (MPX2300DT1, Freescale Semiconductor)
Material	Filter paper, colloidal graphite	Silicon
Sensing principle	Piezoresistive	Piezoresistive
Sensing area dimension (L×W)	20 mm. × 20 mm.	Ø 2.41-2.72 mm.
Pressure ranges	0 - 1.2 kPa (9 mmHg)	0 – 300 mmHg
Sensitivity	100.72 mΩ/Pa (5,659 μV/V/mmHg)* at < 750 mΩ/Pa 32.58 mΩ/Pa (2,057 μV/V/mmHg)* at > 750 mΩ/Pa	5 μV/V/mmHg
Time for fabrication	< 3 hours in laboratory	> 1 day in clean room

AMM-209

Device cost	\$1.73 per device	\$5.38 per device (sale price)
-------------	-------------------	-----------------------------------

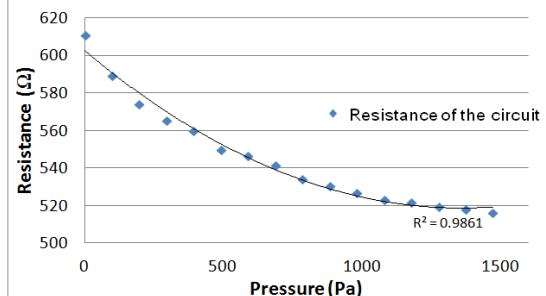
7. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษขึ้นเป็นครั้งแรก โดยขึ้นรูปวงจรเพียโซรีซิสทีฟ ด้วยวิธีหดยดสารละลายแกรไฟต์ลงบนกระดาษที่ผ่านการสร้างลวดลายโดยกระบวนการหน้ากากน้ำที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้น ทำให้สามารถสร้างตัวต้านทานที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ และสามารถควบคุมค่าความต้านทานด้วยการควบคุมปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายแกรไฟต์ที่ใส่ลงในช่องลวดลายที่สร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานของวงจรที่สร้างขึ้นอยู่ในช่วง 150 – 2,300 Ω จากการเปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับแรงที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และแบบจำลองที่สร้างขึ้น



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับแรงต้นที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ โปรแกรม ANSYS และการทดลองที่ความดันต่างๆ

The resistance of the circuit at various pressure values



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความต้านทานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

โดยโปรแกรม ANSYS และการทดลองพบว่าค่าระยะการโก่งตัวที่ได้จากทั้ง 3 วิธีมีผลที่สอดคล้องกัน ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบการใช้งานเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่สร้างขึ้นพบว่าเซนเซอร์ดังกล่าวมีความไวในระดับที่ดีและเหมาะสมสำหรับใช้ในช่วงความดันต่ำที่ 0-1,200 Pa โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์โดยใช้เป็นเซนเซอร์วัดความดันประเภทใช้แล้วทิ้ง เช่น การวัดความดันในเส้นเลือด เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ว่าที่ร้อยตรี ธนพร เสาวรัตน์ชัย และ คุณสุภัท ขานนท์เมือง สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือใน Shop งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช Special Task Force for Activating Research (STAR) ภายใต้กลุ่มการวิจัยเทคโนโลยีการสร้างระดับจุลภาคและนาโน (GSTAR 56-005-21-002)

9. เอกสารอ้างอิง

AMM-209

- [1] Abe K., Suzuki K. and Citterio D., "Inkjet-Printed Microfluidic Multianalyte Chemical Sensing Paper," *Anal.Chem.* 2008, 80, 6928-6934.
- [2] Andes W. M., Scott T. P. and Geoge M.W. "Dianostics for the Developing World, Microfluidic Paper-Based Analytical Devices," *Anal.Chem.* 2010, 82, 3-10.
- [3] Bruzewicz D.A., Reches, M. and Whitesides, G.M., "Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma treatment," *Anal.Chem.* 2008, 80, 3387-3392.
- [4] Liu X., Mwangi M., Li X., O'Brein M. and Whitesides G.M., "Paper-based piezoresistive MEMS sensor," *The Royal Society of Chemistry*, 2011, 2189-2196.
- [5] Nie Z., Deiss F., Liu X., Akbulut O. and Whitesides G.M., "Integration of paper-based microfluidic devices with commercial electrochemical readers," *The Royal Society of Chemistry*, 2010, 10, 3163-3169.
- [6] เกริกฐาภรณ์ พันธุ์พัฒนกุล (2555). การพัฒนาการสร้างลงวดลายช่องทางการไหลขนาดเล็กและการลดการยัดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองสำหรับแล็บบนชิปประเภทกระดาษ, วิทยานิพนธ์ทางวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] A. P. Boresi, R. J. Schmidt (2002) *Advanced Mechanics of Materials* 6th Edition, ISBN-10: 0471438812, John Wiley & Sons, Inc..
- [8] R.C. Hibbeler (2008). *Mechanics of Materials* 7th edition, ISBN: 978-0-13-220991-5, Singapore, Pearson.