

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

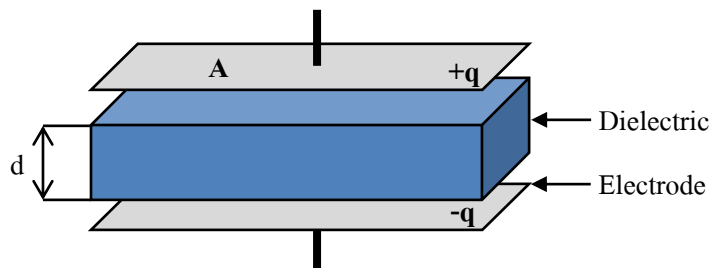
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีค่าความจุไฟฟ้า

ความสามารถในการประจุพลังงานไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ขนาบโดยไม่สัมผัสกันจะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ทางระดับแรงดันไฟฟ้าหรือ ΔV อุปกรณ์ที่อาศัยหลักการทำงานดังกล่าวนี้เรียกว่า “ตัวเก็บประจุ” ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุพลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า [15] ได้ ดังสมการที่ 2.1

$$q = CV \quad (2.1)$$

โดย C คือความจุไฟฟ้า
 q คือค่าประจุไฟฟ้า
 V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบโครงสร้างตัวเก็บประจุ

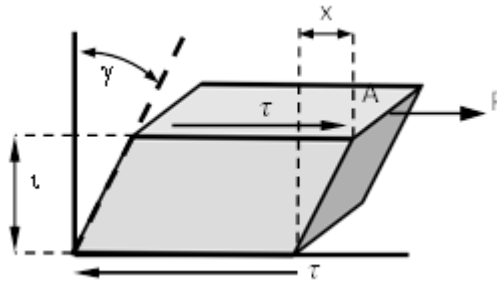
ส่วนประกอบโครงสร้างตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าสองแผ่น และระหว่างตัวนำทั้งสองแผ่นถูกคั่นไว้ด้วยวัสดุแบบแผ่นไดอิเล็กตริกดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งการคั่นไว้ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ โดยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดวัสดุไดอิเล็กตริกเรียกว่า “Fringing Effect” [16] ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก “ ϵ ” ของวัสดุที่นำมาทำเป็นแผ่นไดอิเล็กตริกและสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.2

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

โดย A คือพื้นที่อิเล็กโทรด
 C คือความจุไฟฟ้า
 d คือความหนาไดอิเล็กตริก
 ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

2.1.2 ทฤษฎีแรงเฉือน

แรงเฉือนที่กระทำในทิศทางตัดวัตถุให้เกิดการขาดออกจากกัน [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำ P จะก่อให้เกิดความเค้นเฉือนตามทิศทางของแรงเฉือนตามความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.2 รูปร่างวัตถุที่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางแรงเฉือน [17]

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

โดย A คือพื้นที่ผิว
 P คือแรงกระทำ
 τ คือความเค้นเฉือน

เมื่อมีแรงเฉือนกระทำกับวัตถุส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนและวัตถุจะเปลี่ยนแปลงรูปทรงไปตามทิศทางของแรง ซึ่งสามารถวัดค่าออกมาในลักษณะของความเครียดเฉือน และค่าที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยเรเดียน (Radians) โดยมีความสัมพันธ์ร่วมกับความเค้นเฉือนและค่าโมดูลัสเฉือน ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (2.4)$$

โดย G คือค่าโมดูลัสเฉือน
 γ คือความเครียดเฉือน
 τ คือความเค้นเฉือน

จากสมการที่ 2.4 สามารถวัดค่าความเครียดเนื่องได้จากการวัดระยะเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อใช้คำนวณกลับหาค่าแรงเฉือนได้ดังสมการที่ 2.5 ถึงสมการที่ 2.7

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{x}{l} \quad (2.5)$$

$$\tau = \gamma G \quad (2.6)$$

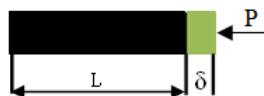
$$P = \tau A \quad (2.7)$$

โดย

- A คือพื้นที่ผิว
- G คือค่าโมดูลัสเฉือน
- γ คือความเครียดเฉือน
- l คือความหนาวัสดุ
- P คือแรงกระทำ
- τ คือความเค้นเฉือน
- x คือระยะทางการเคลื่อนที่

2.1.3 ทฤษฎีความเค้นและความเครียด

วัสดุที่มีรูปทรงในรูปร่างคงตัวเมื่อได้รับแรงกดดันหรือดึงจะก่อให้เกิดความเค้นและความเครียดภายในเนื้อวัสดุ [17] เมื่อพิจารณาขนาดพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับแนวแรงกระทำ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและแรงกระทำได้ดังสมการที่ 2.8



รูปที่ 2.3 ระยะการเปลี่ยนแปลงวัสดุ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

โดย

- A คือพื้นที่ผิว
- P คือแรงกระทำ
- σ คือความเค้น

ขณะที่วัสดุได้รับแรงกระทำก็จะเกิดความเค้นขึ้นและมีระยะการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลให้วัสดุมีความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนที่สัมพันธ์กันระหว่างระยะที่เปลี่ยนแปลงกับความยาวของวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.9)$$

โดย δ คือระยะการเปลี่ยนแปลง
 ε คือความเครียดวัสดุ
 L คือความยาววัสดุ

ซึ่งความเค้นและความเครียดเบื้องต้นจะมีความสัมพันธ์กันผ่านค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) โดยค่านี้มีความเป็นเชิงเส้นกับช่วงแรงกระทำที่ก่อให้เกิดการยืดตัวช่วงหนึ่ง ตามกฎของฮุก (Hooke's law) ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = \frac{PL}{A\delta} \quad (2.11)$$

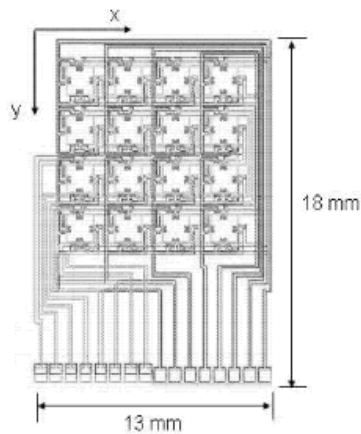
โดย A คือพื้นที่ผิว
 δ คือระยะการเปลี่ยนแปลง
 ε คือความเครียดวัสดุ
 E คือค่าคงที่มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น
 L คือความยาววัสดุ
 P คือแรงกระทำ
 σ คือความเค้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและศึกษางานวิจัยและผลงานที่มีมาก่อน การศึกษาเครื่องมือวัดแรงเฉือนขนาดเล็กสามารถจำแนกออกตามลักษณะของงานวิจัยได้ 2 กลุ่มใหญ่ดังนี้

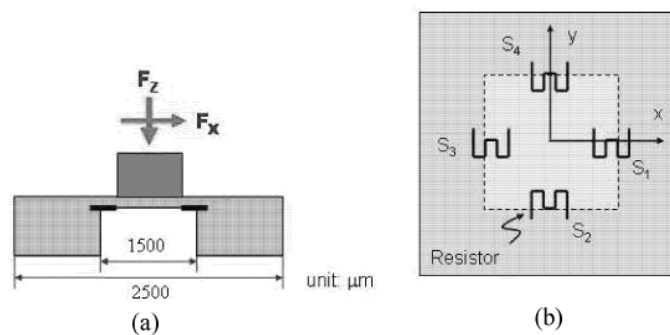
2.2.1 เครื่องมือวัดแรงเฉือนใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

งานวิจัยของ Ho, K.J. และคณะ [6] ได้ออกแบบและสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงและอุณหภูมิ โดยใช้วัสดุประเภทโพลีเมอร์ร่วมกับเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain Gauge) โดยการจัดวางตำแหน่งในรูปแบบอาร์เรย์ขนาด 4×4 บนแผ่นโพลีเมอร์ขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว 18 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจัดวางและขนาดเซ็นเซอร์ [6]

ซึ่งรูปร่างเซ็นเซอร์ถูกออกแบบโดยการสร้างโมดูลรับแรงบนฐานที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเครียด โดยที่เซ็นเซอร์หนึ่งตัวมีขนาด 2500×2500 ไมโครเมตร และมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5

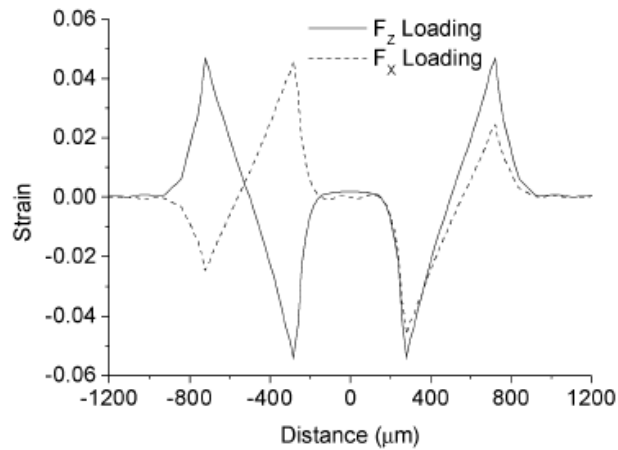


รูปที่ 2.5 โครงสร้างและตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ [6]

(a) โครงสร้างและแรงกระทำ F_x , F_y

(b) ตำแหน่งอุปกรณ์วัดความเครียด S_1 , S_2 , S_3 , S_4

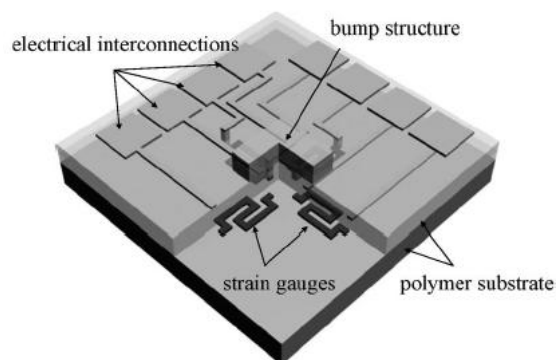
โดยที่คุณสมบัติของวัสดุ polyimide ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 3.4 GPa, Ultimate Stress 190 MPa และค่า Poisson's ratio 3.3 เมื่อใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงบน เซ็นเซอร์ที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร วัสดุประเภท polyimide จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงสุด 0.6 N และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและระยะเคลื่อนที่จากโปรแกรมวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



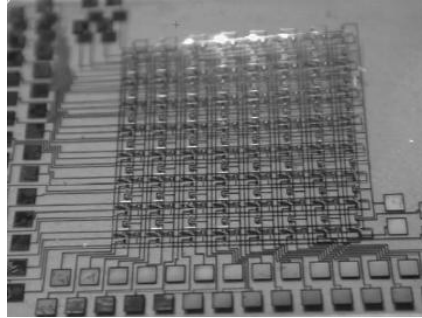
รูปที่ 2.6 ความเครียดและระยะเคลื่อนที่จากโปรแกรมวิเคราะห์ [6]

ลักษณะโครงสร้างในรูปที่ 2.5 ตามตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเครียด เมื่อนำมาทดสอบวัดค่าแรงดันสัญญาณไฟฟ้าต่อแรงกดจะมีค่า 0.52 V/N และแรงดันสัญญาณไฟฟ้าต่อแรงเฉือนที่กระทำต่อเซ็นเซอร์มีค่า 0.25 V/N

นอกจากนี้ งานวิจัยโดย Soo, H.E. และคณะ [2, 3] ได้นำเสนอเซ็นเซอร์วัดแรงกดและแรงเฉือนโดยใช้วัสดุ PDMS เป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยมรับแรงกระทำขนาด 1×1 มิลลิเมตร ความสูง 50 ไมโครเมตร โดยใช้อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gauge) ที่ได้ติดตั้งไว้บนแผ่นโพลีเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

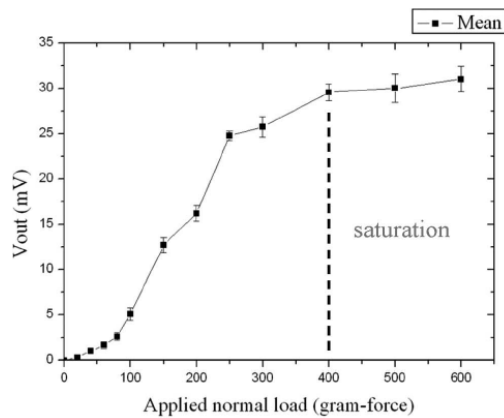


รูปที่ 2.7 โครงสร้างและตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauges [3]

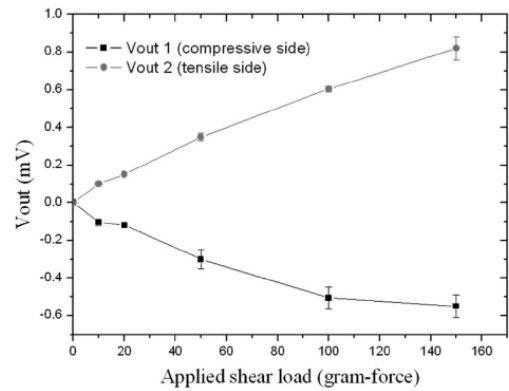


รูปที่ 2.8 ตำแหน่งการจัดวางเซ็นเซอร์เรียงบนแผ่นโพลีเมอร์ [3]

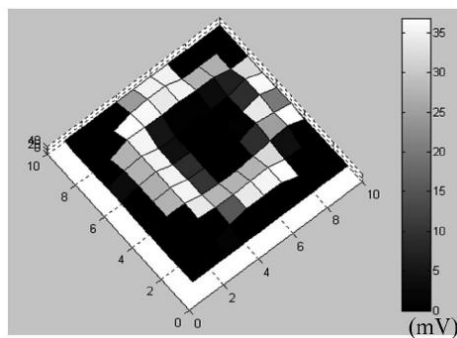
รูปแบบตำแหน่งเซ็นเซอร์ถูกจัดวางแบบอาร์เรย์ 8×8 บนแผ่นโพลีเมอร์ขนาด 35×35 มิลลิเมตรหนา 70 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และเมื่อทำการทดสอบวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามแรงกดและแรงเฉือนได้ผลการตอบสนองจากเซ็นเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.9



(a)



(b)

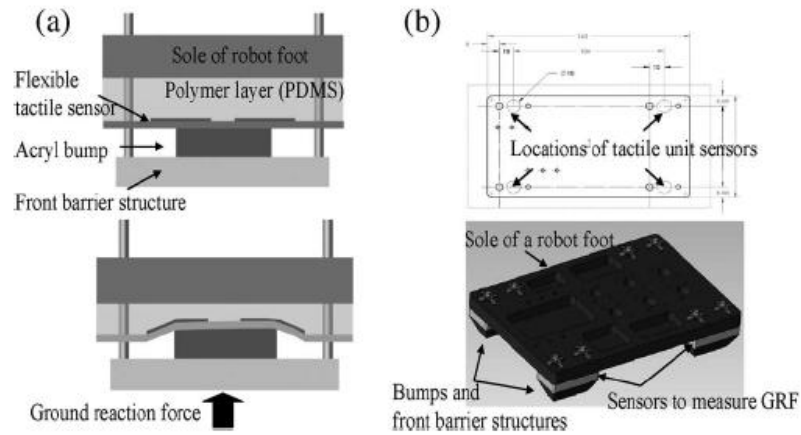


(c)

รูปที่ 2.9 ผลการตอบสนองต่อแรงกระทำ [3]

- (a) ระดับแรงดันไฟฟ้าตามแรงกด
- (b) ระดับแรงดันไฟฟ้าตามแรงเฉือน
- (c) ระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีแรงกด 100 กรัม

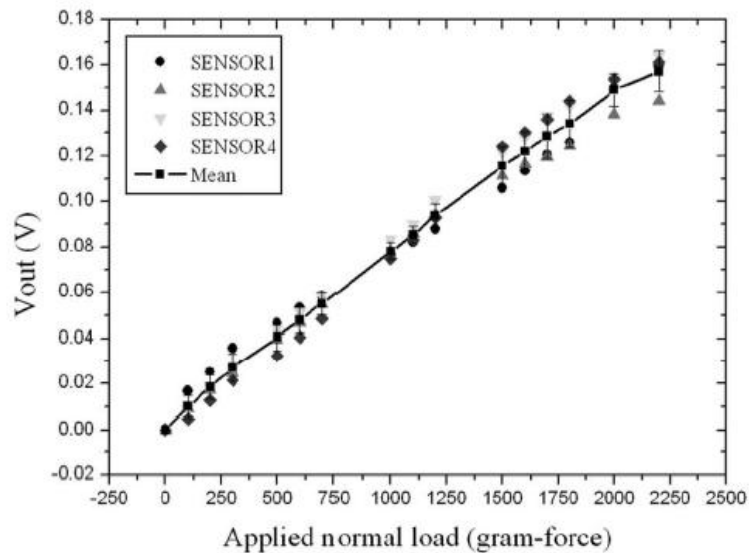
จากผลการวัดสัญญาณไฟฟ้าข้างต้นเมื่อนำชุดเซ็นเซอร์มาติดตั้งกับเท้าของหุ่นยนต์แบบสองขา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าเปรียบเทียบกับน้ำหนักได้ผลดังรูปที่ 2.11 สามารถสรุปได้ว่า ระดับแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 ชั้นโครงสร้างและตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ [3]

(a) ชั้นการจัดวางเซ็นเซอร์และทิศทางแรงกระทำจากพื้น และ

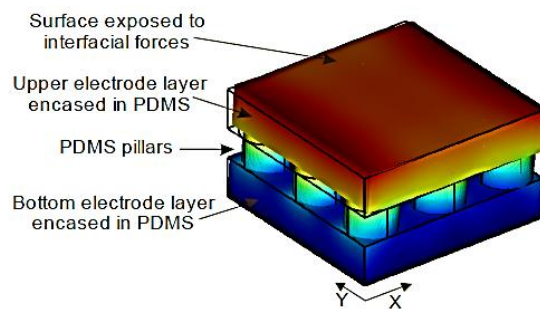
(b) ตำแหน่งจัดวางเซ็นเซอร์บนเท้าหุ่นยนต์



รูปที่ 2.11 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนัก [3]

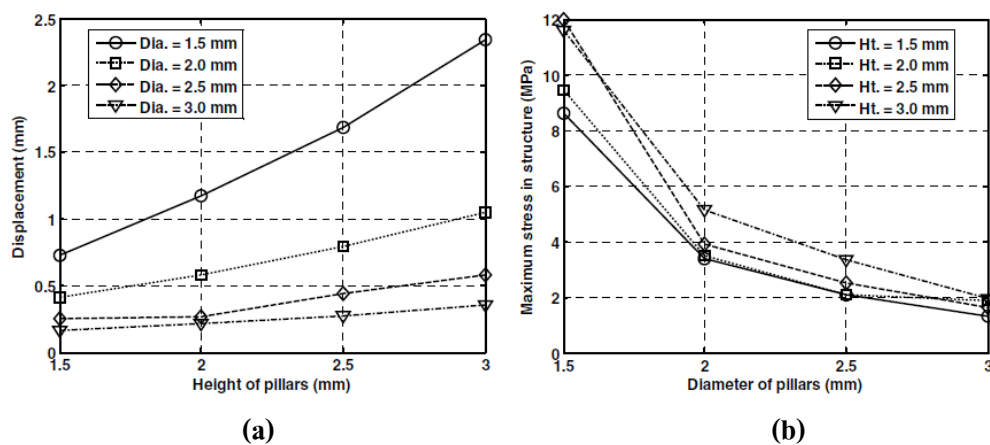
2.2.2 เครื่องมือวัดแรงเฉือนใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า

อีกหนึ่งแนวทางสำหรับการพัฒนาเครื่องวัดแรงเฉือน คือการใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า อาทิ งานวิจัยของ Sundara-Rajan, K. และคณะ [14] ที่นำเสนอแบบจำลองและสร้างเซ็นเซอร์สำหรับการวัดแรงกดและแรงเฉือนในเป้าหมายเทียมโดยติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรด (Electrode) ร่วมกับชั้น PDMS (Polydimethylsiloxane) และเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรดในลักษณะอาร์เรย์ 3×3 โดยในบริเวณส่วนล่างของเซ็นเซอร์จะเป็นพื้นวัสดุแข็งโดยผิวด้านบนเป็นพื้นที่รับแรงคังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อเกิดแรงกระทำขึ้นที่ผิวหน้าสัมผัสของเซ็นเซอร์จะส่งผลให้แท่ง PDMS บิดตัวทำให้สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างชั้น Polydimethylsiloxane และขั้วอิเล็กโทรด [14]

ในงานวิจัยนี้ ตัวเซ็นเซอร์มีขนาด 2×2 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) จำนวน 2994 โหนด โดยมีค่า Minimum mesh quality คือ 0.1682 และค่า Young's modulus 868 kPa, Poisson's ratio 0.48, และค่าความหนาแน่น 965 g/m^3 เมื่อทำการทดลองกับแรงกดจากด้านข้างขนาด 88 N (แรงเฉือน 220 kPa) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ PDMS pillars ที่มีขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

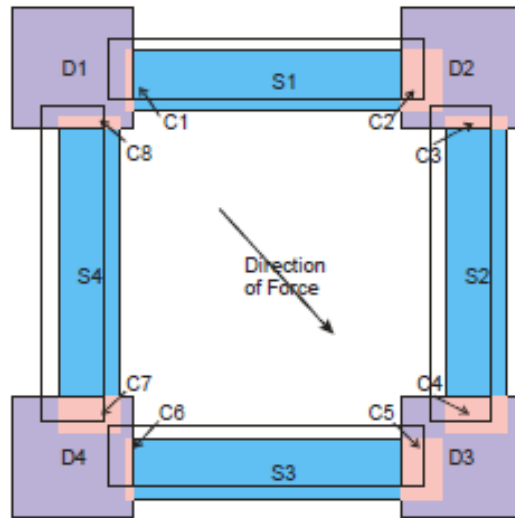


รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ PDMS pillars [14]

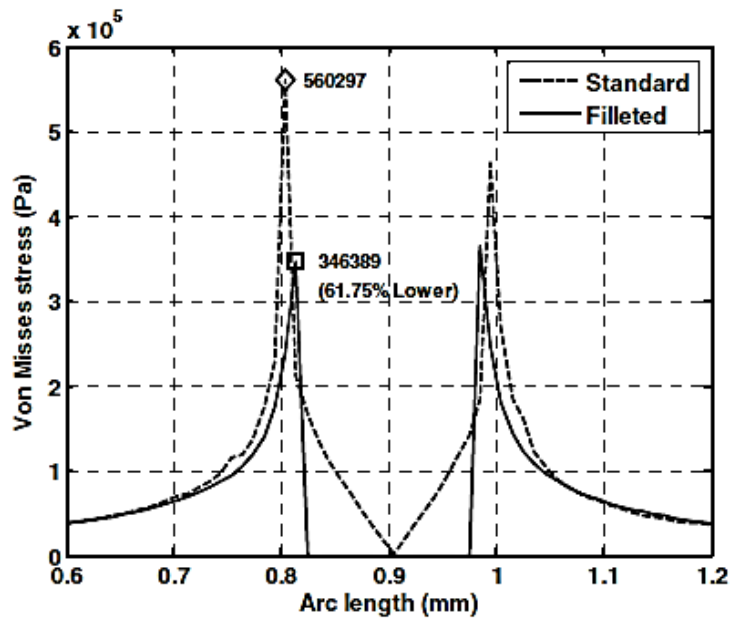
(a) PDMS pillars เส้นผ่านศูนย์กลางคงที่

(b) PDMS pillars ความสูงคงที่

จากผลการเปลี่ยนแปลงที่ได้ ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดตามตำแหน่ง D1, D2, D3, D4 และชั้น PDMS อยู่ที่ตำแหน่ง S1, S2, S3, S4 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยตำแหน่งการติดตั้งดังกล่าวสามารถวัดค่าความจุทางไฟฟ้าได้ทั้งหมด 8 จุด และสามารถหาความสัมพันธ์ของผลการเคลื่อนที่และตำแหน่งขั้วอิเล็กโทรดที่ทับซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2.15

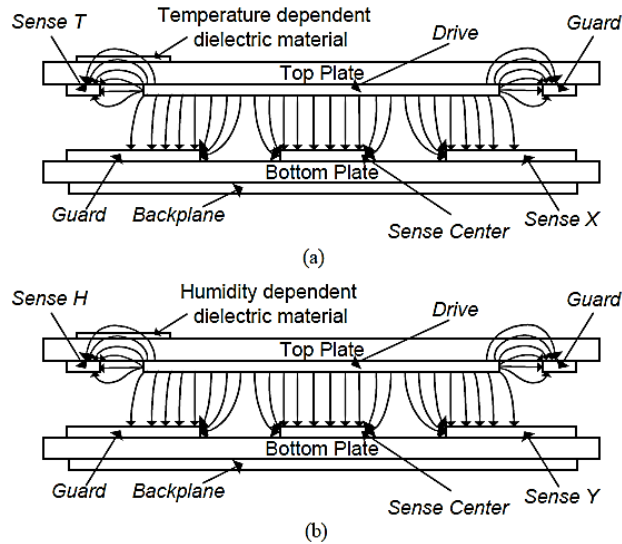


รูปที่ 2.14 ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรด และจุดวัดค่าความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบกับทิศทางของแรงกระทำ [14]



รูปที่ 2.15 ขนาดความเครียดตามระยะกระจัด [14]

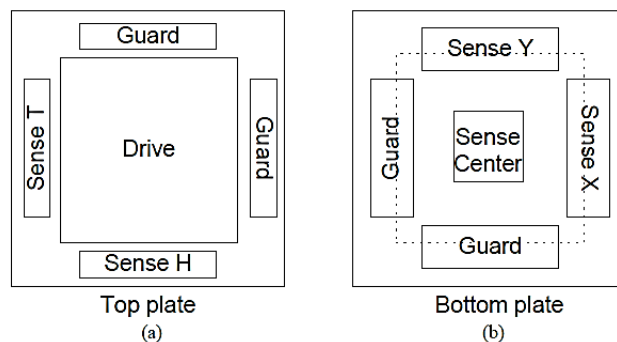
นอกจากนี้ ผลงานวิจัยโดย Rowe, G.I. และคณะ [18] ได้นำเสนอแบบจำลองเซ็นเซอร์ซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิ แรงเหวี่ยงและแรงกดได้ในขณะเดียวกัน โดยใช้หลักการของค่าความจุไฟฟ้าและคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งลักษณะเซ็นเซอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองแผ่นดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ชั้นตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ [18]

- (a) มุมมองด้านหน้าเซ็นเซอร์
- (b) มุมมองด้านข้างเซ็นเซอร์

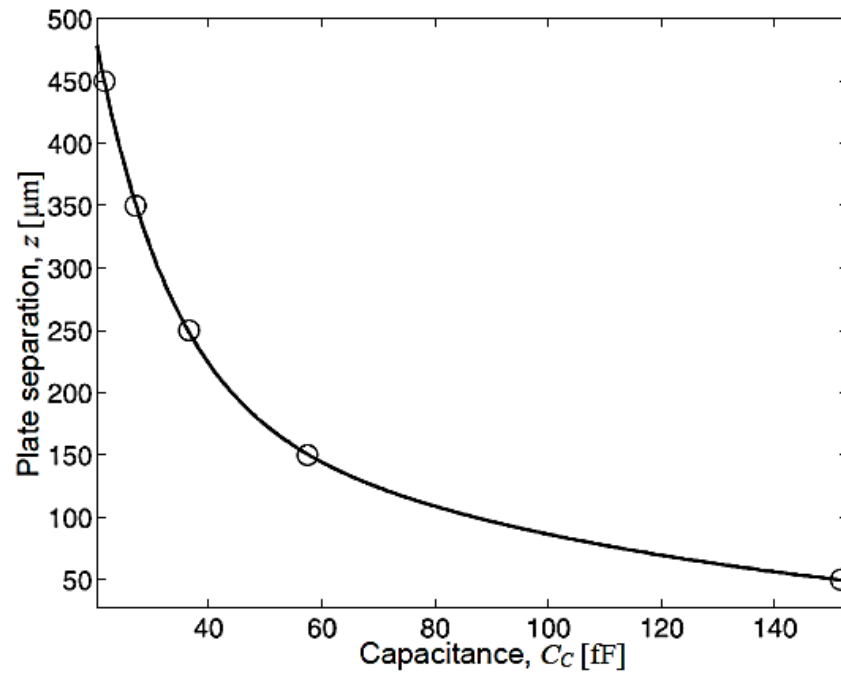
เซ็นเซอร์ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองชั้นมีขนาด 4×4 มิลลิเมตร มีลักษณะการจัดวางเซ็นเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่ชั้นส่วนเซ็นเซอร์แผ่นบนประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ "Drive" ขนาด 2.6×2.6 มิลลิเมตร และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสี่ด้านมีขนาด 0.3×2.0 มิลลิเมตร ส่วนแผ่นล่างประกอบไปด้วยอิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่งกลางขนาด 0.8×0.8 มิลลิเมตร และอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสี่ด้านมีขนาด 0.7×2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบภายในเซ็นเซอร์ [18]

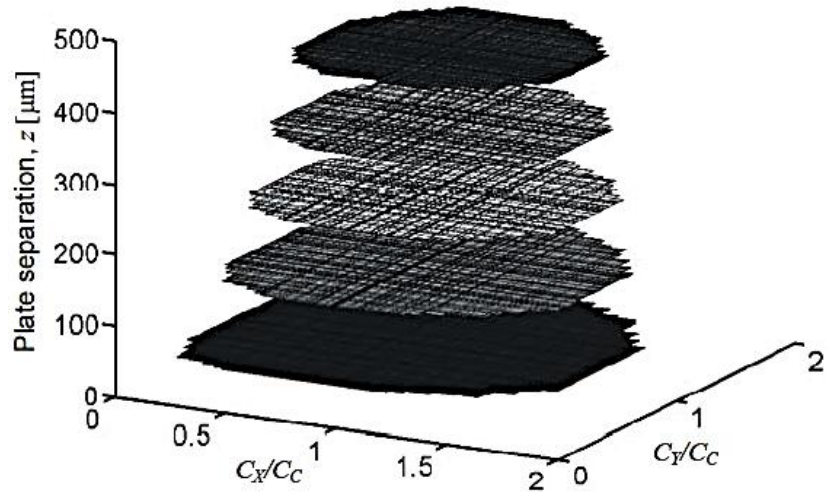
- (a) ชั้นส่วนเซ็นเซอร์แผ่นบน
- (b) ชั้นส่วนเซ็นเซอร์แผ่นล่าง

จากลักษณะและตำแหน่งของอิเล็กโทรด เมื่อนำมาคำนวณทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นตามความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่ความหนาต่างๆ ผลจากการคำนวณสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตำแหน่งกลางและความหนาของแผ่นไดอิเล็กทริกได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18

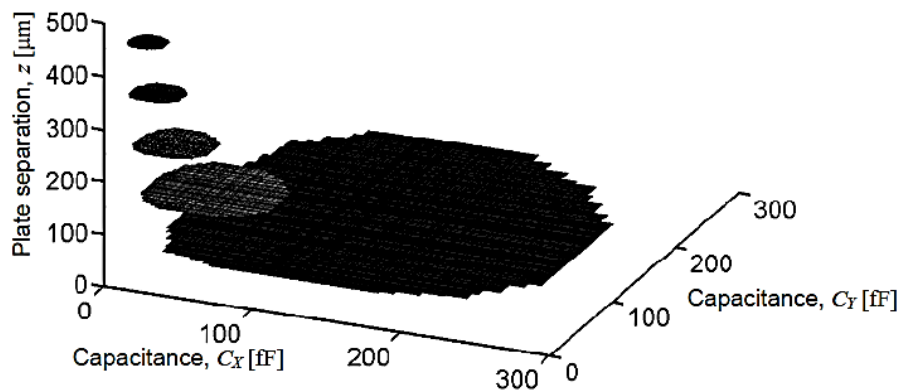


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์และการเคลื่อนที่ของเซ็นเซอร์ [18]

ในขณะที่ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์แผ่นบนและล่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งกลางแล้ว ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์แผ่นบนและยังส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเซ็นเซอร์รอบๆ มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าเมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งกลางสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.19 นอกจากนี้ค่าความจุของเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่ง x และ y สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 อัตราส่วนสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่มีระยะห่างต่างๆ [18]



รูปที่ 2.20 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ในแนว X, Y [18]