



การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด

ดุษฎีนิพนธ์

ของ

วาสนา เกษมสินธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กรกฎาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด

ดุษฎีนิพนธ์
ของ
วาสนา เกษมสินธุ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
กรกฎาคม 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

DESIGN AND FABRICATION OF PLANAR INTERDIGITAL CAPACITOR
FOR PRESSURE MEASUREMENT

BY
WASSANA KASEMSIN

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
The Doctor of Philosophy Degree in Engineering
at Sakon Nakhon Rajabhat University

July 2024

All Rights Reserved by Sakon Nakhon Rajabhat University



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ วาสนา เกษมสินธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการสอบ

(ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล) และผู้ทรงคุณวุฒิ

กรรมการสอบและ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ บัญเกิดรัมย์) ประธานที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์

กรรมการสอบ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง)

กรรมการสอบ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญญา พรหมพินิจ)

กรรมการสอบ

(ดร.ภาคิน ลอยเจริญ)

คณะกรรมการบริหารหลักสูตรรับรองแล้ว

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ บัญเกิดรัมย์)

ประธานหลักสูตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ แสนทวีสุข)

ผู้อำนวยการบัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

เมื่อวันที่ 25 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ประกาศคุณูปการ

ดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือมาโดยตลอด จากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ บุญเกิดรัมย์ ประธานที่ปรึกษาดุชฎินิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ประธานกรรมการสอบดุชฎินิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสณะแสง กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา พรหมพินิจ และ ดร.ภาคิน ลอยเจริญ กรรมการสอบดุชฎินิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อดุชฎินิพนธ์และตรวจสอบดุชฎินิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้แนวคิดทางวิชาการ ซึ่งเป็นผลให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยและพัฒนางานวิจัยนี้ได้อย่างสมบูรณ์ มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณกองทุนพัฒนาบุคลากร มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครที่สนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุสำนักงาน ที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จนทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุดของความสำเร็จในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งบุคคล และหน่วยงานที่ได้กล่าวมาแล้วอีกทั้งที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้ชีวิตและสติปัญญา ขอขอบใจเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลืออย่างดีเสมอมา คุณค่าที่เกิดจากการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ขอมอบแด่บิดา มารดา ตลอดจนสมาชิกครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ ความห่วงใย และให้กำลังใจ แก่ผู้วิจัยตลอดมา หากมีสิ่งใดบกพร่องผู้วิจัยขอน้อมรับไว้และขออภัยมาไว้ ณ โอกาสนี้

วาสนา เกษมสินธ์

ชื่อเรื่อง	การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด
ผู้วิจัย	วาสนา เกษมสินธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิชัย บุญเกิดรัมย์
ปริญญา	ปร.ด. (วิศวกรรมศาสตร์)
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยใช้หลักการตัวเก็บประจุและสามารถสร้างโดยแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ประกอบด้วย 1) a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ 2) a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 3) b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 4) L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ โดยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงกดสามารถใช้เครื่องมือวัด LCR Meter ที่มีความแม่นยำ 0.05% ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับแรงกดที่กระทำต่อพื้นที่ของแผ่นตัวนำ และช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ การศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือทดสอบการกด โดยระดับของแรงกดที่ใช้ในการทดสอบมี 14 ระดับ ระหว่าง 5 นิวตัน ถึง 70 นิวตัน การเพิ่มระดับแรงกดในแต่ละระดับจะเพิ่มครั้งละ 5 นิวตันตลอดย่านการวัด

ผลการวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด มีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1.1897 พิโกฟารัด (pF) ถึง 5.3183 พิโกฟารัด (pF) ความเป็นเชิงเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ระหว่าง 0.9901 ถึง 0.9965 ค่าความไวอยู่ระหว่าง 0.0207 พิโกฟารัด/นิวตัน (pF/N) ถึง 1.5846 พิโกฟารัด/นิวตัน (pF/N) ค่าความถูกต้องอยู่ระหว่าง 0.865 ถึง 0.993 และค่าความแม่นยำอยู่ระหว่าง 99.33 ถึง 99.93 ผลจากการทดลองสามารถนำตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัด

แรงกดไปพัฒนาเป็นตัวรับรู้แรงกดได้เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ มีขนาดเล็ก โครงสร้างที่เรียบง่ายและราคาไม่แพง

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตจิตคาปาซิเตอร์แนวระนาบ ค่าความจุไฟฟ้า ตัวรับรู้แรงกด การวัดแรงกด แผ่นวงจรพิมพ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

TITLE	Design and Fabrication of Planar Interdigital Capacitor for Pressure Measurement
AUTHOR	Wassana Kasemsin
ADVISORS	Assoc. Prof. Dr. Sarawoot Boonkirdram
DEGREE	Ph.D. (Engineering)
UNIVERSITY	Sakon Nakhon Rajabhat University
YEAR	2024

ABSTRACT

The research aims to design and fabricate a planar interdigital capacitor sensor for pressure measurement. It uses the capacitor principle and can be built using a printed circuit board (PCB). The planar interdigital capacitor for pressure measurement consists of 1) a_1 the width of the conductive plates, 2) a_2 the space between the conductive plates, 3) b the width of the conductive plates and the space between the conductive plates, and 4) L the length of the conductor plate. The planar interdigital capacitor for pressure measurement at twelve different models was used in this research, and the capacitance arising from the pressure can be measured with a LCR meter with an accuracy of 0.05%. The capacitance measured depends on the area of the conductor plates and the space between them. This study used the Table Top Universal Testing Machine Force Test MCT series, brand A&D, model MCT- 2510, to press. The test used 14 levels of pressure, between 5 to 70 newtons, increasing the level of force at each level. The force will increase in increments of 5 newtons throughout the entire measurement range.

The results show that the relationship between the capacitance values of planar interdigital sensors for pressure measurement is that capacitance ranges from 1.1897 pF to 5.3183 pF. Linearity has a coefficient of determination (R^2) between 0.9901 and 0.9965. Sensitivity ranges from 0.0207 pF/N to 1.5846 pF/N. The accuracy

ranges from 0.865 to 0.993, and the precision is between 99.33 and 99.93. The experiment has led to the development of the planar interdigital capacitor sensor for pressure measurement due to its low construction cost. It has a small size, a simple structure, and an affordable price.

Keywords: Interdigital Capacitor, Capacitance, Pressure sensor, Pressure Measurement, Print Circuit Board (PCB)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
กรอบแนวคิด.....	3
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
ความเป็นมาของตัวรับรู้ความดันและชนิดของตัวรับรู้ความดัน.....	9
ตัวรับรู้หรือเซนเซอร์	23
ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	41
ความจุไฟฟ้า.....	46
แผ่นวงจรพิมพ์.....	82
อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์.....	91
การวัดแรงกด.....	101
การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์.....	102
การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวรับรู้.....	106
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	108
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	115
ขอบเขตของการวิจัย.....	115
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	116

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
หลักการออกแบบ.....	118
วิธีการสร้างและการทดลอง.....	120
การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	134
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	135
ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	135
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	136
5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	199
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	199
สมมุติฐานของการวิจัย.....	199
ขอบเขตของการวิจัย.....	200
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	200
สรุปผลการวิจัย.....	201
อภิปรายผลการวิจัย.....	208
ข้อเสนอแนะ.....	211
บรรณานุกรม.....	213
ภาคผนวก.....	225
ภาคผนวก ก การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด.....	227
ภาคผนวก ข ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด.....	233
ภาคผนวก ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัล คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด.....	247

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ง ตารางทดสอบค่าความไว ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบ อินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิตีเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด.....	283
ประวัติย่อของผู้วิจัย	295

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ขนาดของต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แฉนวนสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2 เปรียบเทียบหน่วยวัดความดัน.....	12
3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	27
4 ตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....	40
5 ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกโดยประมาณและความเป็นไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	75
5 (ต่อ) ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกโดยประมาณและความเป็นไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	76
6 ขนาดของต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แฉนวนสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการวิจัย.....	120
6 (ต่อ) ขนาดของต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แฉนวนสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการวิจัย.....	121
7 ค่าการรับแรงกดสูงสุดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แฉนวนสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น 12 รูปแบบ.....	130
7 (ต่อ) ค่าการรับแรงกดสูงสุดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แฉนวนสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น 12 รูปแบบ.....	131
8 การเปลี่ยนแปลงของ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำของ 12 รูปแบบ เมื่อผ่านการกดที่ 70 นิวตัน(N).....	132
8 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงของ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำของ 12 รูปแบบ เมื่อผ่านการกดที่ 70 นิวตัน(N).....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
27 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร.....	195
28 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร.....	196
29 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร.....	197

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	3
2 ภาพ 3 มิติของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด.....	5
3 บาร์อิมิตเตอร์ของทอริเซลลิ.....	10
4 จุดอ้างอิงของความดันในแต่ละรูปแบบ.....	14
5 การเกิดจุดของบริเวณไร้การตอบสนอง.....	15
6 โครงสร้างของมาโนมิเตอร์	16
7 โครงสร้างของหลอดบูร์ดองรูปตัวซี	18
8 โครงสร้างของบูร์ดองรูปก้นหอย.....	19
9 บูร์ดองแบบขดซ้อน.....	19
10 ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ.....	20
11 โครงสร้างทั่วไปของตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	21
12 ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำไดอะแฟรมที่เป็นตัวต้านทางแม่เหล็กจะเคลื่อนที่.....	22
13 ค่าความจุที่นำไปดัดแปลงเป็นตัวตรวจรับ.....	26
14 ตัวตรวจจับที่ใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์กระแสสลับแบบชี้ค่า.....	30
15 วงจรกำเนิดความถี่แบบ RC อนุกรมโดยมีความต้านทาน R ของ C ขนานกับ C.....	33
16 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก.....	34
17 การใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับ.....	35
18 วงจรตรวจจับที่ใช้ LED และโฟโตทรานซิสเตอร์.....	36
19 ออปโตไอโซเลเตอร์.....	37
20 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ.....	37
21 ส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ.....	38
22 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบความจุแบบต่างๆ.....	39
23 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสแบบความจุไฟฟ้า.....	40
24 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้า.....	41

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
25 ตัวรับรู้ความดันของ Sung-Pil Chang (2002).....	42
26 ตัวรับรู้ความดันแบบสัมผัสของ Satoshi (2003).....	43
27 ตัวรับรู้ความดันของ Min-XinZhu (2005).....	44
28 ตัวรับรู้ความดันของ Jithendra N. (2006).....	45
29 ตัวรับรู้ความดันของ Ezzat G (2010).....	46
30 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลทแบบขนาน.....	47
31 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุ.....	48
32 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบกระดาษ.....	51
33 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบไมก้า.....	52
34 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบเซรามิก.....	52
35 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์.....	53
36 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม.....	54
37 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบไมลาร์.....	54
38 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีคาร์บอนเนต.....	55
39 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรไพลีน.....	55
40 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน.....	56
41 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบพีดีทรี.....	56
42 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม.....	57
43 ลักษณะของโครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	58
44 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้.....	58
45 ตัวเก็บประจุชนิดทรงกลมลูกเดียว.....	59
46 ตัวนำทรงกลมซ้อนกันและด้านนอกต่อลงดิน.....	61
47 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำคู่ขนาน.....	62

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุ Q บนตัวเก็บประจุ กับความต่างศักย์ V ที่ต่อ กับตัวเก็บประจุ.....	64
49 การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ.....	66
49 (ต่อ) การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ.....	67
50 การคายประจุของตัวเก็บประจุ.....	68
51 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานขณะมีสารไดอิเล็กทริกและไม่มีสารไดอิเล็กทริก.....	69
52 สนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน.....	71
53 การโพลาไรซ์ของอะตอมของสารไดอิเล็กทริก.....	73
54 การเรียงตัวของโมเลกุลของสารไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้ว.....	74
55 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม.....	77
56 การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....	79
57 วงจรตัวเก็บประจุแบบผสม.....	80
58 ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์แบบ Single-Sided, Double-Sided, Double-Sided Plate-through-Hold และ Multi-Layer.....	82
58 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์แบบ Single-Sided, Double-Sided, Double-Sided Plate-through-Hold และ Multi-Layer.....	83
59 รูปแบบของนิวหรือหลักที่มีรูปร่างและตำแหน่งสัมพันธ์ของอิเล็กโทรด.....	91
60 รูปแบบของการเกิดสนามไฟฟ้าเมื่อแยกตัวนำออกจากการในแนวระนาบ.....	93
61 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิตัลอิเล็กทรอนิกส์.....	93
62 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตัล.....	94
63 แนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตัล.....	94
64 ผลของการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในพื้นที่ช่องว่างระหว่าง ขั้วไฟฟ้าสอง ขั้ว (ก) รูปทรงกลม (ข) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ค) รูปทรงเกลียว และ (ง) รูปทรงชี้หัว.....	96

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
65 ตัวรับรู้แบบโปร่งใสอิงตามสื่อนำไฟฟ้าที่ฝังอยู่ในผ้าด้วยวิธีการ PDMS.....	97
66 ผลกระทบของความเครียดเหนี่ยวนำที่มีต่อขนาดโดยรวมของตัวรับรู้.....	98
67 ผลกระทบของความเครียดเหนี่ยวนำที่มีต่อขนาดโดยรวมของตัวรับรู้.....	98
68 อัตราการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เฉลี่ยของตัวรับรู้ในการตอบสนองต่อแรงดึง.....	99
69 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์.....	100
70 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย.....	103
71 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram).....	104
72 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4.....	116
73 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) ยี่ห้อ GW Instek รุ่น LCR-6100.....	117
74 เครื่องทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510.....	118
75 โครงสร้างของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดในสถานะเริ่มต้นและเมื่อเกิดแรงกด.....	119
76 ขั้นตอนการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด ด้วยการใช้ทรายฟิล์ม.....	123
77 ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด 12 รูปแบบที่สร้างเสร็จ.....	124
78 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมเครื่อง Universal Testing machine (UTM).....	125
79 หน้าต่างกำหนดรายละเอียด ความกว้าง ความยาว ความหนา.....	126
80 หน้าต่างกำหนดช่วงความเร็วที่ใช้การทดสอบ.....	126
81 หน้าต่างกำหนดระยะของการยุบตัว.....	127
82 ลักษณะการวางตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดกับเครื่อง Universal Testing machine (UTM).....	128
83 ปุ่ม START เพื่อให้เครื่อง Universal Testing machine (UTM) เริ่มทำการกด.....	128

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
84 file output .csv ที่ใช้บันทึกข้อมูลกราฟจากเครื่อง Universal Testing machine (UTM).....	129
85 การทดสอบการกด ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ การวัดแรงกด 12 รูปแบบ.....	129
85 (ต่อ) การทดสอบการกด ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ การวัดแรงกด 12 รูปแบบ.....	130
86 การใช้โปรแกรม ImageJ วัดการเปลี่ยนแปลงจากภาพของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด.....	132
87 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ การวัดแรงกด.....	134
88 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของแรงไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร.....	137
88 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของแรงไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร.....	138
89 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของแรงไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร.....	139

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 100 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลด
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร (L) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร.....170
- 100 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลด
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร (L) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร.....171
- 101 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลด
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร.....173
- 101 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลด
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร.....174

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor) หรือตัวรับรู้ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก (S.M. Sze., 1994) ดังปรากฏให้เห็นได้จากการนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ด้านยานยนต์ (Wang, F. et al., 2021; Armstrong, K. et al., 2020) โครงสร้างพื้นฐานของเมืองอัจฉริยะ (Smart City) (Subramaniam, R. et al., 2023; Muhammad, N. I. et al., 2022) ระบบควบคุมอัตโนมัติด้านอุตสาหกรรม (Zhu, Y., & Jiao, J., 2022) หรือในทางการแพทย์ (De Guzman, S. et al., 2022) โดยตัวรับรู้จะทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงของความร้อน (Wachulec, M. & Luckner, M., 2021) แสง (Lee, Y. et al., 2022) สี (Bima, A. et al., 2022) เสียง (Syahansyah, A., Heru, Y., & Saptono, R., 2022) ระยะทาง (Cavedo, F. et al., 2022) การเคลื่อนที่ (Venek, V. et al., 2022) ความดัน (Park, J. et al., 2023) แรงกด (Liu, N. et al., 2022; Okamoto, Y. et al., 2022) และการไหล (Faishol, M. et al., 2022) ในการจำแนกประเภทของตัวรับรู้ในมุมมองของการใช้งานในงานอุตสาหกรรมและการผลิตนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 10 ประเภท (Bai, N. et al., 2020) ประกอบด้วย ตัวรับรู้วัตถุ (Du, Y. et al., 2020) พร็อกซิมีตี้ (Delipinar, T. et al., 2021) ตัวรับรู้ความชื้น (Shi, J. X. et al., 2021) ตัวรับรู้แรง (Kuo, J. T. et al., 2012) ตัวรับรู้อัตราการไหล (Lee, J. et al., 2021) ตัวรับรู้แก๊ส (Sakai, O. et al., 2021) ตัวรับรู้สี (S. Repelianto, A., & Kasai, N., 2019) ตัวรับรู้ข้อบกพร่อง (Shi, Z. et al., 2021) ตัวรับรู้แสง (Bai, N. et al., 2020) และตัวรับรู้ความดัน (Wu, Q., et al., 2020) & Oh, J. H., 2020)

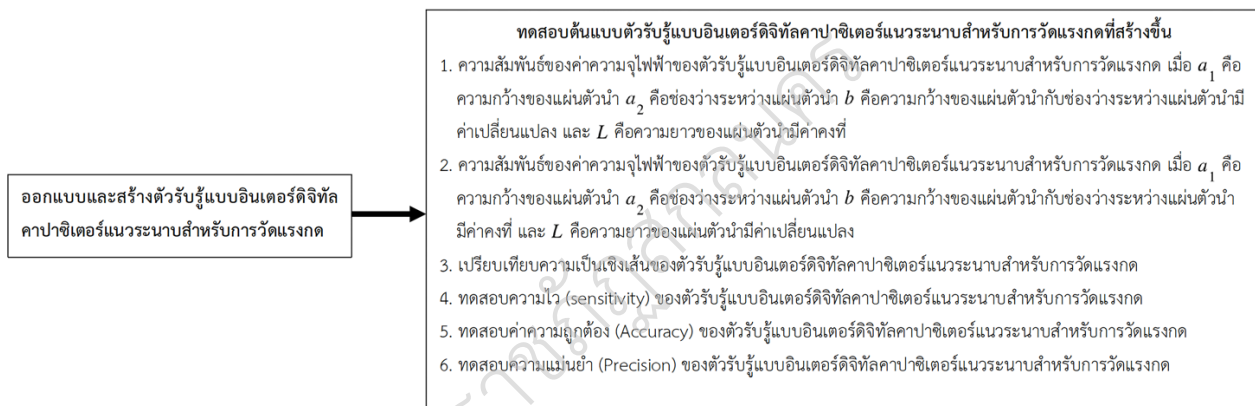
อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เป็นตัวรับรู้ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย โดยมีโครงสร้างมีลักษณะที่คล้ายกับนิ้วมือหรือซี่หวี โดยถูกพัฒนามาจากตัวเก็บประจุที่ทำงานเสมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อกันแบบขนาน (Paul, J., & Philip, J., 2020 ; George, S. P., Isaac, J., & Philip, J., 2019) การออกแบบใช้การวางแผนตัวนำในแนวระนาบแทนการวางแบบขนาน ซึ่งจะวาง

สลับกันระหว่างซีที่เป็นขั้วบวกกับซีที่เป็นขั้วลบ ลักษณะคล้ายกับการนำคาปาซิเตอร์มาต่อกันแบบขนานทำให้มีค่าความจุทางไฟฟ้าและง่ายต่อการวัดค่าความจุทางไฟฟ้า โครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นั้นจะเป็นขึ้นเดียวกันจึงสามารถผลิตได้โดย ระหว่างแผ่นตัวนำและความยาวของแผ่นตัวนำ มีการเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย (Ye, X. et al., 2011) จึงนิยมนำไปใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเข้มของคลื่นเสียง ความชื้น การวัดระยะ การวัดระดับและการวัดแรงดันของการเปลี่ยนแปลง (Rachmanita, R. E. et al., 2019) ตัวรับรู้ความดัน (Pressure Sensor) เป็นตัวรับรู้ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการตรวจการเปลี่ยนแปลงของความดันที่เกิดขึ้น โดยความดัน หมายถึง ปริมาณของแรงที่กระทำต่อพื้นที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพขึ้น จากจุดเด่นของตัวรับรู้แรงกดแบบตัวเก็บประจุนั้นประกอบด้วย การออกแบบที่เรียบง่าย การผลิตที่ไม่แพง และสามารถใช้ร่วมกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้ (De Guzman, S. et al., 2022) การนำตัวรับรู้แรงกดที่ใช้หลักการของการวัดค่าประจุไฟฟ้าหรือตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์นั้นพบว่าส่วนใหญ่ได้นำตัวรับรู้ที่สามารถยืดหยุ่นได้ในการประยุกต์ใช้งาน (Chowdhury, A. H. et al., 2022; Ha, K. H. et al., 2022) ดังปรากฏในงานวิจัยของ Ruzhan Qin และคณะ (Qin, R. et al., 2021) Eshwar Thouti และคณะ (Thouti, E. et al., 2022) Fanghua Liu และคณะ (Liu, F. et al., 2022) Chii-Rong Yang และคณะ (Yang, C. R. et al., 2022) George และคณะ (George, S. P. et al., 2018) De Guzman และคณะ (De Guzman, S. et al., 2022) Maddipatla และคณะ (Maddipatla, D. et al., 2017) Agarwala และคณะ (Agarwala, S. et al., 2017) Chowdhury และคณะ (Chowdhury, A. H. et al., 2017) Yingchun Fu และคณะ (Fu, Y. et al., 2022) Kyoung-Ho Ha และคณะ (Ha, K. 2022) และ Huang และคณะ (Huang, K. H. et al., 2019) แต่การนำอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์มาใช้เป็นตัวรับรู้แรงกดนั้นยังมีการศึกษาถึงความเป็นได้ที่จะนำมาใช้งานเกี่ยวกับการตรวจจับการรับรู้แรงกดยังไม่กว้างขวางและแพร่หลาย

เหตุผลข้างต้นคุณูปการนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวรับรู้แรงกดที่ใช้หลักการวัดค่าประจุไฟฟ้าที่เรียกว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด ซึ่งเป็นตัวรับรู้ ที่ใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ โดยแผ่นตัวนำที่ออกแบบจะอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ซึ่งลักษณะการวางจะวางสลับกันระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบในแนวระนาบ คล้ายกับการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน ดังนั้นคุณูปการฉบับนี้จึงได้ออกแบบสร้าง ทดสอบ ตัวรับรู้แรงกดที่ใช้หลักการวัดค่าประจุไฟฟ้าที่เรียกว่าตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิตอล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบ ที่สามารถใช้ตรวจวัดแรงกดที่มากระทำต่อตัวรับรู้ที่สร้างขึ้น และยังสามารถนำตัวรับรู้แรงกดไปใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบในรูปแบบอื่นได้

กรอบแนวคิด



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด
2. เพื่อทดสอบต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น

สมมุติฐานของการวิจัย

เมื่อพื้นที่ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบซึ่งประกอบด้วย

- 1) a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ
- 2) a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
- 3) b คือ ความกว้างของ

แผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 4) L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ และแรงกดเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า

ความสำคัญของการวิจัย

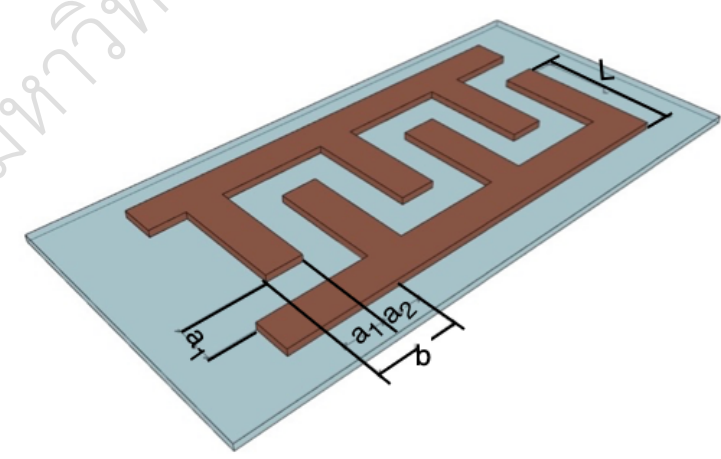
1. ได้ต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น จำนวน 12 รูปแบบ
2. ทราบผลการทดสอบต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น ทั้ง 12 รูปแบบ
3. สามารถนำตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวรับรู้แรงกดได้
4. สามารถนำต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น ไปขยายผลหรือต่อยอดในการวิจัยได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์เกรด FR-4 ด้านหนึ่งเคลือบผิวทองแดง อีกด้านหนึ่งเป็นผิวอีพ็อกซี (Epoxy) โปร่งใสเป็นแผ่นปริ้นท์แบบด้านเดียว (single-sided) ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ (ϵ_r) = 4.6 แผ่นทองแดงมีขนาดความหนา (t) = 0.105 มิลลิเมตร
2. การออกแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop Version: 25.0.0 20230906.r.37 b14e317 arm64 ในการออกแบบ
3. ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สร้างด้วยวิธีการใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film)
4. ต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย เป็นตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จำนวน 12 รูปแบบ รายละเอียดดังนี้

ตาราง 1 ขนาดของต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการวิจัย

รูปแบบ IDC	a_1	a_2	b	L
1	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
2	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
3	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
4	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
5	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
6	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
7	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
8	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
9	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
10	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
11	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
12	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 2 ภาพ 3 มิติของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด

5. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงกดเลือกใช้ชุด Table Top Universal Testing Machine Force Test MCT series ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510 (Maximum Load 500 N) ถูกติดตั้งที่อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร (อาคาร 9)

6. เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อเก็บผลการทดสอบเลือกใช้ LCR Meter รุ่น LCR-6100 ยี่ห้อ GW Instek เลือกใช้ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต (Kilohertz: KHz) และแรงดันไบอัส (Bias Voltage) ที่ 2 โวลต์ (Volt)

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ (Planar Interdigital Capacitor Pressure Sensors) หมายถึง ตัวรับรู้ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้หลักการของคาปาซิเตอร์ (Capacitor) โดยวางผ่านตัวรับรู้ในแนวระนาบและวางสลับกันระหว่างอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวกกับอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบคล้ายการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าขึ้น

2. การทดสอบต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

2.1 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่

2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง

2.3 เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

2.4 ทดสอบความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนว
ระนาบสำหรับการวัดแรงกด

2.5 ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

2.6 ทดสอบความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

3. ความจุไฟฟ้า (Capacitance) หมายถึง ความสามารถในการเก็บประจุของตัวนำไฟฟ้า
หรือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ทำให้ตัวนำมีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 หน่วย

4. ไดอิเล็กทริก (Dielectric) หมายถึง สารที่ไม่สามารถนำไฟฟ้า เช่น ยาง อากาศ
กระดาษไข (Stencil Paper) เซรามิก (Ceramic) เทฟลอน (Teflon) เป็นต้น ไดอิเล็กทริกจะคั่น
ระหว่างแผ่นตัวนำของคาปาซิเตอร์

5. การวัดแรงกด (Pressure Measurement) หมายถึง การวัดแรงที่มากระทำต่อตัวรับรู้
ว่ามีค่าเท่าใด เพื่อให้รู้ถึงแรงกดนั้นในกรณีที่ไม่สามารถรับรู้ได้โดยตรง

6. แผ่วงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) หมายถึง แผ่นปริ้นท์ที่มีลายทองแดง
บาง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการในการกัดปริ้นท์ สามารถนำไฟฟ้าแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟให้กับ
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยที่ตัวนำทองแดงจะถูกทำให้เป็นเส้น (Track) บนพื้นที่เป็นวัสดุ
ฉนวนไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์หนึ่งไปสู่อุปกรณ์หนึ่งตาม
วงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยแผ่นปริ้นท์อาจมีลายทองแดงเพียงด้านเดียว (Single Side) หรือสอง
ด้าน (Double Side)

7. เครื่องมือทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ คือ Table Top Universal
Testing Machine Force Test MCT Series ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510 (Maximum Load
500 N) ที่สามารถทดสอบวัสดุได้หลายวิธี เช่น การดึง การกด และอื่น ๆ ในเครื่องเดียวกัน โดย
สามารถใช้ทดสอบกับวัสดุได้หลากหลายชนิด ระบบการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติสมบูรณ์ในตัว
สามารถแยกการควบคุมด้วยตัวเครื่องหรือคอมพิวเตอร์ได้

8. เครื่องมือที่ใช้วัดคาปาซิแตนซ์ คือ LCR Meter ยี่ห้อ GW Instek รุ่น LCR-6100 มี
ความแม่นยำในการวัด 0.05% - 0.1% โดยเชื่อมต่อระหว่างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดกับเครื่องที่มีความถี่ 10 เฮิร์ต (Hertz: Hz) -100 กิโลเฮิร์ต
(Kilohertz: KHz) แรงดันไบอัส (Bias Voltage) 1 - 2 โวลต์ (Volt)

9. ค่าความไว (sensitivity) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของความจุต่อแรงกดที่ทดสอบ

10. ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ ค่าที่บอกความสามารถของตัวรับรู้ที่สามารถอ่านค่าที่ได้เบี่ยงเบนไปจากค่าที่แท้จริงมากหรือน้อย

11. ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ ค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถของตัวรับรู้ในการวัดค่า นั้น ๆ หรือค่าเดิมซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิม โดยทำการวัดซ้ำค่าเดิมหลาย ๆ ครั้ง

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

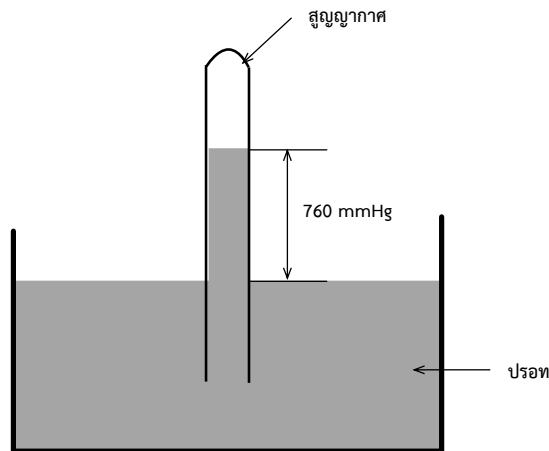
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ที่ผู้วิจัยได้รวบรวมเอกสารและศึกษาค้นคว้า โดยผู้วิจัยได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังต่อไปนี้

1. ความเป็นมาของตัวรับรู้ความดันและชนิดของตัวรับรู้ความดัน
2. ตัวรับรู้หรือเซ็นเซอร์
3. ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ
4. ความจุไฟฟ้า
5. แผ่นวงจรพิมพ์
6. อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
7. การวัดแรงกด
8. การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์
9. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวรับรู้
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความเป็นมาของตัวรับรู้ความดันและชนิดของตัวรับรู้ความดัน

1. ความเป็นมาของตัวรับรู้ความดัน

ตัวรับรู้ความดัน ถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี ชื่อ อีวานเกริสตา ทอริเซลลิ (Evangelista Torricelli, 1644) โดยได้นำหลอดขนาด 1 เมตร ที่ปิดปลายด้านหนึ่งอย่างแน่นหนา จากนั้นนำหลอดจุ่มลงในแนวตั้งในอ่างที่มีปรอทบรรจุอยู่ ส่งผลให้ระดับของปรอทที่อยู่ภายในหลอดมีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตร และหลอดดังกล่าวเหลือที่ว่างสุญญากาศด้านบน ลักษณะของหลอดที่จุ่มแสดงดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 บารอมิเตอร์ของทอริเชลลี

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

ทอริเชลลี ได้ทำการบันทึกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าเป็นแรงบนพื้นผิวของโลก แต่ยังไม่ทราบสาเหตุแน่ชัดที่มาของแรงดังกล่าว และทอริเชลลีสรุปว่าช่องว่างที่บริเวณด้านบนของหลอดนั้นเรียกว่า “สุญญากาศ (Vacuum)” ต่อมา ปาสคาล (Pascal, 1648) ซึ่งเป็นนักปรัชญา นักฟิสิกส์ และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทราบผลการทดลองของทอริเชลลี ทำให้เขาเชื่อว่าแรงที่พบนั้นเป็นแรงของอากาศที่อยู่ด้านบน บริเวณเหนืออ่างปรอทที่กดให้ปรอทมีระดับสูงขึ้นในหลอดและได้ทำการคาดการณ์ว่าที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น ทำให้ความสูงของปรอทในหลอดแก้วลดลง และจากการทดลองของปาสคาล ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของอากาศที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ความดัน” จากนั้น กอทฟรีท (Gottfried, 1700) ได้คิดค้นวิธีทำมาตรวัดความดัน (Barometer) ที่ไม่ใช่ของเหลว แต่ใช้โลหะและสปริงแทน ซึ่งเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า “บารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ (Aneroid Barometer)” แต่อุปกรณ์ดังกล่าวยังไม่มีกลไกการนำมาสร้างเพื่อใช้งานจริง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1843 ลูเซียน (Lucien) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้สร้างบารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ขึ้น เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงและเป็นที่มาของหลอดบูร์ดอง (Bourdon Tube) แสดงดังภาพประกอบ 7 - 9 และในปี ค.ศ. 1849 ได้มีการพัฒนาให้เหมาะกับการนำไปใช้วัดความดันที่สูง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1856 ได้มีการค้นพบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่เกิดจากแรงทางกลโดย วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) และในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการสร้างทรานดิวเซอร์ความดันขึ้นมาเป็นครั้งแรก โดยอาศัยกลไกของการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรม และ

หลอดบิวรีดอง ต่อมาซิมมอน และรูค (Simmons and Ruge, 1938) ได้สร้างสเตรนเกจ (Strain Gauge) ขึ้นมาเพื่อเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าความเครียดในวัสดุให้เป็นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าได้ ในปี ค.ศ.1954 สมิท (Smith) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ “เพียโซรีซิสทีฟ” ในซิลิคอนและเยอรมันเนียม โดยปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเมื่อมีความเครียด (Strain) ทางกลมากระทำ ในปี ค.ศ. 1958 ได้มีการพัฒนารับรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟในเชิงพาณิชย์ โดยบริษัท Kulite Semiconductor Product Honeywell และบริษัท Microsystem Kulite (1961) ได้นำซิลิคอนสเตรนเกจที่เป็นตัวต้านทานถูกสร้างด้วยวิธีการแพร่ของสารกึ่งตัวนำ (Diffusion) ไว้บนซิลิคอนแบบบางที่ทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ต่อมาปี 1966 บริษัท Honeywell พัฒนารูปการสร้างไดอะแฟรมซิลิคอนโดยการกัดซิลิคอนเพื่อให้เกิดช่องว่าง (Cavity) ทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม ปีค.ศ. 1971 ตัวรับรู้ความดันที่มีสัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิตอลได้ถูกออกแบบและทำการทดสอบที่มหาวิทยาลัย Case Western Reserve : CWRU ด้วยซิลิคอนที่มีขนาดเล็กและตัวต้านทานแบบบริดจ์ ที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ในระหว่างการทดสอบและประเมินผลพบว่า บรรจุภัณฑ์ (Packaging) จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของตัวรับรู้ด้วย ซึ่งตัวรับรู้แบบเพียโซรีซิสทีฟ มีความไวต่อสิ่งรบกวนค่อนข้างมาก ทำให้ตัวรับรู้ความดันนี้มีความถูกต้องลดลงตามไปด้วย ในปี ค.ศ.1977 เพื่อให้ได้ความไวและเสถียรภาพของตัวรับรู้ที่ดี ได้มีการพัฒนาตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุขึ้น โดยที่ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Pressure Sensor) ถูกพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford university) ต่อมามหาวิทยาลัย CWRU มีการพัฒนาตัวรับรู้ความดันอย่างต่อเนื่องขึ้น โดยได้นำเอาระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้ ในการสร้างตัวรับรู้ความดัน ซึ่งมีข้อดี คือ ขนาดเล็กลง มีราคาที่ถูก สามารถทำซ้ำได้มีความน่าเชื่อถือสูง และให้ผลผลิตสูงอีกด้วย

2. ชนิดของตัวรับรู้ความดัน

2.1 ความดัน (Pressure, P) เป็นปริมาณชนิดหนึ่งในทางฟิสิกส์ หมายถึง “แรงที่กระทำตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่” มีหน่วยเป็นปาสคาล(Pa), นิวตันต่อตารางเมตร ($N \cdot m^{-2}$), กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$) โดยหน่วยเหล่านี้จะอยู่ในระบบ เอสไอ (SI Unit) แต่ยังมีหน่วยที่นิยมใช้กัน คือ มิลลิเมตรปรอท (mmHg) ซึ่งหน่วยนี้เป็นหน่วยในรูปความสูงของปรอท ไม่ได้เป็นหน่วยที่อยู่ในระบบเอสไอ และยังมีอีกหนึ่งหน่วยที่ควรรู้จักนั้น คือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Psi) ซึ่งเป็นหน่วยอังกฤษ แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2 เปรียบเทียบหน่วยวัดความดัน

Pa	bar	Kgf /cm ²	atm	mmH ₂ O	mmHg
1	1×10 ⁻⁵	1.01972×10 ⁻⁵	9.86923×10 ⁻⁶	1.01972×10 ⁻¹	7.50062×10 ⁻³
1×10 ⁻⁵	1	1.01972	9.86923×10 ⁻¹	1.01972×10 ⁻⁴	7.50062×10 ⁻²
9.80665×10 ⁴	9.80665×10 ⁴	1	9.67841×10	1.0000×10 ⁻⁴	7.35559×10 ²
1.01323×10 ⁵	1.01323	1.03323	1	1.03323×10 ⁻⁴	7.60000×10 ²
9.80665	9.80665×10 ⁻⁵	1×10 ⁴	9.86923×10 ⁻⁵	1	7.35559×10 ⁻²
1.33222×10 ²	1.33222×10 ⁵	1.3591×10 ³	1.3591×10 ³	1.3591×10	1

ที่มา : แฟ็คโตมาร์ท, 2566

ความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีเฉพาะขนาดแต่ไม่มีทิศทาง จากความหมายของความดันที่ว่า “แรงที่กระทำตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่” สามารถนำมาเขียนเป็นสมการในการหาแรงดันได้ ดังนี้

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ

P คือ ความดัน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2 หรือ

กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ผิว มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงกระทำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ความดันของเหลว

$$P = \frac{mg}{A} = \frac{\rho \nu g}{A} = \rho gh \quad (2.2)$$

เมื่อ

m คือ มวลของของเหลว มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

v คือ ปริมาตรของของเหลว มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3)

h คือ ความสูงของของเหลว มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ความดันของก๊าซ

$$P = \frac{1}{3}nmv^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ

n คือ จำนวนโมเลกุลของก๊าซใน 1 ลูกบาศก์เมตร (m^3) มีหน่วยเป็น

$Number/m^3$

m คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

ประเภทของความดัน

รูปแบบของความดันจะแตกต่างกันไปตามจุดอ้างอิง (Reference) ที่มีค่าเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติจะมี 4 รูปแบบ ได้แก่

2.1.1 ความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure)

ความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure) คือ การวัดความดันเทียบกับภาวะสุญญากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ “a” หรือ “abs” ซึ่งจะเขียนสัญลักษณ์ไว้ต่อท้ายชื่อหน่วย เช่น bar_{abs} , $Psia$ เป็นต้น ความดันสัมบูรณ์มีค่าเท่ากับ 101.325 กิโลปาสคาล (kpa) ที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) ค่าความดันสัมบูรณ์ส่วนใหญ่ ใช้สำหรับในการคำนวณทาง เทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) เช่น การหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (Boiler Efficiency) เป็นต้น

2.1.2 ความดันเกจ (Gauge Pressure)

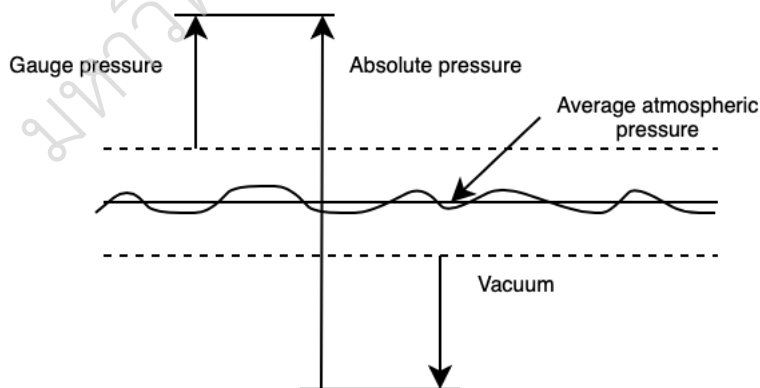
ความดันเกจ (Gauge Pressure) คือ ความดันที่วัดเทียบกับความดันของบรรยากาศ ถ้าค่าที่วัดได้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะเรียกว่า ความดันเกจลบ (Negative Gauge Pressure หรือ Vacuum) และถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่าความดันบรรยากาศ จะเรียกว่า ความดันเกจบวก (Positive Gauge Pressure) ส่วนใหญ่ในงานด้านอุตสาหกรรมจะบอกเป็นความดันเกจแทบทั้งสิ้น โดยที่ความดันเกจจะมีค่าเป็น “0” ที่ความดันบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ “g” หรือ “G” ซึ่งจะเขียนสัญลักษณ์นี้ไว้ต่อท้ายชื่อของหน่วย เช่น bar_g , P_{sig} เป็นต้น

2.1.3 ความดันดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Pressure)

ความดันดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Pressure) เป็นการบอกถึงค่าความแตกต่างของความดันระหว่างจุด 2 จุด โดยความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ความดันทั้ง 2 จุดที่วัดมีค่าเท่ากัน ค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะมีตัวย่อต่อท้ายว่า “d” หรือ “D” เช่น P_{sid} เป็นต้น บางครั้งอาจเรียกว่า เดลตาพี (ΔP)

2.1.4 สุญญากาศ (Vacuum)

สุญญากาศ (Vacuum) เป็นความดันจากความดันศูนย์สมบูรณ์ไปจนถึงความดันบรรยากาศ เป็นค่าที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ P_{vac} เช่น มิลลิเมตรปรอท (mmHg_{vac})

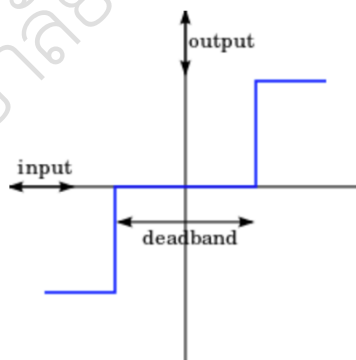


ภาพประกอบ 4 จุดอ้างอิงของความดันในแต่ละรูปแบบ

ที่มา : แฟ็คโตมาร์ท, 2566

บริเวณไร้การตอบสนอง (Deadband หรือ Dead Zone)

บริเวณไร้การตอบสนอง คือ ความแตกต่างระหว่างจุดตั้งต้น (Set point) และจุดที่สวิตช์ถูกกระตุ้น หรือเป็นบริเวณที่มีขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตแต่ไม่มีค่าสัญญาณทางด้านเอาต์พุตเกิดขึ้น จนเกิดเป็นบริเวณที่ไร้การตอบสนอง การคำนวณหาบริเวณดังกล่าวต้องทำการตรวจสอบการเพิ่มขึ้นและการลดลงของความดันที่จุดตั้งต้น ในขั้นแรกจะใช้โอห์มมิเตอร์หรือดิจิตอลมัลติมิเตอร์มาใช้ในการตรวจสอบการตั้งค่าของหน้าสัมผัสสวิตช์ความดันว่าถูกต้องหรือไม่ สำหรับหน้าสัมผัสปกติปิด (Normally Closed : NC) หรือ หน้าสัมผัสปกติเปิด (Normally Open : NO) จากนั้นทำการเชื่อมต่อเทอร์มินัลเข้าไปที่วงจรหน้าสัมผัสปกติเปิด และอ่านค่าที่แสดงเพื่อตรวจสอบว่าเป็นหน้าสัมผัสปกติเปิด ทำการเพิ่มค่าที่จุดตั้งต้นจนกว่าหน้าสัมผัสจะดีดกลับ และมิเตอร์แสดงการเพิ่มขึ้นของความดันที่จุดตั้งต้น จากนั้นเริ่มต้นที่จุดตั้งค่าสูงสุด ลดการตั้งค่าจากหน้าสัมผัสปกติปิดเป็นหน้าสัมผัสปกติเปิด มัลติมิเตอร์จะแสดงการลดลงของความดันที่จุดตั้งต้น การหักล้างการเพิ่มขึ้นของความดันที่จุดเริ่มต้นจากการลดลงของความดันที่จุดเริ่มต้นจะทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองขึ้น การเกิดจุดของบริเวณไร้การตอบสนองแสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 การเกิดจุดของบริเวณไร้การตอบสนอง

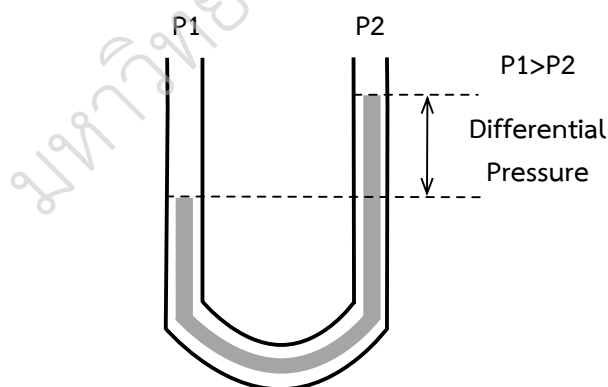
ที่มา : แฟ็คโตมาร์ท, 2566

2.2 ตัวรับรู้ความดันหรือเซนเซอร์ความดัน (Pressure Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน แสง เสียง ความเร็ว ความเร่ง และอัตราการไหล เป็นต้น จากนั้นจะเปลี่ยนสัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลได้

ในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณต่าง ๆ นั้นจะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อให้การใช้งานได้ตรงตามความต้องการ เช่น การออกแบบใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ในส่วนของตัวรับรู้ความดันก็เช่นเดียวกัน ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีการออกแบบและพัฒนาตัวรับรู้ความดันแบบต่าง ๆ ขึ้นมาใช้งานซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.2.1 ตัวรับรู้ความดันแบบของเหลว

ตัวรับรู้ความดันแบบของเหลว เป็นตัวรับรู้ความดันชนิดแรก ๆ ที่มนุษย์คิดค้นและสร้างขึ้น ซึ่งตัวรับรู้ความดันนั้นถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย เอวันเจลิस्ता ตอร์รีเซลลี (Evangelista Torricelli, 1644) ด้วยการนำหลอดขนาด 1 เมตร ที่ปลายด้านหนึ่งถูกปิดอย่างแน่นหนา จากนั้นนำหลอดดังกล่าวจุ่มลงอ่างปรอทในแนวตั้งมีผลทำให้ระดับของปรอทที่อยู่ในหลอดมีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตร (mm) และเกิดพื้นที่ว่างด้านบนเป็นสุญญากาศ ซึ่งตัวรับรู้ความดันแบบปรอทนี้สามารถใช้ตรวจวัดความดันบรรยากาศได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวรับรู้ความดัน ที่ใช้ของเหลวโดยใช้หลักการสมดุลแรงโน้มถ่วง (Gravity Balance) ที่เรียกว่า “มานิเตอร์ (Manometer)” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความดันได้โดยตรง ลักษณะโครงสร้างของมานิเตอร์ แสดงดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 โครงสร้างของมานิเตอร์

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

มาโนมิเตอร์มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัวยู (U) โดยมีสเกลที่ใช้ในการบอกตำแหน่ง หน่วยที่ใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร บนสเกลศูนย์จะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางและที่ปลายทั้งสองด้านของหลอดแก้วจะเปิดสู่บรรยากาศภายนอกระดับของของเหลว ซึ่งส่วนมากใช้น้ำหรือปรอท จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ทั้งสองด้าน เมื่อมีความดันมากระทบด้านใดด้านหนึ่งของมาโนมิเตอร์ของเหลวที่อยู่ภายในจะถูกกดลงส่งผลให้ของเหลวอีกด้านเพิ่มขึ้น ของเหลวที่อยู่ภายในจะหยุดเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงที่เกิดจากความดันแตกต่างกันสมดุลกับแรงที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในหลอดแก้ว การวัดความแตกต่างระหว่างความสูงของของเหลวในหลอดแก้วทั้งสองด้านนั้น คือ ค่าความดันในหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตรของของเหลว นั่นเอง

ข้อดีของตัวรับรู้ความดันแบบของเหลว คือ สามารถวัดความดันในย่านต่าง ๆ ได้ดี และสามารถวัดความดันสุญญากาศได้ดี ให้ความถูกต้องและมีความไวในการวัดสูง เนื่องจากการวัดโดยตรง มีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด และมีราคาถูก แต่มีข้อเสีย คือ สามารถวัดความดันในย่านต่ำเท่านั้น และต้องมีการปรับระดับก่อนการใช้งานทุกครั้งและไม่มีอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดแรงดันเกิน

2.2.2 ตัวรับรู้ความดันเชิงกล

ตัวรับรู้ความดันเชิงกล เป็นตัวรับรู้ความดันชนิดแรก ๆ ที่มีการนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งมีหลักการทำงานง่าย ๆ คือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกลที่เกิดขึ้น เช่น การโก่งตัว การงอตัวของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งก็คือ ความดันนั่นเอง ตัวรับรู้ความดันเชิงกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะเป็นแบบหลอดบูร์ดอง (Bourdon tube) และแบบเบลโลว์ (Bellows)

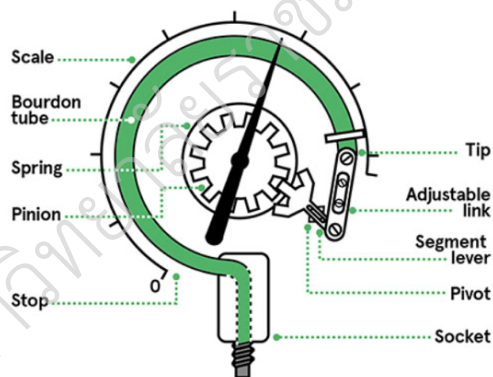
หลอดบูร์ดอง ถูกคิดค้นขึ้นโดย ยูจีน โบรดอน (Eugene Bourdon) วิศวกรชาวฝรั่งเศส และถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1848 บูร์ดองเป็นอุปกรณ์วัดความดันที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมประมาณ 95 % ของเกจวัดความดันทั้งหมด เนื่องจากเป็นแบบที่มีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก สามารถวัด ความดันในย่านสูง ๆ ได้ และสามารถวัดสุญญากาศได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ใช้งานร่วมกับทรานสดิวเซอร์อื่น ๆ ได้ บูร์ดองที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ บูร์ดองรูปตัวซี (C) บูร์ดองรูปก้นหอย (Spiral Bourdon tube) และบูร์ดองแบบขดซ้อน (Helical Bourdon tube) รายละเอียด ดังนี้

บูร์ดองรูปตัวซี จะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมประมาณ 270 องศา ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะคล้ายกับตัวซี เมื่อป้อนความดันเข้าไปในท่อโลหะ จะเกิดการยืดตัวของท่อโลหะ การยืดตัวของท่อโลหะจะมีค่าประมาณ 2-7 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อย จึงจำเป็นต้องมีการขยายระยะทางการเคลื่อนที่เพื่อให้การแสดงผลนั้นสามารถสังเกตเห็นได้ง่ายขึ้น การขยายระยะ

การเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ชุดเฟืองขยาย โครงสร้างของหลอดบูร์ดองมีลักษณะแสดงดังภาพประกอบ 7

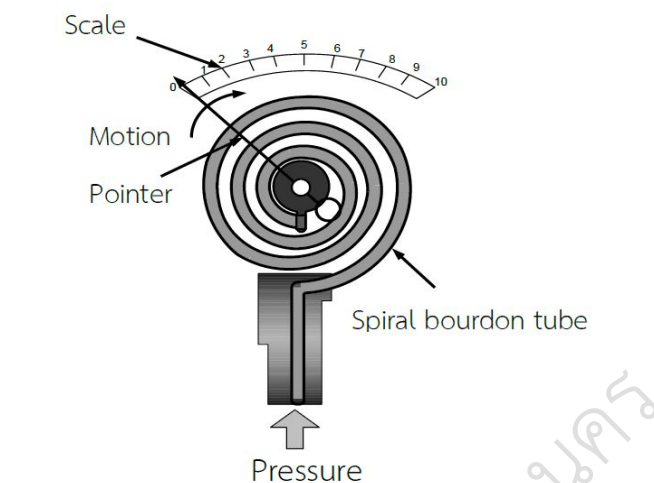
บูร์ดองรูปก้นหอย (Spiral Bourdon tube) บูร์ดองชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายบูร์ดองรูปตัวซี แต่จะถูกขดเป็นรูปก้นหอย ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 หลักการทำงานจะคล้ายกับบูร์ดองรูปตัวซี แต่บูร์ดองรูปก้นหอยจะคลายตัวเมื่อป้อนความดันและก้นหอยจะยืดตัวมากกว่า จึงไม่จำเป็นต้องมีชุดเฟืองขยายมีความเที่ยงตรงมากกว่าบูร์ดองรูปตัวซี

บูร์ดองแบบขดซ้อน (Helical Bourdon Tube) บูร์ดองแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบก้นหอย แต่การขดจะมีรัศมีเท่ากันและขดซ้อนเป็นวงหลาย ๆ วง ซึ่งทำให้บูร์ดองแบบขดซ้อนมีระยะการเคลื่อนที่มากที่สุด ส่วนของเข็มชี้หรือทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนที่จะติดอยู่กับปลายของชิ้นส่วนที่ต่อร่วมกับปลายของด้านที่ปิด แสดงดังภาพประกอบ 9 บูร์ดองชนิดนี้สามารถทนต่อความดันเกินปกติได้ดีกว่าทั้งสองแบบที่กล่าวมา มีเสถียรภาพในการใช้งาน ทดต่อการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วได้ดี



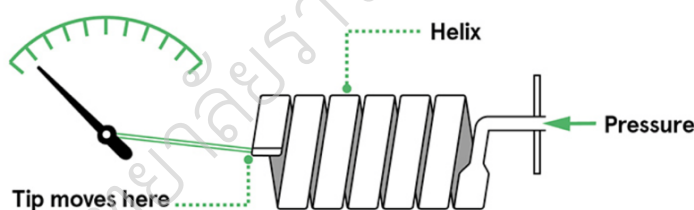
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของหลอดบูร์ดองรูปตัวซี

ที่มา : Avnet Abacus, 2023



ภาพประกอบ 8 โครงสร้างของบูร์ดองรูปก้นหอย

ที่มา : นวภัทรา หนูนาคน และทวีพล ชื้อสตัย, 2555



ภาพประกอบ 9 บูร์ดองแบบขดซ้อน

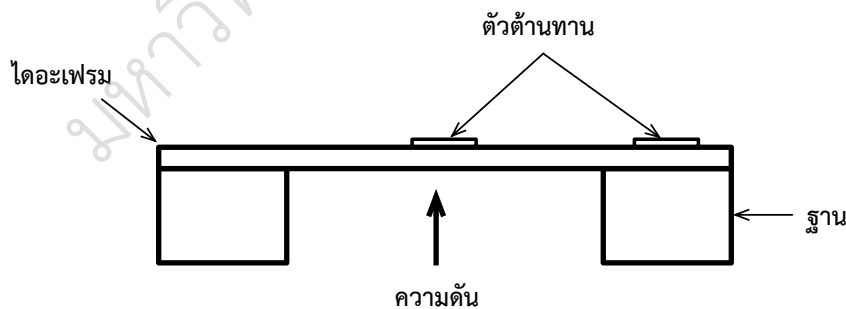
ที่มา : Avnet Abacus, 2023

ข้อดีของตัวรับรู้ความดันแบบหลอดบูร์ดอง คือ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีราคาถูก สามารถออกแบบให้ใช้งานได้ทุกย่านของการวัด สามารถออกแบบให้เข้ากับทรานสดิวเซอร์ชนิดต่าง ๆ ได้ทั้งนิวเมติกส์ ไฮดรอลิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์ แต่ข้อเสีย คือ มีฮีสเตอร์ซิสหรือค่าความผิดพลาดภายในตัวเองค่อนข้างสูงที่ความดันน้อยกว่า 1 บาร์ (bar) หรือ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จึงไม่นิยมนำมาใช้เนื่องจากแรงต้านที่มาจากท่อโลหะมีผลต่อความแม่นยำในการวัดและไม่สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือนได้

2.2.3 ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ โดยที่เมื่อขนาดหรือรูปร่างของโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวรับรู้ความดันแบบนี้มีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่สองส่วน คือ ไดอะแฟรม และตัวต้านทานสเตรนเกจ

ไดอะแฟรมที่เป็นตัวรับรู้ความดัน ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุที่เป็นซิลิคอนเนื่องจากคุณสมบัติในการยืดหยุ่นที่ดี มีค่าความผิดพลาดในตัวหรือฮิสเตอร์ซิสส์น้อยมาก และมีตัวต้านทานสเตรนเกจติดอยู่ด้านบนไดอะแฟรม แสดงดังภาพประกอบ 10 เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัว ตัวต้านทานสเตรนเกจจะเกิดการยืดตัว ทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ตัวต้านทานสเตรนเกจจะสร้างขึ้นด้วยฟิล์มโลหะบาง ออกแบบให้มีโครงสร้างของวงจรตัวต้านทานภายในเป็นบริดจ์แบบวีตสโตน (Wheatstone Bridge) ซึ่งจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบความต่างของแรงดันไฟฟ้า ความต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจะอยู่ในระดับมิลลิโวลต์และผ่านวงจรปรับแต่งและขยายสัญญาณเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากเพียงพอต่อการใช้งาน ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซมีข้อดี คือ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความดันได้ดี มีความไวสูง ค่าความผิดพลาดในตัวหรือความผิดพลาดฮิสเตอร์ซิสส์ต่ำ อย่างไรก็ตามตัวตรวจรู้ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ตัวต้านทานมีสัญญาณรบกวนได้ง่ายและอุณหภูมิมีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน



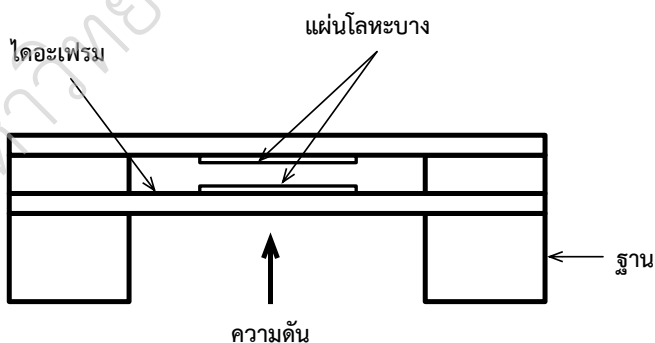
ภาพประกอบ 10 ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

ปัจจุบันตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีความแม่นยำมากขึ้น ตัวรับรู้ความดันเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เป็นแบบความต้านทานเพียโซ ซึ่งมีหลายบริษัท ที่ผลิตตัวรับรู้ความดันแบบตัวต้านทานเพียโซ ออกมาจำหน่าย เช่น Honeywell, Motorola, Freescale Semiconductor เป็นต้น

2.2.4 ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้ไดอะแฟรมเป็นตัวรับรู้ปริมาณอินพุต ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ แสดงดังภาพประกอบ 9 โดยส่วนประกอบหลัก ๆ มีไดอะแฟรมที่ติดกับแผ่นโลหะบาง ซึ่งเป็นขั้วของตัวเก็บประจุและแผ่นโลหะอีกแผ่นอยู่ด้านบนขนานกับแผ่นโลหะที่ติดอยู่กับไดอะแฟรม เมื่อทำการเพิ่มความดัน ไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นจะเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ สามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าได้มากกว่า 25 % ของค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น และออกแบบให้ทนต่อความดันเกินพิกัดได้โดยการออกแบบโครงสร้างทางกล ข้อดีของตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ คือเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้นสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพสูง ความไวสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างด้วย อย่างไรก็ตามตัวรับรู้ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในการวัดความดันต่ำ

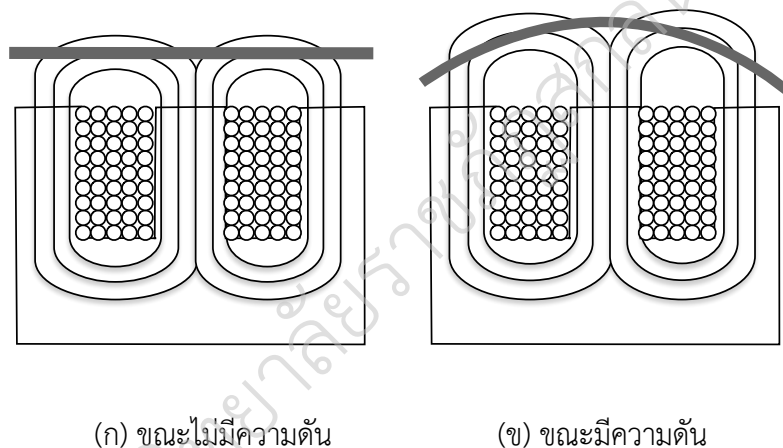


ภาพประกอบ 11 โครงสร้างทั่วไปของตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

2.2.5 ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการวัดความดันที่มีค่าน้อย ๆ ไดอะแฟรมจะมีการโก่งตัวน้อยเช่นเดียวกัน ถ้าใช้ตัวต้านทานสเตรนเกจ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุจึงไม่เหมาะสำหรับการวัดความดันค่าน้อย การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็กหรือตัวเหนี่ยวนำ เรียกว่า Variable Reluctance Pressure (VRP) ตัวรับรู้ความดันชนิดนี้จะใช้วัสดุแม่เหล็กเป็นไดอะแฟรม มีลักษณะเป็นตัวต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กซึ่งจะมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างทั่วไปของตัวรับรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ ไดอะแฟรมที่เป็นตัวต้านทานแม่เหล็กจะเคลื่อนที่
ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

เห็นได้ว่าตัวรับรู้ความดันนั้นเริ่มมีมาตั้งแต่ ปีค.ศ. 1644 และถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความดันนั้นเป็นปริมาณชนิดหนึ่งทางฟิสิกส์ ซึ่งความดันนั้นหมายถึง แรงที่กระทำตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa), นิวตันต่อตารางเมตร ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$) ที่อยู่ในระบบเอสไอ (SI Unit) แต่ยังมีหน่วยที่นิยมใช้กัน คือ มิลลิเมตรปรอท (mmHg) และ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Psi) นอกจากนี้ความดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทที่แตกต่างกันตามจุดอ้างอิง ประกอบด้วย ความดันสัมบูรณ์ ความดันเกจ ความดันดิฟเฟอเรนเชียล และสุญญากาศ ในส่วนของตัวรับรู้หรือเซนเซอร์นั้น เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณ

ทางฟิสิกส์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน แสง เสียง ความเร็ว ความเร่ง และอัตราการไหล ดังนั้นในการออกแบบต้องให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันด้วยในส่วนของตัวรับรู้ความดันหรือแรงดันก็เช่นกัน ตัวรับรู้ความดันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบที่ใช้ในการวัด ประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความดันแบบของเหลว ตัวรับรู้ความดันเชิงกล ตัวรับรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

ตัวรับรู้หรือเซนเซอร์

ตัวรับรู้หรือเซนเซอร์ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดตัวแรกในระบบการวัด ซึ่งจะใช้ตรวจจับ หรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น แสง สี เสียง ความร้อน ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน และการไหล เป็นต้น จากนั้นทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณหรือข้อมูลที่สอดคล้องและเหมาะสมกับส่วนของการกำหนดเงื่อนไขทางสัญญาณ ถ้าใช้ตัวรับรู้ตรวจจับตัวแปรโดยตรง เรียกว่าตัวรับรู้แบบปฐมภูมิ (Primary Sensors) หรือตัวรับรู้ขั้นต้น แต่ถ้าหากมีการตรวจจับโดยผ่านส่วนอื่นก่อน เช่น สเตรนเกจตรวจรับแรงกดที่ต้องรับแรงก่อนถ่ายทอดจากแท่งโลหะที่รับแรงโดยตรงอีกทอดโดยนำสเตรนเกจไปแปะติดกับแท่งโลหะดังกล่าวเพื่อใช้ในการวัดแรง จะเรียกสเตรนเกจในกรณีนี้ว่าเป็นตัวรับรู้แบบทุติยภูมิ (Secondary Sensor) หรือตัวรับรู้ชั้นรอง การตรวจวัดจะอาศัยผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวของตัวรับรู้ที่ตรวจวัดได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเช่น แรงดัน กระแส ความต้านทาน ความจุ และความเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่อค่าตัวแปรทางกายภาพเปลี่ยนแปลงทำให้พารามิเตอร์ของตัวรับรู้เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตาม เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม อาจทำการวัดได้โดยใช้มัลติมิเตอร์หรือวงจรบริดจ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นการวัดตัวแปรทางอ้อมด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบหรือปรับแต่งปริมาณทางไฟฟ้านี้ แทนค่าตัวแปรที่ทำการวัดอีกครั้งหนึ่ง อาจเรียกวิธีการดังกล่าวนี้ว่าเป็นการวัดโดยวิธีอ้อมได้ กระบวนการนี้เรียกว่าการตรวจจับ (Sensing)

1. ชนิดของตัวรับรู้

การแบ่งชนิดของตัวรับรู้ สามารถแบ่งได้โดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1.1 แบ่งตามความต้องการพลังงาน ประกอบไปด้วย

1.1.1 ตัวรับรู้แบบแอคทีฟ (Active Sensors) เป็นตัวรับรู้ที่สามารถปล่อยพลังงานเองได้ เช่น เทอร์โมคัปเปิล เพียโซเซสเซลล์แสงอาทิตย์ ออปโตไดโอด เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์

เหล่านี้ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายในตัวเอง แต่จะสามารถให้สัญญาณแรงดันหรือกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามตัวแปรเองได้

1.1.2 ตัวรับรู้แบบพาสซีฟ (Passive Sensors) ตัวรับรู้ชนิดนี้จะต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกจึงจะทำงาน และการตรวจรู้ได้ เช่น ตัวรับรู้ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความเหนี่ยวนำ ฯลฯ เป็นต้น

1.2 แบ่งตามลักษณะกลไกในการทำงาน ประกอบไปด้วย

1.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุ (Variable Capacitance Transducer)

1.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (Variable Inductance

Transducer)

1.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Variable Resistance

Transducer)

1.3 แบ่งตามชนิดของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ประกอบไปด้วย

1.3.1 เปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า

1.3.2 เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล

1.3.3 เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

1.3.4 เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

1.4 แบ่งตามชนิดของสัญญาณที่ใช้ ประกอบไปด้วย

1.4.1 ตัวรับรู้แบบอนาล็อก จะให้สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง

1.4.2 ตัวรับรู้แบบไบนารี จะให้สัญญาณแบบเปิด – ปิด (ON-OFF)

1.4.3 ตัวรับรู้แบบดิจิตอล จะให้สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง

1.5 แบ่งตามตำแหน่งที่ใช้ในระบบ ประกอบไปด้วย

1.5.1 ตัวรับรู้ด้านเข้า (Input Sensor)

1.5.2 ตัวรับรู้ด้านออก (Output Sensor)

1.6 แบ่งตามข้อมูลหรือวัตถุประสงค์ในการวัด เช่น ตัวรับรู้การเคลื่อนที่ วัดอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ตำแหน่ง เป็นต้น

2. หลักการทำงานของตัวรับรู้แบบต่าง ๆ

หลักการทำงานของตัวรับรู้จะทำการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งซึ่งปกติจะนิยมเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า และนำค่าไปเทียบให้เป็นขนาดของตัวแปรที่ต้องการวัด มีหลักการทำงานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

2.1 ตัวรับรู้แบบความจุ และความเหนี่ยวนำ (Capacitive and Inductive) หลักการเปลี่ยนค่าการเก็บประจุ และความเหนี่ยวนำ สามารถนำไปใช้ในการวัดระยะทาง หรือวัดระยะของการเคลื่อนที่ โดยมีหลักการทำงาน ดังนี้

2.1.1 การเปลี่ยนค่าความจุ (Capacitive) ตัวเก็บประจุอย่างง่ายแสดงดังภาพประกอบ 13 (ก) ประกอบด้วยแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นที่มีฉนวน หรือไดอิเล็กตริก กั้นระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง สามารถอธิบายหลักการทำงานโดยใช้สมการของตัวเก็บประจุบนแผ่นเพลตแบบขนานได้ ดังนี้

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ

ϵ_0 คือ ค่า Permittivity ของสุญญากาศ = 8.85 พิโกฟารัดต่อเมตร (pF/m)

ϵ_r คือ ค่า Relative Permittivity ของวัสดุอื่น ๆ

A คือ พื้นที่เพลตที่ร่วมกัน (ตารางเมตร : m^2)

d คือ ระยะที่เพลตแยกห่างจากกัน (เมตร : m)

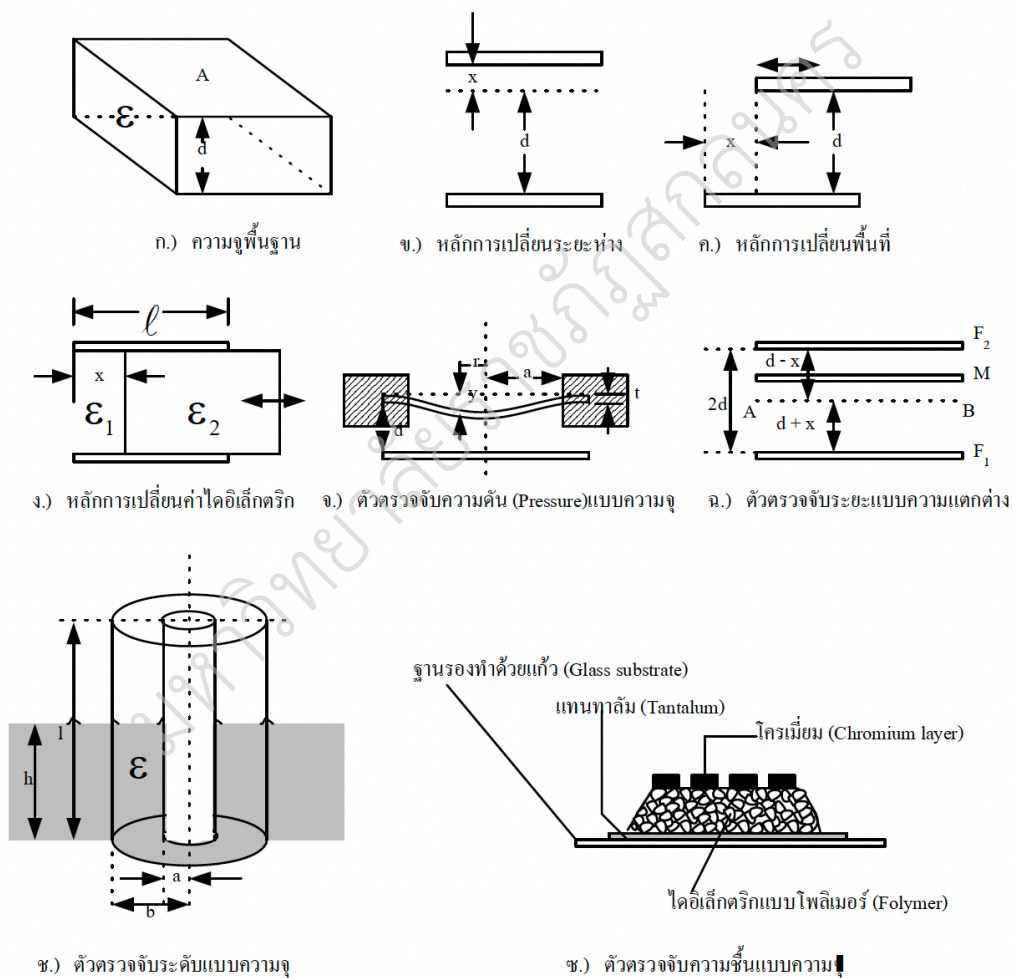
จากสมการ (2.4) ค่าความจุ C สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่า d , A และ ϵ_r สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับระยะขจัดได้ ดังนี้

2.1.2 แบบการเปลี่ยนแปลงความจุตามระยะห่างระหว่างเพลต จากภาพประกอบ 2.11 (ข) ถ้าระยะ x ทำให้เพลตห่างกันเป็นระยะ $d + x$ เขียนสมการได้ ดังนี้

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d+x} \quad (2.5)$$

2.1.3 แบบเปลี่ยนค่าตามการแปรค่าพื้นที่ จากภาพประกอบ 13 (ค) เมื่อระยะ x ทำให้พื้นที่ที่ซ้อนทับของแผ่นเพลต ลดลง $\Delta A = wx$ เมื่อ w = ความกว้างของแผ่นเพลต สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(A - wx)}{d} \quad (2.6)$$



ภาพประกอบ 13 ค่าความจุที่นำไปดัดแปลงเป็นตัวตรวจรับ

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนะบุตร, 2548

ตาราง 3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

วัสดุ(Material)	ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant : ϵ_r)
Vacuum	1.0
Air	1.0006
Teflon	2.0
Wax	2.25
Paper	2.5
Amber	2.65
Rubber	3.0
Oil	4.0
Mica	5.0
Ceramic (low)	6.0
Bakelite	7.0
Glass	7.5
Water	78.0
Ceramic (high)	8000.0

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

2.1.4 แบบเปลี่ยนค่าตามไดอิเล็กตริก จากภาพประกอบ 2.11 (ง) เมื่อระยะ x ทำให้ไดอิเล็กตริก ϵ_2 ระหว่างเพลตเปลี่ยนไป ($\epsilon_2 > \epsilon_1$) ค่าความจุรวมของตัวตรวจจับหาได้จาก ผลรวมของตัวเก็บประจุสองส่วน คือ ส่วนที่มีพื้นที่ A_1 ของไดอิเล็กตริก ϵ_1 และส่วนของพื้นที่ A_2 และไดอิเล็กตริก ϵ_2 นั้น คือ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_1}{d} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_2}{d} \quad (2.7)$$

เมื่อ

A_1 คือ wx

A_2 คือ $w(\ell - x)$

w คือ ความกว้างของแผ่นโลหะ ; ℓ = ความยาวของแผ่นโลหะ

ดังนั้น

$$C = \frac{\varepsilon_0 w}{d} [\varepsilon_2 \ell - (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)x] \quad (2.8)$$

2.1.5 ตัวตรวจวัดความดันแบบค่าความจุ จากภาพประกอบ 2.11 (จ) จะมีแผ่นคงที่และแผ่นเคลื่อนที่ (ทางปฏิบัติจะเป็นจานโลหะวงกลมบาง ๆ) ไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นเพลตจะเป็นอากาศที่มีค่าคงที่ (ประมาณ 1) เมื่อมีความดัน p มากระทำกับแผ่นเคลื่อนที่จะเกิดระยะ y ที่รัศมี r จากศูนย์กลาง เขียนเป็นสมการได้ คือ

$$y = \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu^2)}{Et^3} (a^2 - r^2)^2 P \quad (2.9)$$

เมื่อ

a คือ รัศมีของไดอะแฟรม

t คือ ความหนาของแผ่นเพลต

E คือ ค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus)

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

การผิดรูปไปของไดอะแฟรมจะทำให้ค่าระยะความห่างเฉลี่ยของแผ่นเพลต ลดลง ทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้น ΔC เขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{(1 - \nu^2)}{16Edt^3} a^4 P \quad (2.10)$$

เมื่อ d เป็นระยะห่างเริ่มต้น (เดิม) ของเพลต และ $C = \epsilon_0 \pi a^2 / d$ เป็นค่าความจุเมื่อความดัน $P = 0$ (Zero)

2.1.6 ตัวตรวจจับสนามความแตกต่างหรือผลัก – ดึง (Differential or Push – pull) เนื่องจากตัวรับรู้แบบเปลี่ยนแปลงระยะห่างมีความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งถือว่าเป็นข้อเสีย แต่สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวรับรู้ตรวจจับสนามจัดแบบความจุชนิดมีแผ่นเพลต 3 แผ่น ดังภาพประกอบ 13 (ฉ) ประกอบด้วยแผ่นเพลตอยู่กึ่งกลางที่ F_1 และ F_2 ถ้า x เป็นระยะที่แผ่นเพลตเคลื่อนที่ห่างไปจากแนวเส้นกลาง AB แล้วค่าความจุ C_1 และ C_2 ที่เกิดจากเพลต MF_1 และ MF_2 ตามลำดับ คือ

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d+x} \quad (2.11)$$

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d+x} \quad (2.12)$$

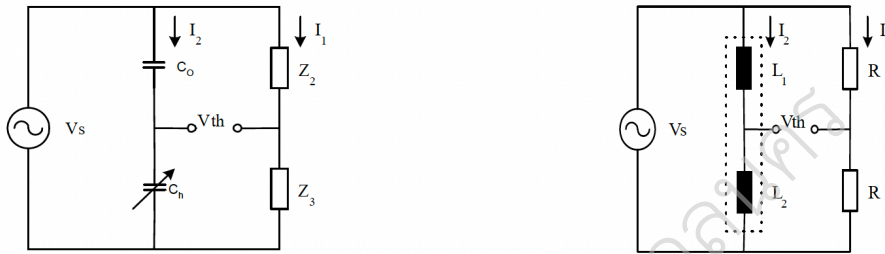
ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 และ C_2 และระยะ x ยังคงเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่เมื่อ C_1 และ C_2 ใช้ร่วมกันกับวงจรบริดจ์แบบชี้แสดงค่า (Deflection) จะทำให้ความสัมพันธ์โดยรวมของแรงดันด้านออกของบริดจ์กับระยะจัด x มีความเป็นเชิงเส้นดีขึ้น

2.1.7 ตัวตรวจจับสนามระดับของเหลวแบบความจุ (Capacitive Level Sensor) จากภาพประกอบ 13 (ช) ประกอบด้วยกระบอบโลหะสองชิ้น มีจุดศูนย์กลางร่วมกันทำให้ของเหลวอยู่ระหว่างช่องว่างของทรงกระบอบทั้งสองมีระดับของเหลวสูง h ถ้าของเหลวไม่เป็นตัวนำ (มีความนำไฟฟ้าน้อยกว่า $0.1 \mu mho / cm^3$) ไดอิเล็กทริกและค่าความจุรวมของตัวตรวจจับสนาม คือ ผลรวมของความจุของของเหลวและความจุของอากาศ ความจุต่อหน่วยความยาวของกระบอบแกนร่วมกัน มีรัศมี b และ a (โดย $b > a$) ถูกแยกด้วยไดอิเล็กทริก ϵ_r คือ $2\pi\epsilon_0\epsilon_r / \log_e(b/a)$ สมมติว่าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกของอากาศเป็นหนึ่ง ค่าความจุของตัวตรวจจับสนามระดับสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\log_e(b/a)} + \frac{2\pi\epsilon_0(\ell-h)}{\log_e(b/a)} \quad (2.13)$$

$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0}{\log_e(b/a)} [\ell + (\epsilon_r - 1)h] \quad (2.14)$$

ซึ่งตัวตรวจจับสนามสามารถใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์กระแสสลับแบบชี้ค่า (Deflection Bridge) ได้ดังภาพประกอบ 14



ก) บริดจ์สำหรับตัวตรวจจับสนามแบบความจุ

ข) บริดจ์สำหรับตัวตรวจจับสนามแบบความแตกต่างของกระแส

ภาพประกอบ 14 ตัวตรวจจับสนามที่ใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์กระแสสลับแบบชี้ค่า
ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

จากภาพประกอบ 14 วงจรบริดจ์กระแสสลับแบบชี้ค่าร่วมกับตัวตรวจจับสนามแบบความจุและความเหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 14 (ก) ที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์แบบความจุสองแขน และอิมพีแดนซ์แบบความต้านทานสองแขนหากพิจารณาว่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวเป็นตัวตรวจจับสนามที่ใช้วัดระดับของเหลวในภาพประกอบ 14 (ข) โดยค่าความจุ C_h มีค่าตามสมการ (2.14) เมื่อกำหนดให้แต่ละแขนของบริดจ์เป็น ดังนี้ คือ

$$Z_1 = 1/(j\omega C_0); Z_2 = R_2 \quad (2.15)$$

$$Z_4 = 1/(j\omega C_h); Z_3 = R_3 \quad (2.16)$$

จะได้

$$V_{th} = V_s \left(\frac{1}{1 + \frac{C_0}{C_h}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) \quad (2.17)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการให้ $V_{th} = 0$ ที่ระดับต่ำสุด h_{min} ต้องใช้ค่าความจุเริ่มต้น $C_0 = C_{hmin}(R_3/R_2)$ จะได้แรงดันเทียบเท่าเทวินิน เป็น

$$V_{th} = V_s \left(\frac{1}{1 + \frac{C_{hmin}}{C_h} \frac{R_3}{R_2}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) \quad (2.18)$$

ถ้าอัตราส่วน R_3/R_2 มีค่ามาก ๆ เทียบกับ 1 การประมาณด้วยสมการ (2.18) จะเป็นเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของสมการ

$$V_{th} \approx V_s \frac{R_2}{R_3} \left(\frac{C_h}{C_{hmin}} - 1 \right) \quad (2.19)$$

จากภาพประกอบ 13 (ค) ค่า

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d+x} \quad (2.20)$$

และ

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d-x} \quad (2.21)$$

เมื่อต่อร่วมกับวงจรบริดจ์แบบกระแสสลับจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ เป็น

$$Z_1 = 1/(j\omega C_1); Z_2 = R_2 \quad (2.22)$$

$$Z_4 = 1/(j\omega C_2); Z_3 = R_3 \quad (2.23)$$

ได้สมการ

$$V_{th} = V_s \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{1}{2} \right) \quad (2.24)$$

จะได้สมการ

$$V_{th} = \frac{V_s}{2d} x \quad (2.25)$$

นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{th} กับระยะ x สำหรับความจุแบบผลัก – ดึง (Push-pull) เป็นเชิงเส้นและไม่ขึ้นกับความถี่ ω

2.1.8 ตัวตรวจวัดความชื้นแบบความจุ (Capacitive Humidity Sensor)

จากภาพประกอบ 13 (ข) เป็นความจุตรวจวัดความชื้นแบบฟิล์มบาง มีไดอิเล็กทริกเป็นโพลิเมอร์ ที่สามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำได้ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกทำให้ค่าความจุมีค่าแปรตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศแวดล้อม เพลตด้านหนึ่งจะประกอบด้วยชั้นของแทนทาลัมซึ่งยึดติดไว้บนแผ่นรองที่เป็นแก้ว ระหว่างเพลตจะเป็นชั้นของโพลิเมอร์ (ไดอิเล็กทริก) ส่วนเพลตอีกด้านจะเป็นชั้นของแผ่นโครเมียมบางที่ทำให้เกิดความเครียดแบบแรงดึงที่มากพอจนทำให้เกิดรูพรุนเล็ก ๆ ที่แผ่นทั้งโครเมียมและที่โพลิเมอร์จะมีโครงสร้างเป็นหลอดลายคล้ายการวางหินหรือแก้วขึ้นเล็ก ๆ ซ้อนกัน ซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำผ่านเข้าไปที่ไดอิเล็กทริกได้ ตัวรับรู้แบบนี้จะมีช่วงด้านเข้าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) โดยมีค่าความจุที่ความชื้น 0 % เป็น 375 พิโกฟารัด (pF) และมีความไวเชิงเส้นเป็น 1.7 พิโกฟารัดต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (pF/%RH) ซึ่งเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$C = 375 + 1.7(RH)pF \quad (2.26)$$

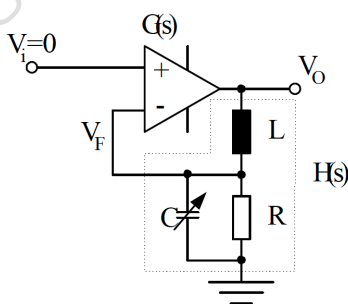
ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดที่ห่างจากเส้นของสมการ (2.26) คือ 2% เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น และ 1% เนื่องจากฮิสเตอร์ีซิส

ตัวตรวจจับแบบความจุส่วนมากจะใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์กระแสสลับ หรือวงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) ในทางปฏิบัติจะมีค่าความจุและค่าความต้านทานรวมอยู่ในลักษณะขนานกัน ในการหาค่าความสูญเสียในไดโอดเล็กทรอนิกส์ส่วนนี้จะมีผลต่อการออกแบบวงจรมาก โดยเฉพาะวงจรกำเนิดความถี่ เช่น ตัวตรวจจับความชื้นแบบความจุจะมีค่าความต้านทานสูญเสียของไดโอดเล็กทรอนิกส์ประมาณ 100 กิโลโอห์ม ($K\Omega$) ที่ 100 กิโลเฮิร์ต (KHz) ซึ่งคุณภาพของไดโอดเล็กทรอนิกส์จะแทนด้วยเทอมของมุมความสูญเสียหรือที่เรียกว่า Loss Tangent ซึ่งอาจเขียนแทนด้วย $\tan \delta$ ซึ่งมีค่า ดังนี้ คือ

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega CR} \quad (2.27)$$

ถ้าค่า $C = 500$ พิโกฟารัด (pF) แล้ว $\tan \delta$ จะ ≈ 0.03 จากภาพประกอบ 15 แสดงตัวตรวจจับแบบความจุใช้ร่วมกับความเหนี่ยวนำอย่างเดี่ยว (Pure) ในวงจรกำเนิดความถี่ จะได้ค่าแฟคเตอร์คุณภาพ (Q) ของวงจรเป็น

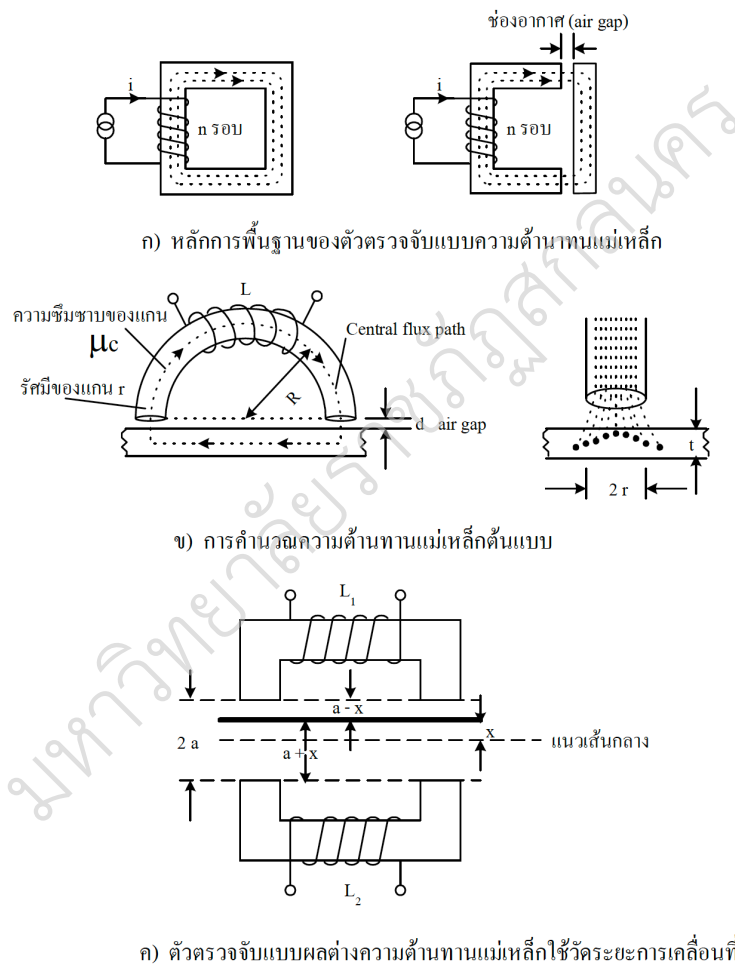
$$Q = \omega_n CR = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.28)$$



ภาพประกอบ 15 วงจรกำเนิดความถี่แบบ RC อนุกรมโดยมีความต้านทาน R ของ C ขนานกับ C

ซึ่งจากสมการแสดงให้เห็นว่า Q แปรตามค่า R มาก ถ้าความถี่ธรรมชาติ f_n ของวงจรกรณีเป็นตัวตรวจจับความชื้นแบบความจุข้างต้นและมีค่าเป็น 105 เฮิร์ตซ์ (Hz) วงจรจะมีค่า Q ประมาณ 30 สำหรับข้อควรระวัง คือ ต้องทำให้ผลของความจุค้างของสายเคเบิลในวงจรมีผลต่ำสุด

2.2 การเปลี่ยนค่าแบบความเหนี่ยวนำ (Inductive) แนวความคิดเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้า และหลักการทำงานของตัวตรวจจับแบบความเหนี่ยวนำ กล่าวโดยสรุป คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้กระแสเคลื่อนที่ผ่านความต้านทานในวงจร หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก แสดงดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 หลักการตรวจจับแบบความต้านทานแม่เหล็ก

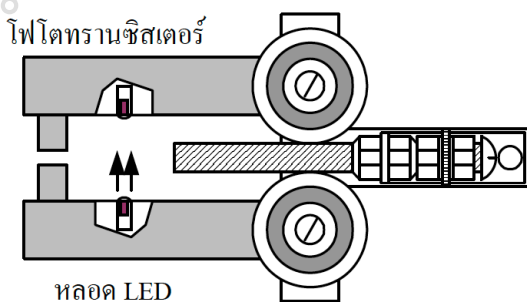
ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

วงจรแม่เหล็กดังภาพประกอบ 16 (ก) เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านขดลวด n ที่พันรอบแกนเหล็กที่ทำจากสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) ทำการพิจารณาว่าขดลวดเป็นแหล่งจ่าย

ที่กำเนิดเส้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กภาพประกอบ 16 (ข) แสดงแกนถูกแยกออกจากกันเป็นสองส่วนด้วยช่องว่างอากาศ (Airgap) ที่ปรับระยะได้ ความต้านทานแม่เหล็กทั้งหมดของวงจรได้จากทั้งแกนเหล็กและช่องว่างอากาศโดยความซึมซาบของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 และของแกนจะมีค่าตามวัสดุ เมื่อมีช่องว่างอากาศเกิดขึ้นจะทำให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงดังนั้นสามารถนำหลักการดังกล่าวนี้ มาใช้ในการสร้างเป็นตัวรับรู้ระยะการเคลื่อนที่ได้ ภาพประกอบ 16 (ค) เป็นต้นแบบของตัวตรวจจับระยะแบบอาศัยการเปลี่ยนค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Variable Reluctance) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แกนเหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกรูปครึ่งวงกลม ช่องว่างอากาศ และแผ่นเฟอร์โรแมกเนติก หรือเรียกว่าอาร์เมเจอร์ (Armature) ความต้านทานแม่เหล็กรวมได้จากความต้านทานแม่เหล็กของแต่ละส่วนรวมกัน

2.2.1 ตัวตรวจจับแบบใช้แสง

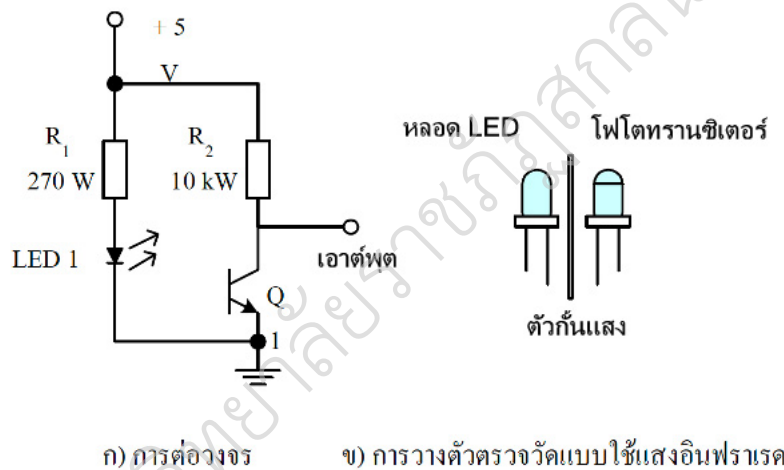
ตัวตรวจจับแบบใช้แสง แสดงดังภาพประกอบ 17 จะใช้ลำแสงที่มีขนาดเล็กตรวจสอบว่าวัตถุอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ เป็นวิธีตรวจจับที่ไม่ละเอียด และมีความถูกต้องน้อยที่สุด จึงไม่นิยมนำมาใช้กับแขนกลที่ต้องการความละเอียดสูง การติดตั้งตัวรับรู้แบบใช้แสงสามารถติดตั้งได้ง่ายโดยการติดตั้งแอลอีดี (LED) แบบอินฟราเรดด้านใดด้านหนึ่ง และติดตั้งตัวรับแสงอินฟราเรดอีกด้านหนึ่ง โดยให้สิ่งที่ต้องการตรวจจับอยู่ระหว่างกลาง เช่น ติดตั้งชุดอินฟราเรดที่ฝ่ามือของแขนกลทำให้ทราบวัตถุกำลังอยู่ในระยะที่สามารถจับได้หรือไม่ เป็นต้น



ภาพประกอบ 17 การใช้หลอด LED และโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับ

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

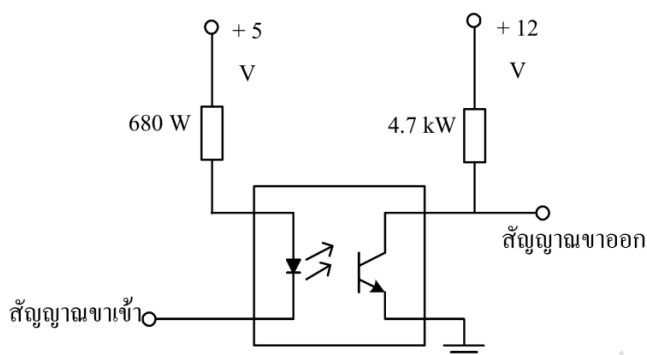
ตัวตรวจจับแบบใช้แสงอินฟราเรดอย่างง่าย แสดงดังภาพประกอบ 18 ซึ่งใช้แอลอีดีแบบอินฟราเรดและโฟโตทรานซิสเตอร์แบบอินฟราเรด โดยเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์สามารถนำไปต่อเข้ากับวงจรควบคุมใด ๆ ก็ได้ตามความต้องการ และมีความต้านทานที่ใช้ปรับเพื่อเพิ่มหรือลดความไวของวงจร การเพิ่มค่าความไวจะทำให้สามารถตรวจจับวัตถุได้ไกล ส่วนการลดความไวจะทำให้สามารถเคลื่อนเข้าไปใกล้วัตถุได้มากขึ้นก่อนที่จะตรวจจับได้ ตัวตรวจจับแบบนี้จะต้องมีแผ่นกันแสง ที่กระจายอยู่ในห้อง และแสงจากหลอดแอลอีดีซึ่งตำแหน่งของหลอดแอลอีดีและโฟโตทรานซิสเตอร์ต้องวางให้ถูกต้อง ซึ่งตัวรับรู้อาจสร้างขึ้นเองหรือใช้ตัวรับรู้ที่ทำสำเร็จแล้ว เช่น ตัวตรวจจับ TIL139 จากบริษัท Texas Instruments



ภาพประกอบ 18 วงจรตรวจจับที่ใช้ LED และโฟโตทรานซิสเตอร์
ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

2.2.2 ออปโตไอโซเลเตอร์ (Opto-isolator)

ออปโตไอโซเลเตอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับที่ทำงานด้วยแสง ซึ่งแยกวงจรที่มีระดับแรงดันต่างกัน ประกอบด้วยส่วนกำเนิดแสงคือแอลอีดี ที่ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าและออปโตทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ต่ออุปกรณ์ภายนอก เขากับสัญญาณด้านขาออกของทรานซิสเตอร์ แสดงดังภาพประกอบ 19 โดยแต่ละด้านของออปโตไอโซเลเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่แยกอิสระกัน จึงใช้งานเป็นตัวปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ เช่น เปลี่ยนจากสัญญาณไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ เป็นต้น



ภาพประกอบ 19 ออปโตไอโซเลเตอร์

ที่มา : กิตติวุฒิ จินณะบุตร, 2548

2.2.3 ตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัส

ตัวรับรู้แบบไม่สัมผัส หรือที่นิยมเรียกว่าพร็อกซิมิตี้เซนเซอร์ ใช้หลักการทางไฟฟ้า ดังนี้

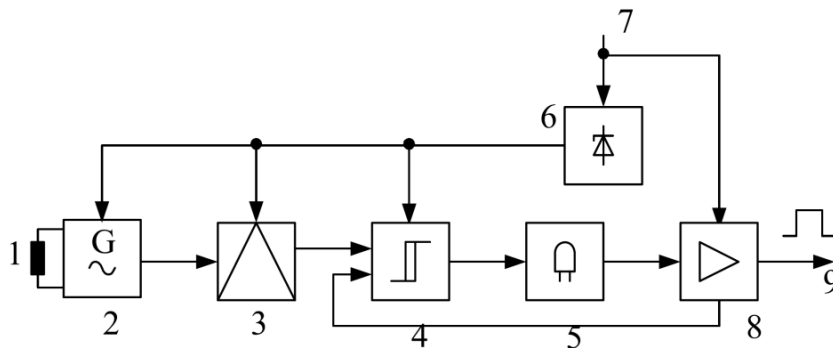
2.2.3.1 ตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Sensors)

ตัวรับรู้แบบเหนี่ยวนำ หรือเรียกว่าอินดักทีฟเซนเซอร์ ทำงานโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งวัตถุที่ตรวจจับได้จะต้องเป็นโลหะเท่านั้น มีลักษณะดังภาพประกอบ 20 และมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 20 ตัวอย่างตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ

ที่มา : Howard, M., 2013



ภาพประกอบ 21 ส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนະบุตร, 2548

ส่วนประกอบของตัวตรวจจับแบบเหนี่ยวนำ ประกอบไปด้วย

- 1) ส่วนตรวจจับ (ขดลวด) (Active Zone : Coil)
- 2) วงจรกำเนิดคลื่นความถี่ (Oscillator)
- 3) ส่วนการประมวลผล (Evaluator)
- 4) วงจรเปรียบเทียบและจุดชนวน (Trigger)
- 5) หลอดแสดงสถานะการทำงาน (Status display)
- 6) วงจรคงค่าแรงดันภายใน (Internal Constant Voltage Supply)
- 7) แหล่งจ่ายแรงดันภายนอก (External Voltage)
- 8) วงจรขยายและป้องกันด้านออก (Output and Protective)
- 9) สัญญาณด้านออก (เป็นแบบ ON-OFF)

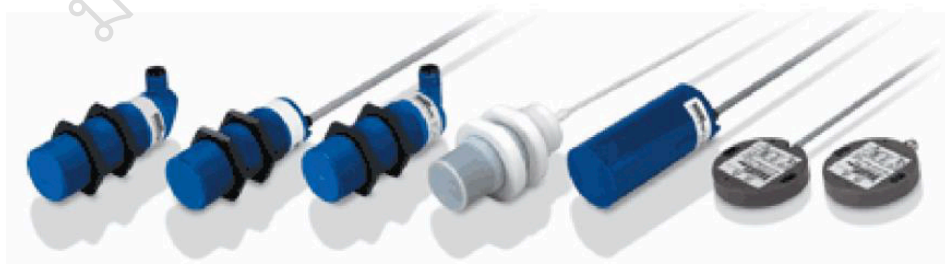
หลักการทำงานของตัวรับรู้แบบความเหนี่ยวนำ มีหลักการทำงาน ดังนี้

คือ ส่วนที่ 1 สร้างสนามแม่เหล็กตามความถี่ของออสซิลเลเตอร์ หมายเลข 2 เมื่อมีวัตถุหรือชิ้นงานที่เป็นโลหะเข้ามาในระยะที่สนามแม่เหล็กส่งไปถึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการออสซิลเลทลดลง หรือหยุดการออสซิลเลท เมื่อนำโลหะออกจากตัวตรวจจับ วงจรกำเนิดความถี่จะเริ่มทำงานตามปกติ จากทั้งสองสภาวะจะถูกเปรียบเทียบด้วย ส่วนหมายเลข 3 และ 4 จากนั้นก็จะถูกส่งผลไปยังส่วนที่ 5 และส่วนที่ 8 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสภาวะ ON หรือ OFF

2.2.3.2 ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า (Capacitive Sensor)

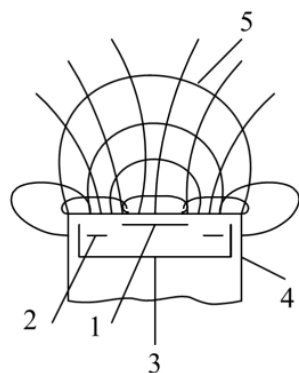
ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้สามารถตรวจจับสนามไฟฟ้าได้ทั้งที่เป็นโลหะและไม่เป็นโลหะ ใช้หลักการตรวจจับสนามไฟฟ้า เรียกว่า ตัวรับรู้แบบคาปาซิทีฟ โดยโครงสร้างและส่วนประกอบจะคล้ายกับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก แต่ต่างกันที่ส่วนตรวจจับสนามไฟฟ้าจะใช้หลักการเปลี่ยนค่าความจุแทน เมื่อวัตถุที่จะตรวจจับสนามไฟฟ้าเข้ามาในระนาบสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งเกิดจาก Active และ Earth Electrode และอาจมีตัวนำที่ทำหน้าที่ป้องกันและชดเชยผลของความชื้นที่ด้านหน้าของบริเวณตรวจจับสนามไฟฟ้า เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณตรวจจับสนามไฟฟ้า ค่าความจุของวงจรกำเนิดคลื่นความถี่ จะเปลี่ยนแปลงไป

จากภาพประกอบ 22 และภาพประกอบ 23 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า เมื่อมีวัตถุใด ๆ เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณสนามไฟฟ้า จะทำให้ค่าความจุของวงจรกำเนิดความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างตัวกลาง หรือวัตถุกับด้านหน้าของส่วนตรวจจับสนามไฟฟ้าของตัวกลาง (Dielectric Constant) (ถ้ามีค่าคงที่ของตัวกลางมาก ระยะการตรวจจับสนามไฟฟ้าจะมีระยะไกลขึ้น) รวมทั้งขนาดและรูปร่างของตัวกลาง การทำงาน (ON) และไม่ทำงาน (OFF) นั้นได้จากสถานะของวงจรกำเนิดความถี่ ว่ามีการอสซิลเลทหรือไม่ โดยใช้หลักการเช่นเดียวกันกับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ระยะการตรวจจับสนามไฟฟ้ามาตรฐานได้จากการใช้แผ่นโลหะเป็นวัตถุตัวกลาง เมื่อเปลี่ยนวัตถุตัวกลางเป็นวัสดุอื่น ระยะทางก็จะแตกต่างกันไป โดยการคูณค่าตัวประกอบกับระยะมาตรฐาน จะได้ระยะตรวจจับสนามไฟฟ้าตามตาราง 4 เป็นตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่าง ๆ



ภาพประกอบ 22 ตัวอย่างตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

ที่มา : Howard, M., 2013



1. Active Electrode
2. อิเล็กโตรดขดขย
3. Earth Electrode
4. โครงของตัวตรวจจับ
5. สนามไฟฟ้า

ภาพประกอบ 23 ภาพตัดขวางด้านข้างส่วนตรวจจับของตัวตรวจจับแบบไม่สัมผัสแบบความจุไฟฟ้า

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนะบุตร, 2548

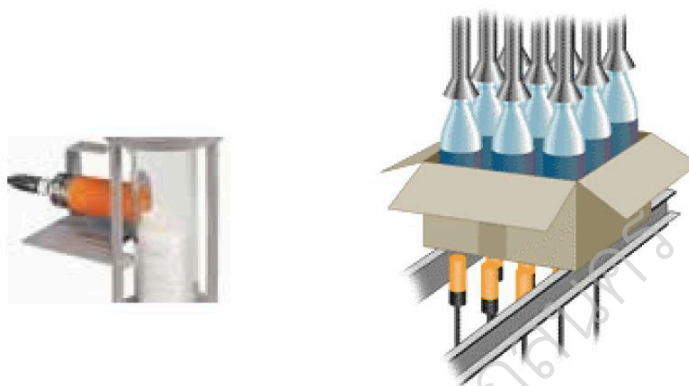
ตาราง 4 ตัวอย่างตัวประกอบของวัตถุตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัตถุ	ค่าตัวประกอบ
โลหะทุกชนิด	1.0
น้ำ	1.0
แก้ว	0.3-0.5
พลาสติก	0.3-0.6
กระดาษแข็ง	0.3-0.5
ไม้(ขึ้นอยู่กับความชื้น)	0.2-0.7
น้ำมัน	0.1-0.3

ที่มา : กิตติวุฒิ จินนะบุตร, 2548

การปรับตัวตรวจจับจะมีโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) ใช้สำหรับปรับความไวของระยะการตรวจจับ ซึ่งจะอยู่ส่วนท้ายของตัวตรวจจับ และสามารถเลือกปรับไม่ให้ตรวจจับวัตถุที่ขวางกั้นอยู่ก่อนวัตถุที่ต้องการตรวจจับ ตัวอย่าง เช่น การตรวจจับน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุ การตรวจจับขดในกล่องกระดาษ เป็นต้น ซึ่งตัวตรวจจับจะสามารถปรับไม่ให้ตรวจจับภาชนะบรรจุ

หรือกล่องกระดาษได้ การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้ามีหลายอย่าง เช่น การตรวจจับระดับของของเหลวในภาชนะบรรจุ และการตรวจจับจำนวนขวดในกล่องกระดาษ ดังภาพประกอบ 24 เป็นต้น



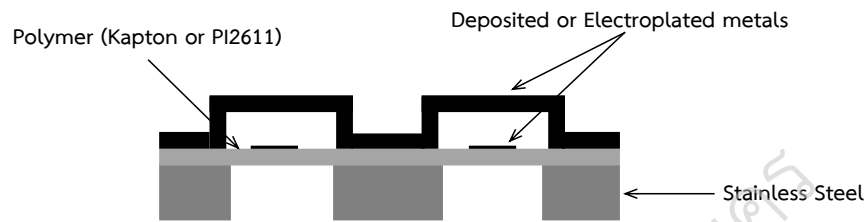
ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างการใช้ตัวตรวจจับแบบความจุไฟฟ้า

ที่มา : Chinpanthana, N. 2022

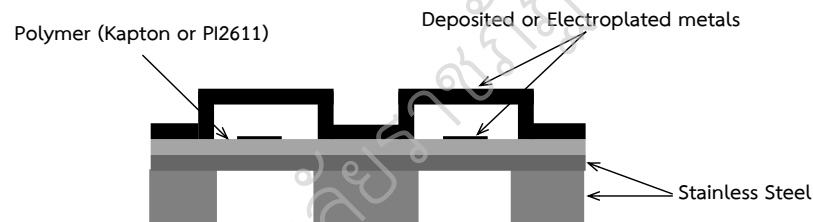
ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

Sung-Pil Chang (2002) ได้นำเสนอตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุแบบอะเรย์ซึ่งจะมีตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุอยู่ภายในหลายตัว ซึ่งจะทำให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันและทำการทดลองใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ ในการสร้างไดอะแฟรม คือ Kapton, Stainless Steel และ Titanium ไดอะแฟรมที่เป็น Kapton มีความหนา 50 ไมโครเมตร (μm) เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 8x8 ทดสอบที่ย่านความดัน 0-34 กิโลปาสกาล (kPa) จากการทดสอบได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 พิโกฟารัด (pF) ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น Stainless Steel ความหนา 12.7 ไมโครเมตร (μm) เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ ขนาด 6x6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0 – 178 กิโลปาสกาล (kPa) จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 พิโกฟารัด (pF) และไดอะแฟรมที่เป็น Titanium ความหนา 25.4 ไมโครเมตร (μm) เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 มิลลิเมตร (mm) วางเป็นอะเรย์ ขนาด 6x6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0-178 กิโลปาสกาล (kPa) จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป เท่ากับ 0.25 พิโกฟารัด (pF) จากการทดสอบ พบว่า

การใช้ไดอะแฟรมที่เป็นโลหะจะช่วยให้ตัวรับรู้ความดันมีความทนทานต่อสภาพการใช้งานต่าง ๆ มากกว่าไดอะแฟรมที่เป็นพอลิเมอร์โดยโครงสร้างของตัวรับรู้ความดัน ดังกล่าวมีลักษณะ แสดงดัง ภาพประกอบ 25 (ก) และภาพประกอบ 25 (ข)



(ก) ไดอะแฟรมพอลิเมอร์

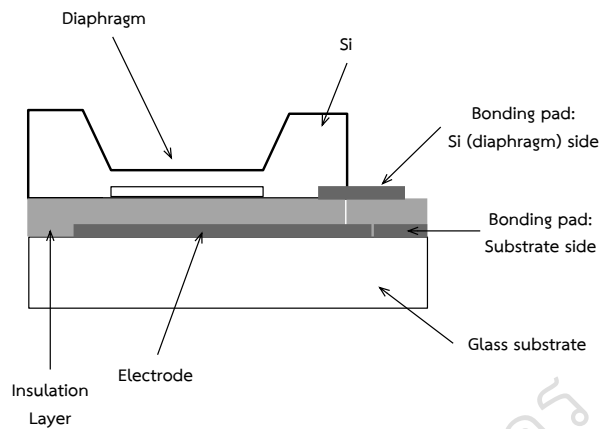


(ข) ไดอะแฟรมโลหะ

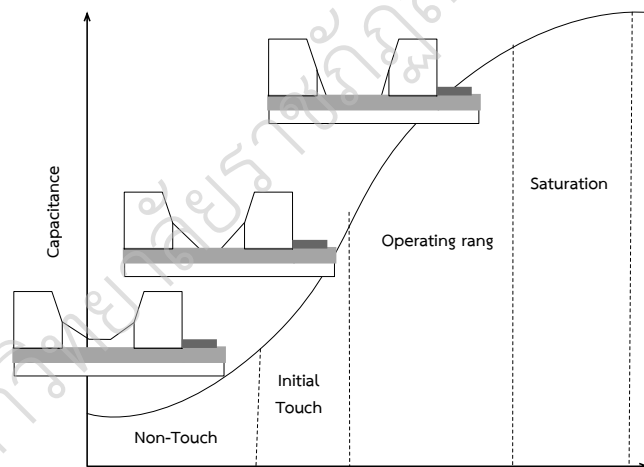
ภาพประกอบ 25 ตัวรับรู้ความดันของ Sung-Pil Chang (2002)

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

Yamamoto และคณะ (2002) ได้นำเสนอตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบให้ทำงานในโหมดสัมผัส (Touch Mode) สำหรับตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์ โดยตัวรับรู้ความดันแบบสัมผัสจะให้ค่าความจุไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงแบบเชิงเส้นในช่วงที่ไดอะแฟรมที่มีขั้วอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนชนสัมผัสกัน แสดงดังภาพประกอบ 26 (ก)



(ก) โครงสร้างของตัวรับรู้ความดัน



(ข) กราฟคุณลักษณะของตัวรับรู้ความดันแบบสัมผัส

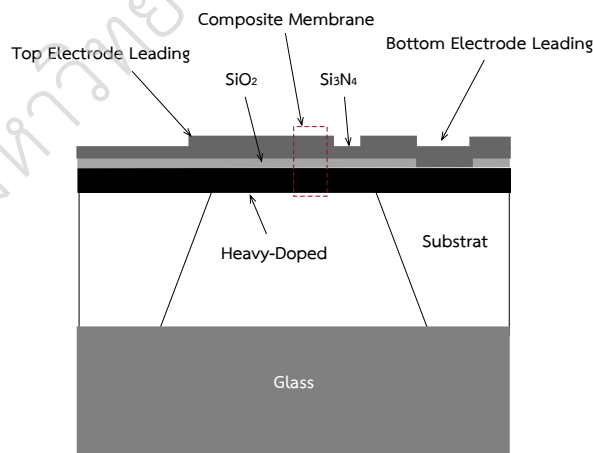
ภาพประกอบ 26 ตัวรับรู้ความดันแบบสัมผัสของ Satoshi (2003)

ที่มา : นิमित ชมนาวังและคณะ, 2556

ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุชนิดนี้จะให้ค่าความไวมากกว่าตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุทั่วไป (Non-touch Mode) แต่มีข้อเสีย คือ จะสามารถให้ค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้นในช่วงที่ออกแบบเท่านั้นซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความดัน แสดง

ดังภาพประกอบ 26 (ข) ตัวรับรู้ความดันที่ Satoshi สร้างขึ้นจะใช้ซิลิคอน n-type เป็นไดอะแฟรม มีความหนา 300 ไมโครเมตร (μm) บนฐานกระจกที่มีขั้วอิเล็กโทรด ออกแบบให้วัดความดันภายใน ยางรถยนต์ส่วนบุคคลความดันเริ่มสัมผัส 60 กิโลปาสกาล (kPa) ความไวที่ความดัน 250 กิโลปาสกาล (kPa) เท่ากับ 0.049 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa) ส่วนตัว ตรวจรู้ความดันที่ใช้วัดความดันภายในยางรถบรรทุก ออกแบบความดันเริ่มสัมผัส 150 กิโลปาสกาล (kPa) ความไวที่ 700 กิโลปาสกาล (kPa) เท่ากับ 0.016 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa)

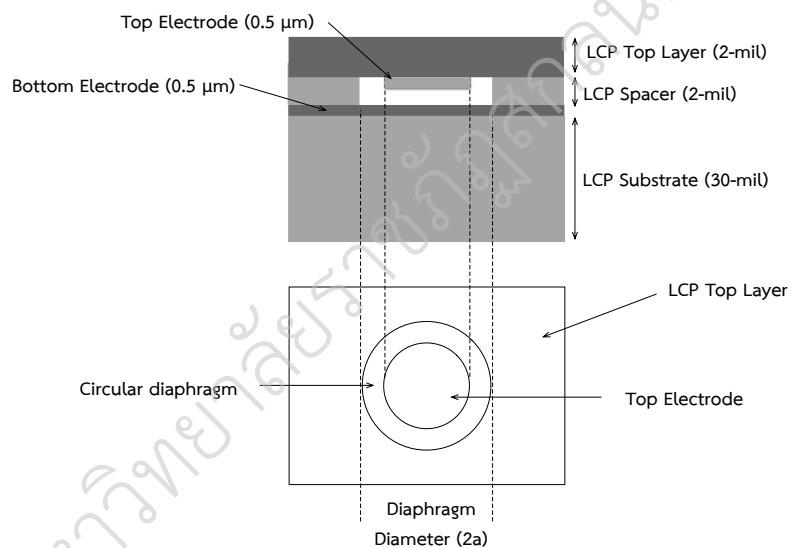
Min-Xin Zhu และคณะ (2005) ได้นำเสนอการสร้างตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ ที่มีโครงสร้างไดอะแฟรมแบบแซนดวิช มีไดอะแฟรมที่เป็นวัสดุต่างชนิดกัน คือ SiO_2 และ Si_3N_4 ทั้งหมด 3 ชั้นใช้เทคนิค Anodic bonding ในการเชื่อมต่อวัสดุทั้งสองชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกันติดบนช่องเปิดซิลิคอนสี่เหลี่ยมมีลักษณะดังภาพประกอบ 2.25 ออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 800 ไมโครฟารัด (μF), 1,000 ไมโครฟารัด (μF), 1,200 ไมโครฟารัด (μF) และ 1,500 ไมโครฟารัด (μF) ตามลำดับ จากการทดสอบได้ความไวเท่ากับ 0.08 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa), 0.12 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa), 0.15 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa), 0.2 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa) ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดฮิสเตอรีซิสสูงสุด 3.3% เทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด



ภาพประกอบ 27 ตัวรับรู้ความดันของ Min-XinZhu (2005)

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

Jithendra N. (2006) ได้นำเสนอการสร้างตัวรับรู้ความดัน โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้างทั้งหมดรวมถึงไดอะแฟรมจะใช้ Liquid-crystal Polymer (LCP) โดยโครงสร้างจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน แสดงดังภาพประกอบ 2.26 ได้แก่ ส่วนฐานที่เคลือบโลหะเป็นขั้วอิเล็กโทรดชั้นที่สองจะเป็นช่องวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ส่วนชั้นที่สามเป็นไดอะแฟรมที่มีขั้วอิเล็กโทรดวงกลมขนาดพื้นที่ 4.9 ตารางมิลลิเมตร (mm^2) ติดบนช่องวงกลมทดสอบที่ความดัน 0 - 100 กิโลปาสกาล (kPa) ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.277 พิโกฟารัด (pF) มีความไวเท่ากับ 0.00277 พิโกฟารัดต่อกิโลปาสกาล (pF/kPa)

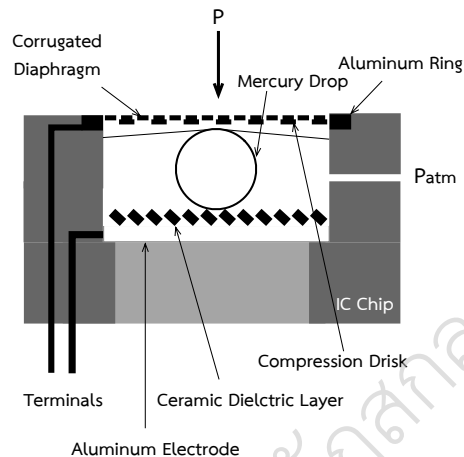


ภาพประกอบ 28 ตัวรับรู้ความดันของ Jithendra N. (2006)

ที่มา : นิमित ชมนาวัง และคณะ, 2556

Ezzat G (2010) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการสร้างตัวรับรู้ความดันซึ่งมีความไวสูง การสร้างตัวรับรู้ความดันแบบใหม่นี้จะใช้ลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด เคลือบด้วย Barium Strontium Titanate หนา 1 ไมโครเมตร (μm) โดยวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (Permittivity) จากนั้นหยดตะกั่วขนาดเล็กลงบนวัสดุไดอิเล็กทริก แล้วปิดทับด้วยลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดอีกด้าน ดังภาพประกอบ 29 ทำการทดสอบที่ความดัน 0 - 3 กิโลปาสกาล (kPa)

ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปมากกว่า 6 ไมโครฟารัด (μF) และมีความไวเท่ากับ 2.24 ไมโครฟารัดต่อกิโลปาสคาล ($\mu F/kPa$)



ภาพประกอบ 29 ตัวรับรู้ความดันของ Ezzat G (2010)

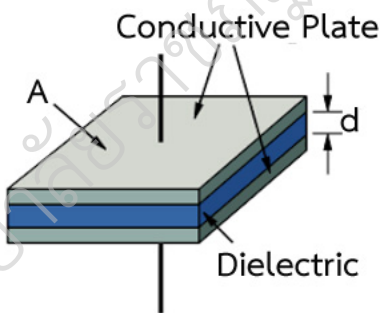
ที่มา : ชมนาวัง และคณะ, 2556

ตัวรับรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุนั้นได้มีนักวิชาการหลายท่านที่ได้ทำการศึกษาในหลาย ๆ องค์ประกอบที่จะทำให้ประสิทธิภาพของตัวรับรู้ดีขึ้น เช่นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง การเปลี่ยนวัสดุในการทำเป็นโครงสร้าง การเปลี่ยนขนาดของตัวรับรู้ การเคลือบผิว จะเห็นได้ว่า เมื่อตัวรับรู้มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้าง วัสดุที่นำมาผลิตหรือการนำวัสดุอื่นมาเคลือบทับบนตัวรับรู้เดิมเมื่อนำไปทดสอบพบว่าตัวรับรู้ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น

ความจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นส่วนประกอบของวงจร สามารถสะสมพลังงานรูปแบบสนามไฟฟ้าและเป็นส่วนประกอบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างว่า คาปาซิเตอร์หรือคอนเดนเซอร์ หรือซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุ คือ ฟารัด (F) คาปาซิเตอร์จะทำงานเป็นตัวที่คอยเก็บประจุไฟฟ้า

และศักย์ไฟฟ้าไว้ในตัวโดยอาศัยความสามารถในการประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ว่าศักย์ไฟฟ้าต่างกัน และดูดกัน เมื่อนำแผ่นโลหะบางสองแผ่นวางใกล้กัน พร้อมจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองต่างศักย์กัน จะเกิดแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองแผ่นโลหะดึงดูดกัน การดึงดูดของศักย์ไฟฟ้าจากแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นยังคงมีต่อเนื่องถึงแม้จะจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองแผ่น เรียกแผ่นโลหะทั้งสองที่อยู่ใกล้กันว่าคาปาซิเตอร์ แผ่นโลหะอาจเรียกว่าแผ่นตัวนำ (Conductive Plate) วางขนานชิดกันมีฉนวนไฟฟ้าเรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระจก ไม้อัด เซรามิก หรืออากาศ วางชั้นกลางแผ่นโลหะทั้งสองแผ่น แผ่นโลหะทั้งสองมีลวดตัวนำติดไว้แผ่นละเส้นใช้เป็นขั้วต่อใช้งาน คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญและสามารถพบได้ทุกวงจร เช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรให้ผ่านสัญญาณ (By-pass Filter) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) เป็นต้น คาปาซิเตอร์เรียกตามสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กทริก เช่น ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก มีแผ่นไดอิเล็กทริกเป็นเซรามิก เป็นต้น โครงสร้างของตัวเก็บประจุแสดงดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ตัวเก็บประจุแผ่นเพลทแบบขนาน

ที่มา : Yaovalit, 2556

การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าสามารถหาได้จากแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่น มีไดอิเล็กทริกชั้นกลางอยู่ คำนวณจากสมการของตัวเก็บประจุแผ่นเพลทแบบขนานได้ดังสมการ (2.29)

$$C = (\epsilon_0 \epsilon_r A) / d \quad (2.29)$$

เมื่อ

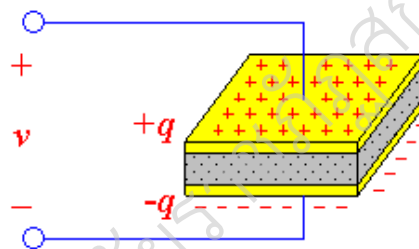
ϵ_0 คือ ค่า Permittivity of free space เท่ากับ 8.85 พิโกฟารัดต่อเมตร (pF/m)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

A คือ พื้นที่โลหะ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (mm^2)

d คือ ระยะห่างน้อยที่สุดของช่องว่างมีหน่วยเป็นเมตร (m)

ตัวเก็บประจุถูกจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดแรงดัน ทำให้ประจุขั้วตรงข้ามบนแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่น จากภาพประกอบ 31 สถานะตัวเก็บประจุสะสมพลังงานรูปประจุ (V)



ภาพประกอบ 31 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุ

ที่มา : ตัวเก็บประจุ, 2566

การเก็บประจุ เกิดขึ้นเมื่อมีการเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่เพลตของตัวเก็บประจุ เมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปรวมกันที่แผ่นเพลตทำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไปผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมีประจุเป็นบวกและลบปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูกผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไรแผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น

การคายประจุ ถ้าไม่นำขั้วของตัวเก็บประจุมาต่อกันอิเล็กตรอนยังคงอยู่ที่แผ่นตัวนำ ถ้าครบวงจรระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง อิเล็กตรอนจะวิ่งจากแผ่นตัวนำทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นตัวนำด้านบวกเรียกว่า “การคายประจุ”

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บประจุ ค่าความจุตัวเก็บประจุจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวแปร คือ

1.1 พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลท เขียนแทนด้วย A ถ้า พื้นที่หน้าตัดมากแสดงว่าสามารถเก็บประจุได้มาก ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยแสดงว่าเก็บประจุได้น้อย เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้น จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขนาดเล็กและขนาดใหญ่จำนวนมากตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มากเพราะมีพื้นที่หน้าตัดมากนั่นเอง

1.2 ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสอง เขียนแทนด้วย d ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ ใกล้กัน ความจุจะมีค่ามาก ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไกลกันความจุจะมีค่าน้อย

1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เขียนแทนด้วย ϵ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถ ในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลท ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละตัว จะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กตริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน ค่าความจุและอัตราทนแรงดันอาจแตกต่างกันออกไป สุญญากาศเป็น ไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น การจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปอาจทำให้ไดอิเล็กตริกสูญเสียสภาพ จากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้

2. ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) หมายถึง ความสามารถในการเก็บประจุของตัวนำไฟฟ้า หรือปริมาณประจุไฟฟ้า ที่ทำให้ตัวนำมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 หน่วย ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้ามากแสดงว่าต้องใช้ประจุไฟฟ้าจำนวนมากในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้าน้อย ศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ปริมาณของประจุแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า (V) และแปรผันตามพื้นที่ (A) ของแผ่นโลหะตัวนำที่ขนานกัน โดยแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน (d) ในกรณีที่ เป็นช่องว่างอากาศ (ϵ_0) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (F/m) และกรณีที่ เป็นไดอิเล็กตริก (ϵ) มีค่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าประจุแผ่นตัวนำแผ่นใดแผ่นหนึ่งต่อค่าแรงดันตกคร่อมแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่น ความจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F) สมการของค่าความจุ ดังสมการ (2.30)

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.30)$$

เมื่อ

Q คือ จำนวนประจุไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

V คือ ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็น คูลอมบ์/โวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

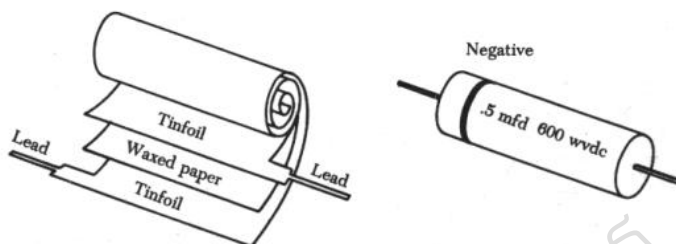
1 ไมโครฟารัดเท่ากับหนึ่งในล้านของฟารัด (1 ไมโครฟารัด เท่ากับ 0.000001 ฟารัด) ใช้สัญลักษณ์ “ μF ” (Microfarad) และหนึ่งในพิโคฟารัดเท่ากับหนึ่งในล้านของหน่วยไมโครฟารัด (1 พิโคฟารัด เท่ากับ 0.000,001 μF) ใช้สัญลักษณ์ “pF” (pico Farad)

3. การแบ่งชนิดตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีมากมาย สามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุตามลักษณะทางโครงสร้างหรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริก การแบ่งโดยใช้สารไดอิเล็กตริกเป็นวิธีการที่ค่อนข้างละเอียดเพราะว่าค่าไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุตัวนั้น ๆ ว่าจะนำไปใช้งานใน ลักษณะใด ทนแรงดันเท่าใด แต่ถ้าหากแบ่งตามระบบเก็บสามารถแบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) และตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) รายละเอียด ดังนี้

3.1 ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งค่าตัวเก็บประจุ จะแสดงค่าคงที่ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด (μF) แผ่นเพลทตัวนำเป็นโลหะและมีไดอิเล็กตริกประเภท ไมก้า เซรามิก อิเล็กโตรไลติกคั่นกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก (Electrolytic) ชนิดเซรามิก (Ceramic) ชนิดไมก้า (Mica) เป็นต้น ซึ่งตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่แบ่งได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่

3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ (Paper Capacitor) ตัวเก็บประจุจะใช้กระดาษชุบไขหรือน้ำมัน (Oil) เป็นฉนวนไดอิเล็กตริก โครงสร้างของตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่น ที่เป็นติบูกบาง ๆ คั่นกลางด้วยกระดาษชุบไขแล้วม้วนเป็นท่อนกลมจากแผ่นตัวนำทั้งสองแต่ละข้างต่อขาเป็นลวดตัวนำใช้งาน ตัวเก็บประจุจะห่อหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น พลาสติกกระดาษแข็ง กระเบื้อง กระดาษอาบน้ำมัน เพื่อไม่ให้เกิดความชื้นและฝุ่นละออง ตัวเก็บประจุชนิดกระดาษมีค่าความจุไม่สูงมาก ซึ่งจะมีการเขียนบอกไว้ที่ด้านข้างของตัวเก็บประจุ คือ ระหว่าง 10 พิโกฟารัด (pF)

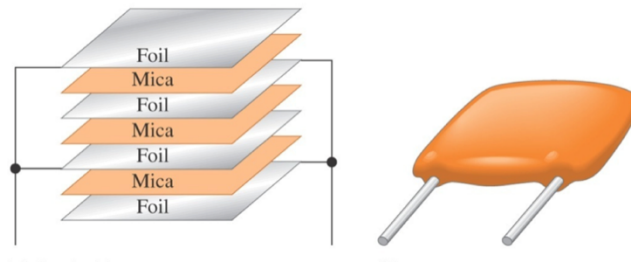
ถึง 10 ไมโครฟารัด (μF) อัตราทนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 150 โวลต์จนถึงหลายพันโวลต์ นิยมใช้ใน วงจรจ่ายกำลังไฟสูง



ภาพประกอบ 32 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

ที่มา : CAPACITANCE, n.d.

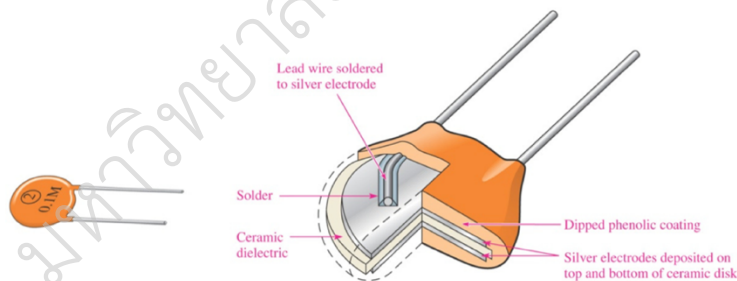
3.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า (Mica Capacitor) ใช้แผ่นไมก้าเป็นฉนวนไดอิเล็กทริก ตัวเก็บประจุชนิดนี้ถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพราะแผ่นไมก้ามีคุณสมบัติที่แข็งและกรอบ โครงสร้าง ประกอบด้วยแผ่นเพลตโลหะบาง อาจใช้หลายแผ่นวางซ้อนทับกันแต่จะต้องคั่นด้วยฉนวนไมก้า ซึ่งตัวเก็บประจุถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนจำพวกเมกกาไลต์เพื่อป้องกันการชำรุด และการสึกหรอ โดย ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีขนาดเล็ก รูปร่างเป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยมคล้ายกับแบบไมลาร์ จะมีค่าความจุ ตั้งแต่ 10 พิโกฟารัด (pF) ถึง 10 ไมโครฟารัด (μF) อัตราทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงประมาณ 150 โวลต์ จนถึงหลายพันโวลต์ โดยผู้ผลิตจะพิมพ์บอกค่าความจุ อัตราทนแรงไฟและค่าความคลาดเคลื่อนไว้ที่ บนตัวเก็บประจุหรือใช้สีแต้มเป็นโค้ดที่ตัวเก็บประจุ มีค่าความผิดพลาดน้อยมาก การใช้งานนิยมใช้ งานในวงจรความถี่วิทยุ (RF) วงจรแรงดันไฟสูง ตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงจัดเป็นตัวเก็บประจุนับว่าเกรดพรีเมียมที่มีราคาสูง



ภาพประกอบ 33 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ที่มา : Tomas L. & Floyd, 2004

3.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก (Ceramic Capacitor) ใช้ไดอิเล็กทริกฉนวนจำพวกกระเบื้องหรือเรียกว่า “เซรามิก” โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกมีรูปร่างแบบแผ่นกลม (Disc) และรูปทรงกระบอก (Tubular) มีค่าความจุไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด (μF) อัตราทนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 500 โวลต์ (V) ใช้กันทั่วไปอย่างแพร่หลายในวงจรแทบทุกชนิด มีราคาถูกใช้เป็นวงจรรองความถี่ วงจรวิทยุ ข้อเสียของตัวเก็บประจุเซรามิก คือ มีการสูญเสียมาก

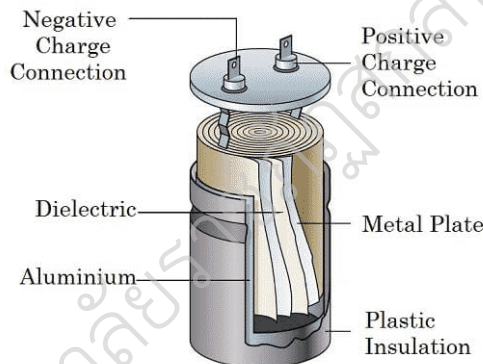


ภาพประกอบ 34 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ที่มา : Tomas L. & Floyd, 2004

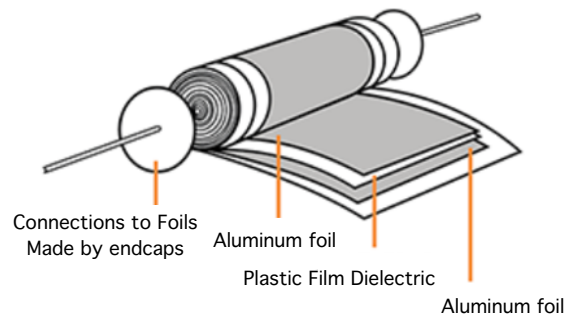
3.1.4 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นโลหะที่ทำเป็นขั้วบวก จุ่มอยู่ตรงกลางของน้ำยาเคมีหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมี 2 แบบ คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวชั้นเรียกว่าชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบเปียก (Wet electrolytic Capacitor) และสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความ

เข้มข้นมากคล้ายแป้งเปียกมาทำตัวคาปาซิเตอร์ชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบแห้ง (Dry Electrolytic Capacitor) มีขั้วบวกและขั้วลบ มีรูปร่างหลายขนาดขึ้นอยู่กับค่าความจุและอัตราการทนแรงดันไฟฟ้า ใช้ทำหน้าที่ต่าง ๆ เช่น การฟิเตอร์ การคัปปลิง การบายพาส เป็นต้น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ นิยมใช้ในวงจรฟิเตอร์ หรือ คัปปลิง มีค่าตั้งแต่ 0.1 ไมโครฟารัด (μF) จนถึง 100,000 ไมโครฟารัด (μF) ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่ามากจะเก็บประจุได้มาก ใช้เวลาในการเก็บนาน ส่วนตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าน้อยจะเก็บประจุได้น้อยใช้เวลาในการเก็บเร็ว ตัวเก็บประจุประเภทนี้ที่ตัวถังมักมีสัญลักษณ์ที่บอกขั้ว เครื่องหมายลบหมายถึงขั้วลบ หรือสังเกตขาของตัวเก็บประจุ ขาลบจะมีขาสั้นกว่า



ภาพประกอบ 35 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์
ที่มา : Electrolytic Capacitor, n.d.

3.1.5 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม (Film Capacitor) ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมาก แต่จะใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจาก โพลีเอสเตอร์ (Polyester) หรือไมลาร์ (Mylar), โพลีโพรไพลีน (Polypropylene) โพลีสไตรีน (Polystyrene), โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) และอื่น ๆ โดยนำมาคันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นแล้วพับให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งจะมีชื่อเรียกต่างกันตามชนิดของสารไดอิเล็กตริก



ภาพประกอบ 36 โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ที่มา : Jeffrey Jenkin, 2018.

3.1.5.1 ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ (Mylar Capacitor) หรือรู้จักกันในชื่อ MKT เป็นตัวเก็บประจุที่นิยมใช้มากเพราะมีเสถียรภาพสูง กระแสรั่วต่ำ มีค่าความจุอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 100 ไมโครฟารัด (μF)



ภาพประกอบ 37 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบไมลาร์

ที่มา : Nilamaara Electronics, n.d.

3.1.5.2 ตัวเก็บประจุโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate Capacitor) หรือรู้จักกันในชื่อ MKC เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กทริกชนิดฟิล์มแบบโลหะ มีเสถียรภาพสูง มีค่าความจุอยู่ระหว่าง 0.01 ไมโครฟารัด (μF) ถึง 10 ไมโครฟารัด (μF)



ภาพประกอบ 38 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีคาร์บอเนต

ที่มา : Jameco, n.d.

3.1.5.3 ตัวเก็บประจุโพลีโพรไพลีน (Polypropylene Capacitor) หรือรู้จักกันในชื่อ MKP เป็นตัวเก็บประจุที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิดโพลีเอสเตอร์ และถ้านำไปใช้กับไฟกระแสไฟฟ้าสลับ มีคุณสมบัติคล้ายกับชนิดโพลีสไตรีน ชนิดฟิล์มฟอยล์ จะมีค่าความจุอยู่ระหว่าง 47 พิโกฟารัด (pF) ถึง 0.022 ไมโครฟารัด (μF)



ภาพประกอบ 39 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรไพลีน

ที่มา : AUDIOPHONE, n.d.

3.1.5.4 ตัวเก็บประจุโพลีสไตรีน (Polystyrene Capacitor) (ใช้อักษรย่อ MKS) เป็นตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับชนิด โพลีโพรไพลีน แต่จะมีประสิทธิภาพทางปริมาตรต่ำกว่า มีค่าความจุอยู่ระหว่าง 47 พิโกฟารัด (pF) ถึง 0.039 ไมโครฟารัด (μF)



ภาพประกอบ 40 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน

ที่มา : Electronicsnote, n.d.

3.1.6 ฟีดทรูคาปาซิเตอร์ (Feedthrough Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้เกี่ยวกับคลื่นวิทยุ เช่น การกรองความถี่รบกวนของวิทยุดีตรอนต์หรือพบในจูนเนอร์ของเครื่องรับโทรทัศน์ โครงสร้างเป็นแท่งทรงกลมมีแกนโลหะอยู่ตรงกลาง มีขาต่อใช้งาน 2 ขา หรือขาเดียวก็ได้ โครงสร้างภายนอกจะถูกต่อลงกราวด์



ภาพประกอบ 41 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบฟีดทรู

ที่มา : Xuansn Capacitor, n.d.

3.1.7 ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม (Tantalum Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งใช้สารแทนทาลัม ทำเป็นขั้วบวกแทนแผ่นอลูมิเนียม มีคุณสมบัติการรั่วของกระแสต่ำ คุณสมบัติทางความถี่ คุณสมบัติทางอุณหภูมิดีกว่า นิยมใช้กับวงจรกำลังสัญญาณรบกวน วงจรขับปลั๊ก วงจรฟิลเตอร์และอื่น ๆ มักจะมีราคาสูง มีด้วยกัน 3 แบบ คือ แบบ Wet Foil แบบ Wet Slug และแบบ Dry slug สำหรับแบบ Wet Slug จะใช้กรดอิเล็กโทรไลต์ ทำให้มี

ประสิทธิภาพสูง เมื่อเทียบกับแบบwet foil ค่าความจุของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด (μF) ถึง 1,000 ไมโครฟารัด (μF) อัตราทนแรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ถึง 120 โวลต์ DC แต่ค่าความจุที่มีขายในท้องตลาดจะมีค่า 0.1 ไมโครฟารัด (μF) ถึง 100 ไมโครฟารัด (μF)

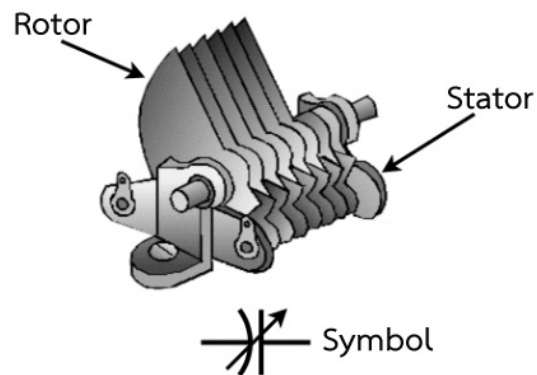


ภาพประกอบ 42 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

ที่มา : RS, n.d.

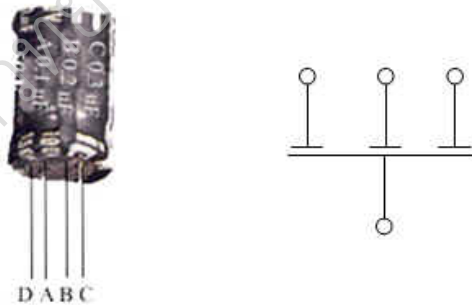
3.2 ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ (Variable Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่มีค่าคงที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ โดยมีไดอิเล็กทริกหลายชนิดด้วยกัน คือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โดยทั่วไปจะมีค่าความจุไม่มากนัก ไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด (μF)

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ ทริมเมอร์และแพดเดอร์ (Trimmer and Padder) โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ในกรณีที่ต้องการปรับค่าความจุ ให้ใช้ไขควงหมุนสลักตรงกลางค่าที่ปรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 พิโกฟารัด (pF) ถึง 20 พิโกฟารัด (pF) การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบนี้ว่าทริมเมอร์หรือแพดเดอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่า จะนำไปต่อในลักษณะใด ถ้านำไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวอื่นจะเรียกว่า ทริมเมอร์ แต่ถ้านำไปต่ออนุกรมจะเรียกว่าแพดเดอร์



ภาพประกอบ 43 ลักษณะของโครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้
ที่มา : Polytechnic Hup, 2017

3.3 ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) ตัวเก็บประจุมีตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่า เหมือนนำตัวเก็บประจุหลายตัวมารวมอยู่ในตัวถังเดียวกัน มีขั้วให้เลือกใช้งานที่ค่าต่าง ๆ กันส่วนมากจะมีขั้วลบร่วมกัน เลือกใช้ค่าที่ขั้วบวกหรือถ้าแบบไม่มีขั้วให้เลือกค่าอย่างเดียว



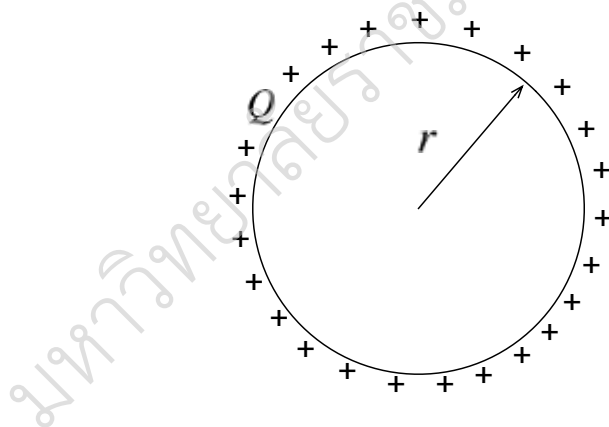
ภาพประกอบ 44 ลักษณะของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้
ที่มา : คาปาซิเตอร์ (Capacitor), n.d.

4. ลักษณะของตัวเก็บประจุ

ลักษณะโดยทั่วไปของตัวเก็บประจุมี 2 ลักษณะได้แก่ตัวนำทรงกลมและชนิดแผ่นตัวนำขนาน รายละเอียด ดังนี้

4.1 ตัวนำทรงกลม ความจุไฟฟ้าของวัตถุตัวนำทรงกลมจะแปรผันตรงกับรัศมีของตัวนำทรงกลม ดังนั้นตัวนำทรงกลมขนาดใหญ่จะมีความจุไฟฟ้ามากกว่าทรงกลมขนาดเล็ก ตัวนำทรงกลมสามารถแบ่งเป็นความจุไฟฟ้าตัวเก็บประจุทรงกลมลูกเดียวและความจุไฟฟ้าทรงกลมซ้อนกัน โดยตัวนำทรงกลมด้านนอกต่อลงดิน

4.1.1 ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดทรงกลมลูกเดียว ตัวนำทรงกลมลูกเดียวเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่ง สามารถเก็บประจุไว้ที่บริเวณผิวทรงกลม ความจุของวัตถุตัวนำทรงกลมจะแปรผันตรงกับรัศมีตัวนำทรงกลมนั้น ดังนั้นตัวนำทรงกลมขนาดใหญ่จะมีความจุไฟฟ้ามากกว่าทรงกลมที่มีขนาดเล็ก ตัวนำทรงกลมรัศมี (r) เมื่อทำให้ทรงกลมมีประจุไฟฟ้า (Q) ปรากฏว่าทำให้ทรงกลมมีศักย์ไฟฟ้า (V)



ภาพประกอบ 45 ตัวเก็บประจุชนิดทรงกลมลูกเดียว

ที่มา : worawut, 2016

ค่าความจุไฟฟ้าวัตถุตัวนำทรงกลม สามารถหาได้จาก

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้า} \quad C = \frac{Q}{V} \quad (2.31)$$

$$\text{ค่าศักย์ไฟฟ้าของทรงกลม} \quad V = \frac{KQ}{r} \quad (2.32)$$

$$\text{แทนค่าศักย์ไฟฟ้าในสมการ} \quad V = \frac{Q}{\frac{KQ}{r}} \quad (2.33)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้สมการความจุไฟฟ้าทรงกลม} \quad C = \frac{K}{r} \quad (2.34)$$

เมื่อ

Q คือ ประจุบนผิวทรงกลมตัวนำ

V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมตัวนำ

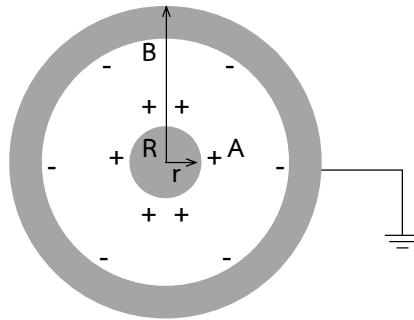
r คือ รัศมีของตัวนำทรงกลม มีหน่วยเป็นเมตร (m)

K คือ $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$; ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$) ซึ่ง $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าตัวนำทรงกลม มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

เมื่อแทนค่ารัศมี a ในหน่วยเมตร จะได้สมการความจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัด (F) และ K เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความจุ (C) แปรผันตรงกับรัศมีของวงกลม (r) เช่นทรงกลมลูกใหญ่รัศมีเป็น 2 เท่าของทรงกลมลูกเล็ก สรุปได้ว่าทรงกลมลูกใหญ่มีความจุไฟฟ้าเป็น 2 เท่า ของทรงกลมลูกเล็ก

4.1.2 ความจุไฟฟ้าของตัวนำทรงกลมซ้อนกัน โดยที่ตัวนำทรงกลมด้านนอกต่อลงดิน เมื่อพิจารณาทรงกลมสองลูก A และ B มีรัศมี r, R ตามลำดับ เมื่อวางทรงกลม A ลงในทรงกลม B โดยให้จุดกลางร่วมกันแล้วให้ประจุ $+Q$ แก่ทรงกลม A ซึ่งเกิดประจุเหนี่ยวนำ $-Q$ v ที่ผิวในของทรงกลม B และประจุ $+Q$ ที่ผิวนอกของทรงกลม B จากนั้นต่อสายดินกับผิวนอกของทรงกลม B ประจุที่ผิวนอกจะหมดไปเหลือแต่ประจุ $-Q$ ที่ผิวในของทรงกลม B



ภาพประกอบ 46 ตัวนำทรงกลมซ้อนกันและด้านนอกต่อลงดิน

ที่มา : <https://shorturl.asia/fDrYh>

สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าของทรงกลมลูกใน ได้จากสมการ

$$V = \frac{KQ}{r} \left(-\frac{KQ}{r} \right) \quad (2.35)$$

$$= KQ \left(-\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (2.36)$$

$$= \frac{KQ(R-r)}{Rr} \quad (2.37)$$

สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าของทรงกลมลูกนอกได้จาก สมการ

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.38)$$

$$= \frac{Q(Rr)}{Kr(R-r)} \quad (2.39)$$

$$= \frac{Kr}{K(R-r)} \quad (2.40)$$

ดังนั้นสมการคำนวณค่าความจุของตัวนำทรงกลมซ้อนกัน คือ

$$C = \frac{Rr}{K(R-r)} \quad (2.41)$$

เมื่อ

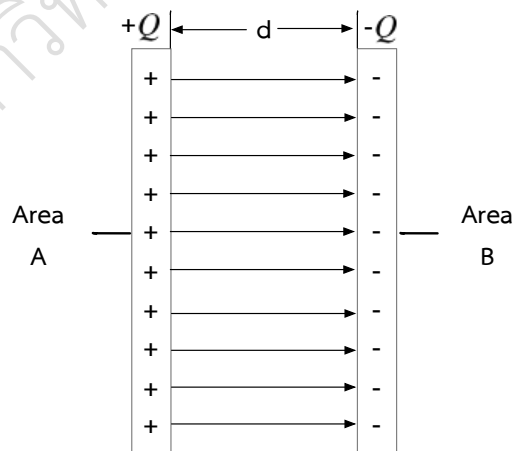
C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำทรงกลมซ้อนกัน หน่วยเป็นฟารัด (F)

R คือ ระยะจากศูนย์กลางถึงผิวในทรงกลมลูกนอก หน่วยเป็นเมตร (m)

r คือ ระยะจากศูนย์กลางถึงผิวนอกทรงกลมลูกใน หน่วยเป็นเมตร (m)

K คือ $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$; ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$) ซึ่ง $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$)

4.2 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำขนาน ความจุไฟฟ้าตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำขนาน (Parallel-plate Capacitor) ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำขนานกัน ในทางปฏิบัติ สามารถสร้างตัวเก็บประจุฟ้าขึ้นได้โดยใช้แผ่นโลหะ 2 แผ่น วางขนานกันแล้วคั่นด้วยฉนวนไฟฟ้า แผ่นตัวนำขนานกัน 2 แผ่นจะสามารถเป็นตัวเก็บประจุได้อีกชนิดหนึ่ง สามารถคำนวณความจุไฟฟ้าได้ แสดงดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำคู่ขนาน

ที่มา : BrainKart.com, 2018

เมื่อนำไปใช้งานโดยต่อเข้ากับความต่างศักย์ค่าหนึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ ทำให้แผ่นโลหะข้างหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ส่วนอีกแผ่นจะมีประจุไฟฟ้าลบ และความสามารถในการเก็บประจุมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ของแผ่นโลหะ ค่าของอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้า (Q) ต่อความต่างศักย์ (V) เรียกว่า “ความจุไฟฟ้า (C)” มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ ค่าความจุของทรงกลมโลหะสองลูกซ้อนกัน สามารถหาความจุได้จากสมการ $C = \frac{Kr}{K(R-r)}$ ถ้าพิจารณาทรงกลมทั้งสองมีขนาดใหญ่มากถือว่า $R^2 \approx r$ คือ ผิวนอกของลูกด้านในใกล้ชิดกับผิวในของลูกด้านนอกมากแล้วระยะ ($R-r$) คือ ระยะห่างระหว่างผิวทรงกลมทั้งสอง ในที่นี้สมมติให้ $R-r = d$ ดังนั้นสามารถหาความจุของตัวเก็บประจุแผ่นโลหะขนานได้จากสมการ

เมื่อ $r^2 \approx r \therefore Rr^2$ และ $R-r = d$

ดังนั้น พื้นที่ผิวทรงกลม $4\pi r^2$ มีความจุ $\frac{r^2}{Kd}$

ถ้าพื้นที่ผิวทรงกลม A จะมีความจุ $\frac{r^2}{Kd} \times \frac{A}{4\pi r^2} = \frac{A}{4\pi Kd}$

การหาค่าความจุตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน คือ

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} = \frac{A}{4\pi Kd} \quad (2.42)$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน

A คือ พื้นที่บนแผ่นโลหะแผ่นหนึ่งหรือเป็นพื้นที่ส่วนที่ซ้อนกัน

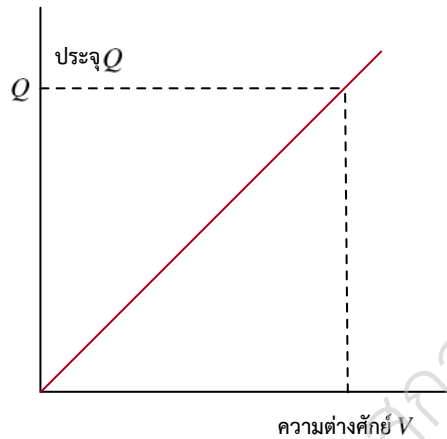
มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง มีหน่วยเป็นเมตร (m)

K คือ $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$; ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$) ซึ่ง $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$)

5. พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ เมื่อต่อความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปลายทั้งสองของตัวเก็บประจุ พบว่าช่วงแรกตัวเก็บประจุยังไม่มีประจุ เมื่อตัวเก็บประจุมีค่าประจุเพิ่มขึ้นจากศูนย์

ถึง Q ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองจะเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึง V เมื่อประจุ Q และความต่างศักย์ V สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังภาพประกอบ 2.46



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุ Q บนตัวเก็บประจุ
กับความต่างศักย์ V ที่ต่อกับตัวเก็บประจุ
ที่มา : worawut, 2016

เมื่อตัวเก็บประจุเริ่มเก็บประจุ จากเดิมที่ไม่มีประจุจนกระทั่งมีประจุ Q ความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับความต่างศักย์ V เป็นตามเส้นกราฟดังแสดงในภาพประกอบ 2.46 พิจารณาตัวเก็บประจุ ความต่างศักย์ระหว่างปลายของตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึง V เมื่อตัวเก็บประจุ มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึง Q โดยที่ V และ Q จะแปรผันตรงกับเส้นกราฟ กรณีนี้งาน (W) การเคลื่อนประจุผ่านจุดสองจุดมีความต่างศักย์ V มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของประจุคูณความต่างศักย์ ถ้า W คือ งานที่ทำ จะได้สมการ (2.43)

$$W = \frac{1}{2} QV \quad (2.43)$$

งาน (W) คือ การเคลื่อนประจุให้กับตัวเก็บประจุ เท่ากับพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง V และ Q ถ้าให้พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ คือ U ดังนั้น

$$U = \frac{1}{2} QV \quad (2.44)$$

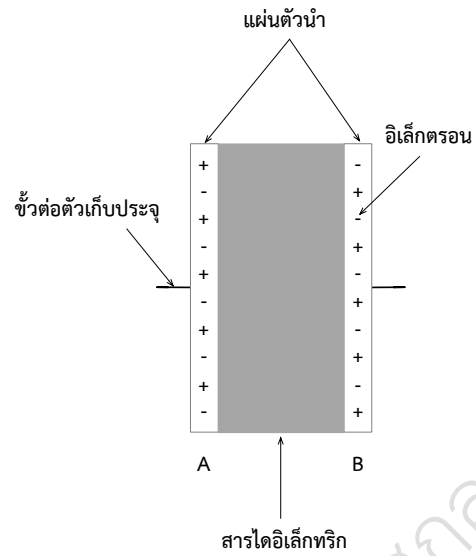
แทนค่า $Q = CV$ และ $V = \frac{Q}{C}$ (2.45)

จะได้ $U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C}$ (2.46)

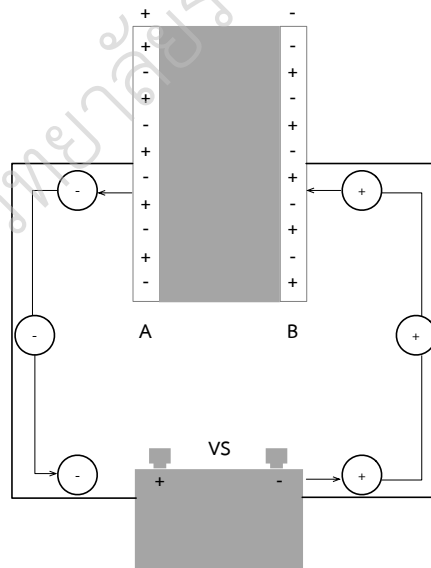
เมื่อ U คือ พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นจูล (J)

6. การทำงานของตัวเก็บประจุ มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ เก็บประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) พลังงานไฟฟ้าสะสมที่เกิดขึ้นในตัวเก็บประจุจะเกิดจากการสะสมประจุที่แผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ ภาพประกอบ 49 การเก็บสะสมประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ภาพประกอบ 49 (ก) ที่แผ่นตัวนำทั้งสองของตัวเก็บประจุที่ไม่ได้ผ่านการเก็บประจุจะมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า คือ จำนวนประจุบวกและประจุลบจะมีปริมาณที่เท่ากัน คือ ผลรวมของประจุบนแผ่นตัวนำทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อจ่ายแรงดันให้ตัวเก็บประจุ ภาพประกอบ 49 (ข) อิเล็กตรอนจะถูกเคลื่อนย้ายออกจากแผ่นตัวนำ A ด้วยแรงดึงดูดจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายผ่านแหล่งจ่ายไปยังแผ่นตัวนำ B แรงผลักรจากขั้วลบของแหล่งจ่ายนี้ตัวเก็บประจุกำลังถูกอัดประจุ อิเล็กตรอนที่แผ่นตัวนำ A จะลดจำนวนลง ซึ่งจะทำให้ประจุไฟฟ้ารวมที่แผ่นตัวนำ A มีค่าเป็นบวกมากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำ B ในขณะที่อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายจะไปสะสมที่แผ่นตัวนำ B ทำให้ประจุไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำ B มีค่าลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำ A พบว่าไม่มีประจุใดเคลื่อนที่ผ่านสารไดอิเล็กทริก เพราะสารไดอิเล็กทริกไม่นำไฟฟ้าผลต่างของประจุบวกและประจุลบระหว่างแผ่นตัวนำ A และแผ่นตัวนำ B จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่อิเล็กตรอนยังถูกเคลื่อนจากแผ่นตัวนำ A ไปยังแผ่นตัวนำ B อิเล็กตรอนหยุดการเคลื่อนที่เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (หรือตกคร่อมแผ่นตัวนำทั้งสอง) มีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย ภาพประกอบ 49 (ค) ถ้าถอดตัวเก็บประจุจากแหล่งจ่าย ภาพประกอบ 2.47 (ง)

ตัวเก็บประจุนั้นมีประจุไฟฟ้าเก็บสะสมอยู่เป็นระยะเวลาหนึ่ง (ขึ้นอยู่กับชนิดตัวเก็บประจุ) และตัวเก็บประจุจะยังคงมีแรงดันตกคร่อมตัวเอง อาจกล่าวได้ว่าขณะนี้ตัวเก็บประจุจะกลายเป็นแบตเตอรี่ไปชั่วขณะ



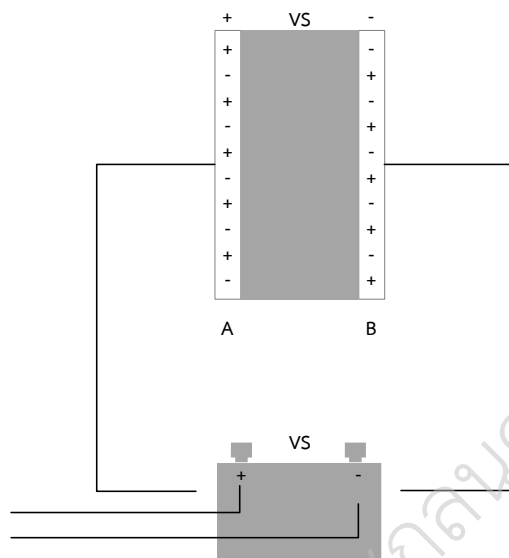
(ก) ตัวเก็บประจุในสภาวะปกติ



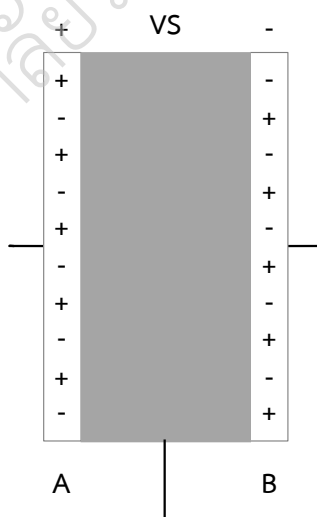
(ข) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในขณะทำการเก็บประจุ

ภาพประกอบ 49 การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

ที่มา : <https://shorturl.asia/x8kS5>



(ค) อิเล็กตรอนหยุดไหลเมื่อประจุเต็ม

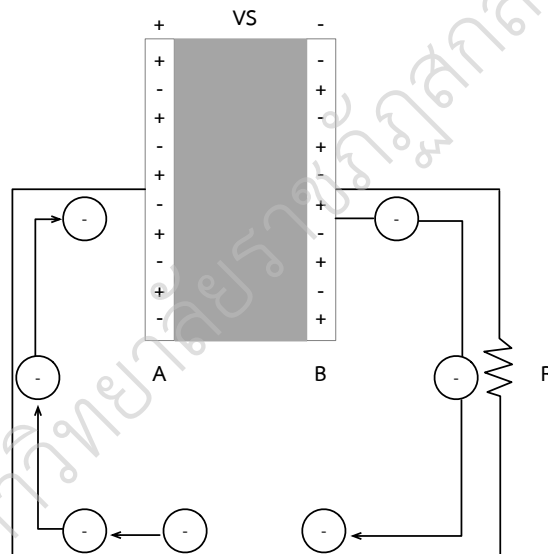


(ง) ศักย์ไฟฟ้าของแผ่นตัวนำหลังจากการเก็บประจุ

ภาพประกอบ 49 (ต่อ) การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

ที่มา : <https://shorturl.asia/x8kS5>

การคายประจุของตัวเก็บประจุ เมื่อนำตัวเก็บประจุที่มีประจุสะสมอยู่มาต่อกับตัวต้านทาน ตามภาพประกอบ 50 ประจุลบของแผ่นตัวนำ (B) จะผลักกันทำให้อิเล็กตรอนนอกแผ่นตัวนำ (B) ไหลผ่านโหลด (Load) (R) รวมตัวกับประจุบวกในแผ่นตัวนำ (A) โดยธรรมชาติของประจุ ประจุที่เหมือนกันจะผลักกันส่วนประจุที่ต่างกันจะดูดกัน การเปรียบตัวเก็บประจุเป็นเหมือนแบตเตอรี่จ่ายไฟโหลดด้วยประจุไฟฟ้าที่สะสม การคายประจุสิ้นสุดลงเมื่อแผ่นตัวนำทั้งสองมีศักย์เป็นกลางทางไฟฟ้า คือ ไม่แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ขาต่อของแผ่นตัวนำทั้งสอง อิเล็กตรอนจึงหยุดไหล การไหลของอิเล็กตรอนในวงจรมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเก็บประจุ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การคายประจุ (Discharge)”



ภาพประกอบ 50 การคายประจุของตัวเก็บประจุ

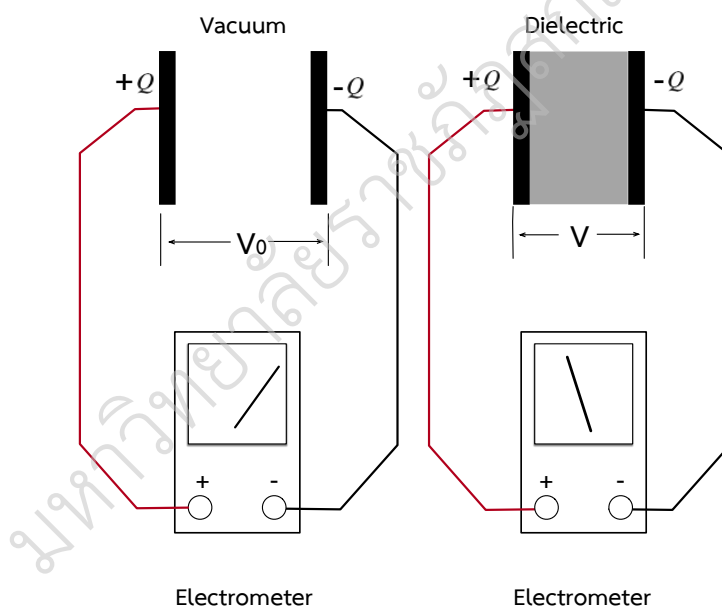
ที่มา : <https://shorturl.asia/4b5Ql>

7. ไดอิเล็กทริก (Dielectric) คือ สารหรือวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่นยาง (Rubber) แก้ว (Glass) กระดาษไข (Stencil Paper) พาราฟิน (Paraffin) เทฟลอน (Teflon) เมื่อทำการพิจารณาคาร์ปาซิเตอร์แบบแผ่นขนาน ซึ่งกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน คือ อากาศหรือช่องว่างมีค่าสภาวะยอม (Relative Permittivity : ϵ_0) มีค่าความจุเริ่มต้นเป็น C_0 เมื่อเติมสารไดอิเล็กทริกที่มีค่า

สภาวะยอม ϵ_0 เข้าไปแทนที่ว่างทำให้คาปาซิเตอร์นั้นมีค่าความจุเพิ่มขึ้น สมมติว่าเป็น C เรียกอัตราส่วนของค่าความจุใหม่ขณะมีสารไดอิเล็กทริกเทียบกับค่าความจุเดิม ขณะไม่มีสารไดอิเล็กทริกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก”

$$K = \frac{C}{C_0} \quad (2.47)$$

คาปาซิเตอร์แบบแผ่นขนานมีสารไดอิเล็กทริก (ก) ขณะที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริก (ข)
 คั่นกลาง แสดงดังภาพประกอบ 51



(ก) ก่อนใส่สารไดอิเล็กทริก

(ข) หลังใส่สารไดอิเล็กทริก

ภาพประกอบ 51 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานขณะมีสารไดอิเล็กทริกและไม่มีสารไดอิเล็กทริก

เมื่อ

A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำขนาน

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน

Q คือ ประจุบนแผ่นตัวนำทั้งสอง

E_0 คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์เมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์เมื่อมีสารไดอิเล็กทริก

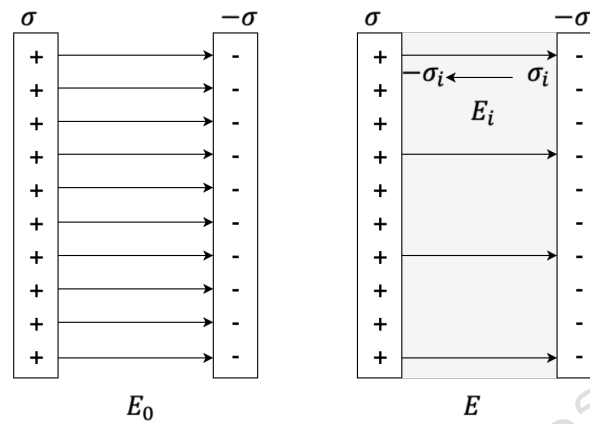
V_0 คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก

V คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานเมื่อมีสารไดอิเล็กทริก

เมื่อเติมสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นตัวนำขนานพบว่าความจุของคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้น ($C > C_0$) ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานจะมีขนาดลดลง ($V < V_0$) ขณะที่ Q นั้นคงที่ และสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำขนานทั้งสองค่าลดลง ($E < E_0$) ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\left(K = \frac{C}{C_0} = \frac{Q/V}{Q/V_0} = \frac{V_0}{V} = \frac{E_0 d}{Ed} = \frac{E_0}{E} \right) \quad (2.48)$$

ขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำขนานของคาปาซิเตอร์ลดลง แสดงว่าความหนาแน่นของประจุเชิงผิว (Surface Charge) ลดลง แต่เนื่องจากประจุบนผิวตัวนำแต่ละแผ่น (Q) ไม่เปลี่ยนแปลงการชี้ให้เห็นว่าต้องมีประจุเหนี่ยวนำ (Induced Charge) อยู่ผิวของสารไดอิเล็กทริก โดยประจุเหนี่ยวนำจะเป็นประจุชนิดตรงกันข้ามกับประจุบนผิว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “โพลาไรเซชัน” (Polarization) แสดงดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 สนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

ที่มา : จูติมา เอ็งเจริญ, 2554

เมื่อ

E คือ ความหนาแน่นประจุเชิงผิวของแผ่นตัวนำ

σ_i คือ ความหนาแน่นประจุเหนี่ยวนำบนผิวของไดอิเล็กทริก

E_i คือ สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุเหนี่ยวนำ

ความหนาแน่นประจุเชิงผิวของคาปาซิเตอร์ที่มีไดอิเล็กทริกบรรจุ หาได้จาก

$$\sigma_{net} = \sigma - \sigma_{it} \quad (2.49)$$

กำหนดให้

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.50)$$

$$E = \frac{\sigma_{net}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} \quad (2.51)$$

จากสมการ (2.33) จะแสดงค่าคงที่ไดโพลีทริกในทอมความหนาแน่นประจุ ดังนี้

$$K = \frac{E_0}{E} = \frac{\sigma}{\sigma - \sigma_t} \quad (2.52)$$

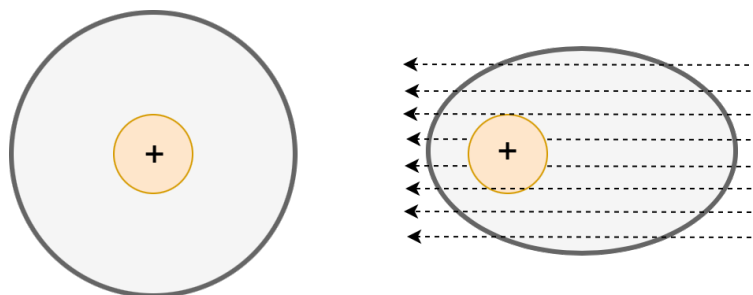
หรือ
$$\sigma_t = \sigma \left[1 - \frac{1}{K} \right] \quad (2.53)$$

เมื่อ $\varepsilon = K\varepsilon_0$ เป็นสภาพยอมของสารไดโพลีทริก พบว่า

$$E = \frac{\sigma_{net}}{\sigma_0} = \frac{\sigma = \sigma_i}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{K\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (2.54)$$

และ
$$C = KC_0 = K\varepsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (2.55)$$

สารไดโพลีทริกมี 2 ชนิด คือ แบบมีขั้วและแบบไม่มีขั้ว กรณีของสารมีขั้วจุดศูนย์กลางมวลของอิเล็กตรอนและนิวเคลียสจะไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้โมเมนต์ของสารจะมีไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าถาวร (Permanent Dipole Moment) แม้ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก สารไดโพลีทริกแบบไม่มีขั้ว ขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กตรอนจะกระจายรอบนิวเคลียสอย่างสมมาตร คือ จุดศูนย์กลางมวลของนิวเคลียสและอิเล็กตรอนจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน สารไดโพลีทริกชนิดนี้ไม่มีไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าที่ถาวร ถ้าสนามไฟฟ้าจากภายนอกกับสารไดโพลีทริกชนิดนี้เกิดแรงกระทำกับอะตอมเป็นเหตุให้ประจุบวก (นิวเคลียส) ประจุลบ (อิเล็กตรอน) เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม สมมติว่าเคลื่อนออกจากกันเป็นระยะทางเฉลี่ย $\ell \hat{u}$ เมื่อ $\hat{u}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นทิศทางของ ℓ จะชี้จากจุดศูนย์กลางของประจุลบไปประจุบวก เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาวะโพลาไรเซชัน ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electric Dipole Moment) ทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า แสดงดังภาพประกอบ 53



(ก) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก

(ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก

ภาพประกอบ 53 การโพลาไรซ์ของอะตอมของสารไดอิเล็กทริก

ที่มา : Mechanism of Polarization, n.d.

ถ้าให้ q_0 เป็นประจุอิสระของโมเลกุลถูกโพลาไรซ์แล้วปริมาณ $q_0 \vec{\ell}$ นิยามได้ว่า ไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment : $\vec{p}$) ของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นโดยสนามไฟฟ้าภายนอก

$$\vec{p} = q_0 \vec{\ell} \quad (2.56)$$

นิยามโพลาไรเซชันเวกเตอร์ (Polarization Vector : $\vec{p}$) ว่าเป็นความหนาแน่นของไดโพลโมเมนต์

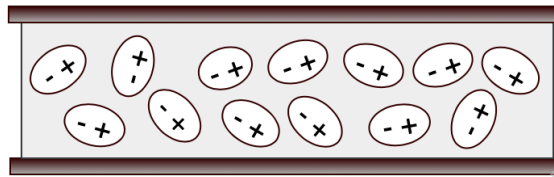
$$\vec{p} = N \vec{p} \quad (\text{สำหรับสารไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว}) \quad (2.57)$$

เมื่อ N คือ จำนวนความหนาแน่นของโมเลกุล (โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตร) จากการทดลองพบว่า โพลาไรเซชันเวกเตอร์ (Polarization Vector : $\vec{p}$) แปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า

กรณีสารไดอิเล็กทริกแบบมีขั้วแต่ละโมเลกุลมีไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ถ้าวรสมมติมีการกระจายอยู่ในเนื้อสาร ถึงแม้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกไดโพลโมเมนต์แต่ละตัวจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายแบบไม่เป็นระเบียบทั้งก้อนสาร จะไม่มีไดโพลโมเมนต์ ภาพประกอบ 54 (ก) และสนามไฟฟ้ากับก้อนสารนี้ทำให้โมเลกุลถูกบังคับให้เรียงตัวในแนวของสนามไฟฟ้า ภาพประกอบ 54 (ข) สาเหตุที่บางโมเลกุลไม่เรียงตัวในแนวของสนามไฟฟ้า เนื่องจากผลทางความร้อน แต่ถ้า

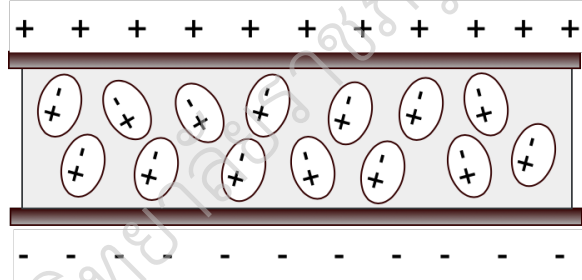
พิจารณาการเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์เฉลี่ย $\langle \vec{p}_0 \rangle$ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอกแล้วจะเห็นว่าค่อนข้างชี้ไปในทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสำหรับสารไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้วนั้น โพลาริเซชันเวกเตอร์จะแสดงดังภาพประกอบ 54 (ก) และภาพประกอบ 54 (ข)

Unpolarized



(ก) ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก

Polarized by an applied electric field



(ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก

ภาพประกอบ 54 การเรียงตัวของโมเลกุลของสารไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้ว

ที่มา : แรงดันสนามไฟฟ้า, n.d.

รูปแบบของโพลาริเซชันเวกเตอร์ในสมการ (2.56) และสมการ (2.57) มีความคล้ายคลึงกันต่างกันในสมการ (2.56) เป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้นแต่พฤติกรรมของโมเลกุลทั้งสองชนิดเหมือนกัน สารไดอิเล็กทริกมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและมีผลต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลท ดังนั้นชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กทริกมีผลต่อค่าการเก็บประจุ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, K) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อทำการนำวัสดุ

ที่ต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลท สูญญากาศเป็นไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อทำการเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ คือ สูญญากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1 สำหรับค่าไดอิเล็กทริกชนิดอื่นจะใช้สูญญากาศเป็นตัวอ้างอิงในการแสดงค่า เช่น ไมก้ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 50 หมายความว่า ไมก้าทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสามารถกักตัวได้ง่ายกว่าสูญญากาศถึง 5 เท่า และด้วยค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังนั้นคาปาซิเตอร์แบบไมก้าจึงมีค่าการเก็บประจุมากกว่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้สูญญากาศเป็นไดอิเล็กทริกถึง 5 เท่า

เมื่อนำไดอิเล็กทริกสอดระหว่างแผ่นคู่ขนานของคาปาซิเตอร์แผ่นคู่ขนานจะพบ ดังนี้

1. สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานลดลง
2. ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น
3. พลังงานสะสมในคาปาซิเตอร์มีค่ามากขึ้น

ตาราง 5 ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกโดยประมาณและความเป็นไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ

ที่อุณหภูมิห้อง

Material	Dielectric Constant, K	Dielectric Strength (10^6 V/m)
Air (dry)	1.00059	3
Bakelite	4.9	24
Fused quartz	3.78	8
Mylar	3.2	7
Neoprene rubber	6.7	12
Nylon	3.4	14
Paper	3.7	16
Paraffin-impregnated paper	3.5	11
Polystyrene	2.56	24
Polyvinyl chloride	3.4	40
Porcelain	6	12
Pyrex glass	5.6	14

ตาราง 5 (ต่อ)

Material	Dielectric Constant, K	Dielectric Strength (10^6 V/m)
Silicone oil	2.5	15
Strontium titanate	233	8
Teflon	2.1	60
Vacuum	1.000 00	-
Water	80	-
Air (dry)	1.00059	3
Bakelite	4.9	24
Fused quartz	3.78	8

ที่มา : สุริยะ ฝ้ายภูมิ, 2013

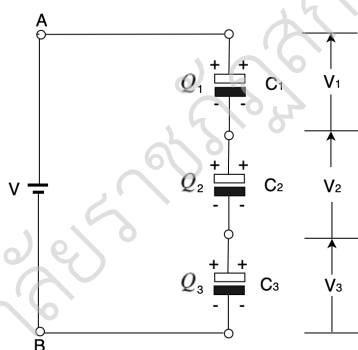
8. การต่อคาปาซิเตอร์ คือ การต่อคาปาซิเตอร์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ค่าคาปาซิเตอร์ตามต้องการ สามารถนำคาปาซิเตอร์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่อกัน ซึ่งในการต่อคาปาซิเตอร์นั้นส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าของความจุ อัตราทนแรงดันไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการต่อของคาปาซิเตอร์ การต่อคาปาซิเตอร์มี 3 แบบ คือ วงจรรอนุกรม วงจรขนาน และวงจรผสม ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติของวงจรที่แตกต่างกัน รายละเอียด ดังนี้

8.1. การต่อคาปาซิเตอร์แบบอันดับหรือแบบอนุกรม (Series Capacitor Circuit) คือ การต่อแผ่นตัวนำของคาปาซิเตอร์ตัวหนึ่งเข้ากับแผ่นตัวนำขั้วบวกของคาปาซิเตอร์อีกตัวหนึ่งลักษณะเรียงลำดับกันไป การต่อคาปาซิเตอร์ลักษณะอนุกรมนี้จะส่งผลเสมือนการเพิ่มความกว้างของไดอิเล็กทริก คือ การเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำของคาปาซิเตอร์ จึงทำให้ค่าความจุรวมมีค่าลดลง โดยปกติอัตราทนแรงดันไฟฟ้าของวงจรรอนุกรมนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มักจะมีค่าน้อยกว่าผลรวมของอัตราทนแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์แต่ละตัวรวมกัน จากคุณสมบัติของการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ 2 ประการ คือ

8.1.1 ต่อเพื่อปรับแต่งค่าความจุที่มีให้ wfh ความต้องการ เช่นต้องการให้คาปาซิเตอร์ขนาด 6.6 ไมโครฟารัด (μF) แต่มีคาปาซิเตอร์ขนาด 10 และ 20 ไมโครฟารัด (μF) ตามลำดับสามารถนำคาปาซิเตอร์ทั้ง 2 มาต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ

8.1.2 ต่อเพื่อให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เช่น ต้องการใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 500 ไมโครฟารัด (μF) ซึ่งต้องทนแรงดันได้อย่างน้อย 600 โวลต์ (V) แต่มีคาปาซิเตอร์ขนาด 1,000 ไมโครฟารัด (μF) ซึ่งทนแรงดันได้ 400 โวลต์ (V) 2 ตัว อาจใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 1,000 ไมโครฟารัด (μF) ซึ่งทนแรงดันได้ 400 โวลต์ (V) 2 ตัวต่ออนุกรมกัน

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (2.58)$$



ภาพประกอบ 55 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

ที่มา : บทที่ 2 คุณสมบัติของ R-L-C, 2553

เมื่อต่อคาปาซิเตอร์ (Q) เข้ากับแรงดันไฟฟ้า (V) จะเกิดการไหลของประจุทันที และผลของการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม จะได้

1. ประจุในคาปาซิเตอร์แต่ละตัวจะเท่ากัน และเท่ากับประจุของวงจร
2. แรงดันรวมเท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ทุกตัว ดังสมการ (2.59)

$$V_{AB} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (2.59)$$

เมื่อ V_{AB} เป็นแรงดันไฟฟ้ารวมประจุในคาปาซิเตอร์แต่ละตัวเท่ากัน เท่ากับประจุของวงจร

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (2.60)$$

ถ้าตัวเก็บประจุ n ตัวมีความจุแต่ละ C เท่ากัน ต่ออนุกรมกัน สามารถหา C รวม ได้จาก

$$C_{AB} = \frac{C}{n} \quad (2.61)$$

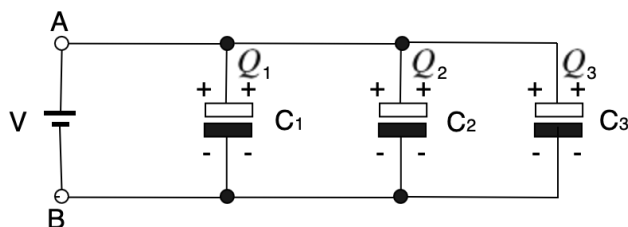
$$\frac{1}{C_{AB}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (2.62)$$

เมื่อ C_{AB} คือ ค่าความจุไฟฟ้าสำหรับคาปาซิเตอร์ 2 ตัว ใช้สมการในการคำนวณ ดังนี้

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.63)$$

8.2. การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Parallel Capacitor Circuit) คือ การนำคาปาซิเตอร์มาต่อขนานกัน การต่อในลักษณะนี้ทำให้พื้นที่รวมของแผ่นเพลตเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเก็บประจุรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อัตราทอนแรงไฟสูงสุดของวงจรเท่ากับตัวที่มีอัตราทอนแรงไฟน้อยที่สุด ค่าการเก็บประจุรวมคำนวณได้จากการรวมพื้นที่ของแผ่นเพลตทุกแผ่นรวมกัน แสดงดังสมการ (2.64)

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.64)$$



ภาพประกอบ 56 การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

ที่มา : บทที่ 2 คุณสมบัติของ R-L-C, 2553

การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน คือ การต่อแผ่นตัวนำขั้วบวกของคาปาซิเตอร์ทุกตัวเข้าด้วยกันและต่อแผ่นตัวนำขั้วลบทุกตัวเข้าด้วยกันเช่นกัน การต่อในลักษณะนี้ส่งผลเสมือนกับเป็นการเพิ่มพื้นที่ของแผ่นตัวนำ ผลรวมค่าความจุของวงจรจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราในการทนแรงดันไฟฟ้าในวงจรขนานเท่ากับอัตราทนแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ที่มีอัตราทนแรงดันน้อยที่สุด คุณสมบัติของการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานนิยมต่อเพื่อเพิ่มค่าความจุ ในกรณีที่มีคาปาซิเตอร์มีค่าความจุไม่เพียงพอ เช่น ต้องการค่าความจุขนาด 10,000 ไมโครฟารัด (μF) แต่มีตัวเก็บประจุขนาด 3,000 ไมโครฟารัด (μF) 3 ตัว อาจใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 3,000 ไมโครฟารัด (μF) 3 ตัวต่อขนานกันแทนได้

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.65)$$

ตัวเก็บประจุแต่ละตัวต่อขนานกับแหล่งจ่าย ดังนั้นค่าแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายด้วย เมื่อ

$$V_S C_T = V_1 C_1 + V_2 C_2 + V_3 C_3 \quad (2.66)$$

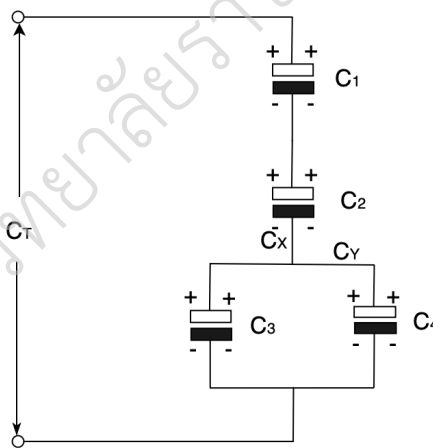
หรือ

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.67)$$

การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานมีผลให้ค่าความจุรวมของคาปาซิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความจุของคาปาซิเตอร์แต่ละตัว (ผลดังกล่าวจะเหมือนกับค่าความต้านทานรวมของตัวต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม) สำหรับกรณีคาปาซิเตอร์ n ตัว ต่อขนานกันจะได้ค่าความจุรวมของคาปาซิเตอร์ ดังนี้

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (2.68)$$

8.3. วงจรรวมคาปาซิเตอร์แบบผสม (Compound Capacitor Circuit) เป็นการต่อคาปาซิเตอร์ร่วมกันระหว่างการต่อแบบอนุกรมและการต่อแบบขนานในวงจรเดียวกัน การต่อคาปาซิเตอร์แบบผสมนี้ไม่มีมาตรฐานแน่นอน สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะการต่อวงจรที่ต้องการ การหาค่าความจุรวมของวงจรให้ใช้วิธีการต่อวงจรแบบอนุกรมและการต่อวงจรแบบขนานร่วม ลักษณะการต่อวงจรแบบผสมแสดงดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 วงจรตัวเก็บประจุแบบผสม

ที่มา : <https://shorturl.asia/KLP4S>

$$\frac{1}{C_{T1}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.69)$$

$$C_{T2} = C_3 + C_4 \quad (2.70)$$

$$C_T = C_{T1} + C_{T2} \quad (2.71)$$

$$C_X = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.72)$$

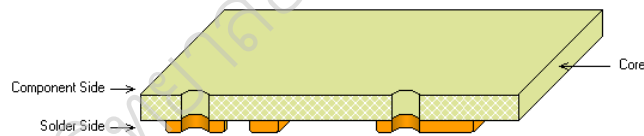
$$C_Y = \frac{C_3 \times C_4}{C_3 + C_4} \quad (2.73)$$

$$C_T = C_X + C_Y \quad (2.74)$$

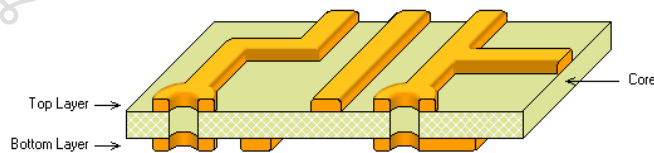
ตัวเก็บประจุนั้น บางครั้งอาจจะเรียกว่า “ตัวคาปาซิเตอร์” (Capacitor) หรือ “ตัวคอนเดนเซอร์” (Condenser) หรือ “ซี (C)” เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำไปใช้งานทางด้าน ไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้าง ขวางกับอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ และในระบบงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าชนิดเดียวที่สามารถสะสมประจุไฟฟ้าเอาไว้ในตัวได้ ซึ่งจะมี เป็นคุณสมบัติเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า หรือแบตเตอรี่ที่ต่ออยู่ภายในวงจร โดยทั่วไป ตัวเก็บประจุจะมามีการทำงานอยู่ 2 ลักษณะ คือ การเก็บประจุ (Charge) และการคายประจุออกจาก ตัวเก็บประจุ (Discharge) ในส่วนของค่าความจุ (Capacitor) นั้นคือ ความสามารถในการสะสม ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ 3 ส่วนด้วยกัน คือ 1) พื้นที่หน้าตัดของแผ่น ตัวนำ ถ้ามีพื้นที่มากการรับประจุไฟฟ้าจุมากตามไปด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถ้าแผ่นโลหะใหญ่หรือ พื้นที่มากค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมากตามไปด้วย 2) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ถ้าระยะห่างกันมากค่าความจุจะน้อยและหากระยะห่างเข้าชิดกันมาก ๆ ความจุจะมากขึ้น 3) ค่า เพอร์มิททิวิตีของไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแต่ละตัวจะแตกต่างกัน ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ ไดอิเล็กทริกต่างกัน แม้จะมีขนาดเท่ากันแต่ความจุและอัตราการทนแรงดันอาจแตกต่างกันออกไป ในการออกแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่จะใช้ในการวัดแรงกดนั้นจึงควร พิจารณาส่วนประกอบ 3 ส่วน ข้างต้นเป็นหลัก

แผ่นวงจรพิมพ์

แผ่นวงจรพิมพ์หรือพีซีบี (Print Circuit Board : PCB) หรือที่นิยมเรียกว่าแผ่นปริ้นท์ เป็นแผ่นที่มีลายทองแดงที่นำไฟฟ้าหรือแผ่นฉนวนที่มีลายทองแดงฉาบอยู่ แผ่นวงจรพิมพ์ใช้สำหรับให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยึดเกาะและเชื่อมโยงถึงกันและจะบัดกรีขาของอุปกรณ์กับลายทองแดง เพื่อประกอบเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟซึ่งจะมีความซับซ้อนและยุ่งยาก โดยที่แผ่นวงจรพิมพ์อาจมีเพียงด้านเดียว (Single-Sided) แสดงดังภาพประกอบ 58 (ก) หรือสองหน้า (Double-Sided) แสดงดังภาพประกอบ 58 (ข) ที่มีทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้าน แต่จุดที่ใช้บัดกรีจะไม่ต่อถึงกันในแต่ละด้าน เหมาะกับวงจรที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน ส่วนแบบสองหน้าเพลตทรูโฮลด์ (Double-Sided Plate-through-Hold : PTH) แสดงดังภาพประกอบ 58 (ค) มีทองแดงอยู่ทั้ง 2 ด้าน และจุดบัดกรีจะต่อถึงกันทั้ง 2 ด้าน วงจรมีความซับซ้อนมาก ๆ ต้องทำเป็นหลาย ๆ ชั้น (Multi-Layer) แสดงดังภาพประกอบ 58 (ง) มีเส้นลายวงจรเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างชั้นใน (Inner Layer) และชั้นนอก (Outer Layer) และภายในจะชุบด้วยทองแดง แผ่นวงจรพิมพ์มัลติเลเยอร์ (Multi Layer) ทำขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์ประเภทอีพอกซีใยแก้วใช้กับวงจรที่มีความซับซ้อน

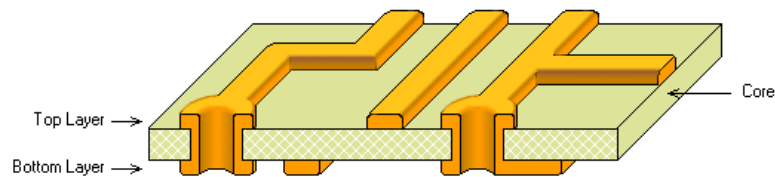


(ก) Single-Sided

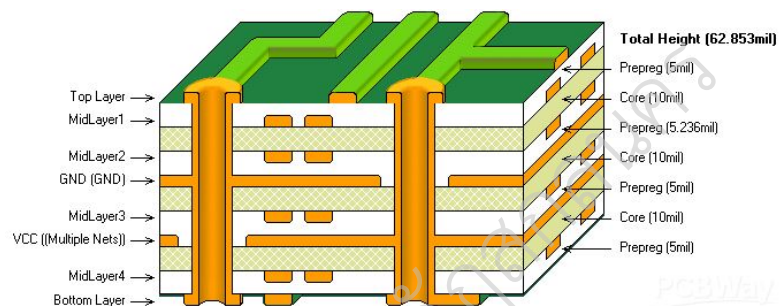


(ข) Double-Sided

ภาพประกอบ 58 ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์แบบ Single-Sided, Double-Sided, Double-Sided Plate-through-Hold และ Multi-Layer
ที่มา : <https://shorturl.asia/Hqjs5>



(ค) Double-Sided Plate-through-Hold : PTH



(ง) Multi-Layer

ภาพประกอบ 58 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์แบบ Single-Sided, Double-Sided, Double-Sided Plate-through-Hold และ Multi-Layer

ที่มา : <https://shorturl.asia/Hqjs5>

1. แผ่นวงจรพิมพ์ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Copper Sheet Laminated) เช่นทองแดง เป็นต้น นิยมใช้หน่วยวัดน้ำหนักเป็น “ออนซ์ (oz)” เพื่อบ่งบอกความหนากับฉนวน (Nonconductive Substrate) ส่วนแผ่นฐาน (Substrate) นิยมใช้หน่วยวัดความหนาเป็น “มิลลิเมตร (mm)” แผ่นฐานจะทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรงที่นิยมใช้มี 3 ชนิด คือ ฟีนอลิก (Phenolic) กลาสอีพอกซี (Glass Epoxy) และสารประกอบอีพอกซี (Composite Epoxy) ซึ่งแผ่นฉนวนทำหน้าที่เป็นช่องว่างและยึดติดตัวอุปกรณ์ มีตัวนำไฟฟ้า เป็นตัวเชื่อมวงจรให้แก่อุปกรณ์ไปด้วย ในการแบ่งเกรดของวงจรพิมพ์นั้น สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแห่งชาติอเมริกา (National Electrical Manufacturers Association : NEMA) ได้ทำการแบ่งชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์ไว้ 30 ชนิด แต่โดยทั่วไปแล้วจะพบเห็นประมาณ 10 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย

1.1. เกรด XXX PC แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ผลิตมาจากการนำกระดาษมาอัดรวมกับฟีนอลิกเรซิน แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้นิยมนำมาใช้กับงานทั่วไป คุณสมบัติ คือ ทนความร้อนได้ไม่สูงมากนัก ความต้านทานค่อนข้างต่ำ เมื่อนำมาเทียบกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผลิตมาจากสารชนิดอื่นสามารถใช้กับงานที่มีความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุ และออกแบบมาเพื่อให้สามารถตัด เจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำได้

1.2. เกรด FR-2 (Phenolic Cotton Paper) แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ผลิตจากฟีนอลิก (Phenolic) ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไป จะคล้ายกับเกรด XXX PC แต่ถูกออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ทำให้สามารถนำแผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้ใช้กับงานที่อุณหภูมิสูงกว่าได้

1.3 เกรด FR-3 (Cotton Paper and Epoxy) แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ผลิตจากกระดาษบาง ๆ อัดติดกันด้วยอีพ็อกซีเรซิน ทำให้มีความแข็งแรงสูง สามารถนำไปใช้กับงานที่มีแรงดันและความชื้นสูงได้ดี วงจรพิมพ์เกรดนี้มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวงจรพิมพ์เกรด XXX PC อีกทั้งยังออกแบบให้สามารถตัด เจาะได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำได้

1.4 เกรด FR-4 (Woven Glass and Epoxy) แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-3 โดยผลิตจากเส้นใยแก้ว จากนั้นอัดด้วยอีพ็อกซีเรซิน แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้สามารถใช้งานได้หลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูง และสามารถนำไปใช้กับงานที่มีแรงดันสูงได้ซึ่งจะดีกว่าวงจรพิมพ์เกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

1.5 เกรด FR-5 (Woven Glass and Epoxy) แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-4 โดยในกระบวนการของการผลิตยังคงใช้วิธีการอัดเส้นใยแก้วด้วยอีพ็อกซีเรซิน แต่แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้จะมีค่าความแข็งแรงทางกลที่สูงกว่าและการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังติดไฟได้ยาก

1.6 เกรด FR-6 (Matter Glass and Polyester) แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ผลิตมาจากแผ่นใยแก้วบาง ๆ ที่ยึดรวมกันด้วยวิธีการทางเทอร์โมเซตติงโพลีเอสเตอร์ (Thermosetting Polyester) มีค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกต่ำ ความแข็งแรงของแผ่นวงจรพิมพ์มีค่อนข้างน้อย แต่ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการทนต่อความชื้น จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความชื้นสูงได้

1.7 เกรด CEM1(Cotton Paper and Epoxy) เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเซลลูโลส (Cellulose) มาใช้เป็นแกนกลาง มีเส้นใยแก้วทอเป็นผิวแกนกลางทั้งสองด้าน จากนั้นอัดติดกันด้วยอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้ตัด เจาะ ได้ง่าย แต่ข้อด้อยก็ คือ ทนความชื้นได้ต่ำกว่าเกรด FR-4, FR-5 และ FR-6

1.8 เกรด G-10 (Woven Glass and Epoxy) เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผลิตมาจากกระบวนการอีพอกซีไฟเบอร์กลาส (Epoxy Resin Fiberglass) ทำให้มีความแข็งแรงทางกลสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม ลักษณะทั่วไปจะคล้ายกับเกรด FR-4 แต่การติดไฟยากจะยากกว่า แผ่นวงจรพิมพ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และยังใช้วัสดุแบบเดิม ๆ ทำเป็นแผ่นฐาน ซึ่งยังมีแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้สารที่พัฒนาขึ้นมาใหม่เป็นแผ่นฐาน ประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์เกรด G-30 และ G-60

1.9 เกรด G-30 แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้ใช้วิธีการทอใยแก้วเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการยึดด้วยโพลีเอไมด์เรซิน (Polyamide Resin) จึงทำให้มีความคงตัวที่ดี สามารถต้านทานต่อความชื้นได้สูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการทำแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดมัลติเลเยอร์

1.10 เกรด G-60 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดพิเศษที่ผลิตด้วยการใช้สารโพลีซัลโฟนเทอร์โมพลาสติก (Polarly Sulfone Thermo Plastic) มาทำเป็นแผ่นฐาน เนื่องจากกระบวนการในการผลิตทำให้แผ่นวงจรพิมพ์เกรดนี้มีค่าความสูญเสียในไดอิเล็กทริกต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของไดอิเล็กทริกได้ง่าย ดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้งานด้านความถี่สูงมาก ๆ ในระดับกิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) สำหรับผลิตไมโครชิปและใช้กับย่านความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น

2. การทำแผ่นวงจรพิมพ์หรือการทำแผ่นปริ้นท์ สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณภาพของแผ่นปริ้นท์ ในการทำแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับใช้กับงานเล็ก ๆ จะนิยมใช้แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์ (Universal PCB) แต่ถ้าวงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นต้องออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์เปล่า จากนั้นนำมากัดลายวงจร โดยส่วนใหญ่การผลิตจำนวนมากหรือผลิตเป็นอุตสาหกรรม มักใช้การทำแบบสกรีนและใช้โปรแกรมเข้ามาช่วย การทำแผ่นปริ้นท์หรือแผ่นพีซีบี (PCB) สามารถทำได้หลายแบบ ได้แก่ การทำแผ่นวงจรพิมพ์โดยการลอกลายจากแบบ การทำแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้ไดร์ฟิล์ม (Dry Film) การทำแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกระดาดโฟโตโดยใช้วิธี Toner Transfer และการทำแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยการใช้บล็อกสกรีน โดยขั้นตอนในการทำ ดังนี้

2.1 การทำแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยการลอกลายจากแบบ การสร้างลายวงจรถือว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจรทำให้วงจรสามารถทำงานได้ถูกต้องมากขึ้นเพียงใด

2.1.1 การสร้างลายวงจรต้นแบบ (Layout Drawing) คือ ขั้นตอนในการสร้างแบบลายวงจรตามเส้นวงจร (Schematic Circuit) เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุด โดยกรณีทำเองด้วยมือ จะเริ่มด้วยการกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ลงบนกระดาด จากนั้นทำการร่างเส้นลายวงจรในส่วน

หลายทองแดงเพื่อต่อเชื่อมถึงกัน ปัจจุบันนิยมใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เช่น โปรแกรม OrCAD หรือ Protel มาช่วยในการสร้างและออกแบบ

2.1.2 ตัดแผ่นวงจรพิมพ์เปล่าตามขนาดต้นแบบด้วยคัตเตอร์หรือเครื่องตัดแผ่นปริ้นท์

2.1.3 ทำความสะอาดแผงวงจรพิมพ์ด้านที่เป็นผิวทองแดงเพื่อล้างสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออก

2.1.4 คัดลอกลายลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยวางให้ด้านที่เป็นทองแดงอยู่ด้านบน จากนั้นใช้กระดาษก๊อปปี้หรือกระดาษคาร์บอนที่ใช้กับงานพิมพ์ดีดวางทับบนผิวทองแดงแล้วนำกระดาษลายวงจรได้ออกแบบไว้แล้วมาวางทับลงไป ทำการลอกลายโดยใช้ดินสอหรือปากกาปากแหลม เขียนทับลงไปบนกระดาษต้นแบบเพื่อให้ลายที่เขียนทับไปติดกับผิวทองแดงของแผ่นพีซีบี เพื่อเป็นต้นแบบในการลงหมึกต่อไป

2.1.5 นำกระดาษคาร์บอนและกระดาษต้นแบบลายวงจรออก จากนั้นใช้สีหรือปากกาเคมีเขียนตามแนวลายวงจรที่ลอกแบบไว้ โดยพยายามเทียบจากต้นฉบับหรือต้นแบบไปด้วย จากนั้นรอให้หมึกแห้งสนิท ก่อนนำไปเทียบกับกับลายวงจรต้นแบบ

2.1.6 เตรียมสารละลายที่จะใช้กับลายวงจรโดยใช้กรดกัดปรินท์ (เป็นผงหรือก้อนสีเหลืองเข้ม) ซึ่งความจริง คือ สารเคมีที่ชื่อ เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และมีสภาพเป็นด่าง ละลายกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม (อัตราส่วนนิยมใช้กัน คือ กรด 1/2 กิโลกรัม กับน้ำหนึ่งลิตร) ใช้ไม้หรือแท่งพลาสติกกวนส่วนผสมให้เข้ากัน

2.1.7 นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่วาดแบบลายวงจรเสร็จแล้ว มากัดโดยแช่ลงในกรดที่เตรียมไว้ ในทางปฏิบัติจะวางด้านที่เป็นทองแดงไว้ด้านบน และพยายามเขย่าภาชนะที่ใส่กรดไปมา ไม่ควรแช่ทิ้งไว้เลย ๆ ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้ทองแดงที่ถูกกัดแล้วหล่นลงไปตามล่างภาชนะ ไม่ให้หล่นลงบนผิวทองแดงด้านบน ซึ่งจะช่วยให้กัดเสร็จเร็วขึ้น ในกรณีต้องการแช่ทิ้งไว้ควรวางในลักษณะแนวตั้งหรือตะแคงเล็กน้อย ไม่ควรวางในแนวนอนแต่ต้องใช้ส่วนผสมที่เข้มข้นกว่าเดิม เวลาที่ใช้ในการกัดปกติจะอยู่ประมาณ 10 - 20 นาที ขณะทำการกัดปรินท์ ควรสวมถุงมือยางเพื่อป้องกันไม่ให้กรดกัดปรินท์ถูกผิวหนัง แต่ถ้าถูกผิวหนังหรือเข้าตาควรล้างออกด้วยน้ำเปล่าทันที จากนั้นควรรีบไปพบแพทย์เพื่อดูอาการต่อไป

2.1.8 เมื่อกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดำเนินการล้างสีออกด้วยทินเนอร์ จากนั้นทำความสะอาดด้านลายทองแดงด้วยผงซักฟอกและสก็อตไบร์ทจากนั้นทิ้งให้แห้ง

2.1.9 จากนั้นนำมาเคลือบลายทองแดงด้วยน้ำยาเคลือบ ที่มีขายหรือใช้อย่างสนผสมกับทินเนอร์ เพื่อเคลือบผิวทองแดงให้สะอาดและไม่หมองไว้เจาะรูตามขนาดขาของอุปกรณ์ โดยใช้สว่านจะได้แผ่นวงจรพิมพ์ตามต้องการ

2.2. การทำแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film) มีขั้นตอนการทำแผ่นปรินท์หรือพีซีบีด้วยทรายฟิล์ม ดังนี้

2.2.1 ตัดแผ่นทรายฟิล์มให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าแผ่นปรินท์เล็กน้อย

2.2.2 เตรียมเครื่องรีดแผ่นทรายฟิล์มเพื่อให้ติดกับแผ่นปรินท์ก่อนที่จะนำไปถ่ายแบบด้วยตู้ฉายแสงยูวี (UV)

2.2.3 เตรียมน้ำยาโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) เพื่อใช้ล้างส่วนที่ไม่ต้องการออกจากแผ่นปรินท์

2.2.4 เตรียมแปรงขนนุ่มมาขัดแผ่นปรินท์เพื่อให้ส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกให้สะอาด

2.2.5 ตัดแผ่นทรายฟิล์มให้ใหญ่กว่าแผ่นปรินท์เล็กน้อย ติดด้วยกาวสองหน้า แล้วลอกออก

2.2.6 นำแผ่นทรายฟิล์ม ด้านที่ลอกออกมาติดกับแผ่นปรินท์ แผ่นพลาสติก ทรายฟิล์มที่ลอกออกไปรีดให้เรียบไม่ให้มีฟองอากาศ ถ้ามีฟองอากาศให้นำเข็มมาเจาะแล้วรีดให้เรียบอีกครั้ง หากกระดาษมารอง 2-3 แผ่น นำเตารีดมารีดปรับไฟอ่อน ๆ ถ้าไฟแรง แผ่นทรายฟิล์มจะกลายเป็นจุดไหม้ เป็นจุด ๆ

2.2.7 แผ่นใสต้นแบบที่ปรินท์ต้องทำเป็น กลับด้าน (Invert) มาวางบนแผ่นทองแดงติดสก็อตเทปกั้นลิ้น จากนั้นทำการคว่ำแผ่นปรินท์วางบนตู้ฉายแสง หากกระดาษมาวางทับด้านบน จากนั้นจับเวลาในการฉายแสงประมาณ 2-3 นาที ในช่วงที่ฉายแสงให้น้ำของหนัก ๆ วางทับบนแผ่นปรินท์ เพื่อให้ลายวงจรแนบติดกับแผ่นปรินท์ซึ่งจะทำให้เส้นของลายทองแดงที่ออกมามีความชัดและคม

2.2.8 แผ่นใสที่ปรินท์ด้วยการ Invert บริเวณตำแหน่งที่เป็นสีดำ แสง UV จากเครื่องถ่ายภาพจะไม่สามารถผ่านได้ ซึ่งแสงจะผ่านได้เฉพาะในส่วนที่เป็นสีขาวเท่านั้น แสงยูวีจะทำปฏิกิริยากับทรายฟิล์ม เกิดเป็นเส้นลายวงจรเหมือนกับวงจรต้นแบบ จากนั้นลอกแผ่นพลาสติกที่เป็นทรายฟิล์มอีกด้านออก

2.2.9 นำสารโซเดียมคาร์บอเนตมาละลายน้ำ 10 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร แช่ทิ้งไว้ 30 นาที นำแปลงมาปิดไปมาจนฟิล์มหลุด ถ้าลายวงจรไม่สวยหรือไม่สมบูรณ์ ควรตกแต่งลายด้วย สีนํ้ามันหรือปากกาเคมีก่อนนำไปกัดปรินต์ต่อไป

2.2.10 นำแผ่นปรินต์ที่ทำเสร็จ วางลงในภาชนะที่ผสมกรดกัดปรินต์จากนั้นทำการ แช่ไปมาประมาณ 20 นาที พร้อมสังเกตการหลุดของส่วนที่ไม่ต้องการ ถ้าลายทองแดงยังเหลืออยู่ ให้กัดต่อไปจนหมด โดยจะเหลือเฉพาะแผ่นฟิล์มที่ติดอยู่ แผ่นปรินต์ที่กัดเสร็จสิ้นแล้วนำมาขัดฟิล์ม ที่ติดออกพร้อมนำไปเคลือบสีให้กับแผ่นปรินต์ต่อไป

2.3 การทำแผนวงจรพิมพ์ด้วยกระดาษโฟโต้ โดยวิธีโทเนอร์ทรานส์เฟอร์ (Toner Transfer) การทำปรินต์สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณภาพของปรินต์ สำหรับการทำปรินต์ด้วย กระดาษโฟโต้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ง่ายต้นทุนต่ำ (สำหรับลายวงจรที่ไม่ซับซ้อน) แต่ข้อเสีย ที่ขนาดของลายเส้นถ้ามีขนาดเล็กจะทำได้ค่อนข้างลำบากมีรายละเอียด ดังนี้

2.3.1 เตรียมกระดาษโฟโต้ขนาด A4 มีลักษณะเป็นมันหนึ่งด้าน

2.3.2 เตรียมเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์ เตารีดแบบพื้นเรียบ และภาชนะใส่นํ้า

2.3.3 เตรียมปากกาเปอรมาแมนท์ กรดกัดปรินต์ ทินเนอร์ และกระดาษชำระ

2.3.4 ทำการออกแบบลายวงจรด้วยโปรแกรมออกแบบลายวงจร โดยให้ใส่เส้น ขอบนอกปรินต์เพื่อง่ายต่อการวางแผ่นปรินต์ในขั้นตอนการติดกระดาษและใส่ข้อความ ก่อนการปรินต์ ตั้งค่าให้เป็นเหมือนการพิมพ์ทั่วไป (ไม่ต้องกลับลายวงจร) ทำการคัดลอกลายวงจรที่ออกแบบไว้ให้ได้ จำนวนหลาย ๆ แผ่นเพื่อใช้วางในกระดาษ โฟโต้เพียงแผ่นเดียวที่เตรียมไว้ให้ได้มากที่สุด

2.3.5 พิมพ์กระดาษโฟโต้ (ด้านมัน) ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ โดยให้สังเกตลาย วงจรที่พิมพ์นั้นจะต้องไม่เป็นลายตรงข้ามกับลายวงจรจริง จากนั้นตัดกระดาษต้นแบบเฉพาะในส่วนที่ ต้องการ

2.3.6 ทำความสะอาดหรือขัดแผ่นปรินต์ (ด้านทองแดง) ด้วยแปรงขนนุ่มหรือ สก๊อตไบต์พร้อมกับใช้นํ้ายาล้างจานช่วย จากนั้นนำแผ่นปรินต์วางคว่ำลงบนแผ่นต้นแบบ โดยนำ ด้านทองแดงสัมผัสกับแบบที่ต้องการ

2.3.7 ติดกระดาษกาวกันการเลื่อนขยับ จากนั้นติดกระดาษกาวกับพื้นกันลื่น เปิดเตารีด และตั้งความร้อนของเตารีดค่อนข้างสูงทำการรีดโดยใช้เวลาประมาณ 30 วินาที โดยรีด ให้ทั่วทั้งแผ่น โดยในการรีดใช้แรงกดพอสมควร

2.3.8 นำลงแช่น้ำ โดยใช้เวลาแช่ประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการลอก กระดาษโฟโต้ที่ติดอยู่ออกแช่น้ำต่ออีก 5 นาที ใช้นิ้วถูกระดาษ หรือบางครั้งอาจใช้แปรงสีฟัน นุ่มช่วยในการถูได้ ใช้ปากกาทันน้ำเพื่อซ่อมแซมลายที่ขาดหายไปทำให้ลายไม่สมบูรณ์ จากนั้นนำไป กัดด้วยกรดกัดปรินต์ เมื่อกัดเสร็จนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า จากนั้นเช็ดให้แห้งหรือทิ้งไว้ ให้แห้งก็จะได้ลายวงจรหรือลายที่ต้องการ

2.4 การทำแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้บล็อกสกรีน หลักการพิมพ์ “ซิลค์สกรีน” (Silkscreen) คือ การปาดหมึกพิมพ์ผ่านบล็อกสกรีนที่ยึดบนกรอบสี่เหลี่ยม ให้ติดลงไปกับวัสดุ ที่จะพิมพ์ หากต้องการให้หมึกผ่านผ้าสกรีนออกมาตามลวดลายใด ๆ ทำให้รูของผ้าเปิดหรือปิด ส่วนที่ต้องการให้หมึกผ่านออกมาตามลวดลายนั้น ๆ การพิมพ์ระบบซิลค์สกรีน สามารถใช้พิมพ์ลงบน วัสดุได้แทบจะทุกชนิด ทั้งวัสดุแบน กลม เหลี่ยม หรือรูปทรงแปลก ๆ ทั้งหลาย การพิมพ์แบบนี้ ใช้การปาดหมึกพิมพ์สกรีนผ่านผ้าสกรีนลงไปติดบนวัสดุ ปริมาณของหมึกพิมพ์จึงผ่านลงไปเกาะยึด ติดกับผิววัสดุ ที่พิมพ์ได้มากและดีกว่าทุกการพิมพ์ระบบอื่น ผ้าสกรีน คือ ผ้าที่ทอขึ้นเป็นพิเศษ ให้มี ขนาดรูของภาพเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็ก ๆ ขนาดรูเท่ากันทุกรู ข้อมูลเกี่ยวกับทำบล็อกงานสกรีน ดังนี้

2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำบล็อกสกรีน ได้แก่ น้ำยาไวแสง บล็อกสกรีน อย่างปาด ไดร่เป่าผม ถ้วยสำหรับไวผสมกาวอัดกับน้ำยาไวแสง ช้อนสำหรับคนน้ำยาไวแสงกับกาวอัดให้เข้ากัน กระดาษเช็ด ถ้วยแยก กระบอกฉีดน้ำ ผงคลอรีนใช้ในกรณีที่ต้องการสร้างบล็อกใหม่

2.4.2 ขั้นตอนการสร้าง การทำแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้บล็อกสกรีน ต้องทำถ้วยแยกแสงบล็อก สกรีนและลายวงจร ปรี้นท์ลงบนแผ่นใส หรือปรี้นท์ลงบนกระดาษไข การทำแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้ บล็อกสกรีน ต้องทำในห้องมืด แสงไฟสลัว ๆ หรือแสงสีแดง สีส้ม แสงสว่างที่ใช้ในห้องจะต้องน้อย ทำการผสมกาวอัดกับน้ำยาไวแสง โดยใช้ช้อนตวงกาวอัด 5 ส่วนใส่ถ้วย น้ำและยาไวแสง 1 ส่วน ใส่ไว้ในถ้วยเดียวกัน จากนั้นคนให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จากนั้นเตรียมบล็อก สกรีนและล้างบล็อกเพื่อให้คราบไขมันที่ติดบล็อกออก นำกาวอัดที่ผสมกับน้ำยาไวแสงปาดลงบล็อก สกรีน ด้วยการใช้อย่างปาดปาดให้ทั่วแผ่น จากนั้นดำไดร่เป่าผมมาเป่าให้แห้ง โดยทำการเป่าไล่ไปให้ ทั่วบล็อกสกรีน จากนั้นเตรียมลายวงจร จุด Solder Mask จุดพิมพ์อุปกรณ์วางบนกระจก การทำ Solder Mask ต้อง Invert ก่อน โดยกลับดำเป็นขาว เขาเป็นดำ ใช้โปรแกรมที่ออกแบบลายวงจร กลับด้าน นำไปฉายแสงใช้เวลา 3 - 5 นาที เสร็จแล้วนำบล็อกสกรีนไปแช่น้ำ 1 นาที นำกระบอก ฉีดน้ำฉีดที่บล็อกสกรีน ลายวงจรจะค่อย ๆ ปรากฏขึ้น พร้อมหลุดเป็นลายเส้น แต่ถ้าฉีดแล้วหลุดไป

เยอะ เส้นลายวงจรขาดแห้ว ไม่สวยงาม แสดงว่าใช้เวลาฉายแสงไวไป หรือใส่น้ำยาไวแสงน้อยเกินไป ให้นำบล็อกสกรีนไปทำใหม่ โดยการนำผงคลอรีนมาล้างที่บล็อก โรยผงคลอรีนให้ทั่วทั้งบล็อก จากนั้น นำแปรงที่นุ่มผสมน้ำเล็กน้อยทำการขัดเบา ๆ ทิ้งไว้ประมาณ 2 - 3 นาที แล้วนำมาล้างน้ำซึ่งจะทำให้ กาวอัดหลุดออก ถ้าตำแหน่งไหนยังมีเกาติดยูให้นำมาล้างด้วยผงคลอรีนใหม่จนสะอาด นำได้รึ เป่าลมมาเป่าให้แห้งพร้อมที่จะไปทำใหม่ โดยเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงขึ้นอีก 2 - 3 นาที

2.5 การเคลือบสีแผ่นปริ้นท์หรือแผ่นพีซีบี การเคลือบสีแผ่นปริ้นท์ (Solder Mask PCB)

คือ การทำหน้ากากประสานแผ่นปริ้นท์ สีที่ใช้ในการเคลือบจะมีอยู่หลายสี เช่น สีเขียว สีแดง สีน้ำเงิน สีม่วง สีขาว สีดำ สีที่ใช้จะเป็นสี UV Solder Mask เป็นสีชนิดพิเศษที่ใช้ในการเคลือบ แผ่นปริ้นท์โดยเฉพาะ และพิมพ์ตำแหน่งอุปกรณ์ เมื่อทำเสร็จแล้วอบด้วยแสง UV หรือใช้แสง UV จากดวงอาทิตย์จนเกาะติดแน่น ไม่หลุดง่าย ทนต่อสารละลาย เช่น ทินเนอร์ เป็นต้น

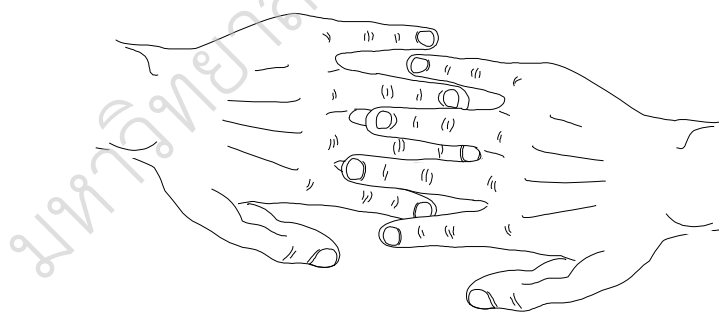
อุปกรณ์ที่ใช้ทำ Solder Mask โดยใช้บล็อกสกรีนประกอบไปด้วย สาร UV Solder Mask PCB แดง เขียวหรือน้ำเงิน บล็อกสกรีนตำแหน่ง Solder Mask ยางปาด น้ำมันล้างสีที่ติด บล็อกสกรีนหรือน้ำมันเบนซิน แผ่นปริ้นท์ ที่ผ่านการกัดลายแล้ว บล็อกสกรีนสำหรับทำ Solder Mask PCB อาจจะทำบล็อกเดียวใช้ได้ 3 อย่าง คือ สกรีนลายวงจร สกรีนตำแหน่ง Solder Mask และสกรีนตำแหน่งอุปกรณ์ นำสีเทลงไปที่บล็อกสกรีน ขั้นตอนการทำ Solder Mask PCB โดย จัดวางตำแหน่งพร้อมที่จะปาด จับยางปาด 90 องศา ก่อนการปาดให้ปาดเอียงมาข้างหน้าเล็กน้อย ปาดไป 1 รอบ สังเกตดูว่าเคลือบแผ่นปริ้นท์ทั่วหรือยัง ถ้ายังให้ปาดถอยหลังกลับ ปาดหน้าเดิมอีก 1 รอบ จากนั้นทำการยกขึ้นเล็กน้อย แล้วมาวางตำแหน่งที่สียังเหลืออยู่ กดลงตรงกลางบล็อกเพื่อให้ แผ่นปริ้นท์หลุดออกมา จากนั้นนำบล็อกสกรีนไปล้างสีที่ติดบล็อกออกด้วยน้ำมัน

จะเห็นว่าแผ่นวงจรพิมพ์หรือแผ่นปริ้นท์ นั้นเป็นแผ่นที่สร้างด้วยพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการฉาบผิวด้วยทองแดงเต็มแผ่น และเมื่อต้องการใช้แผ่นวงจรพิมพ์ จะนำลายวงจรที่ต้องการมาทาบ หรือสกรีนลายลงบนแผ่นทองแดงซึ่งอาจจะสร้างลายด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ที่แตกต่างกันออกไปจนเกิด ลายบนทองแดง จากนั้นไปจุ่มในน้ำยากัดแผ่นปริ้นท์ ทำการเขย่าให้น้ำยาเคลื่อนที่ไปมา จนเริ่มเห็น ลายวงจรที่ชัดเจนขึ้นแล้วนำไปล้างด้วยน้ำเปล่า จากนั้นทำการเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำยา เคลือบแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขายอยู่ตามร้านขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อแห้งก็นำมาเจาะรูเพื่อใช้ สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือประกอบกันเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟ ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก โดยแผงวงจรนี้อาจมีเพียงด้านเดียวหรือสองด้านหรือสามารถวางซ้อนกันได้ หลาย ๆ ชั้น (Multi layer) ได้เช่นกันตามความต้องการของผู้ออกแบบ โดยสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์

ไฟฟ้าแห่งชาติอเมริกา ได้แบ่งเกรดของแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนี้ เกรด XXX PC เกรด FR-2 เกรด FR-3 เกรด FR-4 เกรด FR-5 เกรด FR-6 เกรด CEM1 เกรด G-10 เกรด G-30 และเกรด G-60 โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์เกรด FR4 เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด อีกทั้งยังสามารถหาง่าย ราคาไม่แพง

อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

Mamishhev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M. (2004, pp. 808-845) กล่าวว่า อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ เป็นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดความจุไฟฟ้าของสารหรือ วัสดุที่สนใจ โดยมีโครงสร้างเป็นการวางแผ่นตัวนำในแนวนานกันไปเรื่อย ๆ คำว่า อินเตอร์ดิจิตอล มีความหมายที่แปลว่า “ข้ามหรือชี้” หรือ หมายถึง รูปแบบเป็นระยะที่เหมือนตัวเลข หรือ เหมือนนิ้วของอิเล็กทรอนิกส์ในระนาบขนานที่ใช้เพื่อสร้างความจุที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าของวัสดุ แสดงดังภาพประกอบ 59



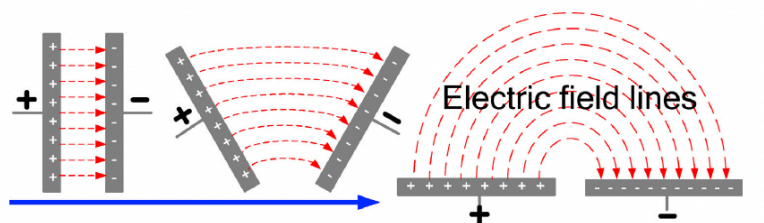
ภาพประกอบ 59 รูปแบบของนิ้วหรือหลักที่มีรูปร่างและตำแหน่งสัมพันธ์ของอิเล็กทรอนิกส์
ที่มา : Mamishhev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M., 2004

ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวัด ที่มีการวางแผ่นตัวนำของขั้วบวกและขั้วลบสลับไปมา ลักษณะคล้ายหวีสองอันวางทาบกัน อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ถูกเผยแพร่ครั้งแรก โดย

Lord Rayleigh ในปี ค.ศ. 1885 (Sakai, O. et al., 2021) ในยุคแรกถูกสร้างขึ้นให้ทำงานร่วมกับ Piezoelectric เพื่อใช้ในการส่งผ่านและกรองสัญญาณในอุปกรณ์สื่อสาร โดยมีการวางอินเตอร์-ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ 2 ส่วน ส่วนที่ใช้ในการส่งและส่วนที่ใช้รับสัญญาณ ใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงสั่นสะเทือน แล้วสามารถเปลี่ยนจากแรงสั่นสะเทือนกลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ใหม่ การสั่นสะเทือนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ของภาคส่ง หรือมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกันก็จะทำให้ความถี่ภาครับและ สัญญาณขาออกก็จะมากตามไปด้วย เรียกหลักการนี้ว่า Surface Acoustic Wave (SAW) การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการวัดด้วยอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ยังคงได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านประยุกต์การใช้งานและการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ ๆ การกำหนดชื่อย่อสำหรับใช้เรียกอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดชนิดนี้ คือ IDT ย่อมาจาก Interdigital Transducer หรือ IDC ย่อมาจาก Interdigital Capacitor การศึกษางานวิจัยพบว่า ส่วนใหญ่เป็นการนำอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์มาใช้วัดเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุทดสอบ เช่น การนำมาประยุกต์ใช้วัดความชื้นในอากาศ การวัดความชื้นในคอนกรีต การวัดปริมาณสารพิษในอาหารทะเล หรือนำมาวัดเพื่อคัดแยกความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล เป็นต้น จุดเด่นสำคัญที่ทำให้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ ได้รับความนิยมนำมาพัฒนาเป็นเครื่องมือวัด คือ การมีโครงสร้างและหลักการทำงานไม่ซับซ้อน ออกแบบและสร้างง่ายในราคาไม่แพง สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดได้หลากหลายชนิด

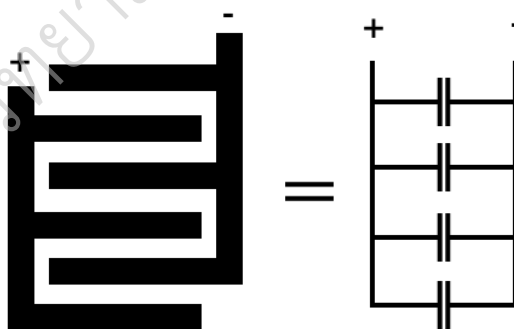
อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กโทรด (Interdigital Electrode) เป็นอิเล็กโทรดแบบค่าความจุไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง โดยการออกแบบให้วางแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ แทนการวางแผ่นตัวนำในแนวขนานเหมือนตัวเก็บประจุ ทำให้มีโครงสร้างเป็นขึ้นเดียวกัน สิ่งที่เกิดขึ้น คือ ตัวเก็บประจุยังคงมีการสะสมประจุ และสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ แต่ค่าความจุก็จะลดลงจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น

แสดงดังภาพประกอบ 60



ภาพประกอบ 60 รูปแบบของการเกิดสนามไฟฟ้าเมื่อแยกตัวนำออกจากกันในแนวระนาบ
 ที่มา : Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P.,
 & Jindapetch, N., (2014)

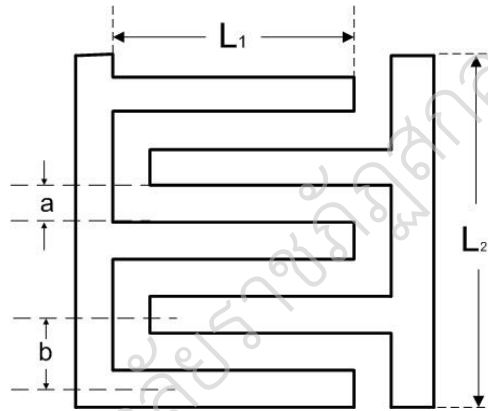
วิธีการทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้นั้น อาศัยการวางแผ่นตัวนำต่อสลับไปมาของ ขั้วบวกและขั้วลบ คล้ายหริสองอันวางทับกัน จึงเกิดค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน เหมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน อีกประการสำคัญ ผลจากการแยกแผ่นตัวนำออก ในลักษณะนี้ทำให้สามารถวางวัสดุไดอิเล็กทริกได้หลายขนาด โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของ ตัวเก็บประจุใหม่ รูปแบบนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะทำเป็นตัววัด และมีการกำหนดตัวที่ใช้วัดชนิดนี้ ว่า IDC ดังภาพประกอบ 61



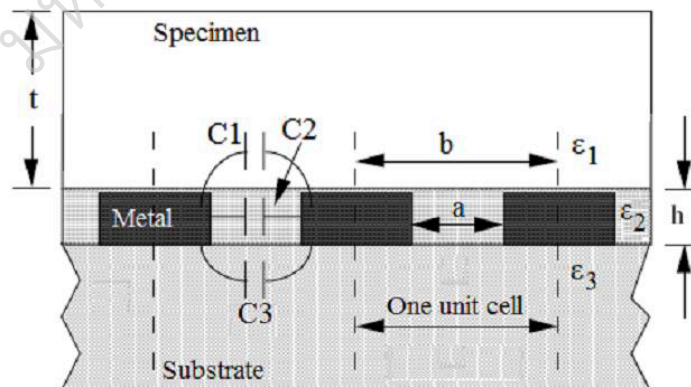
ภาพประกอบ 61 วงจรเสมือนของอินเตอร์ดิจิทัลเล็กโตรด
 ที่มา : ธิตินันท์ ตะเกาน้อย, 2012

Angkawisitpan, N., & Manasri, T. J. M. S. R. (2012, pp. 8-13) กล่าวถึงสมการ การออกแบบ โครงสร้างดังภาพประกอบ 62 และ 63 เริ่มต้นจากหาค่า C_{UC} โดยมีองค์ประกอบ ϵ_0

คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (Permittivity of free Space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัด/เมตร (F/m), ϵ_1 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (The relative Permittivity) ของวัสดุที่ใช้ นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน, ϵ_2 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดง อิเล็กโทรด และ ϵ_3 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง, K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดูลัส (Elliptic Integrals of Modulus) โดยมี a เป็นระยะห่างของซี่ b เป็นระยะความกว้างของอิเล็กโทรด หลังจากนั้นเป็นการหาค่าการเก็บประจุทั้งหมดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์ ดังสมการ (2.75 – 2.78)



ภาพประกอบ 62 รูปแบบของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิเจทัล



ภาพประกอบ 63 แนวตัดโครงสร้างของตัวรับรู้ระดับของเหลวค่าการเก็บประจุอินเตอร์ดิเจทัล

$$C = C_{UN}(N-1)L_1 \quad (2.75)$$

$$C_{UC} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.76)$$

$$C_1 + C_2 = \varepsilon_0 \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right) \frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right)}{K \left(\frac{a}{b} \right)} \quad (2.77)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{h}{a} \quad (2.78)$$

โดยที่

C คือ ค่าการเก็บประจุทั้งหมดของอิเล็กโทรด

C_{UC} คือ ค่าการเก็บประจุของอิเล็กโทรด 1 คู่

N คือ จำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กโทรด

L_1 คือ ความยาวของซี่อิเล็กโทรดแต่ละอัน

a คือ ระยะห่างระหว่างซี่

b คือ ระยะความกว้างระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ε_0 คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (permittivity of free space) มีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (F/m)

ε_1 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ใช้นำมาทดสอบ เช่น อากาศ น้ำ น้ำมัน

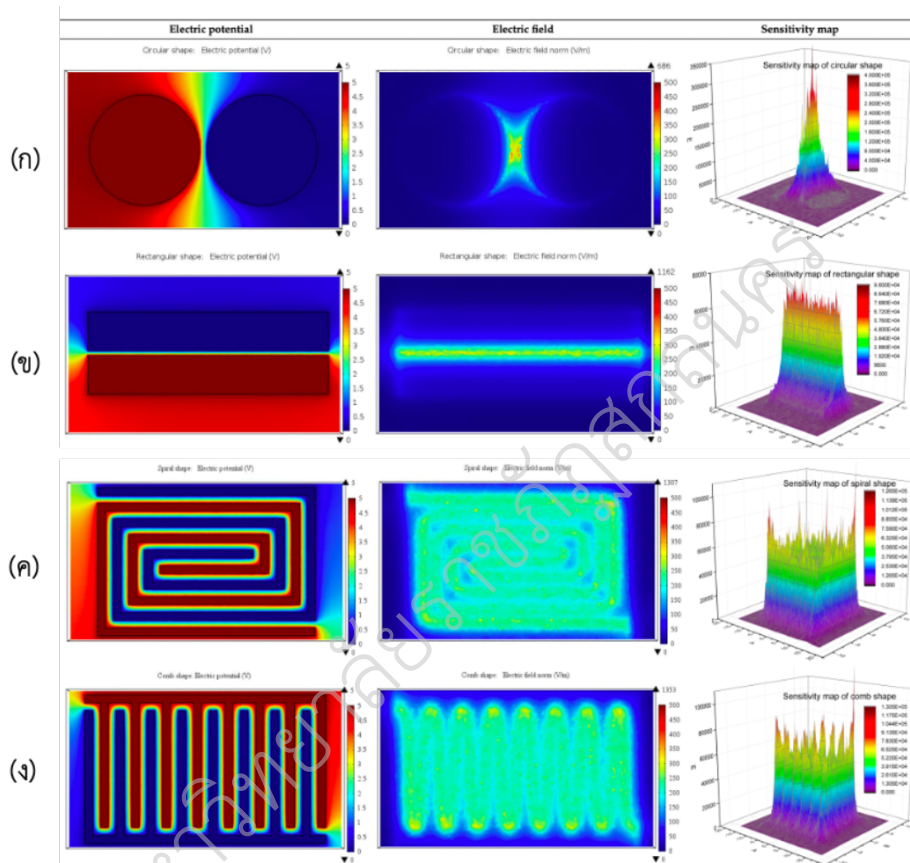
ε_2 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างทองแดงอิเล็กโทรด

ε_3 คือ ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

K คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส

Ye, Y., Deng, J., Shen, S., Hou, Z., & Liu, Y. (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการใหม่สำหรับการตรวจจับระยะใกล้ของเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ โดยใช้ระบบคาปาซิทีฟเซนเซอร์แบบระนาบขนาดใหญ่ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงโดยที่ขนาดของเซนเซอร์แต่ละตัว คือ 31 เซนติเมตร (cm) X 19 เซนติเมตร (cm) การเปลี่ยนแปลงของความจุกับระยะทางนั้นเกิดจากอิเล็กโทรดคู่หนึ่ง

ที่อยู่ในเซ็นเซอร์ที่มีลักษณะเป็นเกลียวและแบบซี่หวีจะมีประสิทธิภาพเกี่ยวกับความไวดีกว่าและมีช่วงของไดนามิกมีมากกว่ารูปทรงสามเหลี่ยมผืนผ้าและทรงกลม แสดงได้ดังภาพประกอบ 64

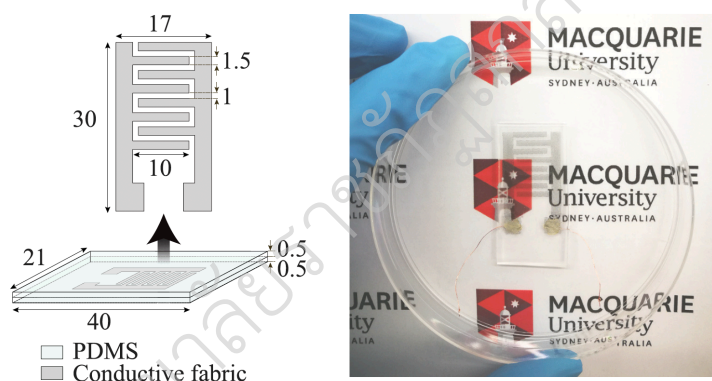


ภาพประกอบ 64 ผลของการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในพื้นที่ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (ก) รูปทรงกลม; (ข) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ค) รูปทรงเกลียว และ (ง) รูปทรงซี่หวี

ที่มา : Ye, Y., Deng, J., Shen, S., Hou, Z., & Liu, Y., 2016

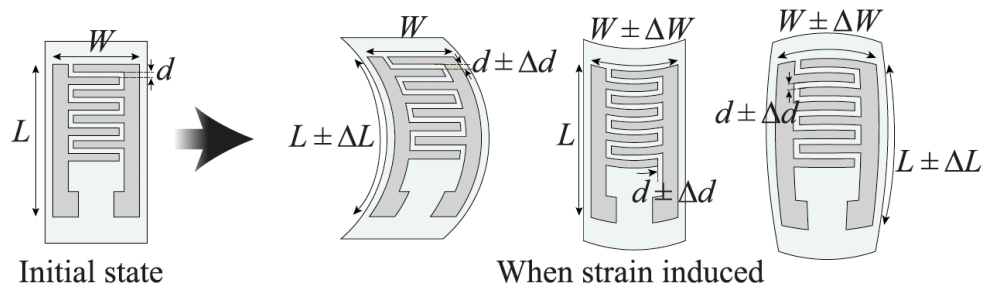
Nag, A. et al. (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล : การใช้งานเกี่ยวกับชีวการแพทย์ สภาวะแวดล้อม และอุตสาหกรรม โดยได้นำวิธีการใหม่ในการสร้างตัวรับรู้เพื่อตรวจวัดความเครียดแบบโปร่งใสที่มีความยืดหยุ่น โดยการนำผ่านไฟฟ้าที่โปร่งใสกับโพลีไธเมทิลไซ-

ลอกเซน (PDMS) ผ่านการประกอบแบบที่ไม่ซับซ้อน โดยที่ผ่านไฟฟ้าแบบโปร่งใสจะทำหน้าที่เป็น อิเล็กโทรด ในขณะที่ PDMS ทำหน้าที่เป็นทั้งชั้นซับสเตรตและตัวเคลือบในการออกแบบและการ สร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคนเชียล (IDT) ตัวรับรู้ที่สร้างจะผ่านการกำหนดคุณลักษณะด้าน ความโปร่งใสและคุณสมบัติทางกลไฟฟ้า ซึ่งตัวรับรู้ดังกล่าวมีความโปร่งใสทางแสงสูงประมาณ 70% และให้ผลลัพธ์เป็นที่ดีในการนำไปใช้ในการตรวจจับทางกายภาพ รวมถึงการตรวจสอบการ เคลื่อนไหวของส่วนต่าง ๆ ของร่างกายและการตรวจจับแบบสัมผัส วิธีการดังกล่าวมีความเป็นไปได้ ที่จะพัฒนาเป็นตัวรับรู้ความเครียดที่ยืดหยุ่นและโปร่งใสสำหรับการนำไปใช้งานที่สวมใส่ได้ ในการ สร้างต้นแบบตัวรับรู้ที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ต้นแบบที่สร้างแสดงดังภาพประกอบ 65



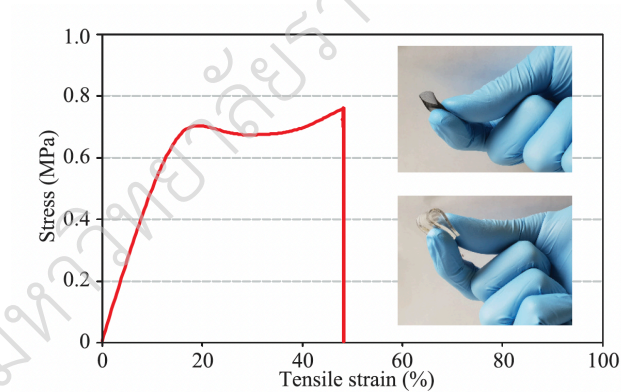
ภาพประกอบ 65 ตัวรับรู้แบบโปร่งใสอิงตามสื่อนำไฟฟ้าที่ฝังอยู่ในผ้าด้วยวิธีการ PDMS
ที่มา : Nag, A. et al., 2018

โดยปกติของตัวรับรู้สามารถเกิดความเครียดขึ้นได้ แสดงดังภาพประกอบ 66 ที่ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดโดยรวมของตัวรับรู้ เช่น เมื่อตัวรับรู้อยู่ในแกนเดียวกันเกิดการโก่งงอ ขนาดของตัวรับรู้จะเกิดเปลี่ยนแปลงประกอบด้วย ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และความยาว (L) หรือความกว้าง (W) ของตัวรับรู้ เกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ ($\Delta d, \Delta L, \Delta W$) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเช่นเดียวกับรีแอคแตนซ์ของตัวรับรู้ ทำให้อิมพีแดนซ์ (Z) ของตัวรับรู้จึงเปลี่ยนไปตามฟังก์ชันของความเครียดที่ใช้



ภาพประกอบ 66 ผลกระทบของความเครียดเหนี่ยวนำที่มีต่อขนาดโดยรวมของตัวรับรู้
ที่มา : Nag, A. et al., 2018

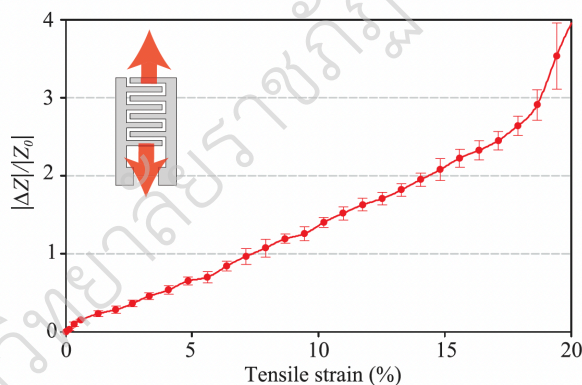
การตอบสนองต่อความเครียดของตัวรับรู้ที่สร้างขึ้น สิ่งที่เราได้เข้าไปแสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของผ้านำไฟฟ้า และตัวรับรู้ผ้าที่สร้างขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 67



ภาพประกอบ 67 ผลกระทบของความเครียดเหนี่ยวนำที่มีต่อขนาดโดยรวมของตัวรับรู้
ที่มา : Nag, A. et al., 2018

จากการทดสอบความยืดหยุ่นของตัวรับรู้ ด้วยการผ่านการวัดความต้านทานแรงดึงโดยใช้เครื่อง EXCEED E42 Universal Test System จาก MTS ตัวรับรู้ได้รับการยืดด้านข้างอย่างแน่นหนาเพื่อลดการเคลื่อนไหว โดยแสดงบริเวณยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีความเค้นสูงถึง 18% ตามด้วยบริเวณ

ที่ไม่เป็นเชิงเส้นจนเกิดความเสียหายที่ประมาณ 48.7% ตามกฎของฮุก ยังโมดูลัส (Young Modulus) ของตัวรับรู้กำหนดไว้ที่ 4.12 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งสูงกว่าค่าโมดูลัสของ PDMS เล็กน้อย ความยืดหยุ่นของเนื้อผ้าต่ำกว่า PDMS สามารถอธิบายความแตกต่างนี้ได้ว่า เมื่อต่อตัวรับรู้กับ LCR มิเตอร์ ภายใต้การยืด ตัวรับรู้จะแสดงการตอบสนองอิมพีแดนซ์เชิงเส้น ($r^2 = 0.98$) ที่ความถี่อยู่ในช่วง 0 – 18% โดยป้อนสัญญาณ 1 โวลต์ (V) RMS, ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต (kHz) สลับกัน ซึ่งการตอบสนองอิมพีแดนซ์ของตัวรับรู้แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 2.66 โดยสาเหตุหลักมาจากความจุที่ลดลงเนื่องจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำอินเตอร์ดิจิทัลที่กว้างขึ้น ในระหว่างการยืด การเปลี่ยนแปลงความจุที่วัดได้สัมพันธ์กับค่าเริ่มต้นนำไปสู่ค่าแฟกเตอร์เกจที่คำนวณได้ (GF) ที่ประมาณ 0.87 สำหรับตัวรับรู้ ค่า GF นี้สอดคล้องกับค่าที่รายงานสำหรับตัวรับรู้ความเครียดแบบยืดหยุ่นแบบคาปาซิทีฟอื่น ๆ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1



ภาพประกอบ 68 อัตราการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เฉลี่ยของตัวรับรู้ในการตอบสนองต่อแรงดึง
ที่มา : Nag, A. et al., 2018

Ragolia, M. A. et al. (2021) ได้นำเสนอเซนเซอร์แบบคาปาเนียร์แบบยืดหดได้ ที่มีต้นทุนต่ำ สำหรับการตรวจวัดระดับของเหลวโดยใช้การพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU) ที่มีจำหน่ายทั่วไปและยังใช้วัสดุนำไฟฟ้า ใช้กระบวนการผลิตแบบเส้นใยรวม (FFF) ในการทำเป็นฐานเซ็นเซอร์มีความเป็นเส้นตรงสูงและสามารถทำซ้ำได้ดี

Korkua, S. K., & Sakphrom, S. (2020) ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของคาปาซิทีฟ ว่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดคาปาซิทีฟ ไม่ได้ใช้เกณฑ์ของความชื้นที่เหลืออยู่

ของของแข็งโดยตรง แต่ใช้คุณลักษณะทางกายภาพของของแข็ง ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของการวัดค่าความจุนั้นขึ้นอยู่กับทฤษฎีความจุของแผ่นตัวนำไฟฟ้าสองแผ่น และลักษณะที่ง่ายที่สุดของตัวเก็บประจุ คือ ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ความจุ คือ ความสามารถของตัวเก็บประจุในการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดขนานสองตัวที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (d) และพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (A) ค่าความจุจะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (A) แต่จะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (d) โดยได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.79)$$

เมื่อ

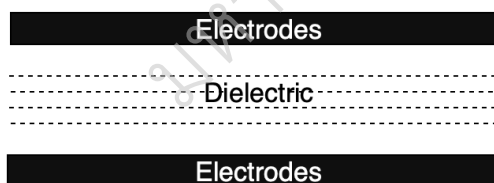
C คือ ค่าความจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)

ϵ_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ในสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$)

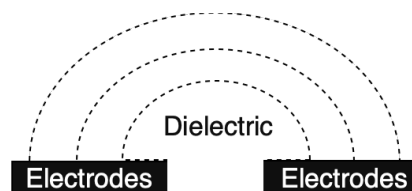
ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีหน่วยเป็นฟารัดต่อเมตร (F/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเมตร (m)



(ก) อิเล็กโทรดแบบแผ่นขนาน



(ข) อิเล็กโทรดร่วมแนวระนาบ

ภาพประกอบ 69 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
ที่มา : Korkua, S. K., & Sakphrom, S., 2020

อินเทอร์ดิทอลคาปาซิเตอร์ หรือ IDC หรือตัวเก็บประจุแบบชีวีวี่ นั้นสอดคล้องกับการวางแผนตัวนำของขั้วบวกและขั้วลบสลับไปมา ที่มีลักษณะคล้ายหีสองอันวางทาบกัน ใช้เป็นอิเล็กโตรดสำหรับตรวจวัดความจุไฟฟ้าของสารหรือวัสดุที่ต้องการทดสอบ การทำงานอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุระหว่างขั้วเมื่อระดับของไดอิเล็กทริกที่เกาะบนผิวของอิเล็กโตรดเปลี่ยนแปลง และเมื่อความกว้างของแผ่นตัวนำ (a) ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ (b) ความยาวของแผ่นตัวนำ (L) และแรงกดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แรงกดแบบอินเทอร์ดิทอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่สร้างขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำสารไดอิเล็กทริกใดมาใช้เนื่องจากใช้แรงกดในการทดสอบ

การวัดแรงกด

การวัดแรงกด (Pressure Measurement) เป็นการวัดค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดของแรง (F) ที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ (A) ไต ๆ โดยแรงกด (Pressure) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคัล (Pa) (การวัดแรงดัน, 2019, ออนไลน์)

1. การเลือกใช้เครื่องมือวัดแรงกด ควรคำนึงถึง

1.1 ย่านความดัน (Range)

1.2 ชนิดหรือรูปแบบของแรงกดแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1.2.1 แรงกดหรือแรงดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure)

1.2.2 แรงกดหรือความดันเกจ (Gauge pressure)

1.2.3 แรงกดหรือความดันแตกต่างหรือความดันดิฟเฟอเรนเชียล (Differential pressure)

1.2.4 แรงกดหรือความดันต่ำกว่าบรรยากาศหรือสุญญากาศ (Vacuum)

1.3 ชนิดและคุณสมบัติของตัวกลางที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันอาจอยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลว โดยการพิจารณาคุณลักษณะของตัวกลางนั้น ๆ เช่น ความบริสุทธิ์ของของไหล การมีสารแขวนลอยปะปน การทำปฏิกิริยา และการกัดกร่อน เป็นต้น

2. การวัดแรงกดด้วยเครื่องมือวัด แบ่งตามหลักการทำงานเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1 กลุ่มที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกล เช่น บารอมิเตอร์ (Barometer) มาโนมิเตอร์ (Manometer) บัวร์ดอง (Bourdon gauge) ไดอะแฟรม (Diaphragm) และเบลโลว์ (Bellow) เป็นต้น

2.2 กลุ่มที่ทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าร่วมกับทางกล สัญญาณทางด้านเอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ทรานสดิวเซอร์วัดแรงดันชนิดเปลี่ยนค่าความจุ ทรานสดิวเซอร์วัดแรงกดชนิดเปลี่ยนค่าความเหนียวน้ำ และทรานสดิวเซอร์วัดแรงกดชนิดเปลี่ยนค่าความต้านทานหรือชนิดสเตรนเกจ เป็นต้น การวัดแรงดันสามารถนำไปใช้วัดค่าตัวแปรอื่นได้ เช่น

2.2.1 การวัดอัตราการไหล (Flow Measurement) ด้วยแผ่นออริฟิส (Orifice Plate) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการวัดค่าแรงดันแตกต่าง (Differential pressure)

2.2.2 การวัดระดับ (Level Measurement) ของเหลวในภาชนะโดยใช้หลักการวัดแรงดันสถิต (Static head)

2.2.3 การวัดอุณหภูมิ (Temperature Measurement) ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดเปลี่ยนการขยายตัวเป็นแรงดัน (Pressure Thermometer) เป็นต้น

การวัดแรงกดนั้นจะใช้เครื่องวัดแรงกด เครื่องวัดแรงดึง ซึ่งสามารถเรียกชื่อได้หลากหลาย เช่น เครื่องวัดแรงดึง แรงกด (Force Gauge หรือ Push Pull Gauge) โดยการวัดแรงกดนั้นเป็นการทดสอบด้านแรงผลักหรือดันขึ้นงานนั้น ๆ เพื่อหาค่าแรงต้านทั้งแรงดึงและแรงกด เครื่องที่ใช้ในการวัดหรือทดสอบมีทั้งแบบอนาล็อก (Analog) และแบบดิจิทัล (Digital) สำหรับการวัดแรงกดในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง Force Tester MCT series รุ่น MCT-2150 ในการกดตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่สร้างขึ้น จากนั้นใช้ LCR Meter รุ่น LCR-6100 ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในตัวรับรู้แรงกดแบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่นำมาทดสอบ

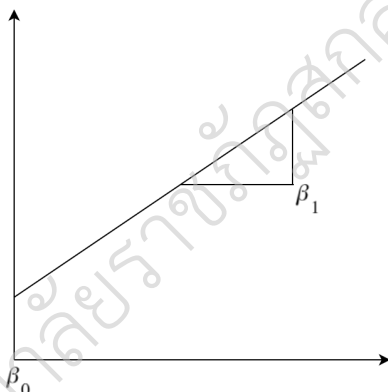
การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) (2541) (บุญชม ศรีสะอาด, 2541) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปร หลักในการวิเคราะห์การถดถอย นั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อการประมาณค่าของตัวแปรตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (Dependent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y โดยอาศัยข้อมูลจาก

ตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งเรียกว่าตัวแปรอิสระ(Independent Variable) ที่นิยมเขียนแทนด้วย X หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าใช้ข้อมูลหรือสารสนเทศจากตัวแปร X เป็นเกณฑ์ในการประมาณค่าของตัวแปร Y ถ้าใช้ตัวแปร X เพียงตัวแปรเดียวในการประมาณค่าตัวแปร Y ความสัมพันธ์ของ Y และ X จะเป็นเชิงเส้นตรง ที่เรียกว่าการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

1. ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Model) สมมติว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กัน ในภาพประกอบ 70 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ แสดงดังสมการ (2.80)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.80)$$

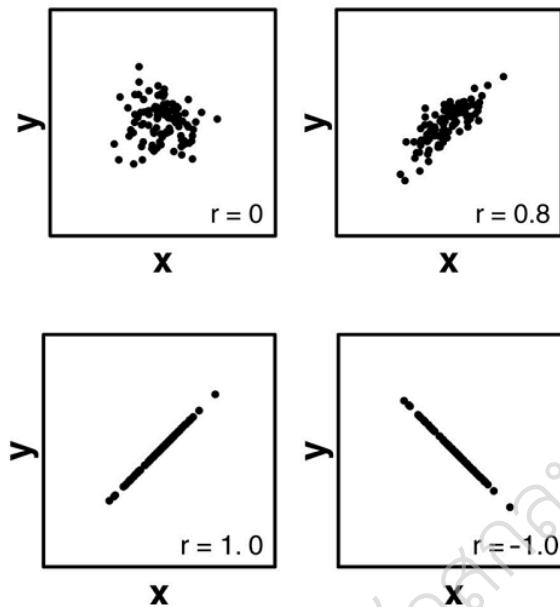


ภาพประกอบ 70 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ที่มา : บุญชม ศรีสะอาด, 2541

โดยที่ β_0 และ β_1 เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร (Population Regression Coefficient) จะถือว่าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า นั่นคือ β_0 และ β_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเรียกสมการ (2.80) ว่าตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Y กับ X ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือไม่ จะเป็นการนำค่าของตัวแปร Y กับ X พล็อตเป็นจุด โดยแผนภาพประกอบได้เรียกว่าแผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) แสดงภาพประกอบ 71



ภาพประกอบ 71 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)

ที่มา : บุญชม ศรีสะอาด, 2541

เมื่อทราบค่าของตัวแปร Y กับ X ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ขึ้นต่อไปจะทำการประมาณตัวแบบด้วยสมการการถดถอย (Regression Equation) ซึ่งแสดงในสมการ (2.81)

$$\hat{Y} = a + bX \quad (2.81)$$

โดยที่ a และ b เป็นตัวประมาณแบบกำลังสองต่ำสุด (Least Square Methods) ของ β_0 และ β_1 ตามลำดับ กล่าวคือ ทำการหา a และ b ที่ทำให้

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum e_i^2 \quad \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (2.82)$$

ค่าของ a และ b จะเป็นค่าประมาณของ β_0 และ β_1 ตามลำดับ จึงเรียก a และ b ว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวอย่าง (Sample Regression Coefficient) โดยที่

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (2.83)$$

และ

$$b = \frac{\Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y)/n}{\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}} \quad (2.84)$$

เมื่อกำหนดให้

$$S_{XX} = \Sigma(X - \bar{X})^2 = \Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{n} \quad (2.85)$$

$$S_{XY} = \Sigma(X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) = \Sigma XY - \frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n} \quad (2.86)$$

$$S_{YY} = \Sigma(Y - \bar{Y})^2 = \Sigma Y^2 - \frac{(\Sigma Y)^2}{n} \quad (2.87)$$

สมการที่ได้

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.88)$$

2. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ β_0 และ β_1

ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ β_0 และ β_1 จะต้องมีข้อสมมติเกี่ยวกับ ε ดังนี้

$\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$ การประมาณค่า σ^2 เป็นขั้นตอนแรกในการทดสอบสมมติฐาน (และสร้างช่วงของความเชื่อมั่น) ที่จะกล่าวถึงในลำดับถัดไป จะได้ตัวประมาณที่ไม่เอนเอียงของ σ^2 แสดงในสมการ (2.89)

$$S^2 = \frac{SSE}{n-2} \quad (2.89)$$

รากที่สองของ S^2 คือ S บางครั้งอาจเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณ หรือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย (Standard Error of Estimate หรือ Standard Error of Regression) แสดงในสมการ (2.90)

$$S^2 = \frac{S_{YY} - bS_{XY}}{n - 2} \quad (2.90)$$

การทดสอบสมมติฐานและสร้างช่วงความเชื่อมั่นเกี่ยวกับ β_0 ในการทดสอบสมมติฐาน $H_0 : \alpha = 0$ และ $H_1 : \alpha \neq 0$ สถิติที่ใช้ คือ t-test

$$t = \frac{a - 0}{S_a} \text{ มีการแจกแจงแบบ } t \text{ ที่มีองศาแห่งความอิสระ } V = n - 2$$

3. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

เมื่อทราบความหมายของการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ตามสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r ดังแสดงในสมการ (2.91)

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (2.91)$$

ซึ่งแสดงได้ว่า

$$r = \sqrt{R^2} \quad (2.92)$$

การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวรับรู้

1. ค่าความไว (Sensitivity) ที่เป็ค่าที่เกิดจากของค่าความจุทางไฟฟ้าหลังการก่ดกับค่าความจุทางไฟฟ้าก่อนการก่ด และผลต่างของแรงก่ดที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในสมการ (2.70) (Qin, R. et al., 2021)

$$S = \left| \frac{\Delta C}{\Delta P} \right| \quad (2.93)$$

เมื่อ

S คือ ค่าความไว (pF/N)

ΔC คือ ผลต่างค่าความจุทางไฟฟ้าของแรงกด

ΔP คือ ผลต่างของแรงกด

2. ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ ค่าที่บอกความสามารถของตัวรับรู้ว่าสามารถอ่านค่าที่ได้เปรียบเบนไปจากค่าที่แท้จริงมากหรือน้อย ดังแสดงในสมการ (2.94 – 2.98) (Aduen, J.F, et al., 2011)

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Error: e) คือ ค่าปริมาณความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าวัด

$$e = X_t - X_m \quad (2.94)$$

เมื่อ

e คือ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Error)

X_t คือ ค่าจริง (true Value)

X_m คือ ค่าที่ได้จากการวัด

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) หรือ PercentError (%Error) คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดได้จากค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เปรียบเทียบกับค่าจริง

$$\%Error = 1 - \left| \frac{X_t - X_m}{X_t} \right| \times 100\% \quad (2.95)$$

ค่าความถูกต้อง หรือความแม่นยำ (Accuracy : A) คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากน้อยเพียงใด

$$A = 1 - \%Error \quad (2.96)$$

เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (% Acc)

$$\%Acc = A \times 100\% \quad (2.97)$$

$$\%Acc = 100\% - \%Error \quad (2.98)$$

3. ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ ความสามารถของตัวรับรู้ในการเกิดซ้ำ (ค่าเดิม) ของการตรวจวัดหลาย ๆ ครั้ง ดังแสดงในสมการ (2.99) (มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, ม.ป.ป.)

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= 1 - \left| \frac{X_n - \overline{X_n}}{\overline{X_n}} \right| \\ &= \overline{X_n} = \frac{\sum X}{n} \end{aligned} \quad (2.99)$$

เมื่อ

Precision	คือ ค่าความแม่นยำ
X_n	คือ ค่าความจุทางไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละครั้ง
$\overline{X_n}$	คือ ค่าเฉลี่ยของความจุทางไฟฟ้า
n	คือ จำนวนครั้งของการทดสอบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qin, R. et al. (2021) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวัดแรงดันแบบโค้งงอที่มีประสิทธิภาพสูง โดยนำไปประยุกต์ใช้กับผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้อัจฉริยะ แต่ก็ยังเป็นความท้าทายที่ดีในการสร้างเซ็นเซอร์คาปาซิทีฟด้วยค่าสูง ความไวต่อการตอบสนอง โดยการใช้วัสดุ MXene/polyvinylpyrrolidone (PVP) โดยอิเล็กโทรดระหว่างดิจิทัล โดยการเพิ่ม จำนวนอิเล็กโทรดระหว่างชั้น และการเลือกชั้นไดอิเล็กทริกที่เหมาะสม ความไวของเซ็นเซอร์ตัวเก็บประจุ สามารถปรับปรุงได้ เซ็นเซอร์เก็บประจุนี้ ที่ใช้ MXene/PVP มีความไวสูง ($\sim 1.25 \text{ kPa}^{-1}$) การตรวจจับต่ำขีดจำกัด ($\sim 0.6 \text{ Pa}$) ช่วงการตรวจจับกว้าง (สูงสุด 294 kPa) เวลาตอบสนองและการคืนสภาพประกอบรวดเร็ว ($\sim 30/15 \text{ ms}$) และระบบกลไก ความเสถียร 10,000 รอบ เซ็นเซอร์ที่นำเสนอนี้สามารถใช้กับแอปพลิเคชันการตรวจจับแรงดันต่าง ๆ เช่น การกอดนิ้ว การวัดชีพจรที่ข้อมือ การหายใจ การกลืน และการรู้จำคำพูด งานนี้จัดให้ใหม่ วิธีการใช้อิเล็กโทรด

ระหว่างชั้นเพื่อสร้างเซ็นเซอร์เก็บประจุที่มีความไวสูงพร้อมการใช้งานที่มีแนวโน้มมาก แนวโน้มในเซ็นเซอร์ที่ยืดหยุ่นและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้

Thouti, E. et al. (2022) ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างภายในของเซ็นเซอร์เก็บประจุสำหรับวัดแรงดันกดจากแผ่นเรียบประกบกันเป็นแบบโดมที่สามารถยืดหยุ่นได้โดยสร้างมาจากซิลิกอน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนอง โดยนำไปประยุกต์ใช้กับผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีความหนาของเซ็นเซอร์ที่ ประมาณ 81 ไมโครเมตร เซ็นเซอร์ไม่มีชั้นเคลือบมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเซ็นเซอร์ที่มีชั้นเคลือบในช่วงความดันกว้าง (< 500 kPa) แสดงความจุสัมพัทธ์ที่เสถียร ($\Delta C/C_0$) สูงถึง 1,000 รอบ และสามารถรับรู้แรงดันต่ำ (~ 55 Pa) เซ็นเซอร์ที่พัฒนาแล้วยังใช้สำหรับการตรวจสอบรูปคลื่นชีพจรของหลอดเลือดแดงในร่างกายเมื่อติดตั้งอย่างถูกต้องบนข้อมือ การทดสอบการยืดเกาะด้วยแรงเหวี่ยงเดียวของเซ็นเซอร์แสดงว่าเซ็นเซอร์ไม่มีชั้นเคลือบแสดงความเค้นเฉือนสูงสุด ~ 2.7 นิวตัน (ก่อนการแตกหัก) เมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ที่มีชั้นเคลือบ (~ 1.9 นิวตัน)

Liu, F. et al. (2022) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์เก็บประจุสำหรับวัดแรงดันที่ปรับปรุงการยืดตัวและความซับซ้อนของกระบวนการผลิตในโครงสร้างทางจุลภาคของเซ็นเซอร์บนพื้นฐานของซิลิกอนที่สามารถยืดหยุ่นและมีรอยย่น โดยเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความไวสูงถึง 2.13 kPa^{-1} และเวลาตอบสนองประมาณ 0.1 วินาที ในระหว่างการทดสอบการขนถ่าย ตัวเก็บประจุแบบยืดหยุ่น เซ็นเซอร์แสดงประสิทธิภาพการตรวจจับที่เสถียรและการทำซ้ำได้ดีโดยมีผลฮิสเทรีซิสเล็กน้อย งานวิจัยนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์แบบยืดหยุ่นในสาขาต่าง ๆ เช่น หุ่นยนต์แบบนิ่ม ผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ และการเฝ้าติดตามทางการแพทย์ในอนาคต โดยในงานนี้มีจุดเด่นที่กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและมีความแม่นยำสูงง่ายต่อการขยายกำลังการผลิตในอุตสาหกรรม

Yang, C. R. et al. (2022) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์เก็บประจุสำหรับอุปกรณ์สวมใส่ที่ใช้วัสดุกลุ่มเพียโซอิเล็กทริกเจอกับวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์โดยงานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่การเตรียมวัสดุด้วยเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบเข้ากันแบบแซนวิช โดยเซ็นเซอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถรับความจุได้เพิ่มขึ้น ความไวในการตอบสนองดีขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปและการคอมโพสิตของเส้นใยภายในเป็นรูปแบบทรงกระบอกขนาดเล็ก โดยมีความไวเพิ่มขึ้นสูงถึง 5 kPa^{-1} การตอบสนองที่รวดเร็วและเวลาในการปล่อย 25 และ 50 มิลลิวินาที (ms) ชีตจำกัดการตรวจจับต่ำสุดที่ 0.11 ปาสคาล (Pa) และมากกว่า 10,000 ครั้ง และการทดสอบรอบการกดทับ/รอบการดัด 5,000 ครั้ง โดยไม่มีการลดทอนสัญญาณใด ๆ เพื่อความทนทานสูงและ ความน่าเชื่อถือสูง ผลการศึกษานี้พิสูจน์

ว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพดีเยี่ยมและนำไปใช้ได้ บนอุปกรณ์สวมใส่สำหรับการตรวจสอบชีพจรของมนุษย์และการตรวจจับเสียง

George, S. P., Issac, J., & Philip, J. (2018, pp. 71-78) ได้ศึกษาเซ็นเซอร์อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟที่มีรูปทรงระนาบสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย การเปลี่ยนแปลงในรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างทรานสดิวเซอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟแบบระนาบนั้น แสดงการเปลี่ยนแปลงในการตอบสนองในแง่ของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุที่สอดคล้องกัน ในงานนี้ได้นำเสนอการหาประสิทธิภาพการตอบสนองของโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิทีฟ โดยพิจารณาจากความแตกต่างในรูปทรงเรขาคณิตของรูปแบบหวีที่เจาะทะลุระหว่างกัน รูปทรงเรขาคณิตทั้งหมดภายใต้การทดสอบนี้ถูกสร้างขึ้นตามขั้นตอนเดียวกันบนแผงวงจรพิมพ์ที่ทำจาก FR-4 ค่าความจุสำหรับการกำหนดค่าแต่ละรายการได้รับการวัดโดยตรง ค่าความจุสำหรับการกำหนดค่าเดียวกันได้รับการประเมินโดยการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ระยะห่างระหว่างนิ้ว การอนุญาตสัมผัส และความหนาปานกลาง มีความหลากหลายในการจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ มีการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้และค่าจำลองและแสดงผลลัพธ์ ผลลัพธ์ทำให้สามารถทำนายค่าความจุและประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ของโครงสร้าง IDC ประเภทนี้ได้ ขั้นตอนนี้สามารถปรับให้เข้ากับโครงสร้างประเภทอื่นได้เช่นกัน

Rachmanita, R. E. (2019, pp. 55-63) ได้นำเสนอผลการศึกษาค่าความจุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอล (IDCs) ในแบบจำลอง 3 แบบ ฟิล์มบางของ IDC ทั้งสามแบบได้รับการออกแบบและประดิษฐ์บนบอร์ด PCB มาตรฐาน FR-4 โดยใช้ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ฟิล์มบางของ IDC ทั้งสามแบบมีวัสดุอิเล็กโทรด จำนวนอิเล็กโทรด ความยาว และความกว้างของอิเล็กโทรดเหมือนกัน แตกต่างกันที่โครงสร้างอิเล็กโทรด วัสดุอิเล็กโทรดเป็นสีเงิน (Ag) ความจุ ความต้านทาน อิมพีแดนซ์ และความนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของ IDC ถูกวัดและวิเคราะห์โดย LCR-6100 ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างอิเล็กโทรดมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของ IDC ฟิล์มบางของ IDCs แบบใหม่แบบที่ 1 แบบที่ 2 และแบบที่ 3 ที่แสดงค่าความจุสูงในช่วงความถี่ 1 – 100 กิโลเฮิร์ต (kHz) เมื่อเทียบกับ IDC ทั่วไป

De Guzman, S. et al. (2022) ได้ทำการพัฒนาระบบวัดแรงกดฝ่าเท้าที่ถูกติดตั้งภายในรองเท้าสำหรับเด็ก โดยในแต่ละช่วงอายุของเด็กจะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเท้า ซึ่งจะมีผลต่อรูปแบบของเท้าและกิจกรรมต่าง ๆ ของเท้าที่เกิดขึ้น โดยในการเก็บข้อมูลแบบเดิมนั้นจะใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงจึงได้เสนอตัวรับรู้แรงกดแบบคาปาซิทีฟที่มีคาราถูกและมีความน่าเชื่อถือมาใช้

ทดแทน โดยตัวรับรูปแบบคาปาซิทีฟนี้มีความเหมาะสมในการนำไปวางไว้ในร่องเท้าที่มีลักษณะคล้ายกับพื้นรองเท้าของเด็ก ซึ่งสามารถที่จะระบุการเปลี่ยนแปลงและรูปแบบที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในเท้าของเด็กได้ ในการศึกษาพบว่าตัวรับรับรู้แสดงฮิสเทอรีซิสที่ไม่ขึ้นกับอัตราในการประเมินค่าแรงกด สิ่งนี้ทำให้สามารถพัฒนารูปแบบการสอบเทียบได้ ระบบสามารถเลียนแบบระบบการวัดแรงดันฝ่าเท้าที่มีราคาแพงกว่าที่ความเที่ยงตรงต่ำกว่า เทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถใช้เพื่อช่วยเหลือแพทย์ นักวิจัย และนักออกแบบรองเท้าที่สนใจว่าการกระจายแรงกดเปลี่ยนจากทารกเป็นเด็กวัยหัดเดินอย่างไร

Sayyed Faizan Ali & Nirupama Mandal (2019) ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งสัญญาณระดับอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบดิจิทัล พบว่าเทคนิคในการวัดระดับของเหลวอย่างง่ายและประหยัดที่ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการวัดระดับของของเหลวทุกชนิด ตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์ (IDC) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ขนาด 17.5 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร x 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 ใช้เป็นเซ็นเซอร์หลักในการทดสอบ โดยระดับของเหลวจะเป็นรูปแบบที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ การเปลี่ยนแปลงความจุดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้วงจรสะพานของ De Sauty (De sauty bridge) ซึ่งใช้ LCR Meter (MECO LCR999A) เป็นเครื่องมือในการวัด การทดสอบในครั้งนี้ใช้น้ำประเภทต่าง ๆ เช่น น้ำแร่ น้ำประปา น้ำกลั่น และน้ำจากแม่น้ำ จะเห็นได้ว่าเซ็นเซอร์นี้สามารถใช้ตรวจในการวัดระดับน้ำได้โดยไม่ขึ้นกับประเภทของน้ำที่นำมาทดสอบ เซ็นเซอร์ที่นำเสนอได้รับการพัฒนาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าผลการทดสอบข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามสมการและทฤษฎีที่นำมาใช้ สำหรับวัดระดับน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 15 เซนติเมตร ความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 12.8 มิลลิโวลต์ (mV)

Maddipatla, D. et al. (2017, pp. 1-4) ได้ศึกษาในการพัฒนาเซ็นเซอร์แรงกดแบบยืดหยุ่นชนิดใหม่ผ่านการพิมพ์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน ในการพัฒนาเซ็นเซอร์ความดันแบบยืดหยุ่นชนิดใหม่ด้วยวิธีการพิมพ์จากวัสดุคาร์บอน โดยที่เซ็นเซอร์ความดันแบบคาปาซิทีฟที่ใช้คาร์บอนแบบยืดหยุ่น (CNT) ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจจับแรงดันที่ใช้ต่างกัน เซ็นเซอร์นี้ถูกสร้างขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีน ซึ่งโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ที่เตรียมด้วยพริโพลีเมอร์ PDMS และสารบ่ม ที่ผสมในอัตราส่วน 10 : 1 ถูกนำมาใช้เป็นชั้นไดอิเล็กตริก ซึ่งอิเล็กโทรดจะถูกพิมพ์ลงโดยตรงด้วยหมึกนำไฟฟ้า CNT บน PDMS เซ็นเซอร์สามารถแยกความแตกต่างระหว่างแรงดันที่ใช้ จากทดสอบการตอบสนองของตัวเก็บประจุ พบว่าเซ็นเซอร์วัดแรงดันที่ใช้ CNT จะเกิด

การเปลี่ยนแปลงความจุ 8.2% เมื่อเปรียบเทียบกับความจุพื้นฐาน สำหรับแรงดันสูงสุดที่ตรวจจับได้ คือ 337 กิโลปาสกาล (kPa) การเปลี่ยนแปลงความจุเท่ากับ 0.021% ต่อ กิโลปาสกาล (kPa) และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.9971 การตอบสนองแบบคาปาซิทีฟแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ ในการใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็น CNT สำหรับการพัฒนาเซ็นเซอร์แรงดันที่มีประสิทธิภาพ ยืดหยุ่น และ คุ่มค่าสำหรับการใช้งานด้านการกีฬา การทหาร หุ่นยนต์ ยานยนต์ และชีวการแพทย์

Agarwala, S. et al. (2017, pp. 593-599) ได้ทำการออกแบบการประดิษฐ์และ คุณสมบัติของเซ็นเซอร์วัดความเครียดแบบไมโครเซนแนล โดยใช้วัสดุที่ยืดหยุ่น ด้วยการพิมพ์ สามมิติ ได้อธิบายถึงการออกแบบ การประดิษฐ์ และคุณสมบัติของเซ็นเซอร์วัดความเครียดแบบ ไมโครเซนแนลโดยใช้วัสดุที่ยืดหยุ่น โดยใช้วิธีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุหรือการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อสร้าง เซ็นเซอร์ด้วยวิธีที่ง่ายและประหยัดต้นทุน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพิมพ์ 3 มิตินั้นสามารถพิมพ์แบบที่ถูกต้อง ออกแบบที่มีความซับซ้อนได้อย่างง่ายดาย และสร้างวัตถุที่มีคุณสมบัติฝังตัวไมโครเซนแนลที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร จะถูกพิมพ์ลงไปในโครงสร้างของเซ็นเซอร์และเติมด้วยหมึก ซิลเวอร์นาโนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ อุปกรณ์ประดิษฐ์ได้รับการตรวจสอบความสามารถในการพิมพ์ และการยึดเกาะของวาล์ว ตามการออกแบบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและไมโครซีที จะเห็น ได้ว่าเซ็นเซอร์ที่พิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ 3 มิติสามารถวัดแรงดึงปกติ (ตั้งฉากกับช่อง) และในระนาบ (ขนานกับช่อง) และได้นำแท่นทดสอบที่สร้างขึ้นเองมาใช้ในการทดสอบ

Mak, K.W. & Hao, J. (2014, pp. 1-8) ได้ศึกษาถึงความก้าวหน้าสำหรับการวิเคราะห์ ลักษณะของอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แบบหลายชั้น พบว่าแบบจำลองการวิเคราะห์สำหรับการระบุ ลักษณะของอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แบบหลายชั้นโดยประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุแบบอินเตอร์ ดิจิตอลแบบหลายชั้น มักถูกจำลองโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ เป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน นอกจากการจำลองแล้วแบบจำลองการวิเคราะห์ที่เป็นฟังก์ชันยังให้วิธีที่สะดวกในการใช้งานเฉพาะ เช่น การกำหนดลักษณะของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก บทความนี้จึงเป็นการทบทวนในการที่จะพัฒนา ฟังก์ชันสำหรับแบบจำลองการวิเคราะห์ ซึ่งภาพรวมของเทคนิคความจุบางส่วนและเทคนิคการทำ แผนทีแบบสอดคล้องที่ใช้สำหรับการกำหนดฟังก์ชัน นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอแบบจำลองทั่วไป สามรูปแบบที่ใช้เทคนิคเหล่านี้ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงความแตกต่างของแต่ละรูปแบบและการใช้งาน ด้วยแบบจำลอง

Chowdhury, A. H., Jafarizadeh, B., Pala, N., & Wang, C. (2017) ได้ศึกษา เกี่ยวกับเซ็นเซอร์วัดแรงดันที่สวมใส่ได้แบบคาปาซิทีฟแบบ สำหรับการตรวจจับแบบสัมผัสและ

ไม่สัมผัสด้วยการตรวจสอบรูปคลื่นพัลส์ พบว่าการใช้โพลิเมอร์โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ที่มีรูปทรงและชั้นไดอิเล็กทริกที่ประกอบขึ้นจากท่อนาโนคาร์บอนแบบหลายชั้น (MWCNT) เซ็นเซอร์แสดงความไวสูง 2.42 kPa^{-1} พร้อมกับขีดจำกัดการตรวจจับต่ำที่ 1.46 ปาสคาล (Pa) ความไวสูงเกิดจากการเพิ่ม MWCNT ลงใน PDMS ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของโพลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ เซ็นเซอร์แรงดันยังแสดงความเสถียรที่ดี ที่การโหลดแบบวนรอบถึง 9,000 รอบ ซึ่งพิสูจน์ความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้งานที่ยาวนาน ในการสัมผัสและการรับสัมผัสทางสรีรวิทยา ความไวสูงของเซ็นเซอร์เหมาะสำหรับการตรวจจับการเสียรูปขนาดเล็ก เช่น รูปคลื่นพัลส์ ตลอดจนการตรวจจับแรงกดสัมผัส นอกจากนี้ บทความนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจจับแบบสัมผัสและไม่สัมผัสพร้อมกัน ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจจับแบบคู่ (ความดันและความใกล้เคียง) ด้วยระบบการอ่านข้อมูลเดียว ความสามารถในการตรวจจับแบบสองโหมดอาจเปิดโอกาสในการสร้างระบบขนาดเล็กในวิทยาการหุ่นยนต์ การควบคุมด้วยท่าทาง แอปพลิเคชันแบบไร้สัมผัส และอื่น ๆ อีกมากมาย การใช้งานจริงของเซ็นเซอร์แสดงให้เห็นได้ในการใช้งานต่าง ๆ เช่น การตรวจจับการสัมผัส เครื่องสร้างรหัสบาร์โค้ด การตรวจจับระยะใกล้ และการตรวจจับคลื่นพัลส์

Fu, Y. et al. (2022, pp. 012018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์วัดความดันแบบคาปาซิทีฟ โหมดสัมผัสที่เสริมความไวพร้อมช่องคู่ พบว่าเซ็นเซอร์ความดันความจุแบบใหม่ที่มีช่องสองช่อง และช่องก๊าซได้รับการออกแบบสำเร็จ และการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบ บทความนี้แสดงให้เห็นผลของการปรับปรุงเกี่ยวกับการตรวจวัดความดันระดับไมโคร ความไวของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น 1.83 เท่า โดยการตั้งค่าอัตราส่วนปริมาตรโพรงด้านบนและด้านล่างเป็น 4 : 1 เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีโครงสร้างการขยายการตรวจจับแรงกด เซ็นเซอร์ที่ออกแบบนี้แสดงให้เห็นว่าช่องสองช่องและช่องแก๊สค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความไวต่อแรงกดและช่วงเชิงเส้นของแรงดันระดับไมโคร ผลการจำลองโดยรวมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพประกอบเพิ่มขึ้นสำหรับการตรวจจับแรงดันระดับจุลภาค

Ha, K. H., Huh, H., Li, Z., & Lu, N. (2022, pp. 3442-3448) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์แรงดันคาปาซิทีฟแบบอ่อน : แนวโน้ม ความท้าทาย และมุมมอง พบว่าเซ็นเซอร์วัดแรงกดแบบอ่อนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ (e-skins) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในสองสาขาที่กำลังเติบโต ได้แก่ หุ่นยนต์แบบอ่อน และอิเล็กทรอนิกส์ชีวภาพ เซ็นเซอร์แรงดันแบบคาปาซิทีฟ (CPS) เป็นที่นิยมเนื่องจากมีความยืดหยุ่นเชิงกล ความไวสูง และความเสถียรของสัญญาณสูง หลังจากสองทศวรรษของการพัฒนาอย่างรวดเร็วผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ (e-skins) ที่ใช้ CPS แบบ

อ่อนประสบความสำเร็จในแง่ของความนุ่มและความละเอียดอ่อนเหมือนกับผิวหนังมนุษย์ อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาสำคัญสองประการที่ขัดขวางการใช้งานจริงของ CPS แบบอ่อน คือ การลดลงของความไวต่อแรงกด และการตอบสนองระหว่างแรงกดในระนาบและแรงกดนอกระนาบ

Huang, K. H., Tan, F., Wang, T. D., & Yang, Y. J. (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอาร์เรย์ตรวจจับความดันที่มีความไวสูงสำหรับการประเมินค่าความดันโลหิตด้วยจากเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยได้นำเสนออาร์เรย์ตรวจจับความดันสำหรับการตรวจติดตามความดันโลหิตผ่านทาง การวัดคลื่นจากการเต้นของจร ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่ทำให้ได้รับการบาดเจ็บ อุปกรณ์ที่นำเสนอ มีการกำหนดค่าอาร์เรย์เชิงเส้นซึ่งใช้องค์ประกอบการตรวจจับแรงกดด้วยสามองค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบ ประกอบด้วยฟิล์มโพลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าและคู่อิเล็กโตรดระหว่างดิจิทัลบนวัสดุพิมพ์ที่ยืดหยุ่น โครงสร้าง ไมโครโดมมีการสร้างลักษณะของตัวนำบนฟิล์มโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มความไวในการรับแรงกด การออกแบบอาร์เรย์ที่นำเสนอช่วยให้ง่ายและสะดวกอย่างมากในการวัดคลื่นจากการเต้นของชีพจร อุปกรณ์ที่ตรวจวัดมีความไวที่สูง (-0.533 kPa^{-1}) และมีการตอบสนองแบบไดนามิกที่รวดเร็ว นอกจากนี้ยังใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่แตกต่างกันสามรูปแบบเพื่อใช้ในการประเมินความดันโลหิตซิสโตลิกและไดแอสโตลิกจากสัญญาณคลื่นพัลส์ที่วัดได้ และมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอ พบว่าตัวรับรู้ระดับแรงกดแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบนั้นจะเปลี่ยนแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าตามตัวแปร ดังนี้ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ วัสดุที่นำมาใช้เป็นฐาน (Substrate) และวัสดุอิเล็กโตรด (Electrode) ดังนั้นในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้ระดับแรงกดแบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ ต้องคำนึงถึงส่วนที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการออกแบบ สร้าง และทดสอบต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการในการดำเนินการ ดังนี้

1. ขอบเขตของการวิจัย
2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
3. หลักการออกแบบ
4. การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์เกรด FR-4 ด้านหนึ่งเคลือบผิวทองแดง อีกด้านหนึ่งเป็นผิวอีพ็อกซี (Epoxy) โปร่งใส เป็นแผ่นปริ้นท์แบบด้านเดียว (Single-sided) ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ (ϵ_r) = 4.6 แผ่นทองแดงมีขนาดความหนา (t) = 0.105 มิลลิเมตร
2. การออกแบบตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop Version: 25.0.0 20230906.r.37 b14e317 arm64 ในการออกแบบ
3. การสร้างด้วยตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ด้วยวิธีการใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film)
4. ต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย เป็นตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จำนวน 12 รูปแบบ ดังรายละเอียดแสดงในตาราง 6 และภาพประกอบ 77
5. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงกดเลือกใช้ชุด Table Top Universal Testing Machine Force Test MCT series ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510 (Maximum Load 500 N)

ถูกติดตั้งที่อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร (อาคาร 9)

6. เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อเก็บผลการทดสอบเลือกใช้ LCR Meter รุ่น LCR-6100 ยี่ห้อ GW Instek เลือกใช้ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต (Kilohertz: KHz) และแรงดันไบอัส (Bias Voltage) ที่ 2 โวลต์ (Volt)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แผ่นวงจรพิมพ์

เป็นแผ่นที่สร้างด้วยพลาสติกชนิดหนึ่งโดยมีการฉาบผิวด้วยทองแดงเต็มแผ่น ที่มีด้านเดียว (single-sided) งานวิจัยนี้ใช้แผ่นวงจรพิมพ์เกรด FR-4 ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ $\epsilon_r = 4.6$ แผ่นทองแดงขนาดความหนา 0.105 มิลลิเมตร ในการออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แวนเนนาสำหรับการวัดแรงกด ดังภาพประกอบ 72



(ก) ทองแดง



(ข) วัสดุฐานรอง

ภาพประกอบ 72 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4

2. เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter)

เป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) รุ่น LCR-6100 ยี่ห้อ GW Instek มีความแม่นยำในการวัด 0.05% ถึง 0.1%

ช่วงความถี่ 10 เฮิร์ต (Hertz: Hz) ถึง 100 กิโลเฮิร์ต (Kilohertz: KHz) แรงดันไบอัส (Bias Voltage) 1 ถึง 2 โวลต์ (Volt) ลักษณะของ LCR Meter แสดงดังภาพประกอบ 73



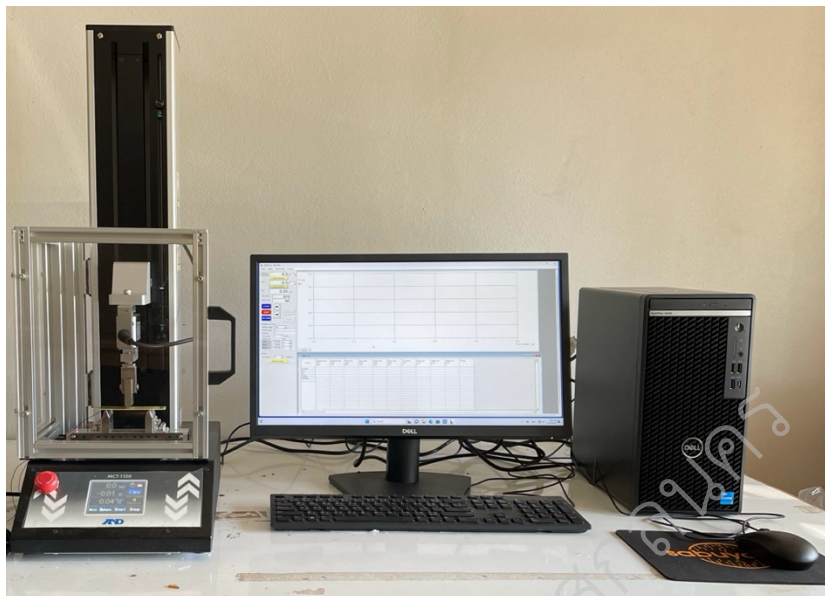
(ก) ด้านหน้าของ LCR Meter



(ข) ด้านหลังของ LCR Meter

ภาพประกอบ 73 เครื่องวัดค่าการเหนี่ยวนำ ค่าการเก็บประจุ และค่าความต้าน (LCR Meter) ยี่ห้อ GW Instek รุ่น LCR-6100

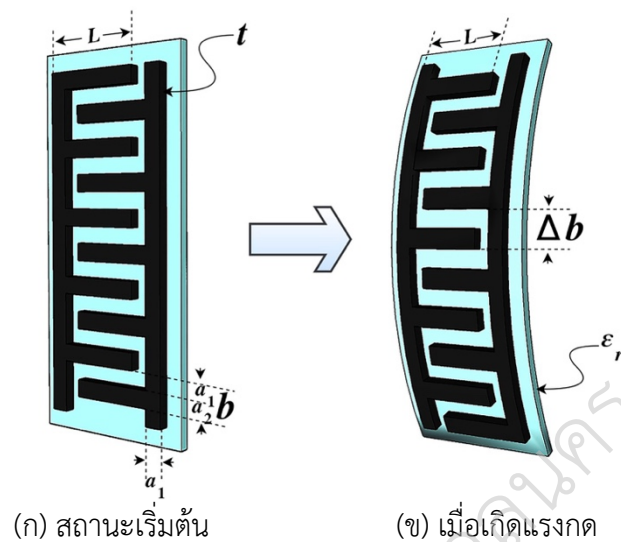
3. เครื่องทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ คือ Table Top Universal Testing Machine Force Test MCT Series ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510 (Maximum Load 500 N) ที่สามารถทดสอบวัสดุได้หลายวิธี เช่น การดึง การกด และอื่น ๆ ในเครื่องเดียวกัน โดยสามารถใช้ทดสอบกับวัสดุได้หลากหลายชนิด ระบบการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติสมบูรณ์ในตัว สามารถแยกการควบคุมด้วยตัวเครื่องหรือคอมพิวเตอร์ได้ แสดงดังภาพประกอบ 74



ภาพประกอบ 74 เครื่องทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510

หลักการออกแบบ

ในการออกแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จะใช้หลักการการขนานของแผ่นทองแดงมีขั้วบวกและลบ โดยเมื่อทองแดงมีการขนานกันเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการเก็บประจุมีค่ามากขึ้นเช่นกัน จากนั้นนำค่าการเก็บประจุที่ได้ไปแปลงค่าในระบบ ประมวลผล ค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นพิโกฟารัด (Picofarad, pF) การออกแบบตัวรับรู้ ตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ดังโครงสร้างใน ภาพประกอบ 75



ภาพประกอบ 75 โครงสร้างของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรียัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดในสถานะเริ่มต้นและเมื่อเกิดแรงกด

$$C = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_{air} + \epsilon_r}{2} \right) \frac{K \left[1 - \left(\frac{a_1}{\Delta b} \right)^2 \right]}{K \left[\frac{a_1}{\left(\frac{a_1}{\Delta b} \right)} \right]} + \epsilon_0 \epsilon_{air} \frac{t}{a_1} \quad (3.1)$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุทั้งหมดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรียัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity of Free Space) มีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (Farads/meter)

ϵ_{air} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอากาศ ($\epsilon_{air} = 1$)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ของวัสดุฐานรอง ($\epsilon_r = 4.6$)

t คือ ค่าความหนาของแผ่นตัวนำ ($t = 0.105$ มิลลิเมตร)

a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ

Δb คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำที่มีการยึดตัวใน
ขณะที่กด

b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ

$K \left[\frac{a}{\left(\frac{a}{\Delta b} \right)} \right]$ คือ ฟังก์ชันของปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส

วิธีการสร้างและการทดลอง

สำหรับการคำนวณและออกแบบ สร้างต้นแบบตัวรับรู้ในหัวข้อที่ 3.3 ตามสมการ (3.1) ขึ้นนั้นเพื่อใช้พิสูจน์หลักการของการวัดแรงกดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วิธีการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยออกแบบเป็น 12 รูปแบบ ตามตาราง 6 มีขนาดความหนาของแผ่นทองแดง 0.105 มิลลิเมตร โดยสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ชนิด FR-4 ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ $\epsilon_r = 4.6$ จากนั้นทำการสร้างวงจรเป็นรูปอิเล็กทรอนิกส์ตามทีออกแบบตามขนาดต่าง ๆ ด้วยวิธีการใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film) แสดงดังภาพประกอบ 78 และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่สร้างเสร็จทั้ง 12 รูปแบบ แสดงดังภาพประกอบ 77

ตาราง 6 ขนาดของต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ใช้ในการวิจัย

รูปแบบ IDC	a_1	a_2	b	L
1	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
2	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
3	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
4	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
5	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร

ตาราง 6 (ต่อ)

รูปแบบ IDC	a_1	a_2	b	L
6	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
7	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
8	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
9	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
10	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
11	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
12	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร

ในการออกแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดด้วยวิธีการใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film) มีขั้นตอน ดังนี้

1.1 เตรียมตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในรูปแบบเนกาทีฟ (Negative) แสดงดังภาพประกอบ 76 (ก)

1.2 ทำการปริ้นท์ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดลงในแผ่นใสชนิดถ่ายเอกสารด้วยเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์

1.3 นำแผ่นปริ้นท์ชนิด FR-4 แบบด้านเดียวมาทำความสะอาดด้วยการเช็ดด้วยผ้าสะอาดเพื่อให้ฝุ่นหรือคาบน้ำมันที่ติดมากับแผ่นปริ้นท์ออก

1.4 ตัดแผ่นฟิล์มไวแสงให้มีขนาดใกล้เคียงกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการนำไปปริ้น จากนั้นใช้คัตเตอร์ลอกแผ่นเคลือบใสด้านบางออก (แผ่นพลาสติกใสที่เคลือบฟิล์มไวแสงจะมีทั้งสองด้านให้แกะด้านในออก สังเกตจากการม้วนของฟิล์มไวแสง) แสดงดังภาพประกอบ 76 (ข)

1.5 ทำการลอกแผ่นพลาสติกออกครึ่งหนึ่งเพื่อเตรียมการรีดฟิล์ม จากนั้นทำการคว่ำฟิล์มไวแสงลงแล้วนำเข้าเครื่อง LAM-150 พร้อมกับแผ่นปริ้นท์เพื่อให้เครื่อง LAM-150 ทำการรีดฟิล์มไวแสงและแผ่นปริ้นท์เข้าไว้ด้วยกัน (ในขั้นตอนนี้ไม่ควรให้ฟิล์มไวแสงโดนแสงมากเกินไป) แสดงดังภาพประกอบ 76 (ข)

1.6 ขณะที่เครื่อง LAM-150 ดึงแผ่นฟิล์มไวแสงที่ติดอยู่กับแผ่นปรี้นท์นั้น ให้ทำการประคองหรือดึงแผ่นเคลือบด้านใสที่ทำการลอกกลับขึ้นไปด้านบนของเครื่อง LAM-150 ให้ตั้งพอสมควร เครื่องจะเริ่มดึงแผ่นวงจรพิมพ์เข้าไปพร้อมกับฟิล์ม แผ่นเคลือบด้านใสจะหลุดออกจากแผ่นฟิล์มไวแสง แสดงดังภาพประกอบ 76 (ข)

1.7 นำแผ่นวงจรพิมพ์ต้นแบบที่ทำเป็นเนกกาทีฟไว้ มาวางติดกับแผ่นปรี้นท์ที่ผ่านการรีดฟิล์มไวแสงที่เตรียมไว้ ด้วยด้วยเทปใสก่อนนำไปถ่ายแบบด้วยเครื่อง EXP-152 ในขั้นตอนการถ่ายแบบหรือการฉายแสงต่อไป แสดงดังภาพประกอบ 76 (ค)

1.8 ทำการตั้งเวลาการทำงานของเครื่อง EXP-152 เพื่อฉายแสงประมาณ 20 นาที

1.9 นำแผ่นวงจรพิมพ์ต้นแบบที่ทำเป็นเนกกาทีฟไว้มาติดกับแผ่นปรี้นท์ที่รีดฟิล์มไวแสงที่เตรียมไว้มาวางคว่ำหน้า (ด้านที่ติดแผ่นวงจรต้นแบบ) ลงบนกระจกของเครื่อง EXP - 152 จากนั้นทำการปิดฝาเครื่อง EXP - 152 แสดงดังภาพประกอบ 76 (ง)

1.10 กดปุ่ม Start เครื่อง EXP - 152 จะเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเลตโดยอัตโนมัติ เมื่อครบเวลาที่ได้ทำการตั้งไว้เครื่องจะหยุดการทำงาน

1.11 นำแผ่นปรี้นท์ออกจาก เครื่อง EXP - 152 จากนั้นทำการแกะลายวงจรต้นแบบออกเพื่อที่จะนำแผ่นปรี้นท์ที่ผ่านการฉายแสงไปทำการ Develop ต่อไป

1.12 ผสมผงโซเดียมโบคาร์บอเนต กับน้ำที่เตรียมไว้ โดยทำการเตรียมน้ำในปริมาณที่ต้องการผสมในภาชนะผสม จากนั้นเทผงโซเดียมโบคาร์บอเนต ลงไปในน้ำและคนให้ละลายให้เข้ากัน (ผสมผงโซเดียมโบคาร์บอเนตในอัตราส่วน 5 กรัมต่อน้ำ 500 ซีซี หรือ 10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) แสดงดังภาพประกอบ 76 (จ)

1.13 นำแผ่นปรี้นท์ที่ผ่านการฉายแสงแล้วมาแกะแผ่นเคลือบด้านใส (Cover Sheet) ที่ติดอยู่บนแผ่นฟิล์มไวแสงอีกด้านหนึ่งออก

1.14 นำแผ่นปรี้นท์ที่ผ่านการฉายแสงมา Develop กับน้ำยาที่เตรียมไว้ โดยในการล้างจะใช้ฟองน้ำที่เตรียมไว้ถูที่แผ่นปรี้นท์เบา ๆ ให้ทั่ว เพื่อทำให้ฟิล์มไวแสงส่วนที่ไม่โดนแสงระหว่างการฉายแสงหลุดออกจากแผ่นปรี้นท์ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งปรากฏลายวงจรตามแบบที่ได้เตรียมไว้เด่นชัดที่สุด

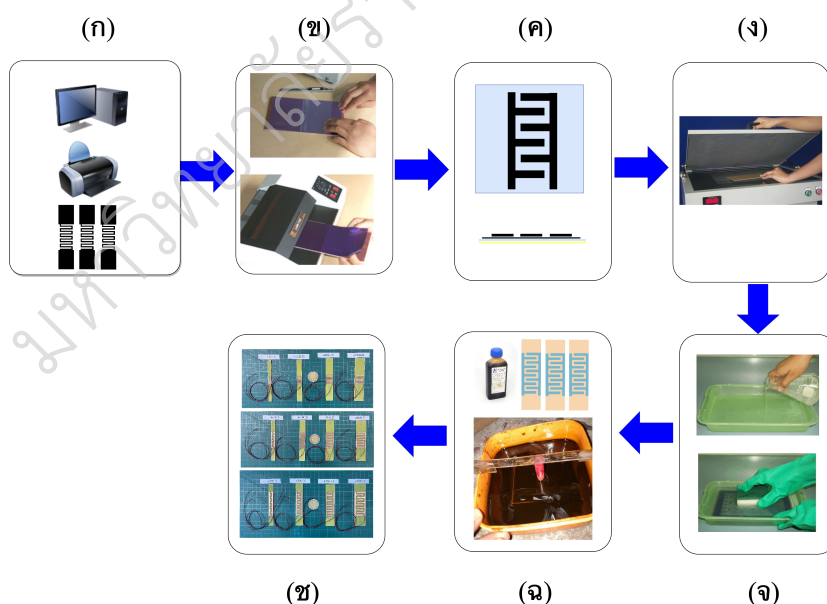
1.15 นำแผ่นปรี้นท์ที่ผ่านการ Develop มาล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง

1.16 จากนั้นนำแผ่นปริ้นท์ที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาทำให้แห้ง จะได้ลายของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดตามที่ออกแบบไว้และพร้อมที่จะดำเนินการในขั้นตอนการกัดปริ้นท์ต่อไป

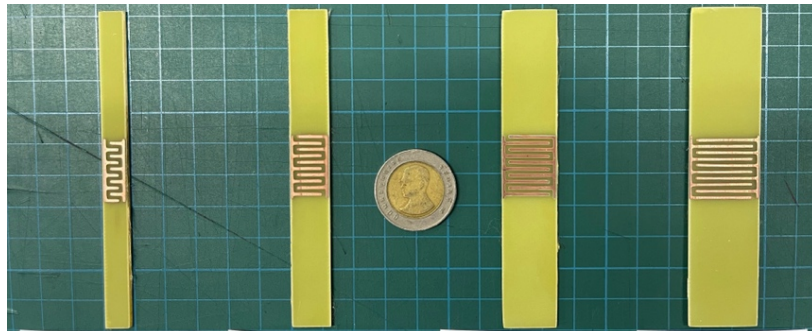
1.17 ขั้นตอนการกัดปริ้นท์เริ่มจากหาภาชนะที่เป็นพลาสติกที่ขนาดพอเหมาะกับแผ่นปริ้นท์ที่ต้องการกัด นำแผ่นปริ้นท์ที่ผ่านขั้นตอนทรายฟิล์มมาวางลงในภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นเทน้ำยากัดลายปริ้นท์ลงในภาชนะให้ท่วมแผ่นปริ้นท์ ทำการเขย่าภาชนะไปเรื่อย ๆ จนกว่าส่วนที่ไม่ต้องการถูกกัดออกจนหมด จากนั้นนำแผ่นปริ้นท์ออกจากน้ำยากัดลายปริ้นท์เพื่อมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า แล้วทำให้แห้ง แสดงดังภาพประกอบ 76 (ฉ)

1.18 ตรวจสอบความสมบูรณ์ลายทองแดงของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น จากนั้นทำความสะอาด เพื่อกำจัดเศษทองแดงที่เกินออกเพราะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากนั้นนำตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดไปใช้ทดสอบต่อไป แสดงดังภาพประกอบ 76 (ช)

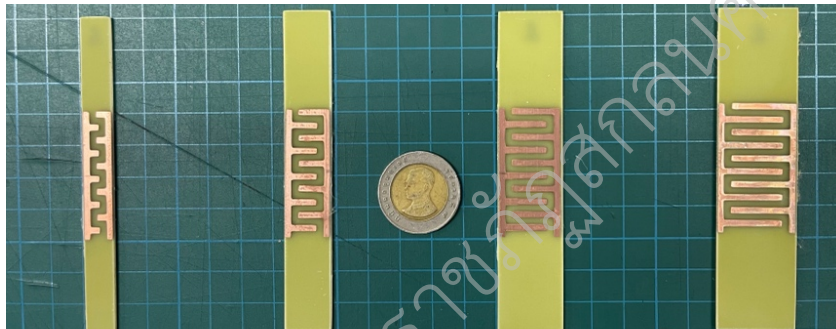
ขั้นตอนในการสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยทรายฟิล์มแสดงดังภาพประกอบ 76



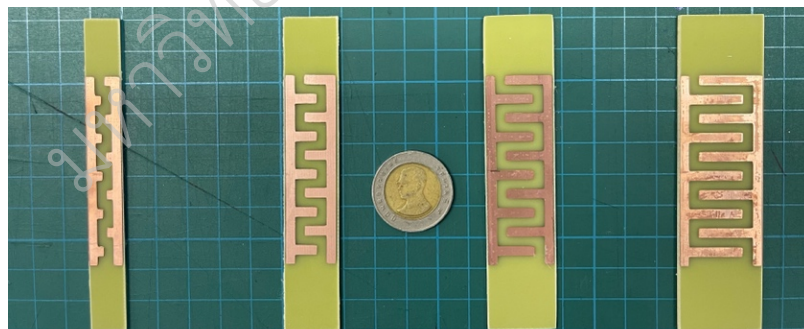
ภาพประกอบ 76 ขั้นตอนการสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ด้วยการใช้ทรายฟิล์ม



(ก) รูปแบบที่ 1, 2, 3 และ 4



(ข) รูปแบบที่ 5, 6, 7 และ 8



(ค) รูปแบบที่ 9, 10, 11 และ 12

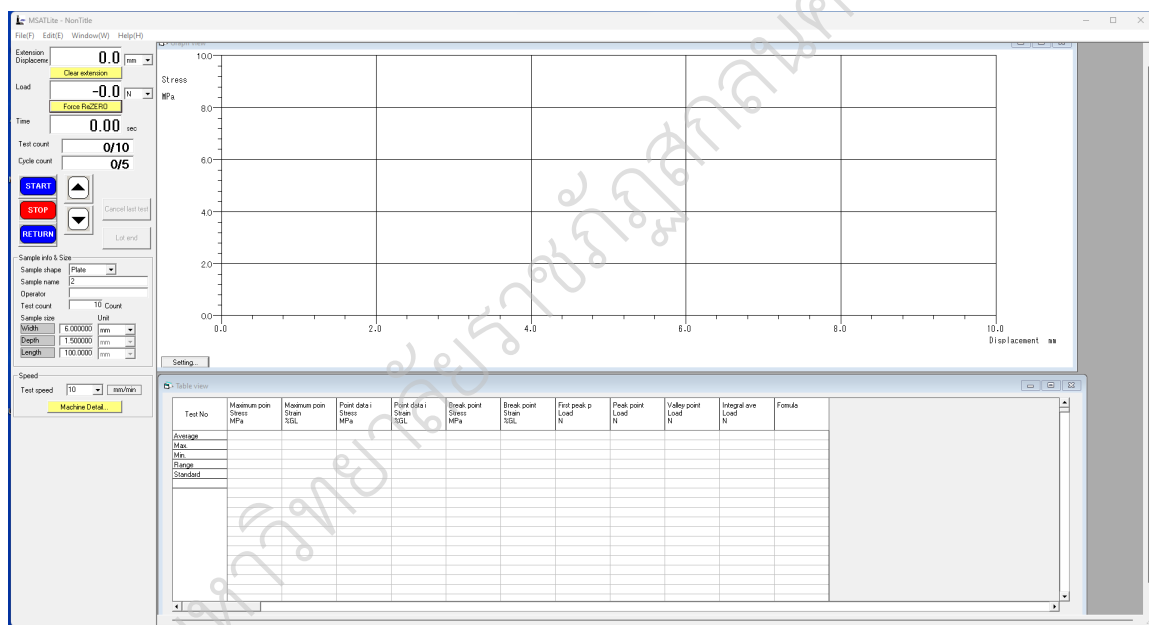
ภาพประกอบ 77 ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด
12 รูปแบบที่สร้างเสร็จ

2. วิธีการทดสอบแรงกดสูงสุดที่ตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่รับได้

โดยในขั้นตอนนี้ยังไม่มีภาระดันและความถี่ให้กับตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ดำเนินการ ดังนี้

2.1 นำตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด 12 รูปแบบที่สร้างขึ้น มาเตรียมทดสอบกับเครื่องทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

2.2 เปิดหน้าต่างโปรแกรมควบคุมเครื่อง Universal Testing machine (UTM)



ภาพประกอบ 78 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมเครื่อง Universal Testing machine (UTM)

2.3 กำหนดรายละเอียดของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่นำมาทดสอบ ประกอบด้วย การกำหนดความกว้าง ความยาว ความหนา (width, depth, length)

Sample info & Size

Sample shape: Plate

Sample name: 2

Operator:

Test count: 10 Count

Sample size:

Sample size	Unit
Width: 6.000000	mm
Depth: 1.500000	mm
Length: 100.0000	mm

Speed

Test speed: 10 mm/min

Machine Detail...

ภาพประกอบ 79 หน้าต่างกำหนดรายละเอียด ความกว้าง ความยาว ความหนา

2.4 กำหนดช่วงความเร็วที่ต้องใช้ในการทดสอบ

Speed

Test speed: 10 mm/min

Machine Detail...

ภาพประกอบ 80 หน้าต่างกำหนดช่วงความเร็วที่ใช้การทดสอบ

2.5 เปิดหน้าต่าง Machine Detail >> ระบุระดับ Dispresment limit เพื่อ
กำหนดระยะของการยุบตัว

Machine Detail condition

Test

Standard type: Cycle

Test direction: Compression

Sampling interval: 20 Micro m

Sampling skipping: 3 Count

Cycle

Cycle mode: Disp

Number of cycles: 5

Disp limit: 50.0 mm

Upper limit stop time: 1.0 sec

Lower limit stop time: 0.0 sec

Load cell

Load rating: 500 N

Rated output: 1.14999 mV/V

Limit

Load limit: 300.000 N

Extension limit: 150.0 mm

Action: ☐ stop, ☒ return, ☐ off

Sample break detection

Load drop sensitivity: 100.0 N

Load value to start detection: 10.0 N

Action: ☒ stop, ☐ return, ☐ off

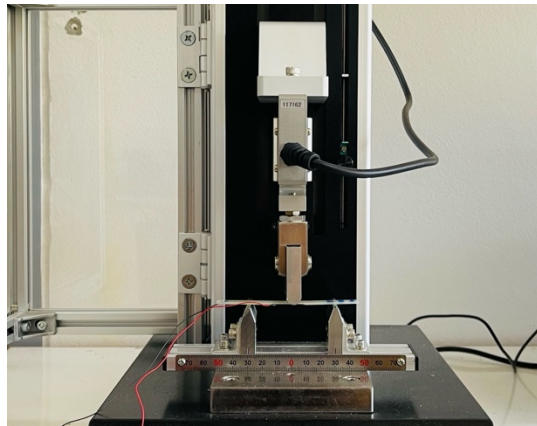
Traverse Speed

Traverse Speed: 250 mm/min

Return Speed: 300 mm/min

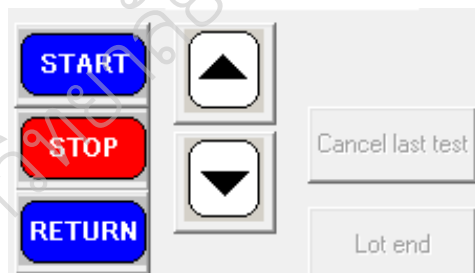
ภาพประกอบ 81 หน้าต่างกำหนดระยะของการยุบตัว

2.6 วางชิ้นงานที่ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2.3 – 2.5 เข้ากับเครื่อง Universal Testing machine (UTM) เพื่อทำการทดสอบ



ภาพประกอบ 82 ลักษณะการวางตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดกับเครื่อง Universal Testing machine (UTM)

2.7 กดที่ปุ่ม start ที่โปรแกรมของ UTM เพื่อให้เครื่อง Universal Testing machine (UTM) ทำการกด



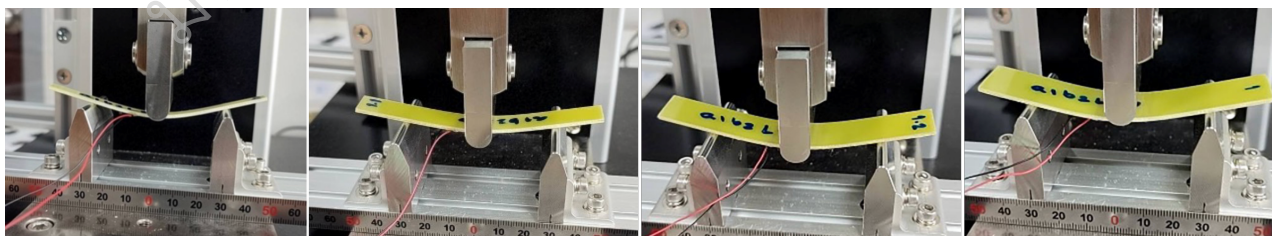
ภาพประกอบ 83 ปุ่ม START เพื่อให้เครื่อง Universal Testing machine (UTM) เริ่มทำการกด

2.8 เครื่อง Universal Testing machine (UTM) จะทำการแสดงผลการทดสอบการกดผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบการกด ค่าที่นำมาพิจารณา คือ Peak Point Load มีหน่วยเป็นนิวตัน (Newton: N) ในที่นี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 179 นิวตัน ซึ่งรูปแบบดังกล่าวสามารถรับแรงกดได้สูงสุดประมาณ 17 กิโลกรัม เป็นต้น

Test No	Maximum pc	Maximum strain	Point data i	Break point	Break point	First peak	Peak point	Valley point	Integral ave	Formula
	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Load	Load	Load	
	MPa	%GL	MPa	%GL	MPa	%GL	N	N	N	
1	14.559	68.25	0.0325	-0.6667	14.456	69.416	174	174.7	*****	80.159
2	14.98	69.583	0.0354	-0.8333	14.698	69.166	179.7	179.76	*****	57.157
3	14.496	67.166	0.0343	-1.0833	14.482	66.75	176.3	176.35	*****	84.37
4	15.236	69	0.0343	-1.0833	15.044	68.583	182.8	182.83	*****	84.624
5	14.873	71.666	0.0319	-2.5833	14.718	71.25	178.4	178.48	*****	90.628
6	15.235	71.333	0.0272	-1	14.961	70.833	182.8	182.82	*****	88.348
7	14.835	68.75	0.0326	-1.0833	14.627	68.25	178.0	178.02	*****	74.037
Average	14.916	69.393	0.0326	-1.1905	14.712	69.178	179	179	*****	79.005
Max	15.236	71.666	0.0354	-0.6667	15.044	71.25	182.8	182.83	*****	90.628
Min	14.559	67.166	0.0272	-2.5833	14.456	66.75	174	174.7	*****	57.157
Range	0.6771	4.5	0.0082	1.9167	0.5881	4.5	8.125	8.1253	*****	33.471
Standard dev	0.2557	1.6228	0.0027	0.6341	0.2228	1.5384	3.06	3.069	*****	11.405

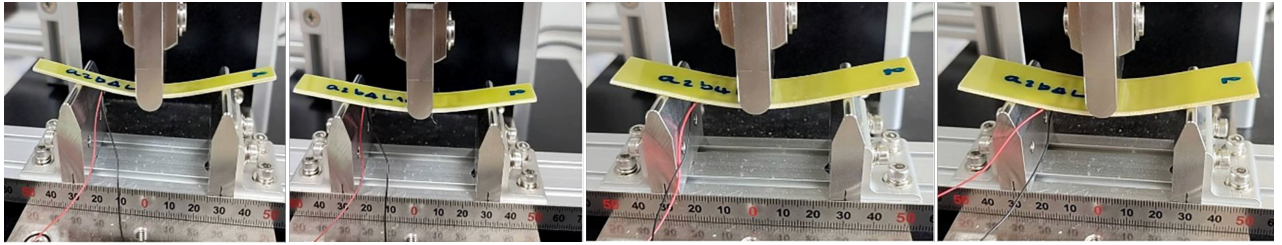
ภาพประกอบ 84 file output .csv ที่บันทึกข้อมูลกราฟจากเครื่อง Universal Testing machine (UTM)

2.9 ทำการทดสอบให้ครบทั้ง 12 รูปแบบ รูปแบบละ 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยแรงกดของแต่ละรูปแบบ โดยเริ่มจากขั้นตอนที่ 2.2 - 2.9 การทดสอบการกดของทั้ง 12 รูปแบบ แสดงดังภาพประกอบ 85 และผลการทดสอบแรงกดแสดงในตาราง 7

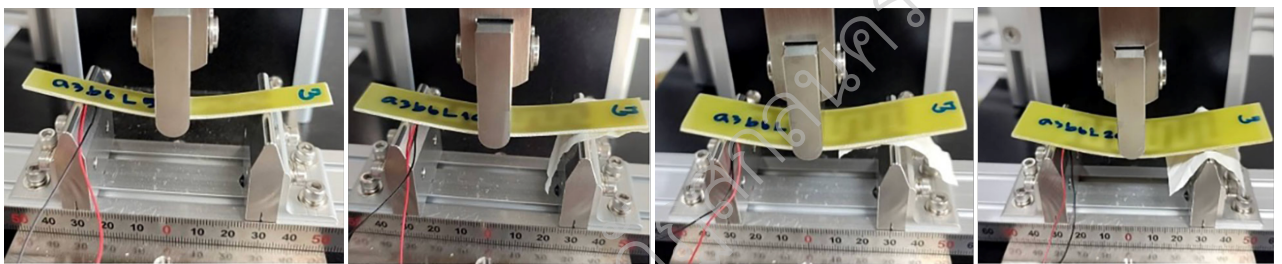


(ก) ลักษณะของรูปแบบที่ 1-4 ขณะที่ถูกกด

ภาพประกอบ 85 การทดสอบการกดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ติจิทัลปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด 12 รูปแบบ



(ข) ลักษณะของรูปแบบที่ 5-8 ขณะที่ถูกกด



(ค) ลักษณะของรูปแบบที่ 9-12 ขณะที่ถูกกด

ภาพประกอบ 85 (ต่อ) การทดสอบการกดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด 12 รูปแบบ

ตาราง 7 ค่าการรับแรงกดสูงสุดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ
การวัดแรงกดที่สร้างขึ้น 12 รูปแบบ

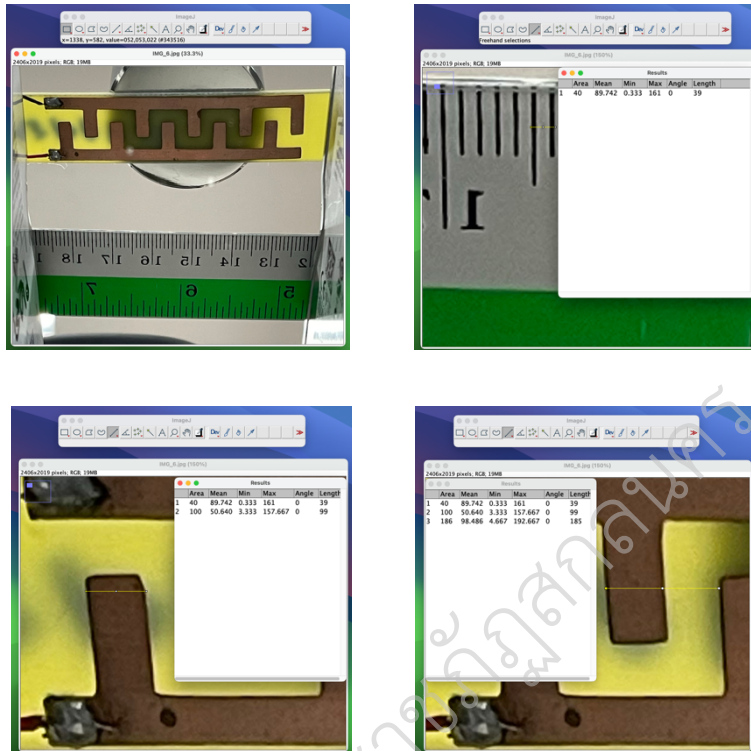
รูปแบบ IDC	a_1 (มิลลิเมตร)	a_2 (มิลลิเมตร)	b (มิลลิเมตร)	L (มิลลิเมตร)	Peak Point Load (Newton)
1	1	1	2	5	70
2	1	1	2	10	94
3	1	1	2	15	167
4	1	1	2	20	214

ตาราง 7 (ต่อ)

รูปแบบ IDC	a_1 (มิลลิเมตร)	a_2 (มิลลิเมตร)	b (มิลลิเมตร)	L (มิลลิเมตร)	Peak Point Load (Newton)
5	2	2	4	5	75
6	2	2	4	10	80
7	2	2	4	15	141
8	2	2	4	20	171
9	3	3	6	5	78
10	3	3	6	10	105
11	3	3	6	15	155
12	3	3	6	20	186

3. วิธีการวัดขนาดความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำที่เปลี่ยนแปลงเป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นเมื่อผ่านการกดจากเครื่อง Universal Testing machine (UTM) โดยการเปลี่ยนแปลงที่ทำการวัดประกอบไปด้วย a_1 ความกว้างของแผ่นตัวนำ มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ถูกกด (Δa_1) และ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ถูกกด (Δb)

โดยในการวัดนั้นจะทำการวัดขนาดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดก่อนการกดที่จะนำมาทดสอบจากนั้นทำการบันทึกค่าที่วัดได้ จากนั้นทำการทดสอบการกดด้วยเครื่อง Universal Testing machine (UTM) ครึ่งละรูปแบบ จากนั้นทำการถ่ายภาพ นำแต่ละรูปแบบมาวัดการเปลี่ยนแปลงของ โดย a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ ด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 86 จากนั้นนำข้อมูลของขนาดที่วัดได้มาทำการบันทึกผลลงในตาราง แสดงดังตาราง 8



ภาพประกอบ 86 การใช้โปรแกรม ImageJ วัดการเปลี่ยนแปลงจากภาพของตัวรับรู้แบบอินเตอร์
ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ตาราง 8 การเปลี่ยนแปลงของ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำของ 12 รูปแบบ
เมื่อผ่านการกดที่ 70 นิวตัน (N)

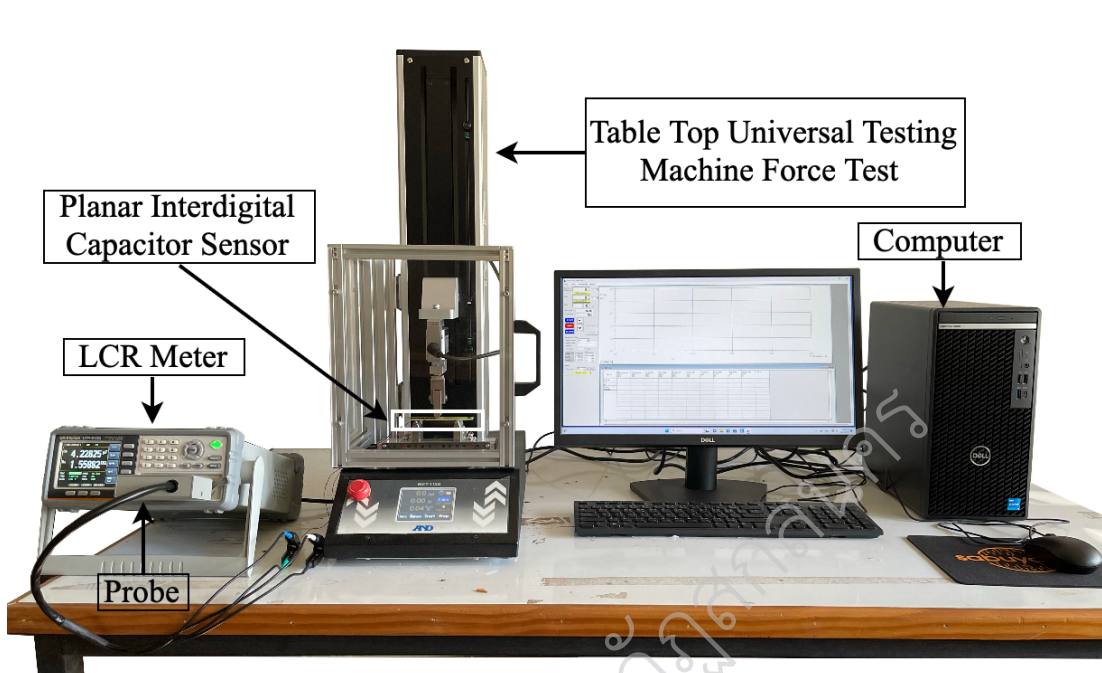
รูปแบบ IDC	a_1 (มิลลิเมตร)	a_2 (มิลลิเมตร)	b (มิลลิเมตร)	Δa_1 (มิลลิเมตร)	Δb (มิลลิเมตร)
1	1	1	2	0.106	0.304
2	1	1	2	0.324	0.309
3	1	1	2	0.387	0.321
4	1	1	2	0.189	0.381
5	2	2	4	0.619	0.418

ตาราง 8 (ต่อ)

รูปแบบ IDC	a_1 (มิลลิเมตร)	a_2 (มิลลิเมตร)	b (มิลลิเมตร)	Δa_1 (มิลลิเมตร)	Δb (มิลลิเมตร)
6	2	2	4	0.542	0.439
7	2	2	4	0.436	0.362
8	2	2	4	0.469	0.399
9	3	3	6	0.756	0.679
10	3	3	6	0.590	0.615
11	3	3	6	0.699	0.665
12	3	3	6	0.542	0.643

4. วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

เมื่อสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แวนรอนาสำหรับการวัดแรงกด ทั้ง 12 รูปแบบและทราบถึงการรับแรงกดสูงสุดของแต่ละรูปแบบแล้ว นำตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แวนรอนาสำหรับการวัดแรงกดแต่ละรูปแบบมาทำการเฉลี่ยแรงกดออกเป็น 14 แรงกดต่อหนึ่งรูปแบบ จากนั้นวัดค่าการเก็บค่าประจุที่แรงกดกระทำต่อตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แวนรอนาสำหรับการวัดแรงกดของแต่ละรูปแบบ โดยทำการทดสอบรูปแบบละ 5 ครั้ง ทำการวัดค่าการเก็บประจุใช้เครื่องวัด LCR Meter ยี่ห้อ GW Instek รุ่น LCR-6100 โดยใช้โหมดวงจรขนาน และวงจรอนุกรม และวัดค่าความต้านทานที่โหมดขนานและอนุกรม กำหนดการป้อนแรงดันที่ 2 โวลต์ และใช้ความถี่ที่ 100 กิโลเฮิร์ต ดังภาพประกอบ 87



ภาพประกอบ 87 การวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล จากการทดลองวัดค่าการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบอินเตอร์-ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จากนั้นนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์การถดถอย และสหสัมพันธ์ ซึ่งการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะใช้ข้อมูลที่ได้จากแรงกด และค่าความจุที่เกิดขึ้น จุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแรงกดที่มีผลต่อตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด กับค่าความจุทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และมีความสัมพันธ์กันในทิศทางใด นอกจากนี้ยังหาค่าความไว (Sensitivity) เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของความจุต่อแรงกดที่ใช้ในการทดสอบ การหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) เพื่อบอกถึงความสามารถของตัวรับรู้ว่าสามารถอ่านค่าที่ได้เบี่ยงเบนไปจากค่าที่แท้จริงมากหรือน้อย และการหาค่าความแม่นยำ (Precision) ซึ่งเป็นการหาค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถของตัวรับรู้ในการวัดค่านั้น ๆ หรือค่าเดิมซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิม โดยทำการวัดซ้ำค่าเดิมหลาย ๆ ครั้ง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

1. ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการเสนอผลการวิเคราะห์ โดยจำแนกออก ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่
2. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง
3. เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด
4. ทดสอบค่าความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด
5. ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

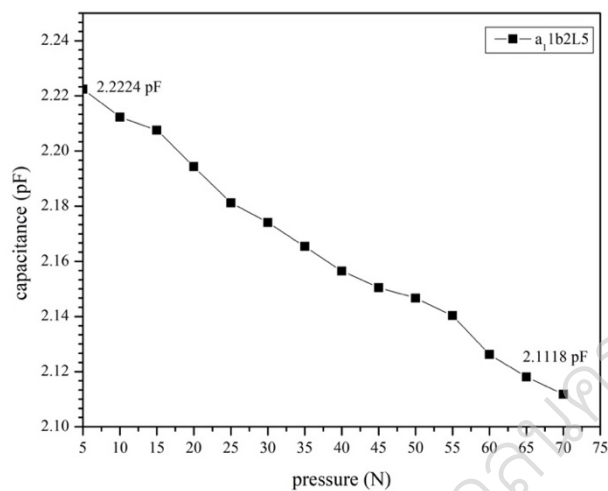
6. ทดสอบค่าความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
 แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

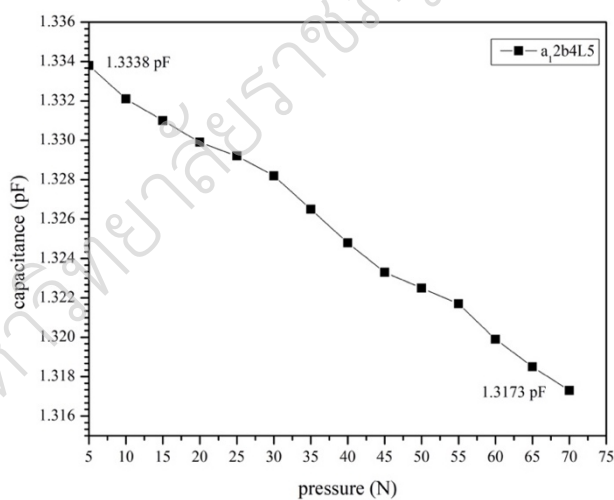
ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบกับระดับของแรงกดที่เปลี่ยนแปลง โดยจำแนกออกได้
 ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาว
 ของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ เป็นการทดลองโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดกับระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเพิ่มระดับของ
 แรงกดครั้งละ 5 นิวตัน พร้อมกับวัดค่าความจุที่ได้จากตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกดด้วยเครื่องวัด LCR Meter เพื่อทำการเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าที่ได้จาก
 การวัดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบ
 แตกต่างกัน 12 รูปแบบ

ผลการทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาว
 ของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ แสดงดังภาพประกอบ 88 - 91



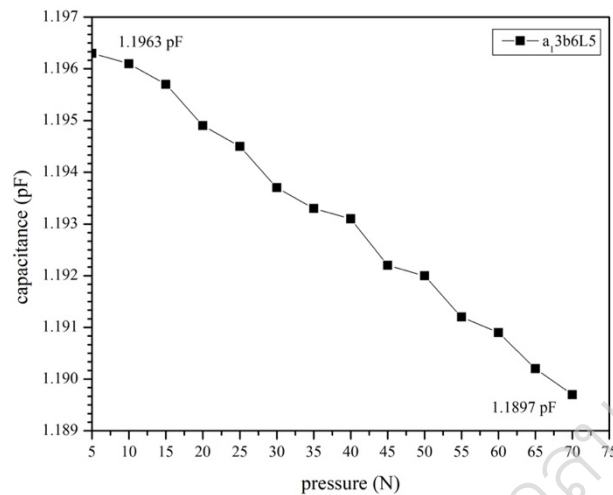
(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 5$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 88 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร
 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ
 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ
 5 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 88 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

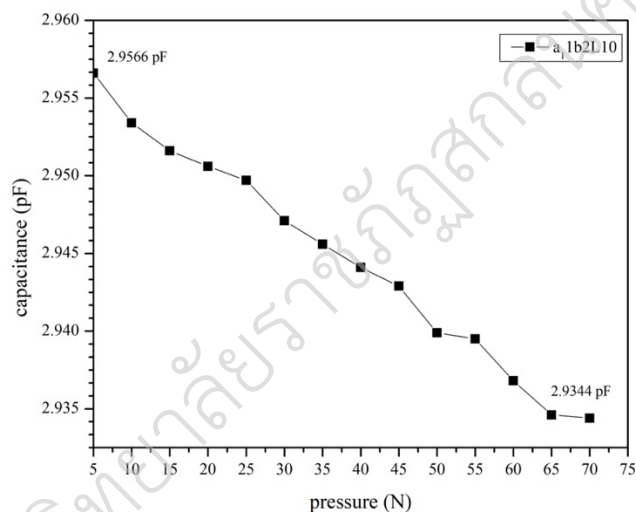
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

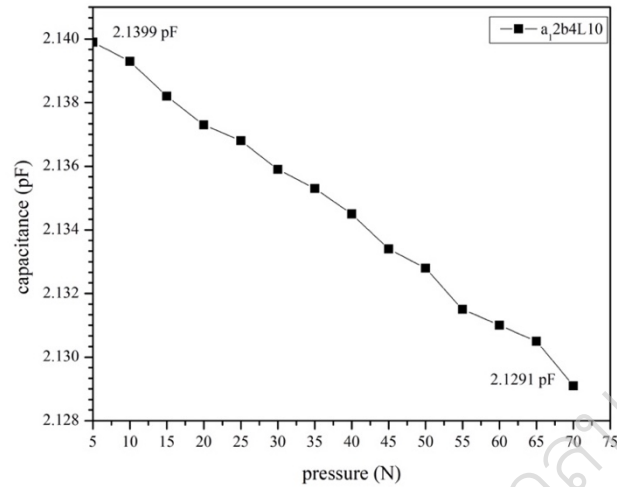
ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากภาพประกอบ 88 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.2224 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.1118 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ

ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.3338 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.3173 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.1963 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.1897 พิโกฟารัด (pF)

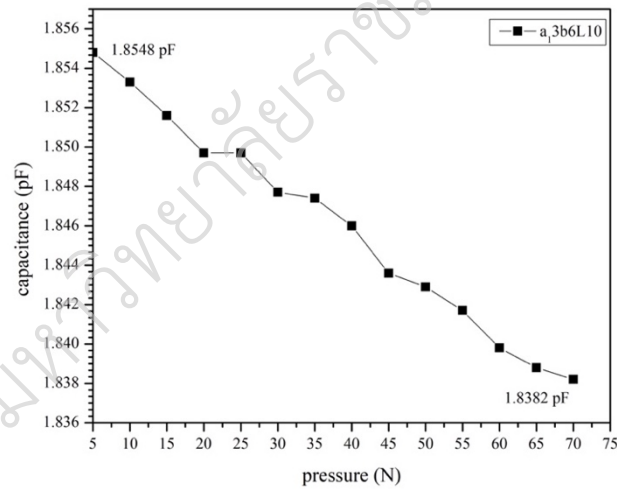


(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 89 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

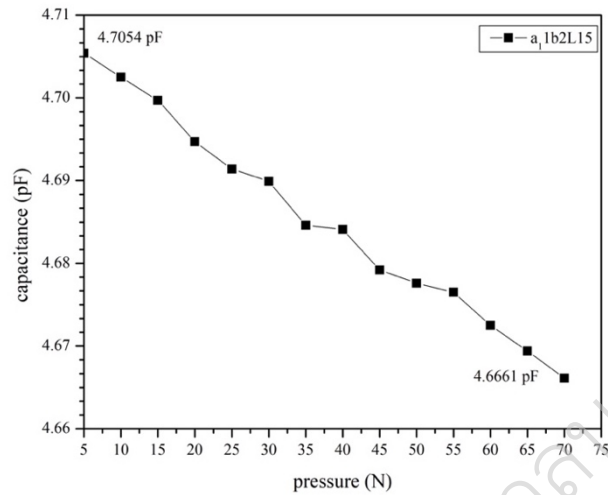


(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

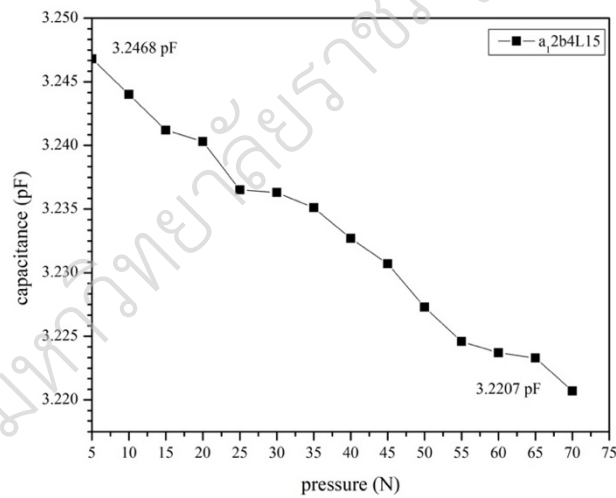
ภาพประกอบ 89 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความถี่ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร
 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ
 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ
 L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากภาพประกอบ 89 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.9566 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.9344 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำเท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.1399 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.1291 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.8548 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.8382 พิโกฟารัด (pF)

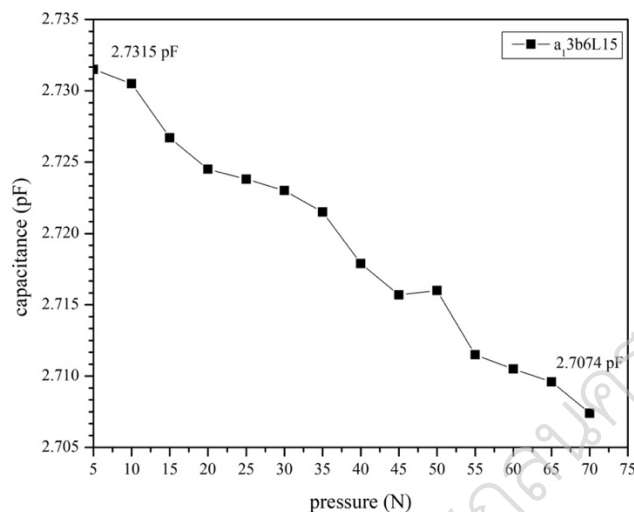


(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 90 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล คาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 90 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่าง

ระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการ

เปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากภาพประกอบ 90 พบว่า ตัวรับรู้แบบ

อินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ

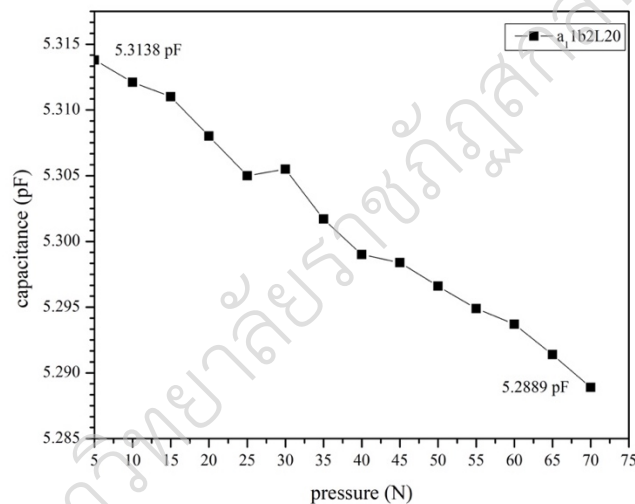
เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้าง

ของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.7054 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.6661 พิโกฟารัด (pF)

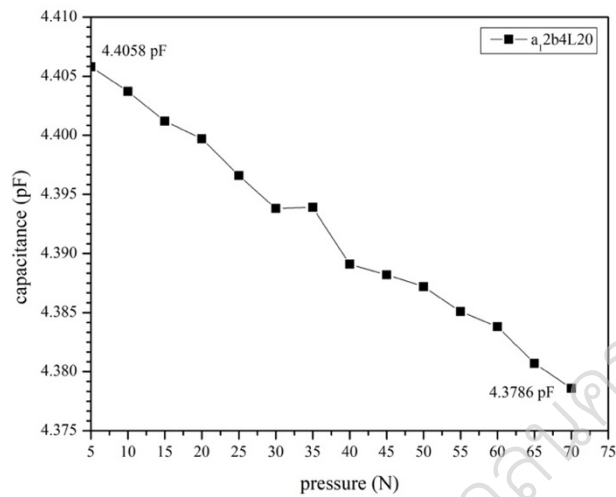
ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือความกว้างของ

แผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำเท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 3.2468 พิโกฟารัด (pF) ถึง 3.2207 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.7315 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.7074 พิโกฟารัด (pF)

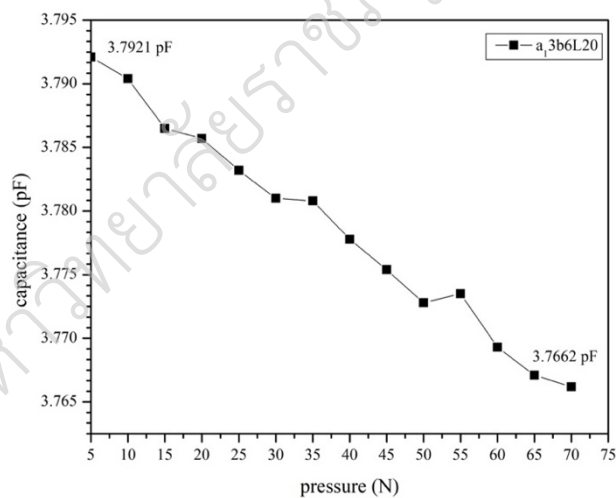


(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 91 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 91 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

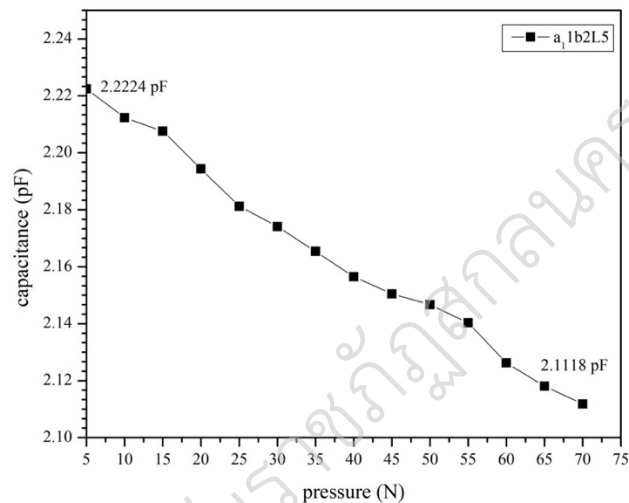
2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากภาพประกอบ 91 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 5.3183 พิโกฟารัด (pF) ถึง 5.2889 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตรมีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.4058 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.3786 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำเท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 3.7921 พิโกฟารัด (pF) ถึง 3.7662 พิโกฟารัด (pF)

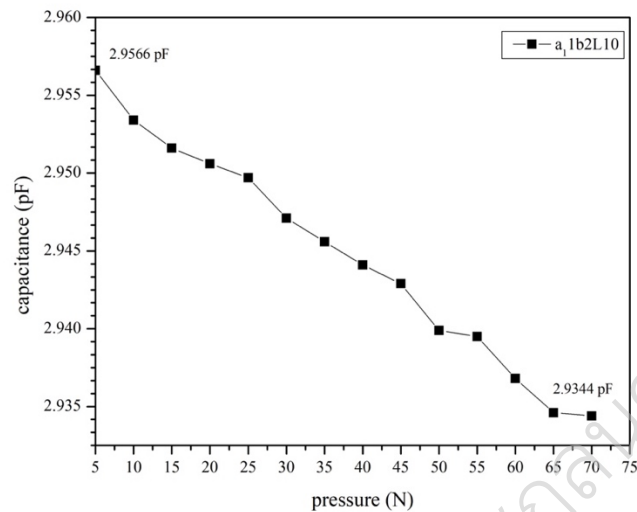
2. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง เป็นการทดลองโดยใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดกับระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเพิ่มระดับของแรงกดครั้งละ 5 นิวตัน (N) พร้อมกับวัดค่าความจุที่ได้จากตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดด้วยเครื่องวัด LCR Meter เพื่อทำการเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ

ผลการทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
 แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่น
 ตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาว
 ของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง แสดงดังภาพประกอบ 92 - 94

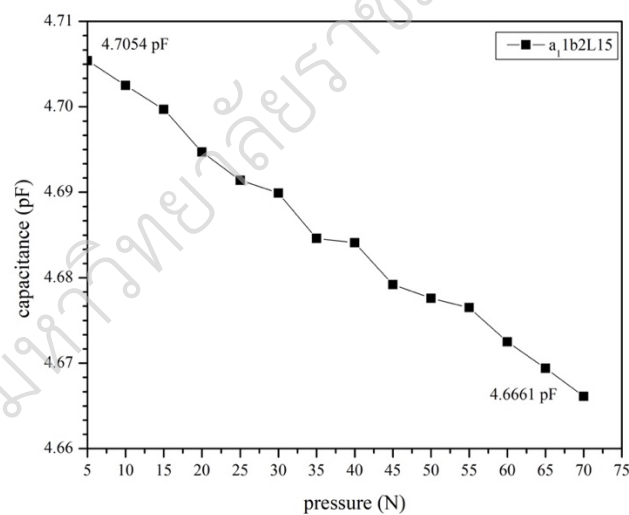


(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 92 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล
 คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร
 a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร
 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร



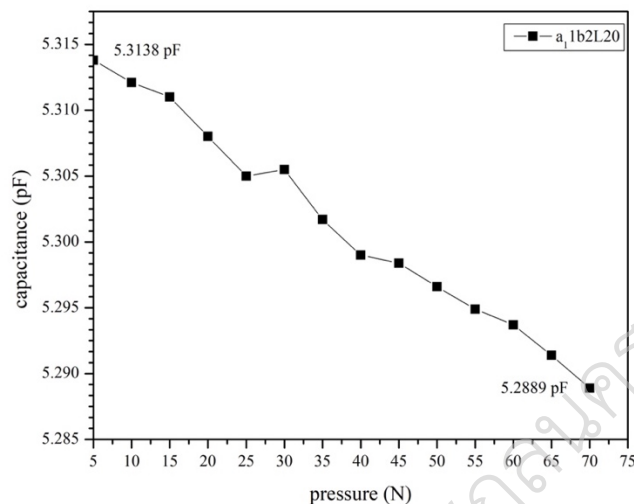
(ค) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 92 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ

L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

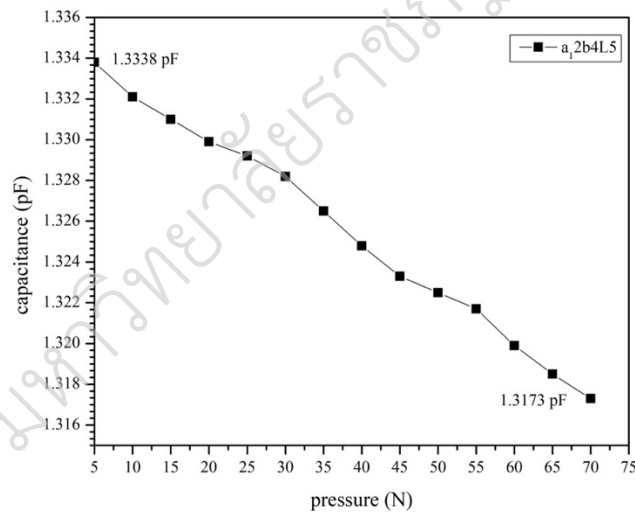


(ง) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 92 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

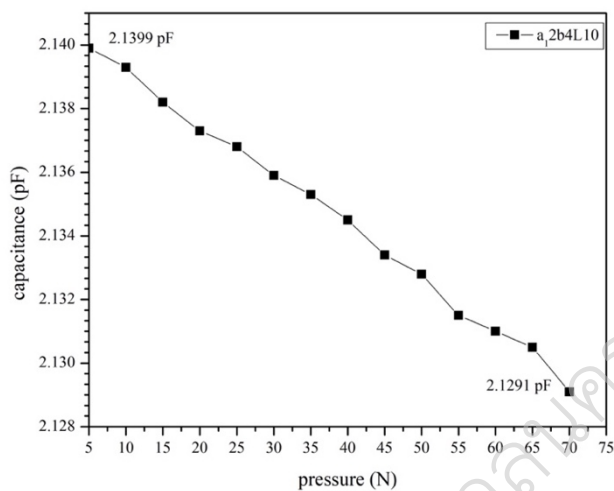
ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง จากภาพประกอบ 92 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.2224 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.1118 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้าง

ของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.9566 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.9344 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.7054 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.6661 พิโกฟารัด (pF) และ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 5.3138 พิโกฟารัด (pF) ถึง 5.2889 พิโกฟารัด (pF)

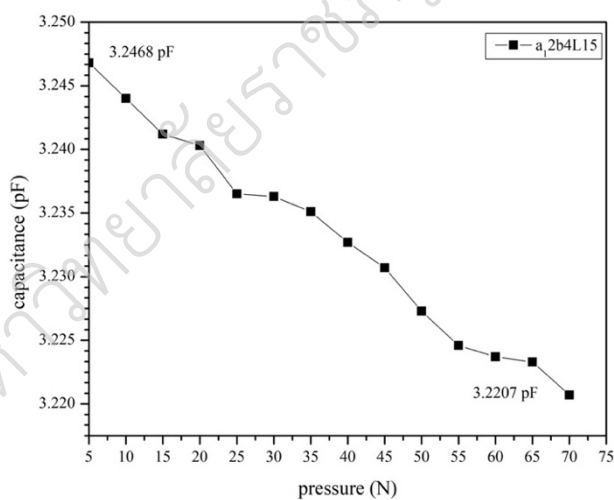


(ก) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 93 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร



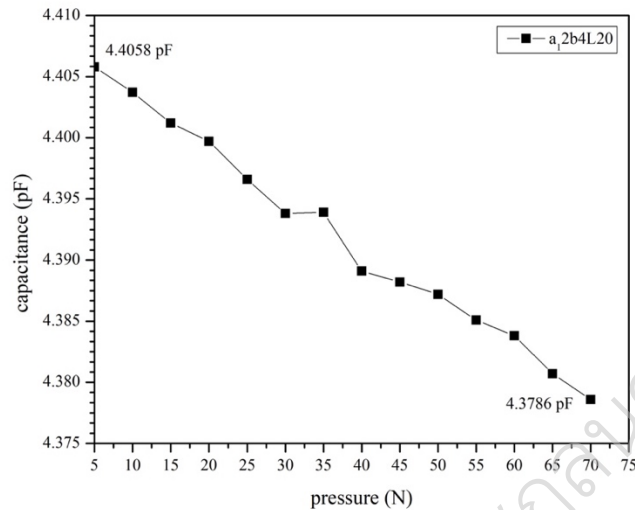
(ค) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 93 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ

L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

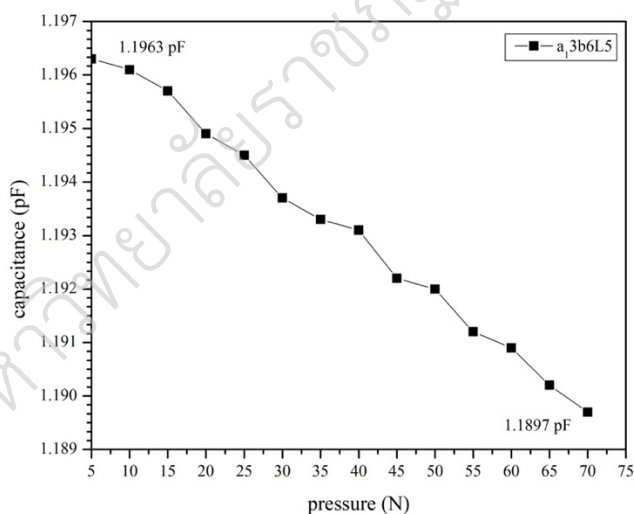


(ง) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 93 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

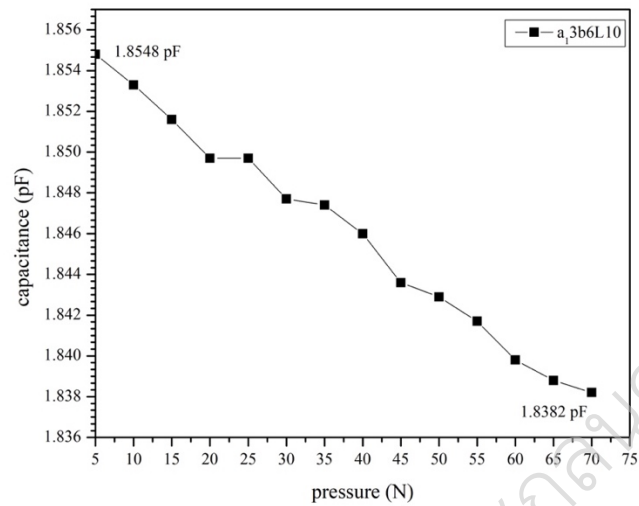
ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง จากภาพประกอบ 93 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.3338 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.3173 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้าง

ของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.1399 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.1299 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 3.2468 พิโกฟารัด (pF) ถึง 3.2207 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.4058 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.3786 พิโกฟารัด (pF)

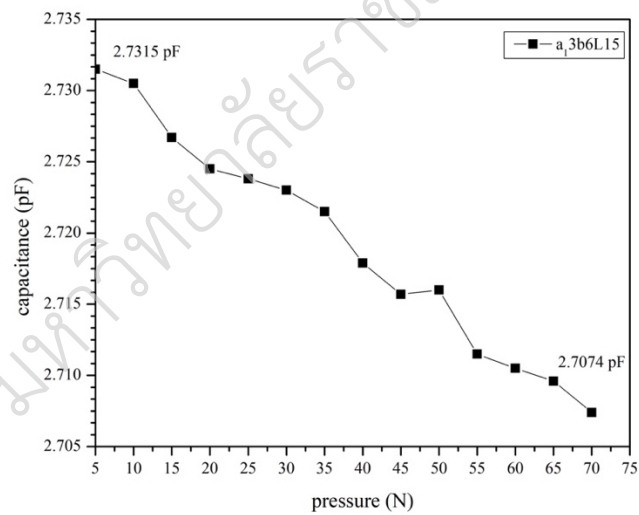


(ก) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 94 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร



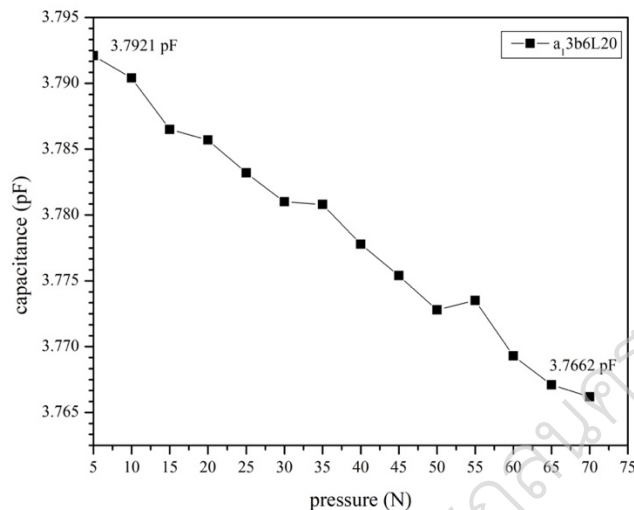
(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 94 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ

L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร



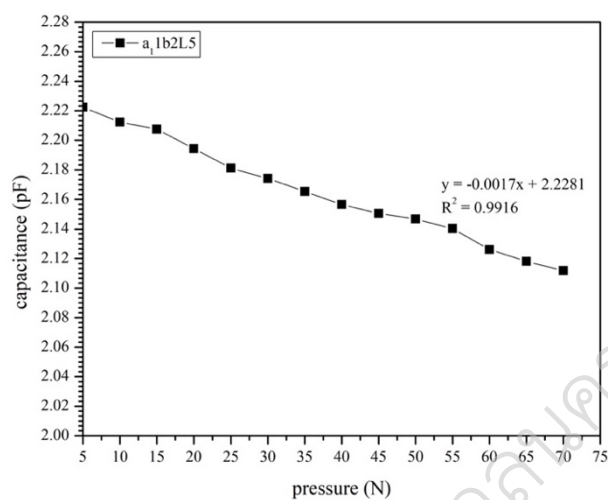
(ง) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 94 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

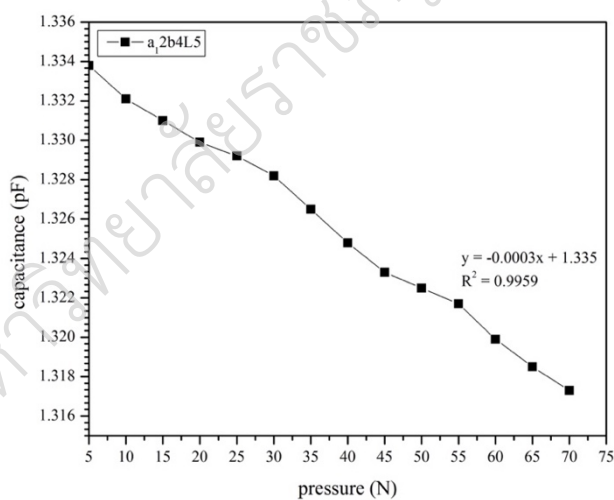
ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง จากภาพประกอบ 94 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.1963 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.1897 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ

ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.8548 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.8382 พิโกฟารัด (pF) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.7314 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.7074 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 3.7921 พิโกฟารัด (pF) ถึง 3.7662 พิโกฟารัด (pF)

3. เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เป็นการทดลองกับระดับของแรงกด ตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเพิ่มระดับของแรงกดครั้งละ 5 นิวตัน (N) พร้อมกับวัดค่าความจุ ที่ได้จากตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ด้วยเครื่องวัด LCR Meter สำหรับอ่านค่าความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ทั้งหมด 12 รูปแบบ แสดงดังภาพประกอบ 95 – 101



(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

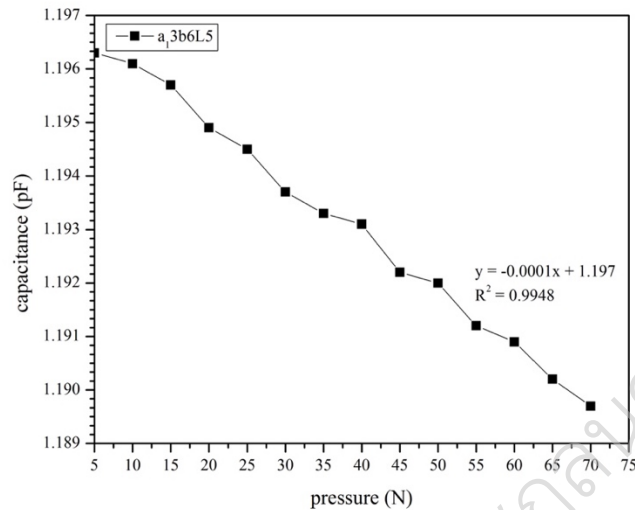
ภาพประกอบ 95 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ

3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 95 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

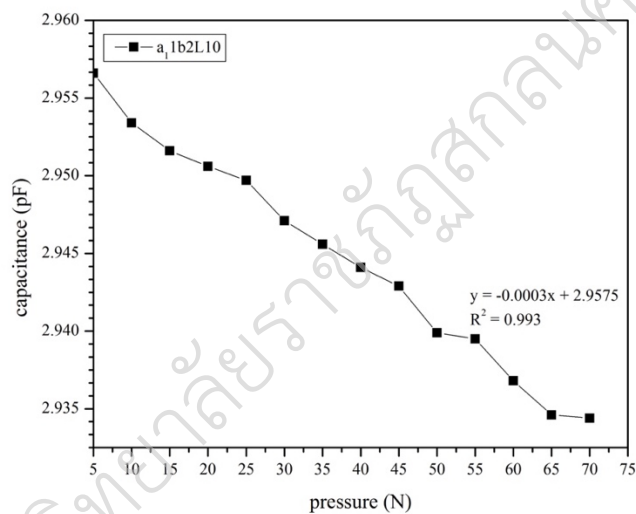
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

และ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ จากภาพประกอบ 95 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9916

เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9959 และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9948



(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

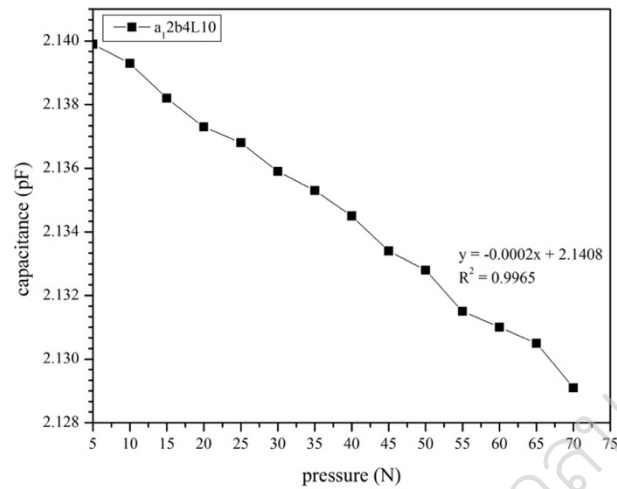
ภาพประกอบ 96 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

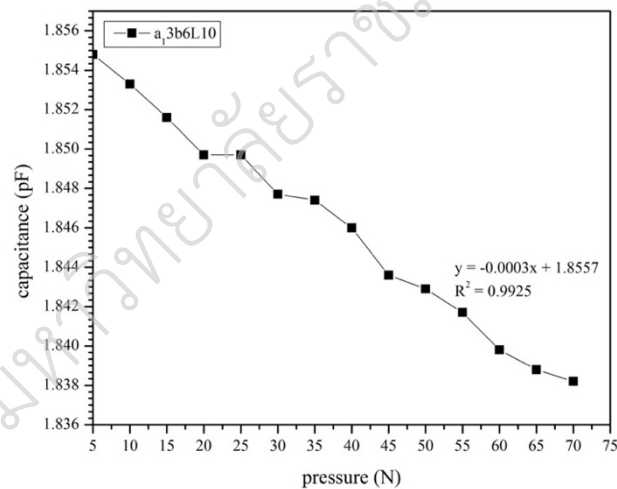
2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ

3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 96 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

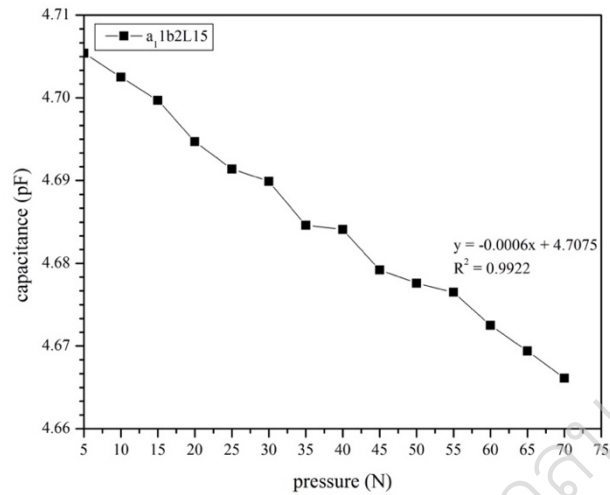
ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

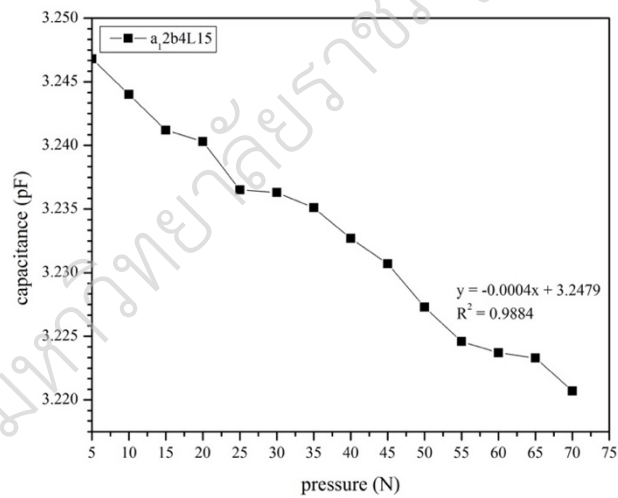
2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

และ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนว
 ราบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 จากภาพประกอบ 96 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวราบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter
 มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
 และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 $(R^2) = 0.993$ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 $(R^2) = 0.9965$ และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่าง
 ระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์
 การตัดสินใจ $(R^2) = 0.9925$



(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

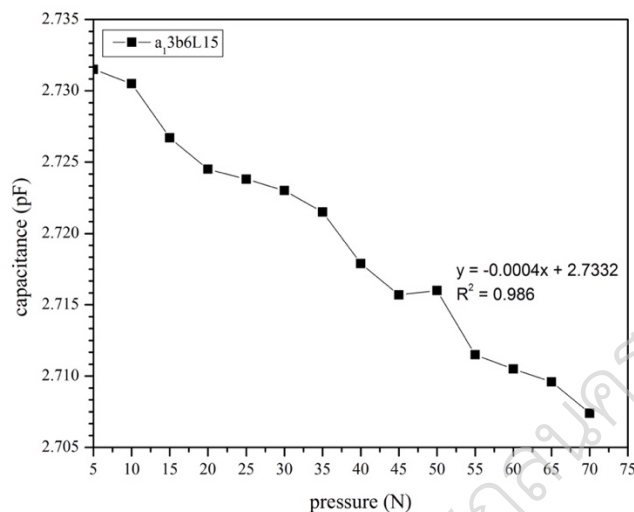
ภาพประกอบ 97 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความถี่ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ

3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 97 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนรณานสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

และ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์

แวนรณานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่น

ตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของ

แผ่นตัวนำ จากภาพประกอบ 97 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของ

ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนรณานสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR

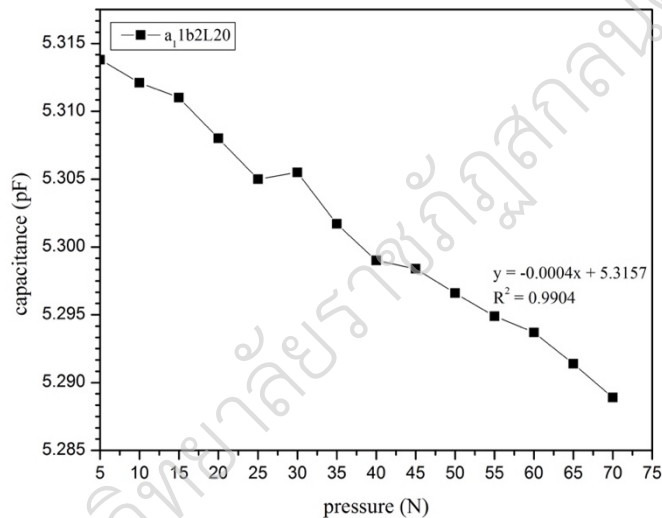
Meter มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N)

โดยเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ

เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ

2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

$(R^2) = 0.9922$ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจ $(R^2) = 0.9844$ และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสั่นใจ $(R^2) = 0.968$



(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

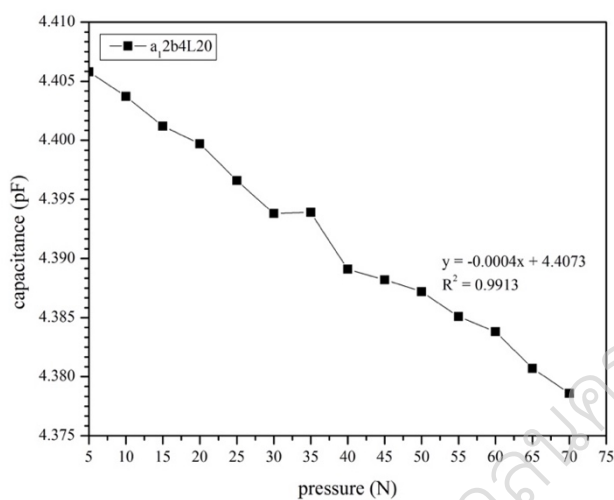
ภาพประกอบ 98 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

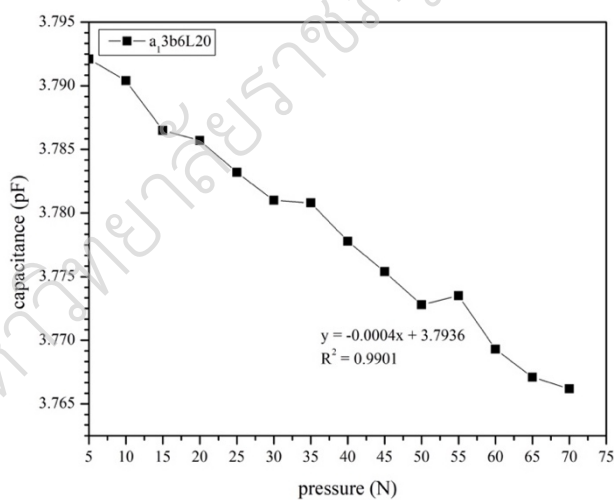
2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ

3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร



(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 98 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

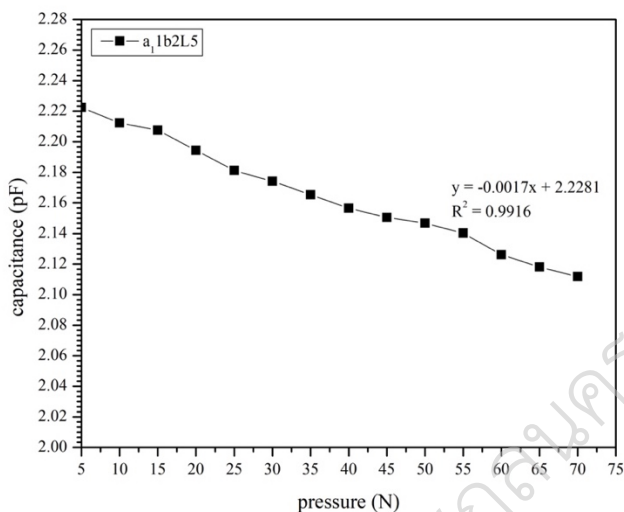
ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

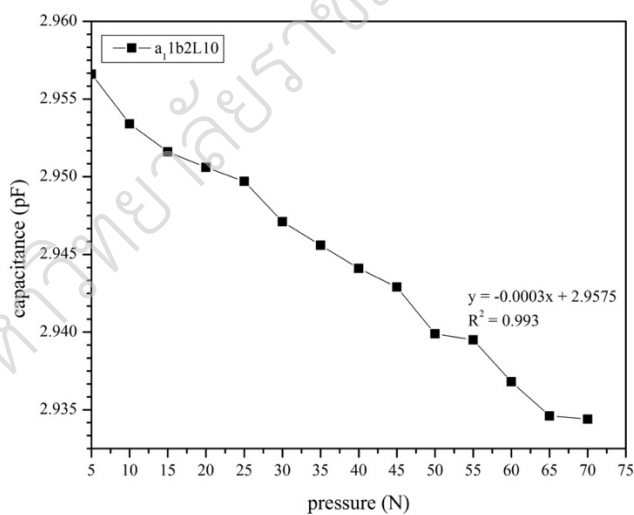
2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

และ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ราบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 จากภาพประกอบ 98 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวราบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter
 มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9904
 เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9913
 และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 (R^2) = 0.9901



(ก) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร



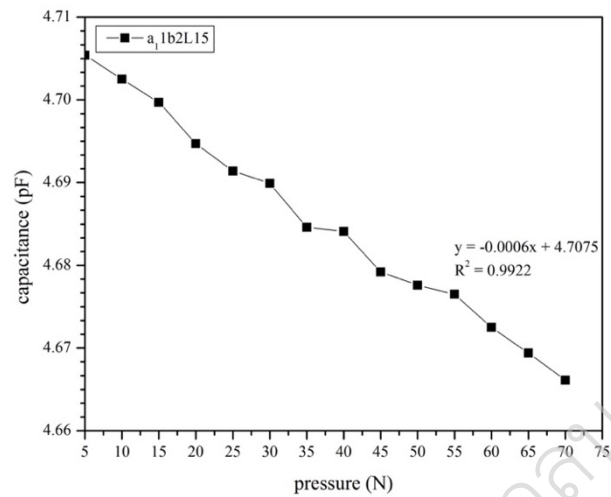
(ข) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 99 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล

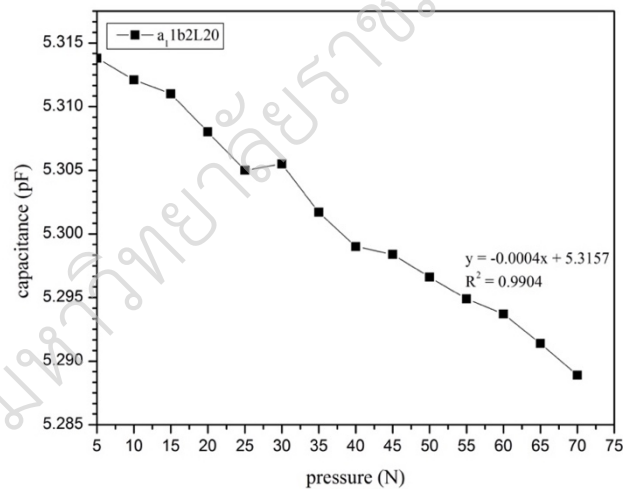
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร



(ง) $a_1 = 1$ มิลลิเมตร $a_2 = 1$ มิลลิเมตร $b = 2$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

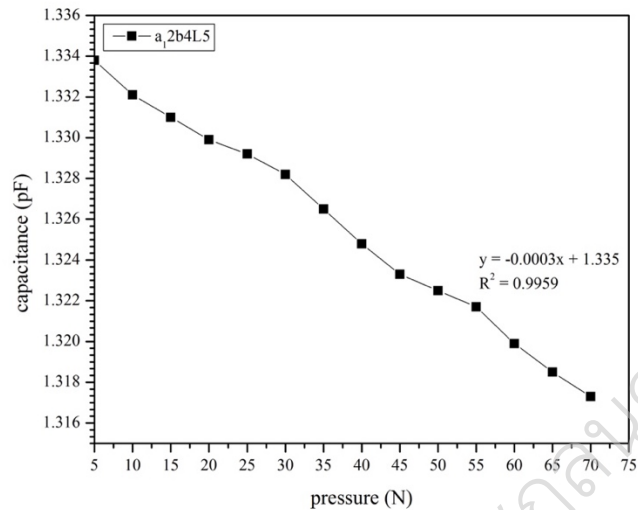
ภาพประกอบ 99 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

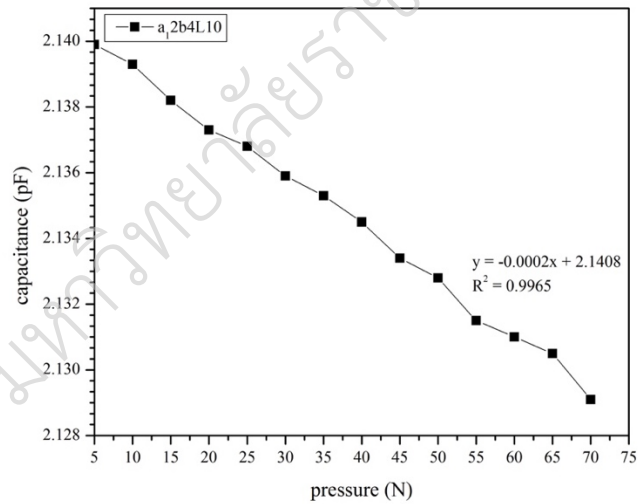
1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร

L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนว
 ราบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 จากภาพประกอบ 99 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวราบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter
 มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 1 มิลลิเมตร
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9916
 เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.993
 เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9922
 และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 (R^2) = 0.9904



(ก) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร



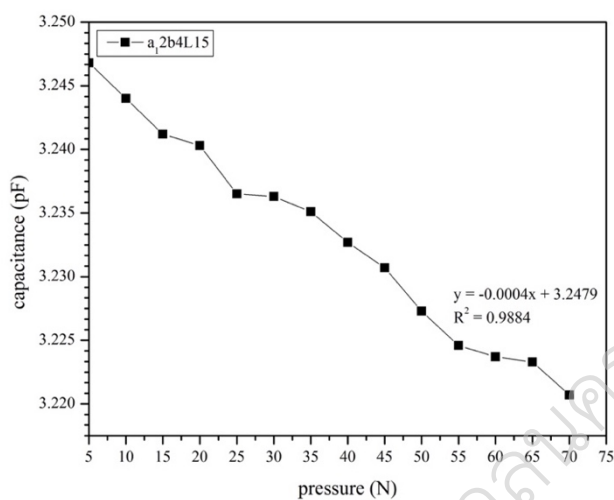
(ข) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 100 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

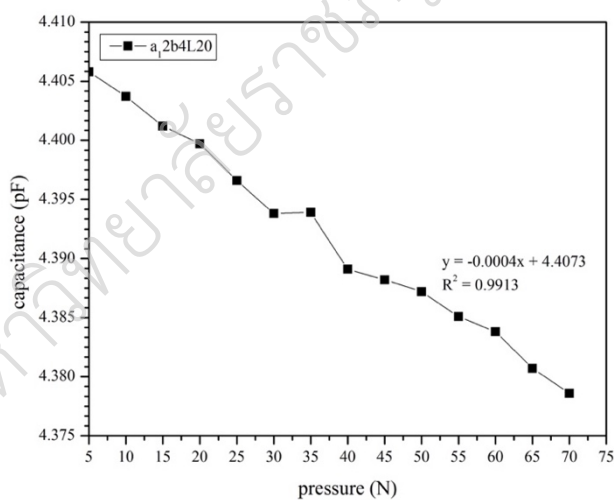
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร

a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร (L) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร



(ง) $a_1 = 2$ มิลลิเมตร $a_2 = 2$ มิลลิเมตร $b = 4$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

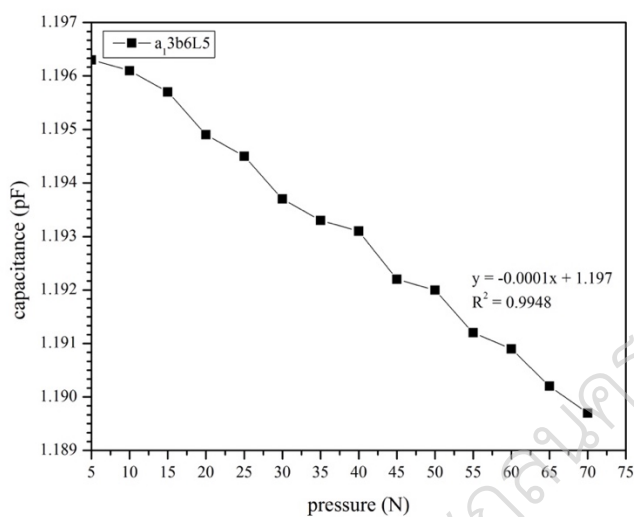
ภาพประกอบ 100 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

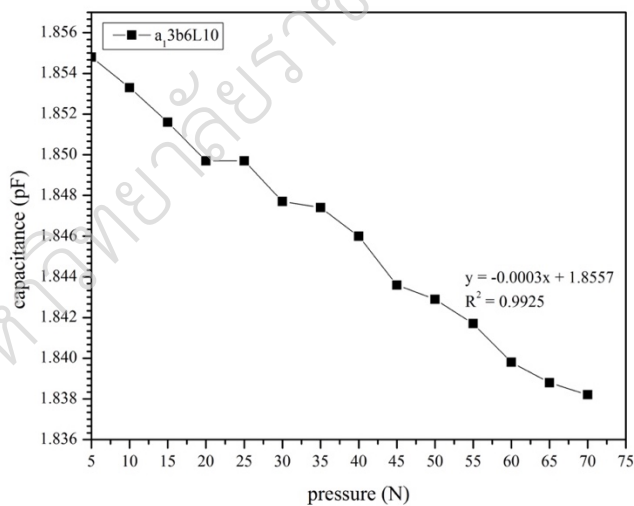
2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร L เท่ากับ

5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ราบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 จากภาพประกอบ 100 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวราบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter
 มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 2 มิลลิเมตร
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9959 เมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9965
 เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.9884
 และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 (R^2) = 0.9913



(ก) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 5$ มิลลิเมตร



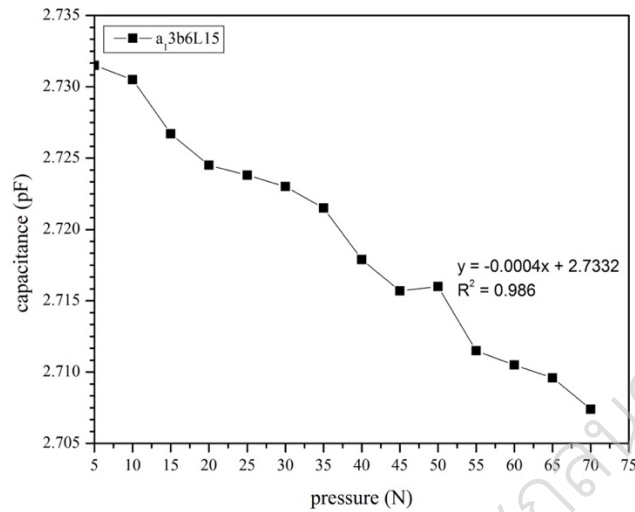
(ข) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 10$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 101 กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล

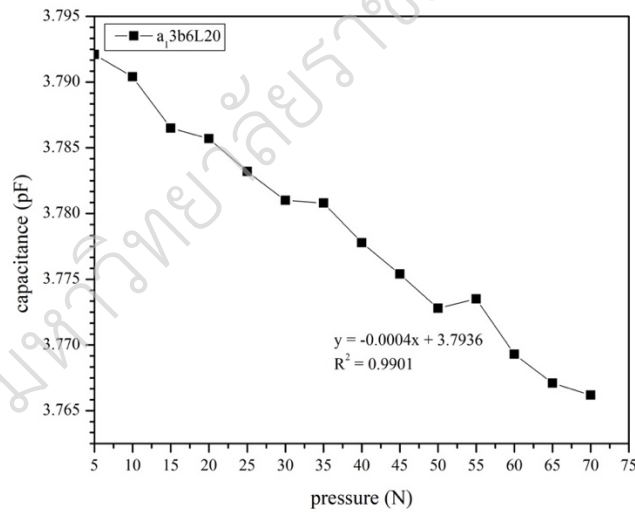
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตร



(ค) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 15$ มิลลิเมตร



(ง) $a_1 = 3$ มิลลิเมตร $a_2 = 3$ มิลลิเมตร $b = 6$ มิลลิเมตร และ $L = 20$ มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 101 (ต่อ) กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ

3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร L เท่ากับ

5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์
 แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาว
 ของแผ่นตัวนำ จากภาพประกอบ 101 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงกดกับค่าความจุไฟฟ้า
 ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่วัดด้วยเครื่องวัด LCR
 Meter มีผลตอบสนองเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N)
 โดยเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 $(R^2) = 0.9948$ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 $(R^2) = 0.9925$ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
 $(R^2) = 0.986$ และ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่าง
 ระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์
 การตัดสินใจ $(R^2) = 0.9901$

4. ทดสอบค่าความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ผลการทดสอบหาค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ แสดงดังตาราง 9 - 12

ตาราง 9 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ

การวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ

1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร

และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L5$	0.1860
$a_1 2b4L5$	0.4967
$a_1 3b6L5$	1.2687

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 9 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1860 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.4967 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 1.2687 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ตาราง 10 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L10$	0.1609
$a_1 2b4L10$	1.5846
$a_1 3b6L10$	0.4687

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 10 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1609 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 1.5846 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.4687 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ตาราง 11 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L15$	0.0207
$a_1 2b4L15$	0.7851
$a_1 3b6L15$	0.2414

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 11 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.0207 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.7851 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.2414 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ตาราง 12 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L20$	0.0802
$a_1 2b4L20$	0.1696
$a_1 3b6L20$	0.1502

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 12 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.0802 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1696 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1502 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ผลการทดสอบหาค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ

b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง แสดงดังตาราง 13 - 15

ตาราง 13 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ

การวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ

2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L5$	0.1860
$a_1 1b2L10$	0.1609
$a_1 1b2L15$	0.0207
$a_1 1b2L20$	0.0802

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 13 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1860 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1609 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.0207 พิกอฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.0802 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ตาราง 14 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 2b4L5$	0.4967
$a_1 2b4L10$	1.5846
$a_1 2b4L15$	0.7851
$a_1 2b4L20$	0.1696

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 14 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.4967 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 1.5846 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร

b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.7851 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1696 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

ตาราง 15 การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ

การวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
a_1 3b6L5	1.2687
a_1 3b6L10	0.4687
a_1 3b6L15	0.2414
a_1 3b6L20	0.1502

ผลการทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 15 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 1.2687 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.4687 พิโกฟารัดต่อนิวตัน

(pF/N) ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.2414 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.1502 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

5. ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกด

ผลการทดสอบหาค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ แสดงดังตาราง 16 - 19

ตาราง 16 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนาน

สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L5	0.865 (86.5%)
a_1 2b4L5	0.983 (98.3%)
a_1 3b6L5	0.990 (99.0%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาว

ของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 16 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.865 หรือ 86.5 % ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.983 หรือ 98.3% และ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.990 หรือ 99.0%

ตาราง 17 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ

สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L10	0.984 (98.4%)
a_1 2b4L10	0.993 (99.3%)
a_1 3b6L10	0.980 (98.0%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 17 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ

ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.984 หรือ 98.4% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.993 หรือ 99.3% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.980 หรือ 98.0%

ตาราง 18 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรอลคาปาซิเตอร์แนวนอน สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L15	0.983 (98.3%)
a_1 2b4L15	0.979 (97.9%)
a_1 3b6L15	0.973 (97.3%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรอลคาปาซิเตอร์แนวนอน สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 18 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความ

ถูกต้องอยู่ที่ 0.983 หรือ 98.3% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.979 หรือ 97.9% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.973 หรือ 97.3%

ตาราง 19 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนาน

สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร, 2 มิลลิเมตร, 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L20	0.991 (99.1%)
a_1 2b4L20	0.988 (98.8%)
a_1 3b6L20	0.985 (98.5%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนาน สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 19 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.991 หรือ 99.1% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง

แผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.988 หรือ 98.8% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.985 หรือ 98.5%

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง แสดงดังตาราง 20 - 22

ตาราง 20 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
$a_1 1b2L5$	0.865 (86.5%)
$a_1 1b2L10$	0.984 (98.4%)
$a_1 1b2L15$	0.983 (98.3%)
$a_1 1b2L20$	0.991 (99.1%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 20 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความ

ถูกต้องอยู่ที่ 0.865 หรือ 86.5% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.984 หรือ 98.4% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.983 หรือ 98.3% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.991 หรือ 99.1%

ตาราง 21 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
$a_1 2b4L5$	0.983 (98.3%)
$a_1 2b4L10$	0.993 (99.3%)
$a_1 2b4L15$	0.979 (97.9%)
$a_1 2b4L20$	0.988 (98.8%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 21 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ

ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้อง อยู่ที่ 0.983 หรือ 98.3% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.993 หรือ 99.3% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.979 หรือ 97.9% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.988 หรือ 98.8%

ตาราง 22 การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 3b6L5	0.990 (99.0%)
a_1 3b6L10	0.980 (98.0%)
a_1 3b6L15	0.973 (97.3%)
a_1 3b6L20	0.985 (98.5%)

ผลการทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 22 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้อง อยู่ที่ 0.990 หรือ 99.0% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.980 หรือ 98.0% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.973 หรือ 97.3% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.985 หรือ 98.5%

6. ทดสอบความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

ผลการทดสอบหาค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ แสดงดังตาราง 23 - 26

ตาราง 23 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร
 a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร
 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
$a_1 1b2L5$	99.33%
$a_1 2b4L5$	99.83%
$a_1 3b6L5$	99.93%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 23 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ
 ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่า
 ความแม่นยำอยู่ที่ 99.33% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด
 เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.83% และตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่น
 ตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้าง
 ของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.93%

ตาราง 24 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ

สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร

a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a_1 1b2L10	99.90%
a_1 2b4L10	99.93%
a_1 3b6L10	99.88%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 24 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.90% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.93% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ มีเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.88%

ตาราง 25 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร
 a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร
 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
$a_1 1b2L15$	99.89%
$a_1 2b4L15$	99.90%
$a_1 3b6L15$	99.88%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 25 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนว
 ระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ
 ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความ
 แม่นยำอยู่ที่ 99.89% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.90% และตัวรับรู้
 แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่น
 ตัวนำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้าง
 ของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.88%

ตาราง 26 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ

สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร

a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร

6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a_1 1b2L20	99.94%
a_1 2b4L20	99.92%
a_1 3b6L20	99.91%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากตาราง 26 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.94% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.92% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.91%

ผลการทดสอบหาค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ

b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง แสดงดังตาราง 27 - 29

ตาราง 27 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ

สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร

และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
$a_1 1b2L5$	99.33%
$a_1 1b2L10$	99.90%
$a_1 1b2L15$	99.89%
$a_1 1b2L20$	99.94%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ

สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 27 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.33% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.90% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.89% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์
 แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ
 ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความ
 แม่นยำอยู่ที่ 99.94%

ตาราง 28 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
 b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
 และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
$a_1 2b4L5$	99.83%
$a_1 2b4L10$	99.93%
$a_1 2b4L15$	99.90%
$a_1 2b4L20$	99.92%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
 สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ
 ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ
 มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 28 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ
 การวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่น
 ตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่
 99.83% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ
 ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
 b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ
 ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.93% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์

ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.90% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.92%

ตาราง 29 การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
$a_1 3b6L5$	99.93%
$a_1 3b6L10$	99.88%
$a_1 3b6L15$	99.88%
$a_1 3b6L20$	99.91%

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ สำหรับการวัดแรงกด a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลง จากตาราง 29 พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.93% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ

ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.88% ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.88% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิรัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.91%

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนว
ระนาบสำหรับการวัดแรงกด ผู้วิจัยได้สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ ตามลำดับ ดังนี้

1. ความมุ่งหมายของการวิจัย
2. สมมุติฐานของการวิจัย
3. ขอบเขตของการวิจัย
4. การวิเคราะห์ข้อมูล
5. สรุปผลการวิจัย
6. อภิปรายผลการวิจัย
7. ข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการ
วัดแรงกด
2. เพื่อทดสอบต้นแบบตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัด
แรงกดที่สร้างขึ้น

สมมุติฐานของการวิจัย

เมื่อพื้นที่ของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบซึ่งประกอบด้วย
ประกอบด้วย 1) a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ 2) a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 3) b คือ
ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ 4) L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำและแรงกด
เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์เกรด FR-4 ด้านหนึ่งเคลือบผิวทองแดงอีกด้านหนึ่งเป็นผิวอีพ็อกซี (Epoxy) โปรงใส เป็นแผ่นปริ้นท์แบบด้านเดียว (single-sided) ค่าความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่ (ϵ_r) = 4.6 แผ่นทองแดงมีขนาดความหนา (t) = 0.105 มิลลิเมตร
2. การออกแบบตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop Version: 25.0.0 20230906.r.37 b14e317 arm64 ช่วยในการออกแบบ
3. ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สร้างด้วยวิธีการใช้ทรายฟิล์ม (Dry Film)
4. ต้นแบบที่ใช้ในการวิจัย เป็นตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จำนวน 12 รูปแบบ
5. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงกดเลือกใช้ชุด Table Top Universal Testing Machine Force Test MCT series ยี่ห้อ A&D รุ่น MCT-2510 (Maximum Load 500 N) ถูกติดตั้งที่อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร (อาคาร 9)
6. เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อเก็บผลการทดสอบเลือกใช้ LCR Meter รุ่น LCR-6100 ยี่ห้อ GW Instek เลือกใช้ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต (Kilohertz: KHz) และแรงดันไบอัส (Bias Voltage) ที่ 2 โวลต์ (Volt)

การวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิทัลดคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ

b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่

2. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง

3. เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

4. ทดสอบค่าความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

5. ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

6. ทดสอบค่าความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดในครั้งนี้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่

1.1 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ พบว่า ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีความจุไฟฟ้ามากที่สุดคือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ

1.2 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบอินเทอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์

1.3 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์

แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ พบว่า ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีความจุไฟฟ้ามากที่สุดคือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับ

การวัดแรงกตที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.7054 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.6661 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกตที่มีความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกตที่มี a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.7315 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.7074 พิโกฟารัด (pF)

การทดลองใช้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดกับระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเพิ่มระดับของแรงกดครั้งละ 5 นิวตัน พร้อมกับวัดค่าความจุที่ได้จากตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดด้วยเครื่องวัด LCR Meter เพื่อทำการเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ

2.1 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงตามระดับของแรงกด ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความจุมากที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 5.3138 พิโกฟารัด (pF) ถึง 5.2889 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 2.2224 พิโกฟารัด (pF) ถึง 2.1118 พิโกฟารัด (pF)

2.2 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงตามระดับของแรงกด ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนานสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาว

ของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 4.4058 พิโกฟารัด (pF) ถึง 4.3786 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.3338 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.3173 พิโกฟารัด (pF)

2.3 ผลการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงตามระดับของแรงกด ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 3.7921 พิโกฟารัด (pF) ถึง 3.7662 พิโกฟารัด (pF) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1.1963 พิโกฟารัด (pF) ถึง 1.1897 พิโกฟารัด (pF)

3. เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเป็นการทดลองใช้วัดระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยเพิ่มระดับของแรงกดครั้งละ 5 นิวตัน พร้อมกับวัดค่าความจุที่ได้จากตัวรับรู้

แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดด้วยเครื่องวัด LCR Meter เพื่อทำการเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นที่ได้จากการวัดของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่า ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตลอดย่านการวัดระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.9965 ถึง 0.9901 โดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่า (R^2) = 0.9965 และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่า (R^2) = 0.9901

4. ทดสอบความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกด

การทดสอบหาความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความไวสูงสุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ กับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 0.0207 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความไวต่ำที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แวนเนนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้าง

ของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความไวอยู่ที่ 1.5846 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

5. ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

การทดสอบหาค่าความถูกต้อง ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์
 แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่าง
 แผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาว
 ของแผ่นตัวนำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบ
 แตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัด
 แรงกดที่มีค่าความถูกต้องสูงที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการ
 วัดแรงกดที่ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 4
 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.993
 หรือ 99.3 % และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่า
 ความถูกต้องต่ำที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่
 a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ
 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ
 L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0.865 หรือ 86.5 %

6. ทดสอบค่าความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์
แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

การทดสอบหาค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความแม่นยำสูงสุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ

1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.94% และตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีค่าความแม่นยำต่ำที่สุด คือ ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 99.33%

อภิปรายผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. ค่าความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ จากการทดลองเมื่อนำตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นมาทดสอบกับระดับของแรงกดตั้งแต่ 5 นิวตัน (N) ถึง 70 นิวตัน (N) โดยทำการเพิ่มระดับของแรงกดครั้งละ 5 นิวตัน (N) จะเห็นได้ว่าค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นนั้นในแต่ละรูปแบบจะมีค่าความจุทางไฟฟ้าที่วัดได้ไม่เท่ากัน เนื่องมาจาก a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำและ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ถูกนำมาทดสอบ จึงส่งผลทำให้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุทางไฟฟ้า

2. ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง จากการทดลองสามารถวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของระดับของแรงกดได้ โดยตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดแต่ละ

รูปแบบจะมีค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไม่เท่ากัน เนื่องจาก L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ในการเก็บประจุของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมีมากขึ้น โดยในการทดลองนี้กำหนดให้ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าคงที่ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าน้อย แต่ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำมีค่ามาก จะทำให้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดรูปแบบนั้นมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบที่แตกต่างไปเนื่องจาก L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำที่ยังมีค่ามากจะทำให้ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมี A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเก็บประจุทางไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย

3. เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดเมื่อ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำตลอดย่านของแรงกด พบว่าความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9965 ถึง 0.9901

4. ทดสอบค่าความไว (sensitivity) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยที่ค่าความไว คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของความจุต่อแรงกดที่ทดสอบ ในการทดสอบใช้แรงกดที่ 5 นิวตัน (N) จากการทดสอบหาค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล

คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมีค่าความไว อยู่ระหว่าง 0.0207 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N) ถึง 1.5846 พิโกฟารัดต่อนิวตัน (pF/N)

5. ทดสอบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด จากการทดสอบหาค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมีค่าความถูกต้องอยู่ระหว่าง 0.993 ถึง 0.865 เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ค่าความถูกต้องอยู่ระหว่าง 99.3% ถึง 86.5%

6. ทดสอบค่าความแม่นยำ (Precision) ของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดยค่าความแม่นยำนี้จะบ่งชี้ถึงความสามารถของตัวรับรู้ในการวัดค่า นั้น ๆ หรือค่าเดิมซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมซึ่งทำการวัดซ้ำค่าเดิมหลาย ๆ ครั้ง จากการทดสอบหาค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่ a_1 คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ a_2 คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ b คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ L คือ ความยาวของแผ่นตัวนำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 12 รูปแบบ พบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมีค่าความแม่นยำอยู่ระหว่าง 99.94 % ถึง 99.33 %

จากการศึกษาพบว่าตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์นั้นโครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับนิ้วมือหรือซี่หวีซึ่งถูกพัฒนามาจากตัวเก็บประจุที่ทำงานเสมือนกับการนำตัวเก็บประจุมาต่อกันแบบขนาน (Paul, J., & Philip, J., 2020 ; George, S. P., Isaac, J., & Philip, J., 2019) การออกแบบใช้การวางแผ่นตัวนำในแนวระนาบ ซึ่งจะวางสลับกันระหว่างซี่ที่เป็นขั้วบวกกับซี่ที่เป็นขั้วลบ ลักษณะคล้ายกับการนำคาปาซิเตอร์มาต่อกันแบบขนานทำให้มีค่าความจุทางไฟฟ้าและง่ายต่อการวัดค่าความจุทางไฟฟ้า โครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์นั้นจะเป็นขึ้นเดียวกันจึงสามารถผลิตได้ โดยระหว่างแผ่นตัวนำและความยาวของแผ่นตัวนำ มีการเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย (Ye, X. et al., 2011) ดังนั้นตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น ใช้ในการวัด

ความเข้มของคลื่นเสียง ความชื้น การวัดระยะ การวัดระดับและวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Rachmanita, R. E. et al., 2019) การวัดระดับน้ำ (Boonkirdram, S., & Sa-Ngiamvibool, W., 2015) การหาปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำนมดิบ (Phimphisat, S., & Sa-ngiamvibool, W., 2015) การนำตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบไปใช้ในการวัดแรงกดนั้น พบว่าส่วนใหญ่มีการนำตัวรับรู้ที่สามารถยืดหยุ่นได้ในการประยุกต์ใช้งาน (Chowdhury, A. H. et al., 2022; Ha, K. H. et al., 2022) เช่น การนำอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แบบยืดหยุ่นไปใช้เป็นผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ และติดในเครื่องนุ่งห่ม (Qin, R. et al., 2021) การนำตัวรับรู้ไปติดไว้ในรองเท้าของเด็กเพื่อตรวจสอบการลงน้ำหนักของเท้า (De Guzman, S. et al., 2022) การผลิตตัวรับรู้ที่สวมใส่ได้สำหรับการตรวจจับแบบสัมผัสและไม่สัมผัส (Chowdhury, A. H. et al., 2017) เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษา พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้จัดทำขึ้นในเรื่องของหลักการ การสร้างและการออกแบบ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการนำอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่ผลิตขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์มาใช้เป็นตัวรับรู้แรงกด ซึ่งมีการศึกษาถึงความเป็นได้ที่จะนำมาใช้งานเกี่ยวกับการตรวจจับการรับรู้แรงกดไม่กว้างขวางและแพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงถือได้ว่าเป็นการนำอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่ผลิตจากแผ่นวงจรพิมพ์มาใช้เป็นตัวรับรู้แรงกดเป็นครั้งแรก ผลของการศึกษาทำให้ทราบว่าสามารถนำอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแรงกดได้ อีกทั้งยังสามารถนำตัวรับรู้แรงกดไปใช้เป็นตัวแบบในการพัฒนาตัวรับรู้แรงกดแบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบในรูปแบบอื่นได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแรงกด
2. ควรนำอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) มาประยุกต์ใช้กับตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้น เพื่อการใช้งานที่หลากหลาย
3. ควรมีการทดสอบตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกดที่สร้างขึ้นเกี่ยวกับจำนวนครั้งสูงสุดที่สามารถนำไปใช้งานได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บรรณานุกรม

- การวัดแรงดัน PRESSURE MEASUREMENT. (2019). เข้าถึงได้จาก
https://www.gotrading.co.th/Article/Article_detail/13 25 มกราคม 2566.
- กิตติวุฒิ จินนะบุตร. (2548). เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- คาปาซิเตอร์ (Capacitor). (n.d.). ตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor) คืออะไร. เข้าถึงได้จาก http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2490 25 มกราคม 2566.
- ฐิติมา เอ็งเจริญ. (2554). การวัดสภาพยอมเชิงซ้อนของของเหลวที่มีความถี่ไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ตัวเก็บประจุ. (2566). เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/nithwat023new/taw-keb-pracu-capacitors> 15 กุมภาพันธ์ 2566.
- ธิตินันท์ ตะเกาน้อย. (2555). ระบบแผ้วระวังตรวจจับระดับน้ำโดยใช้หัววัดอัจฉริยะแบบอินเตอร์ ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์. *KKU ENGINEERING JOURNAL*, 39, 249-256.
- นวภัทรา หนูนา และ ทวีพล ชี้อัสตัย. (2555). การวัดและเครื่องมือวัด การประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอาหาร : Spiral bourdon/สปริงดองแบบก้นหอย เข้าถึงได้จาก <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4328/spiral-bourdon-สปริงดองแบบก้นหอย> 15 กุมภาพันธ์ 2566.
- นิमित ชมนาวัง, วัชรพล ภูมรา และอดิสร เตื่อนตรานนท์. (2556). การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บทที่ 2 คุณสมบัติของ R-L-C. (2553). เข้าถึงได้จาก <https://blog.rmutl.ac.th/montri/assets/week-2-pp22.pdf> 5 มกราคม 2566.
- บุญชม ศรีสะอาด. (2541). วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.

- แฟ็คโตมาร์ท. (2566). *ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Pressure ที่คุณไม่ควรพลาด*. เข้าถึงได้จาก <https://mall.factomart.com/principle-pressure/> 1 มีนาคม 2566.
- มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. (ม.ป.ป.). *บทที่ 1 ความผิดพลาดจากการวัด*. เข้าถึงได้จาก <http://blog.bru.ac.th/wp-content/uploads/bp-attachments/9206/บทที่-1.pdf>, 12 กุมภาพันธ์ 2566.
- แรงต้านสนามไฟฟ้า. (n.d.). เข้าถึงได้จาก https://hmong.in.th/wiki/Dielectric_permittivity 12 มกราคม 2566.
- สุริยะ ไผ่ชัยภูมิ. (2013). *ไดอิเล็กทริก*. เข้าถึงได้จาก <https://www.slideshare.net/ssuser5fb065/ss-26428657> 12 มกราคม 2566.
- Ali, S. F., & Mandal, N. (2019). Design and development of an electronic level transmitter using interdigital capacitor. *IEEE Sensors Journal*, 19(13), 5179-5185.
- AUDIOPHONE. (n.d.). *Polypropylene Dayton Audio Capacitor*. Retrieved from <https://www.audiophonics.fr/en/dayton-audio-capacitors/dayton-audio-dmpc-82-polypropylene-capacitor-250v-82f-p-13110.html> February 15th, 2023.
- Avnet Abacus. (2023). *Pressure Sensor: The Design Engineer's Guide*. Retrieved from <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/pressure-sensing-elements/> February 15th, 2023.
- Armstrong, K., Das, S., & Cresko, J. (2020). The energy footprint of automotive electronic sensors. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00195.
- Angkawisittpan, N., & Manasri, T. J. M. S. R. (2012). Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor. *Measurement Science Review*, 12(1), 8-13.

- Agarwala, S., Goh, G. L., Yap, Y. L., Goh, G. D., Yu, H., Yeong, W. Y., & Tran, T. (2017). Development of bendable strain sensor with embedded microchannels using 3D printing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 593-599.
- Aduen, J. F., Castello, R., Daniels, J. T., Diaz, J. A., Safford, R. E., Heckman, M. G., ... & Burger, C. D. (2011). Accuracy and precision of three echocardiographic methods for estimating mean pulmonary artery pressure. *Chest*, 139(2), 347-352.
- Bima, A., Hadi, S., Fadli, M. N., Hidayah, N., & Arzani, L. D. P. (2022). Designing a Honey Quality Tool Based on Gas Sensor and Color Sensor. *International Journal of Engineering and Computer Science Applications (IJECSA)*, 1(2), 94-102.
- Bai, N., Wang, L., Wang, Q., Deng, J., Wang, Y., Lu, P., ... & Guo, C. F. (2020). Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity. *Nature communications*, 11(1), 209.
- Boonkirdram, S., & Sa-Ngiamvibool, W. (2015). A novel planar interdigital capacitor level sensor. *Przeglad Elektrotechniczny*, 91(8), 125-128.
- BrainKart.com.(2018). Chapter: 12th Physics : Electrostatics : Capacitance of a parallel plate capacitor. Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Capacitance-of-a-parallel-plate-capacitor_38390/ February 7th, 2023.
- CAPACITANCE.(n.d.). Retrieved from <http://avstop.com/ac/apgenera/capacitance.html> February 15th, 2023.
- Chinpanthana, N. (2022). แบบจำลองการเรียนรู้ท่าทางมนุษย์จากการเคลื่อนไหวด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการและแบบหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว, *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 12(1), 27-36.
- Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P., & Jindapetch, N. (2014). A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 209, 175-182.

- Chowdhury, A. H., Jafarizadeh, B., Pala, N., & Wang, C. (2022). Wearable Capacitive Pressure Sensor for Contact and Non-Contact Sensing and Pulse Waveform Monitoring. *Molecules*, 27(20), 6872.
- Cavedo, F., Esmaili, P., & Norgia, M. (2022). Self-Mixing Laser Distance-Sensor Enhanced by Multiple Modulation Waveforms. *Sensors*, 22(21), 8456.
- De Guzman, S., Lowe, A., Williams, C., Kalra, A., & Anand, G. (2022). The Development of a Built-In Shoe Plantar Pressure Measurement System for Children. *Sensors*, 22(21), 8327.
- Du, Y., Yu, G., Dai, X., Wang, X., Yao, B., & Kong, J. (2020). Highly stretchable, self-healable, ultrasensitive strain and proximity sensors based on skin-inspired conductive film for human motion monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(46), 51987-51998.
- Delipinar, T., Shafique, A., Gohar, M. S., & Yapici, M. K. (2021). Fabrication and materials integration of flexible humidity sensors for emerging applications. *ACS omega*, 6(13), 8744-8753.
- Electrolytic Capacitor*.(n.d.). Retrieved from <https://i0.wp.com/electricalfundablog.com/wp-content/uploads/2018/08/Electrolytic-Capacitor.png?ssl=1> February 15th, 2023.
- Electronicsnote. (n.d.). *Polystyrene Capacitor*. Retrieved from https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/capacitors/polystyrene.php February 15th, 2023.
- Faishol, M., Ismail, M., & Hapsari, J. P. (2022). Design and Build a Water Pump Protection Tool Using IOT (Internet Of Things) Based Water Flow Sensor. *Journal of Applied Science and Technology*, 2(02), 16-27.
- Fu, Y., He, F., Guo, W., Qu, X., Duan, Z., Hu, M., & Ma, L. (2022, December). Sensitivity Enhanced Touch-mode Capacitive Pressure Sensor with Double-cavity. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2396, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.

- George, S. P., Issac, J., & Philip, J. (2018). Geometry dependence of the response of inter-digital capacitive structures: a finite element analysis. *Sensors & Transducers*, 228(12), 71-78.
- _____. (2019). Performance Assessment of Inter-Digital Capacitive Structure-Finite Element Approach. In *Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques: Select Proceedings of AEOTIT 2018* (pp. 431-439). Singapore: Springer Singapore.
- Ha, K. H., Huh, H., Li, Z., & Lu, N. (2022). Soft capacitive pressure sensors: trends, challenges, and perspectives. *ACS nano*, 16(3), 3442-3448.
- Howard, M. (2013). The new generation of inductive sensors. *World Pumps*, 2013(2), 10-11.
- <http://mpecs.sc.mahidol.ac.th/forums/index.php?topic=88.0>.
- <http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELTC1203/capacitor/principle.htm>.
- <https://www.altium.com/documentation/altium-designer/understanding-printed-circuit-board-makeup?version=17.1>.
- http://www.hs8iyx.com/html/rlc_circuit.html.
- Hua, T., Xiang, Z., Xia, X., Li, Z., Sun, D., Wu, Y., ... & Li, R. (2023). A Sensitivity-Optimized Flexible Capacitive Pressure Sensor with Cylindrical Ladder Microstructural Dielectric Layers. *Sensors*, 23(9), 4323.
- Huang, K. H., Tan, F., Wang, T. D., & Yang, Y. J. (2019). A highly sensitive pressure-sensing array for blood pressure estimation assisted by machine learning techniques. *Sensors*, 19(4), 848.
- Jameco. (n.d.). *Film Capacitor Polycarbonate 0.47uF 250V 5%*. Retrieved from https://www.jameco.com/z/MKC-10-0-47-250V-5--Wima-Film-Capacitor-Polycarbonate-0-47uF-250V-5-_2280063.html February 15th, 2023.
- Jeffrey Jenkin. (2018). *EV Engineering News : A closer look at film capacitors*. Retrieved from <https://chargedevs.com/features/a-closer-look-at-film-capacitors/> February 15th, 2023.

- Kim, Y., & Oh, J. H. (2020). Recent progress in pressure sensors for wearable electronics: From design to applications. *Applied Sciences*, 10(18), 6403.
- Kuo, J. T., Yu, L., & Meng, E. (2012). Micromachined thermal flow sensors—A review. *Micromachines*, 3(3), 550-573.
- Korkua, S. K., & Sakphrom, S. (2020). Low-cost capacitive sensor for detecting palm-wood moisture content in real-time. *Heliyon*, 6(8).
- Lee, J., Jung, Y., Sung, S. H., Lee, G., Kim, J., Seong, J., ... & Jeon, S. (2021). High-performance gas sensor array for indoor air quality monitoring: The role of Au nanoparticles on WO₃, SnO₂, and NiO-based gas sensors. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(2), 1159-1167.
- Lee, Y., Park, M. K., & Park, M. (2022). Improving Lane Detection Performance for Autonomous Vehicle Integrating Camera with Dual Light Sensors. *Electronics*, 11(9), 1474.
- Liu, F., Dai, S., Cao, J., Zhang, Z., Cheng, G., & Ding, J. (2022). CNTs based capacitive stretchable pressure sensor with stable performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 343, 113672.
- Liu, N., Zhong, P., Zheng, C., Sun, K., Zhong, Y., & Yang, H. (2022). Integrated Piezoresistive Normal Force Sensors Fabricated Using Transfer Processes with Stiction Effect Temporary Handling. *Micromachines*, 13(5), 759.
- Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du, Y., & Zahn, M. (2004). Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE*, 92(5), 808-845.
- Mak, K. W., & Hao, J. (2014). Advance in the Analysis Models for Characterizing Multi-Layered Interdigital Capacitors. *Int. J. of Advanced Applied Physics Research*, 1(1), 1-8.
- Muhammad, N. I., Abdullahi, M. Y., & Nasiru, M. (2022). DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AUTOMATIC LIGHT CONTROL WITH BIDIRECTIONAL COUNTING SENSOR. *FUDMA JOURNAL OF SCIENCES*, 6(6), 214-223.

- Maddipatla, D., Narakathu, B. B., Ali, M. M., Chlahawi, A. A., & Atashbar, M. Z. (2017, March). Development of a novel carbon nanotube based printed and flexible pressure sensor. In *2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Mechanism of Polarization.(n.d.). *Electronic polarization*. Retrieved from http://www.vias.org/matsch_capmag/matsch_caps_magnetics_chap2_22.html February 7th, 2023.
- Nag, A., Simorangkir, R. B., Valentin, E., Björninen, T., Ukkonen, L., Hashmi, R. M., & Mukhopadhyay, S. C. (2018). A transparent strain sensor based on PDMS-embedded conductive fabric for wearable sensing applications. *IEEE Access*, 6, 71020-71027.
- Nilamaara Electronics.(n.d.). *Mylar Capacitors (Polyester Film) 2.2uf 400V – 225 Mylar Capacitor*. Retrieved from <https://nilambaraelectronics.com/product/2-2uf-400v-225-mylar-capacitor/> February 15th, 2023.
- Okamoto, Y., Nguyen, T. V., Okada, H., & Ichiki, M. (2022). Thermal Flow Sensor With a Bidirectional Thermal Reference. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 31(5), 830-839.
- Park, J. S., Koo, S. M., & Kim, C. H. (2023). Capacitive-Type Pressure Sensor for Classification of the Activities of Daily Living. In *Micro*, 3(1), 35-50.
- Paul, J., & Philip, J. (2020). Inter-digital capacitive structures for sensing applications: Fabrication methods and capacitance measurement techniques. In *AIP Conference Proceedings*, 2663(1),unpaged.
- Phimphisarn, S., & Sa-ngiamvibool, W. (2015). Determination of water added in raw milk using interdigital capacitor sensor. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 91, 265-267.

- Publishing.Polytechnic Hup. (2017). *Construction of PVC gang capacitor*. Retrieved from <https://www.polytechnichub.com/wp-content/uploads/2017/04/PVC-gang-capacitor.jpg> February 7th, 2023.
- Qin, R., Hu, M., Li, X., Liang, T., Tan, H., Liu, J., & Shan, G. (2021). A new strategy for the fabrication of a flexible and highly sensitive capacitive pressure sensor. *Microsystems & nanoengineering*, 7(1), 100.
- Ragolia, M. A., Lanzolla, A. M., Percoco, G., Stano, G., & Di Nisio, A. (2021). Thermal characterization of new 3D-Printed bendable, coplanar capacitive sensors. *Sensors*, 21(19), 6324.
- Rachmanita, R. E. (2019). The high capacitance for electrode structure of interdigital capacitor thin film models. *Creative Science*, 11(2), 55-63.
- RS.(n.d.). *KEMET 100 μ F MnO₂ Tantalum Capacitor 20V dc, T356 Series*. Retrieved from <https://th.rs-online.com/web/p/tantalum-capacitors/5382234> February 7th, 2023.
- Subramaniam, R., Hajjaj, S. S. H., Gsangaya, K. R., Sultan, M. T. H., Mail, M. F., & Hua, L. S. (2023). Redesigning dispenser component to enhance performance crop-dusting agriculture drones. *Materials Today: Proceedings*, 81, 166-172.
- Sakai, O., Kitagawa, T., Sakurai, K., Itami, G., Miyagi, S., Noborio, K., & Taguchi, K. (2021). In-vacuum active color sensor and wireless communication across a vacuum-air interface. *Scientific Reports*, 11(1), 1364.
- Syahansyah, A., Heru, Y., & Saptono, R. (2022). Design and Build a Coconut Ripeness Classifier Using Sound Sensor. *Journal of Telecommunication Network* (Jurnal Jaringan Telekomunikasi), 12(2), 85-88.
- Shi, J. X., Lei, X. W., & Natsuki, T. (2021). Review on carbon nanomaterials-based nano-mass and nano-force sensors by theoretical analysis of vibration behavior. *Sensors*, 21(5), 1907.

- Shi, Z., Wang, T., & Lin, J. (2021). A simultaneous calibration technique of the extrinsic and turntable for structured-light-sensor-integrated CNC system. *Optics and Lasers in Engineering*, 138, 106451.
- S. Repelianto, A., & Kasai, N. (2019). The improvement of flaw detection by the configuration of uniform eddy current probes. *Sensors*, 19(2), 397.
- Sze, S. M. (2008). Semiconductor devices: physics and technology. United States of America: John Wiley & sons.
- Thouti, E., Chauhan, K., Prajesh, R., Farman, M., Maurya, R. K., Sharma, P., & Nagaraju, A. (2022). Flexible capacitive pressure sensors using microdome like structured polydimethylsiloxane dielectric layers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 335, 113393.
- Tomas L. Floyd .(2004). *Electronics Fundamentals 6e: Chapter 9 Capacitor: Fixed Capacitors* Retrieved from <http://mapoly.co.in/wp-content/uploads/2020/03/CH09.pdf> February 15th, 2023.
- Venek, V., Kranzinger, S., Schwameder, H., & Stöggel, T. (2022). Human Movement Quality Assessment Using Sensor Technologies in Recreational and Professional Sports: A Scoping Review. *Sensors*, 22(13), 4786.
- Wu, Q., Qiao, Y., Guo, R., Naveed, S., Hirtz, T., Li, X., ... & Ren, T. L. (2020). Triode-mimicking graphene pressure sensor with positive resistance variation for physiology and motion monitoring. *ACS nano*, 14(8), 10104-10114.
- Wang, F., He, B., Yao, F., Xu, Y., & Zhang, L. (2021). Research on the Sensitivity of Automotive Sensors under the Background of 5G. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1744(2), p. 022028. IOP Publishing.
- Wachulec, M., & Luckner, M. (2021). Fault detection of jet engine heat sensor. *Procedia Computer Science*, 192, 844-852.
- worawut. (2016). *Capacitance*. Retrieved from <http://phichitelec1.blogspot.com/2016/06/capacitance.html> January 25th, 2023

- Xuansn Capacitor. (n.d.). *Feedthrough capacitor what is ?*. Retrieved from <https://www.xuanxcapacitors.com/feedthrough-capacitor-what-is.html> February 7th, 2023.
- Ye, X., Fang, L., Liang, B., Wang, Q., Wang, X., He, L., ... & Ko, W. H. (2011). Studies of a high-sensitive surface acoustic wave sensor for passive wireless blood pressure measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 169(1), 74-82.
- Yamamoto, S., Nakao, O., & Nishimura, H. (2002, June). Touch mode capacitive pressure sensor for passive tire monitoring system. *SENSORS*, 2002 IEEE, 2,1582-1586.
- Yang, C. R., Lin, M. F., Huang, C. K., Huang, W. C., Tseng, S. F., & Chiang, H. H. (2022). Highly sensitive and wearable capacitive pressure sensors based on PVDF/BaTiO₃ composite fibers on PDMS microcylindrical structures. *Measurement*, 202, 111817.
- Yaovalit. (2013). *Capacitors*. Retrieved from <https://www.bloggang.com/mainblog.php?id=yaovarit&month=22-07-2013&group=1&gblog=10> February 15th, 2013.
- Ye, Y., Deng, J., Shen, S., Hou, Z., & Liu, Y. (2016). A novel method for proximity detection of moving targets using a large-scale planar capacitive sensor system. *Sensors*, 16(5), 699.
- Zhu, Y., & Jiao, J. (2022). Automatic Control System Design for Industrial Robots Based on Simulated Annealing and PID Algorithms. *Advances in Multimedia*.

ภาคผนวก

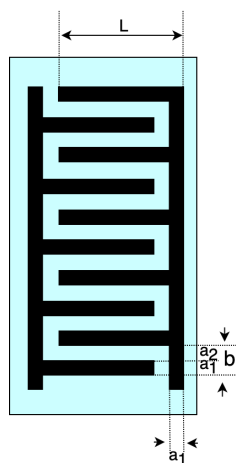
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ก

การออกแบบและสร้างตัวรับรู้แบบอินเทอร์เน็ตจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด

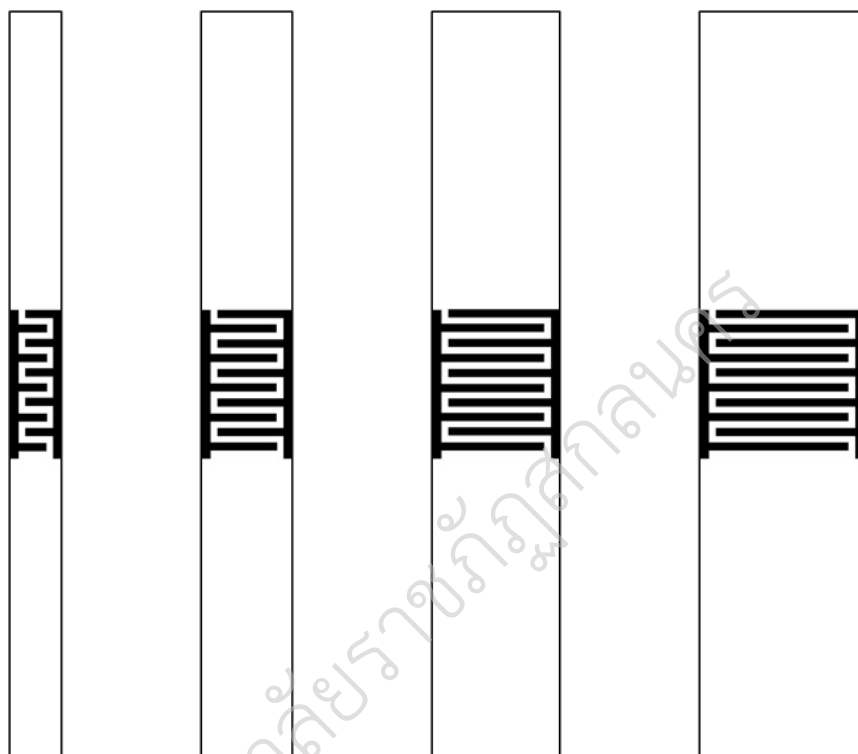
ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด



- (a_1) คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ
 (a_2) คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 (b) คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำกับช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ
 (L) คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

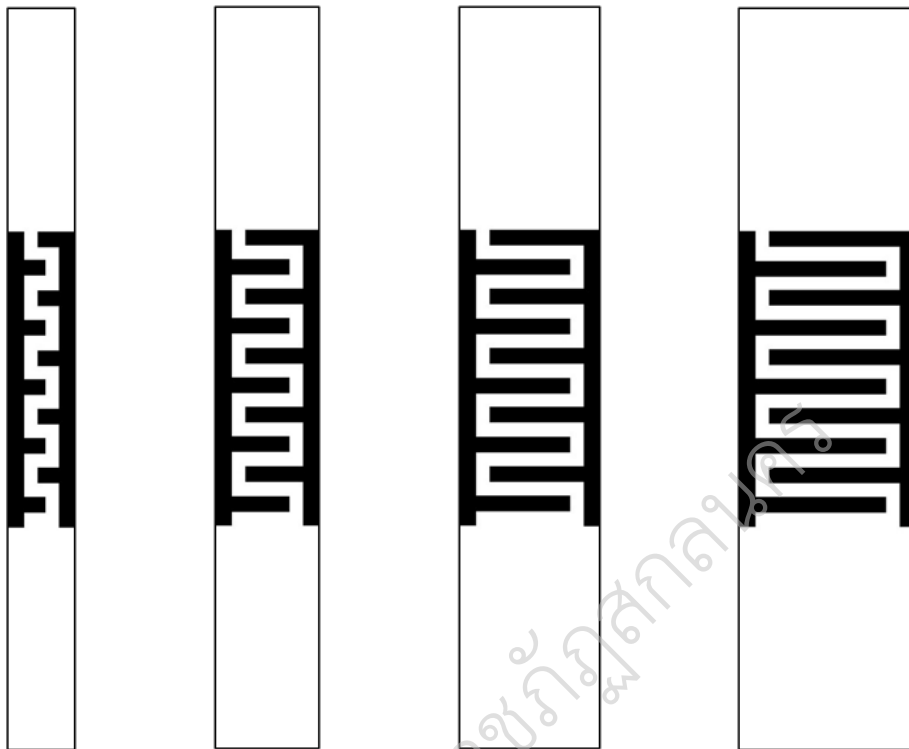
รูปแบบ IDC	a_1	a_2	b	L
1	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
2	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
3	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
4	1 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
5	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
6	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
7	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
8	2 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร	4 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร
9	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
10	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร
11	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	15 มิลลิเมตร
12	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	20 มิลลิเมตร

ตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟฟิเรนเชียลคาปาซิเตอร์แนวนอนสำหรับการวัดแรงกด
ที่ใช้ในการศึกษา



$a_1 = 1, b = 2, L = 5$ $a_1 = 1, b = 2, L = 10$ $a_1 = 1, b = 2, L = 15$ $a_1 = 1, b = 2, L = 20$





$$a_1 = 2, b = 4, L = 5$$

$$a_1 = 2, b = 4, L = 10$$

$$a_1 = 2, b = 4, L = 15$$

$$a_1 = 2, b = 4, L = 20$$




 $a_1 = 3, b = 6, L = 5$
 $a_1 = 3, b = 6, L = 10$
 $a_1 = 3, b = 6, L = 15$
 $a_1 = 3, b = 6, L = 20$


มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ข

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 1b2L5	2	100	5	2.2224
2				10	2.2123
3				15	2.2076
4				20	2.1943
5				25	2.1812
6				30	2.1741
7				35	2.1654
8				40	2.1565
9				45	2.1505
10				50	2.1467
11				55	2.1403
12				60	2.1262
13				65	2.1181
14				70	2.1118
ค่าความจุเฉลี่ย					2.1648

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิรต์:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 1b2L10	2	100	5	2.9566
2				10	2.9534
3				15	2.9516
4				20	2.9506
5				25	2.9497
6				30	2.9471
7				35	2.9456
8				40	2.9441
9				45	2.9429
10				50	2.9399
11				55	2.9395
12				60	2.9368
13				65	2.9346
14				70	2.9344
ค่าความจุเฉลี่ย					2.9448

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 1b2L15	2	100	5	4.7054
2				10	4.7025
3				15	4.6997
4				20	4.6947
5				25	4.6914
6				30	4.6899
7				35	4.6846
8				40	4.6841
9				45	4.6792
10				50	4.6776
11				55	4.6765
12				60	4.6725
13				65	4.6694
14				70	4.6661
ค่าความจุเฉลี่ย					4.6853

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 1b2L20	2	100	5	5.3138
2				10	5.3121
3				15	5.3110
4				20	5.3080
5				25	5.3050
6				30	5.3055
7				35	5.3017
8				40	5.2990
9				45	5.2984
10				50	5.2966
11				55	5.2949
12				60	5.2937
13				65	5.2914
14				70	5.2889
ค่าความจุเฉลี่ย					5.3014

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 2b4L5	2	100	5	1.3338
2				10	1.3321
3				15	1.3310
4				20	1.3299
5				25	1.3292
6				30	1.3282
7				35	1.3265
8				40	1.3248
9				45	1.3233
10				50	1.3225
11				55	1.3217
12				60	1.3199
13				65	1.3185
14				70	1.3173
ค่าความจุเฉลี่ย					1.3256

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 2b4L10	2	100	5	2.1399
2				10	2.1393
3				15	2.1382
4				20	2.1373
5				25	2.1368
6				30	2.1359
7				35	2.1353
8				40	2.1345
9				45	2.1334
10				50	2.1328
11				55	2.1315
12				60	2.1310
13				65	2.1305
14				70	2.1291
ค่าความจุเฉลี่ย					2.1347

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 2b4L15	2	100	5	3.2468
2				10	3.2440
3				15	3.2412
4				20	3.2403
5				25	3.2365
6				30	3.2363
7				35	3.2351
8				40	3.2327
9				45	3.2307
10				50	3.2273
11				55	3.2246
12				60	3.2237
13				65	3.2233
14				70	3.2207
ค่าความจุเฉลี่ย					3.2331

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 2b4L20	2	100	5	4.4058
2				10	4.4037
3				15	4.4012
4				20	4.3997
5				25	4.3966
6				30	4.3938
7				35	4.3939
8				40	4.3891
9				45	4.3882
10				50	4.3872
11				55	4.3851
12				60	4.3838
13				65	4.3807
14				70	4.3786
ค่าความจุเฉลี่ย					4.3920

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 3b6L5	2	100	5	1.1963
2				10	1.1961
3				15	1.1957
4				20	1.1949
5				25	1.1945
6				30	1.1937
7				35	1.1933
8				40	1.1931
9				45	1.1922
10				50	1.1920
11				55	1.1912
12				60	1.1909
13				65	1.1902
14				70	1.1897
ค่าความจุเฉลี่ย					1.1931

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 3b6L10	2	100	5	1.8548
2				10	1.8533
3				15	1.8516
4				20	1.8497
5				25	1.8497
6				30	1.8477
7				35	1.8474
8				40	1.8460
9				45	1.8436
10				50	1.8429
11				55	1.8417
12				60	1.8398
13				65	1.8388
14				70	1.8382
ค่าความจุเฉลี่ย					1.8461

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

ครั้งที่ ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 3b6L15	2	100	5	2.7315
2				10	2.7305
3				15	2.7267
4				20	2.7245
5				25	2.7238
6				30	2.7230
7				35	2.7215
8				40	2.7179
9				45	2.7157
10				50	2.7160
11				55	2.7115
12				60	2.7105
13				65	2.7096
14				70	2.7074
ค่าความจุเฉลี่ย					2.7193

ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด (ต่อ)

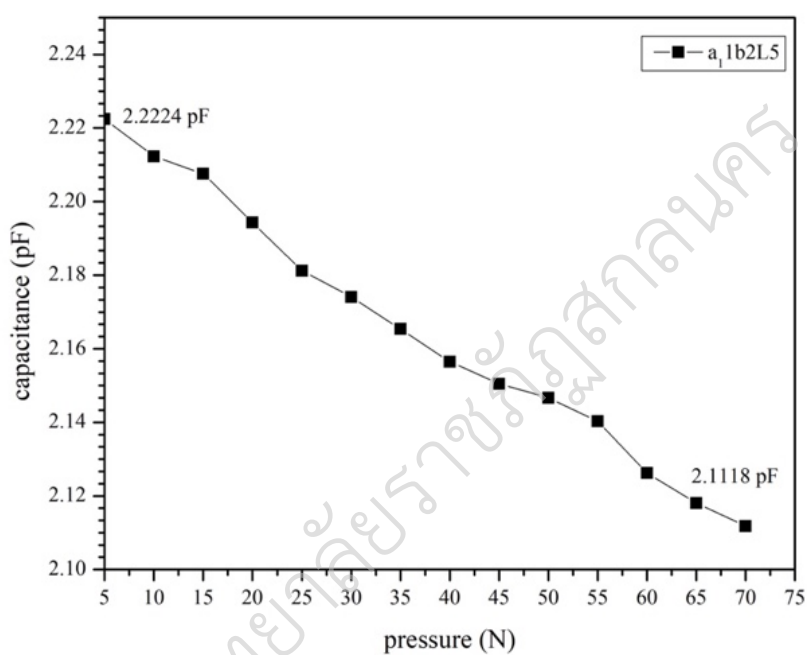
ครั้งที่ทดสอบ	รูปแบบ	แรงดัน (โวลต์: V)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ต:KHz)	แรงกด (นิวตัน: N)	ค่าความจุ (พิโกฟารัด:pF)
1	a ₁ 3b6L20	2	100	5	3.7921
2				10	3.7904
3				15	3.7865
4				20	3.7857
5				25	3.7832
6				30	3.7810
7				35	3.7808
8				40	3.7778
9				45	3.7754
10				50	3.7728
11				55	3.7735
12				60	3.7693
13				65	3.7671
14				70	3.7662
ค่าความจุเฉลี่ย					3.7787

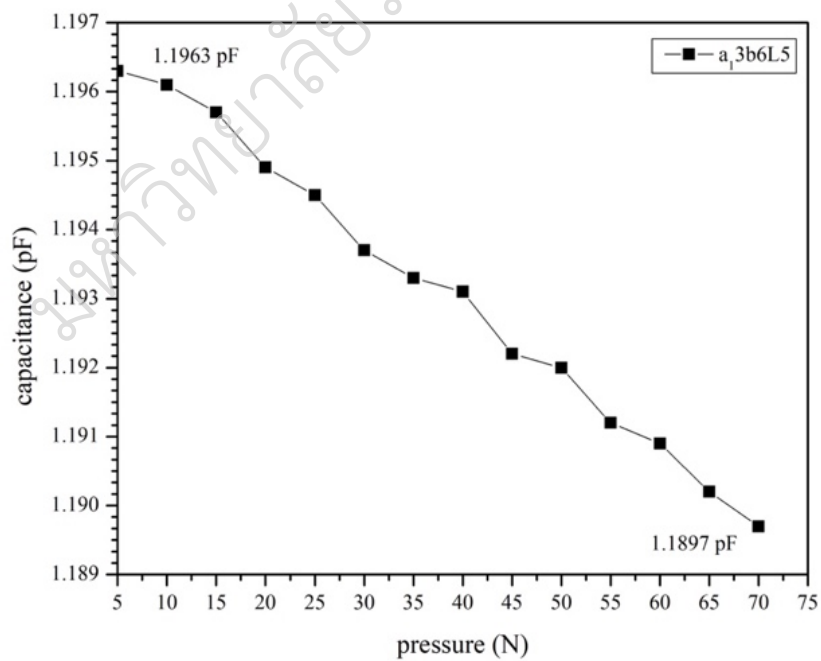
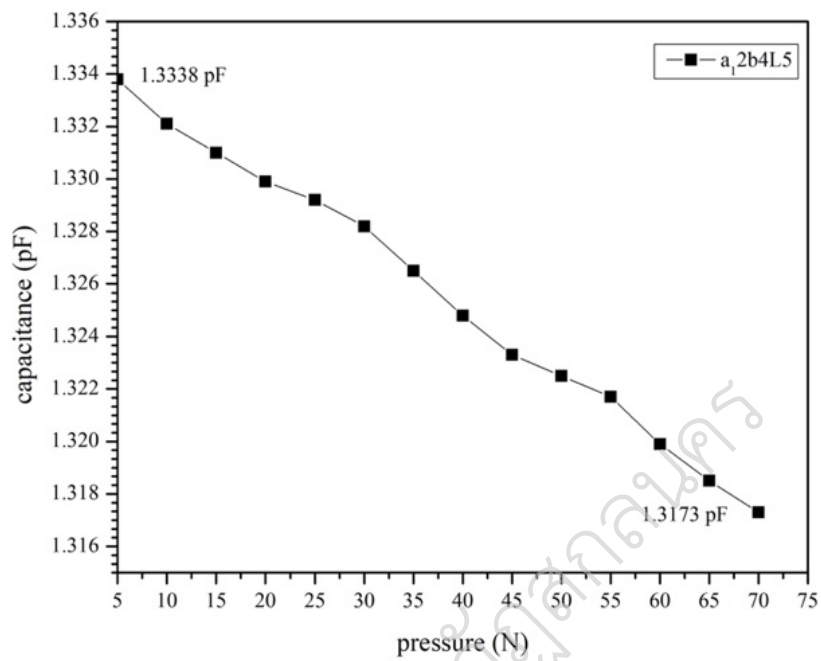
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ค

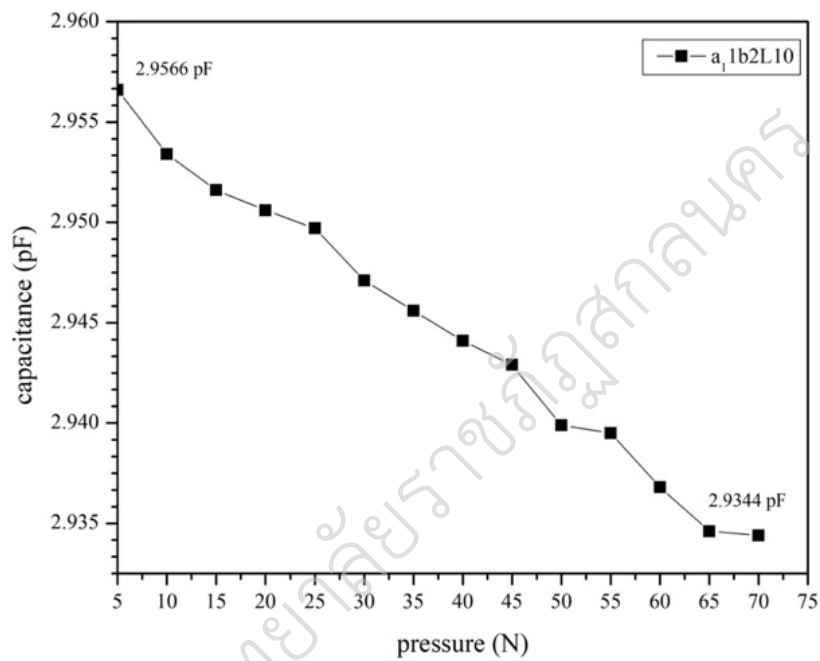
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิทัล
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

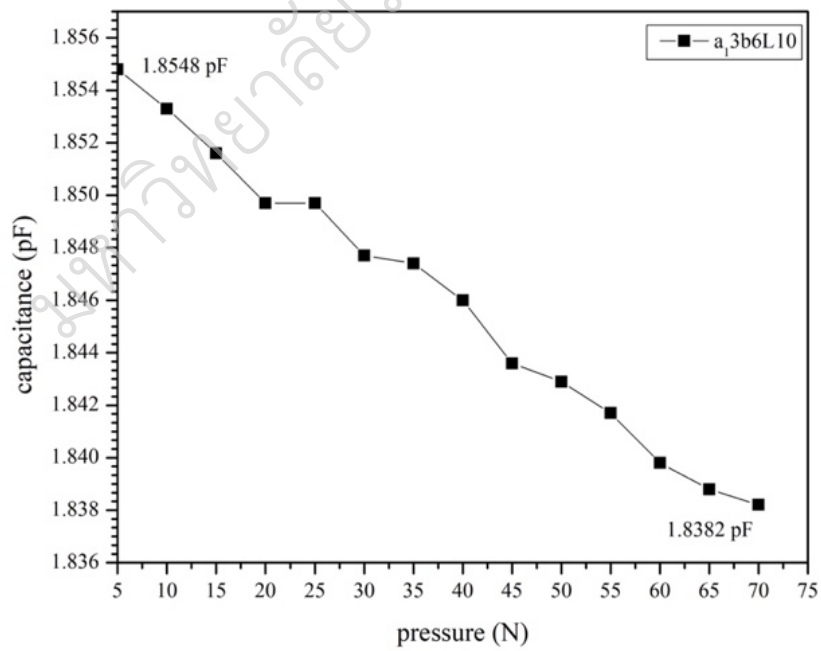
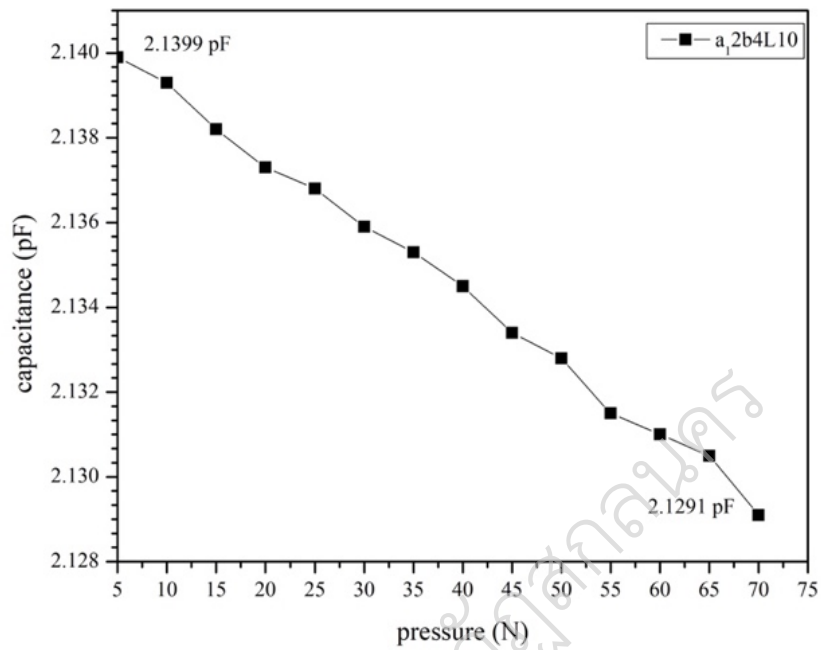
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร



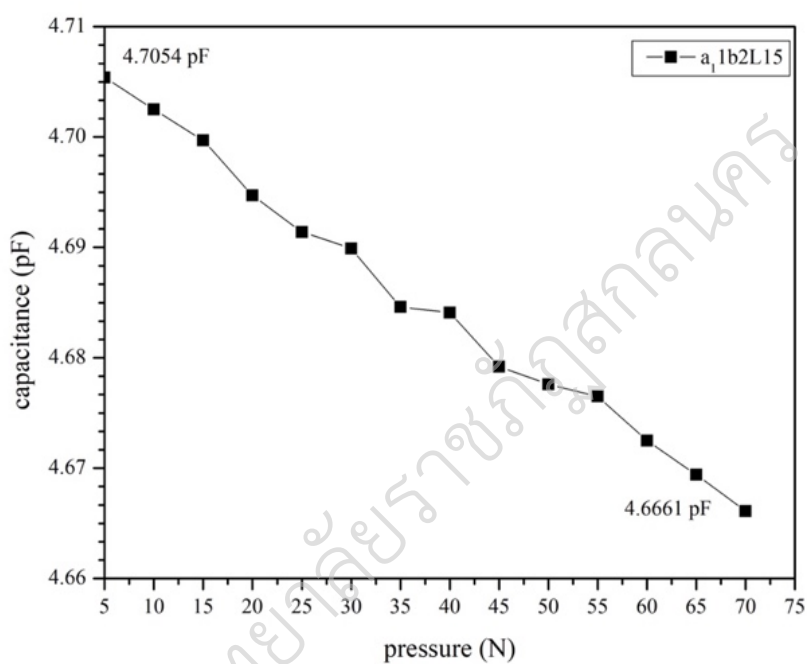


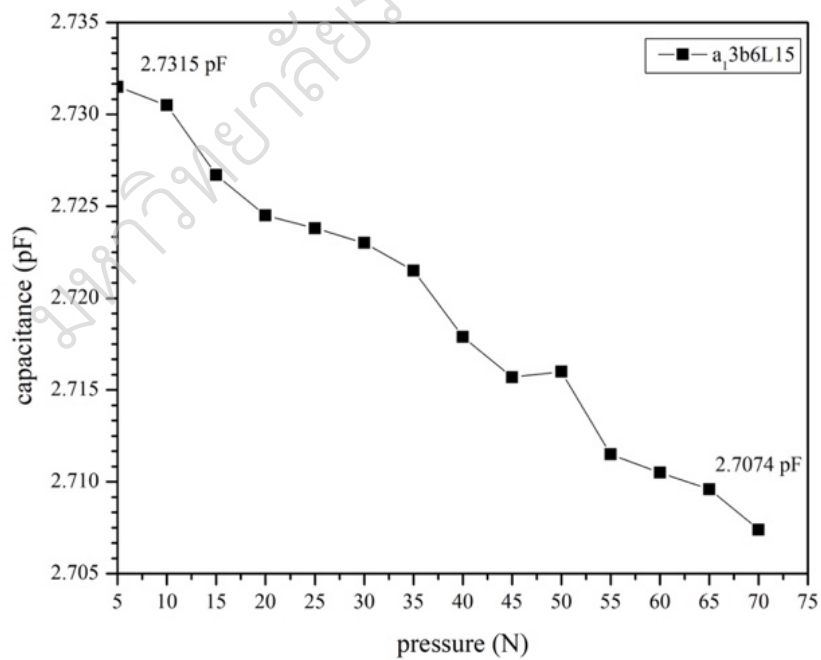
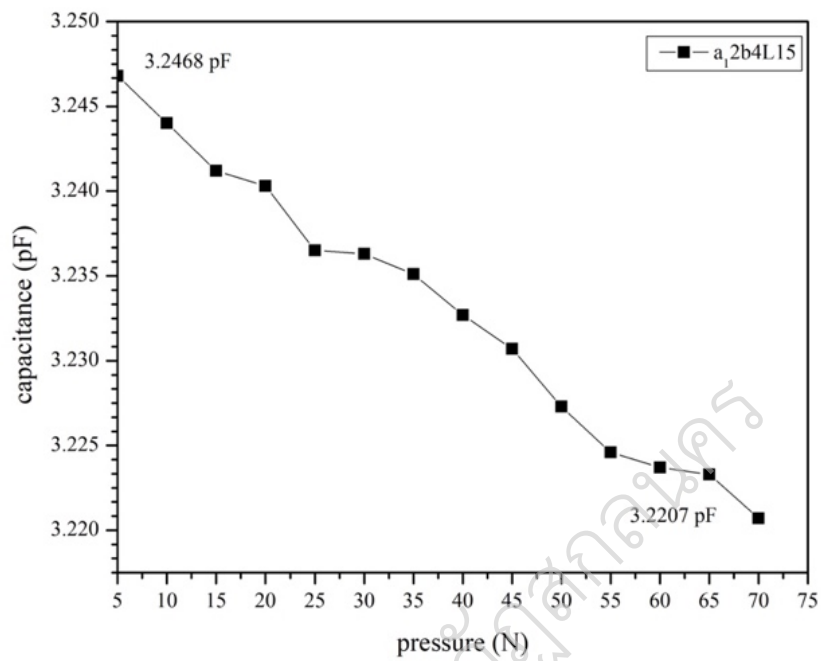
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร
6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร



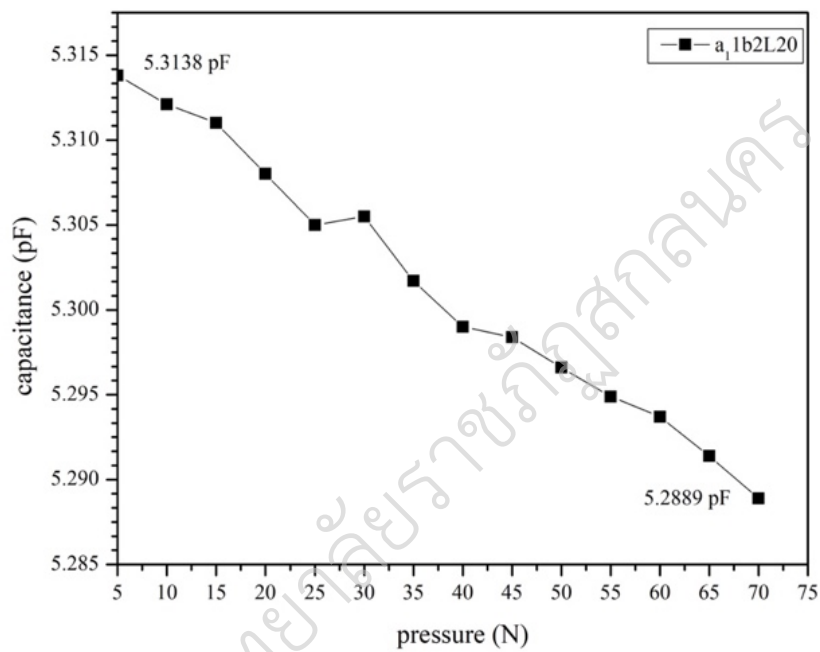


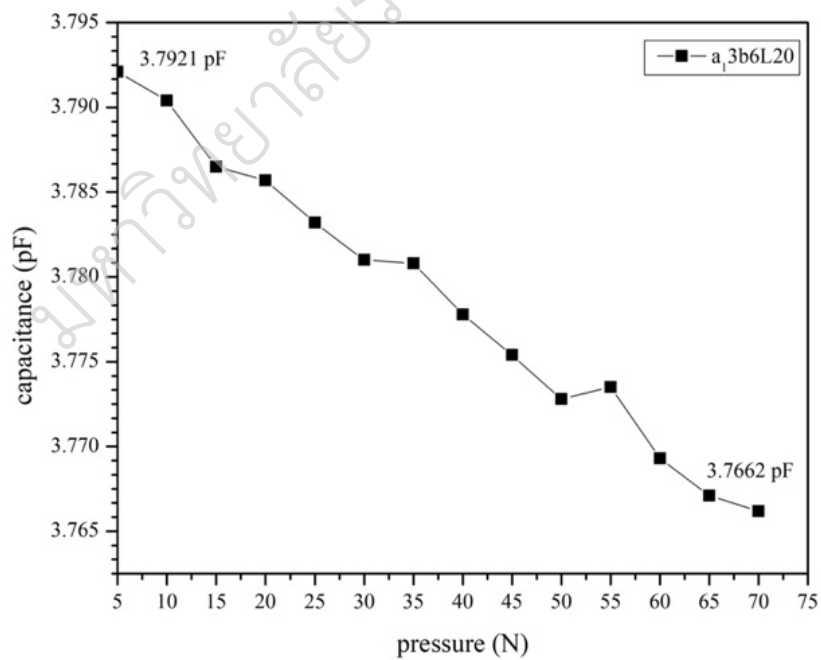
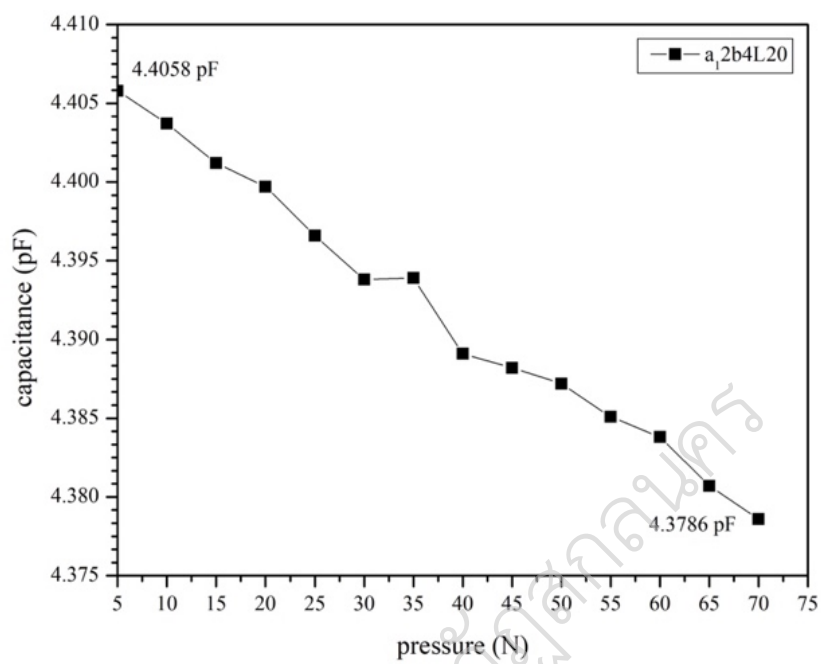
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร



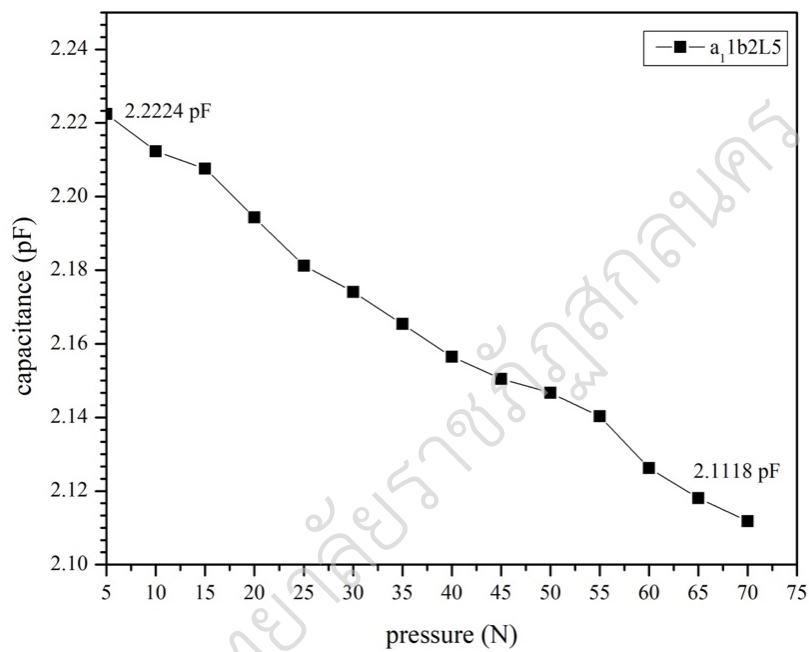


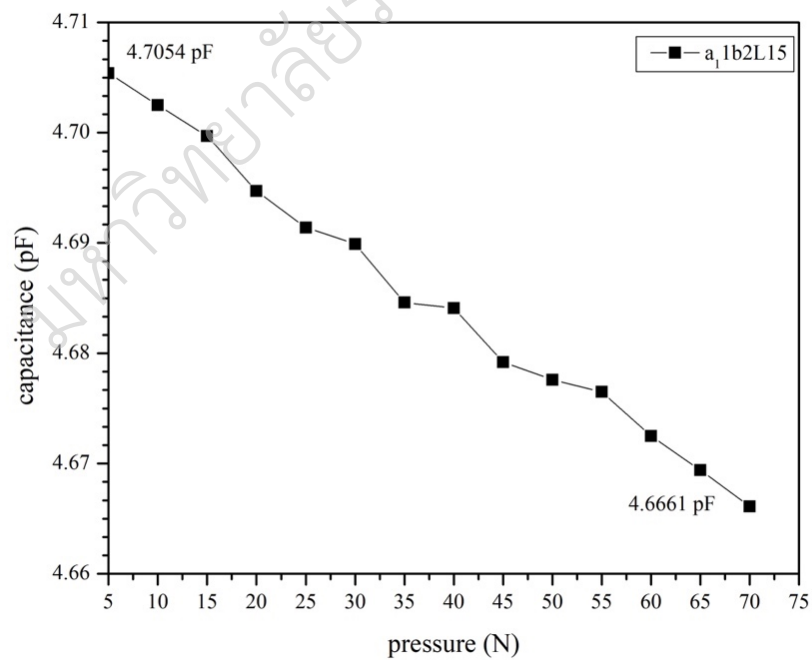
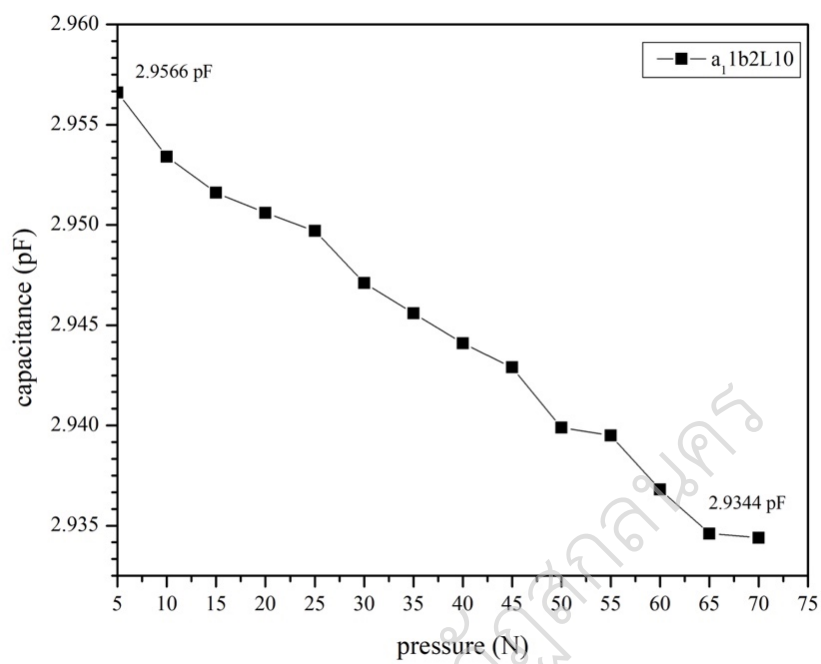
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

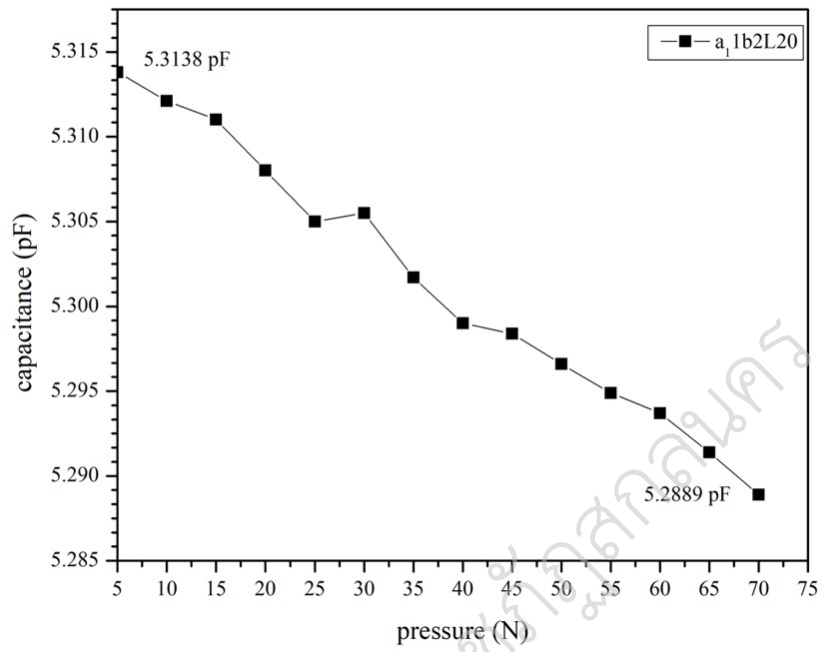




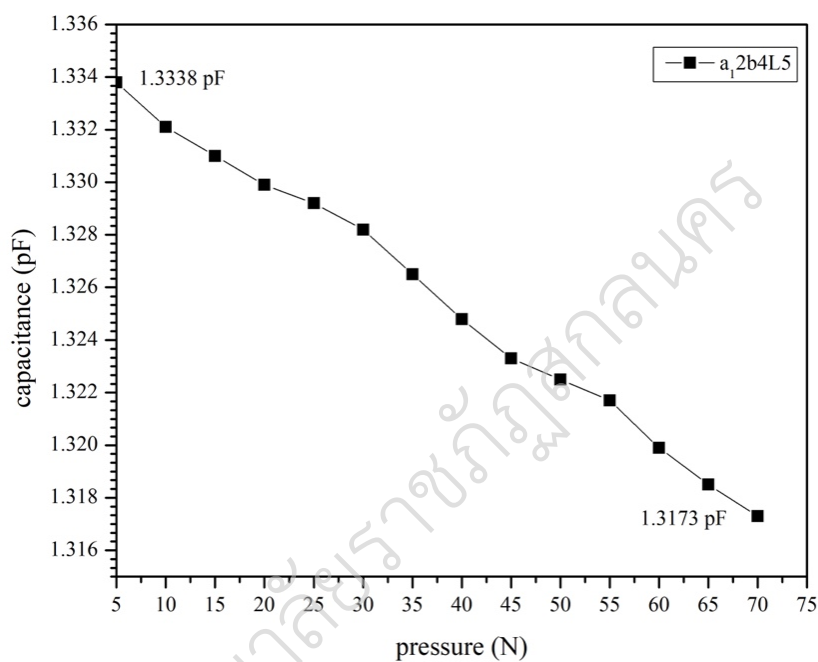
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
20 มิลลิเมตร

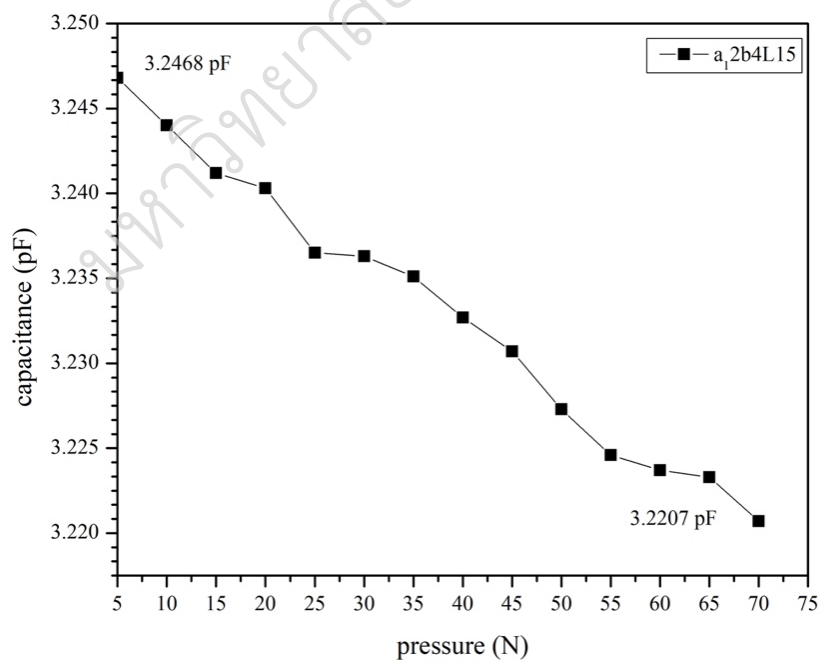
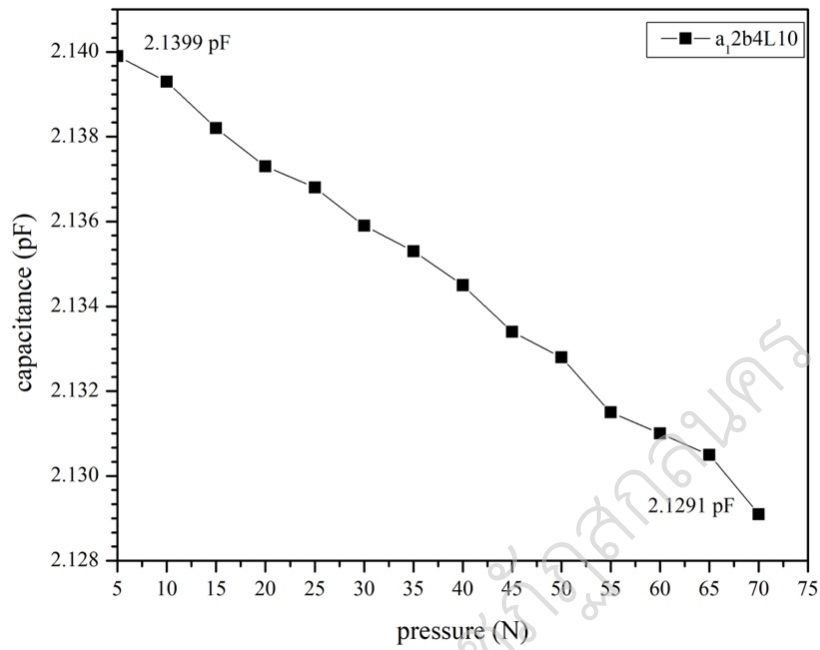


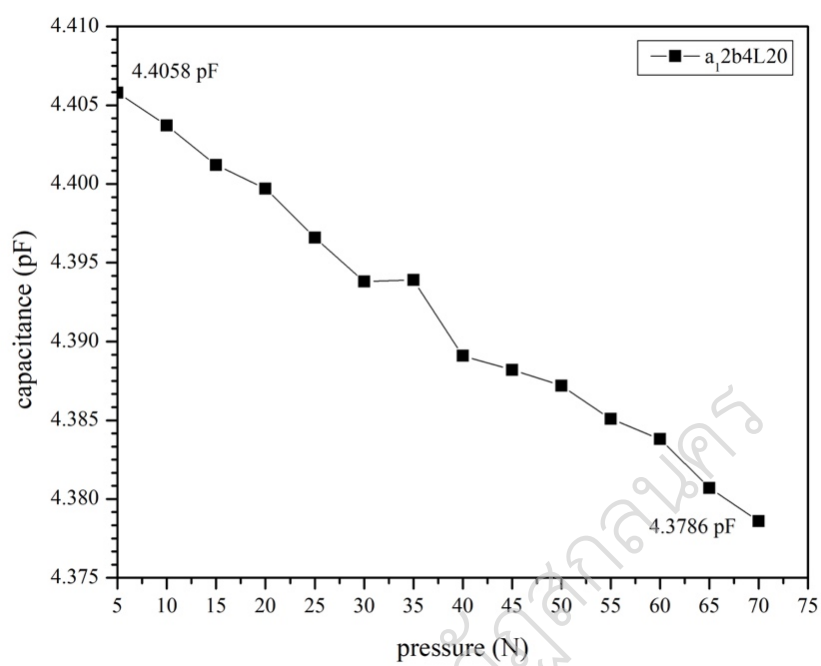




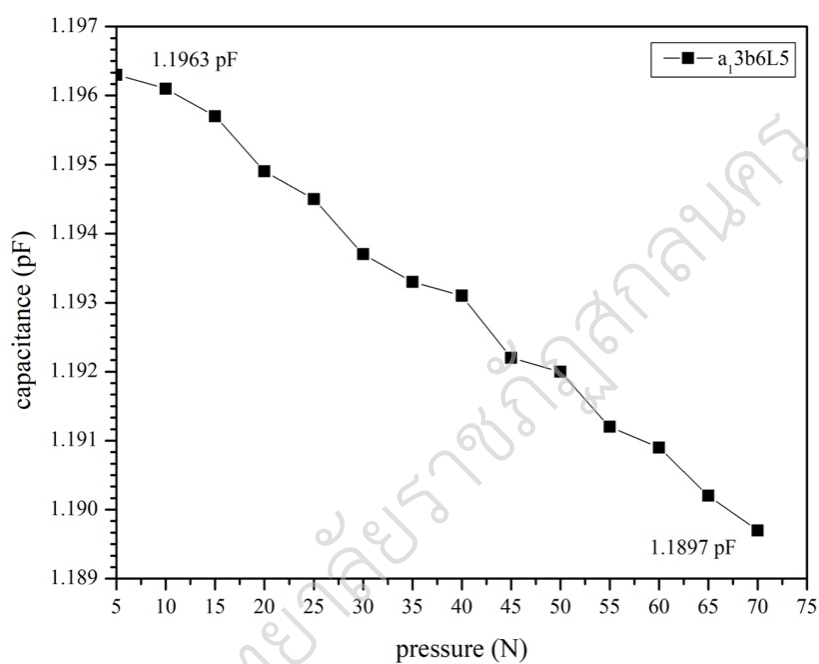
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์เนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร

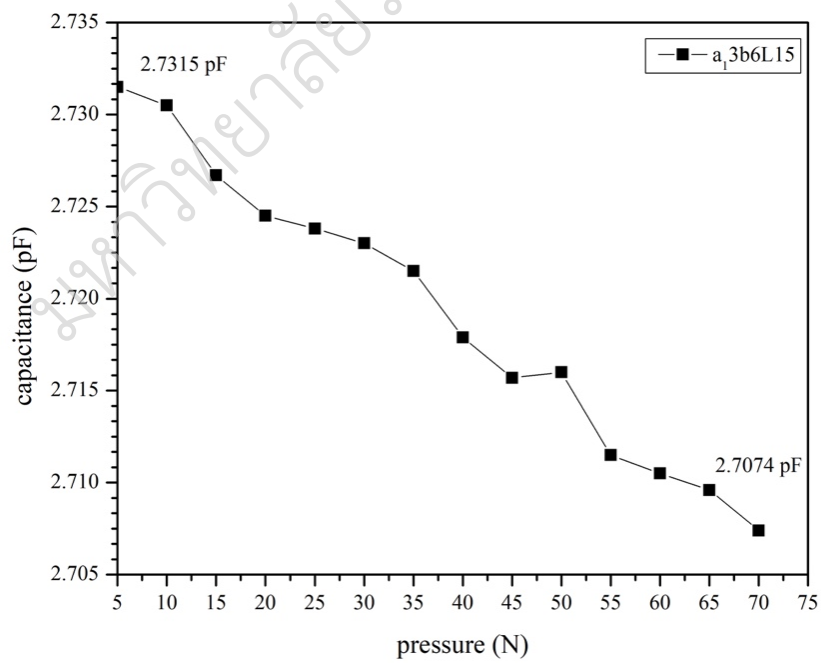
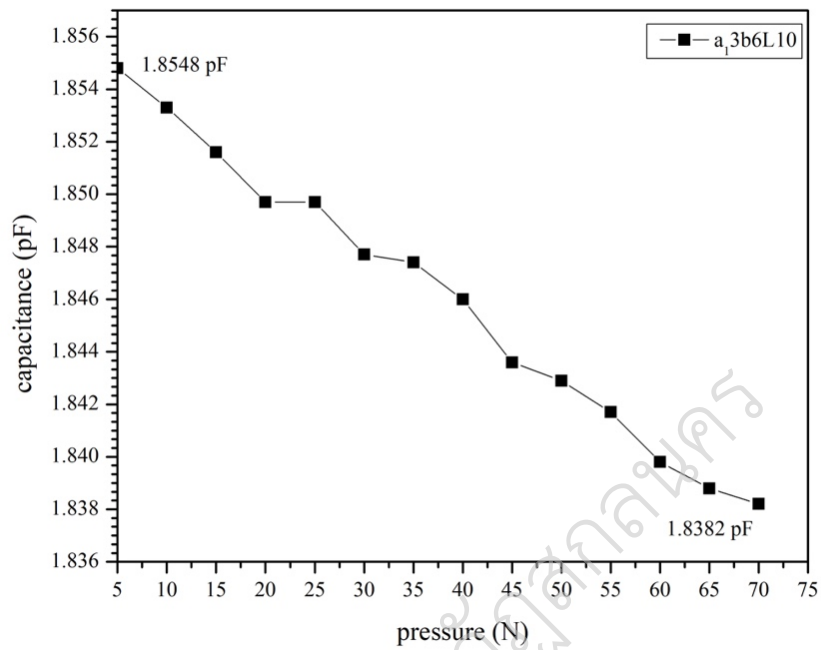


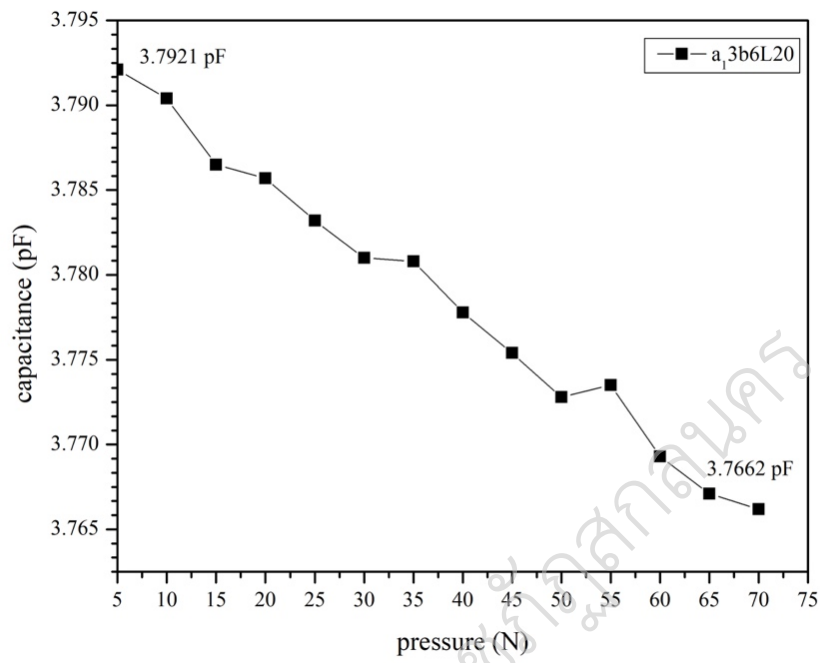




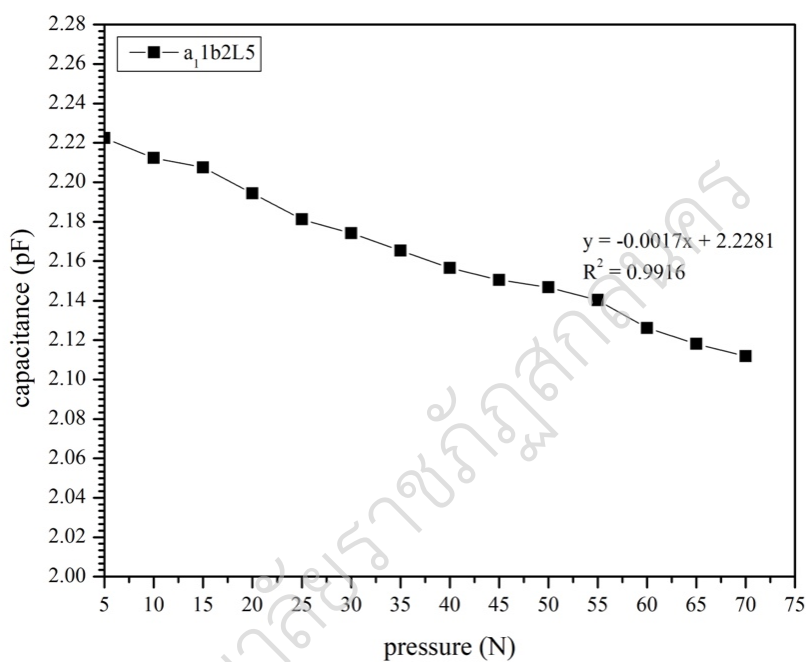
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

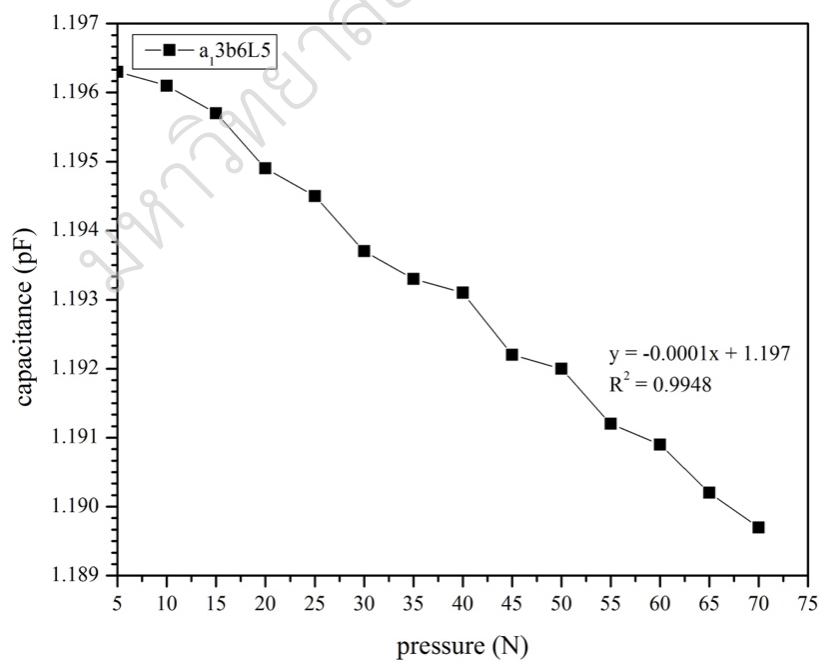
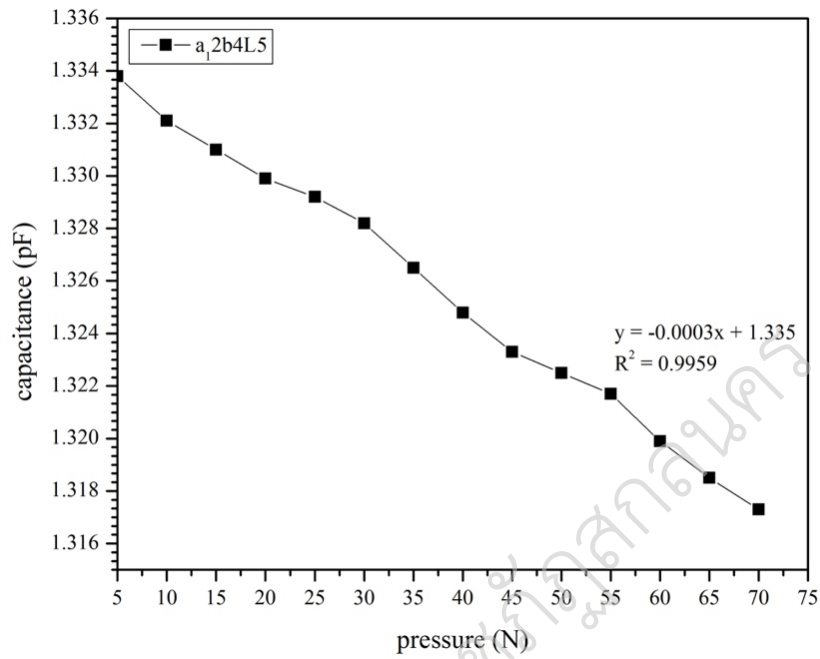




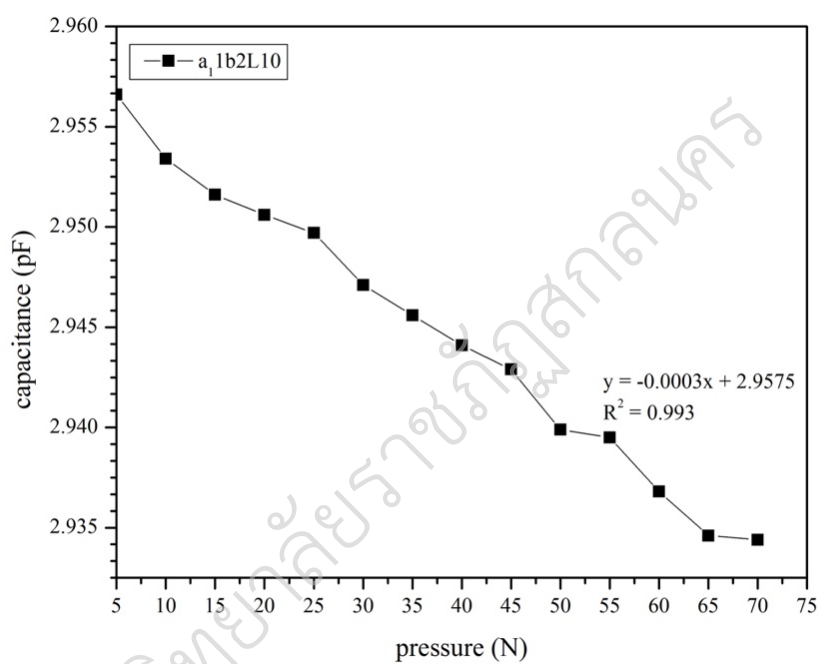


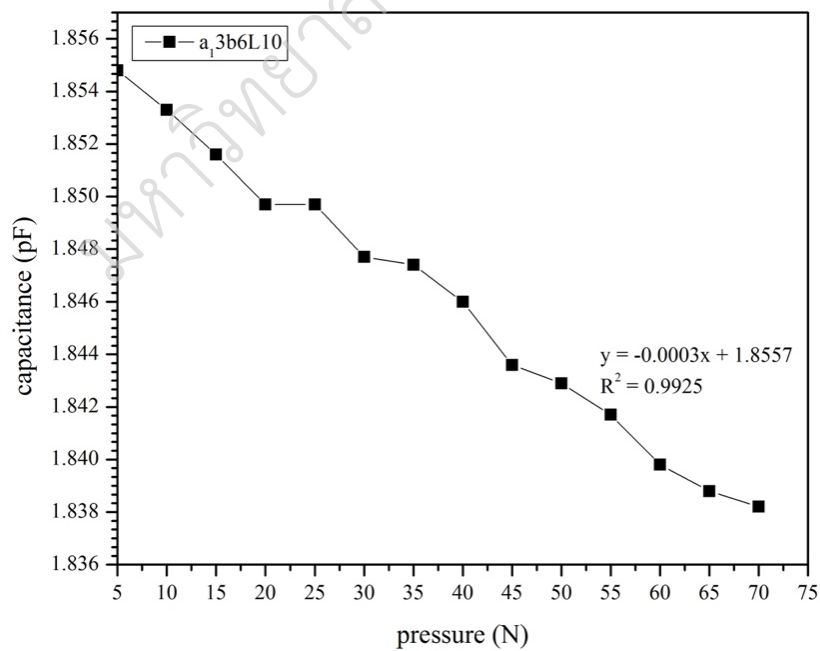
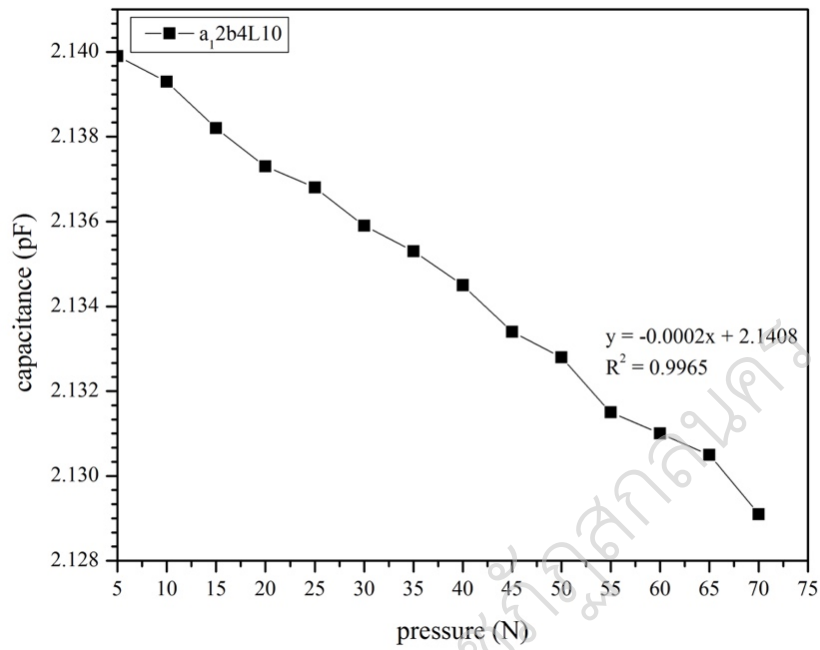
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร



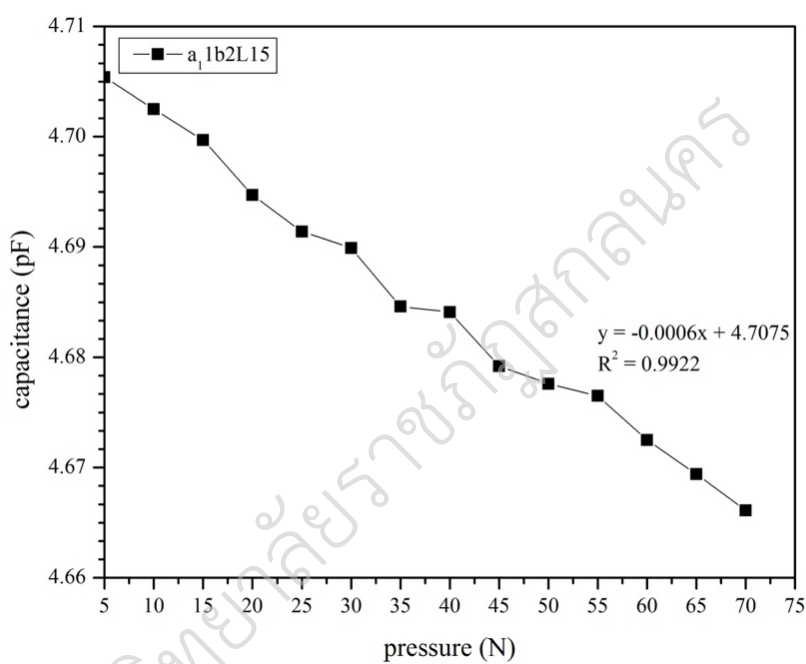


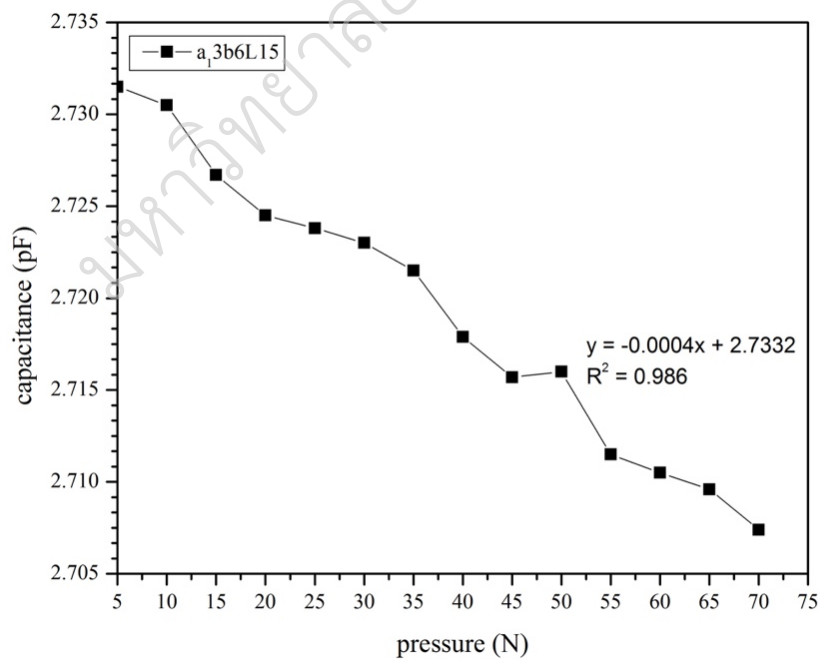
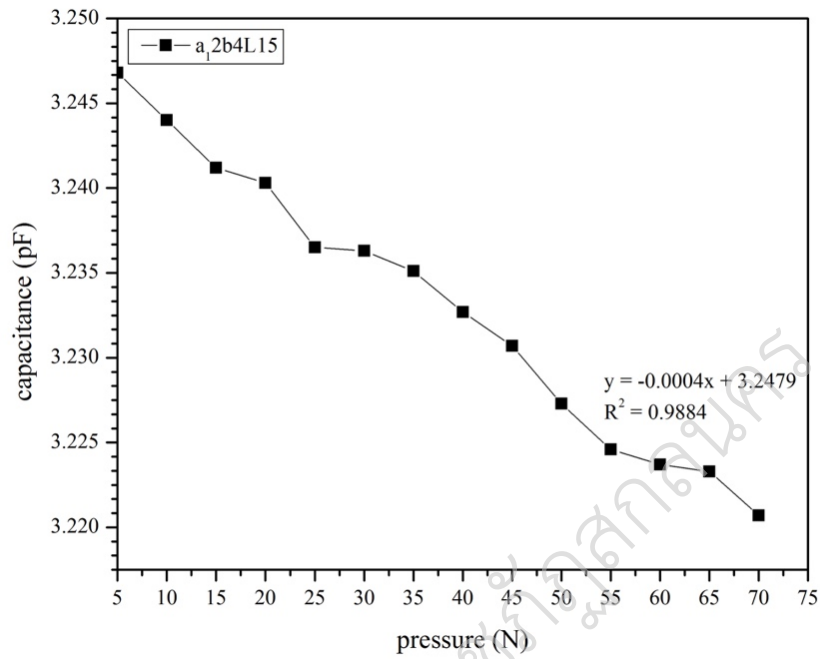
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร



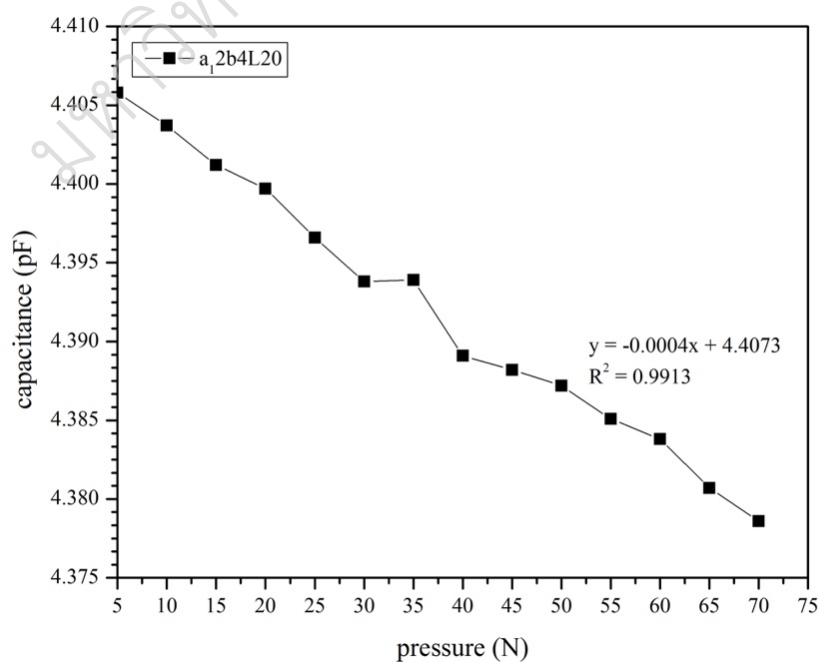
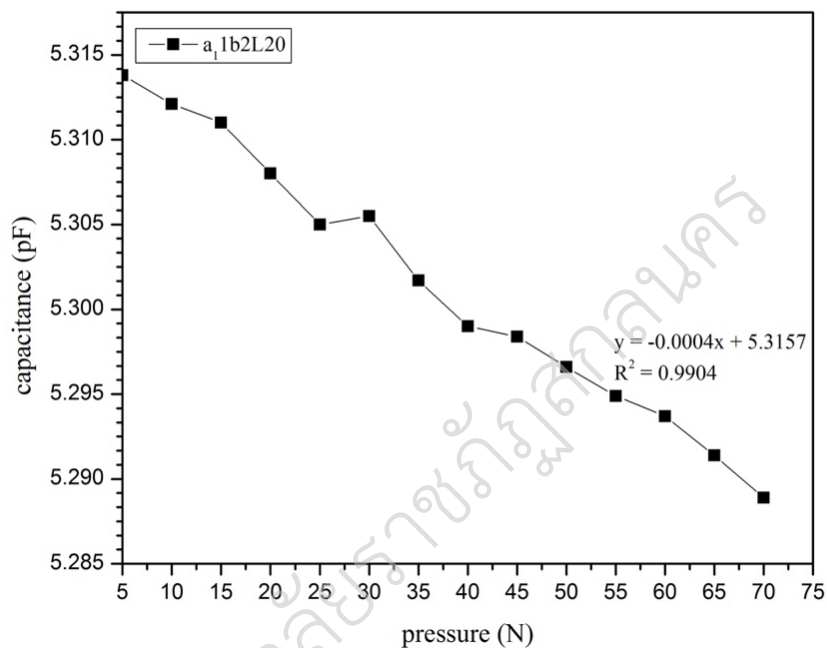


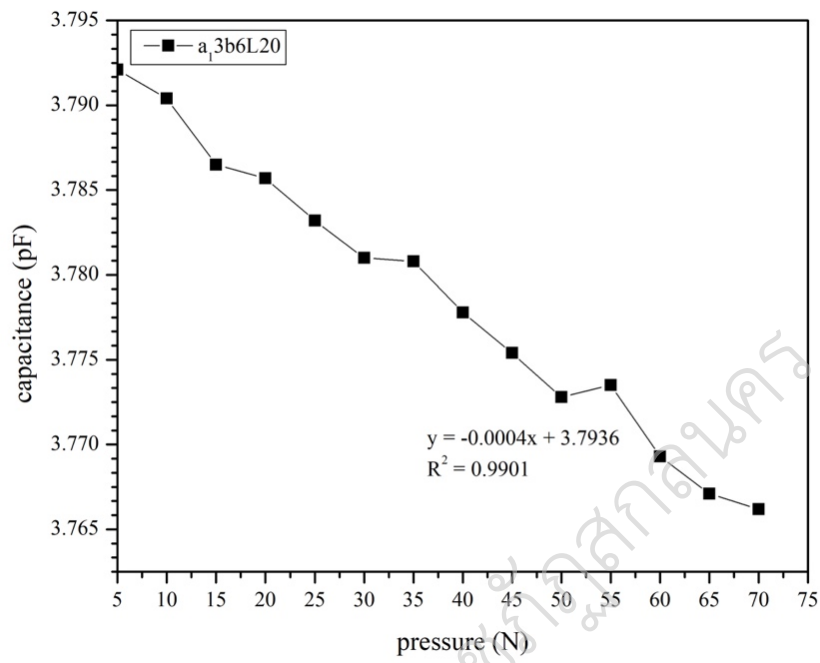
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
 คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร
 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร



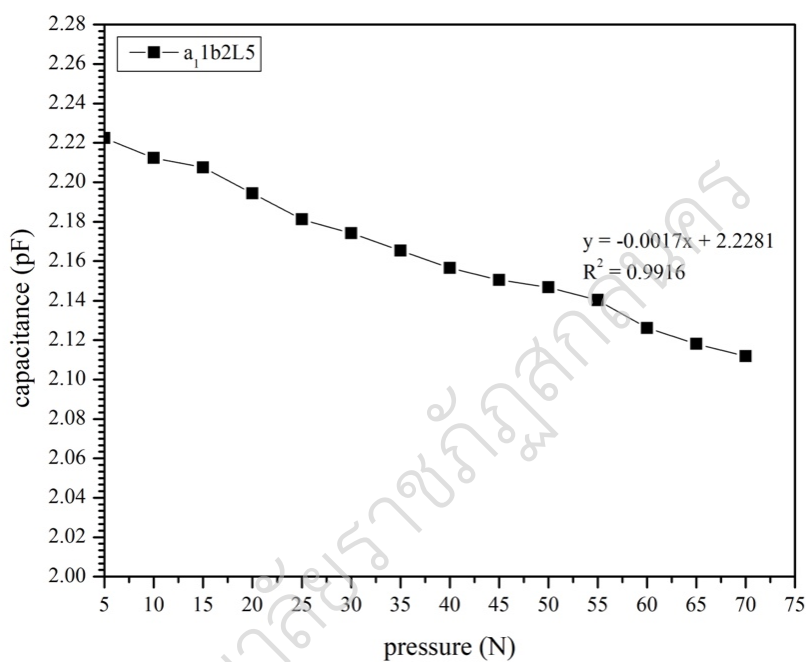


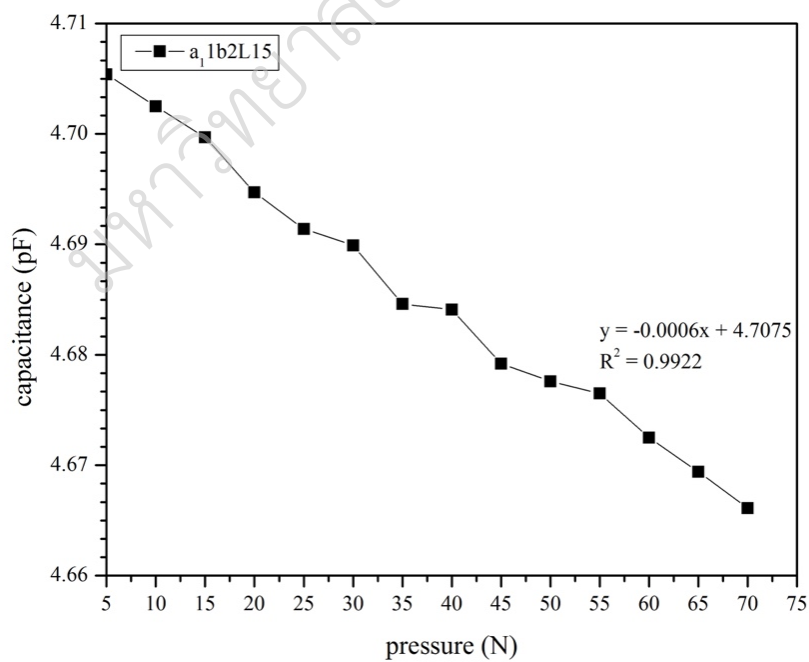
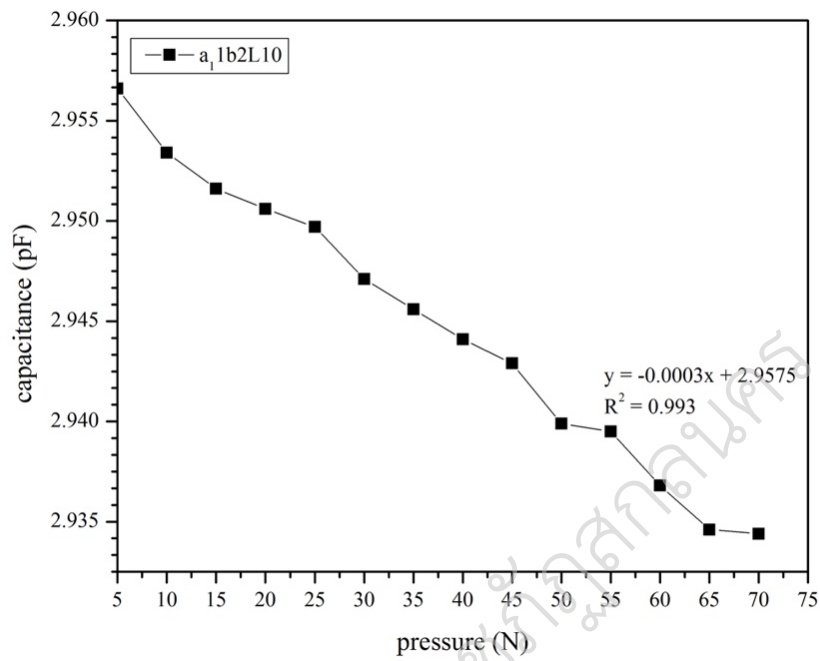
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคา-
ปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร และ
3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร
4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

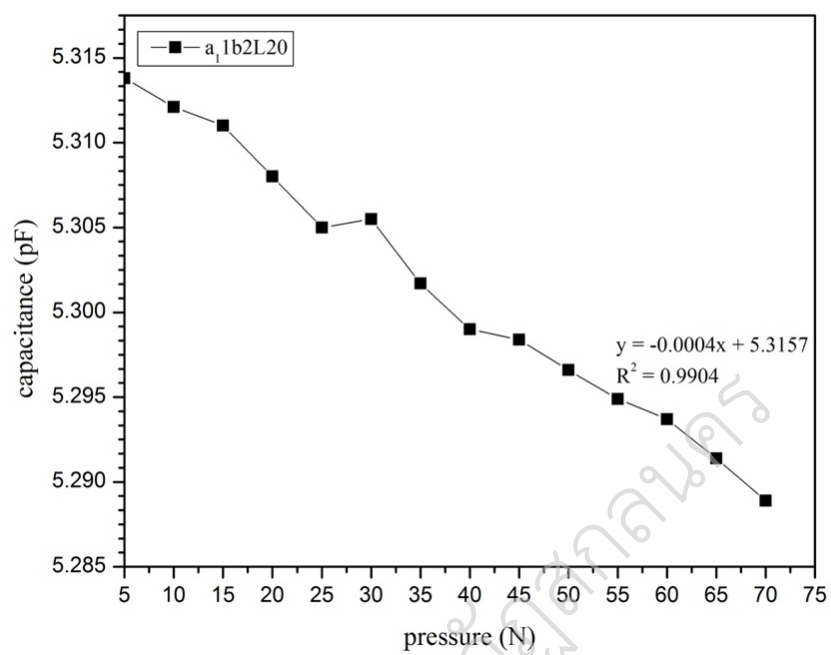




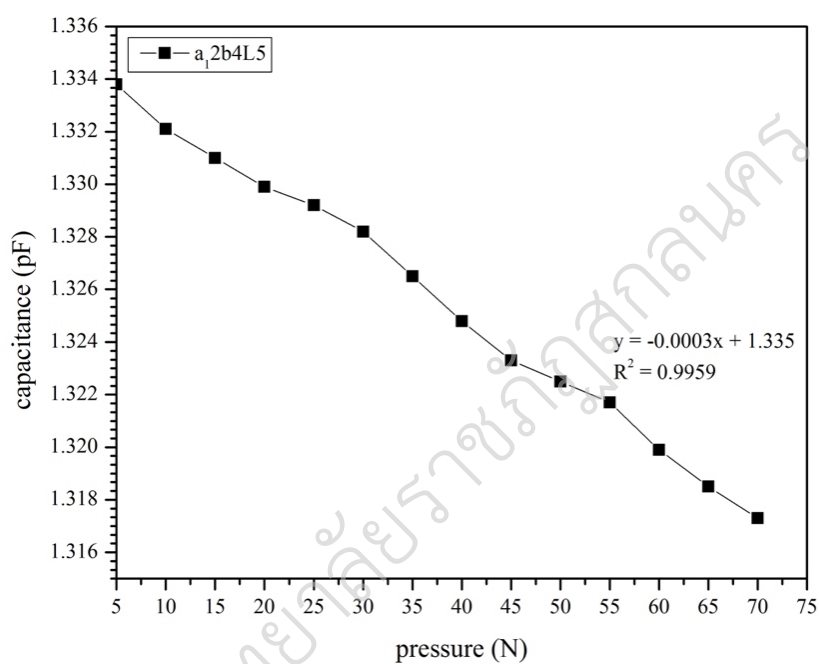
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิคัล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
20 มิลลิเมตร

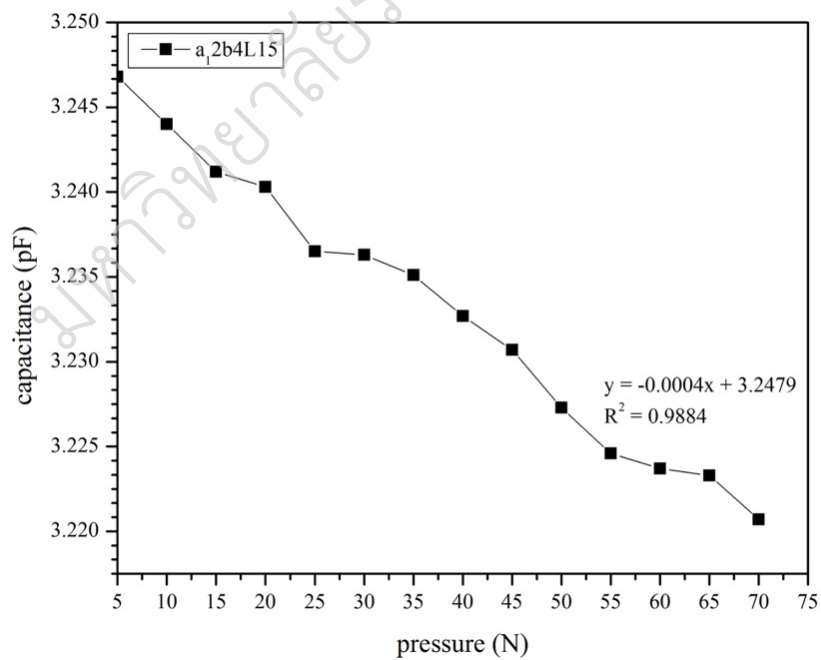
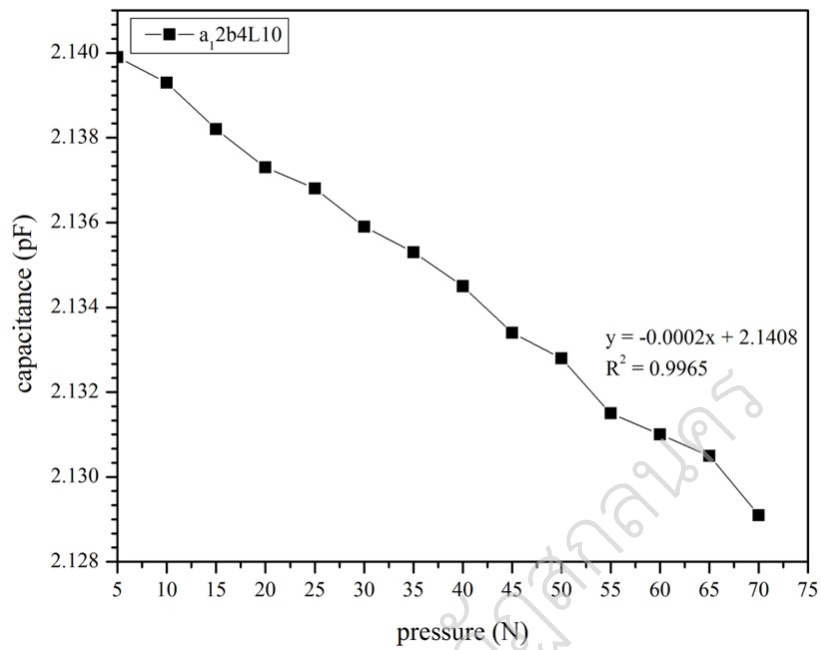


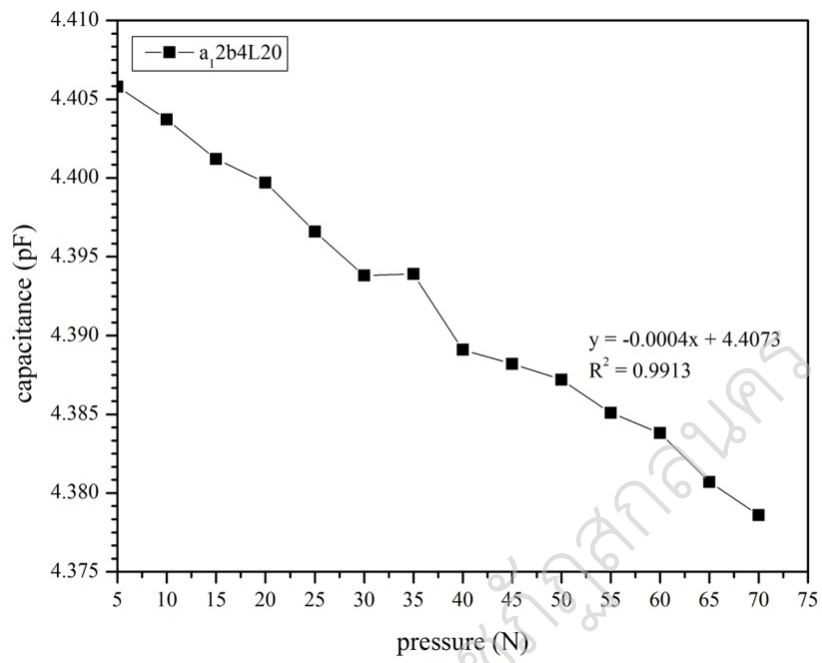




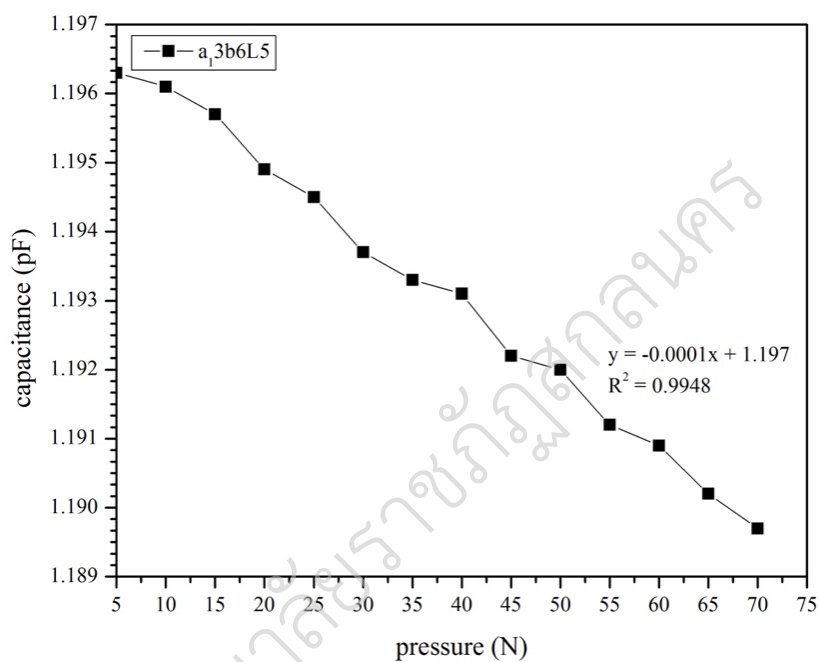
กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
20 มิลลิเมตร

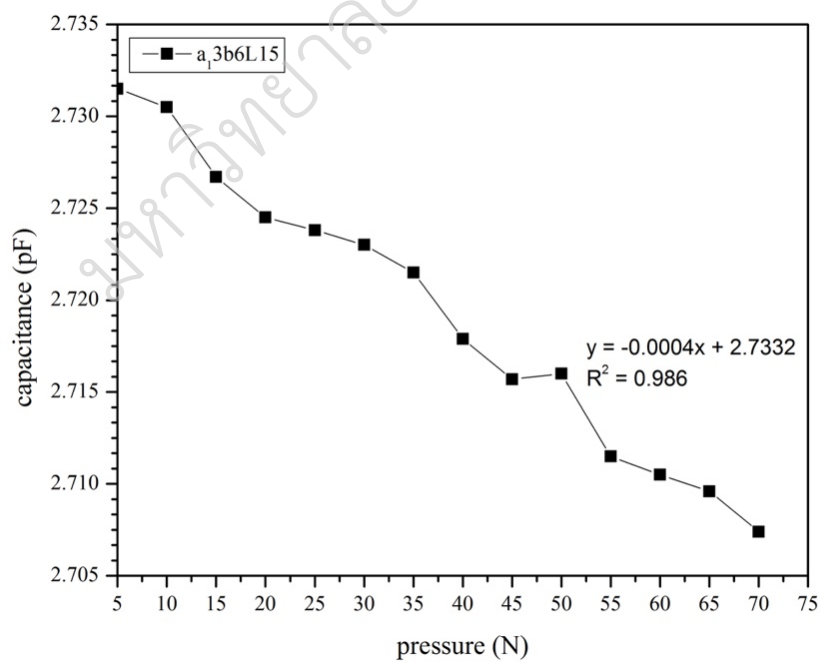
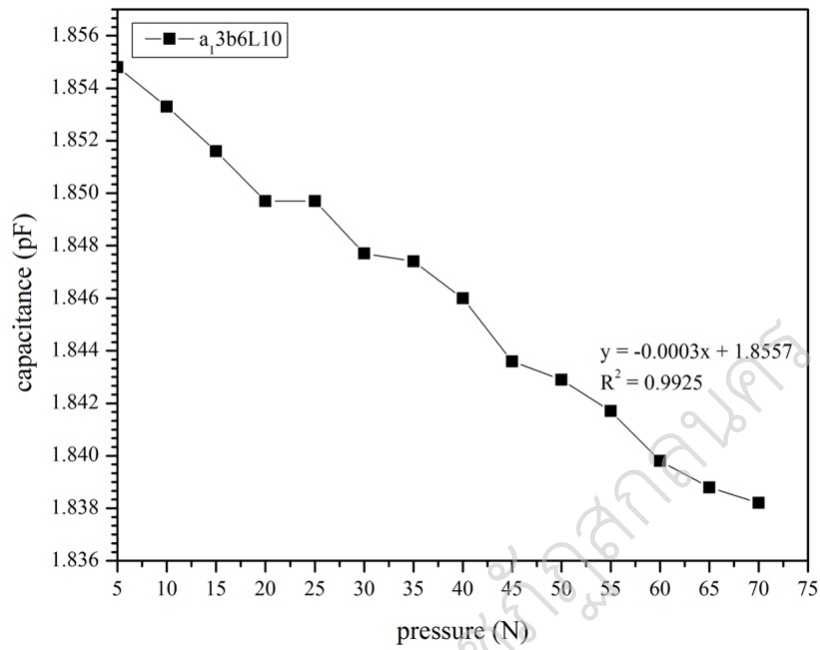


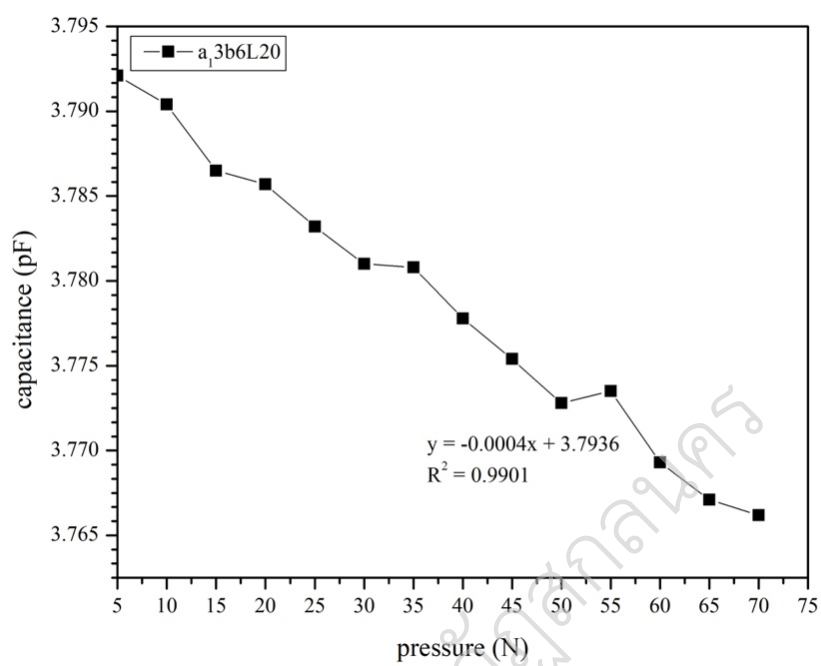




กราฟผลการทดลองความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอล-
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด โดย a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3
มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร
และ 20 มิลลิเมตร







มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ง

ตารางทดสอบค่าความไว ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ของตัวรับรู้แบบอินเทอร์ดิจิตัล
คาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L5$	0.1860
$a_1 2b4L5$	0.4967
$a_1 3b6L5$	1.2687

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
$a_1 1b2L10$	0.1609
$a_1 2b4L10$	1.5846
$a_1 3b6L10$	0.4687

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
a_1 1b2L15	0.0207
a_1 2b4L15	0.7851
a_1 3b6L15	0.2414

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
a_1 1b2L20	0.0802
a_1 2b4L20	0.1696
a_1 3b6L20	0.1502

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
a_1b2L5	0.1860
a_1b2L10	0.1609
a_1b2L15	0.0207
a_1b2L20	0.0802

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัดต่อนิวตัน : pF/N)
a_12b4L5	0.4967
$a_12b4L10$	1.5846
$a_12b4L15$	0.7851
$a_12b4L20$	0.1696

การทดสอบค่าความไวของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความไว (Sensitivity) (พิโกฟารัด/นิวตัน : pF/N)
a_1 3b6L5	1.2687
a_1 3b6L10	0.4687
a_1 3b6L15	0.2414
a_1 3b6L20	0.1502

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิฟิเคิลคาปาซิเตอร์แนวระนาบสำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L5	0.865 (86.5%)
a_1 2b4L5	0.983 (98.3%)
a_1 3b6L5	0.990 (99.0%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวนอน
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L10	0.984 (98.4%)
a_1 2b4L10	0.993 (99.3%)
a_1 3b6L10	0.980 (98.0%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิเจทัลคาปาซิเตอร์แนวนอน
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a_1 1b2L15	0.983 (98.3%)
a_1 2b4L15	0.979 (97.9%)
a_1 3b6L15	0.973 (97.3%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
$a_1 1b2L20$	0.991 (99.1%)
$a_1 2b4L20$	0.988 (98.8%)
$a_1 3b6L20$	0.985 (98.5%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ
2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
$a_1 1b2L5$	0.865 (86.5%)
$a_1 1b2L10$	0.984 (98.4%)
$a_1 1b2L15$	0.983 (98.3%)
$a_1 1b2L20$	0.991 (99.1%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนอน สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a ₁ 2b4L5	0.983 (98.3%)
a ₁ 2b4L10	0.993 (99.3%)
a ₁ 2b4L15	0.979 (97.9%)
a ₁ 2b4L20	0.988 (98.8%)

การทดสอบค่าความถูกต้องของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวนอน สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความถูกต้อง (Accuracy)
a ₁ 3b6L5	0.990 (99.0%)
a ₁ 3b6L10	0.980 (98.0%)
a ₁ 3b6L15	0.973 (97.3%)
a ₁ 3b6L20	0.985 (98.5%)

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ 1b2L5	99.33%
a ₁ 2b4L5	99.83%
a ₁ 3b6L5	99.93%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ 1b2L10	99.90%
a ₁ 2b4L10	99.93%
a ₁ 3b6L10	99.88%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ 1b2L15	99.89%
a ₁ 2b4L15	99.90%
a ₁ 3b6L15	99.88%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ
1 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร b เท่ากับ 2 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร 6 มิลลิเมตร
และ L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ b2L20	99.94%
a ₁ 2b4L20	99.92%
a ₁ 3b6L20	99.91%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตอลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 1 มิลลิเมตร b เท่ากับ
2 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ b2L5	99.33%
a ₁ b2L10	99.90%
a ₁ b2L15	99.89%
a ₁ b2L20	99.94%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร b เท่ากับ
4 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ 2b ₄ L ₅	99.83%
a ₁ 2b ₄ L ₁₀	99.93%
a ₁ 2b ₄ L ₁₅	99.90%
a ₁ 2b ₄ L ₂₀	99.92%

การทดสอบค่าความแม่นยำของตัวรับรู้แบบอินเตอร์ดิจิตัลคาปาซิเตอร์แนวระนาบ
สำหรับการวัดแรงกด เมื่อ a_1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร a_2 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร
 b เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ L เท่ากับ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร

รูปแบบ	ค่าความแม่นยำ (Precision)
a ₁ 3b ₆ L ₅	99.93%
a ₁ 3b ₆ L ₁₀	99.88%
a ₁ 3b ₆ L ₁₅	99.88%
a ₁ 3b ₆ L ₂₀	99.91%

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวาสนา เกษมสินธ์
วัน เดือน ปีเกิด	9 มิถุนายน 2521
สถานที่ปัจจุบัน	239 หมู่ 10 ตำบลยางโอง อำเภอมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร รหัสไปรษณีย์ 47000
ตำแหน่งปัจจุบัน	รองศาสตราจารย์
สถานที่ทำงาน	สาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จังหวัดสกลนคร 47000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันราชภัฏสกลนคร
พ.ศ. 2547	การศึกษามหาบัณฑิต (กศ.ม.) สาขาอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2547	อาจารย์ประจำสาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
พ.ศ. 2556	รองคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
พ.ศ. 2557	ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)
พ.ศ. 2558	รองคณบดีฝ่ายแผนงานและกิจการพิเศษ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
พ.ศ. 2561	ดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ. 2564	รองผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
พ.ศ. 2565	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร