# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| รายการตาราง | ฉ |
| รายการรูปประกอบ | ช |
| รายการสัญลักษณ์ | ฌ |
| ประมวลศัพท์และคำย่อ | ญ |
| **บทที่ 1 บทนำ** | **1** |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย | 2 |
| **บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** | **3** |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1.1 ทฤษฎีค่าความจุไฟฟ้า | 3 |
| 2.1.2 ทฤษฎีแรงเฉือน | 4 |
| 2.1.3 ทฤษฎีความเค้นและความเครียด | 5 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.2.1 เครื่องมือวัดแรงเฉือนใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน | 7 |
| 2.2.2 เครื่องมือวัดแรงเฉือนใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า | 11 |
| **บทที่ 3 การออกแบบและทดลอง** | **16** |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 16 |
| 3.2 การศึกษางานวิจัยและผลงานที่มีมาก่อน | 16 |
| 3.3 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1 | 17 |
| 3.3.1 ผลการออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1 | 21 |
| 3.4 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2 | 21 |

**หน้า**


3.4.1 การพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือวัดผล 22
3.4.2 การทดลองวัดผลข้อมูลน้ำหนักกดทับจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 23
3.4.3 ผลการทดลองวัดค่าข้อมูลน้ำหนักกดทับจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 24
3.4.4 การทดลองวัดผลข้อมูลน้ำหนักกดทับและแรงเฉือนจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 25
3.4.5 ผลการทดลองวัดค่าข้อมูลน้ำหนักกดทับและแรงเฉือนจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 25
3.4.6 การปรับปรุงเครื่องมือทดลองวัดผลข้อมูลเซ็นเซอร์ 26
3.4.7 การปรับปรุงลักษณะแผ่นเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 27
3.4.8 ผลการปรับปรุงลักษณะแผ่นเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 28

**บทที่ 4 การปรับปรุงและพัฒนาเซ็นเซอร์ 30**
4.1 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1 30
4.1.1 ผลการออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1 32
4.2 การออกแบบและผลิตเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริก รูปแบบที่ 2 33
4.2.1 การออกแบบแผ่นเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2 33
4.2.2 ผลการทดลองแผ่นเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2 34
4.2.3 การประกอบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2 35
4.2.4 ผลการทดลองเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2 39

**บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 40**
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง 40
5.1.1 เซ็นเซอร์แบบใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริก 40
5.1.2 เซ็นเซอร์แบบใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริก 41
5.2 ข้อเสนอแนะ 42

**เอกสารอ้างอิง 43**

**ประวัติผู้วิจัย 46**

# รายการตาราง

**ตาราง** **หน้า**

4.1 คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้า 30

# รายการรูปประกอบ


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ส่วนประกอบโครงตัวเก็บประจุ | 3 |
| 2.2 | รูปร่างวัตถุที่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางแรงเฉือน | 4 |
| 2.3 | ระยะการเปลี่ยนแปลงวัสดุ | 5 |
| 2.4 | ตำแหน่งจัดวางและขนาดเซ็นเซอร์ | 7 |
| 2.5 | โครงสร้างและตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ | 7 |
| 2.6 | ความเครียดและระยะเคลื่อนที่จากโปรแกรมวิเคราะห์ | 8 |
| 2.7 | โครงสร้างและตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauges | 8 |
| 2.8 | ตำแหน่งการจัดวางเซ็นแบบอาร์เรย์บนแผ่นโพลิเมอร์ | 9 |
| 2.9 | ผลการตอบสนองต่อแรงกระทำ | 9 |
| 2.10 | ชั้นโครงสร้างและตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ | 10 |
| 2.11 | ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนัก | 10 |
| 2.12 | โครงสร้างชั้น Polydimethylsiloxane และขั้วอิเล็กโทรด | 11 |
| 2.13 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ PDMS pillars | 11 |
| 2.14 | ตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดและจุดวัดค่าความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบกับทิศทางของแรงกระทำ | 12 |
| 2.15 | ขนาดความเครียดตามระยะกระจัด | 12 |
| 2.16 | ชั้นตำแหน่งอิเล็กโทรด | 13 |
| 2.17 | ส่วนประกอบภายในเซ็นเซอร์ | 13 |
| 2.18 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์และการเคลื่อนที่ของเซ็นเซอร์ | 14 |
| 2.19 | อัตราส่วนสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่มีระยะห่างต่างๆ | 15 |
| 2.20 | ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ในแนว X, Y | 15 |
| 3.1 | แผ่น PDMS หลังขึ้นรูป | 17 |
| 3.2 | เซ็นเซอร์ต้นแบบ | 17 |
| 3.3 | ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งอิเล็กโทรดปรกติ | 18 |
| 3.4 | ตำแหน่งการจัดวางขั้วอิเล็กโทรด | 18 |
| 3.5 | ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งอิเล็กโทรดเหลื่อมล้ำ | 18 |
| 3.6 | ผลเปรียบเทียบระดับค่าความจุไฟฟ้าโดยการคำนวณและผลข้อมูลเครื่องมือวัด | 21 |
| 3.7 | ตำแหน่งอิเล็กโทรด | 21 |
| 3.8 | ขั้นตอนหล่อ PDMS | 22 |
| 3.9 | วงจรรวมเพื่อวัดความจุไฟฟ้า | 22 |

**รูป** **หน้า**

3.10 ขั้นตอนวัดค่าความจุไฟฟ้าร่วมกับน้ำหนักกดทับ 23
3.11 ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากน้ำหนักที่กด ณ ตำแหน่งเซ็นเซอร์รอบข้าง 24
3.12 ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากน้ำหนักกดตำแหน่งเซ็นเซอร์กลาง 24
3.13 ขั้นตอนทดสอบวัดน้ำหนักกดทับและแรงเฉือน 25
3.14 ค่าความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม 25
3.15 ตำแหน่งปรับปรุงเครื่องมือวัดผล 26
3.16 แผ่นอิเล็กโทรดปรับปรุงใหม่ 27
3.17 วิธีบีบแผ่นเซ็นเซอร์ระหว่างหล่อ PDMS 27
3.18 ค่าความจุไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม 28
3.19 ตัวอย่างค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง 28
3.20 เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น HP 4284a 29
3.21 ค่าความจุไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม 29
4.1 ลำดับชั้นโครงสร้างเซ็นเซอร์ 30
4.2 เซ็นเซอร์ต้นแบบสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริก 31
4.3 ตำแหน่งเคลื่อนที่แผ่นโพลีเอสเตอร์ 32
4.4 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ 32
4.5 ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยเปรียบเทียบตามตำแหน่งไดอิเล็กตริก 32
4.6 ตำแหน่งแผ่นอิเล็กโทรดแผ่นฐานรอง 33
4.7 แผ่นอิเล็กโทรดส่วนบนและตำแหน่งติดตั้ง 33
4.8 ค่าความจุไฟฟ้าแกน X 34
4.9 ค่าความจุไฟฟ้าแกน Y 34
4.10 ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 34
4.11 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์วัดแรงเฉือน 35
4.12 แบบหล่อพาราฟินผ่านขั้นตอนการปรับระดับความหนา 36
4.13 ขั้นตอนการฉีดหล่อ PDMS 37
4.14 เสา PDMS หล่อเชื่อมต่อแผ่น PCB 37
4.15 ระบบทดสอบเซ็นเซอร์ และตำแหน่งติดตั้งน้ำหนัก 38
4.16 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระดับแรงเฉือนต่างๆ 39

## รายการสัญลักษณ์

| | | |
|---|---|---|
| A | = | พื้นที่สัมผัส |
| C | = | ความจุไฟฟ้า |
| E | = | ค่าคงที่มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น |
| $F_x$, $F_y$ | = | แรงกระทำบนทิศทางแนวแกน |
| G | = | ค่าคงที่โมดูลลัสเฉือน |
| L | = | ความยาววัสดุ |
| P | = | แรงกระทำ |
| V | = | ความต่างศักย์ไฟฟ้า |
| d | = | ความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก |
| $l$ | = | ความหนาวัสดุ |
| q | = | ประจุไฟฟ้า |
| $x$ | = | ระยะทางการเคลื่อนที่ |
| $\varepsilon$ | = | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก, ความเครียดวัสดุ |
| $\delta$ | = | ระยะการเปลี่ยนแปลง |
| $\gamma$ | = | ความเครียดเฉือน |
| $\tau$ | = | ความเค้นเฉือน |
| $\sigma$ | = | ความเค้น |

# ประมวลศัพท์และคำย่อ

| | | |
|---|---|---|
| Dielectric Constant | = | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก |
| Electrode | = | ขั้วไฟฟ้า |
| Fringing Effect | = | ปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กเบี่ยงเบน |
| MEMS | = | Micro Electrical Mechanical System |
| PDMS | = | Polydimethylsiloxane |
| PDMS pillars | = | แท่งวัสดุ Polydimethylsiloxane |
| Poisson’s ratio | = | อัตราส่วนความเครียดสัมพัทธ์ |
| Polyimide | = | โพลิเมอร์ |
| Strain | = | ความเครียด |
| Strain Gauge | = | อุปกรณ์วัดความเครียดวัสดุ |
| Stress | = | ความเค้น |
| Ultimate Stress | = | ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ |
| Young’s modulus | = | ค่าคงที่มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น |