

การพัฒนาระบบตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุใน 2 มิติ โดยใช้
หลักการวัดค่าตัวเก็บประจุแบบอาร์เรย์
DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL OBJECT
POSITION LOCATING SYSTEM BASED ON CAPACITIVE
SENSING ARRAY MEASURING TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาระบบตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุใน 2 มิติ โดยใช้
หลักการวัดค่าตัวเก็บประจุแบบอาร์เรย์

DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL OBJECT
POSITION LOCATING SYSTEM BASED ON CAPACITIVE
SENSING ARRAY MEASURING TECHNIQUE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149462
วันเดือนปี 8 อ.พ. 2561

b. 12884601
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2559** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL OBJECT
POSITION LOCATING SYSTEM BASED ON CAPACITIVE
SENSING ARRAY MEASURING TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุใน 2 มิติ โดยใช้หลักการวัดค่าตัวเก็บประจุแบบอาร์เรย์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุพรรณษา กุลทนนท์	รหัสนักศึกษา	56051231
	นางสาวสุนันท์ หมอดี	รหัสนักศึกษา	56051234
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.อนุพงษ์ สรงประภา		

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่วางบนระนาบ XY โดยใช้เทคนิควัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โครงสร้างของเซ็นเซอร์ทำจากแผ่นพิมพ์วงจร 2 หน้า ซึ่งผิวบนได้ออกแบบเป็นอาร์เรย์ 6×6 โดยมี 6 ขั้วอิเล็กโทรด เรียงตัวกันตามแนวแกน X และอีก 6 ขั้วอิเล็กโทรดเรียงตัวกันตามแนวแกน Y แต่ละขั้วเป็นการโยงถึงกันตามแนวทแยงของสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างกันเป็น 0.2 เซนติเมตร ในการตรวจจับและประมวลผลค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MPR121 ร่วมกับบอร์ด Arduino nano การใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของวัตถุขนาดแก้วทรงกระบอกสามารถแยกแยะขนาดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่า 1 ตารางเซนติเมตร ได้ทั้งหมด 36 ตำแหน่งเมื่อวางบริเวณจุดตัดของแนวขั้วอิเล็กโทรดในแนวแถวและคอลัมน์ และค่าความจุไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนของเหลวที่อยู่ภายในขวดหรือเปลี่ยนขนาดของขวด

คำสำคัญ : ตำแหน่ง คาปาซิทีฟ เซ็นเซอร์

Title	Development of a Two-Dimensional Object Position Locating System Based on capacitive Sensing Array Measuring Technique		
Student	Miss Supansa Kultanan	Student ID	56051231
	Miss Suwanan Modee	Student ID	56051234
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		
Academic Year	2016		
Advisor	Assoc.Prof. Anupong Songprapa		

Abstract

This special project presented the study and designed of electric capacitance changing effect to sense the position of an object place on the flat XY plate sensing array formed by 6×6 1 Cm^2 square pad was made from double layers printed circuit board. The 6 pads that are wired together along the diagonal direction from one electrode, the distance between each pad is 0.2 Cm. There are 12 electrodes, 6 are arranged consequencively in the X direction (COLUMN, C) and the other 6 are arranged in the Y direction (ROW, R). MPR121 module is used in conjunction with the Arduino nano for detecting the changes in electrode capacitance caused by placing cylindrical glass bottle on ROW-COLUMN intersection position of the XY plate. The experimental results showed that position resolution of the system is around 1.3 Cm and the change in capacitance value was also depended on the type of fluid filled in the bottle.

Keywords: Position, Capacitive, Sensor

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.อนุพงศ์ สรงประภา ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด และให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุขุ และ อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นายอนุสิทธิ์ บุญมา ที่คอยให้ความช่วยเหลือแนะนำมาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มจนจบโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ MERL และพี่ในแลปทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สุพรรณษา กุลทนนท์
สุวรินทร์ หมอติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์	3
2.1.1. ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำคู่ขนาน (Capacitance of Parallel plate)	3
2.1.2. ขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบ (Coplanar Electrode)	7
2.1.3. คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์อาร์เรย์	8
2.2 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า	
2.3.5. โมดูล MPR121 (Proximity Capacitive Touch Sensor Controller)	9
2.2.1. วงจร Multiplexer (MUX)	11
2.2.2. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล	11
2.3.3. วงจรกรองความถี่	13
2.3.4. การส่งข้อมูลด้วยระบบ I ² C Bus	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1. การดำเนินการโครงงานวิจัย	17
3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์	18
3.3. ขั้นตอนการออกแบบและการทำแผ่น PCB ให้เป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ แบบอาร์เรย์ ใน 2 มิติ	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4. วิธีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า	23
3.5. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	24
3.5.1. การทดลองเพื่อตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดในขณะที่ ยังไม่มีวัตถุมาสัมผัสกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์	24
3.5.2. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมี การสัมผัสของวัตถุในตำแหน่งต่างๆ บนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์	24
3.5.3. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของของเหลว	25
3.5.4. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของวัตถุ	26
3.5.5. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักของวัตถุ	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1. ผลจากการทดสอบการตรวจจับวัตถุในตำแหน่งต่างๆบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ แบบอาร์เรย์	28
4.1.1. ผลจากการทดลองเพื่อตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละขั้ว	28
4.1.2. ผลจากการทดสอบตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุจากคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์	29
4.2. ผลจากการศึกษาการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยน ชนิดของของเหลว	48
4.3. ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของวัตถุ	50
4.3.1. กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขวดแก้ว ที่มีรัศมีของขวดเท่ากับ 0.65 เซนติเมตร	51
4.3.2. กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขวดแก้ว ที่มีรัศมีของขวดเท่ากับ 1.00 เซนติเมตร	52
4.3.3. กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขวดแก้ว ที่มีรัศมีของขวดเท่ากับ 1.50 เซนติเมตร	53
4.3.4. กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขวดแก้ว ที่มีรัศมีของขวดเท่ากับ 2.00 เซนติเมตร	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4. ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักของวัตถุ	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ค่าความจุไฟฟ้าจากการทดลอง	63
ภาคผนวก ข Data sheet MPR121	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะเบื้องต้นของตัวเก็บประจุไฟฟ้า	3
2.2	คุณลักษณะตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำคู่ขนานที่มีความกว้างเป็นอนันต์	4
2.3	Fringing Field ของตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำขนาน	6
2.4	กราฟคุณลักษณะของไดอิเล็กตริกแสดงค่า k_c ที่มีค่า $\epsilon = 4.5$	7
2.5	ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด	7
2.6	ตัวอย่างขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบที่นำไปใช้สำหรับการวัดตำแหน่งใน 2 มิติ	8
2.7	(a) การบวกรวมของสนามไฟฟ้าเมื่อมีการสัมผัสพื้นสัจอทัชสกรีน (b) เส้น x-y ที่เป็นอาร์เรย์ได้หน้าจอสัจอทัชสกรีน	9
2.8	แสดง block diagram ขั้นตอนการทำงานของ MPR121	10
2.9	การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดย MPR121	10
2.10	วงจรมัลติเพลกเซอร์ และ วงจรดีมัลติเพลกเซอร์	11
2.11	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณ A/D	11
2.12	การทำงานของวงจรมัลติเพลกเซอร์ Simple and Hold	12
2.13	โครงสร้างภายในของ Sigma-Delta ADC	13
2.14	แสดงลักษณะโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบ I2C Bus	14
2.15	(ก) แสดงสถานะเริ่มต้นและหยุดของการส่งข้อมูลแบบ I2C (ข) ลักษณะการรับส่งบิตข้อมูลของ I2C	15
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุ	17
3.2	แผ่น PCB (Print Circuit Board)	18
3.3	Arduino Nano	18
3.4	โมดูล Proximity Capacitive Touch Sensor Controller (MPR121)	19
3.5	ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	19
3.6	ขดแก้วที่ใช้ในการทดลอง	20
3.7	(ก) รูปแบบขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ทำเป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (ข) รูปแบบขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ทำเป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์	21
3.8	การเชื่อมต่อขั้วอิเล็กโทรด โมดูล MPR121 และ ARduino nano	22
3.9	Flowchart ของโปรแกรม Arduino MPR121_test	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	ตำแหน่งต่างๆในการวางวัตถุ	25
3.11	ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	26
3.12	ขวดแก้วขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	26
3.13	ภาพอุปกรณ์ในการทดลองการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ	27
4.1	แสดงค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดในหลักที่ 1-6	28
4.2	แสดงค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดในแถวที่ 1-6	29
4.3	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R1	30
4.4	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R2	30
4.5	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R3	31
4.6	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R4	31
4.7	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R5	32
4.8	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R6	32
4.9	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R1	33
4.10	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R1	33
4.11	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R3	34
4.12	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R4	34
4.13	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R5	35
4.14	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R6	35
4.15	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R1	36
4.16	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R2	36
4.17	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R3	37
4.18	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R4	37
4.19	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R5	38
4.20	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R6	38
4.21	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R1	39
4.22	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R2	39
4.23	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R3	40
4.24	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R4	40
4.25	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R5	41
4.26	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R6	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R1	42
4.28	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R2	42
4.29	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R3	43
4.30	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R4	43
4.31	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R5	44
4.32	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R6	44
4.33	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R1	45
4.34	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R2	45
4.35	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R3	46
4.36	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R4	46
4.37	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R5	47
4.38	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R6	47
4.39	รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแกว้เปล่า	48
4.40	รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแกว้ที่ภายในบรรจุน้ำมันพืช	49
4.41	รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแกว้ที่ภายในบรรจุนม	49
4.42	รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแกว้ที่ภายในบรรจุน้ำเปล่า	50
4.43	รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแกว้ที่ภายในบรรจุน้ำอัดลม	50
4.44	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแกว้ที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 0.65 เซนติเมตรมาสัมผัส	51
4.45	มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.44	52
4.46	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแกว้ที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 1.00 เซนติเมตร	52
4.47	มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.46	53
4.48	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแกว้ที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 1.50 ตารางเซนติเมตร	53
4.49	มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.48	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแก้วที่มี รัศมีของขดเท่ากับ 2.00 เซนติเมตร	54
4.51	มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.50	55
4.52	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 10 กรัม	56
4.53	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 20 กรัม	56
4.54	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 30 กรัม	57
4.55	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40 กรัม	57
4.56	กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 50 กรัม	58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์เข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันของเราเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ หรือหน้าจอโทรศัพท์มือถือ ล้วนประกอบไปด้วยอุปกรณ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ ด้วยคุณสมบัติของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าจากการกระทำต่างๆ แต่เนื่องจากคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ในโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์นั้นมีขนาดเล็กและราคาสูง จึงไม่สามารถนำมาใช้งานในการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ได้ ยกตัวอย่างเช่น กระจกน้ำหรือขวดน้ำ จึงได้มีแนวคิดในการประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่มีขนาดใหญ่ โดยอาศัยหลักการของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

โครงการนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ ที่จะสามารถตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่วางอยู่บนแผ่นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ได้ และสามารถตรวจจับวัตถุที่มีขนาดและของเหลวที่อยู่ภายในวัตถุที่แตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษารูปแบบของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์และปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป
- 2) ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ เพื่อนำมาออกแบบให้สามารถใช้ร่วมกับวงจรตรวจจับสัญญาณได้
- 3) ศึกษาแบบการจัดวางสิ่งของและนำมาประยุกต์ใช้กับระบบตรวจจับตำแหน่งของวัตถุแบบคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สามารถนำอุปกรณ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ไปใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่นำมาวางบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์นี้ได้
- 2) ระบบสามารถตรวจสอบได้ว่าวัตถุนั้นวางอยู่บนตำแหน่งใดบนเซ็นเซอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ระบบสามารถบอกตำแหน่งของวัตถุที่นำมาวางได้
- 2) สามารถออกแบบเซ็นเซอร์และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้
- 3) สามารถนำหลักการและทฤษฎีคาปาซิทีฟมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	แผนการดำเนินงาน						
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาข้อมูลและ หลักการทำงานของ capacitive sensor							
ศึกษาข้อมูล วิธีการวัด การเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้า							
ประดิษฐ์ Capacitive sensor							
ออกแบบการทดลอง และทำการทดลอง							
วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผล							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ รวมไปถึงหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้า และวิธีการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธีการต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในโครงงานนี้

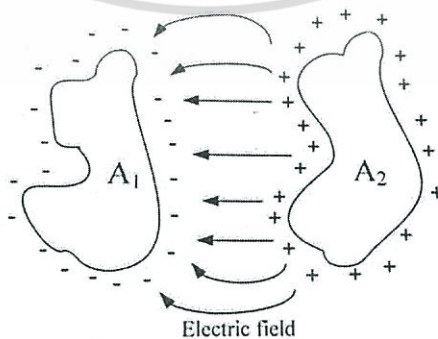
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive sensor) ทำงานโดยอาศัยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์มีความแม่นยำมากที่สุดสำหรับเซ็นเซอร์ไฟฟ้าทั้งหมด (ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดค่าความต้านทาน (Resistive sensor) และเซ็นเซอร์วัดการเหนี่ยวนำ (Inductive sensor)) เป็นที่ทราบกันดีว่าคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์มีความไวในการตอบสนองสูง อีกทั้งมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ต้นทุนต่ำและมีคุณสมบัติในการตรวจวัดแบบไม่ต้องสัมผัสได้ คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ส่วนใหญ่ต้องคงทนต่อความชื้น อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้าแฝง (stray capacitance) และในบางครั้งสามารถประดิษฐ์ขึ้นจากแผ่น PCB (Print Circuit Board) หรือฝังลงในไมโครชิปได้

คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์มีการทำงานอย่างแม่นยำในการตรวจวัดการเคลื่อนที่ การวัดความหนาของพื้นผิว ระดับน้ำและอัตราการไหล วัดแรงดัน วัดองค์ประกอบทางเคมีของสาร หรือแม้กระทั่งลายนิ้วมือของแต่ละบุคคล เป็นต้น

2.1.1 ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำคู่ขนาน (Capacitance of Parallel plate)

แนวความคิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเบื้องต้นอธิบายโดยกำหนดให้ตัวนำ A_1 มีประจุไฟฟ้า (+Q) และตัวนำ A_2 มีประจุไฟฟ้า (-Q) กระจายทั่วพื้นผิวตัวนำ โดยจำนวนประจุทั้งสองมีค่าเท่ากัน และ สภาวะแวดล้อมรอบตัวนำไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆอยู่เลย ผลรวมประจุไฟฟ้าของระบบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ สนามไฟฟ้า (Electric Field) มีทิศทางจากตัวนำ A_2 ไปยังตัวนำ A_1 ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะเบื้องต้นของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างตัวนำทั้งสองมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ V ค่าความจุไฟฟ้าของสองตัวนำมีค่าเท่ากับสัดส่วนของขนาดผลรวมประจุไฟฟ้าทั้งหมดบนตัวนำในแต่ละตัวต่อขนาดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ ดังสมการที่ 2.1

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้า (F)

Q คือประจุไฟฟ้าที่กระจายบนผิวของตัวนำ (C)

V คือความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ (V)

ค่า Q หาได้จากการอินทิเกรต (Integrate) ฟลักซ์ไฟฟ้ารอบพื้นที่ผิวตัวนำ ค่า V คืองานที่ต้องกระทำในการนำประจุบวกจำนวนหนึ่งประจุ เคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวก สมการที่ 2.1 เขียนใหม่ได้เป็น

$$C = \frac{\oint \epsilon \vec{E} d\vec{S}}{-\int \vec{E} dL} \quad (2.2)$$

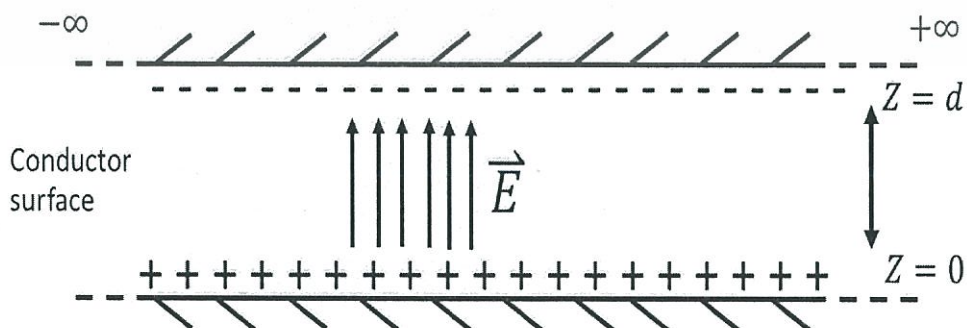
เมื่อ S คือพื้นที่ผิวตัวนำ (m^2)

E คือสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ (V/m)

ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุระหว่างตัวนำทั้งสอง (F/m)

L คือระยะทางที่ประจุบวกเคลื่อนที่ (m)

หากกำหนดให้ตัวนำเป็นแบบแผ่นคู่ขนานที่มีความกว้างเป็นอนันต์ มีระยะห่างเท่ากับ d ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำคู่ขนานที่มีความกว้างเป็นอนันต์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้แผ่นตัวนำด้านล่างมีพิกัดที่ $Z = 0$ และแผ่นตัวนำด้านบนมีพิกัดที่ $Z = d$ มีประจุไฟฟ้ากระจายทั่วพื้นที่ผิวบนตัวนำทั้งสองเท่ากับ $\pm \rho_s$ สมการของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$\vec{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon} \vec{a}_z \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ_s คือจำนวนประจุไฟฟ้าที่กระจายทั่วพื้นผิว (C/m^2)
ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างระนาบบนและระนาบล่างคือ

$$V = - \int_{upper}^{lower} \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \int_d^0 \frac{\rho_s}{\epsilon} dz = \frac{\rho_s \cdot d}{\epsilon} \quad (2.4)$$

จากที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ข้างต้นว่าแผ่นตัวนำมีความกว้างเป็นอนันต์ ประจุที่กระจายบนพื้นผิวที่แผ่นตัวนำก็มีค่าเป็นอนันต์เช่นเดียวกัน ฉะนั้นต้องกำหนดให้แผ่นตัวนำมีพื้นที่จำกัดเท่ากับ S แต่มีข้อแม้ว่าขนาดต้องมากกว่าความห่างของแผ่นตัวนำ d มากพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Fringing Field โดยจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ประจุบนพื้นที่ผิวตัวนำมีค่าเท่ากับ $Q = \rho_s S$ ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำระนาบขนานคือ

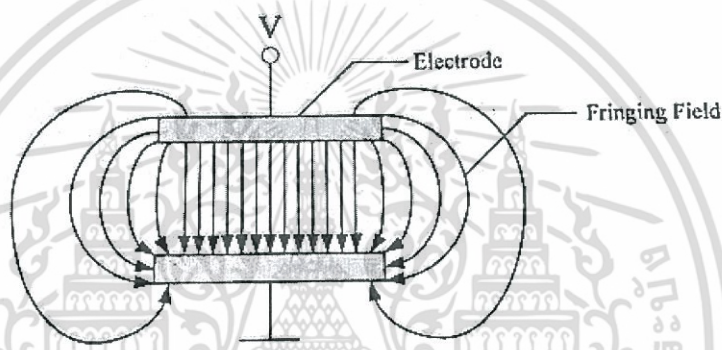
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\rho_s S}{\frac{\rho_s d}{\epsilon}} = \frac{\epsilon S}{d} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 พบว่าค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของตัวเก็บประจุในทางกายภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการคือ

1. พื้นที่ส่วนที่ซ้อนกันของแผ่นตัวนำ (S) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดขนาดของค่าความจุ หากแผ่นตัวนำซ้อนกันเต็มแผ่นตัวเก็บประจุก็สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มาก ถ้าหากวางแผ่นตัวนำให้ซ้อนกันน้อยตัวเก็บประจุก็สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้น้อยลง หรืออีกประการหนึ่ง ถ้าพื้นที่ของแผ่นตัวนำมีขนาดเล็กก็จะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้น้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าพื้นที่ของแผ่นตัวนำมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากด้วย
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) จะมีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยหากแผ่นตัวนำทั้งสองมีระยะห่างน้อย จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่หากเลื่อนแผ่นตัวนำทั้งสองให้มีระยะห่างกันมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง

3. ชนิดของไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้ทำตัวเก็บประจุ ค่า permittivity (สัญลักษณ์ ϵ) ของสารไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารไดอิเล็กทริก เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ถ้าใช้สารไดอิเล็กทริกที่มีค่า permittivity มาก ก็จะส่งผลให้ตัวเก็บประจุมีค่าความจุมากด้วย โดยทั่วไปค่า permittivity จะบอกมาเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคือค่า permittivity ของสารเทียบกับค่า permittivity ของอากาศ

ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำคู่ขนานหากมีการออกแบบให้ความกว้าง และความยาวของแผ่นตัวนำหรือเรียกอีกอย่างว่าขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ให้มีขนาดเล็กกว่าระยะห่าง (d) ของขั้วอิเล็กโทรดมากๆ ผลที่ตามมาคือ Fringing Field เป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้าที่ทำให้ผิดเพี้ยนจากค่าทฤษฎีตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Fringing Field ของตัวเก็บประจุชนิดแผ่นตัวนำขนาน [1]

จากรูปอธิบายได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด เกิดสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดที่เป็นรูปแบบตามทฤษฎีของการกระจายประจุแบบแผ่นขนานและมีสนามไฟฟ้าตามขอบแผ่นโลหะนอกปริมาตรของอิเล็กโทรดซึ่งเรียกสนามไฟฟ้าตรงนี้ว่า Fringing Field สนามไฟฟ้างกล่าวขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ชั้นกลางอีกด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่เกิดจากผลกระทบของค่า Fringing Field ได้มีการอ้างอิงในหนังสือ [2] กำหนดไว้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะขนานต่อหน่วยความยาวมีค่าเท่ากับ

$$\frac{C}{l} = \epsilon k_c \frac{w}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ w คือความกว้างแผ่นอิเล็กโทรด (m)

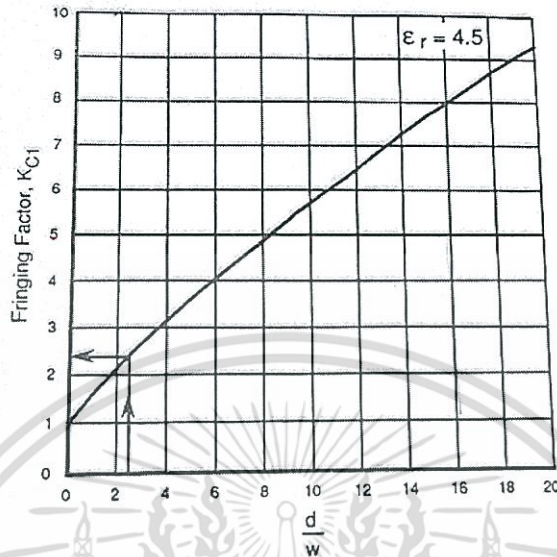
l คือความยาวแผ่นอิเล็กโทรด (m)

d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (m)

k_c คือตัวแปรที่เพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าจาก Fringing Field ตามชนิดของไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

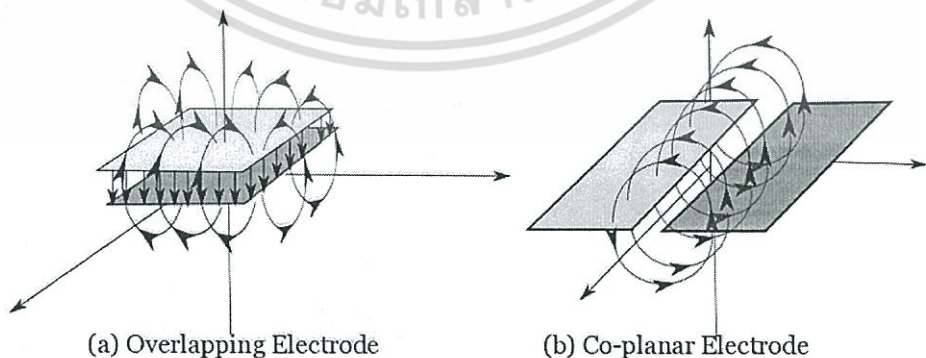
โดยที่ค่า k_c ขึ้นอยู่กับ $\frac{w}{d}$ และมีค่ามากกว่า 1 ขึ้นไปแต่ถ้าหาก $\frac{w}{d} \ll 1$ ค่าของ k_c ประมาณเท่ากับ 1



รูปที่ 2.4 กราฟคุณลักษณะของไดอิเล็กตริกแสดงค่า k_c ที่มีค่า $\epsilon = 4.5$ [1]

2.1.2 ขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบร่วม (Coplanar Electrode)

การทำงานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบร่วม (Coplanar Electrode) จะทำงานบนพื้นฐานสนามไฟฟ้าของ Fringing field ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากชนิดที่มีขั้วอิเล็กโทรดเป็นแผ่นตัวนำแบบขนาน (Parallel Plate Electrode) ที่ทำงานบนหลักการของตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด

(ที่มา: <http://1.bp.blogspot.com/8tjCrXAY4X8/UwDy7Q9QV2I/CapElectrodes.png>)

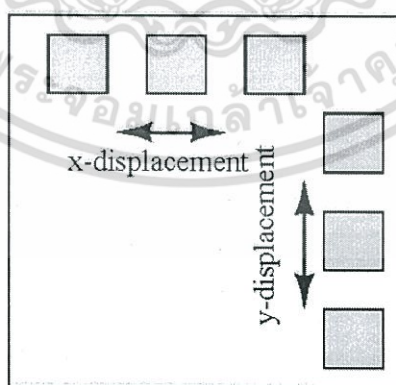
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับวัตถุถูกสร้างขึ้นโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นพื้นที่ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หลังจากมีการบ่อนความต่างศักย์เพื่อทำการเก็บประจุแล้ว การคายประจุจะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อมีการเชื่อมต่อกับกราวด์ เมื่อมีวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือวัตถุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอากาศเข้าใกล้กับขั้วอิเล็กโทรด ค่าความจุไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้น แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้านั้นก็ทำให้เซ็นเซอร์ชนิดนี้ตรวจจับวัตถุได้ เมื่อต้องการให้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เราสามารถเพิ่มจำนวนขั้วอิเล็กโทรดอิสระหลายๆขั้วอิเล็กโทรดได้

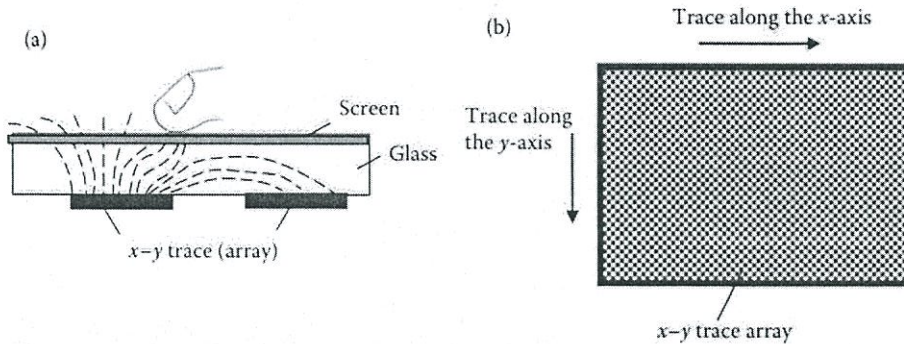
ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่บนระนาบร่วม (Coplanar Electrode) สำหรับเซ็นเซอร์ชนิดตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า จะมี Fringing Field ที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเป็นตัวกำหนดค่า Mutual Capacitance ซึ่งการรบกวน Fringing Field จะส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ยกตัวอย่างขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบร่วมนำมาใช้สำหรับเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งใน 2 มิติ เมื่อมีสารที่มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกหรือร่างกายมนุษย์ที่ส่งผลกระทบต่อ การคับปลิง (Coupling) ของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรดมีการเปลี่ยนแปลงไป

2.1.3 คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์

คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สามารถนำขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบร่วม (Coplanar Electrode) มาจัดเรียงเป็นอาร์เรย์ซึ่งนำไปสู่งานที่ซับซ้อนมากขึ้น ความก้าวหน้าล่าสุดในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับวงจรรวม ทำให้คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์มีขนาดเล็ก ยกตัวอย่างการใช้งานคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์อย่างง่ายคือ การตรวจจับลายนิ้วมือ และหน้าจอสัมผัสกรีน (touch screen) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างขั้วอิเล็กโทรดแบบระนาบที่นำมาใช้สำหรับการวัดตำแหน่งใน 2 มิติ [3]



รูปที่ 2.7 (a) การบวกรวมของสนามไฟฟ้าเมื่อมีการสัมผัสหน้าจอสกีน
(b) เส้น xy ที่เป็นอาร์เรย์ใต้หน้าจอสกีน

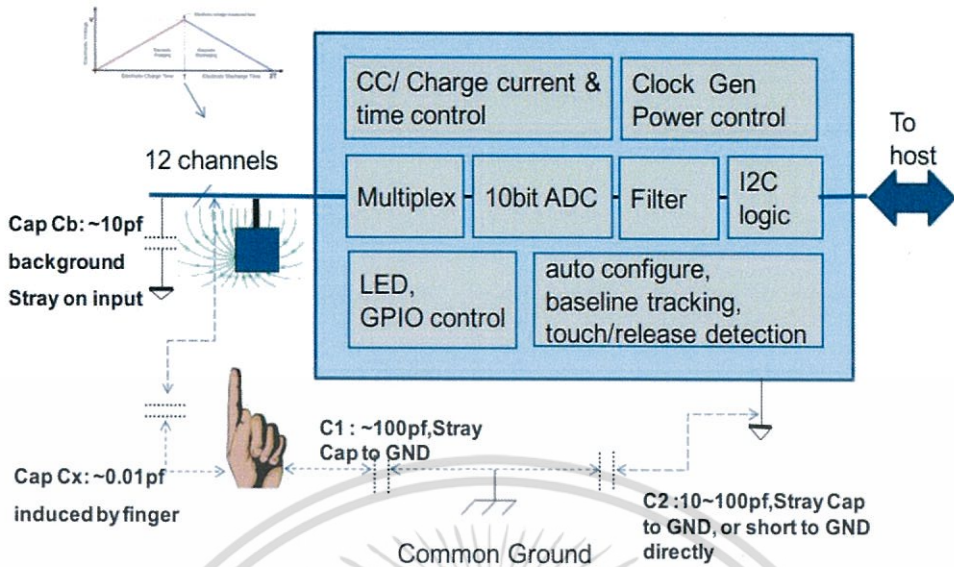
รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เรย์ใช้ทำหน้าจอสกีน ซึ่งหน้าจอสัมผัสแบบสกรีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า ข้อเสียเปรียบของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์คือมีความไวในการตอบสนองต่อการรบกวนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและ ESD จึงต้องหาวิธีการในการลดการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive measurement)

2.2.1 MPR121 (Proximity Capacitive Touch Sensor Controller)

MPR121 เป็นระบบการวัดค่าความจุไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจจับเชื่อมต่อกับอินพุตของ MPR121 โดย MPR121 ใช้การสื่อสารกับหน่วยประมวลผลผ่าน I²C Bus และ Interrupt สัญญาณเอาต์พุต การตรวจวัดทั้งหมดมี 13 channel ซึ่งประกอบด้วยอินพุตสำหรับการตรวจจับลักษณะทางกายภาพ 12 channel และ channel ที่ 13 คือ multiplexed สำหรับการตรวจจับวัตถุที่เข้าใกล้ ซึ่ง multiplexer จะถูกรวมอยู่ในลำดับสุดท้าย ดังนั้นทั้ง 13 channel จะถูกใช้ในการวัดตามลำดับ หลังจากนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่ถูกวัดได้ จะนำมากรองความถี่และกำหนดสถานะว่าถูกสัมผัสหรือไม่

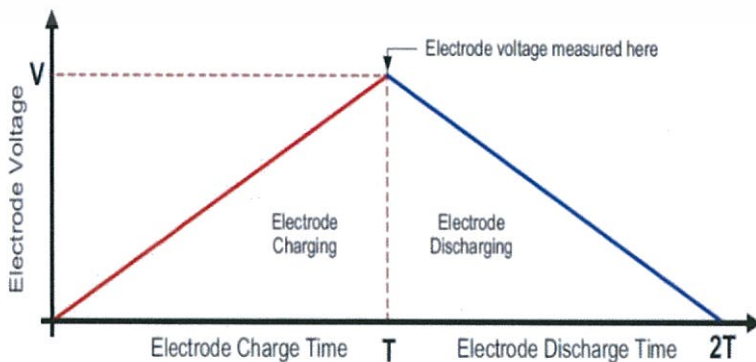
นอกเหนือจากการตรวจจับการสัมผัสแล้ว MPR121 สามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปสำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โดยข้อมูลสัญญาณเอาต์พุต 10 บิตสามารถนำมาใช้งานในการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระดับน้ำ การเคลื่อนที่ หรือการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ



รูปที่ 2.8 แสดง block diagram ขั้นตอนการทำงานของ MPR121

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละอินพุตนั้น คือค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมดไปสู่กราวด์ ซึ่งจะรวมไปถึงค่า Parasitic capacitance (C_b) และค่าความจุไฟฟ้าจากการสัมผัสของนิ้วไปสู่กราวด์ (C_x) ซึ่งกราวด์นี้จะกล่าวถึง Common ground เมื่ออุปกรณ์นี้เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า และกล่าวถึงกราวด์ของ MPR121 เมื่ออุปกรณ์นี้ไม่เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าอื่น สำหรับการทำงานโดยทั่วไป C_b อาจจะมีค่าประมาณ 10 pF และ C_x อาจจะมีต่ำกว่า 1 pF ซึ่งค่าทั้งสองนี้อาจจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่บรรจุในแบตเตอรี่ ซึ่งจะต้องใส่ใจในการออกแบบเป็นอย่างยิ่ง

MPR121 ใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า แต่ละอินพุตจะ charge และ discharge ประจุไฟฟ้าล่งสู่กราวด์เป็นระยะๆ เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.10 อินพุตทั้งหมดนั้นจะถูกวัดตามลำดับ เมื่ออินพุตหนึ่งอยู่ในการ charge/discharge แล้วอินพุตอื่นๆจะถูกลัดวงจรลงสู่กราวด์



รูปที่ 2.9 การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดย MPR121

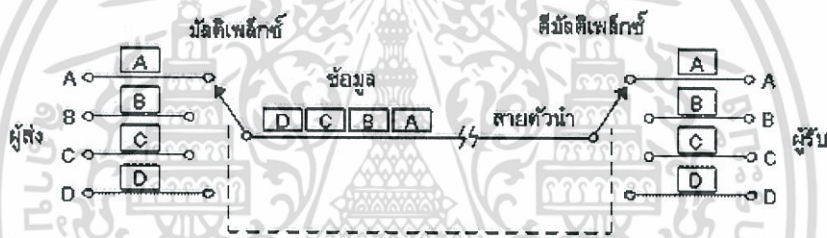
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPR121 สามารถกำหนดจำนวนประจุไฟฟ้า (Q) ที่ใส่เข้าไปได้จากการกำหนดกระแสไฟฟ้า (I) และเวลาในการ Charge (T) เมื่อข้อวิเล็กโทรดถูก charge จุดสูงสุดของศักย์ไฟฟ้า (V) คือจุดที่สิ้นสุดในการ charge วัดโดย ADC Count 10 บิตภายในตัวอุปกรณ์ ค่าศักย์ไฟฟ้านี้คือส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้า (C) ของการตรวจจับในอินพุตนั้นดังสมการที่ 2.7

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{I \times T}{V}, \quad V = \frac{Q}{C} = \frac{I \times T}{C} \quad (2.7)$$

2.2.2 วงจร Multiplexer (MUX)

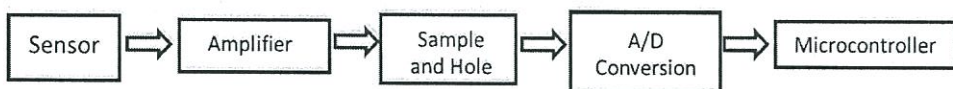
วงจร Multiplexer (MUX) หรือ วงจร (Data Selectors) คือวงจรเลือกข้อมูล ใช้ในกรณีที่มีข้อมูลวงจรถิจิตอลหลาย ๆ บิต และต้องการเลือกเฉพาะบิตใดบิตหนึ่งมาใช้งาน โดยการใช้สัญญาณลอจิกเป็นตัวกำหนดลำดับการเลือกข้อมูลการทำงานของ MUX คล้ายกับสวิตช์เลือก (Selector Switch) ดังรูป



รูปที่ 2.10 วงจร Multiplexer และ วงจร Demultiplexer

2.2.3 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital converter)

ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าจำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณเพื่อแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ความถี่ (Frequency) พัลส์ (Pulse-width) หรือกระแส (Current) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งแต่ละวงจรถูกออกแบบแตกต่างกันแล้วแต่ผู้ที่จะนำไปใช้ ซึ่งในเซ็นเซอร์บางชนิดต้องให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิตอลเนื่องจากต้องนำไปเป็นอินพุตของ Microcomputer โดยตรง ในบางครั้งให้ค่าเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อกที่เปลี่ยนไปตามปริมาณทางกายภาพ ดังนั้นการนำสัญญาณอนาล็อกมาใช้เป็นอินพุตให้กับ Microcomputer นั้นจะต้องเปลี่ยนให้เป็นข้อมูลดิจิตอลเสียก่อน โดยใช้วงจร Analog to digital convertor (A/D)

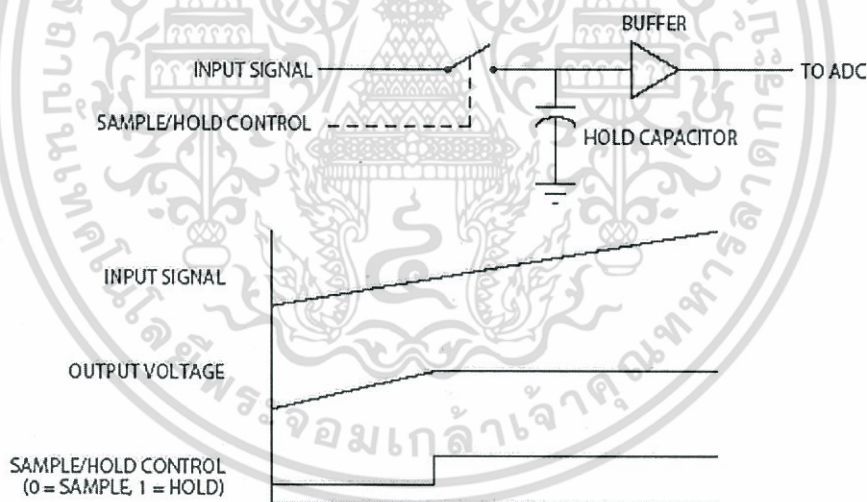


รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณ A/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับค่าสัญญาณที่มีอินพุตเป็นอนาล็อก เนื่องจากสัญญาณที่มาจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น เซ็นเซอร์ อาจมีระดับต่ำมากจึงต้องนำสัญญาณนั้นไปขยายก่อน โดยการใช้ Amplifier หลังจากนั้นต้องมีการแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นตัวเลข เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประมวลผลได้ ด้วยการใช้ ADC จำเป็นต้องผ่านวงจร Sample and Hold ก่อนเพื่อให้สัญญาณมีระดับคงที่ จนกว่าการแปลง ADC จะเสร็จสิ้น ดังจะอธิบายต่อไปนี้

เนื่องจากสัญญาณจากเซ็นเซอร์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมาก จึงต้องนำมาขยายด้วย วงจรขยายประเภทต่างๆก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้ได้ เมื่อสัญญาณจากเซ็นเซอร์ผ่านเข้าวงจรขยายจนได้ขนาดที่เหมาะสมแล้ว ก่อนที่จะมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเกิดขึ้นนั้น สัญญาณต้องผ่านเข้าวงจร Sample and Hold ก่อน เนื่องจากสัญญาณอนาล็อกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แต่การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลนั้น ต้องใช้เวลานานพอสมควรโดยขณะที่แปลง อาจต้องมีการเปรียบเทียบค่าที่แปลงได้กับค่าจริงในขณะนั้น ดังนั้นเพื่อคงค่าในขณะนั้นไว้ระหว่างการแปลง จึงต้องมีการใช้วงจร Sample and Hold เข้ามาช่วย โดยวงจรจะ Sample สัญญาณดังรูปและเอาต์พุตของวงจรคือค่าของสัญญาณตอนที่ Sample เข้ามาและค่านี้จะคงที่ จนกว่าจะมีการ Sample ครั้งใหม่



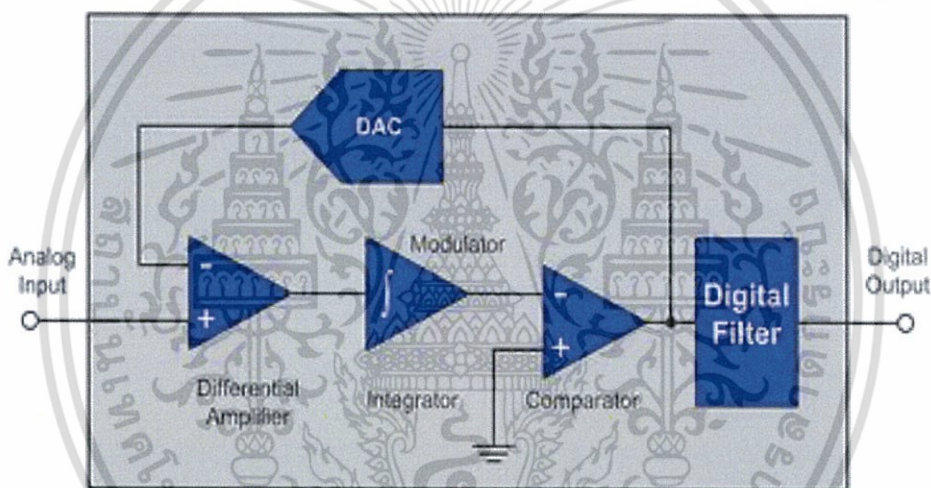
รูปที่ 2.12 การทำงานของวงจร Sample and Hold

วงจร Sample and Hold ใช้เป็นสวิทช์สัญญาณอนาล็อกแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อการสุ่มสัญญาณอนาล็อก และเก็บค่าที่ได้ไว้ในตัวเก็บประจุ จากนั้น A/D Converter จะทำการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เก็บอยู่ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิตอล นับเป็นการสิ้นสุดการแปลง

วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกที่อยู่ในรูปของแรงดันหรือกระแสที่เปลี่ยนแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งไปยังส่วนประมวลผลที่ใช้

วงจรดิจิทัล เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ADC แต่ละชนิดจะมีจุดเด่นจุดด้อยแตกต่างกันไป ผู้ใช้จำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน

1. Delta-Sigma เป็นการแปลงสัญญาณที่มีความละเอียดสูง เป็นการแปลงที่ถือว่าเป็นอุดมคติ (Ideal) และทำงานได้หลายย่านความถี่ตั้งแต่สัญญาณ DC ไปจนถึงหลัก MHz การทำงานของ Delta-Sigma ADC สัญญาณอินพุตจะถูก Oversample โดยตัว Modulator หลังจากนั้นจะนำสัญญาณมากรองอีกที เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นโดย Digital Filter จึงทำให้ได้ค่า ADC ที่มีความละเอียดสูง ที่อัตรา Sampling ต่ำ เพราะว่า Delta-Sigma ทำการ Oversample สัญญาณอินพุตจึงทำให้ได้สัญญาณที่เรียบขึ้น (Anti-aliasing) และในวงจรส่วน Digital Filter จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า Analog Filter โดยปกติแล้วความละเอียดสูงๆจากการแปลงแบบ Delta-Sigma จะใช้ในงานเครื่องมือวัด งานควบคุมในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในของ Sigma-Delta ADC

2.2.4 วงจรกรองความถี่ (Filter circuit)

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าผ่านได้บางช่วงเท่านั้น โดยที่ความถี่อื่นๆจะถูกลดทอนหรือ ตัดออกไปเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการเท่านั้น โดนวงจรกรองความถี่นั้น แบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter Circuit, HPF) , วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter Circuit, BPF) และวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF)

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF) เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่สูงกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ

2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter Circuit, HPF) เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงกว่ความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่ต่ำกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ

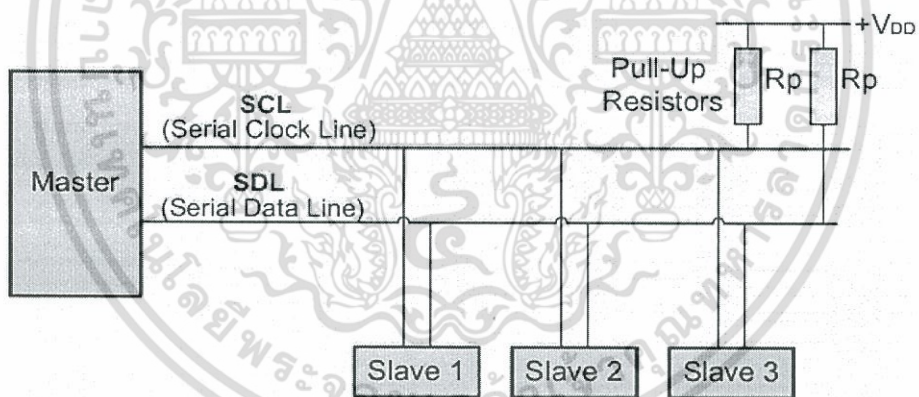
3. วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter Circuit, BPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงสัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยความถี่ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนดจะถูกลดทอนไป

4. วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF) เป็นวงจรที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการบางช่วงออกไป

2.2.5 การส่งข้อมูลด้วยระบบ I²C Bus

I²C คือ I²C Bus ย่อมาจาก Inter Integrate Circuit Bus (IIC) เป็นการสื่อสารอนุกรมแบบ ซิงโครนัส(Synchronous) เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้นคือ Serial data (SDA) และสาย Serial clock (SCL) ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนหลายๆตัวเข้าด้วยกันได้ ทำให้ MCU ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น

1. การเชื่อมต่อแบบ I²C Bus จะใช้สายสัญญาณ 2 เส้นคือ SCL และ SDA สำหรับติดกับอุปกรณ์แบบ 2 ทิศทาง โดยที่ขาสัญญาณทั้งสอง จะต้องต่อกับตัวต้านทานแบบ Pull-Up ไว้เพื่อให้สถานะของบัสในขณะนั้นไม่ถูกใช้งาน มีสถานะเป็นบัสว่างหรือ “1” ทั้งคู่ เนื่องจากเอาต์พุตมีลักษณะแบบ Open Drain หรือเป็นแบบ Open Collector เพื่อให้เอาต์พุตเชื่อมต่อกันได้หลายตัว

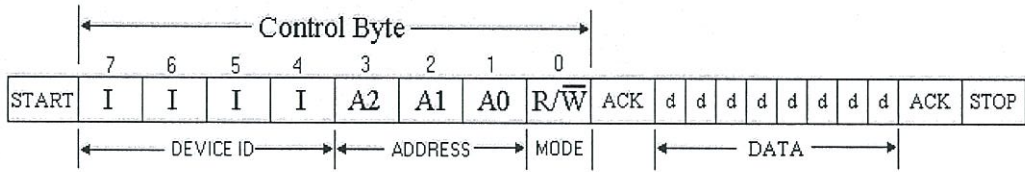


รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะโครงสร้างการเชื่อมต่อแบบ I²C Bus

2. การรับส่งข้อมูลแบบ I²C Bus จะเริ่มต้นด้วยการที่สร้างสถานะเริ่มต้น (start condition) เพื่อแสดงการขอใช้บัส จากนั้นจึงเริ่มการส่งรหัสควบคุม (Control Byte) ซึ่งประกอบด้วยรหัสประจำตัวอุปกรณ์ (Device ID) เพื่อใช้ระบุตำแหน่งแอดเดรสของตัวอุปกรณ์ที่ต้องการจะติดต่อกับ โดยรหัสควบคุมจะมีขนาด 8 บิตซึ่ง 7 บิตแรก (เริ่มจาก MSB) จะเป็นค่าตำแหน่งแอดเดรสของตัวลูก ส่วนบิตที่ 8 (LSB) จะเป็นบิตสุดท้ายของไบท์ที่ใช้สำหรับระบุทิศทางของข้อมูลในการรับส่ง (R/W) โดยข้อมูลจะทำการรับส่งครั้งละ 1 ไบท์ (8 บิต) และปิดท้ายข้อมูลของแต่ละไบท์ด้วยบิตแสดงการตอบรับ (Acknowledge Bit) โดยลักษณะโครงสร้างของ Control Byte ของ

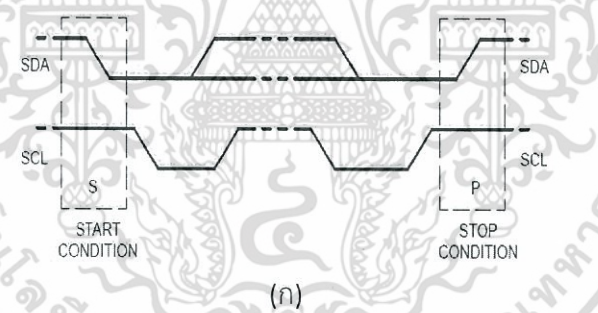
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ I²C มีดังนี้

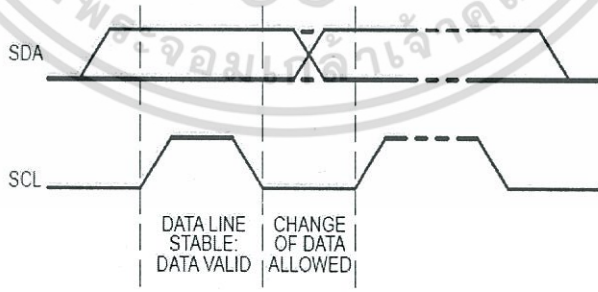


รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของ Control Byte

สำหรับในกรณีที่ตัวแม่ต้องการติดต่อกับอุปกรณ์หลายๆตัว ตัวแม่สร้างสถานะเริ่มต้น (Start condition) ขึ้นมาและทำการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ตัวหนึ่งเสร็จแล้ว ไม่จำเป็นต้องสร้างสถานะสิ้นสุด (Stop condition) เพื่อกลับไปเริ่มต้นรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ตัวต่อไปอีกก็ได้ แต่ตัวแม่สามารถสร้างสถานะเริ่มต้นขึ้นมาซ้ำใหม่ พร้อมกับส่งค่ารหัสควบคุมซึ่งระบุตำแหน่งที่อยู่ของอุปกรณ์ตัวต่อไปได้ทันที เมื่อต้องการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ทุกตัวเสร็จแล้ว จึงสร้างสถานะสิ้นสุดเพื่อเป็นการเลิกใช้บัสและทำให้บัสอยู่ในสถานะว่างในภายหลังก็ได้เช่นกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.17 (ก) แสดงสถานะเริ่มต้นและหยุดของการส่งข้อมูลแบบ I2C
(ข) ลักษณะการรับส่งบิตข้อมูลของ I2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อกำหนดในการเริ่มต้นสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสิ้นสุดของ I²C Bus การกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสิ้นสุดจะถูกกำหนดโดยตัวแม่ (CPU) โดยสภาวะปกติของบัสหรือสภาวะว่างนั้น สัญญาณ SCL และ SDA จะมีค่าเป็น “1” ทั้งคู่ เมื่อต้องการเริ่มต้นในการรับส่งข้อมูลในบัส ตัวแม่จะสร้างสภาวะเริ่มต้น โดยการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ SDA จาก “1” มาเป็น “0” ในขณะที่สัญญาณ SCL ยังมีสถานะเป็น “1” อยู่ และเมื่อต้องการสิ้นสุดการใช้งาน บัสตัวแม่ก็จะสร้างสภาวะสิ้นสุด โดยการเปลี่ยนสภาวะของสัญญาณ SDA จาก “0” กลับไปเป็น “1” ในขณะที่สัญญาณ SCL ยังมีค่าเป็น “1” อยู่

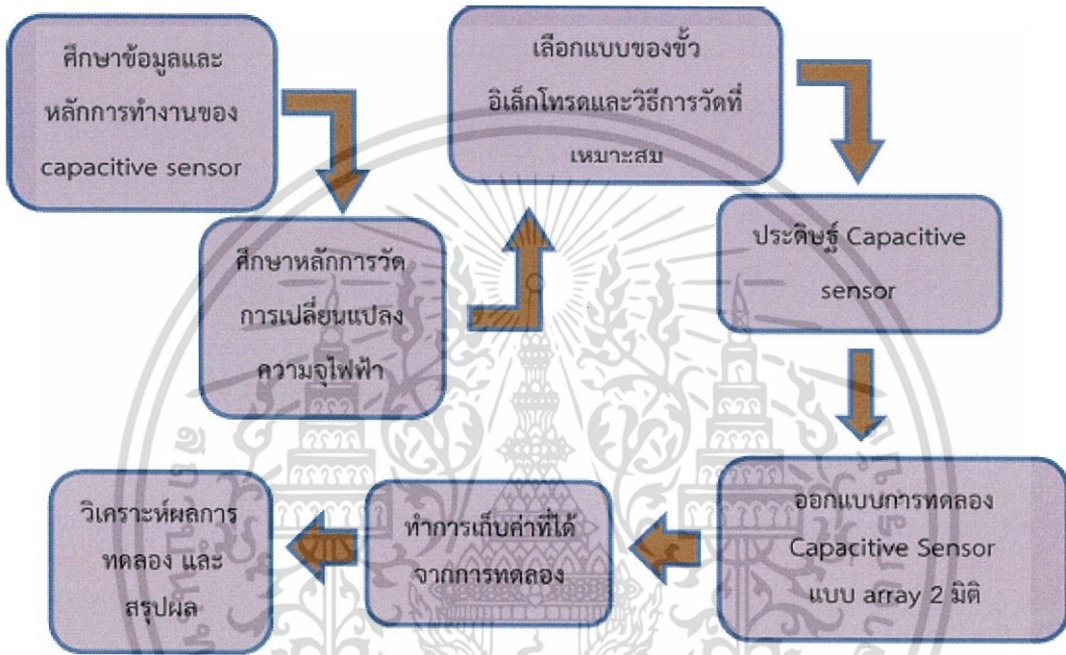
3. การแจ้งสภาวะรับทราบในบัส (Acknowledge) ในการรับส่งข้อมูลแบบ I²C Bus จะต้องมีการแจ้งรับทราบ เพื่อแจ้งให้ทราบว่า ข้อมูลที่ถูกส่งออกไปนั้นได้รับแล้วและมีความถูกต้องสมบูรณ์ ซึ่งตัวแม่จะใช้สัญญาณนาฬิกา SCL ในการควบคุมการรับส่งข้อมูลทางขา SDA เมื่อข้อมูลถูกส่งครบ 8 บิตตัวลูกจะต้องตอบรับให้ตัวแม่รับรู้ เมื่อตัวแม่ส่งครบ 8 บิตแล้วตัวแม่จะปล่อยสัญญาณข้อมูล SDA ให้อยู่ในสภาวะว่าง “1” และสร้างสัญญาณนาฬิกาออกมาในบัสอีก 1 ลูกคลื่น ซึ่งในสภาวะนี้ตัวลูกต้องส่งสัญญาณ “0” ออกมาทางขา SDA ในช่วงที่สัญญาณ SCL มีค่าเป็น “0” เป็นเวลา 1 ลูกคลื่นของสัญญาณ SCL และตัวแม่ก็จะทำการตรวจสอบสัญญาณการรับรู้ในช่วงที่สัญญาณนาฬิกามีค่าเป็น “1” เสมอ ในกรณีที่ตัวลูกไม่ยอมส่งสัญญาณให้ตัวแม่ อาจจะต้องเริ่มต้นกระบวนการส่งสัญญาณใหม่ทั้งหมด

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงานโครงการวิจัยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนในการประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ใน 2 มิติ เราสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานดังแผนภาพในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุ

ในการดำเนินการวิจัยเพื่อการประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์นี้ มีการดำเนินงานโดยการศึกษาค้นคว้า เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์เพื่อใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ ชนิดของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ รูปแบบของขั้วอิเล็กโทรด และศึกษาหาวิธีในการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนในการประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์รูปแบบต่างๆ และทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า เมื่อสามารถตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงได้แล้ว จึงทำการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น ความสามารถในการตรวจจับตำแหน่งเมื่อมีวัตถุมาสัมผัสบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ผลการทดลองและทำการสรุปผลจากการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุของโครงการวิจัยนี้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์

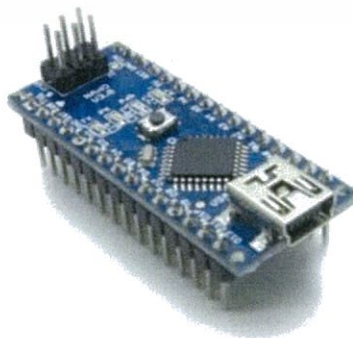
1. แผ่น PCB (Print Circuit Board) 2 หน้า และ 1 หน้า ขนาด 6x6 นิ้ว ใช้สำหรับในการกัดปรินท์เพื่อจัดทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.2 แผ่น PCB (Print Circuit Board)

2. Arduino Nano

Arduino Nano คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป ที่รวมเอาตัวไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็นมาในบอร์ดเดียว บอร์ดที่ใช้คือไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega168 หรือเบอร์ ATmega328 โปรแกรมผ่านโปรโตคอล UART ใช้ Mini USB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ มีพอร์ตดิจิตอลอินพุตเอาต์พุต 14 พอร์ต มีพอร์ตอนาล็อกอินพุต 8 พอร์ต บนบอร์ดยังมีเรกูเลเตอร์ สามารถจ่ายไฟได้ตั้งแต่ 7 – 12V เพื่อให้บอร์ดทำงานได้ (จ่ายไฟที่ขา VIN) กรณีมีแหล่งจ่ายไฟ 5V อยู่แล้วก็จ่ายเข้าได้เลยที่ขา 5V



รูปที่ 3.3 Arduino Nano

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าคือ พื้นที่ของตัวนำ ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกวัสดุที่มีพื้นที่สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยวัสดุที่เลือกใช้คือขวดแก้วที่มีขนาดต่างๆ ดังนี้

1. ขวดที่ 1 ขวดแก้วสูง 3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของขวด 0.65 เซนติเมตร ความจุ 1.33 มิลลิลิตร
 2. ขวดที่ 2 ขวดแก้วสูง 4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของขวด 1.00 เซนติเมตร ความจุ 3.14 มิลลิลิตร
 3. ขวดที่ 3 ขวดแก้วสูง 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของขวด 1.50 เซนติเมตร ความจุ 7.07 มิลลิลิตร
 4. ขวดที่ 4 ขวดแก้วสูง 6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของขวด 2.00 เซนติเมตร ความจุ 12.57 มิลลิลิตร
- (ดังรูปที่ 3.6 เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา)

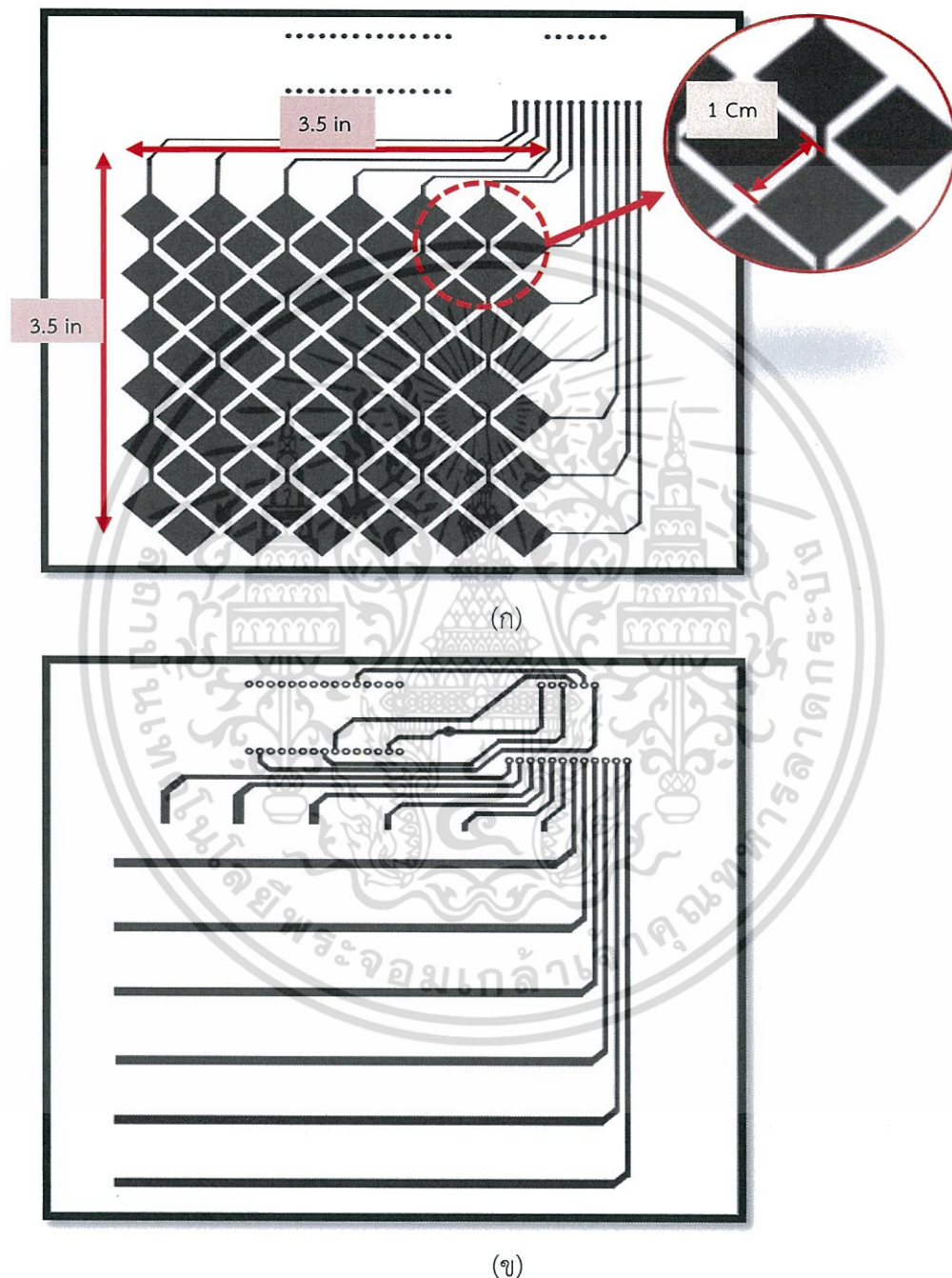


รูปที่ 3.6 ขวดแก้วขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการออกแบบและการทำแผ่น PCB ให้เป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ ใน 2 มิติ

1. ใช้โปรแกรม illustrator ในการออกแบบซั้วอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูป



รูปที่ 3.7 (ก) รูปแบบซั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำเป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (ด้านบน)

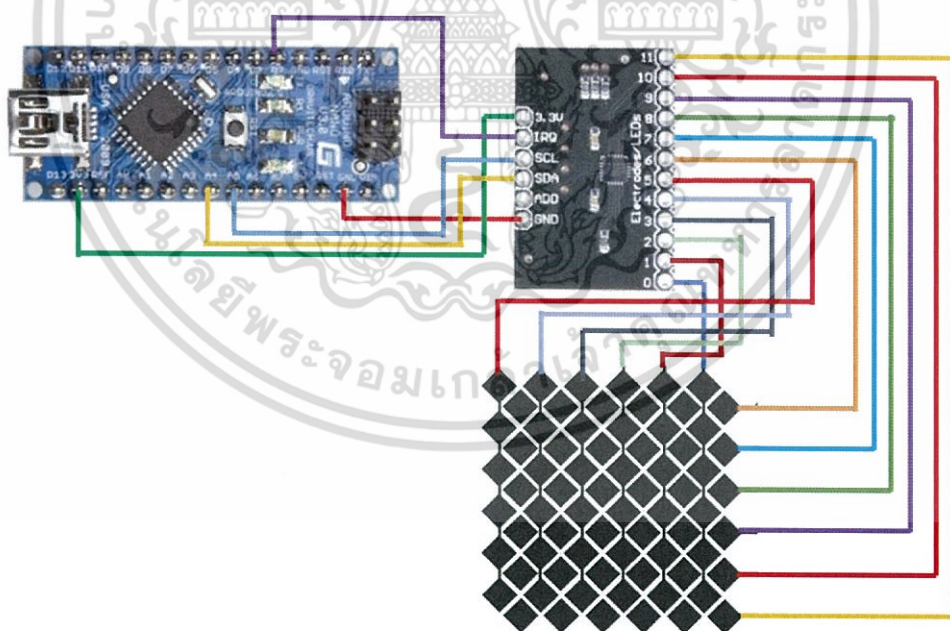
(ข) รูปแบบซั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำเป็นคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการกัดแผ่น PCB ซึ่งในการทำคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 2 มิติ นั้นต้องใช้แผ่นปรินสองหน้าเนื่องจากลายปรินมีทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y เพื่อไม่ให้ทั้งสองแกนเชื่อมถึงกันจึงจำเป็นต้องให้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของทั้งสองแกนอยู่คนละหน้ากัน การกัดปรินแผ่น PCB เลือกใช้วิธีการรีดลายปรินจากกระดาษโฟโต้ให้ติดกับแผ่น PCB เมื่อได้ลายบนแผ่น PCB แล้วจึงนำไปใส่ในน้ำยากัดปรินรอกจนกัดทองแดงที่ไม่ต้องการออกจนหมดแล้วจึงนำไปขัดให้เหลือแต่ลายทองแดงที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.6

3. การบัดกรีขั้วอุปกรณ์ เพื่อกำหนดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และการทำ ground plane เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก ซึ่งในการกำหนดขั้วอิเล็กทรอนิกส์นั้นแบ่งเป็น Column 6 ขั้วและ Row 6 ขั้ว โดยให้ Column ที่ 1-6 ต่อเข้ากับขา 5,4,3,2,1,0 ของ mpr121 ตามลำดับและ Row ที่ 1-6 ต่อเข้ากับขา 6-11 ของ mpr121 ตามลำดับ และในส่วนของการทำ ground plane นั้นใช้แผ่น PCB หน้าเดียวทำเป็น Layer ที่ 2 โดยใช้ด้านที่ไม่ใช่ทองแดงมาปะกบเข้ากับแผ่น PCB ที่กัดปรินเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้วและบัดกรีให้ด้านที่เป็นทองแดงเป็น ground ทั้งแผ่น โดยการบัดกรี ground นั้นเชื่อมต่อเข้ากับ GND ของ MPR121

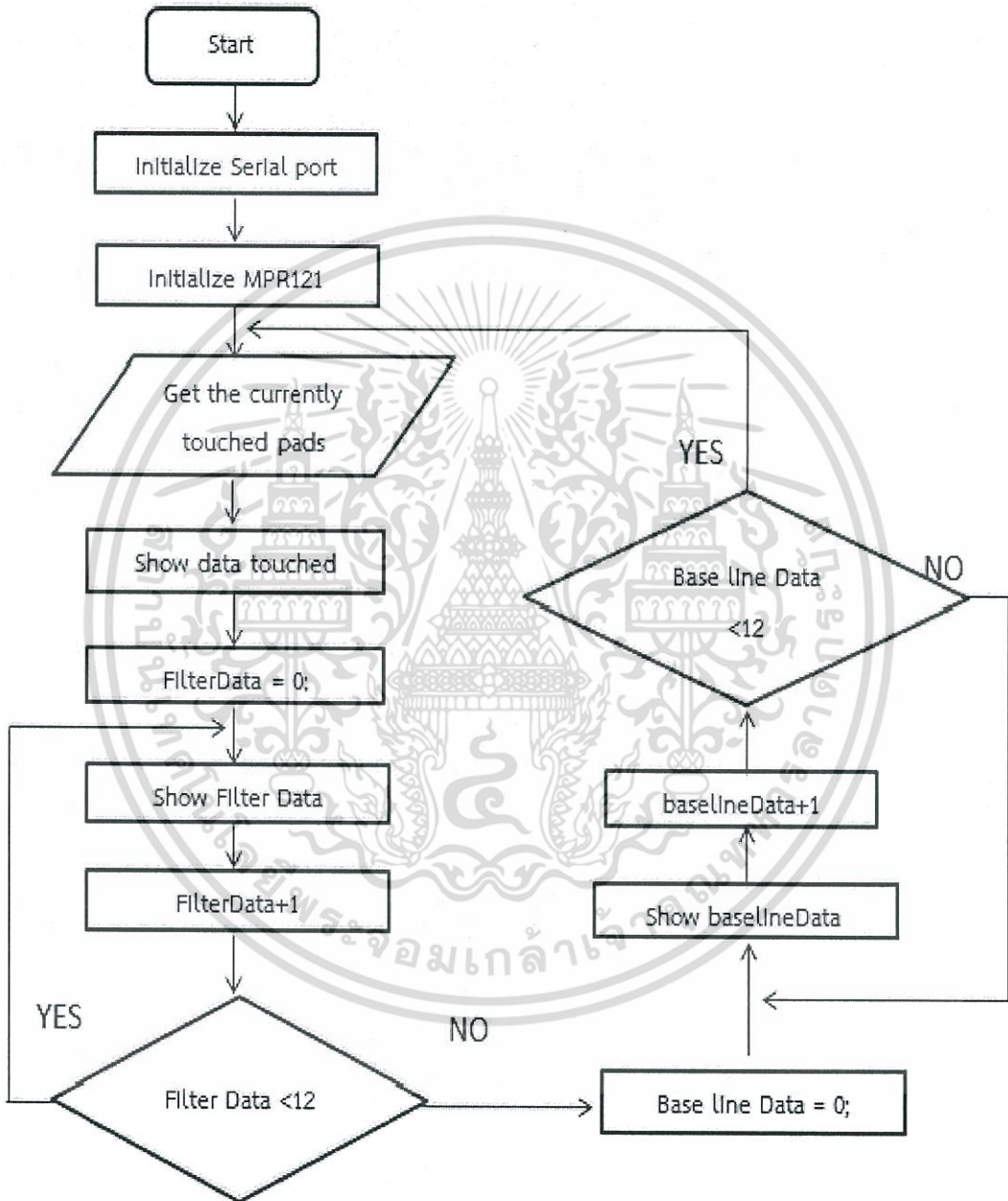
4. ทำการเชื่อมต่อพอร์ตของโมดูล MPR121 ; Arduino nano และขั้วอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โมดูล MPR121 และ Arduino nano

3.4. วิธีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า

ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า ได้ทำการเลือกใช้โมดูล MPR121 ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้านั้นเลือกใช้เป็น Arduino nano ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานโดย Flowchart ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Flowchart ของโปรแกรม Arduino MPR121_test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ในการทดลองการตรวจจ็วัดของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ที่จัดทำขึ้น จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.5.1. การทดลองเพื่อตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดในขณะที่ยังไม่มีวัตถุมารสัมผัสกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

1. เชื่อมต่อคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ ทำการรันโปรแกรม Arduino
2. อ่านค่า ADC Count เมื่อไม่มีวัตถุมารสัมผัสบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 12 ขั้ว แล้วนำมาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการ (3.1)

$$C = \frac{I \times T}{ADC} \times \frac{1}{Vdd} \times 1024 \quad (3.1)$$

โดย I คือกระแสที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด ในที่นี้ใช้เท่ากับ $63 \mu A$

T คือคาบเวลา เท่ากับ $1mS$

Vdd คือไฟที่ป้อนให้กับเซ็นเซอร์ มีค่าเท่ากับ $3.3 V$

3. พล็อตกราฟ 3 มิติจากค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละขั้ว ทั้ง 12 ขั้ว

3.5.2. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการสัมผัสของวัตถุในตำแหน่งต่างๆ บนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

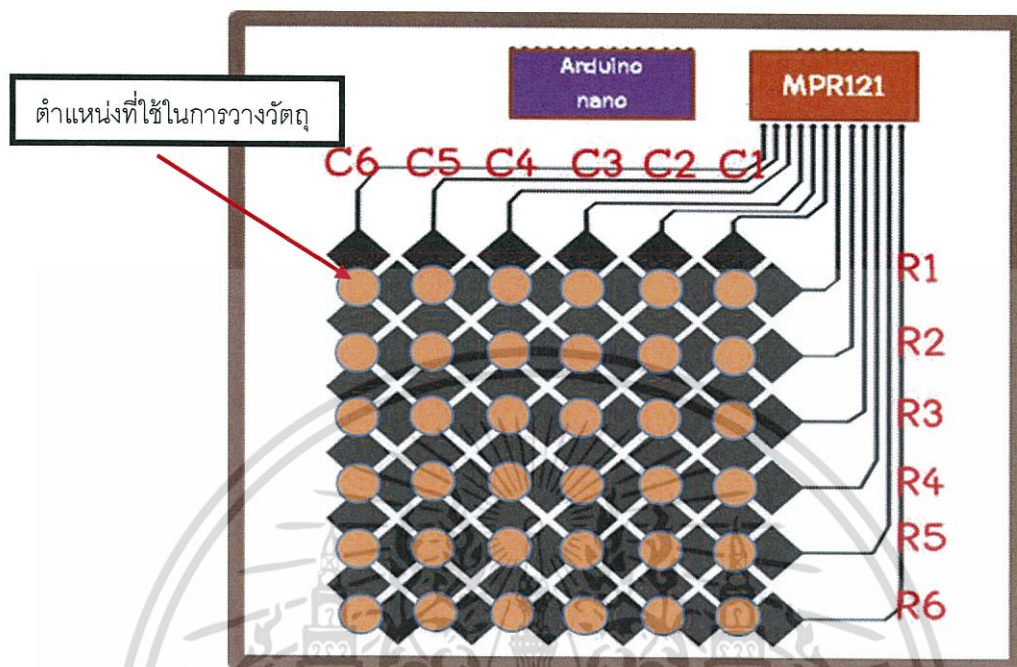
ในการทดลองเพื่อศึกษาการตรวจจ็วัดวัตถุในตำแหน่งต่างๆ ของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ทั้ง 36 ตำแหน่ง จะทำการทดลองโดยใช้วัตถุซึ่งเป็นขวดแก้วที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มีรัศมีของขวดเท่ากับ 0.65 เซนติเมตร ภายในบรรจุน้ำเปล่ามาเป็นวัตถุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งขั้นตอนการทำการทดลองมีดังนี้

1. นำวัตถุที่ใช้ในการทดลองมาวางไว้บนจุดตัดของแนวหลักและแถวบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่จัดทำขึ้นมีขั้วอิเล็กโทรด 12 ขั้ว แบ่งเป็น 6 คอลัมน์ และ 6 แถว ดังนั้นจุดตัดของขั้วอิเล็กโทรดทั้งในแนวหลักและแถวนั้น จะมีทั้งหมด 36 จุด ดังรูปที่ 3.10 ในการทดลองจะทำการทดลองโดยวางวัตถุไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง แล้วเก็บค่า ADC Count ของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 12 ขั้วที่สามารถอ่านได้ ADC Count จากคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.1 แล้วเลื่อนตำแหน่งที่วางวัตถุไปเรื่อยๆ จนครบทั้ง 36 ตำแหน่ง

2. นำค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้มาพล็อตกราฟ 3 มิติโดยให้แกน x แทนขั้วอิเล็กโทรดในแนวคอลัมน์ แกน Y แทนขั้วอิเล็กโทรดในแนวแถว และแกน Z แทนค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

โดยนำค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละขั้วที่คำนวณได้ไปลบค่าความจุไฟฟ้าเมื่อไม่มีการสัมผัสที่วัดได้ใน

3.5.1



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งต่างๆในการวางวัตถุ

3.5.3. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของของเหลว

ในการทดลองเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าโดยคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่สร้างขึ้นนี้ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนชนิดของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในวัตถุที่ใช้วัด โดยของเหลวที่เลือกใช้คือ น้ำเปล่า น้ำอัดลม นม และน้ำมันพืช วัตถุที่เลือกใช้ในการทดลองคือ ขวดแก้วที่มีขนาดเท่าเดิมกับตอนที่ 1 ทำการทดลองโดยจะวางวัตถุไว้ในตำแหน่งเดียวกันทั้งการทดลองคือ ตำแหน่งที่ C5 ตัดกับ R2 การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำทดลองวางวัตถุที่มีของเหลวอยู่ในขวดบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ แล้วบันทึกค่า ADC Count ของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 12 ขั้ว ทำการทดลองเหมือนเดิม 5 ครั้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่ 3.1 แล้วนำมาพล็อตกราฟเหมือนการทดลองที่ 3.5.2

2. เปลี่ยนของเหลวภายในขวดแก้ว แล้วนำมาทำการทดลองเหมือนข้อ 1

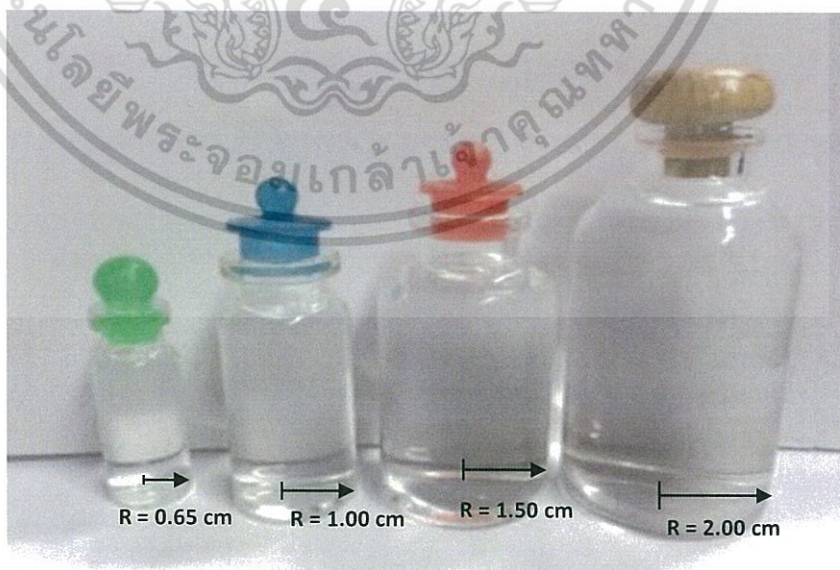
3. นำค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้มาพล็อตกราฟ 3 มิติโดยให้แกน X แทนขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในแนวหลัก แกน Y แทนขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในแนวแถว และแกน Z แทนค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงโดยนำค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละขั้วที่คำนวณได้ไปลบค่าความจุไฟฟ้าเมื่อไม่มีการสัมผัสที่วัดได้ใน 3.5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

3.5.4. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของวัตถุ
ในการทดลองเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนขนาด
ของวัตถุ ทำการทดลองโดยใช้ของเหลวชนิดเดียวคือน้ำเปล่า แล้วเปลี่ยนขนาดของขวดแก้ว โดยขนาด
ของขวดแก้วที่นำมาใช้ทำการทดลองมีรัศมีของของแตกต่างกัน 0.65, 1.00, 1.50 และ 2.00
เซนติเมตรตามลำดับดังรูปที่ 3.12 และตำแหน่งที่วางคือ C2 และ R5 และทำการทดลองเหมือนใน
ตอนที่ 3.5.3 .



รูปที่ 3.12 ขวดแก้วขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

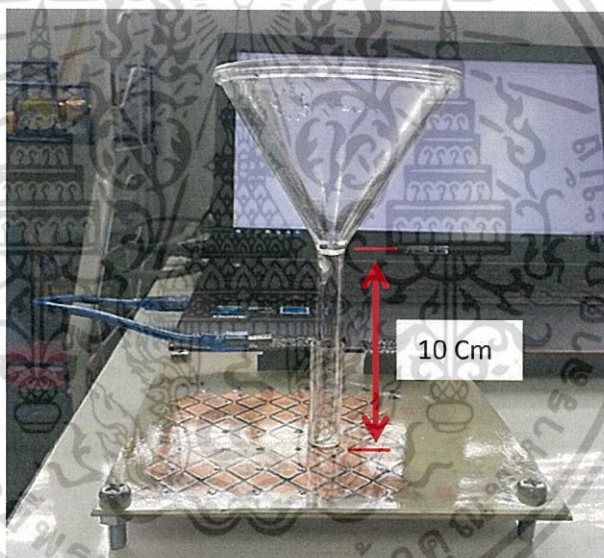
3.5.5. การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนค่าความจุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุ

ในการทดลองเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุ ทำการทดลองโดยขั้นตอนดังนี้

1. การใช้แท่งแก้วขนาดเล็กวางบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ แล้วใช้กรวยแก้วที่มีก้านของกรวยยาว 10 เซนติเมตร มาใส่ไว้ในแท่งแก้ว ดังรูปที่ 3.13 แล้วทำการบันทึกค่า ADC Count ของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 12 ขั้ว จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าดังสมการที่ 3.1

2. เพิ่มน้ำหนักของวัตถุบนแท่งแก้วให้มีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 10 กรัม ทำการเพิ่มน้ำหนักโดยการเติมน้ำบนกรวย โดยไม่ให้น้ำไหลลงมาเข้าสู่แท่งแก้วจากนั้นทำการบันทึกค่า ADC Count แล้วทำการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า

3. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการนำค่าความจุไฟฟ้าในขณะที่มีการเพิ่มน้ำหนักขึ้นครั้งละ 10 กรัมไปลบกับค่าความจุไฟฟ้าในข้อ 1 โดยการนำมาพล็อตกราฟ 3 มิติ



รูปที่ 3.13 ภาพอุปกรณ์ในการทดลองการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

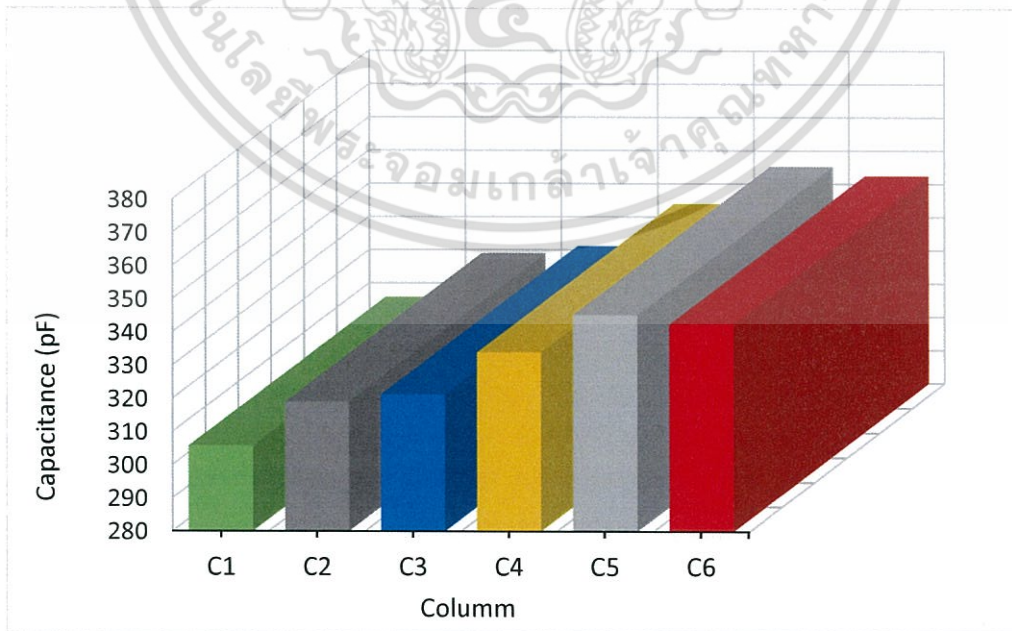
ในบทนี้จะอธิบายถึงผลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ผลจากการศึกษาการตรวจจับวัตถุโดยคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดสอบการตรวจจับวัตถุในตำแหน่งต่างๆ บนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์อาร์เรย์ การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของของเหลวภายในขวดที่นำมาใช้ในการตรวจสอบ และการทดสอบเมื่อมีวัตถุที่มีขนาดไม่เท่ากันมาสัมผัสกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่สร้างขึ้น

4.1 ผลจากการทดสอบการตรวจจับวัตถุในตำแหน่งต่างๆบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์

จากการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 6x6 ในตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีวัตถุมาสัมผัสและไม่มีวัตถุมาสัมผัส โดยจะแสดงผลค่าความจุไฟฟ้าที่ตรวจจับได้ ดังตารางที่ ในภาคผนวก

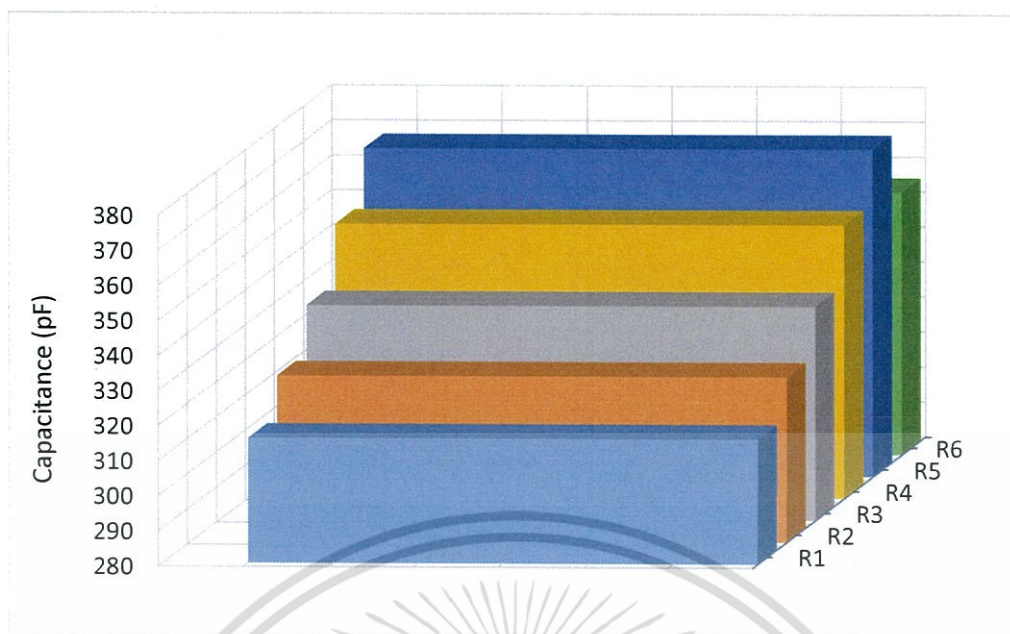
4.1.1. ผลจากการทดลองเพื่อตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กทรอนิกส์แต่ละขั้ว

คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 6x6 ที่สร้างขึ้นมีขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 12 ขั้ว โดยแบ่งเป็นแถว 6 แถว และหลัก 6 หลัก ในการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กทรอนิกส์แต่ละขั้วได้ค่าความจุไฟฟ้าเมื่อไม่มีการสัมผัส สามารถแสดงได้ดังแผนภูมิแท่ง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในคอลัมน์ที่ C1-C6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



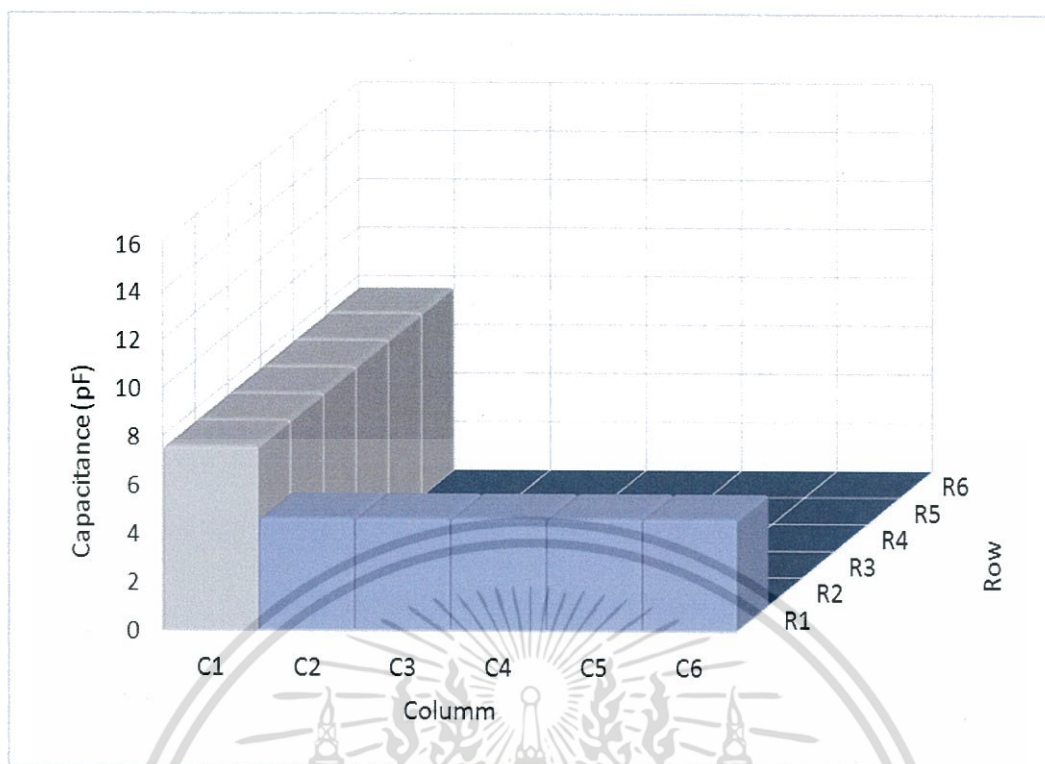
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในแถวที่ 1-6

จากรูปภาพแสดงให้เห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่ตรวจจับได้จากขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละขั้ว มีค่าแตกต่างกัน โดยขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในหลักที่ 1 และแถวที่ 1 ซึ่งอยู่ใกล้กับตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับ การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า (MPR121) จะเห็นได้ว่ามีเส้นทางในการเชื่อมกับขั้วอิเล็กทรอนิกส์นั้นใกล้กว่า ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ไกลออกไป ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าทำให้มีค่าน้อยกว่า และอีกประการหนึ่งคือขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ขอบ (หลักที่ 1,6 และแถวที่ 1,6) มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่าขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บริเวณด้านใน เนื่องจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ด้านในมีขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เกิดการคับปลิง (Coupling) มากกว่าขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บริเวณขอบ

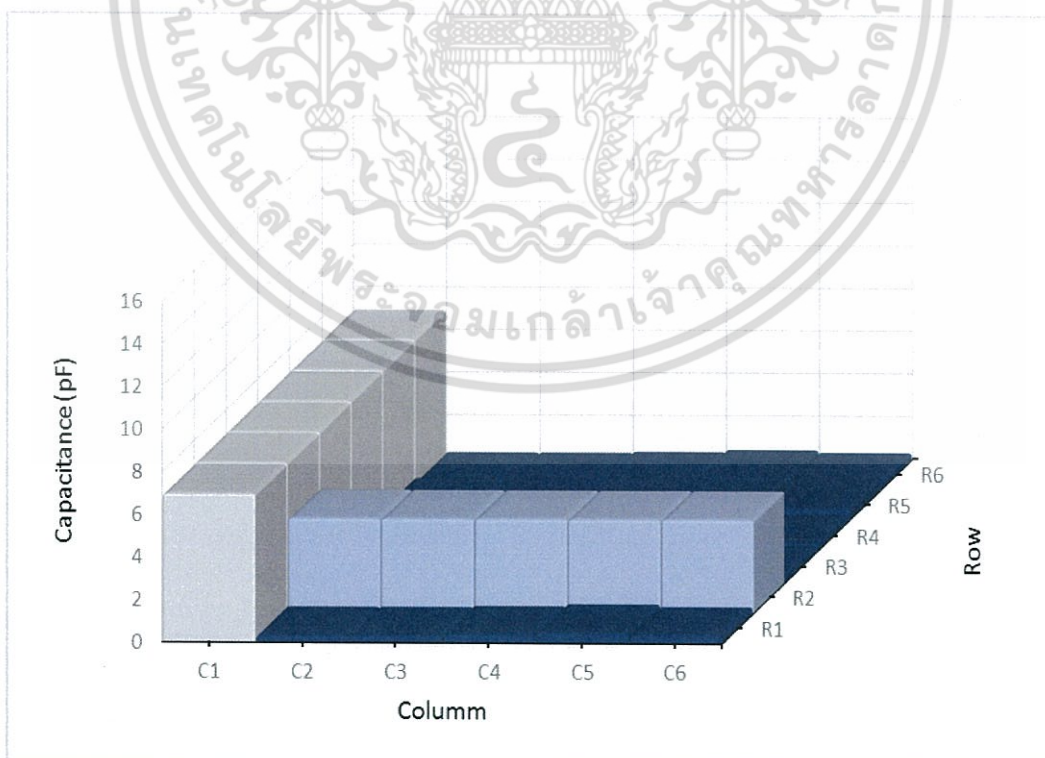
4.1.2 ผลจากการทดสอบตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุจากคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์

จากการทดลองในการทดสอบการตรวจจับวัตถุของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 6X6 ที่สร้างขึ้นนี้ พบว่ามีจุดที่ติดกันระหว่างแถวและหลักทั้งหมด 36 จุด จากการทดลองโดยใช้ขวดแก้วที่มีขนาดพื้นที่บริเวณกันขวด 1.33 ตารางเซนติเมตร ซึ่งภายในขวดบรรจุน้ำเปล่า ไปวางบนจุดที่ติดกันที่ละตำแหน่ง ผลจากการทดลองพบว่าในตำแหน่งที่ถูกวัดวางทับอยู่ ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจากเดิมที่ไม่มีวัตถุวาง ดังนั้นการตรวจสอบตำแหน่งในการตรวจจับวัตถุนี้ จึงต้องทดสอบทั้ง 36 ตำแหน่งเพื่อสังเกตการตอบสนองในการตรวจจับวัตถุว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า

ผลจากการทดลองในตอนนี้จะแสดงในกราฟ 3 มิติ ซึ่งบ่งบอกตำแหน่งที่วัตถุวางอยู่โดยดูจากการตัดกันของกราฟในแกน X และแกน Y โดยแกน Z แสดงถึงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่ไม่มีวัตถุวางอยู่

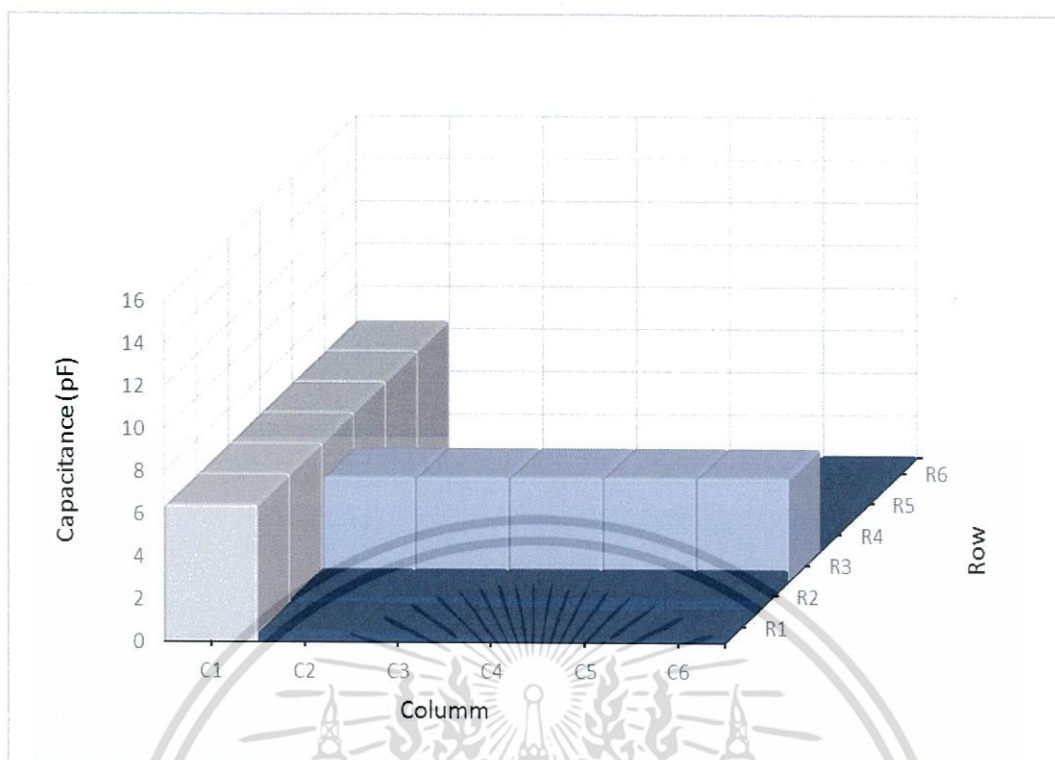


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R1

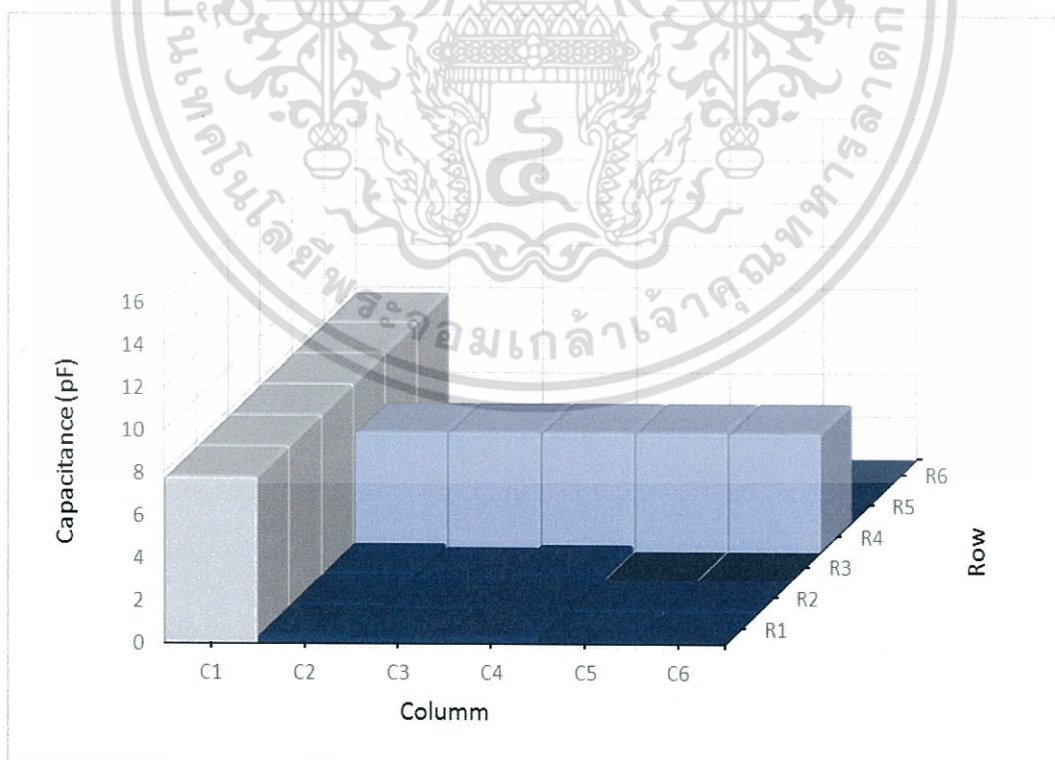


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

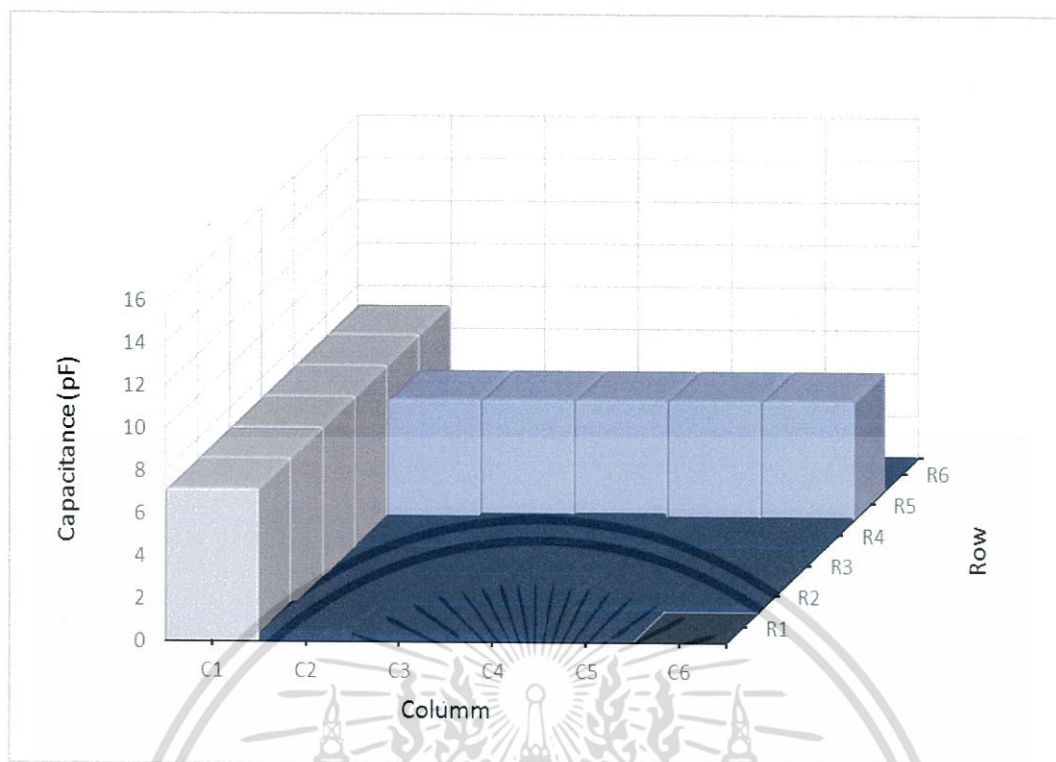


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R3

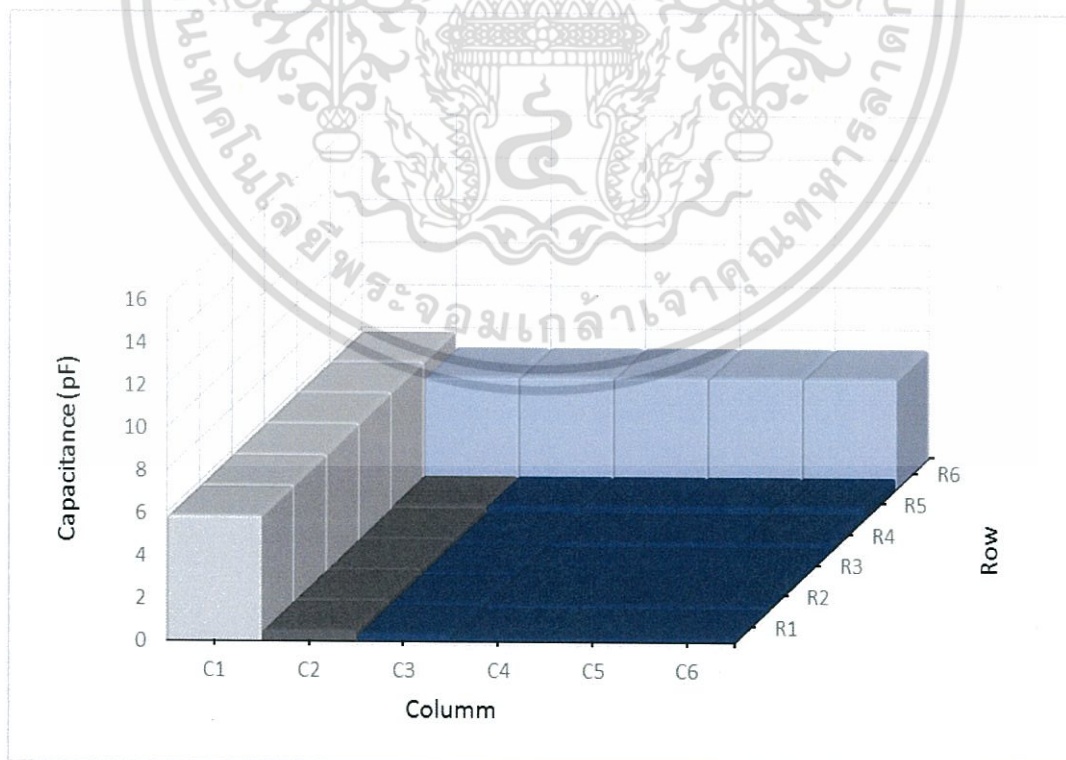


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

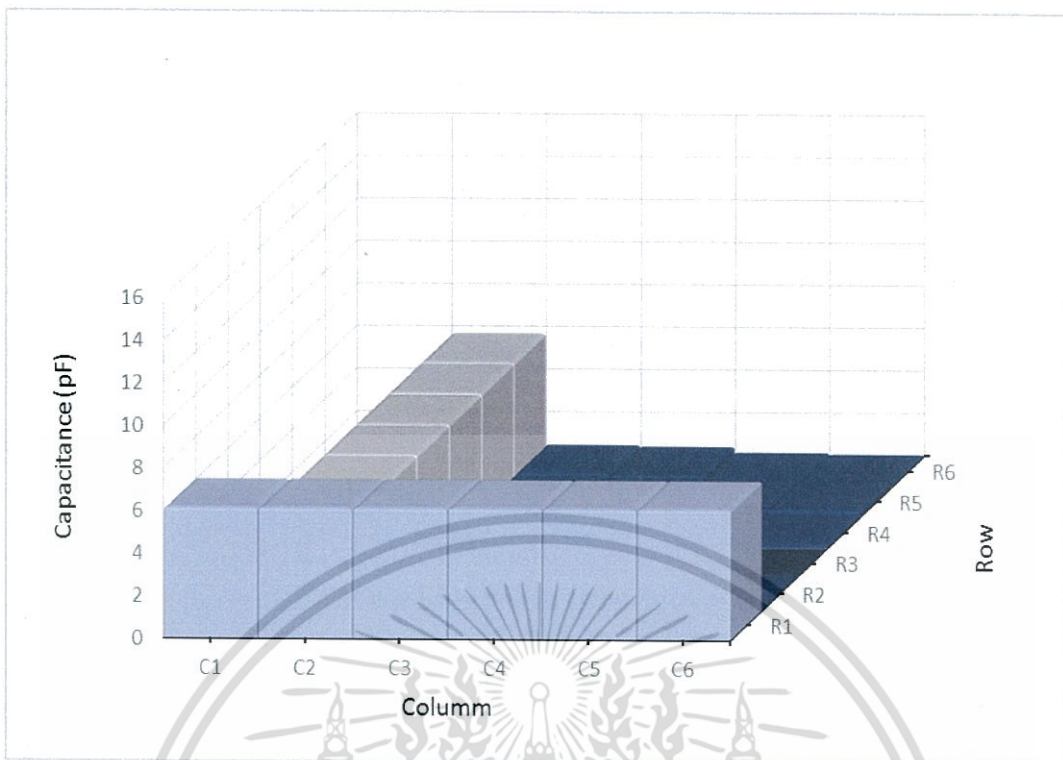


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R5

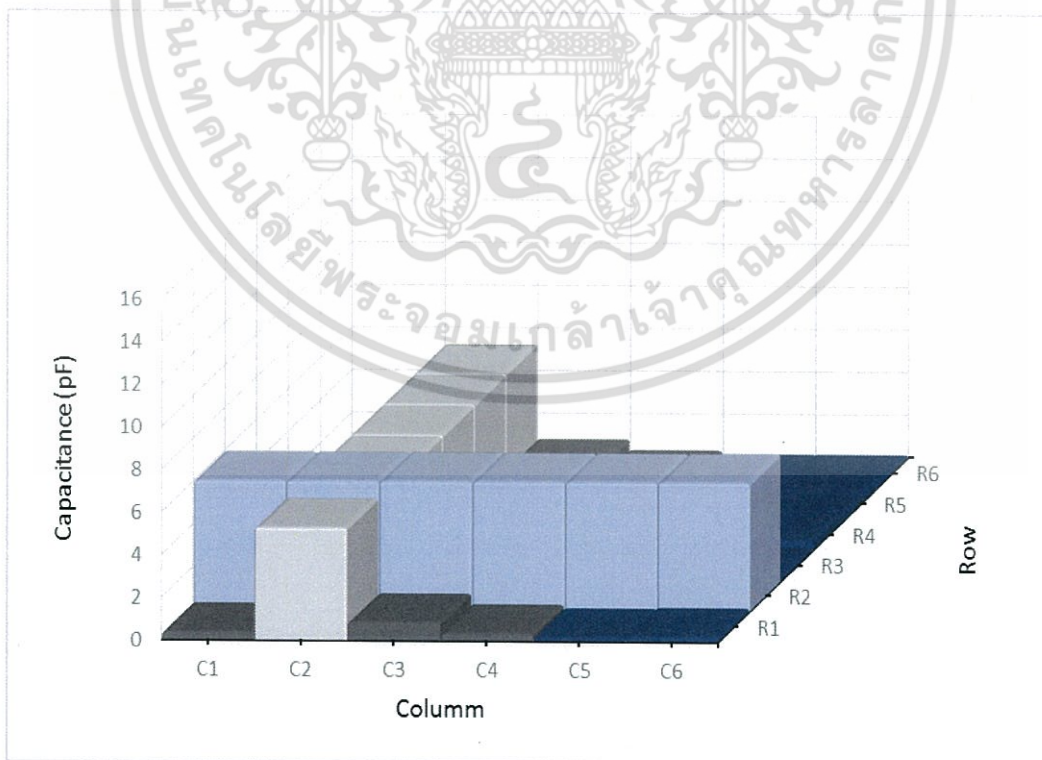


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C1R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

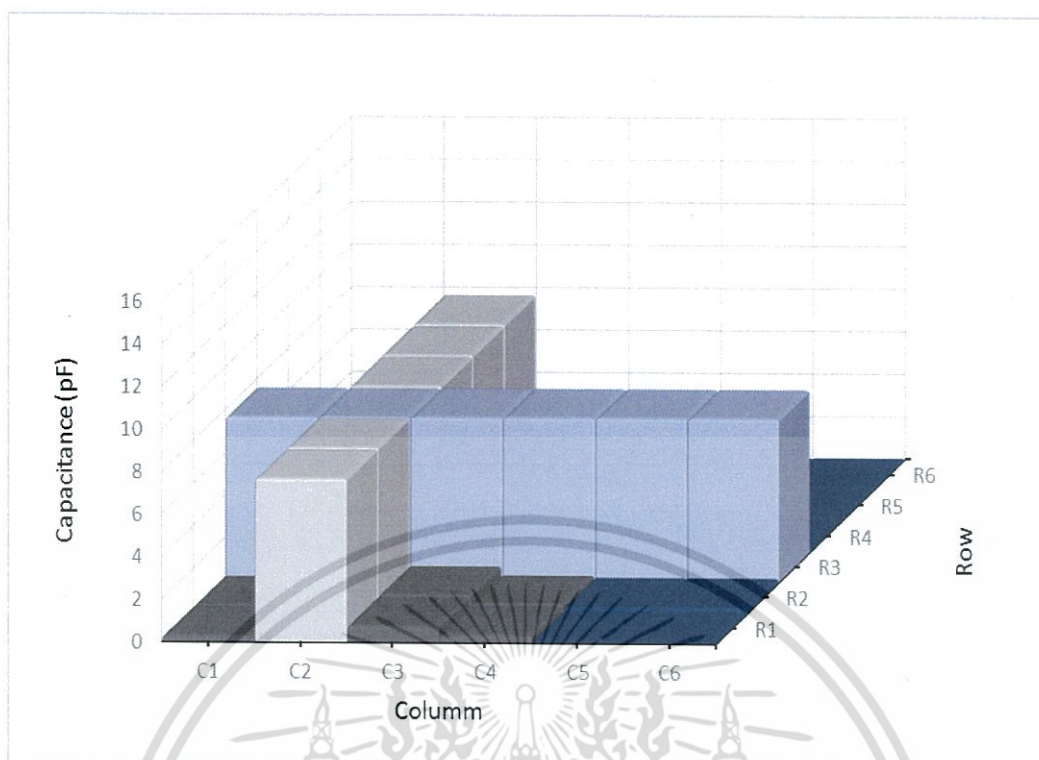


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R1

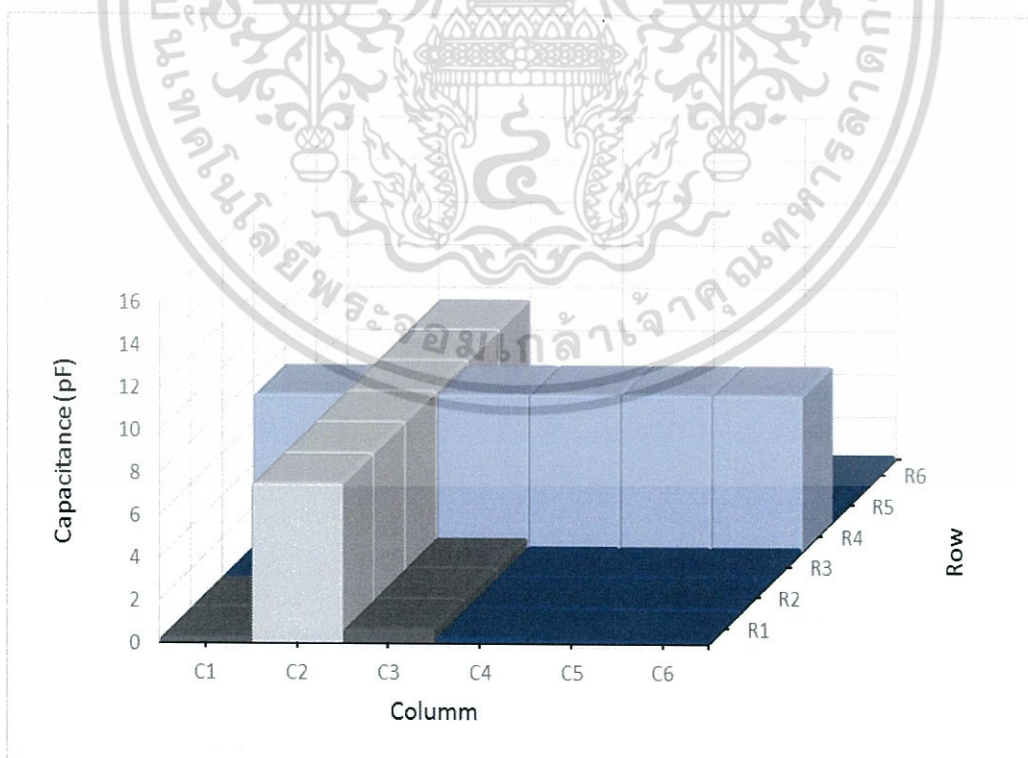


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

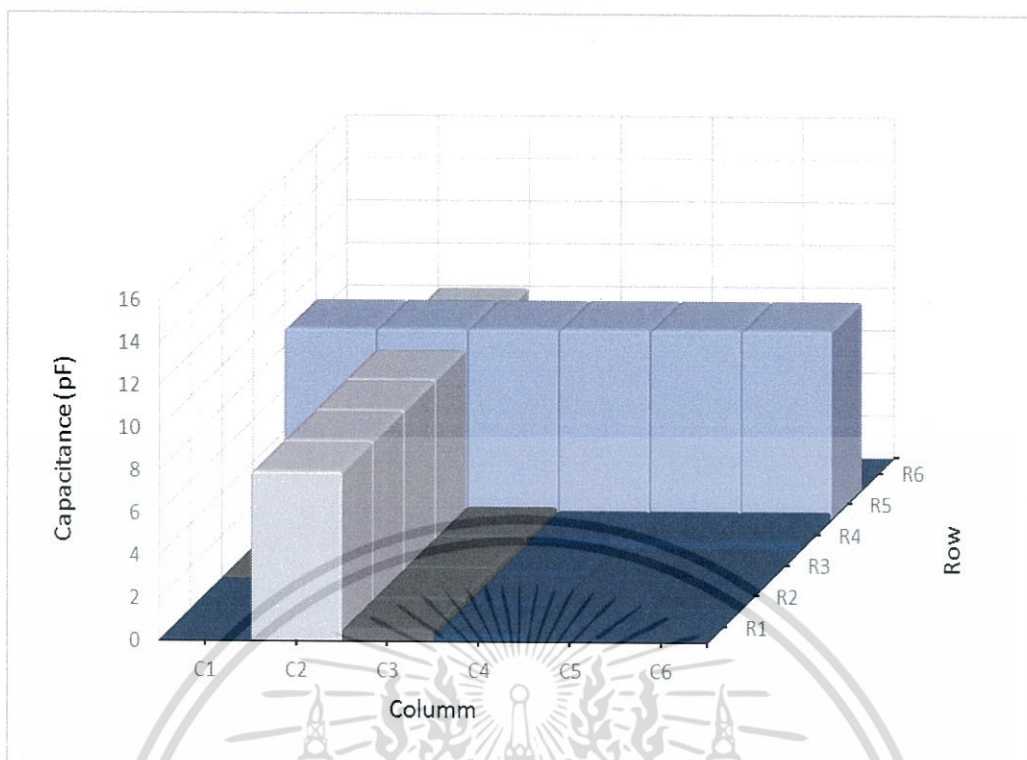


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R3

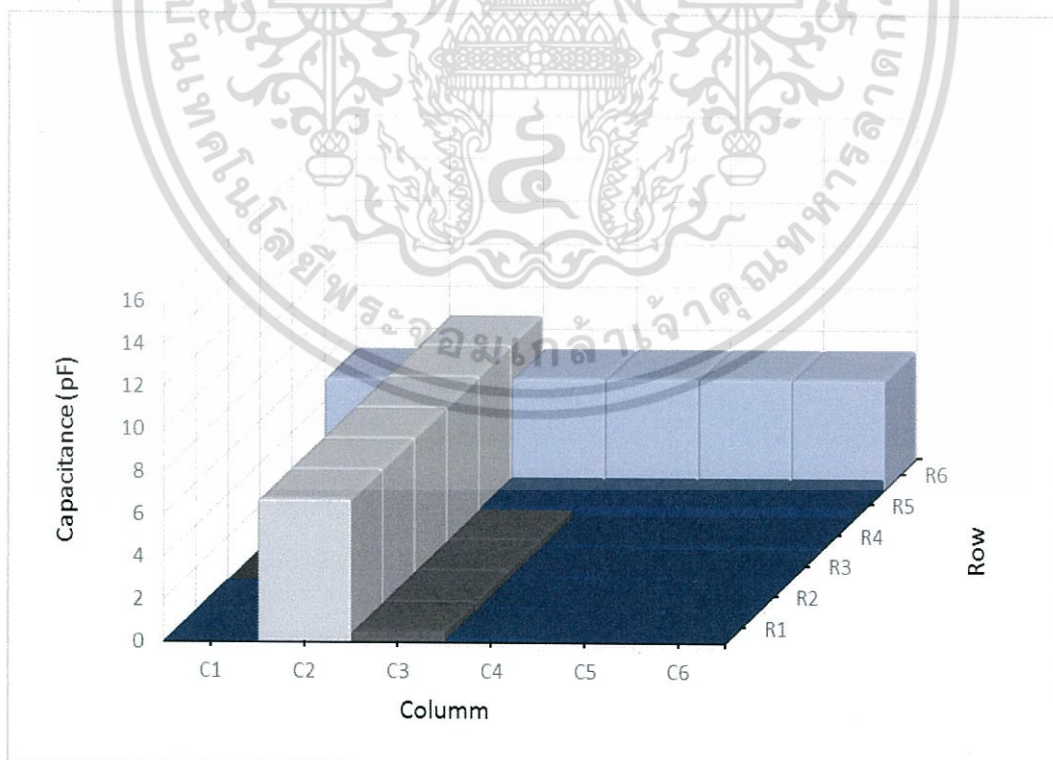


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

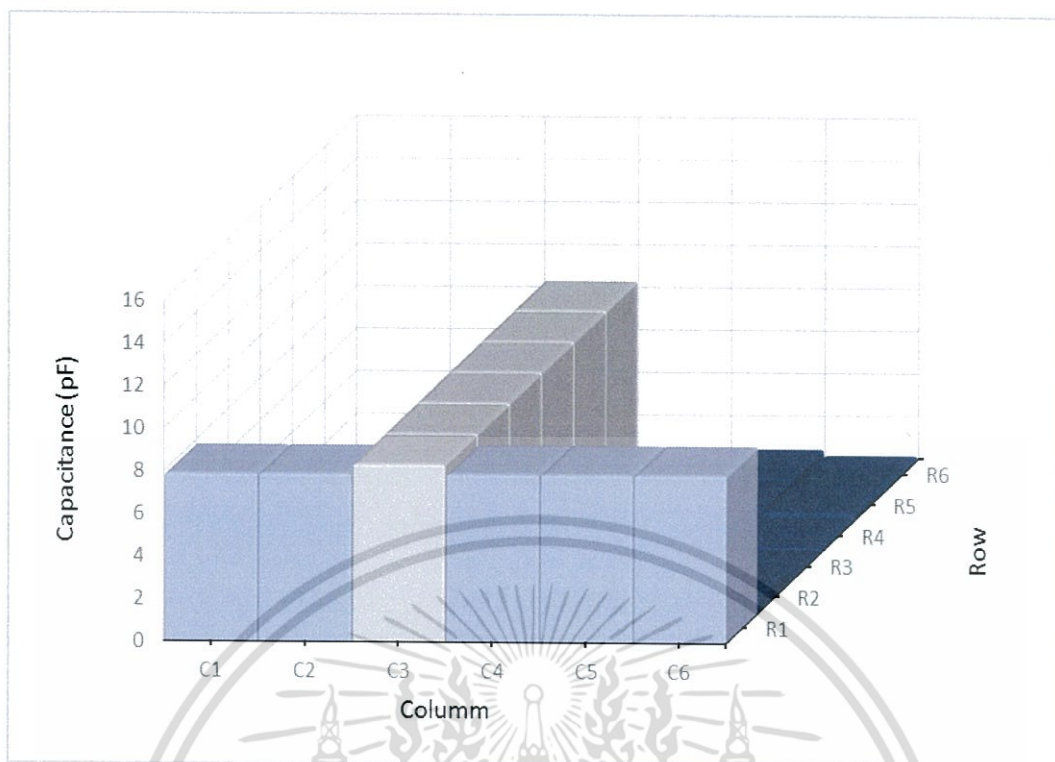


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R5

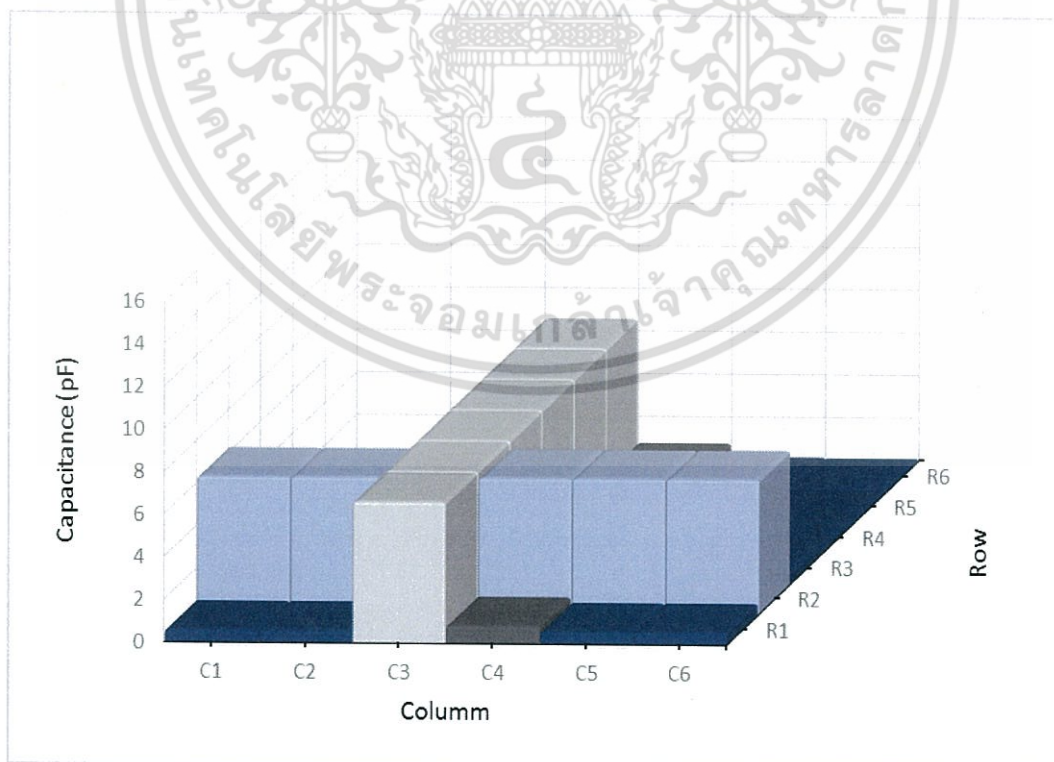


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C2R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

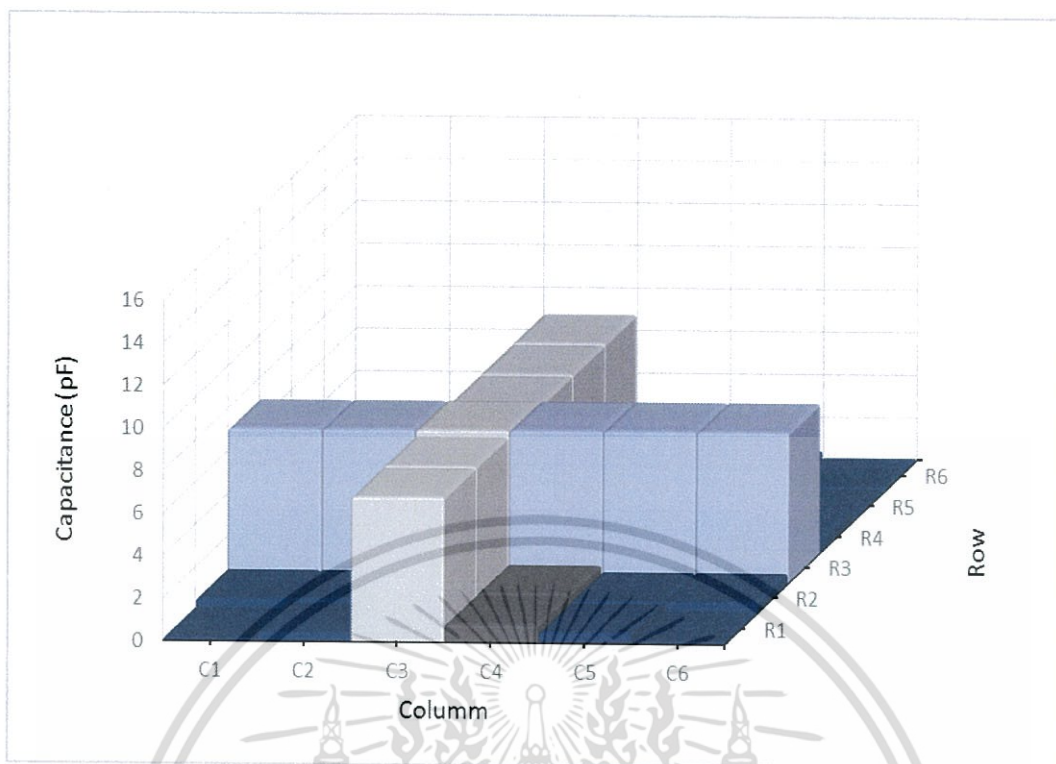


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R1

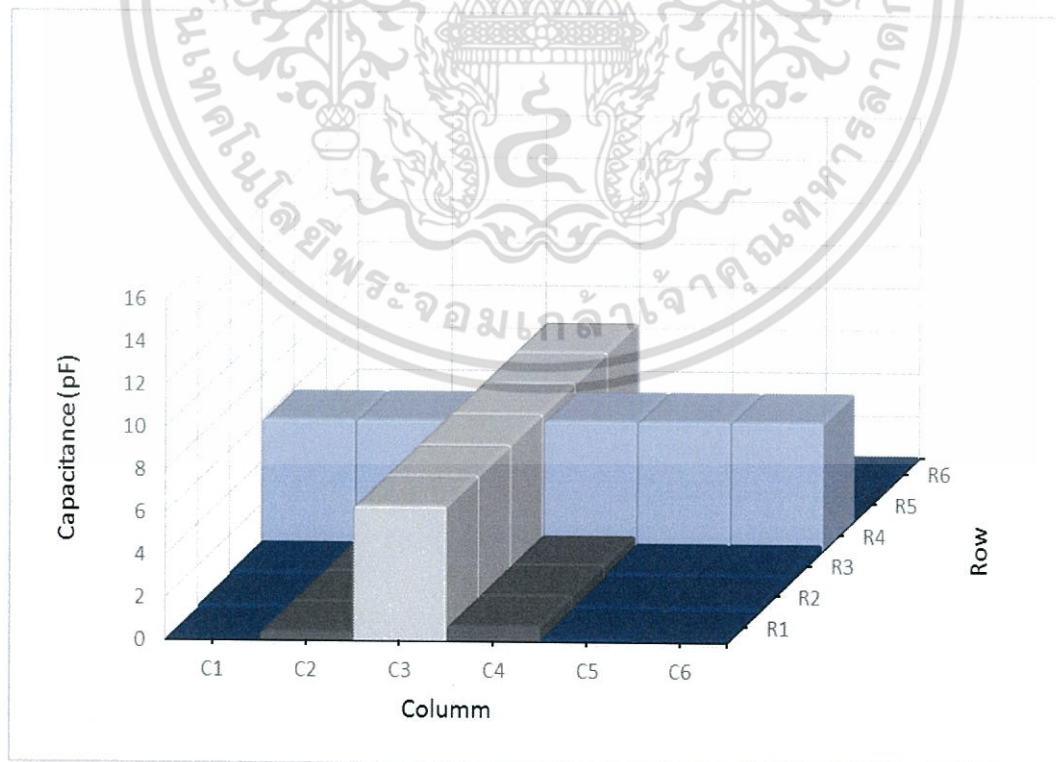


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

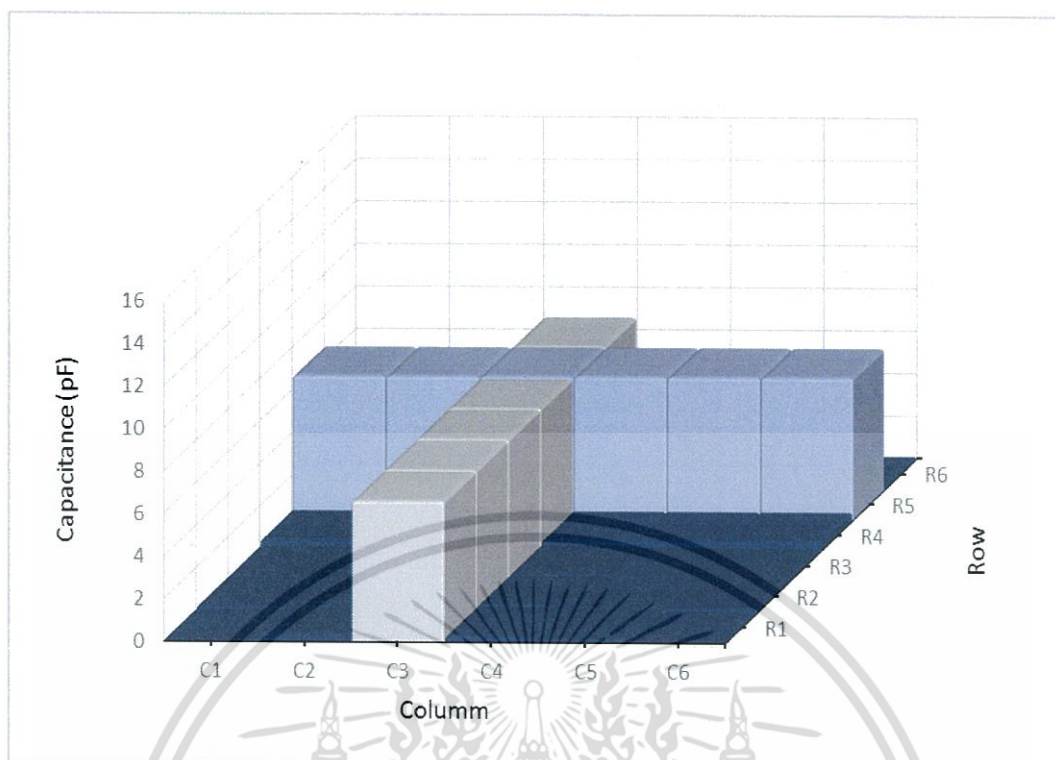


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R3

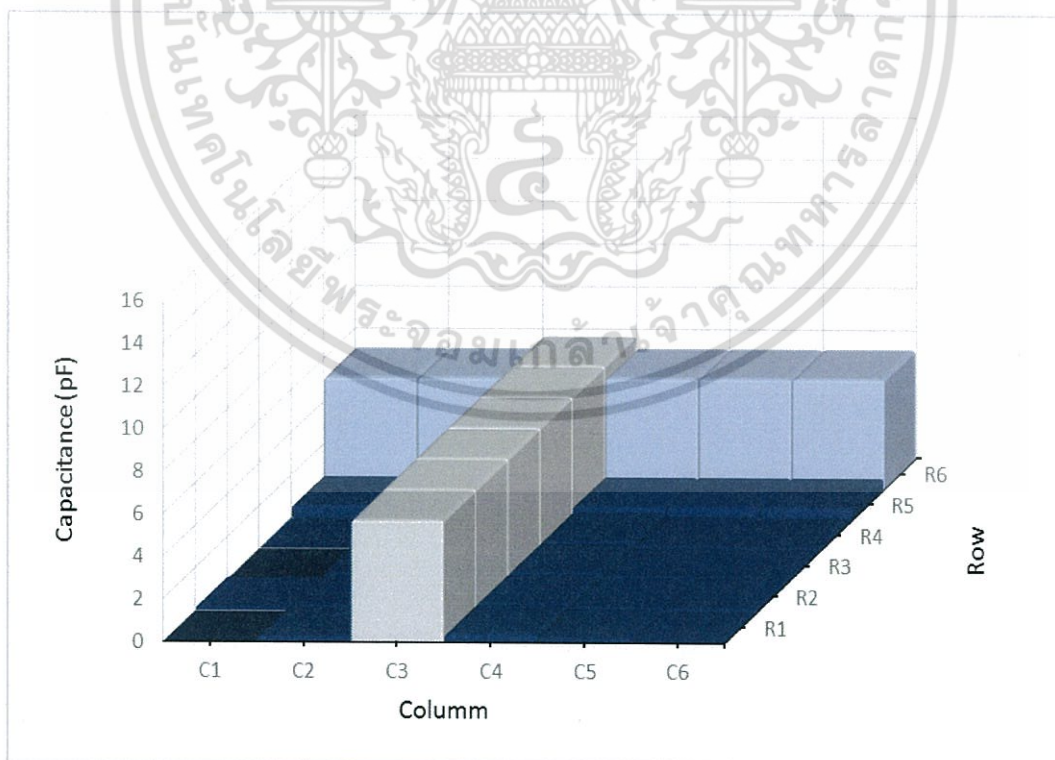


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

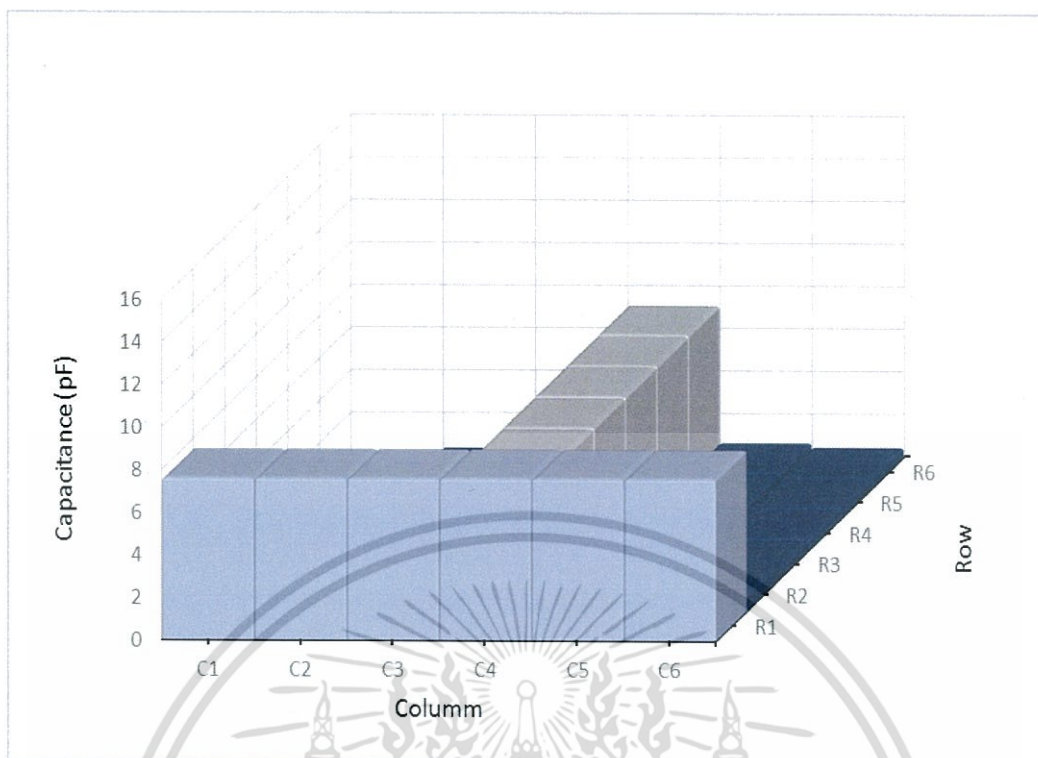


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R5

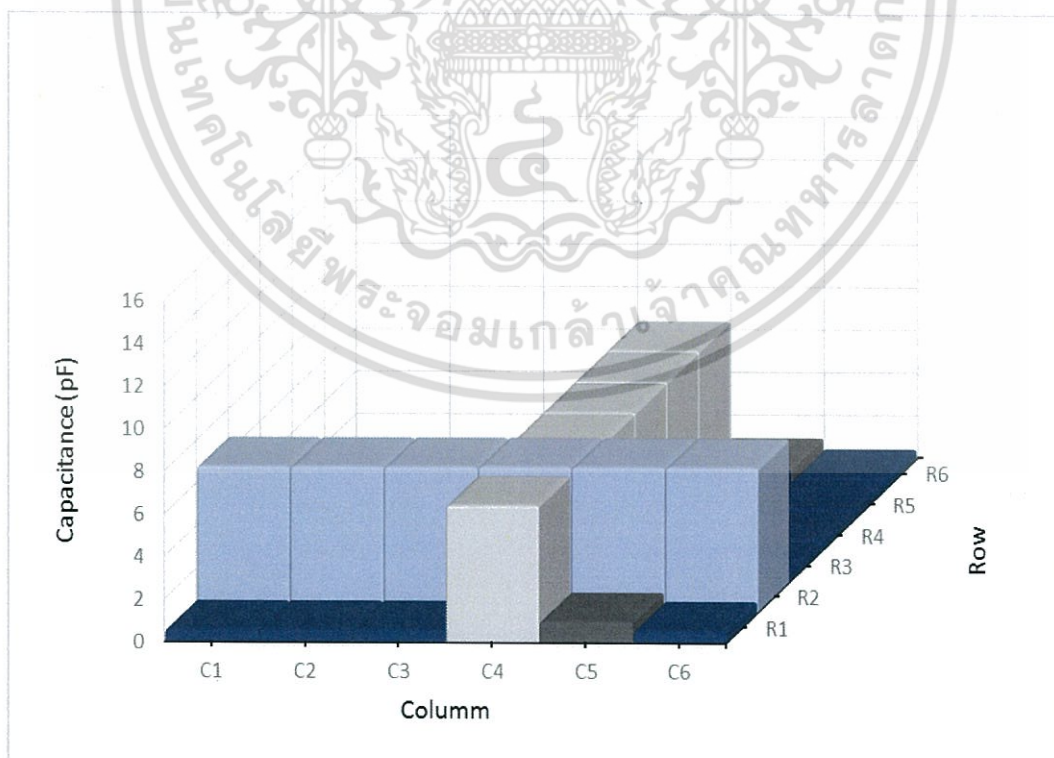


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C3R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

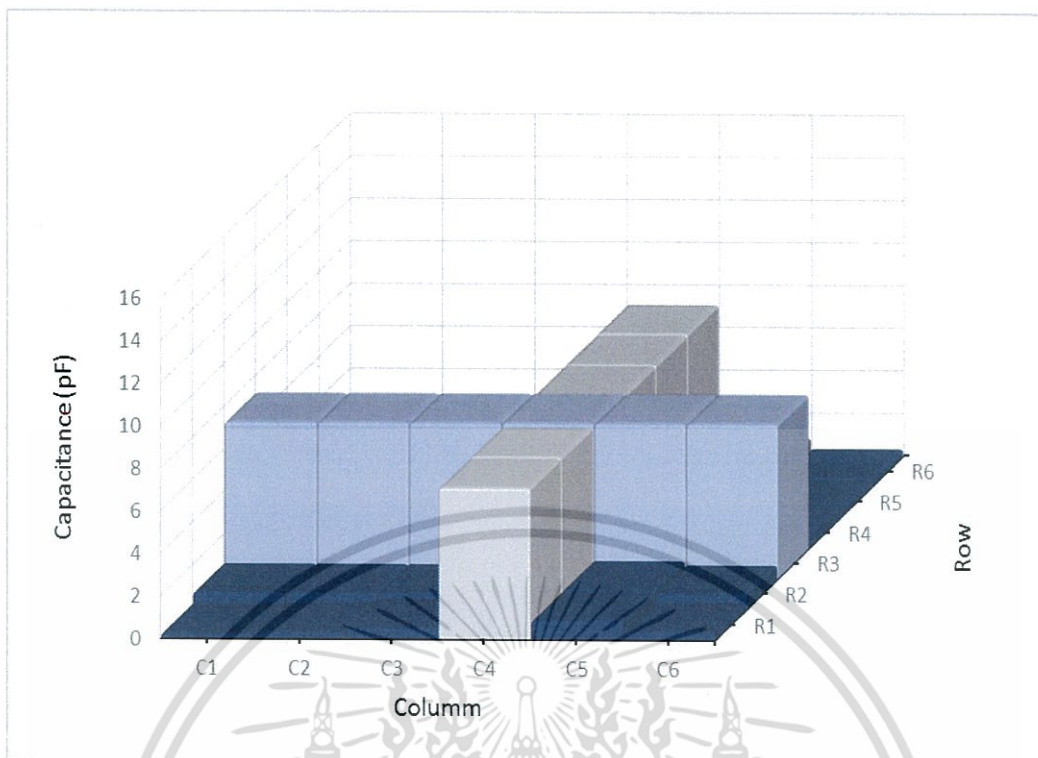


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R1

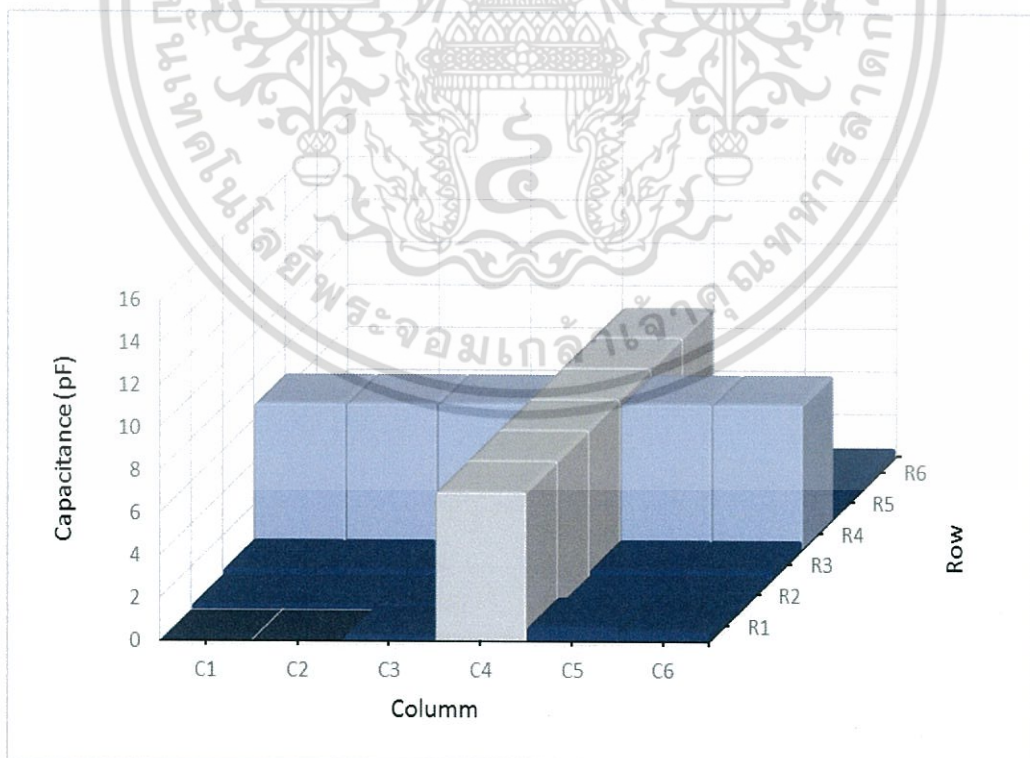


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

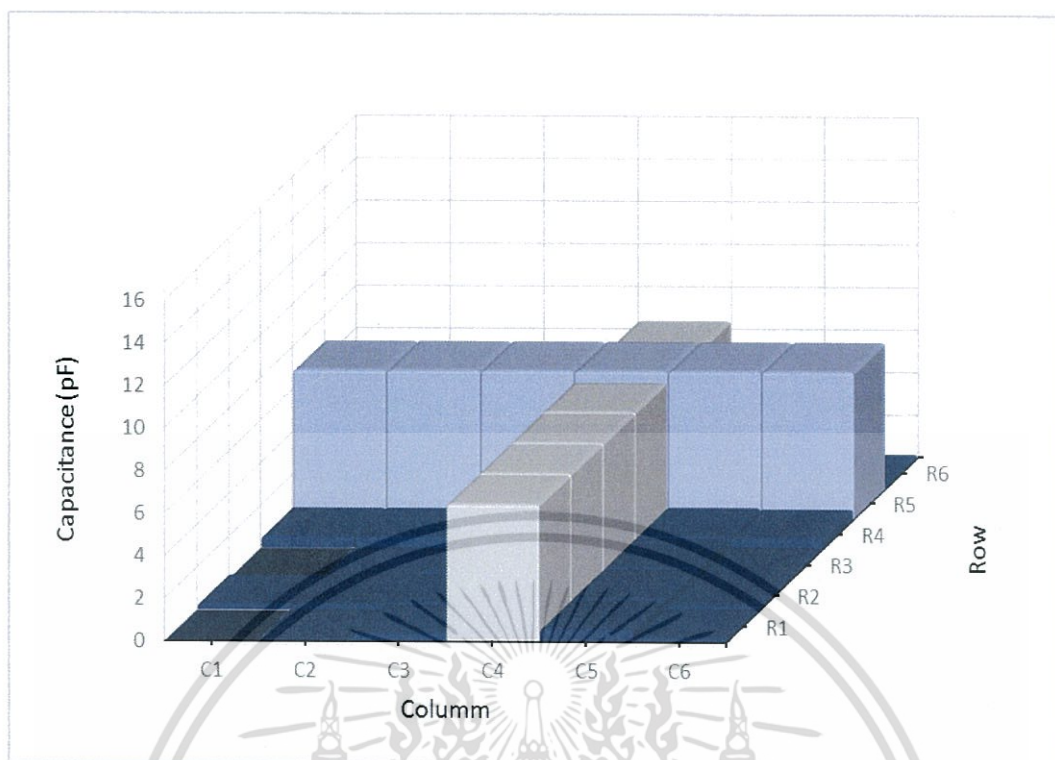


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R3

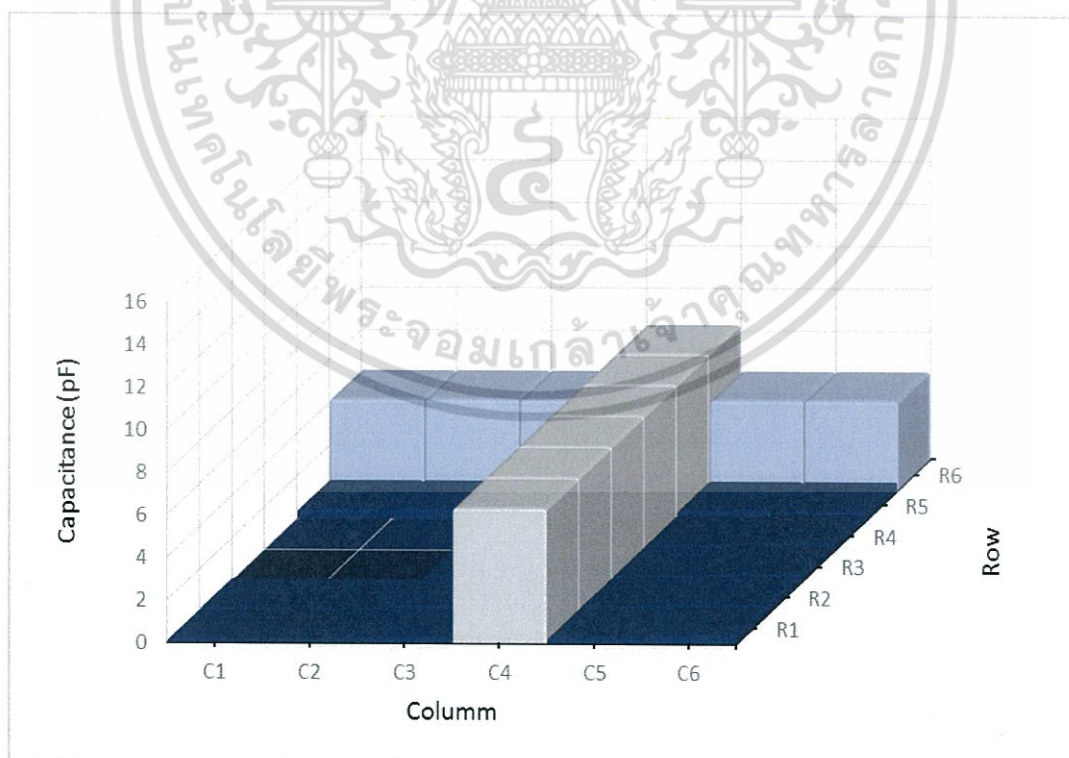


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

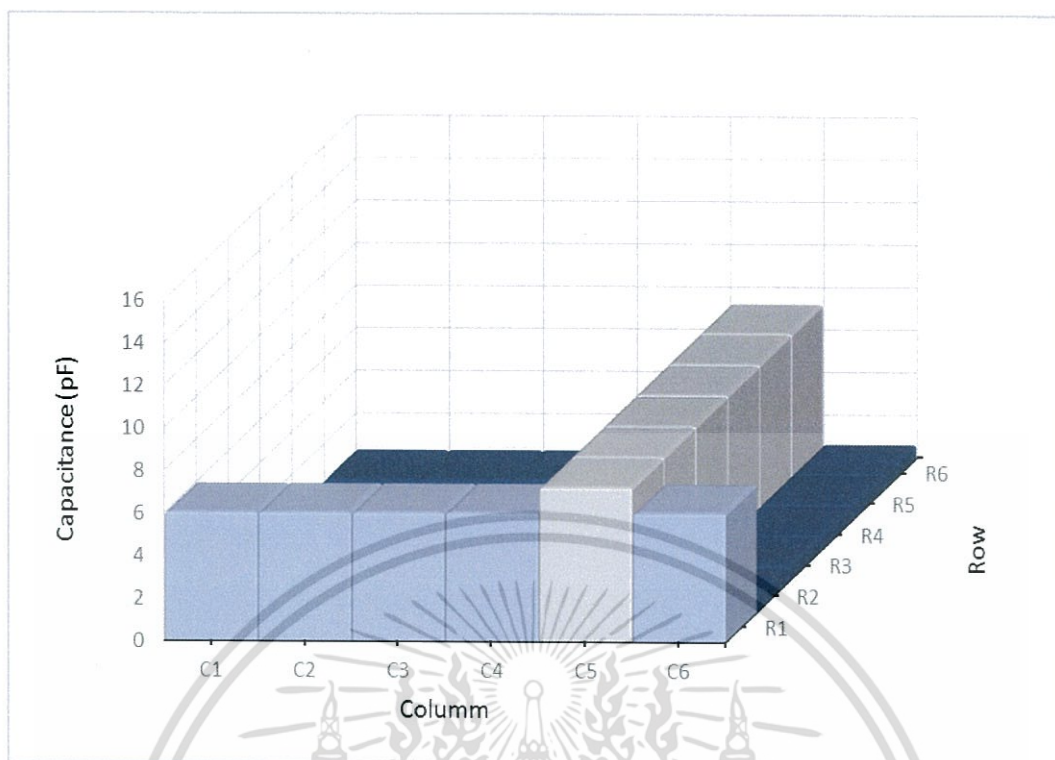


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R5

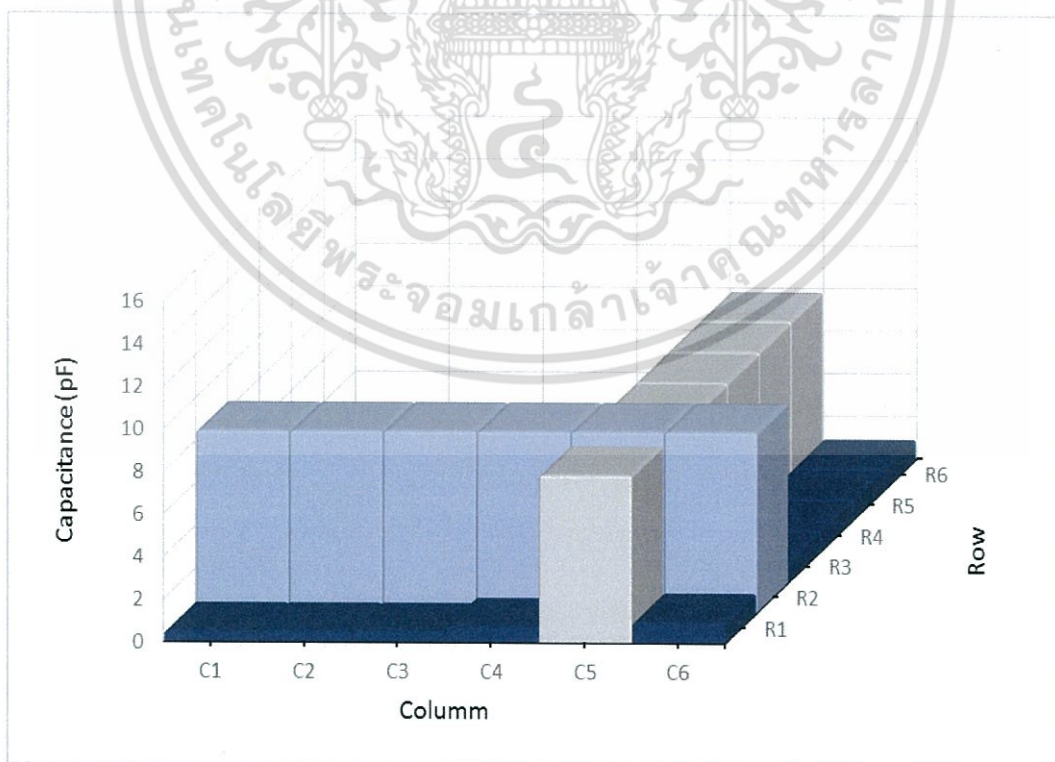


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C4R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

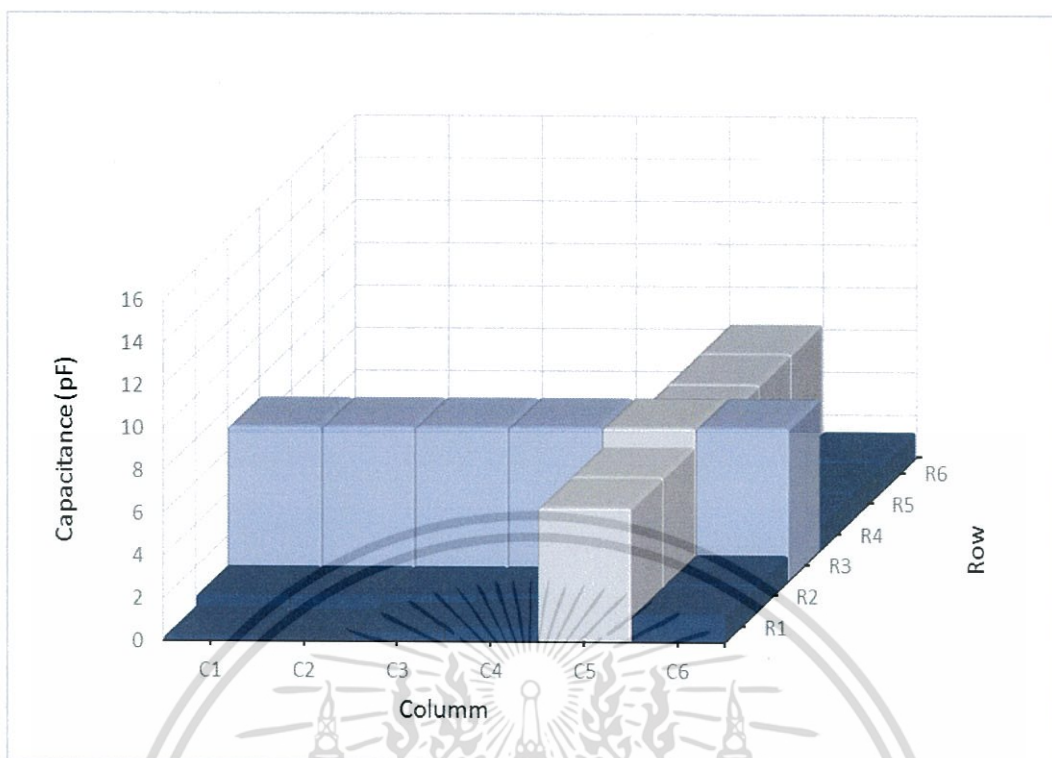


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R1

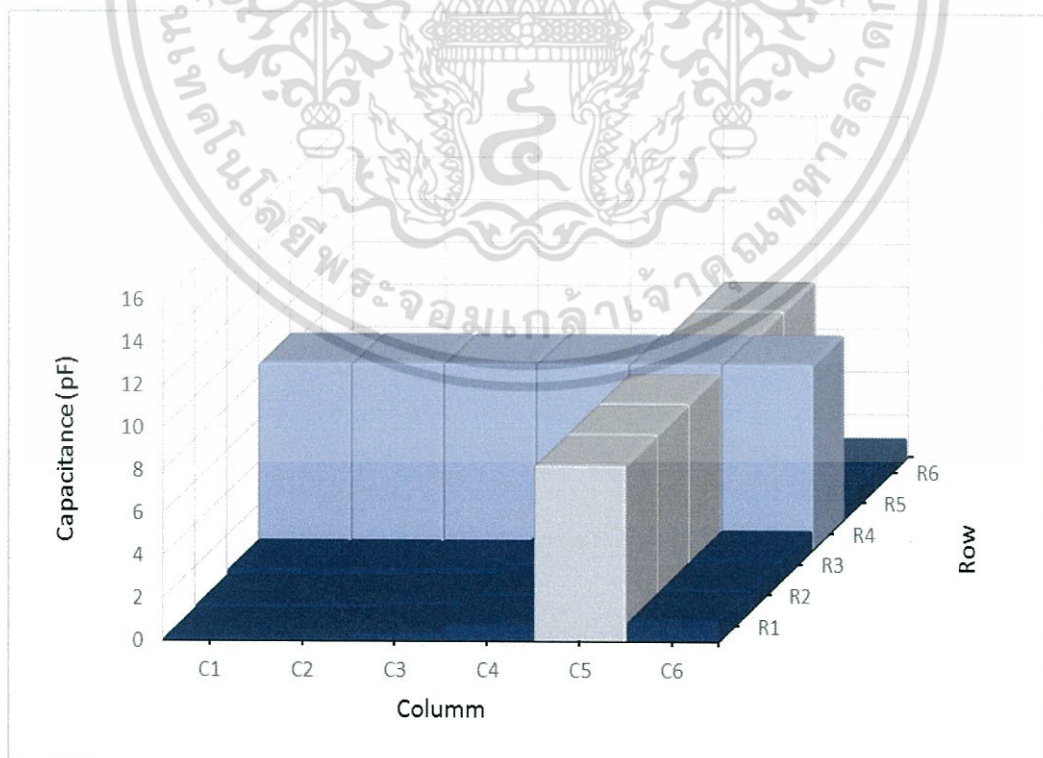


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

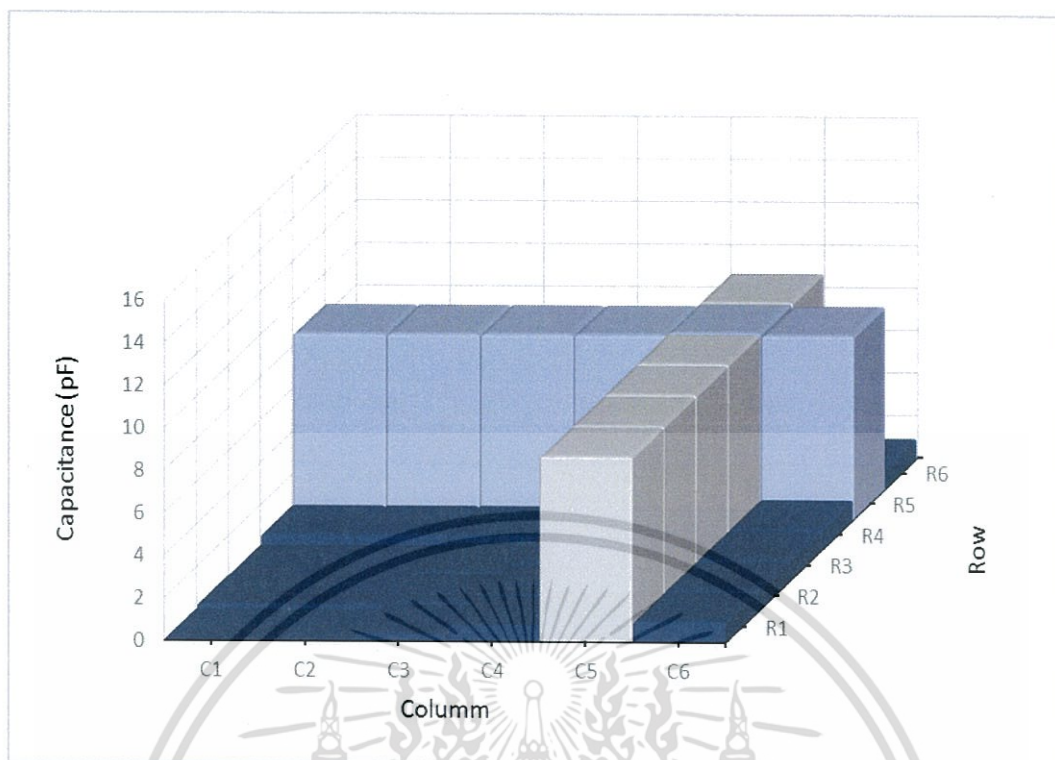


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R3

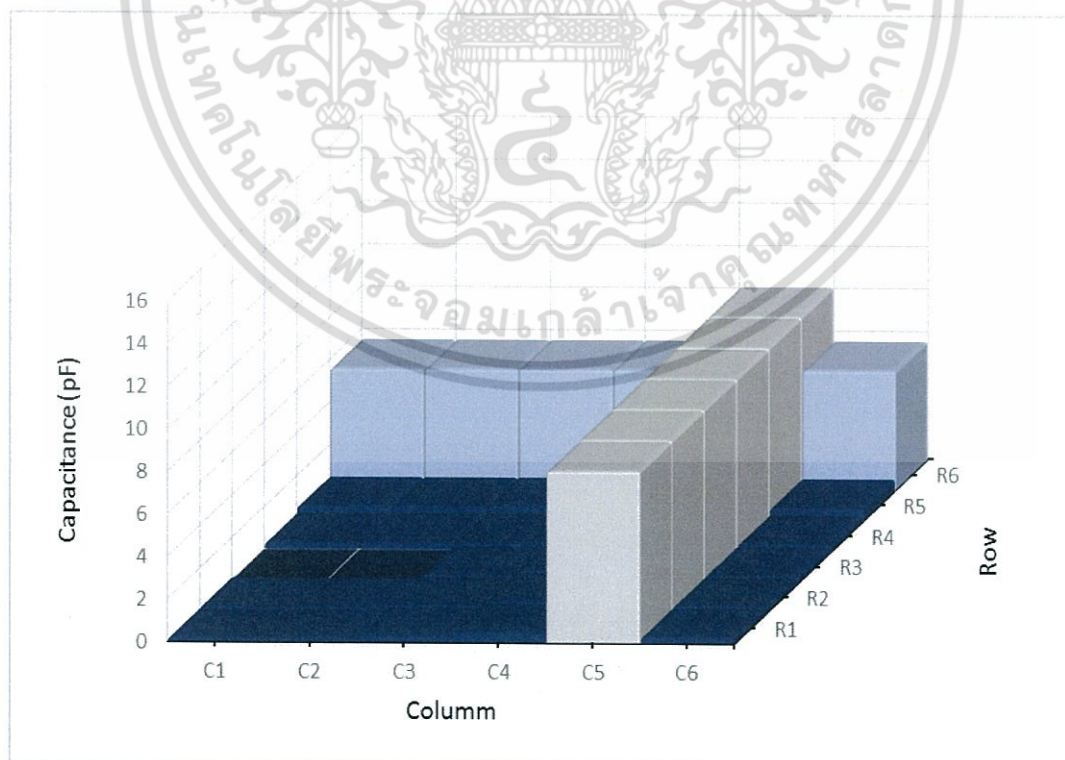


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

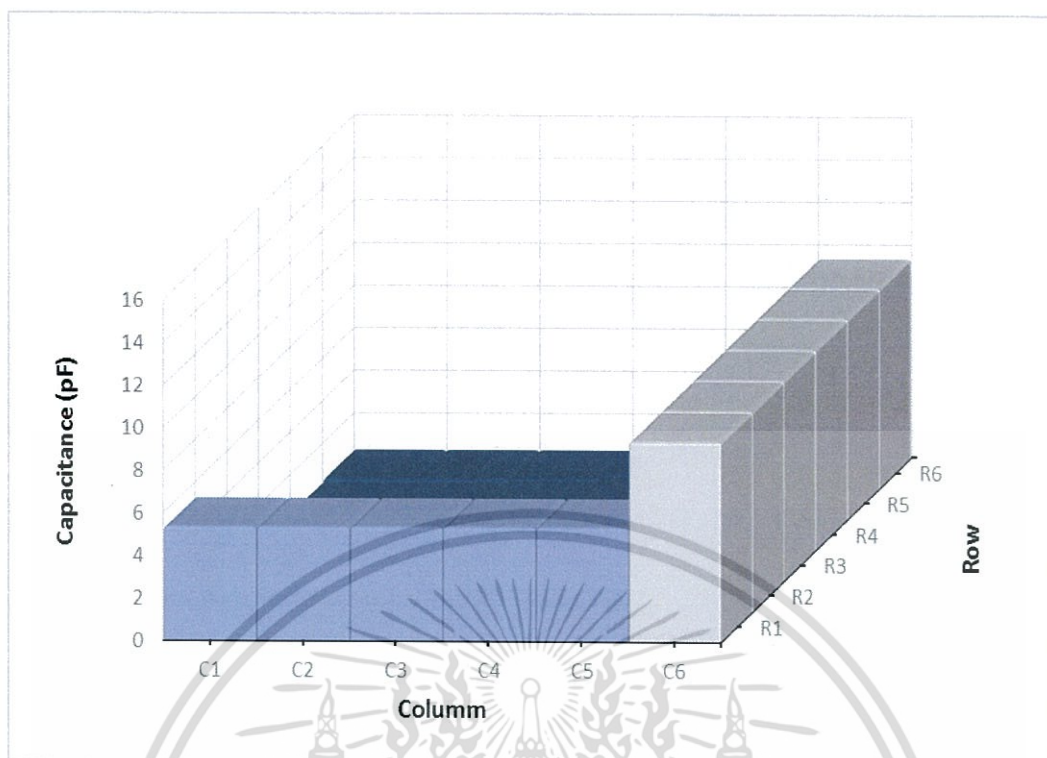


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R5

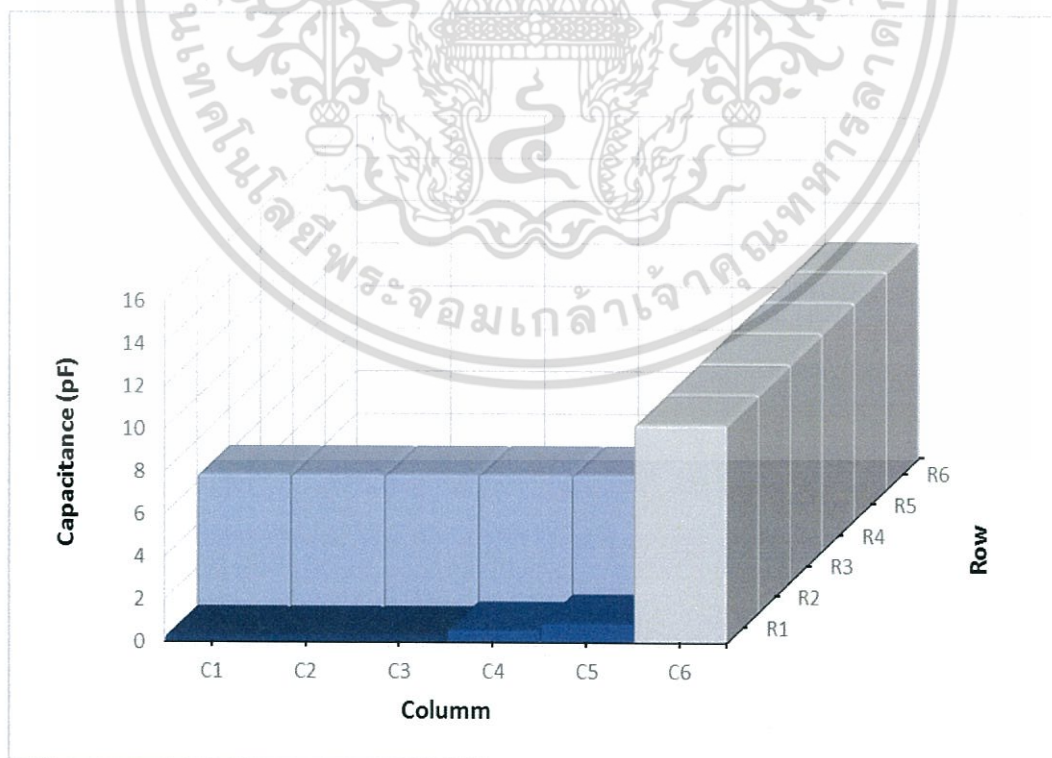


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C5R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

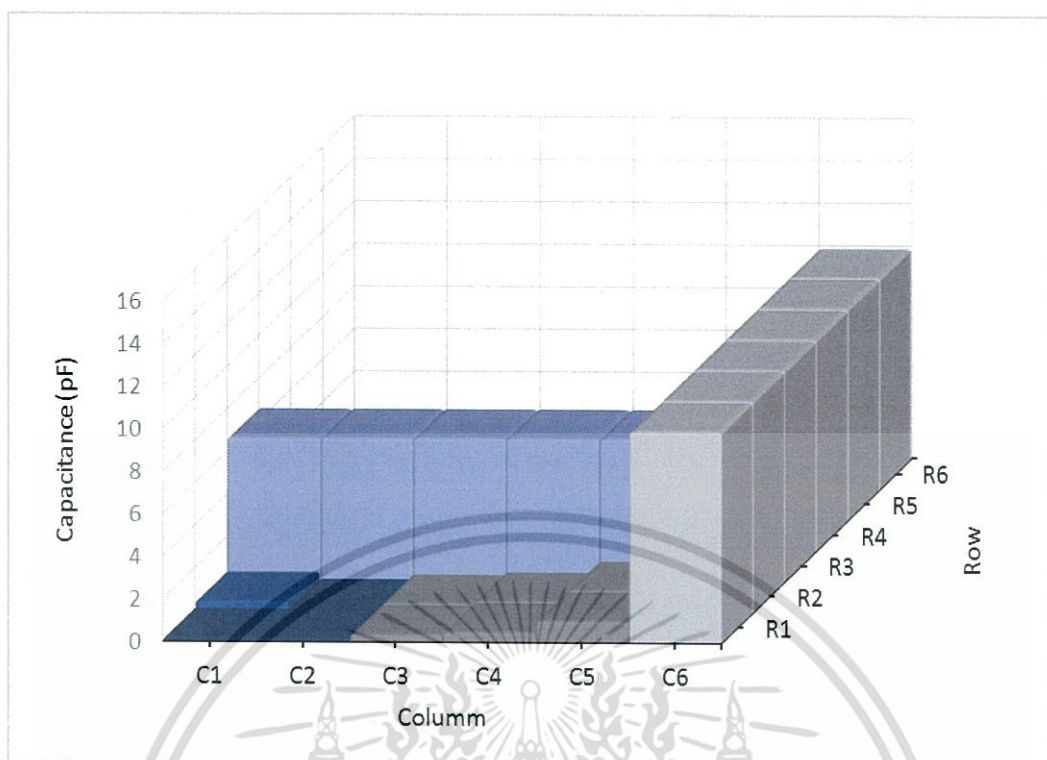


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R1

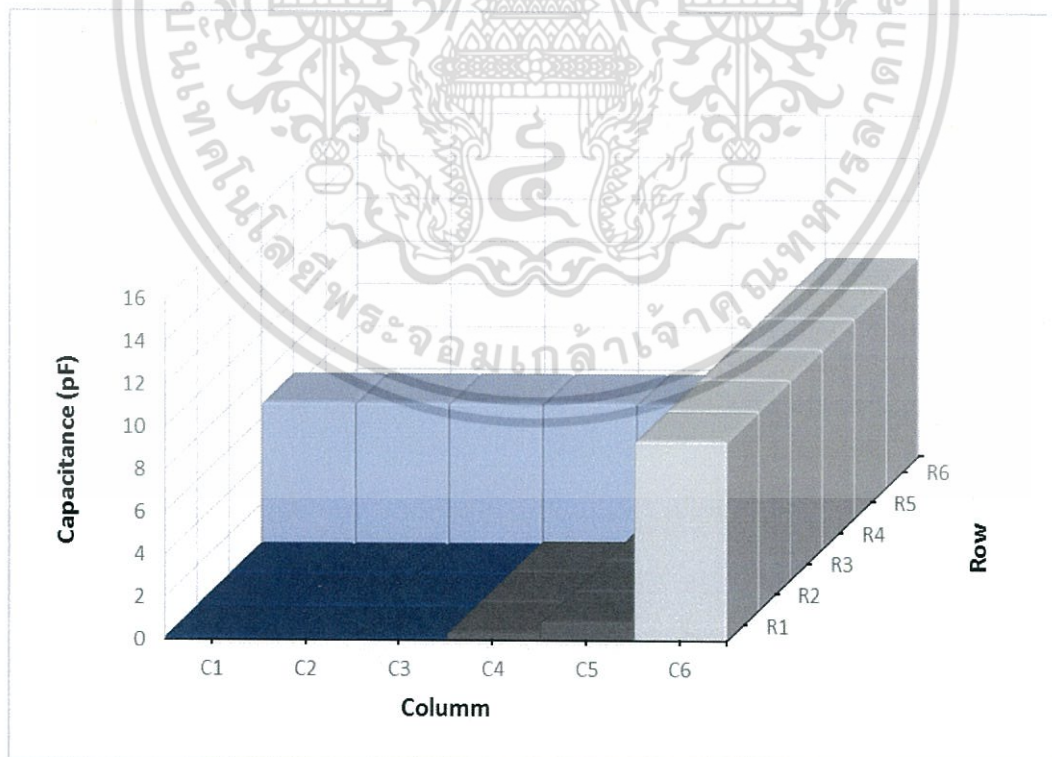


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

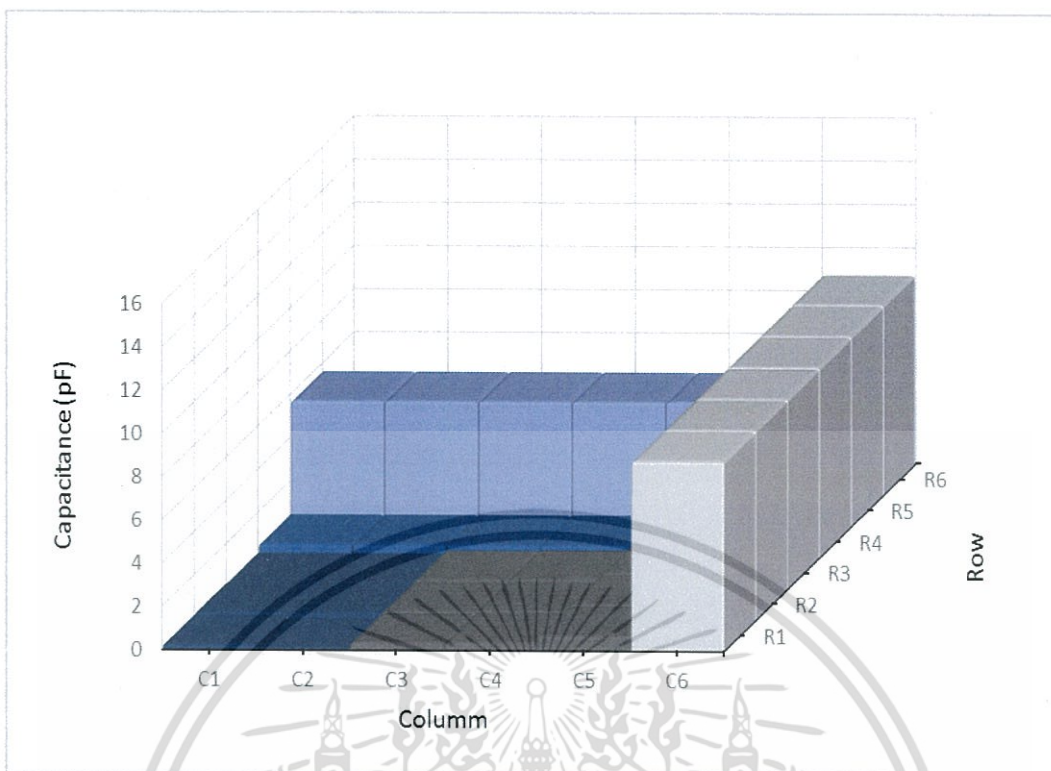


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R3

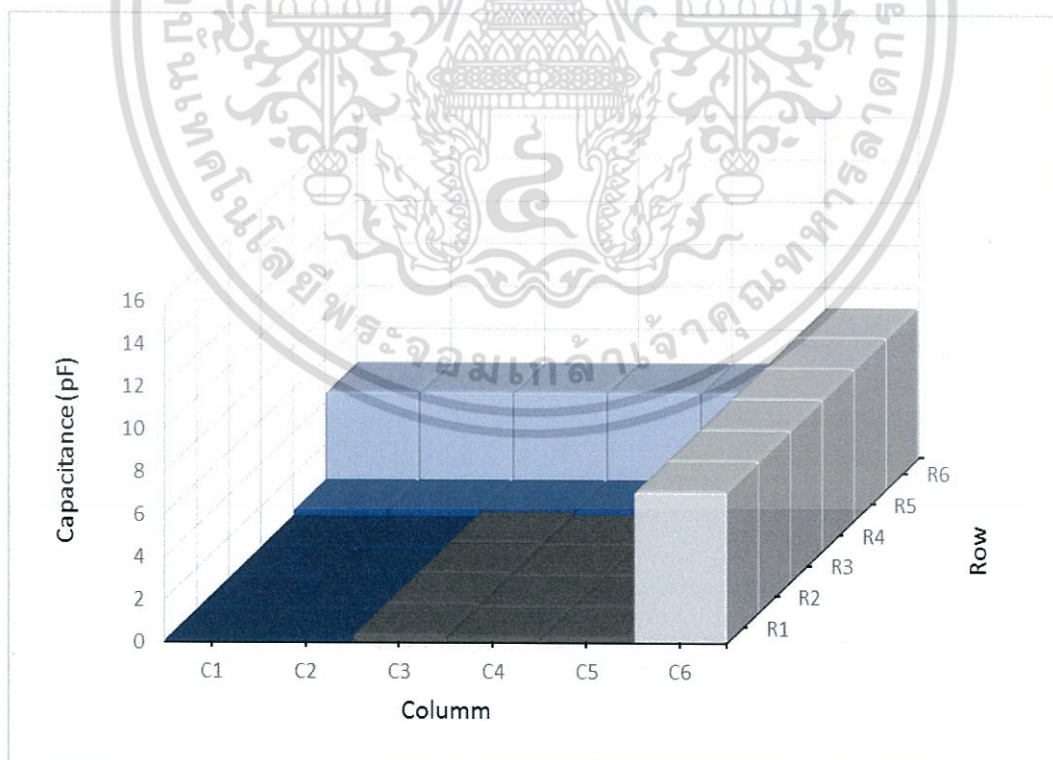


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R5



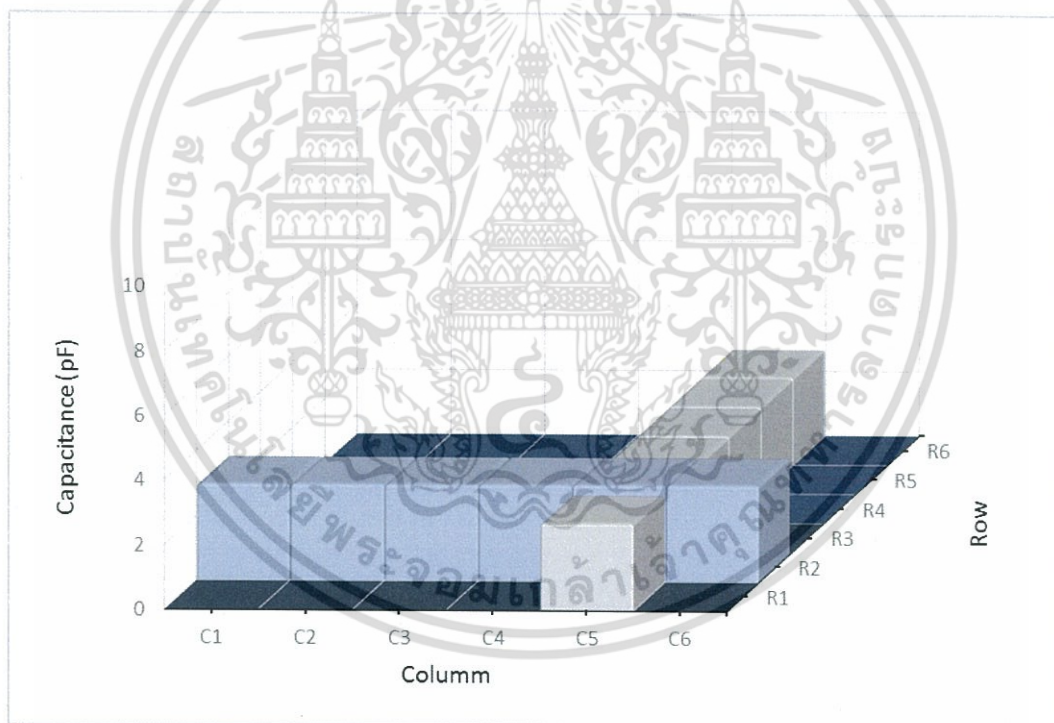
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำวัตถุวางในตำแหน่ง C6R6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในการตรวจสอบตำแหน่งทั้ง 36 ตำแหน่ง พบว่าเมื่อมีวัตถุมาสัมผัสกับคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่สร้างขึ้นในตำแหน่งใดๆ ค่าความจุไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดทั้งในแนวหลักและแนวจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น การตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุสามารถทราบได้จากการตัดกันของขั้วอิเล็กโทรดในแนวแกนหลักและแนว ของขั้วอิเล็กโทรดที่มีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

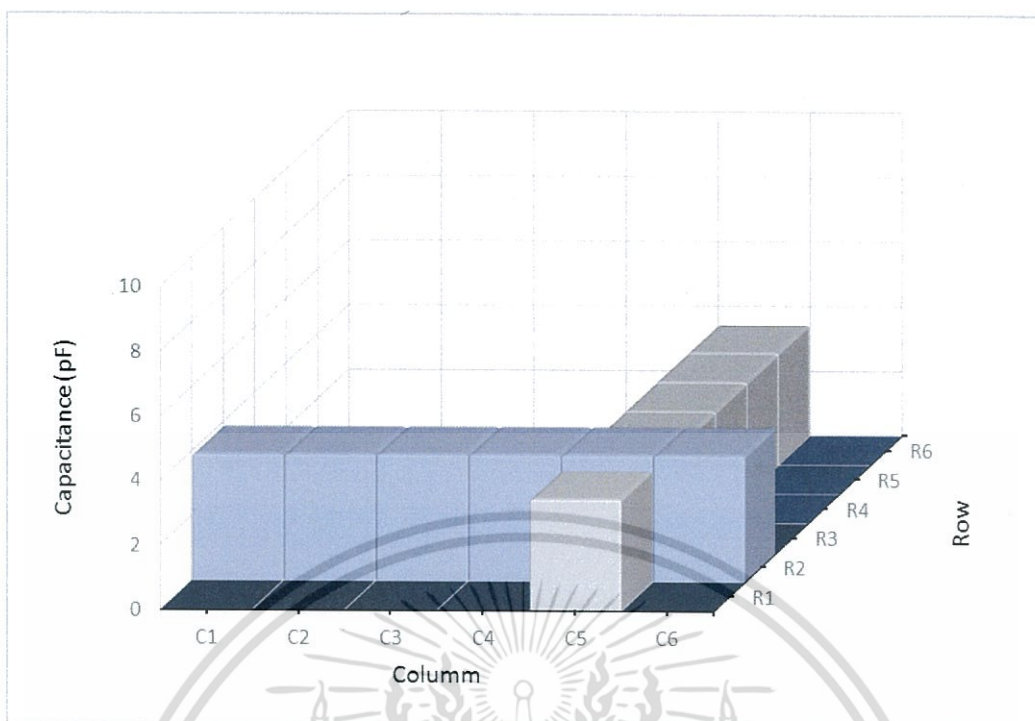
4.2 ผลจากการศึกษาการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของของเหลว

จากการศึกษาการเปลี่ยนชนิดของของเหลวภายในขวดแก้ว ที่มีพื้นที่ของกันขวด 1.33 ตารางเซนติเมตร และมีปริมาตร 5 มิลลิลิตร ซึ่งของเหลวที่เลือกใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย น้ำมันพืช น้ำเปล่า นม น้ำอัดลม และเลือกใช้ขวดเปล่าที่ไม่มีของเหลวอยู่ในขวดแก้ว ในการทดลองจะวางขวดแก้วไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันคือ ตำแหน่งหลักที่ 5 ตัดกับแถวที่ 2 โดยผลการทดลองจะแสดงเป็นกราฟได้ดังรูป

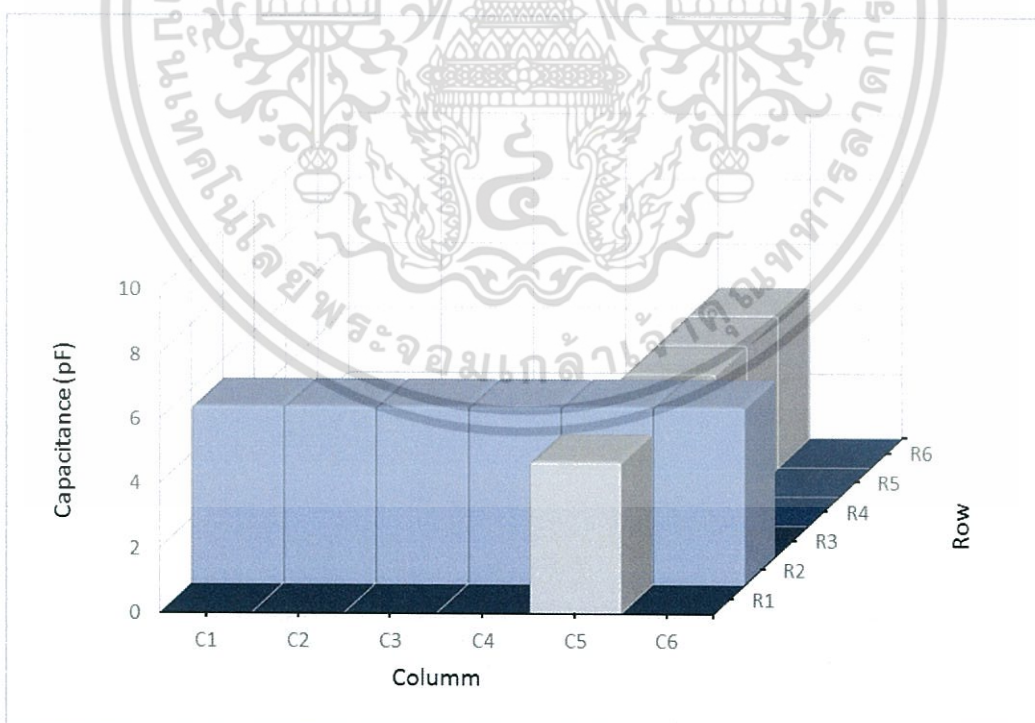


รูปที่ 4.39 รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขวดแก้วเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

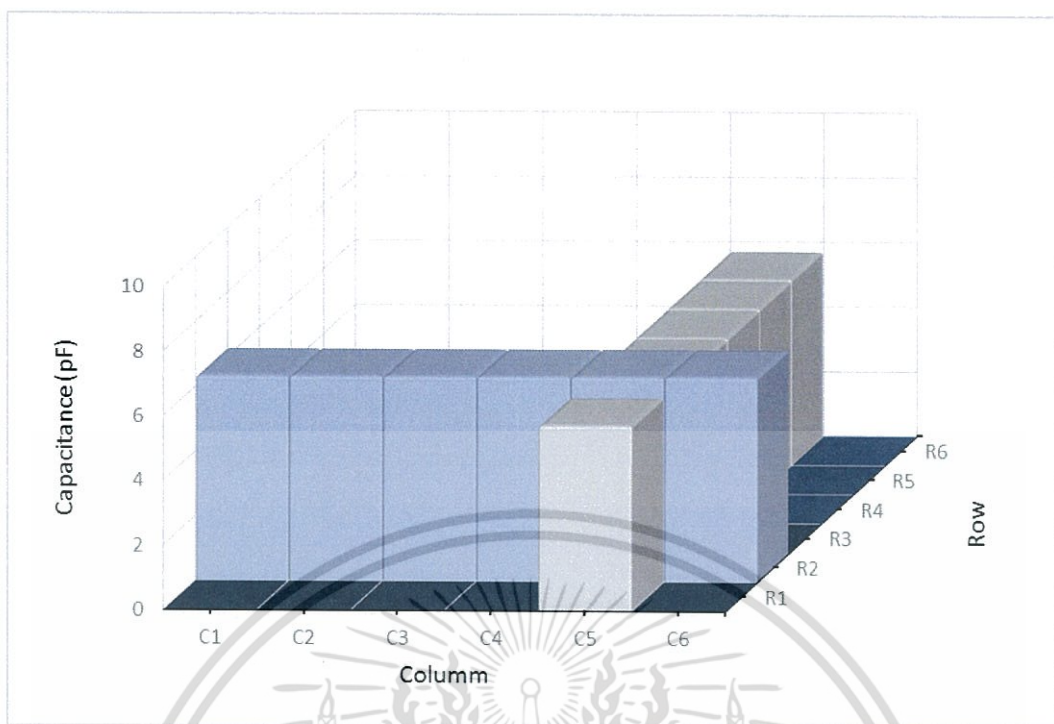


รูปที่ 4.40 รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแก้วที่ภายในบรรจุน้ำมันพืช

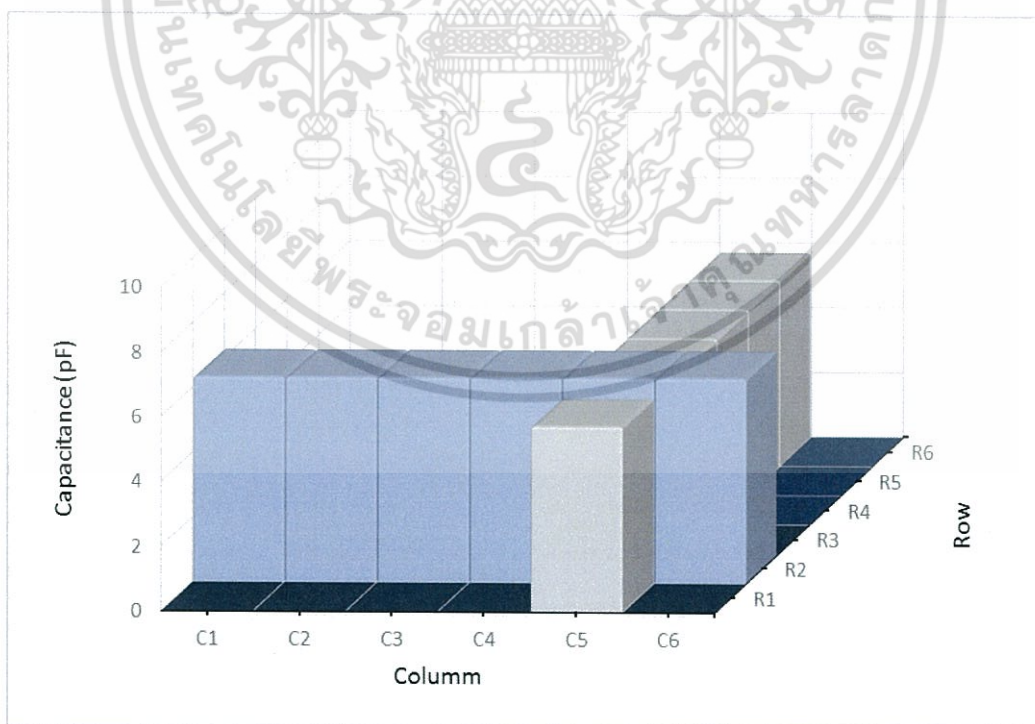


รูปที่ 4.41 รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจากขดแก้วที่ภายในบรรจุนม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจาก
ขดแก้วที่ภายในบรรจุน้ำเปล่า



รูปที่ 4.43 รูปภาพแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการสัมผัสจาก
ขดแก้วที่ภายในบรรจุน้ำอัดลม

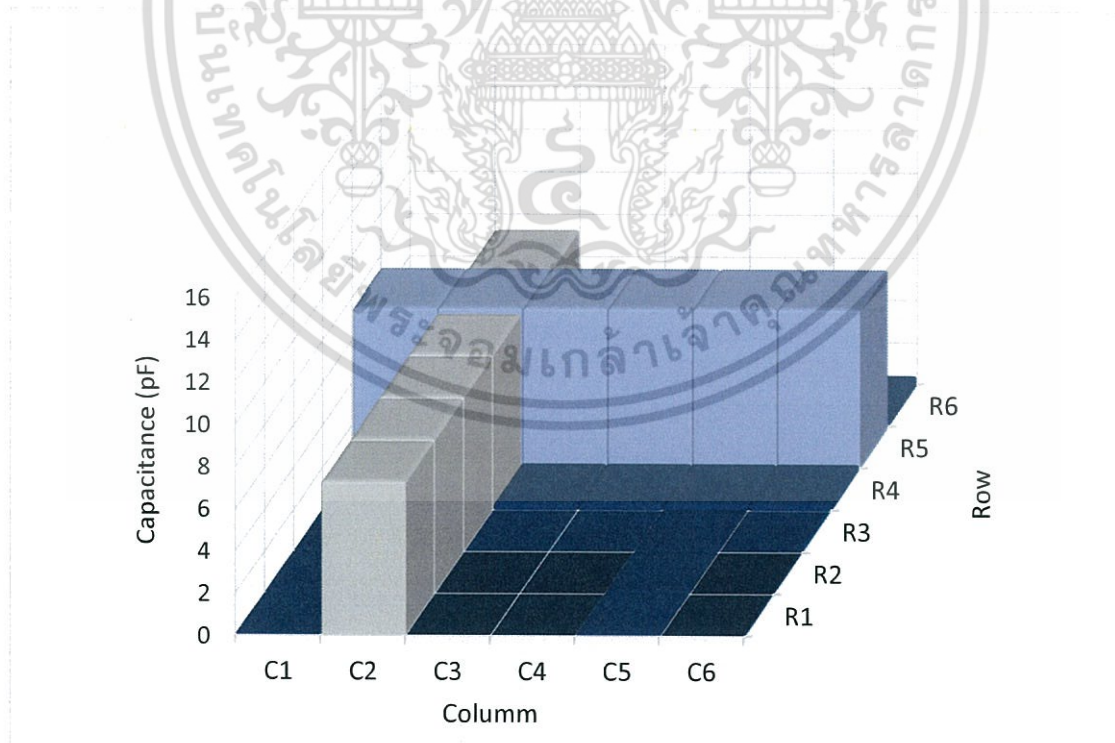
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการนำขดแก้วที่ภายในบรรจุด้วยของเหลวชนิดต่างๆมาเปรียบเทียบกับแล้ว พบว่าความสูงของกราฟที่แตกต่างกันหรือมีค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่บอกว่า สารแต่ละชนิดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่เท่ากัน ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้ ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงค่าความจุไฟฟ้าก็จะมีค่ามากขึ้น ตรงกันข้ามหากค่าความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำ ก็หมายความว่าสารชนิดนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่น้อยกว่า

4.3 ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของวัตถุ

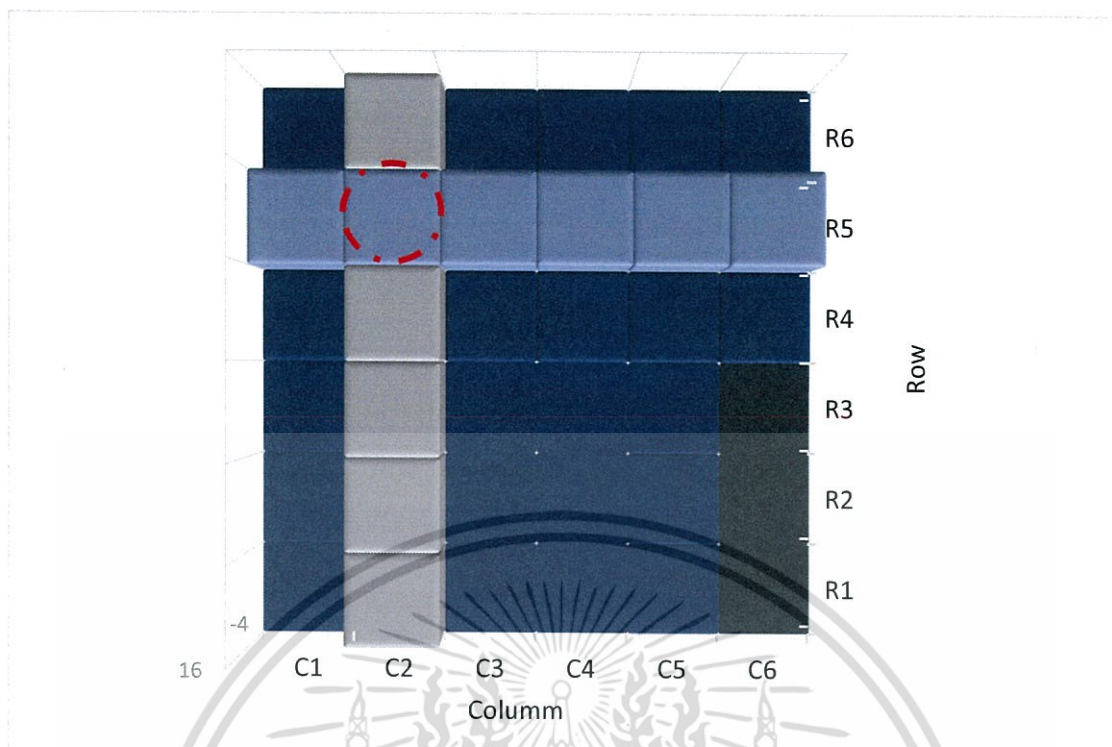
ในการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการนำวัตถุที่มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของวัตถุที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 ขนาด โดยวัตถุที่เลือกใช้คือขดแก้ว การวัดขนาดของขดจะวัดพื้นที่บริเวณก้นขดซึ่งมีพื้นที่ 1.33 ตารางเซนติเมตร 3.14 ตารางเซนติเมตร 7.07 ตารางเซนติเมตร และ 12.57 ตารางเซนติเมตร และภายในขดแก้วนั้นบรรจุน้ำเปล่า มาสัมผัสกับคาปาซิทิฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 6x6 ที่สร้างขึ้น โดยบริเวณที่วางวัตถุจะวางที่ C2R5 โดยผลจากการทดลองจะแสดงดังรูปภาพด้านล่าง

4.3.1 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขดแก้วที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 0.65 เซนติเมตร มาวางบนคาปาซิทิฟเซ็นเซอร์



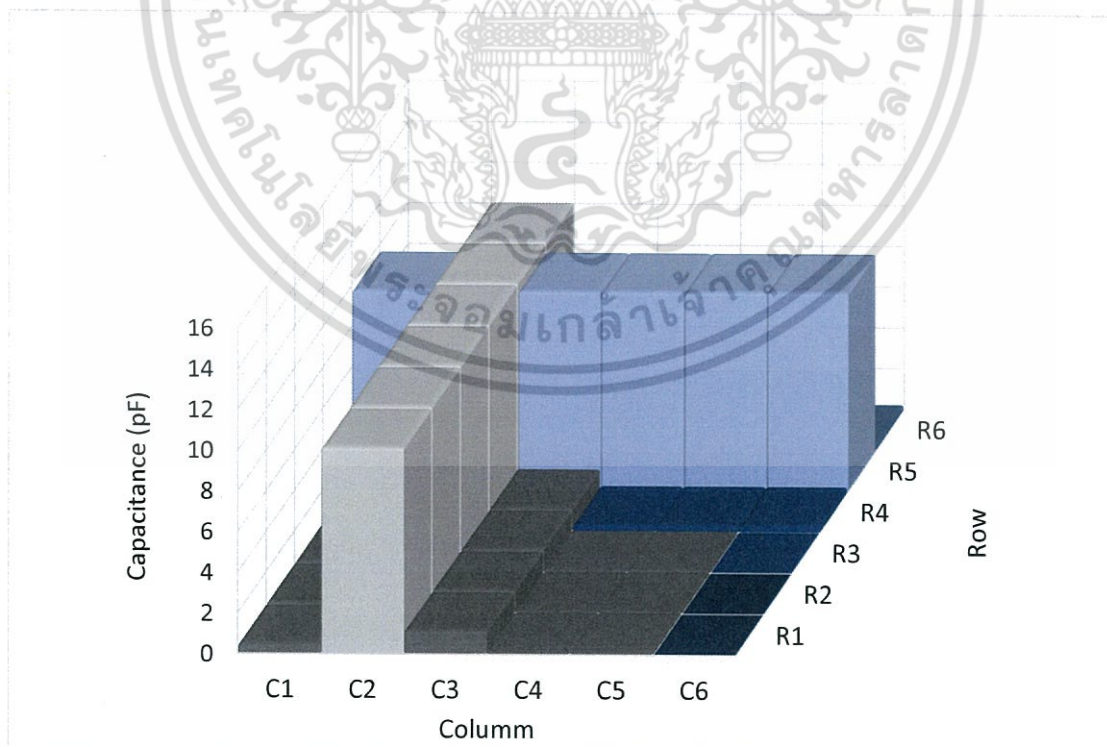
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแก้วที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 0.65 เซนติเมตรมาสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



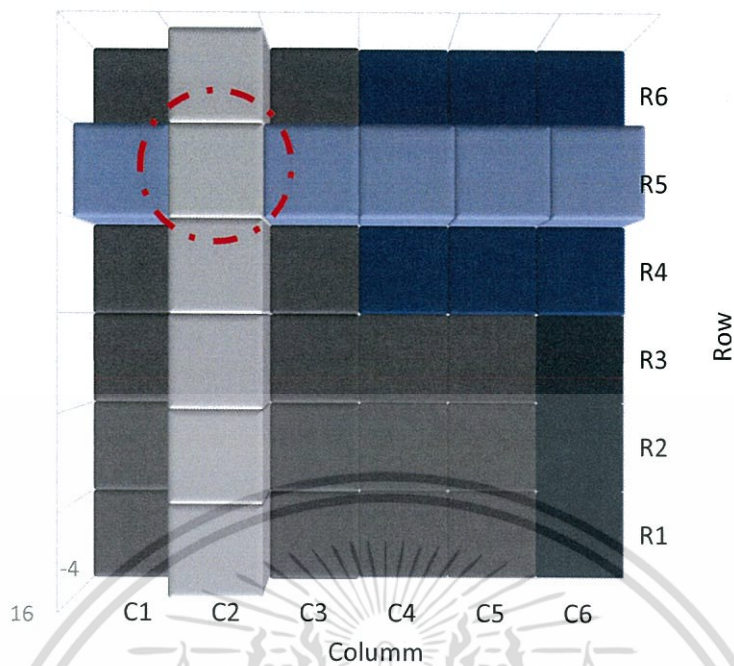
รูปที่ 4.45 มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.44

4.3.2 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขดแก้วที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 1.00 เซนติเมตร มาวางบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์



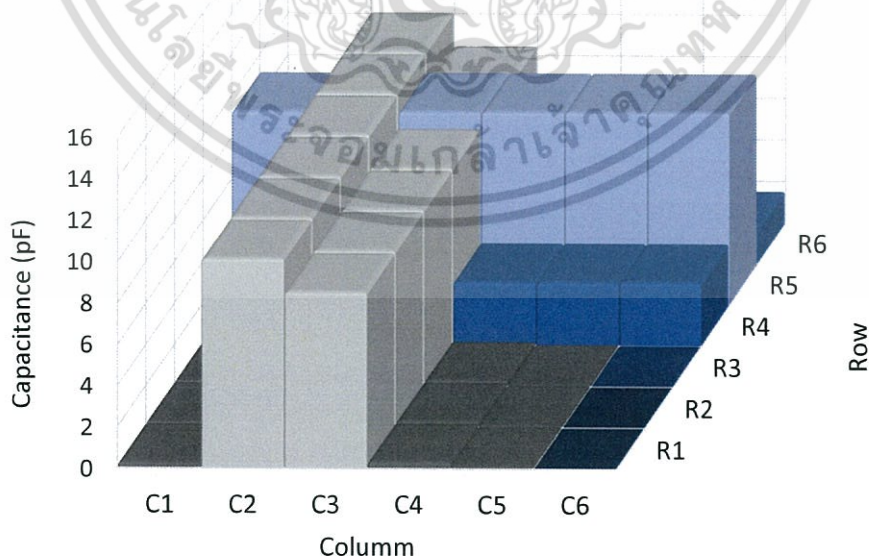
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำขดแก้วที่มี

รัศมีของขดเท่ากับ 1.00 เซนติเมตร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



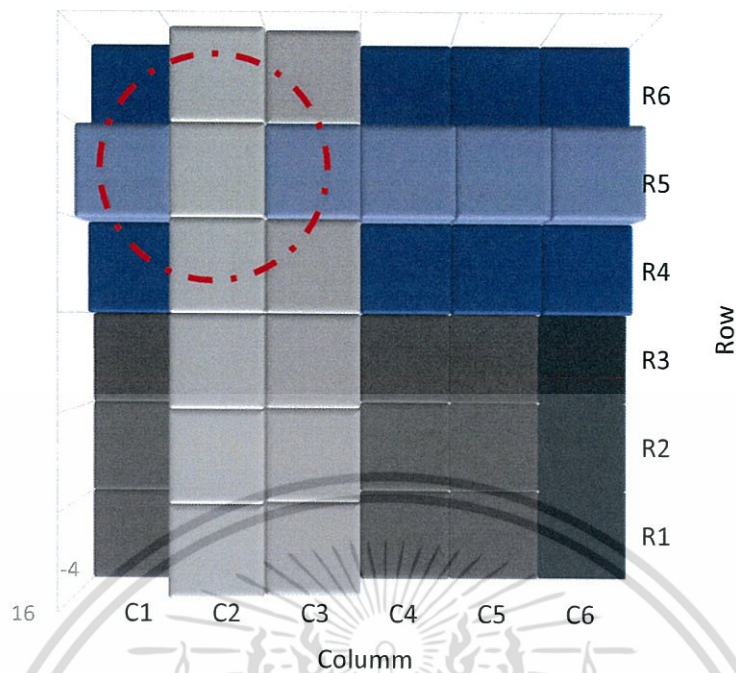
รูปที่ 4.47 มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.46

4.3.3 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขดแก้วที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 1.50 เซนติเมตร มาวางบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์



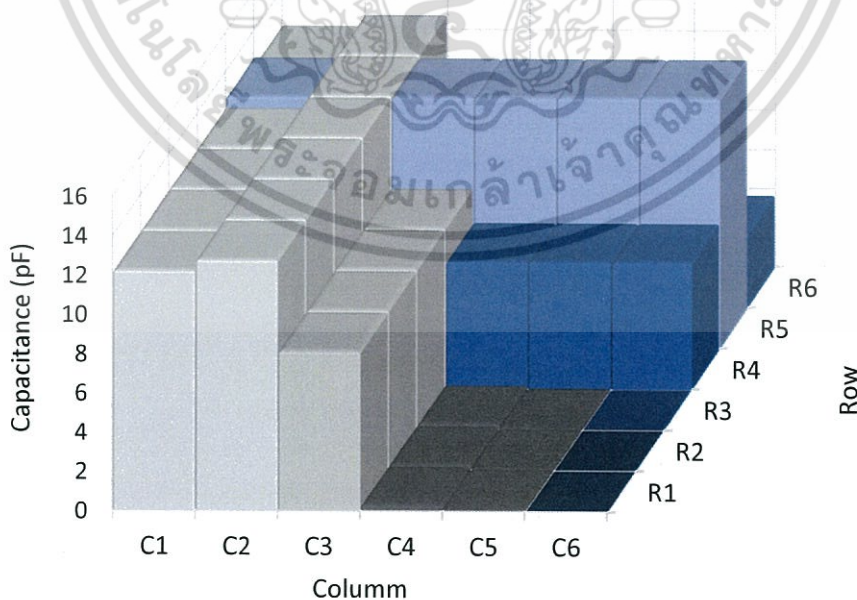
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีขดแก้วที่มี

รัศมีของขดเท่ากับ 1.50 ตารางเซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



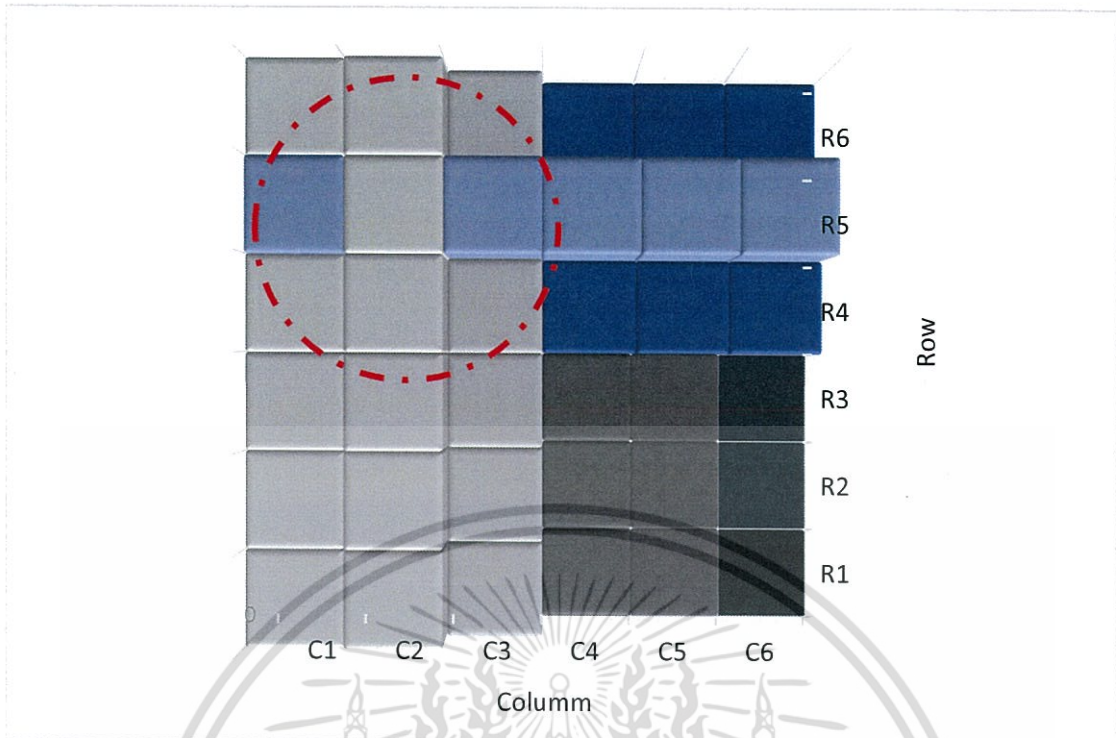
รูปที่ 4.49 มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.48

4.3.4 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขดแก้วที่มีรัศมีของขดเท่ากับ 2.00 เซนติเมตร มาวางบนคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำขดแก้วที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



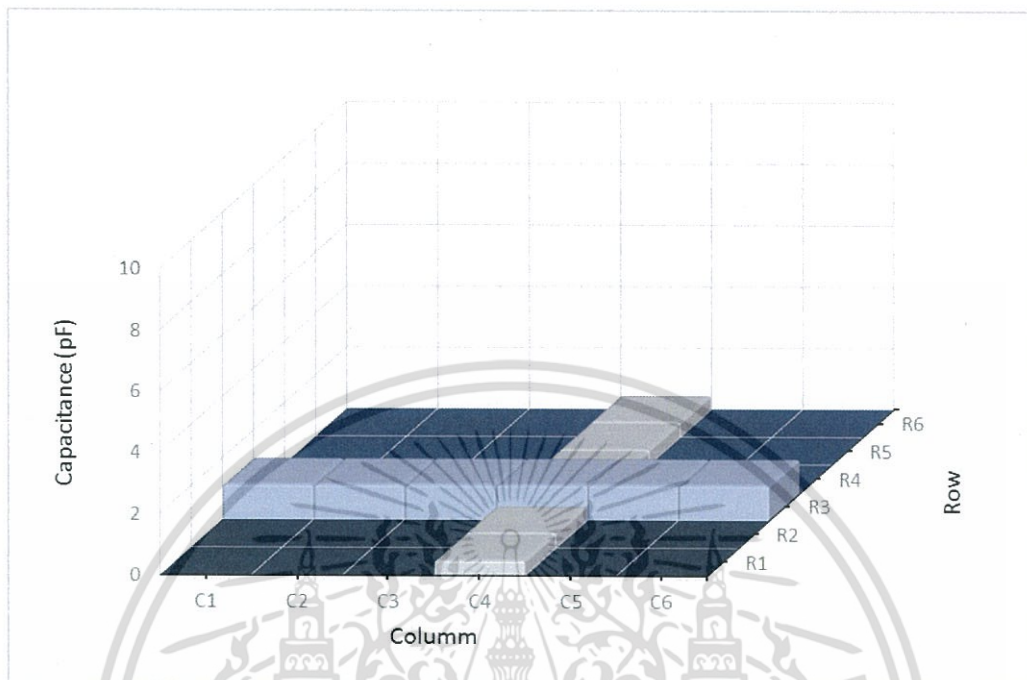
รูปที่ 4.51 มุมมองด้านบนของกราฟที่ 4.50

จากรูปแสดงถึงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีวัตถุที่มีขนาดต่างๆ มาวางบนคาปาซิทีฟ เซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ พบว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ นั้นส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ตรวจจับได้มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า และวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อนำมาวางบนคาปาซิทีฟ เซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่สร้างขึ้นจะใช้พื้นที่ในการวางเยาะกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็ก ค่าความจุไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงจึงเปลี่ยนแปลงในบริเวณแถวและหลักที่ถูกวัตถุวางทับอยู่กว้างขึ้น

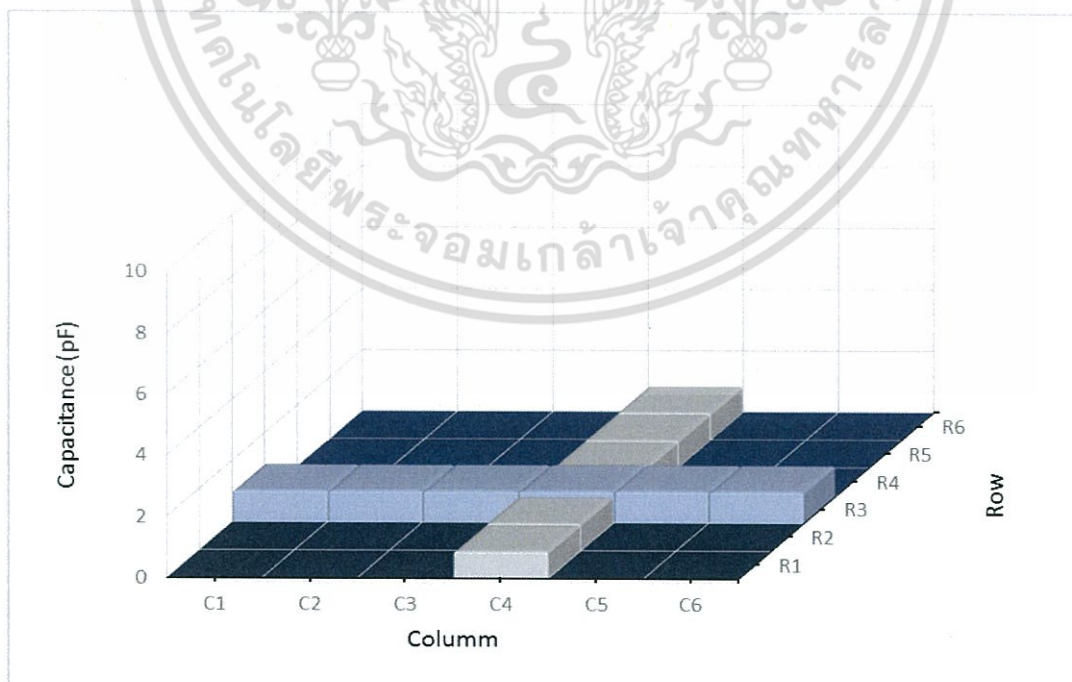
4.4 ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการนำหนักของวัตถุ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ ดังการทดลองที่ 3.3.5 โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 กรัม ผลจากการทดลองแสดงดังรูป

4.4.1 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำขวดพลาสติกมาวางบนตำแหน่ง C4R3 ของคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แล้วเพิ่มน้ำหนักของวัตถุขึ้นครั้งละ 10 กรัม

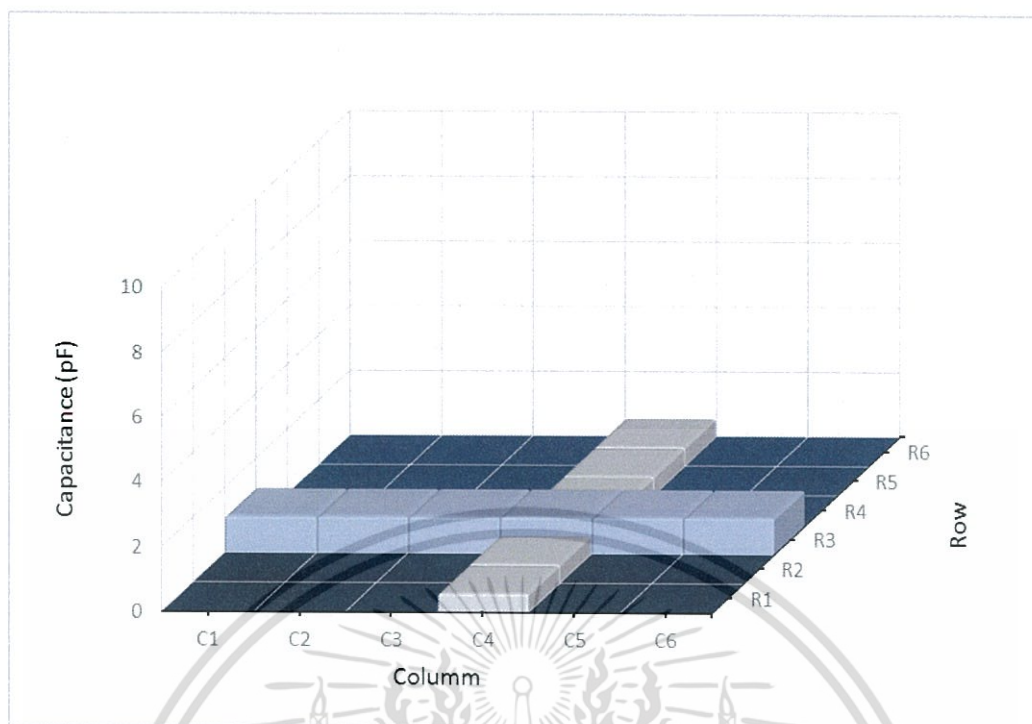


รูปที่ 4.52 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 10 กรัม

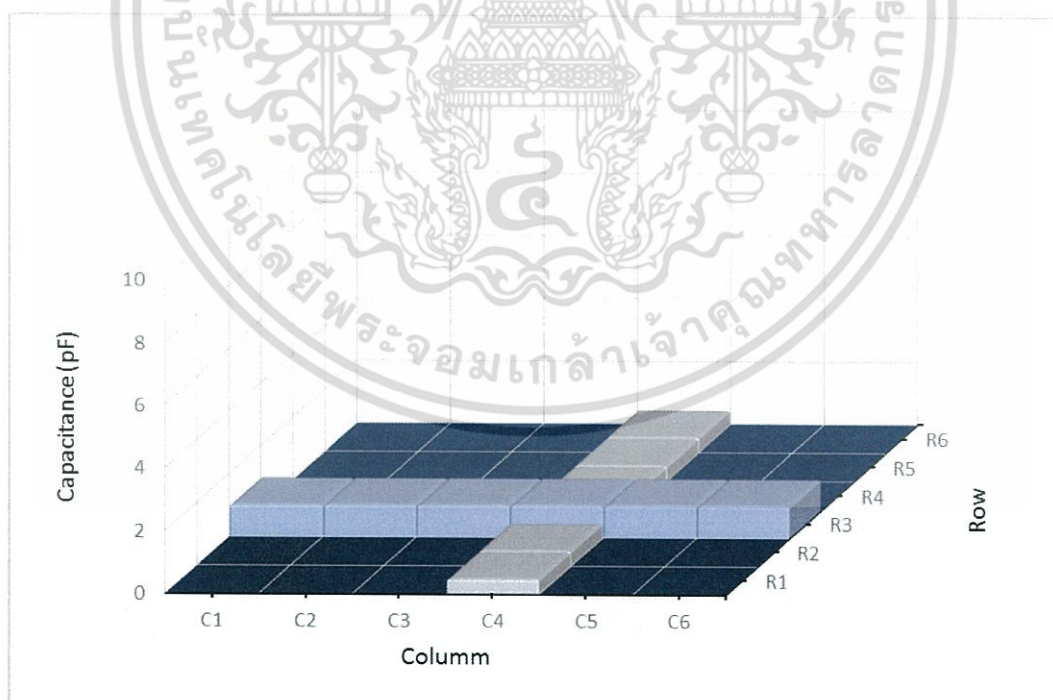


รูปที่ 4.53 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 20 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

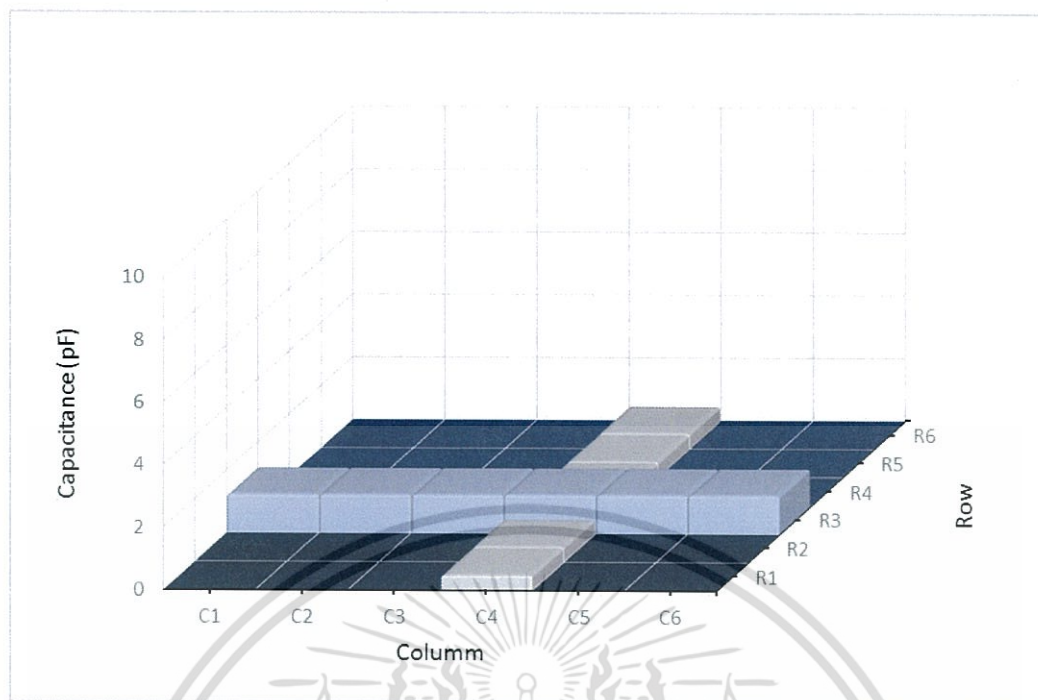


รูปที่ 4.54 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุน้ำหนักเพิ่มขึ้น 30 กรัม



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 50 กรัม

จากกราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของวัตถุเมื่อมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปนั้น มีค่าแตกต่างกันอย่างเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนของเหลวหรือเปลี่ยนขนาดของวัตถุ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองและศึกษาเพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุใน 2 มิติ โดยใช้หลักการของตัวเก็บประจุแบบ ARRAY พบว่าในการพัฒนาระบบนี้ต้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือรูปแบบของเซ็นเซอร์ และส่วนที่ใช้ในการวัด ซึ่งทั้งสองส่วนต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้ได้การระบุตำแหน่งที่แม่นยำ จากการประดิษฐ์คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ 6×6 ใน 2 มิติ ซึ่งมีขั้วอิเล็กโทรดทั้งหมด 12 ขั้วอิเล็กโทรด และใช้โมดูล MPR121 ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า พบว่าคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์แบบอาร์เรย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถใช้งานได้จริง มีค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองน้อยมาก

ในการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า เมื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าโดยพื้นฐานสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาการเปลี่ยนของเหลวภายในขวดแก้ว เป็นการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กทริกของวัตถุ พบว่าของเหลวแต่ละชนิดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน ตัวตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถแยกความแตกต่างของวัตถุที่สัมผัสได้ จากการทดลองของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือ อากาศ น้ำมันพืช นม น้ำอัดลม น้ำเปล่า ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าตรวจจับได้จะเรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ

2. การศึกษาการเปลี่ยนขนาดของวัตถุที่มาสัมผัสกับตัวตรวจจับตำแหน่งของวัตถุนี้ จากการทดลองใช้ขวดแก้วที่มีปริมาตร 1.33, 3.14, 7.07, 12.57 มิลลิลิตร พบว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดมีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็ก และค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นก็เพิ่มขึ้นมากกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า

3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อวัตถุมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นโดยขนาดและชนิดของสารไดอิเล็กทริกของวัตถุเหมือนเดิม จากการทดลองเพิ่มน้ำหนักของวัตถุขึ้นทีละ 10 กรัม พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ ดังนั้นตัวตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ มีผลกระทบจากการเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุเพียงเล็กน้อย

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองในช่วงแรกปัญหาที่พบคือ รูปแบบตัวตรวจจับตำแหน่งของวัตถุที่ประดิษฐ์ขึ้น มีสัญญาณรบกวนเยอะ ไม่สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แน่นอนได้ และไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยได้ ต้องหาวิธีที่ลดสัญญาณรบกวนจากขั้ว

อีเล็กโทรดที่อยู่ติดกัน โดยการทำการชิลด์ และต้องปรับค่า threshold สำหรับตรวจจับวัตถุขนาดเล็กๆ ที่ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยในหน่วย pF

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบขั้วอีเล็กโทรดแบบอาร์เรย์หรือขั้วอีเล็กโทรดที่อยู่บนระนาบเดียวกันต้องคำนึงถึง ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขั้วอีเล็กโทรดที่อยู่ติดกัน
2. ในการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ควรคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ก็จะไม่สามารถตรวจจับได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อาคม ศรีหาเพท. 2556. “การออกแบบและกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Texas Instruments. 2014. *Basics of Capacitive Sensing and Applications*. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/snoa927/snoa927.pdf>
- [3] Fatemeh Aezinia. 2014. “Design of Interface Circuit for Capacitive Sensing Applications.” Ph.D. philosophy, Simon Fraser University
- [4] Larry K Baxter. 1997. *Capacitive sensors design and application*. New York: Institute of electrical and electronics Engineers.
- [5] Gregory S. *Capacitive circuit Array for Fingerprint Sensing*. U.S Patent no. 6429666, 6 Aug, 2002.
- [6] Charles S. Walker. 1990. *Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis*. Norwood: ARTECH HOUSE, Inc
- [7] Christopher James BROWN, Michael Paul COULSON. *Projected Capacitance Touch Panel with Reference and Guard electrode*. U.S Patent no.0257786. Oct 3, 2013.
- [8] Winncy Y. Du. 2015. *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technology*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.
- [9] M.H.Bao, “Handbook of Sensor and Actuators.” Vol.8, pp. 144-145, 2000.
- [10] Thaimicrotron.com. *การเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ I2C*. [Online]. Available: <http://www.thaimicrotron.com/CCS-628/Reference/I2CBUS.htm>
- [11] ปีโยรส ขอนดอก 2555. “การศึกษาการใช้หัววัดค่าความจุไฟฟ้าแบบวงจรรวม.” ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้า (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กโทรดเมื่อไม่มีวัตถุมาสัมผัส

ขั้วอิเล็กโทรด	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
C1	305.7477
C2	319.0264
C3	321.1762
C4	333.9320
C5	345.2807
C6	342.4033
R1	316.4789
R2	327.0831
R3	340.9338
R4	358.9344
R5	374.4139
R6	355.9490

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กโทรดเมื่อมีวัตถุมาสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ

ขั้วอิเล็กโทรด	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C5R1	C5R2	C5R3	C5R4	C5R5	C5R6
C1	7.5887	6.9759	6.4467	7.8345	7.1799	5.8789
C2	0.3206	0.3206	0.5133	0.4276	0.5133	0.5133
C3	0.4334	0.3250	0.4334	0.2599	0.3467	0.3467
C4	0.4891	0.3725	0.2793	0.3725	0.3725	0.1862
C5	0.2253	0.4759	0.1001	0.1001	0.1001	0.2002
C6	0.3694	0.3694	0.1969	0.0000	0.0000	0.1969
R1	4.6188	0.3763	0.1671	0.0835	0.1671	0.1671
R2	0.2696	4.3672	0.6297	0.1797	0.2696	0.2696
R3	0.0000	0.1220	4.8479	0.0000	0.0000	0.0000
R4	0.1614	0.1614	0.5384	5.5688	0.2152	0.3229
R5	0.2635	0.5567	0.3514	0.4687	5.5822	0.5860
R6	0.4764	(0.0529)	0.1058	0.0000	0.0000	5.1489

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กทรอนิกส์
เมื่อมีวัตถุมาสัมผัส

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C5R1	C5R2	C5R3	C5R4	C5R5	C5R6
C1	0.3121	0.3902	0.3121	0.3121	0.3121	0.0780
C2	5.7388	5.2968	7.6979	7.5188	7.9669	6.7154
C3	0.5203	0.8680	0.7810	0.6941	0.6071	0.5203
C4	0.4658	0.3725	0.3725	0.2793	0.3725	0.1862
C5	0.2002	0.2002	0.1001	0.2002	0.1001	0.1001
C6	0.0984	0.1969	0.0984	0.0000	0.0000	0.0984
R1	6.1308	0.2508	0.1671	0.1671	0.0835	0.0835
R2	0.3595	6.0351	0.2696	0.2696	0.0898	0.0898
R3	0.0000	0.1952	7.6805	0.2929	0.0976	0.0000
R4	0.2152	0.4306	0.4306	7.3518	0.4306	0.2152
R5	0.3514	0.3514	0.1171	0.4687	8.8651	0.5860
R6	0.1058	0.1057	0.1057	0.1057	0.1057	5.1489

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กทรอนิกส์เมื่อมีวัตถุ
มาสัมผัส (ต่อ)

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C5R1	C5R2	C5R3	C5R4	C5R5	C5R6
C1	0.2340	0.1560	0.1560	0.0780	0.1560	0.0000
C2	0.3420	0.4276	0.4276	0.4276	0.4276	0.2565
C3	8.3492	6.6267	6.8072	6.3564	6.6267	5.7274
C4	0.5591	0.8393	0.8393	0.7459	0.2793	0.3725
C5	0.5010	0.2002	0.5010	0.2002	0.2002	0.2002
C6	0.0000	0.0000	0.0984	0.1969	0.0000	0.0984
R1	7.8763	0.5858	0.1671	0.0835	0.0835	0.0000
R2	0.7199	6.3147	0.5396	0.2696	0.1797	0.1797
R3	0.0976	0.4884	7.0696	0.3906	0.0000	(0.0975)
R4	0.2152	0.3229	0.6463	6.0129	0.4306	0.0000
R5	0.3514	0.1171	0.1171	0.7034	6.6702	0.5860
R6	0.2116	0.0000	(0.1057)	(0.1057)	0.0000	5.1489

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กทรอนิกส์
เมื่อมีวัตถุมาสัมผัส

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C4R1	C4R2	C4R3	C4R4	C4R5	C4R6
C1	0.2340	0.0780	0.2340	0.0000	0.0000	0.0779
C2	0.4276	0.4276	0.3420	0.0000	0.0854	0.0000
C3	0.6941	0.5203	0.5203	0.2599	0.3467	0.2599
C4	7.1261	6.4481	7.1261	7.0291	6.4481	6.3515
C5	0.7018	1.0034	0.9028	0.7018	0.6014	0.3004
C6	0.4927	0.4927	0.3940	0.4927	0.1969	0.3940
R1	7.6132	0.5858	0.2508	0.0000	0.0000	0.1671
R2	0.7199	6.7818	0.7199	0.2696	0.2696	0.1797
R3	0.0000	0.4884	7.2730	0.4884	0.0000	0.0000
R4	0.2152	0.3229	0.6463	6.7928	0.5384	0.0000
R5	0.2342	0.2342	0.2342	0.5860	6.9129	0.4687
R6	0.0000	-0.3169	0.1058	-0.1057	0.2116	4.1721

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กทรอนิกส์
เมื่อมีวัตถุมาสัมผัส (ต่อ)

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C5R1	C5R2	C5R3	C5R4	C5R5	C5R6
C1	0.0000	0.0000	0.2340	0.0780	0.0780	0.0780
C2	0.1709	0.0854	0.0854	0.0000	0.0000	0.0000
C3	0.2599	0.4334	0.4334	0.3467	0.3467	0.2599
C4	0.5591	0.7459	0.6524	0.7459	0.7459	0.4658
C5	7.2529	7.8798	6.3167	8.2990	8.7192	8.0893
C6	0.6901	0.9868	1.2839	0.9868	0.9868	0.2954
R1	6.0440	0.5020	0.0835	0.1671	0.0835	0.1671
R2	0.6297	8.4741	0.7199	0.2696	0.2696	0.1797
R3	0.2929	0.4884	7.1713	0.4884	0.1952	0.0000
R4	0.3229	0.4306	0.7542	8.7006	0.6463	0.3229
R5	0.3514	0.3514	0.4687	0.5860	8.6200	0.5860
R6	1.1669	0.2116	0.2116	0.0000	0.0000	5.5847

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (pF) ของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด
เมื่อมีวัสดุมาสัมผัส (ต่อ)

ขั้ว อิเล็กโทรด	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)					
	C6R1	C6R2	C6R3	C6R4	C6R5	C6R6
C1	0.0000	0.1560	0.0780	0.2340	0.2340	0.0000
C2	0.2565	0.0854	0.0000	0.0854	0.0000	0.0854
C3	0.3467	0.3467	0.3467	0.1732	0.3467	0.4334
C4	0.5591	0.5591	0.4658	0.3725	0.3725	0.2793
C5	0.8023	0.9028	1.0034	0.9028	0.7018	0.3004
C6	9.4017	10.2346	9.9218	9.4017	8.7796	7.1313
R1	5.3514	0.3345	0.1671	0.1671	0.0835	0.1671
R2	0.6297	6.4080	0.4495	0.2696	0.2696	0.1797
R3	0.2929	0.3906	6.6635	0.2929	0.1952	0.0000
R4	0.3229	0.5384	0.3229	6.7928	0.5384	0.2152
R5	0.3514	0.5860	0.2342	0.4687	5.7028	0.4687
R6	0.0000	0.0000	0.2113	0.0000	0.1057	4.4971

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้า (pF) เมื่อเปลี่ยนของเหลวที่บรรจุอยู่ในขวด
และวางวัตถุบนตำแหน่ง C5R2

ขั้วอิเล็กโทรด	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)				
	อากาศ	น้ำมันพืช	นม	น้ำเปล่า	น้ำอัดลม
C1	0.0836	0.1556	0.1556	0.0778	0.0000
C2	0.2950	0.4262	0.4262	0.4262	0.4262
C3	0.9007	0.6921	0.5188	0.6055	0.5188
C4	0.8369	0.9302	0.8369	1.0235	0.8369
C5	2.6976	3.4577	4.6947	5.2126	5.7321
C6	0.0834	0.5906	0.3937	0.5906	0.5906
R1	0.3222	0.4177	0.3341	0.4177	0.3345
R2	2.9774	3.9133	5.4864	5.6724	6.3252
R3	0.9732	0.97382	0.7786	0.9738	0.7786
R4	0.6451	0.3222	0.3222	0.4298	0.2147
R5	0.3505	0.1167	0.0000	0.1167	0.1165
R6	0.0152	0.0157	0.03676	0.0367	0.0577

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้า (pF) ของขั้วอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเปลี่ยนขนาดของวัตถุ และนำวัตถุวางบนตำแหน่ง C2R5

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่าความจุไฟฟ้า			
	R = 0.65 Cm	R = 1.00 Cm	R = 1.50 Cm	R = 2.00 Cm
C1	0.0780	0.4684	0.2340	12.2443
C2	7.3503	8.1439	9.7718	12.7954
C3	0.0000	1.1294	8.5319	8.1708
C4	0.0000	-0.0930	0.2793	0.0930
C5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0984
C6	0.1001	-0.1000	0.1001	0.2000
R1	-0.3338	-0.2504	-0.0835	0.2504
R2	-0.1795	-0.1795	-0.1795	0.3587
R3	-0.3897	-0.3897	-0.1950	0.3897
R4	0.3229	0.4306	3.0451	8.4588
R5	7.5208	9.7256	9.2363	12.7056
R6	0.5295	0.3175	0.2340	8.74083

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าความจุไฟฟ้า (pF) ของขั้วอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเพิ่มน้ำหนักของวัตถุ และนำวัตถุวางบนตำแหน่ง C4R3

ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	ค่า Capacitance (pF)				
	10g	20g	30g	40g	50g
C1	0.0000	-0.3130	0.0000	0.0000	0.0000
C2	1.7314	0.7768	0.4311	0.4311	0.4311
C3	1.3888	1.4818	1.8543	1.6679	1.8543
C4	0.4857	0.8752	0.5830	0.4857	0.4857
C5	1.6143	1.0746	1.1824	1.1824	0.0000
C6	0.5333	1.3898	1.6046	1.7121	0.0000
R1	0.4209	0.0000	0.3366	0.3366	0.2524
R2	0.9811	1.3751	1.7700	1.7700	1.7700
R3	1.5394	1.0247	1.1275	1.0247	1.2304
R4	0.0000	1.1386	1.1386	1.2528	1.1386
R5	0.6270	1.8872	2.0137	1.8872	1.7608
R6	0.5333	0.1065	0.1065	0.1065	0.1065



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Information

Proximity Capacitive Touch Sensor Controller

MPR121 OVERVIEW

The MPR121 is the second generation capacitive touch sensor controller after the initial release of the MPR03x series devices. The MPR121 features increased internal intelligence, some of the major additions include an increased electrode count, a hardware configurable I²C address, an expanded filtering system with debounce, and completely independent electrodes with auto-configuration built in. The device also features a 13th simulated sensing channel dedicated for near proximity detection using the multiplexed sensing inputs.

Features

- Low power operation
 - 1.71 V to 3.6 V supply operation
 - 29 μ A supply current at 16 ms sampling interval period
 - 3 μ A Stop mode current
- 12 capacitance sensing inputs
 - 8 inputs are multifunctional for LED driver and GPIO
- Complete touch detection
 - Auto-configuration for each sensing input
 - Auto-calibration for each sensing input
 - Touch/release threshold and debounce for touch detection
- I²C interface, with Interrupt output
- 3 mm x 3 mm x 0.65 mm 20 lead QFN package
- -40°C to +85°C operating temperature range

Implementations

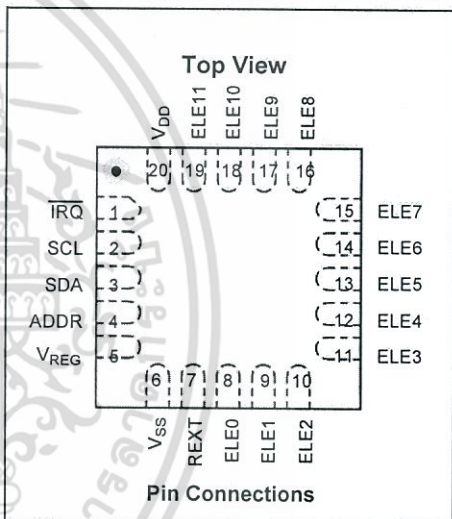
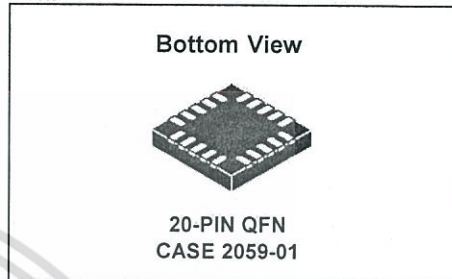
- General Purpose Capacitive Detection
- Switch Replacements
- Touch Buttons
- Touch Keypad
- Touch Slide bar
- Touch Wheel
- Touchpad
- Touch Panel
- Near Proximity Detection

Typical Applications

- PC Peripherals
- MP3 Players
- Remote Controls
- Mobile Phones
- Lighting Controls

MPR121

Capacitive Touch Sensor Controller



ORDERING INFORMATION					
Device Name	Temperature Range	Case Number	Touch Pads	I ² C Address	Shipping
MPR121QR2	-40°C to +85°C	2059 (20-Pin QFN)	12-pads	0x5A - 0x5D	Tape & Reel

This document contains a product under development. Freescale Semiconductor reserves the right to change or discontinue this product without notice.

© Freescale Semiconductor, Inc., 2009, 2010. All rights reserved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN DESCRIPTION

Pin No.	Pin Name	Description
1	IRQ	Active Low Open-drain Interrupt Output
2	SCL	I ² C Serial Clock
3	SDA	I ² C Serial Data
4	ADDR	I ² C Slave Address Pin Selects. Connect to VSS, VDD, SDA, SCL to choose address 0x5A, 0x5B, 0x5C, 0x5D respectively.
5	VREG	Internal Supply Voltage. Internal regulator output. Bypass to VSS with a 0.1 μ F capacitor. Connect to VDD when supply below 2.75V
6	VSS	Ground
7	REXT	Reference Resistor Connection. Connect a 75k \pm 1% resistor from REXT to VSS
8	ELE0	Electrode 0 Connection
9	ELE1	Electrode 1 Connection
10	ELE2	Electrode 2 Connection
11	ELE3	Electrode 3 Connection
12	ELE4/LED0	Electrode 4, or LED0, or GPIO4 Connection
13	ELE5/LED1	Electrode 5, or LED1, or GPIO5 Connection
14	ELE6/LED2	Electrode 6, or LED2, or GPIO6 Connection
15	ELE7/LED3	Electrode 7, or LED3, or GPIO7 Connection
16	ELE8/LED4	Electrode 8, or LED4, or GPIO8 Connection
17	ELE9/LED5	Electrode 9, or LED5, or GPIO9 Connection
18	ELE10/LED6	Electrode 10, or LED6, or GPIO10 Connection
19	ELE11/LED7	Electrode 11, or LED7, or GPIO11 Connection
20	VDD	Power Supply Input. Bypass to VSS by a 0.1 μ F capacitor.

TYPICAL APPLICATION EXAMPLE AND ELECTRODE PATTERN

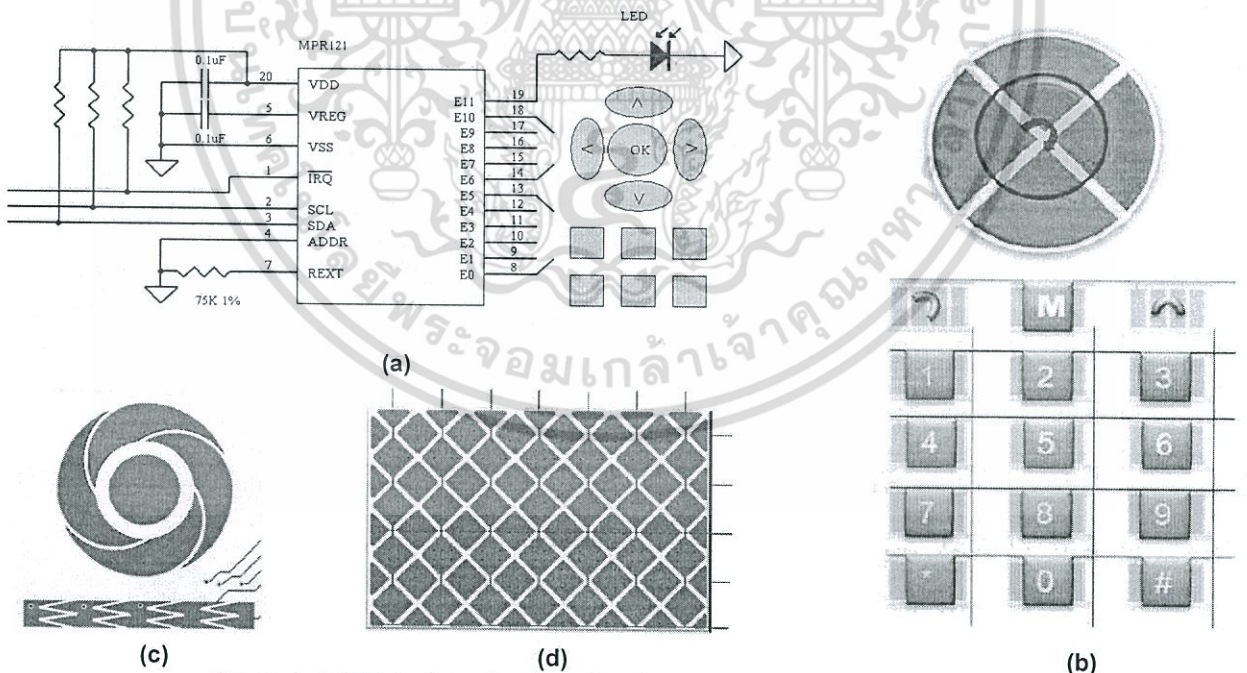


Figure 1. (a) Typical application circuit
 (b) Button matrix pattern using 12 channels for 20 touch buttons
 (c) Slide wheel and slide bar pattern using 10 channels
 (d) Touchpad 5x7 pattern using 12 channels

DEVICE OPERATION OVERVIEW

Power Supply

MPR121 has two supply pins VDD and VREG. Power supply should always be connected to the VDD pin, which should be decoupled with a 0.1µF ceramic decoupling capacitor from VDD to VSS. The VDD should be clean without excessive noise, for example, noise ripple big than 100mV may result false function in some case.

To operate from a supply voltage in the range 2.0V to 3.6V, apply the voltage to VDD and internal voltage regulator will regulate a lower operating voltage on VREG. Connect a 0.1µF ceramic decoupling capacitor between VREG and VSS, but otherwise do not load VREG.

When power supply voltage is in the range 1.71V to 2.75V, the supply can also be routed into VREG directly to bypass internal voltage regulator. Bypass VDD and VREG together with a 0.1µF ceramic decoupling capacitor from VDD to VSS. Refer to Figure 2.

Note: The **absolute maximum rating** for VREG pin is 2.75V, the voltage applied should be carefully below this limit. The VDD pin should be always connected with VREG in this case.

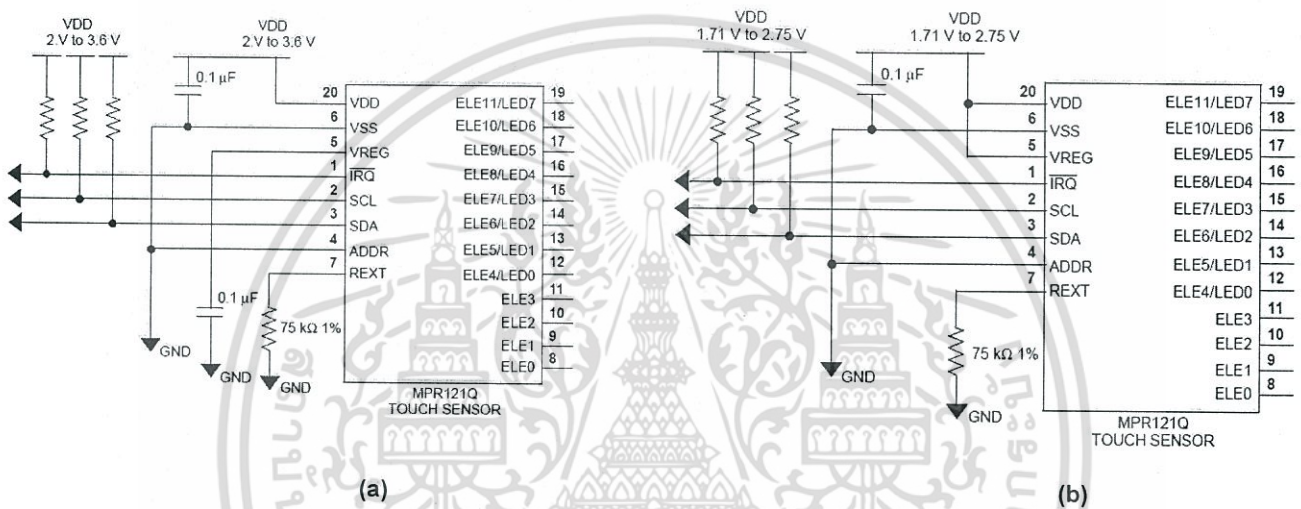


Figure 2. Typical MPR121 power supply connection.

(a) MPR121 runs from a 2.0 V to 3.6 V supply.

(b) MPR121 runs from a 1.71 V to 2.75 V supply.

Serial Communication

The MPR121 is an Inter-Integrated Circuit (I²C) compliant device with an additional interrupt that is triggered any time a touch or release of a button is detected. The device has a configurable I²C address by connecting the ADDR pin to the VSS, VDD, SDA or SCL lines, the resulting I²C addresses are 0x5A, 0x5B, 0x5C and 0x5D respectively. The specific details of this system are described at the end of this document.

LED Driver and GIPO Function

Among the 12 sensing input pins, 8 pins are multifunctional pins capable for LED driver and GPIO functions. When these sensing input pins are not configured as electrodes inputs, they may be used to drive LEDs or for GPIO functions. When used for LED driver, connect these electrodes output to LED anodes and a series current limiting resistor to ground. The configuration of the LED driver and GPIO system is described in application note AN3894.

Capacitance Measurement and Touch Sensing

1. Capacitance Measurement

The complete capacitance measurement system is composed by sensing electrode pads connected to the MPR121 sensing inputs, and the MPR121 communicating with the host processor via the I²C bus and Interrupt output. The total measurable sensing channels is 13 channels, including 12 physical electrode inputs and one multiplexed 13th channel for proximity detection. A multiplexer is included internally at the front end, so the 13 channels are measured sequentially in time. After the capacitance is measured, it then get noise filtered and finally touch /release status is determined.

Apart from touch sensing, MPR121 can also be used for general purpose capacitive detection in various industry applications. The 10bit output data (or even the 8bit baseline value providing an even higher level of noise rejection for slowly changing mediums) can be used as the capacitance measurement output relating to the measured parameters such as the water level, displacement, or medium content change.

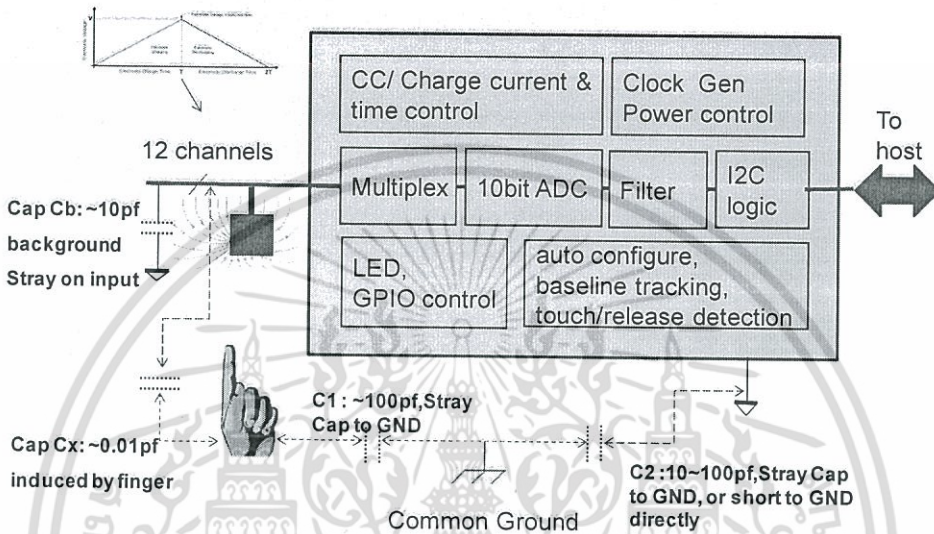


Figure 3. MPR121 Block Diagram and Capacitance Measurement

The capacitance measured on each sensing channel, is the total capacitance to ground which can be the combination of background parasitic capacitance to ground (Cb) and finger touch induced capacitance to ground (Cx). This ground refers to the common ground when the device is not electrically floated, and refers to the MPR121 device ground when the device is floated for example powered by batteries. For a typical application, for example the Cb can be about 10pF, and the Cx can be below 1pF. The two values can be much smaller in battery powered portable application, which requires more attention on touch sensitivity design.

The MPR121 uses a constant DC charge current scheme for capacitance measurement. Each channel is charged and then discharged completely to ground periodically to measure the capacitance (see Figure 4). All the channels are measured sequentially, when one channel is in the charge/discharge and measurement period the other channels are shorted to ground.

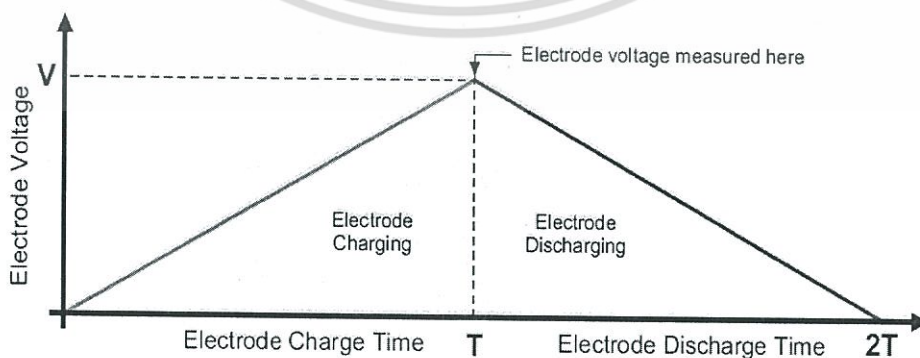


Figure 4. MPR121 Capacitance Measurement

The amount of charge (Q) applied is programmable by setting the charge current (I), and the charge time (T). Once the electrode is charged, the peak voltage (V) at the end of charge is measured by internal 10bit ADC. This voltage V (that is the ADC counts) is reverse proportional to the capacitance (C) on the sensing channel.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{I \times T}{V}, \quad V = \frac{Q}{C} = \frac{I \times T}{C}$$

The programmable range for the current I is 1uA~63uA, see description on AFE Configuration 1 Register (0x5C). The programmable range for time T is 0.5uS~32uS, see description on AFE Configuration 2 Register (0x5D). To maintain the linearity of internal current source, the voltage on the sensing input suggested range is 0.7V ~ VDD-0.7V. Using these setting limits for the above equation, the C measurable range can be calculated.

Taking VDD=1.8V as an example:

$$C_{low} = \frac{I_{min} \times T_{min}}{V_{max}} = \frac{0.5\mu S \times 1\mu A}{1.8V - 0.7V} = 0.45pF$$

$$C_{high} = \frac{I_{max} \times T_{max}}{V_{min}} = \frac{32\mu S \times 63\mu A}{0.7V} = 2880pF$$

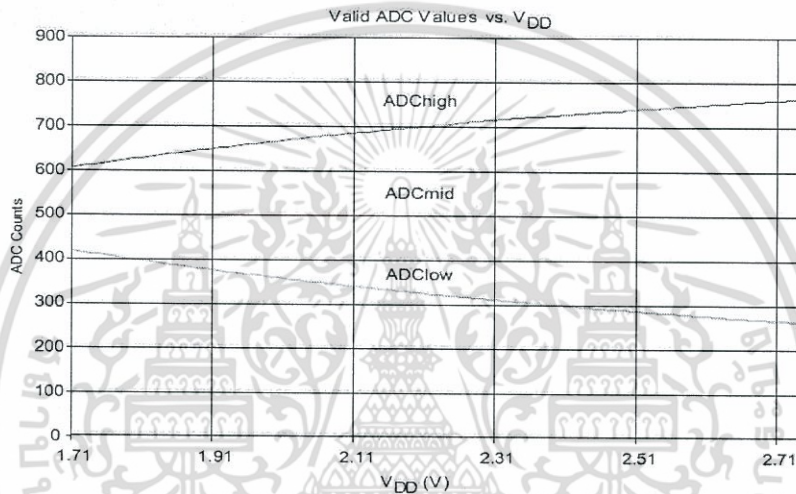


Figure 5. MPR121 linear voltage range by the supply voltage

Note: If the exact C value is not cared and MPR121 is only used for touch detection, then the current source linearity is not an issue and sensitivity is critical, the electrode can be charged up to the supply limit so maximum charge can be generated for higher touch detection sensitivity. However, charge should not be so high that the voltage is clipped by supply rail which can cause a reverse impact on sensitivity.

Since the ADC is 10bit, the equation for ADC reading result is as below:

$$ADC\ counts = \frac{V}{V_{dd}} \times 1024 = \frac{I \times T}{C} \times \frac{1}{V_{dd}} \times 1024$$

Re-arrange above equation, the capacitance C can be calculated as below:

$$C = \frac{I \times T}{ADC\ counts} \times \frac{1}{V_{dd}} \times 1024$$

To calculate the capacitance resolution per ADC counts,

$$\frac{dC}{dADC\ counts} = \frac{I \times T}{(ADC\ counts)^2} \times \frac{1}{V_{dd}} \times 1024 = \frac{C}{ADC\ counts}$$

From above equation, the resolution is dependent on the capacitance under measurement and the ADC reading counts. It's easy to understand smaller C or higher $ADC\ counts$ result higher resolution.

To get the maximum resolution for a given C , the highest ADC counts is used, which gives out:

$$\left(\frac{dC}{dADC\ counts}\right)_{min} = \frac{C}{(ADC\ counts)_{max}} = \frac{C}{1024} \approx 0.001C$$

For example, with C=10pF, when setting I and T so that the ADC reading counts is 1000, the sensing resolution for this capacitance at this reading counts will be 0.01pF. The conclusion is that to get the maximum sensing resolution, the capacitance shall be charged close to the upper counts limit. This scheme is used by the MPR121 in electrode auto-configuration where the optimized I and T are chosen to set the reading counts close to upper counts limit for the capacitance on the electrode.

For touch sensing application, to achieve the best sensing sensitivity, smaller C is desired, which means unnecessary stray capacitance on the channel inputs shall be kept as little as possible. The stray capacitance (Cb) can cause the sensing charge field return back to ground directly without following through Cx (See Figure 3) which is the capacitance change need to be detected. So ground layer and shield shall be carefully decided and designed so that both the EMC design consideration and the sensitivity target can be both achieved. Refer to MPR121 design guideline for more information on sensitivity issue.

2. Three levels of filtering

The ADC raw data outputs run through 3 levels of digital filtering to filter out the high frequency and low frequency noise encountered.

The first level filter is a simple running average filter configured by FFI (see description on AFE Configuration 1 Register (0x5C)) which is the number of samples used for the filter.

The 2nd level filter result is 10bit and stored in the output data registers 0x04~0x1D as the immediate capacitance of each sensing input (see description on Filtered Data Registers). The filter control parameter is SFI and ESI (see description on AFE Configuration 2 Register (0x5D)).

The 3rd level filter result is an even lower frequency content of signal change using the 2nd level filter output, and is mainly used as the baseline value representing the capacitance variation over the long term and slow environment change such as atmospheric moisture and dirt for touch detection. There are two sets of filter control parameters, all the 12 electrodes' baseline share the same set of parameters, while the 13th channel ELEPROX is controlled by another independent set of parameters (refer to description on Baseline Filter Control Registers).

The 3rd level filtered result is internally 10bit but only high 8 bits are readable from registers 0x1E~0x2A as the baseline value output for each channel (see description on Baseline Value Registers).

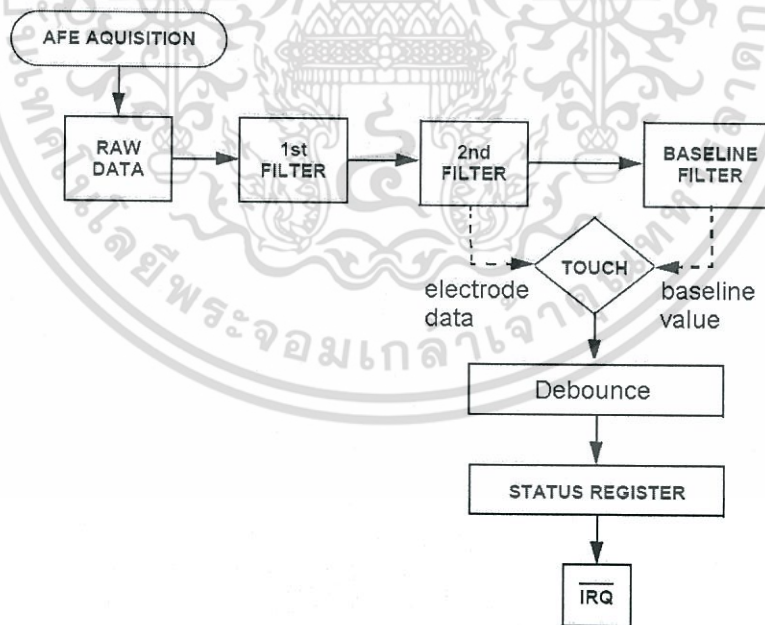


Figure 4. MPR121 Capacitance Measurement

3. Electrode Auto-Configuration

Given by a user defined target charge level, MPR121 can automatically run to get an optimized setting of charge current and charge time for each electrode without knowing the specific capacitance value on the electrode input. This smart auto-configuration feature greatly reduces the trial and fine tune time during the real system development period. The independent control and setting for each electrode allow for a great deal of flexibility in electrode pattern design. For information on how to use the auto-configuration function refer to application note AN3889.

4. Environment Auto-Calibration

MPR121 incorporates auto-calibration function which continually learns the background baseline capacitance of each individual electrode, so the system only has to program the amount of small change from these baselines that represents a touch or release. The 3rd level filtered result is used as the baseline value representing the capacitance variation of each electrode over the long term and slow environment change such as atmospheric moisture and dirt. For information on how to set up the background baseline tracking system refer to application note AN3891 and AN3892.

5. Touch and Release Detection

Touch and release is determined by comparing the immediate capacitance deviation that is the electrode 2nd level filtered output data deviation to the baseline value. If the deviation passed the setting threshold, then a touch or release status is detected and reported in the status register. The touch threshold and release threshold are independent and individually programmable for each electrode, providing hysteresis and electrode independence. Debounce setting can be used for further noise filtering to provide glitch free touch and release detection.

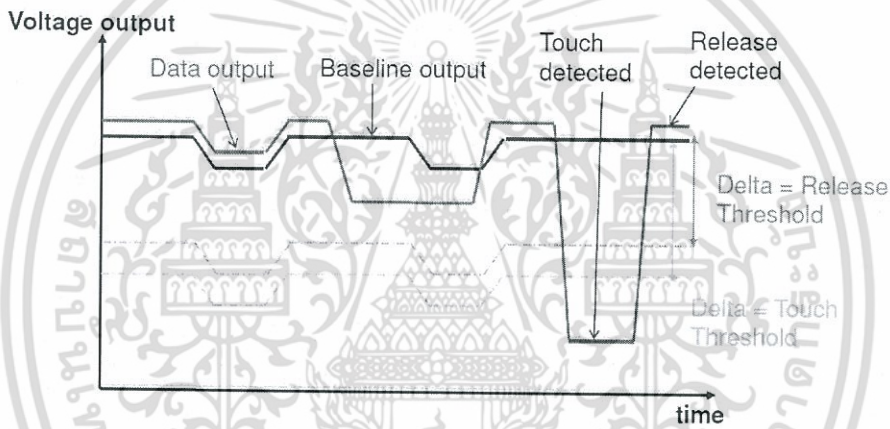


Figure 5. MPR121 Touch and Release Detection

6. Proximity Sensing

MPR121 can be used for near proximity sensing. By internally multiplexing all the sensing inputs so that they are connected together and all separated touch pads are “combined together” to create a single large electrode covering a larger sensing area. When enabled, this 13th proximity detection channel will be included at the beginning of a normal electrode detection cycle. This 13th proximity detection has its own independent set of configuration registers. This system is described in application note AN3893.

Run Mode and Stop Mode

After completing power on reset (POR), MPR121 is default in Stop Mode without any capacitance measurement. MPR121 can be set into Run Mode when bit D5~D0 in **Electrode Configuration Register (ECR, address 0x5E)** are not all zeros which indicates at least one of the 13 measurement channels is enabled. MPR121 can be set into Stop Mode by writing 2bXX000000 to ECR register.

In Run Mode, MPR121 uses a state machine which wakes up periodically to measure the electrodes, filter and analyze the data, and determine whether a touch pad has been touched or released. During the waiting period between measurements MPR121 draws negligible current, so the average current consumption is determined by the frequency and quantity of measurements channels enabled. MPR121 can be configured for a sampling interval between 1ms and 128ms. The user can make the tradeoff between noise rejection, touch response time, and power consumption. Refer to application note AN3890 on how to set up these configurations.

REGISTER DESCRIPTION

Table 1. Register Map

REGISTER	Fields								Register Address	Initial Value	Auto Increment Address	
ELE0 - ELE7 Touch Status	E7TS	E6TS	E5TS	E4TS	E3TS	E2TS	E1TS	E0TS	0x00	0x00	Register Address + 1	
ELE8 - ELE11, ELEPROX Touch Status	OVCF			E12TS	E11TS	E10TS	E9TS	E8TS	0x01	0x00		
ELE0 - ELE7 OOR Status	E7OOR	E6OOR	E5OOR	E4OOR	E3OOR	E2OOR	E1OOR	E0OOR	0x02	0x00		
ELE8 - ELE11, ELEPROX OOR Status	ARFF	ACFF		E12OOR	E11OOR	E10OOR	E9OOR	E8OOR	0x03	0x00		
ELE0 Electrode Filtered Data LSB	E0FDL								0x04	0x00		
ELE0 Electrode Filtered Data MSB									E0FDH	0x05		0x00
ELE1 Electrode Filtered Data LSB	E1FDL								0x06	0x00		
ELE1 Electrode Filtered Data MSB									E1FDH	0x07		0x00
ELE2 Electrode Filtered Data LSB	E2FDL								0x08	0x00		
ELE2 Electrode Filtered Data MSB									E2FDH	0x09		0x00
ELE3 Electrode Filtered Data LSB	E3FDL								0x0A	0x00		
ELE3 Electrode Filtered Data MSB									E3FDH	0x0B		0x00
ELE4 Electrode Filtered Data LSB	E4FDL								0x0C	0x00		
ELE4 Electrode Filtered Data MSB									E4FDH	0x0D		0x00
ELE5 Electrode Filtered Data LSB	E5FDL								0x0E	0x00		
ELE5 Electrode Filtered Data MSB									E5FDH	0x0F		0x00
ELE6 Electrode Filtered Data LSB	E6FDL								0x10	0x00		
ELE6 Electrode Filtered Data MSB									E6FDH	0x11		0x00
ELE7 Electrode Filtered Data LSB	E7FDL								0x12	0x00		
ELE7 Electrode Filtered Data MSB									E7FDH	0x13		0x00
ELE8 Electrode Filtered Data LSB	E8FDL								0x14	0x00		
ELE8 Electrode Filtered Data MSB									E8FDH	0x15		0x00
ELE9 Electrode Filtered Data LSB	E9FDL								0x16	0x00		
ELE9 Electrode Filtered Data MSB									E9FDH	0x17		0x00
ELE10 Electrode Filtered Data LSB	E10FDL								0x18	0x00		
ELE10 Electrode Filtered Data MSB									E10FDH	0x19		0x00
ELE11 Electrode Filtered Data LSB	E11FDL								0x1A	0x00		
ELE11 Electrode Filtered Data MSB									E11FDH	0x1B		0x00
ELEPROX Electrode Filtered Data LSB	E12FDL								0x1C	0x00		
ELEPROX Electrode Filtered Data MSB									E12FDH	0x1D		0x00
ELE0 Baseline Value	E0BV								0x1E	0x00		
ELE1 Baseline Value	E1BV								0x1F	0x00		
ELE2 Baseline Value	E2BV								0x20	0x00		
ELE3 Baseline Value	E3BV								0x21	0x00		
ELE4 Baseline Value	E4BV								0x22	0x00		
ELE5 Baseline Value	E5BV								0x23	0x00		
ELE6 Baseline Value	E6BV								0x24	0x00		
ELE7 Baseline Value	E7BV								0x25	0x00		
ELE8 Baseline Value	E8BV								0x26	0x00		
ELE9 Baseline Value	E9BV								0x27	0x00		
ELE10 Baseline Value	E10BV								0x28	0x00		
ELE11 Baseline Value	E11BV								0x29	0x00		
ELEPROX Baseline Value	E12BV								0x2A	0x00		
MHD Rising									MHDR	0x2B	0x00	
NHD Rising									NHDR	0x2C	0x00	
NCL Rising	NCLR								0x2D	0x00		
FDL Rising	FDLR								0x2E	0x00		
MHD Falling									MHDF	0x2F	0x00	
NHD Falling									NHDF	0x30	0x00	

MPR121

Sensor

Table 1. Register Map

REGISTER	Fields	Register Address	Initial Value	Auto Increment Address
NCL Falling	NCLF	0x31	0x00	Register Address + 1
FDL Falling	FDLF	0x32	0x00	
NHD Touched	NHDT	0x33	0x00	
NCL Touched	NCLT	0x34	0x00	
FDL Touched	FDLT	0x35	0x00	
ELEPROX MHD Rising	MHDPROXR	0x36	0x00	
ELEPROX NHD Rising	NHDPROXR	0x37	0x00	
ELEPROX NCL Rising	NCLPROXR	0x38	0x00	
ELEPROX FDL Rising	FDLPROXR	0x39	0x00	
ELEPROX MHD Falling	MHDPROXF	0x3A	0x00	
ELEPROX NHD Falling	NHDPROXF	0x3B	0x00	
ELEPROX NCL Falling	NCLPROXF	0x3C	0x00	
ELEPROX FDL Falling	FDLPROXF	0x3D	0x00	
ELEPROX NHD Touched	NHDPROXT	0x3E	0x00	
ELEPROX NCL Touched	NCLPROXT	0x3F	0x00	
ELEPROX FDL Touched	FDLPROXT	0x40	0x00	
ELE0 Touch Threshold	E0TTH	0x41	0x00	
ELE0 Release Threshold	E0RTH	0x42	0x00	
ELE1 Touch Threshold	E1TTH	0x43	0x00	
ELE1 Release Threshold	E1RTH	0x44	0x00	
ELE2 Touch Threshold	E2TTH	0x45	0x00	
ELE2 Release Threshold	E2RTH	0x46	0x00	
ELE3 Touch Threshold	E3TTH	0x47	0x00	
ELE3 Release Threshold	E3RTH	0x48	0x00	
ELE4 Touch Threshold	E4TTH	0x49	0x00	
ELE4 Release Threshold	E4RTH	0x4A	0x00	
ELE5 Touch Threshold	E5TTH	0x4B	0x00	
ELE5 Release Threshold	E5RTH	0x4C	0x00	
ELE6 Touch Threshold	E6TTH	0x4D	0x00	
ELE6 Release Threshold	E6RTH	0x4E	0x00	
ELE7 Touch Threshold	E7TTH	0x4F	0x00	
ELE7 Release Threshold	E7RTH	0x50	0x00	
ELE8 Touch Threshold	E8TTH	0x51	0x00	
ELE8 Release Threshold	E8RTH	0x52	0x00	
ELE9 Touch Threshold	E9TTH	0x53	0x00	
ELE9 Release Threshold	E9RTH	0x54	0x00	
ELE10 Touch Threshold	E10TTH	0x55	0x00	
ELE10 Release Threshold	E10RTH	0x56	0x00	
ELE11 Touch Threshold	E11TTH	0x57	0x00	
ELE11 Release Threshold	E11RTH	0x58	0x00	
ELEPROX Touch Threshold	E12TTH	0x59	0x00	
ELEPROX Release Threshold	E12RTH	0x5A	0x00	
Debounce Touch & Release	DR DT	0x5B	0x00	
AFE Configuration 1	FFI CDC	0x5C	0x10	
AFE Configuration 2	CDT SFI ESI	0x5D	0x24	
Electrode Configuration(ECR)	CL ELEPROX ELE	0x5E	0x00	
ELE0 Electrode Current	CDC0	0x5F	0x00	
ELE1 Electrode Current	CDC1	0x60	0x00	
ELE2 Electrode Current	CDC2	0x61	0x00	

Table 1. Register Map

REGISTER	Fields						Register Address	Initial Value	Auto Increment Address
ELE3 Electrode Current						CDC3	0x62	0x00	Register Address + 1
ELE4 Electrode Current						CDC4	0x63	0x00	
ELE5 Electrode Current						CDC5	0x64	0x00	
ELE6 Electrode Current						CDC6	0x65	0x00	
ELE7 Electrode Current						CDC7	0x66	0x00	
ELE8 Electrode Current						CDC8	0x67	0x00	
ELE9 Electrode Current						CDC9	0x68	0x00	
ELE10 Electrode Current						CDC10	0x69	0x00	
ELE11 Electrode Current						CDC11	0x6A	0x00	
ELEPROX Electrode Current						CDC12	0x6B	0x00	
ELE0, ELE1 Charge Time			CDT1			CDT0	0x6C	0x00	
ELE2, ELE3 Charge Time			CDT3			CDT2	0x6D	0x00	
ELE4, ELE5 Charge Time			CDT5			CDT4	0x6E	0x00	
ELE6, ELE7 Charge Time			CDT7			CDT6	0x6F	0x00	
ELE8, ELE9 Charge Time			CDT9			CDT8	0x70	0x00	
ELE10, ELE11 Charge Time			CDT11			CDT10	0x71	0x00	
ELEPROX Charge Time						CDT12	0x72	0x00	
GPIO Control Register 0						CTL0	0x73	0x00	
GPIO Control Register 1						CTL1	0x74	0x00	
GPIO Data Register						DAT	0x75	0x00	
GPIO Direction Control Register						DIR	0x76	0x00	
GPIO Enable Register						EN	0x77	0x00	
GPIO Data Set Register						SET	0x78	0x00	
GPIO Data Clear Register						CLR	0x79	0x00	
GPIO Data Toggle Register						TOG	0x7A	0x00	
AUTO-CONFIG Control Register 0	AFES		RETRY		BVA	ARE	ACE	0x7B	0x00
AUTO-CONFIG Control Register 1	SCTS				ORIE	ARFIE	ACFIE	0x7C	0x00
AUTO-CONFIG USL Register								0x7D	0x00
AUTO-CONFIG LSL Register								0x7E	0x00
AUTO-CONFIG Target Level Register								0x7F	0x00
Soft Reset Register						SRST		0x80	0x00
Factory Reserved Region(0x81~0xFF)								-	-

Register Operation

1. General Rules

Note: After completing power on reset (POR) or soft reset by command, MPR121 all registers are in default reset initial value (see Table 1). All the registers are cleared, except AFE Configuration Registers 0x5C (Default 0x10) and 0x5D (Default 0x24).

MPR121 reset default mode is Stop Mode without any capacitance measurement. Set MPR121 into Run Mode by configuring ECR register (0x5E) so that least one of the 13 measurement channels is enabled. Set MPR121 into Stop Mode by writing 2bXX000000 to ECR register at any time. For all the registers, the current value can be read at any time.

Note: Registers write operation can only be done after MPR121 is set into Stop Mode, except the ECR and GPIO/LED related registers, which means changing the value of these registers while MPR121 is in Run Mode will not be effective.

Registers from address 0x00 to 0x2A are the output registers which are updated periodically when MPR121 is in Run Mode. While Baseline Value Registers 0x1D to 0x2A are the internal output baseline registers, these registers are also writeable to user, this is useful if customer setting targets as the initial baseline tracking start points is desired.

Registers from address 0x2B to 0x7F are control and configuration registers, which need to be correctly configured and initialized to start the capacitance measurement and touch detection.

MPR121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการก Sensor

2. Touch Status Registers (0x00~0x01)

ELE0 - ELE7 Touch Status (0x00)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	E7TS	E6TS	E5TS	E4TS	E3TS	E2TS	E1TS	E0TS
Write								

ELE8 – ELE12 Touch Status (0x01)

Read	OVCF	0	0	E12TS	E11TS	E10TS	E9TS	E8TS
Write	1							

These two registers indicate touch/release status of each electrode. ELE12 is the status for the “13th” **Electrode Proximity Detection (ELEPROX)**. The update rate of these status bits will be {ESI x SFI}.

ExTS: Touch or Release status bit of each respective channel (Read only).

- 1, the respective channel is currently deemed as touch.
- 0, the electrode is deemed as release.

Note: When a GPIO is enabled as input port and the pin is not configured as an electrode, the corresponding status bit shows the input level. This feature is for ELE4~ELE11 only. These GPIO status change will not cause any IRQ interrupt.

OVCF: Over Current Flag (Read and Write)

- 1, over current was detected on REXT pin.
- 0, normal condition

When over current detected, the OVCF is set and MPR121 goes to Stop Mode immediately. The ExTS bits in status registers, output registers 0x04~0x2A, and bit D5~D0 in ECR will be also cleared on over current condition. When the bit is “1”, writing ECR register to enter Run mode will be discarded.

Write “1” to OVCF will clear this bit and MPR121 fault condition is cleared so that MPR121 can be configured into Run Mode again.

3. Electrode Data Register (0x04~0x1D)

Electrode Data Low Byte ExFDL and High Byte ExFDH

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	ExFD7	ExFD6	ExFD5	ExFD4	ExFD3	ExFD2	ExFD1	ExFD0
Write								

Read	0	0	0	0	0	0	ExFD9	ExFD8
Write								

ExFDL, ExFDH: Each of the 13 channels has a low byte and a high byte registers to store a 10bit output electrode data, which is the 2nd level filter filtered data output. The data range is 0~1024 or 0x000~0x400 in Hex. Low byte ExFDL holds the lower 8 bits D0~D7, and high byte ExFDH holds the higher 2 bits D8 and D9.

These registers are read only and updated every {ESI x SFI}. A multi byte read operation to read both LSB and MSB is required to keep the data coherency (LSB and MSB matching).

A multi byte reading of 0x00 thru 0x2A returns results of a single moment (never mixed-up old and new).

4. Baseline Value Register (0x1E~0x2A)

Electrode Baseline Value

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	ExBV9	ExBV8	ExBV7	ExBV6	ExBV5	ExBV4	ExBV3	ExBV2
Write								

ExBV: The 3rd level filter is used as the baseline filter for touch detection with an output of a 10bit baseline value. Baseline Value Register holds the high 8 bits of the internal 10bit baseline value for each of the 13 channels.

CL bits from ECR register (0x5E) specify the update operation of these registers. The update rate of these registers is {ESI x SFI}.

User can write it in Stop Mode and the write operation will clear lower 2 bits of the internal 10bits value.

MPR121

Sensor

5. Baseline Filtering Control Register (0x2B~0x40)

Background baseline value tracking is operated by the internal 3rd level filter controlled by registers 0x2B to 0x40. All the 12 electrodes' baseline are controlled by the same set of registers 0x2B to 0x35, while the 13th channel ELEPROX is controlled by another independent set of registers 0x36 to 0x40.

Both above two sets have the same structure using 3 different scenarios called rising, falling, and touched. The rising situation is defined when electrode data > baseline value, the falling is defined when electrode data < baseline value, and the touched is when the electrode is in touched status.

For each scenario, the filtering characteristic is further defined by 4 parameters: the maximum half delta, noise half delta, noise count limit and filter delay count limit. There is no maximum half delta for touched scenario.

Maximum Half Delta (MHD): Determines the largest magnitude of variation to pass through the baseline filter. The range of the effective value is 1~63.

Noise Half Delta (NHD): Determines the incremental change when non-noise drift is detected. The range of the effective value is 1~63.

Noise Count Limit (NCL): Determines the number of samples consecutively greater than the Max Half Delta necessary before it can be determined that it is non-noise. The range of the effective value is 0~255.

Filter Delay Count Limit (FDL): Determines the rate of operation of the filter. A larger number makes it operate slower. The range of the effective value is 0~255.

The setting of the filter is depended on the actual application. For the details on how to set these registers, refer to application note AN3891.

6. Touch and Release Threshold (0x41~0x5A)

Touch Threshold ExTTH

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	ExTTH							
Write								

Release Threshold ExRTH

Read	ExRTH							
Write								

ExTTH, ExRTH: Each of the 13 channels has its own set of touch threshold and release threshold registers. The threshold is defined as a deviation value from the baseline value, so it remains constant even baseline value changes. Typically the touch threshold is a little bigger than the release threshold to touch debounce and hysteresis.

The range of the value is 0~255. For typical touch application, the value can be in range 0x05~0x30 for example. The setting of the threshold is depended on the actual application. For the operation details and how to set the threshold refer to application note AN3892 and MPR121 design guidelines.

7. Debounce Register (0x5B)

Touch and Release Debounce

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	0	DR				0	DT	
Write								

The register holds debounce setting affecting the final touch and release status change in 0x00 and 0x01. The status change will only take place after the number of consecutive touch or release detection meets the debounce number. If the number detected does not meet the debounce number, the status will not change.

DT: Debounce number for touch. The value range is 0~7.

DR: Debounce number for release. The value range is 0~7.

When an electrode data deems consecutive touch with the debounce number, the status becomes "touch". When an electrode data deems consecutive release with the debounce number, the status becomes "release". The status appears on Status Register with a delay of {ESI x SFI x DR (or DT)}.

8. AFE Configuration Register (0x5C, 0x5D)

AFE Configuration 1 Register (0x5C), default =0x10

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	FFI		CDC					
Write	FFI		CDC					

This register holds the first level filter configuration, and the charge current global setting for all 13 channels. For each channel the global CDC will be used if the individual charge discharge current CDCx is zero. If there is none zero data in 0x5F~0x6B, then this individual CDCx value will be used for that respective channel instead of the global CDC value.

Field	Description
7:6 FFI	First Filter Iterations – The first filter iterations field selects the number of samples taken as input to the first level of filtering. 00 Encoding 0 – Sets samples taken to 6 (Default) 01 Encoding 1 – Sets samples taken to 10 10 Encoding 2 – Sets samples taken to 18 11 Encoding 3 – Sets samples taken to 34
5:0 CDC	Charge Discharge Current – The Charge Discharge Current field selects the supply current to be used when charging and discharging an electrode. Programmable in 1uA step. 000000 Encoding 0 – Disables Electrode Charging?? 000001 Encoding 1 – Sets the current to 1µA ~ 010000 Encoding 16 – Sets the current to 16µA (Default) ~ 111111 Encoding 63 – Sets the current to 63 µA

AFE Configuration 2 Register (0x5D), default =0x24

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	CDT		SFI		ESI			
Write	CDT		SFI		ESI			

This register holds global charge and discharge time setting, and the second level filter configuration. The CDT bits set the charge/discharge time global setting for all the 13 channels. For each channel the global CDT will be used if the individual charge discharge time CDTx is zero. If there is none zero data in 0x6C~0x72, then this individual CDTx value will be used for that respective channel instead of the global CDT value.

Field	Description
7:5 CDT	Charge Discharge Time – selects the amount of time an electrode charges. Programmable to $0.5 (2^{n-1}) \mu S$ 000 Encoding 0 – Invalid 001 Encoding 1 – Time is set to 0.5 µs (Default) 010 Encoding 2 – Time is set to 1 µs ~ 111 Encoding 7 – Time is set to 32 µs
4:3 SFI	Second Filter Iterations – selects the number of samples taken for the second level filter. 00 Encoding 0 – Number of samples is set to 4 (Default) 01 Encoding 1 – Number of samples is set to 6 10 Encoding 2 – Number of samples is set to 10 11 Encoding 3 – Number of samples is set to 18
2:0 ESI	Electrode Sample Interval – selects the period between samples used for the second level of filtering. Programmable to $2^n ms$. 000 Encoding 0 – Period set to 1 ms 001 Encoding 1 – Period set to 2 ms ~ 100 Encoding 4 – Period set to 16 ms (Default) ~ 111 Encoding 7 – Period set to 128 ms

9. Individual Charge Current Register (0x5F~0x6B)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	0		CDCx					
Write								

These registers hold the individual Charge/Discharge Current (CDCx) value for each channel if CDC global value is not used. The parameter setting is similar to the CDC. The power on reset default of these registers is all zeros.

Field	Description
5:0 CDCx	Individual Charge Discharge Current – The Individual Charge Discharge Current field selects the supply current to be used when charging and discharging a specific channel. Programmable in 1uA step. 000000 Encoding 0 – Global CDC is used if this channel is enabled (Default). 000001 Encoding 1 – Sets the current to 1µA, global CDC is not used ~ 010000 Encoding 16 – Sets the current to 16µA, global CDC is not used ~ 111111 Encoding 63 – Sets the current to 63µA, global CDC is not used

If the CDCx is zero, then the global value is used. If there is none zero data in 0x5F~0x6B, then the individual value will be used for this respective channel instead of the global CDC value.

If auto configuration is enabled and run once, the individual CDC will be automatically updated by MPR121 internally after auto configuration is finished.

10. Individual Charge Time Register (0x6C~0x72)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	0		CDTx'			0		CDTx
Write								

These registers hold the individual Charge/Discharge Time (CDTx) value for each channel if CDT global value is not used. The parameter setting is similar to the CDT. The power on reset default of these registers is all zeros.

Field	Description
7:5 CDTx	Individual Charge Discharge Time – selects the amount of charge time for individual channels. Programmable to 0.5 (2 ⁿ⁻¹) uS 000 Encoding 0 – Global CDT is used if this channel is enabled (Default) 001 Encoding 1 – Time is set to 0.5µs, global CDT is not used 010 Encoding 2 – Time is set to 1µs, global CDT is not used ~ 111 Encoding 7 – Time is set to 32µs, global CDT is not used

If the CDTx is zero, then the global value is used. If there is none zero data in 0x6C~0x72, then the individual value will be used for this respective channel instead of the global CDT value.

If auto configuration and SCTS bit in Auto Configuration Register 1 (0x7B) are enabled and run once, the individual CDTx will be automatically updated by MPR121 internally after auto configuration is finished.

11. Electrode Configuration Register (ECR, 0x5E)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	CL[1:0]		ELEPROX[1:0]		ELE[3:0]			
Write	CL[1:0]		ELEPROX[1:0]		ELE[3:0]			

This register selects measurement electrodes and proximity detection electrode configurations, and controls MPR121 in Run Mode or Stop Mode. MPR121 reset default is in Stop Mode without any capacitance measurement.

To start capacitance measurement and touch detection, set into Run Mode by selecting the sensing inputs to be enabled. MPR121 can be set into Stop Mode by writing 2bXX000000 to ECR at any time.

CL: Calibration Lock bit. The CL bits controls the Baseline Value Register update. Typically CL=2b10 is used so the baseline value can be initialized at the beginning stage with a value close to the immediate data instead of starting from zero. Since the 3rd level filter has a big time constant, starting from zero may cause a long time of no response with touch.

CL[1:0]	Description
00	Baseline tracking enable (Default). The baseline values updates every {ESI x SFI} period by MPR121 per baseline filter operation. The initial value is?????
01	Calibration lock. Baseline tracking disabled. Baseline values are unchanged by MPR121.
10	Baseline tracking and initialize enable. At the first {ESI x SFI}, MPR121 copy 5MSBs of the 2 nd filter output to 10bit baseline value (5LSBs become zero). Subsequent update is per nominal baseline filter operation.
11	Baseline tracking and initialize enable. At the first {ESI x SFI}, MPR121 copy the 2 nd filter output to 10bit baseline value. Subsequent update is per nominal baseline filter operation.

ELE[3:0]	Description
0000	Electrode touch detection disabled (Default)
0001	Run Mode with ELE0 measurement enabled.
0010	Run Mode with ELE0~1 measurement enabled.
0011	Run Mode with ELE0~2 measurement enabled.
0100	Run Mode with ELE0~3 measurement enabled.
0101	Run Mode with ELE0~4 measurement enabled.
0110	Run Mode with ELE0~5 measurement enabled.
0111	Run Mode with ELE0~6 measurement enabled.
1000	Run Mode with ELE0~7 measurement enabled.
1001	Run Mode with ELE0~8 measurement enabled.
1010	Run Mode with ELE0~9 measurement enabled.
1011	Run Mode with ELE0~10 measurement enabled.
11xx	Run Mode with ELE0~11 measurement enabled.

ELEPROX[1:0]	Description
00	Proximity detection disabled(Default)
01	Run Mode with ELE0~1 for proximity detection enabled.
10	Run Mode with ELE0~3 for proximity detection enabled.
11	Run Mode with ELE0~11for proximity detection enabled.

When both ELEPROX and ELE are none zero, proximity detection measures first then measures electrode(s). When both ELEPROX and ELE are cleared, MPR121 will be back to Stop Mode.

ELE: When ELECON ≠ 0, electrode touch detection with specific electrodes is enabled

ELEPROX: When ELEPROXCON≠ 0, proximity detection with specific electrodes combination is enabled

12. Auto Configuration Registers (0x7B~0x7F)

In real application, the capacitance on each of the 13 channels can be various very differently depending on the electrode pattern, size, overlay and base material dielectric constant used for each channel. For example, the proximity channel ELEPROX may have a quite larger capacitance than the other individual electrode. The global CDC and CDT value may not fit all the channels in these cases that the charge is either not strong enough to detect weak capacitance change or too big that overflow the ADC detectable range.

To optimize the charge setting for each channel, the individual CDCx (I), CDTx (T) need to be properly set if the channel difference is large. There will be total 26 parameters need to be set if 13 channels are all used. This may consume a lot of time on trial and test with all possible combinations of different electrode pattern, size, overlay and base material dielectric constant, charge current value and charge time value used.

However, with auto-configuration, this task can be easily done by MPR121 automatically inside with binary search process on proper CDCx(I) and CDTx(T) combination so the charge level is as close to a target level as possible. Normally the target charge level (I x T) may be simply put at close to the input linear upper limit so the highest charge field can be produced to detect weak capacitance change. The upper limit and lower limit levels are also needed to provide the necessary searching boundaries. After auto configuration, the proper CDCx and CDTx for each channel are found and automatically filled.

The AUTO-CONFIG runs only once at first transition from Stop Mode to Run Mode. The AUTO-RECONFIG is supplements of AUTO-CONFIG. If electrode data goes out of valid range during normal measurement, AUTO-RECONFIG starts binary search for that electrode.

There are 5 registers in this group. Register 0x07D to 0x07F provided the configuration target settings. Registers 0x7B and 0x7C are the auto configuration control registers. Refer to application note AN3889 for details on how to set these registers.

Upper Side Limit Register (0x7D)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	USL							
Write								

Lower Side Limit Register (0x7E)

Read	LSL							
Write								

Target Level Register (0x7F)

Read	TL							
Write								

Note similar to the baseline value, all the three parameters are in the 8bit format but internally treated as the 8MSB of 10bit data.

USL: Upper Side Limit. This value makes sure that the electrode data level is below the linear upper limit range $VDD-0.7V$. Typically the USL is set at the maximum linear limit.

$$USL = (VDD-0.7) / VDD \times 256$$

LSL: Lower Side Limit. This value results the lower limit for the electrode data. To make sure the touched electrode data still in the limit, the LSL should be low enough to prevent unnecessary out of range error. In a typical touch application, for example, the LSL can be set at 65% of the USL, that is

$$LSL = (VDD-0.7) / VDD \times 256 \times 0.65$$

TL: Target Level is the expected target electrode data level when untouched after auto configuration. MPR121 executes binary search on the proper setting of the charge current and/or charge time for each channel to hit the target level as close as possible. The TL shall be in between the Upper Side Limit (USL) and Lower Side Limit (LSL), and should be as high as possible to maximize the sensing charge field to get the maximum touch response.

Note the linear input range for ADC is limited from $VDD-0.7$ to $0.7V$ for each channel. To anticipate possible capacitance decrease range and VDD variation, for example, a typical setting for TL is 90% of the USL, that is

$$TL = USL \times 0.9 = (VDD-0.7) / VDD \times 256 \times 0.9$$

If a searching result is outside the range limited by USL and LSL, an Out Of Range (OOR) error will be reported at the end of auto configuration (refer to next section). Set the USL and TL as close to the linear upper input limit as possible will result the highest possible charge to detect weak capacitance change. **Note** in case where VDD is changing, the lowest VDD value shall be used to prevent OOR error.

MPR121

Sensor

Auto Configuration Register 0 (0x7B)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	AFES		RETRY		BVA		ARE	ACE
Write								

ACE: 1: Enable AUTO-CONFIG, 0: Disable AUTO-CONFIG

ARE: 1: Enable AUTO-RECONFIG, 0: Disable AUTO-RECONFIG

BVA: Baseline Value Adjust Control specifies how to change baseline value for each channel upon finishing auto configuration and auto re-configuration.

00: Baseline value is no change,

01: Baseline value is cleared to zero,

10: Baseline is set to the AUTO-CONFIG baseline value with 5MSBs loaded and the other lower bits cleared,

11: Baseline is set to the AUTO-CONFIG baseline value

RETRY: MPR121 may retry AUTO-CONFIG or AUTO-RECONFIG after failed.

00: no retry,

01: 2 times,

10: 4 times,

11: 8 times.

AFES: This bit specifies AFE Samples during binary search. The AFES values should be as same as global AFES in ACR register, otherwise AUTO-CONFIG couldn't configure CDCx/CDTx correctly.

00: 6 samples,

01: 10 samples,

10: 18 samples,

11: 34 samples.

Auto Configuration Register 1 (0x7C)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
Read	SCTS		0	0	0	0	OORIE	ARFIE	ACFIE
Write									

SCTS: 1: Skip Charge Time Search during binary search. User should specify charge time through global value CDT or individual value CDTx in respective registers. 0: Charge Time Search is executed during binary search.

ACFIE: 1: AUTO-CONFIG Fail Interrupt Enable, 0: AUTO-CONFIG Fail will not cause interrupt.

ARFIE: 1: AUTO-RECONFIG Fail Interrupt Enable, 0: AUTO-RECONFIG fail will not cause interrupt.

OORIE: 1: Out of Range Interrupt Enable, 0: Out of Range error will not cause Interrupt.

13. Out Of Range Status Registers (0x02, 0x03)

MPR121 checks electrode data after AUTO-CONFIG/AUTO-RECONFIG operation and also in normal measurement. When electrode data goes out of a range, corresponding OORx bits in the OOR0 and OOR1 Registers become "1" to indicate failed electrode. One possible example of triggering OOR error may be caused by shorting one of the measurement channels to ground. The valid range can be programmed through USL Register and LSL Register. Those bits are cleared when passed AUTO-CONFIG, AUTO-RECONFIG or range check. These two register is read only, user can't change the contents.

OUT OF RANGE Register 0 (0x02)

Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Read	OOR7	OOR6	OOR5	OOR4	OOR3	OOR2	OOR1	OOR0
Write								

OUT OF RANGE Register 1 (0x03)

Read	ACFF	ARFF	0	OOR12	OOR11	OOR10	OOR9	OOR8
Write								

OORx: 1: OOR error detected on respective channel, 0: No OOR error.

ACFF: AUTO-CONFIG Fail Flag. When AUTO-CONFIG failed, this bit set.

ARFF: AUTO-RECONFIG Fail Flag. When AUTO-RECONFIG failed this bit set.

14. GPIO Registers (0x73~0x7A)

These registers control GPIO function. D7~D0 bits corresponds to GPIO7 ~ GPIO0 on pins ELE11/LED7 ~ ELE4/LED0 respectively. The GPIO control registers can write always regardless Stop and Run mode. The configuration of the LED driver and GPIO system is described with more detail in application note AN3894.

When the ports are not used for electrode sensing, they can be used for GPIO pins to be set as input or output, and can be used to drive LED.

Note: The number of touch sensing electrodes, and therefore the number of GPIO ports left available is configured by the Electrode Configuration register (0x5E) and GPIO Enable Register (0x77), but electrode configuration has higher priority than GPIO feature. When a pin is enabled as GPIO but is also selected as electrode by Electrode Configuration Register, the GPIO function is disabled immediately and it becomes an electrode during Run Mode.

During the Stop Mode just after power on reset, all electrodes and GPIO ports are in high impedance as all the GPIO ports and are default disabled and the electrodes are not enabled.

GPIO Registers (0x73~0x7A)

Name	Address	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
GPIO Control 0	0x73	CTL0[7]	CTL0[6]	CTL0[5]	CTL0[4]	CTL0[3]	CTL0[2]	CTL0[1]	CTL0[0]
GPIO Control 1	0x74	CTL1[7]	CTL1[6]	CTL1[5]	CTL1[4]	CTL1[3]	CTL1[2]	CTL1[1]	CTL1[0]
GPIO Data	0x75	DAT[7]	DAT[6]	DAT[5]	DAT[4]	DAT[3]	DAT[2]	DAT[1]	DAT[0]
GPIO Direction	0x76	DIR[7]	DIR[6]	DIR[5]	DIR[4]	DIR[3]	DIR[2]	DIR[1]	DIR[0]
GPIO Enable	0x77	EN[7]	EN[6]	EN[5]	EN[4]	EN[3]	EN[2]	EN[1]	EN[0]
GPIO Data Set	0x78	SET[7]	SET[6]	SET[5]	SET[4]	SET[3]	SET[2]	SET[1]	SET[0]
GPIO Data Clear	0x79	CLR[7]	CLR[6]	CLR[5]	CLR[4]	CLR[3]	CLR[2]	CLR[1]	CLR[0]
GPIO Data Toggle	0x7A	TOG[7]	TOG[6]	TOG[5]	TOG[4]	TOG[3]	TOG[2]	TOG[1]	TOG[0]

EN, DIR, CTL0, CTL1: GPIO Enable and Input/Output Configuration Bits

When an EN bit sets, the corresponding GPIO pin is enabled and the function is configured by CTL0, CTL1 and DIR bits.

When the port is used as input, it can be configured as normal logic input with high impedance (CTL0CTL1=2b00) or input with additional internal pull-down (CTL0CTL1=2b10) or pull-up (CTL0CTL1=2b11), note the former may result unstable logic input state if opened without fixed logic level input.

For output configuration, it can be push/pull (CTL0CTL1=2b00) or open drain.

EN	DIR	CTL0:CTL1	DESCRIPTION
0	X	XX	GPIO function is disabled. Port is high impedance state if not enabled for electrode either.
1	0	00	GPIO port becomes input port.
1	0	10	GPIO port becomes input port with internal pull-down.
1	0	11	GPIO port becomes input port with internal pull-up.
1	0	01	Not defined yet (as same as CTL0:CTL1 = 00).
1	1	00	GPIO port becomes CMOS output port.
1	1	11	GPIO port becomes open drain output port with only high side MOS.
1	1	10	GPIO port becomes open drain output port with only low side MOS.
1	1	01	Not defined yet (as same as CTL0:CTL1 = 00).

DAT: GPIO Data bits

When a GPIO is enabled as output, the GPIO port outputs the corresponding DAT bit level from GPIO Data Register (0x075). The output level toggle holds on during any electrode charging and AD conversion and the level transition will be occurred after the AD conversion. Reading this register returns the content of the GPIO Data Register (not a level of the port).

When a GPIO is configured as input, reading this register returns latched input level of the corresponding port (not contents of the GPIO Data Register). A write changes content of the register, but not affect to the input function.

SET, CLR, TOG: Manipulate GPIO Data Register Content

Write a bit with "1" to the GPIO Data Set Register, GPIO Data Clear Register, and GPIO Data Toggle Register will set/clear/toggle contents of the corresponding DAT bit in Data Register. Write "0" has no meaning. Using of those registers allows any individual port(s) to be able individually set, cleared, or toggled without affecting other ports. Reading those register returns as same as GPIO Data Register reading.

15. Software Reset Register (0x80)

Write 0x80 with 0x63 asserts soft reset. The soft reset doesn't affect I²C module, but all others reset as same as POR.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings are stress ratings only, and functional operation at the maxima is not guaranteed. Stress beyond the limits specified in Table 2 may affect device reliability or cause permanent damage to the device. For functional operating conditions, refer to the remaining tables in this section. This device contains circuitry protecting against damage due to high static voltage or electrical fields; however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltages higher than maximum-rated voltages to this high-impedance circuit.

Table 2. Absolute Maximum Ratings - Voltage (with respect to V_{SS})

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V_{DD}	-0.3 to +3.6	V
Supply Voltage	V_{REG}	-0.3 to +2.75	V
Input Voltage SCL, SDA, IRQ	V_{IN}	$V_{SS} - 0.3$ to $V_{DD} + 0.3$	V
Operating Temperature Range	T_O	-40 to +85	°C
GPIO Source Current per Pin	I_{GPIO}	12	mA
GPIO Sink Current per Pin	I_{GPIO}	1.2	mA
Storage Temperature Range	T_S	-40 to +125	°C

ESD AND LATCH-UP PROTECTION CHARACTERISTICS

Normal handling precautions should be used to avoid exposure to static discharge.

Qualification tests are performed to ensure that these devices can withstand exposure to reasonable levels of static without suffering any permanent damage. During the device qualification ESD stresses were performed for the Human Body Model (HBM), the Machine Model (MM) and the Charge Device Model (CDM).

A device is defined as a failure if after exposure to ESD pulses the device no longer meets the device specification. Complete DC parametric and functional testing is performed per the applicable device specification at room temperature followed by hot temperature, unless specified otherwise in the device specification.

Table 3. ESD and Latch-up Test Conditions

Rating	Symbol	Value	Unit
Human Body Model (HBM)	V_{ESD}	±2000	V
Machine Model (MM)	V_{ESD}	±200	V
Charge Device Model (CDM)	V_{ESD}	±500	V
Latch-up current at $T_A = 85^\circ\text{C}$	I_{LATCH}	±100	mA

DC CHARACTERISTICS

This section includes information about power supply requirements and I/O pin characteristics.

Table 4. DC Characteristics

(Typical Operating Circuit, $V_{DD} = V_{REG} = 1.8\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
High Supply Voltage	V_{DD}		2.0	3.3	3.6	V
Low Supply Voltage	V_{REG}		1.71	1.8	2.75	V
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 1 ms sample interval		393		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 2 ms sample interval		199		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 4 ms sample interval		102		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 8 ms sample interval		54		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 16 ms sample interval		29		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 32 ms sample interval		17		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 64 ms sample interval		11		μA
Average Supply Current	I_{DD}	Run1 Mode @ 128 ms sample interval		8		μA
Measurement Supply Current	I_{DD}	Peak of measurement duty cycle		1		mA
Idle Supply Current	I_{DD}	Stop Mode		3		μA
Input Leakage Current ELE_	I_{IH}, I_{IL}			0.025		μA
Input Capacitance ELE_					15	pF
Input High Voltage SDA, SCL	V_{IH}		$0.7 \times V_{DD}$			V
Input Low Voltage SDA, SCL	V_{IL}				$0.3 \times V_{DD}$	V
Input Leakage Current SDA, SCL	I_{IH}, I_{IL}			0.025	1	μA
Input Capacitance SDA, SCL					7	pF
Output Low Voltage SDA, $\overline{\text{IRQ}}$	V_{OL}	$I_{OL} = 6\text{ mA}$			0.5V	V
Output High Voltage ELE4 - ELE11 (GPIO mode)	V_{OHGPIO}	$V_{DD} = 2.7\text{ V to } 3.6\text{ V}: I_{OHGPIO} = -10\text{ mA}$ $V_{DD} = 2.3\text{ V to } 2.7\text{ V}: I_{OHGPIO} = -6\text{ mA}$ $V_{DD} = 1.8\text{ V to } 2.3\text{ V}: I_{OHGPIO} = -3\text{ mA}$	$V_{DD} - 0.5$			V
Output Low Voltage ELE4 - ELE11 (GPIO mode)	V_{OLGPIO}	$I_{OLGPIO} = 1\text{ mA}$			0.5	V
Power On Reset	V_{TLH}	V_{DD} rising	1.08	1.35	1.62	V
	V_{THL}	V_{DD} falling	0.88	1.15	1.42	V

AC CHARACTERISTICS

Table 5. AC CHARACTERISTICS

(Typical Operating Circuit, V_{DD} and $V_{REG} = 1.8\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
8 MHz Internal Oscillator	f_H		7.44	8	8.56	MHz
1 kHz Internal Oscillator	f_L		0.65	1	1.35	kHz

I²C AC CHARACTERISTICS

Table 6. I²C AC Characteristics

(Typical Operating Circuit, V_{DD} and V_{REG} = 1.8 V, T_A = 25°C, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Serial Clock Frequency	f _{SCL}				400	kHz
Bus Free Time Between a STOP and a START Condition	t _{BUF}		1.3			μs
Hold Time, (Repeated) START Condition	t _{HD, STA}		0.6			μs
Repeated START Condition Setup Time	t _{SU, STA}		0.6			μs
STOP Condition Setup Time	t _{SU, STO}		0.6			μs
Data Hold Time	t _{HD, DAT}				0.9	μs
Data Setup Time	t _{SU, DAT}		100			ns
SCL Clock Low Period	t _{LOW}		1.3			μs
SCL Clock High Period	t _{HIGH}		0.7			μs
Rise Time of Both SDA and SCL Signals, Receiving	t _R			20+0.1C _b	300	ns
Fall Time of Both SDA and SCL Signals, Receiving	t _F			20+0.1C _b	300	ns
Fall Time of SDA Transmitting	t _{F, TX}			20+0.1C _b	250	ns
Pulse Width of Spike Suppressed	t _{SP}			25		ns
Capacitive Load for Each Bus Line	C _b				400	pF

SERIAL COMMUNICATION

Introduction

The MPR121 uses an I²C Serial Interface. The MPR121 operates as a slave that sends and receives data through an I²C 2-wire interface. The interface uses a Serial Data Line (SDA) and a Serial Clock Line (SCL) to achieve bi-directional communication between master(s) and slave(s). A master (typically a microcontroller) initiates all data transfers to and from the MPR121, and it generates the SCL clock that synchronizes the data transfer.

The MPR121 SDA line operates as both an input and an open-drain output. A pull-up resistor, typically 4.7 kΩ, is required on SDA. The MPR121 SCL line operates only as an input. A pull-up resistor, typically 4.7 kΩ, is required on SCL if there are multiple masters on the 2-wire interface, or if the master in a single-master system has an open-drain SCL output.

The I²C timing parameter is shown as below.

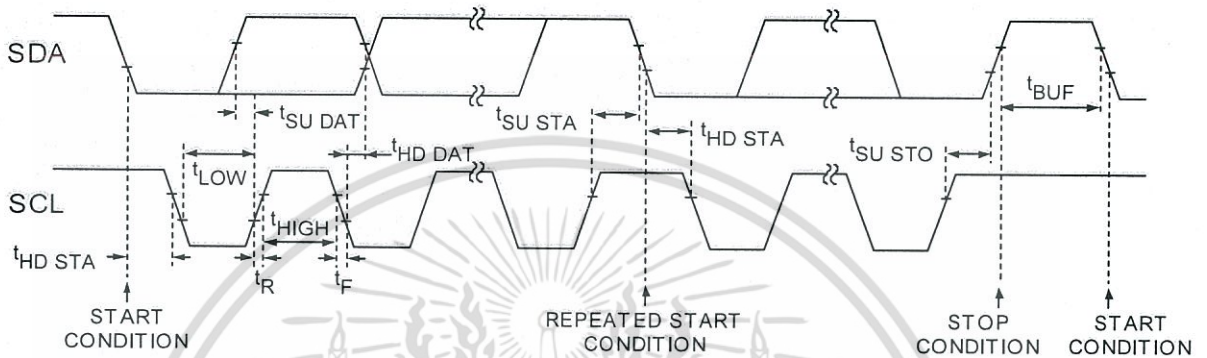


Figure 6. Serial Interface Timing Details

Start and Stop Conditions

Each transmission consists of a START (S) condition signaled by a master, followed by the MPR121's 7-bit slave address plus R/W bit, a register address byte, one or more data bytes, and finally a STOP (P) condition (Figure 7). Both SCL and SDA remain high when the interface is not busy. A master signals the beginning of a transmission with a START (S) condition by transitioning SDA from high to low while SCL is high. When the master has finished communicating with the slave, it issues a STOP (P) condition by transitioning SDA from low to high while SCL is high. The bus is then free for another transmission.

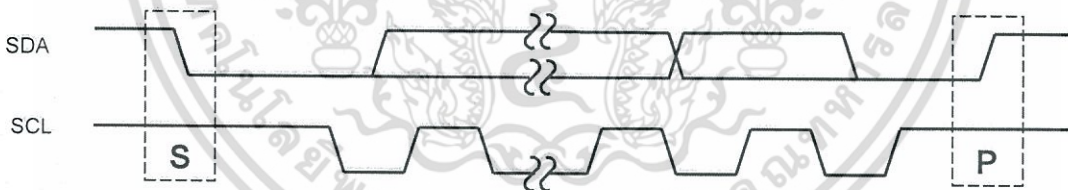


Figure 7. Start and Stop conditions

Bit Transfer

One data bit is transferred during each clock pulse (Figure 8). The data on SDA must remain stable while SCL is high.

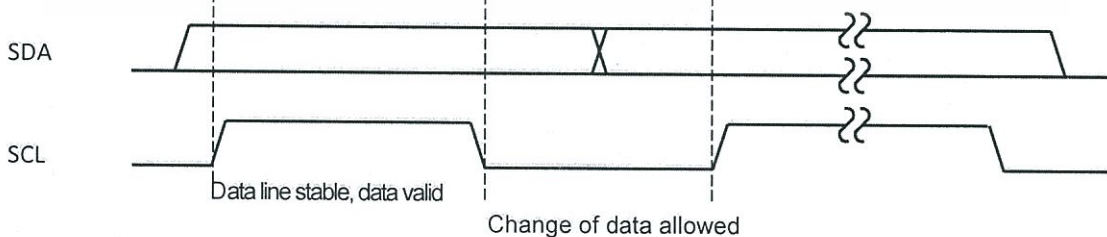


Figure 8. Bit Transfer

Operation with Multiple Masters

The application should use repeated starts to address the MPR121 to avoid bus confusion between I²C masters. On an I²C bus, once a master issues a start/repeated start condition, that master owns the bus until a stop condition occurs. If a master that does not own the bus attempts to take control of that bus, then improper addressing may occur. An address may always be rewritten to fix this problem. Follow I²C protocol for multiple master configurations.

MPR121 Slave Address and R/W bit

MPR121 use a 7-bit format slave address which is pin configurable by ADDR pin connection. The MPR121 slave addresses can be configured as shown in Table 7.

Table 7.

ADDR Pin Connection	I ² C Address
VDD	0x5A
VSS	0x5B
SDA	0x5C
SCL	0x5D

The MPR121 monitors the bus continuously, waiting for a START condition followed by its slave address. The bit following the 7-bit slave address (the 8th bit) is the R/W bit, which is low for a write command and high for a read command (Figure 9). When a MPR121 recognizes its slave address, it acknowledges and is then ready for continued communication.

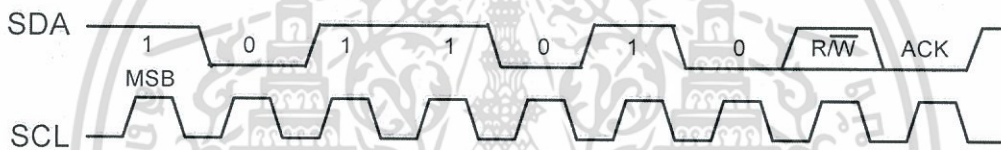


Figure 9. Slave Address

Acknowledge

The acknowledge bit is a clocked 9th bit (Figure 11) which the recipient uses to handshake receipt of each byte of data. Thus each byte transferred effectively requires 9 bits. The master generates the 9th clock pulse, and the recipient pulls down SDA during the acknowledge clock pulse, such that the SDA line is stable low during the high period of the clock pulse. When the master is transmitting to the MPR121, the MPR121 generates the acknowledge bit, since the MPR121 is the recipient. When the MPR121 is transmitting to the master, the master generates the acknowledge bit, since the master is the recipient.

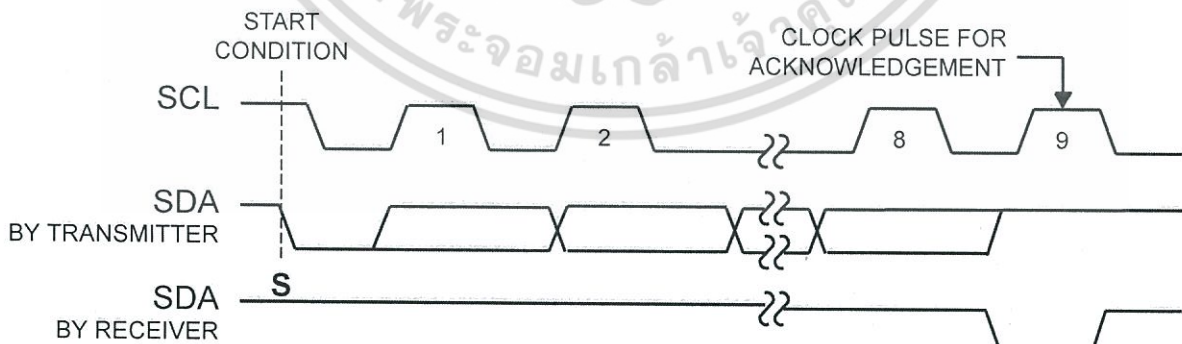


Figure 10. Acknowledge

Write Format

A write to the MPR121 comprises the transmission of the MPR121's slave address with the \overline{RW} bit set to 0, followed by at least one byte of information. The first byte of information is the command byte. The command byte determines which register of the MPR121 is to be written by the next byte, if received. If a STOP condition is detected after the command byte is received, the command byte is just stored in the register pointer and the MPR121 takes no further action (Figure 11) beyond storing the command byte.

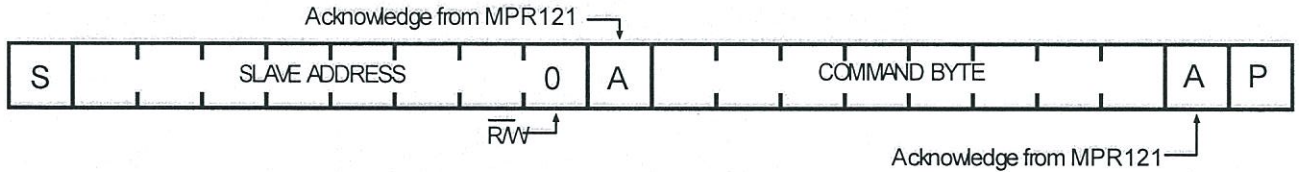


Figure 11. Write format with command byte only

Any bytes received after the command byte are data bytes. The first data byte goes into the internal register of the MPR121 selected by the command byte (Figure 12). If multiple data bytes are transmitted before a STOP condition is detected, these bytes are generally stored in subsequent MPR121 internal registers because the command byte address generally auto-increments (see Table 1) for the address auto-increment change.

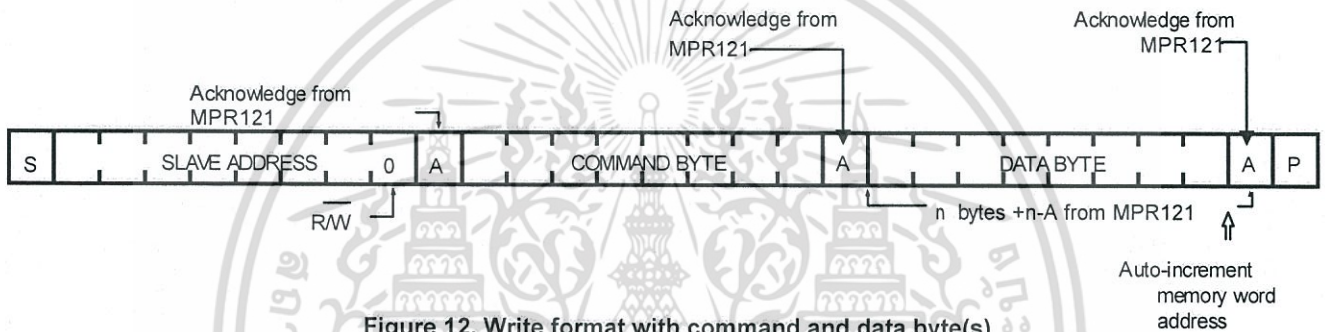


Figure 12. Write format with command and data byte(s)

Read Format

MPR121 is read using MPR121's internally register pointer, the same way the stored register address is used as address pointer for a write. The pointer generally auto-increments after each data byte is read using the same rules as for a write. Thus, a read is initiated by first configuring MPR121's register address by performing a write command byte (Figure 13) followed by a repeated start (Sr). The master can now read 'n' consecutive bytes from MPR121, with first data byte being read from the register addressed by the initialized register address, and ending the read by a not-acknowledge (NA) before a STOP (P).

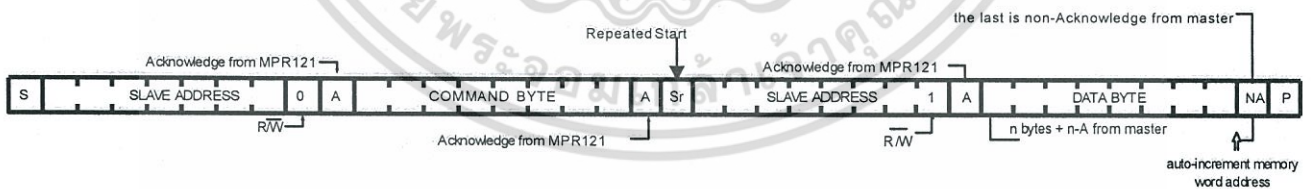


Figure 13. Read format with command and data and data byte(s)

How to Reach Us:

Home Page:
www.freescale.com

Web Support:
<http://www.freescale.com/support>

USA/Europe or Locations Not Listed:

Freescale Semiconductor, Inc.
Technical Information Center, EL516
2100 East Elliot Road
Tempe, Arizona 85284
1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
www.freescale.com/support

Europe, Middle East, and Africa:

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
www.freescale.com/support

Japan:

Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Headquarters
ARCO Tower 15F
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,
Tokyo 153-0064
Japan
0120 191014 or +81 3 5437 9125
support.japan@freescale.com

Asia/Pacific:

Freescale Semiconductor China Ltd.
Exchange Building 23F
No. 118 Jianguo Road
Chaoyang District
Beijing 100022
China
+86 010 5879 8000
support.asia@freescale.com

For Literature Requests Only:

Freescale Semiconductor Literature Distribution Center
1-800-441-2447 or +1-303-675-2140
Fax: +1-303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc. 2010. All rights reserved.

RoHS-compliant and/or Pb-free versions of Freescale products have the functionality and electrical characteristics of their non-RoHS-compliant and/or non-Pb-free counterparts. For further information, see <http://www.freescale.com> or contact your Freescale sales representative.

For information on Freescale's Environmental Products program, go to <http://www.freescale.com/epp>.



MPR121
REV0.4
09/2010

MPR121

Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

