

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ
ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY SYSTEM

ธนากร เลิศภักดี
THANAKORN LERTPAKDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ

ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY SYSTEM

ธนากร เลิศภักดี

THANAKORN LERTPAKDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY SYSTEM

THANAKORN LERTPAKDEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ
นักศึกษา	นายธนากร เลิศภักดี
รหัสประจำตัว	46060905
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กิติพล ชิตสกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า โดยมี เซ็นเซอร์ทรงกระบอกหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมซึ่งติดตั้งอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด โดยรอบ มีวงจรใส่ประจุไฟฟ้าลงไปในเซ็นเซอร์ผ่านคู่อิเล็กโทรด และมีวงจรวัดศักย์ไฟฟ้าบนคู่อิเล็กโทรดที่เหลือ ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เกิดจากการเหนี่ยวนำของประจุที่กระจายตัวบนไดอิเล็กทริก ภายใน ข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่โหนด ของพื้นที่ย่อยๆ ของภาคตัดขวาง โดยจะใช้วิธี ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับเซ็นเซอร์สี่เหลี่ยมและใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์ สำหรับเซ็นเซอร์รูปทรงกระบอก ข้อมูลที่ได้นำมาสร้างภาพกลับด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน (Linear back-projection) การกระจายตัวของไดอิเล็กทริกของวัตถุที่เป็นองค์ประกอบภายในที่มีค่าเพอมีตริวิตีแตกต่างกัน โดยสามารถแสดงเป็นภาพตัดขวางของวัตถุ และเพื่อให้ภาพที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นจะใช้อัลกอริทึมการทำซ้ำ (Iterative Algorithm) และการทำเทรซโฮลด์เข้ามาช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพ จากผลการทดลอง พบว่าสามารถแสดงภาพตัดขวางระดับเทา (Grey Level) ของวัตถุได้ ใกล้เคียงกับภาพตัดขวางจริงของวัตถุ

Thesis Title	Electrical Capacitance Tomography System
Student	Mr. Thanakorn Lertpakdee
Student ID.	46060905
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Dr. Kitipol Chitsakul

ABSTRACT

An Electrical capacitance tomography system has been developed. The system consists of a cylindrical sensor with 8 surrounding electrodes attached on external surface. An electronic system has been realized for injecting charges into the object and collecting the potential around the sensors due to the charges distributing in the sensor. The node potentials and then the dielectric of small elements of cross section are calculated. An algorithm of image reconstruction, for square sensor, is based on the finite difference method and linear back-projection algorithm (LBP). However the finite element method has been used with the circular cylindrical sensor for cross sectional image reconstructing of the dielectric distribution. An iterative algorithm also has been used to improve the image quality. The experimental results of the sensors filled with two different permittivity test phantoms have been displayed in gray level. The reconstructed images closely resemble with the cross-section of the real object.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายๆ ท่าน ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณทุกๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กิตติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ แรงผลักดัน รวมทั้ง ความเอื้อเฟื้อเครื่องมือ เครื่องใช้ในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังใจ และการให้โอกาสในการศึกษา ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้ง ในความเมตตาของท่าน และ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ นายอภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์ นายจักรพันธ์ สิทธิไกรพงษ์ และนายวรรณฤทธิ์ ชัดติยะ ที่ช่วยให้แนวคิด แก้ปัญหา คำแนะนำและความช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู สนับสนุน การศึกษา ตลอดจนใจให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธนากร เลิศภักดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุ.....	5
2.1 แนวคิดพื้นฐาน.....	5
2.2 ตัวอย่างหลักการสร้างภาพ.....	6
2.2.1 การสร้างภาพตัดขวางโดยรังสีเอ็กซ์ (Computed Tomography (CT))	6
2.2.2 การสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography (EIT)).....	9
2.3 การสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรม (Industrial process tomography).....	10
บทที่ 3 การสร้างภาพตัดขวางค่าความจุทางไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography).....	12
3.1 หลักการพื้นฐาน.....	12
3.2 วงจรพื้นฐานที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า.....	12
3.2.1 วงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit).....	13
3.2.2 วงจรเอซี-เบส (AC – Based Circuit).....	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3	รูปแบบการวางอิเล็กทรอนิกส์ในระบบ ECT.....18
3.4	โครงสร้างของระบบ ECT.....19
3.5	ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....20
3.5.1	เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....20
3.5.2	เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดวงกลม.....21
3.6	วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Generator).....22
3.7	วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer).....24
3.8	วงจรมายสัญญาณ (AC-Amplifier).....25
3.9	วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ (Multiple Feedback Bandpass Filter).....27
3.10	วงจรแปลงแรงดันเอซี เป็นแรงดันดีซี (RMS to DC Converter).....29
3.11	แปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล (A to D Converter).....30
3.12	การ์ดอินเตอร์เฟซ 8255 (ET-8255 Interface Card).....31
3.13	ภาคจ่ายไฟ (Power Supply).....35
บทที่ 4	การสร้างภาพกลับ (Image reconstruction).....36
4.1	หลักการพื้นฐาน.....36
4.2	วิธีการหาค่าเซนซิวิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT.....38
4.3	การสร้างภาพกลับ.....41
4.3.1	การสร้างภาพกลับโดยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน.....41
4.3.2	การสร้างภาพกลับโดยใช้วิธี ART.....44
4.4	การปรับปรุงภาพ.....47
4.4.1	วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลัก projected Landweber iteration.....47
4.4.2	การใช้วิธีเทอร์ชโฮลด์.....49
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง.....51
5.1	รูปแบบการวัดค่าความจุไฟฟ้า.....51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง.....	53
5.2.1 การทดลองการทำงานของระบบ.....	53
5.2.2 การทดลองสร้างภาพตัดขวาง.....	59
5.3 เกณฑ์ประเมินสมรรถนะ(Performance evaluation criteria).....	66
บทที่ 6 บทสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรซาร์จ-คิสซาร์จ และวงจรเอซี-เบส.....17
3.2	แสดงข้อดีและข้อเสียของการตัดอิเล็กทรอนิกส์โทรคแต่ละลักษณะ18
3.3	การเลือกชนิดของสัญญาณเอาท์พุทของไอซี MAX 038.....23
3.4	สถานะสวิทช์.....25
3.5	คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12..... 31
3.6	คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET – 8255.....32
3.7	การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255.....33
5.1	แสดงลำดับการจับคู่ อิเล็กทรอนิกส์ตัวส่งและตัวรับ.....53
5.2	ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ 2 ชั้น ในเซ็นเซอร์หน้าตัดกลม.....60
5.3	ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ 1 ชั้น ในเซ็นเซอร์หน้าตัดกลม.....61
5.4	การสร้างภาพกลับของวัตถุ 2 ชั้น โดยทำเทรซโฮลด์เซนซitivitiในอัลกอริทึมวงกลม.....62
5.5	การสร้างภาพกลับของวัตถุ 1 ชั้น โดยทำเทรซโฮลด์เซนซitivitiในอัลกอริทึมวงกลม.....63
5.6	ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ ในเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยม.....64
5.7	การสร้างภาพกลับ โดยทำเทรซโฮลด์เซนซitiviti ในอัลกอริทึมหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี.....	6
2.2 ตัวอย่างของการสร้างภาพตัดขวางตามวิธีการแบ็กโปรเจคชัน.....	8
3.1 วงจร ชาร์จ – ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit).....	13
3.2 วงจรเอซี – เบส (AC – Based Circuit).....	15
3.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบชาร์จ-ดิสชาร์จ และแบบเอซี-เบส.....	16
3.4 โครงสร้างระบบ ECT.....	19
3.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด.....	20
3.6 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.7 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด.....	22
3.8 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.9 วงจรโซลาร์เซลล์เรเตอร์เรเตอร์โดยใช้ไอซี MAX038.....	23
3.10 รูปแบบการต่อสวิตช์ในวงจรมัลติเพล็กซ์.....	24
3.11 วงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer)	25
3.12 วงจรขยายสัญญาณ (AC Amplifier).....	26
3.13 แสดงจุดตัดความถี่ของวงจรขยาย U4 และความถี่ที่ใช้งาน.....	27
3.14 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์แบบมัลติเฟดแบค (Multiple Feedback Bandpass Filter).....	28
3.15 การตอบสนองความถี่ของวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.14.....	29
3.16 วงจรแปลง อาร์เอ็มเอส เป็น แรงดันไฟตรง (RMS to DC Converter).....	30
3.17 เอาท์พุทของวงจรในรูปที่ 3.16 เมื่อวัดใหม่.....	30
3.18 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12.....	31
3.19 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET – 8255.....	32
3.20 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม.....	33
3.21 วงจรภายในของการ์ด ET-8255.....	34
3.22 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply).....	35
4.1 รูปตัวนำสองตัวเมื่อวางอยู่ระหว่างวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า.....	36
4.2 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิวิตีในแบบ 3 มิติของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะ คู่อิเล็กโทรด 1-4.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8	40
4.4 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ.....	40
4.5 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8	41
4.6 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของเซ็นเซอร์ออกเป็นพิกลเซลล์ย่อยๆรูปสี่เหลี่ยมสำหรับเซ็นเซอร์แบบ สี่เหลี่ยม และแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมในเซ็นเซอร์แบบวงกลม.....	42
4.7 รูปแบบการฉายแสง และการคำนวณค่าแฟกเตอร์น้ำหนักของอัลกอริทึมเชิงพีชคณิต.....	44
4.8 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีในแบบ 3 มิติของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-4 เมื่อทำเทรซโฮลด์.....	50
5.1 รูปภาคตัดขวางของเซ็นเซอร์ทั้งสองแบบ แสดงตำแหน่งของอิเล็กโทรด.....	51
5.2 อัลกอริทึมการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบ ECT.....	52
5.3 จุดทดสอบสัญญาณของอิเล็กโทรด.....	53
5.4 รูปของสัญญาณเมื่อใช้ความถี่ของระบบเป็น 500 KHz จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.3.....	54
5.5 รูปของสัญญาณเมื่อใช้ความถี่ของระบบเป็น 1 MHz จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.3.....	54
5.6 ผลจากการวัดค่าศักดาไฟฟ้าซ้ำกัน 4 ครั้งโดยใช้ความถี่ 500 KHz.....	55
5.7 ผลจากการวัดค่าศักดาไฟฟ้าซ้ำกัน 4 ครั้งโดยใช้ความถี่ 1 MHz.....	56
5.8 จุดทดสอบวงจรแปลงสัญญาณ AC เป็นแรงดัน DC.....	56
5.9 สัญญาณไซน์อินพุต (Ch1) และแรงดัน DC เอาท์พุต (Ch2) จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.8.....	57
5.10 แสดงสัญญาณรบกวนที่ขึ้นอยู่กับแรงดัน DC (Ch2) จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.8.....	57
5.11 แสดงขอบขาขึ้นแรงดันเอาท์พุต (Ch2) เมื่อเริ่มสวิตช์ (Ch1) จากจุดทดสอบรูปที่ 5.8.....	58
5.12 ช่วงเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าในแต่ละค่า.....	59
5.13 ตำแหน่งของวัตถุที่ใช้ทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนในเซ็นเซอร์ทั้ง 2 แบบ.....	66
5.14 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมด้วยวิธี LBP ตามหลักของ Projected Landweber Iteration โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ.....	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมด้วยวิธี ART โดยใช้จำนวน การทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ.....	67
5.16 รูปกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนนอร์มัลสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม.....	67
5.17 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบกลมด้วยวิธี LBP ตามหลักของ Projected Landweber Iteration โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ.....	68
5.18 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบกลมด้วยวิธี ART โดยใช้จำนวน การทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ.....	68
5.19 รูปกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนนอร์มัลสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แบบกลม.....	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสร้างภาพตัดขวางเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อตรวจสอบและสังเกตลักษณะรูปร่างหรือขนาดของวัตถุที่อยู่ในสถานะปิดทึบ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้รังสีเอ็กซ์ ใช้วิธีสร้างภาพการกำทอนแม่เหล็ก (Magnetic Resonance Imaging ; MRI) การใช้เทคนิคอัลตราซาวด์ (Ultrasound) และวิธีการสร้างภาพตัดขวางค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography ; EIT) ในปัจจุบันการใช้รังสีเอ็กซ์ MRI และอัลตราซาวด์ เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในทางการแพทย์เพื่อใช้ดูภาพอวัยวะภายในของผู้ป่วย เนื่องจากให้รายละเอียดของภาพที่ได้ชัดเจนและมีความแม่นยำสูง แต่ข้อจำกัดของ MRI และรังสีเอ็กซ์ คือมีขนาดใหญ่ทำให้วัตถุที่ต้องการศึกษาโครงสร้างภายในต้องเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก ราคาต้นทุนสูง ทั้งในด้านราคาอุปกรณ์ที่ใช้และราคาในการปฏิบัติการ เทคนิคของอัลตราซาวด์ แม้ว่าจะสามารถทำให้ระบบมีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ แต่การใช้เครื่องมือลักษณะดังกล่าวสร้างภาพตัดขวางยังมีข้อจำกัดในการใช้กับเฉพาะวัตถุบางชนิด ราคาสูง ส่วน EIT [6] ถึงแม้ว่ามีราคาต่ำกว่าและใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อนน้อยกว่าวิธีข้างต้น แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือ วัตถุที่นำมาตรวจสอบต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนี้อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าต้องสัมผัสกับวัตถุภายใน จึงไม่เหมาะกับการใช้งานกับวัตถุที่มีคุณสมบัติการกักร่อนสูง สำหรับภาพตัดขวางค่าความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography ; ECT) ใช้หลักการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัตถุและวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) โดยรอบวัตถุ ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่รบกวนหรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบอื่นๆ มีขนาดเล็ก มีความปลอดภัยสูง มีความเร็วในการสร้างภาพ เป็นเครื่องมือที่มีราคาถูกลงและสร้างได้ง่าย

ระบบ ECT ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้คุณลักษณะการกระจายของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ภายในวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวาง 2 มิติเพื่อใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การตรวจสอบระดับน้ำมัน/ก๊าซหรือการเจือปนของน้ำในท่อส่ง หรือสังเกตส่วนผสมกระบวนการ แยก/ผสมในทางเคมี เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบสร้างระบบ ECT โดยได้ทำการทดลองกับชุดเซ็นเซอร์สองแบบด้วยกันคือ แบบทรงกระบอกหน้าตัดกลมและแบบทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบทั้งหมดจากชุดเซ็นเซอร์ จากนั้นใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน (Linear backprojection) ร่วมกับเทคนิคการทำซ้ำ (Iteration) [2] ในการสร้างภาพกลับ นอกจากนี้ยังได้ใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตในการลดจำนวนการทำซ้ำของกระบวนการสร้างภาพ และใช้วิธีการเทอร์ซโซลด์ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและสร้างระบบสร้างภาพตัดขวาง 2 มิติภายในวัตถุจากค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุที่มีค่าไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อสร้าง ต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางที่สามารถใช้งานได้ใช้ต้นทุนต่ำและมีความปลอดภัยสูง เป็นแนวทางประยุกต์ ใช้ในงานอุตสาหกรรม

1.2.3 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพตัดขวางที่ได้จากอัลกอริธึมเดิม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วัตถุที่มีโครงสร้างทางกายภาพต่างชนิดกันจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าเพอิมิตติวิตีต่างกันเมื่อนำวัตถุนั้นๆ มาเป็นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุ ก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุนั้นแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ในวัตถุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อใส่ประจุลงไปสะสมและวัดค่าศักดาไฟฟ้าจากคู่อิเล็กโทรดที่ติดอยู่โดยรอบจะทำให้ได้ค่าศักดาไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างเช่น การวางอิเล็กโทรดไว้โดยรอบบริเวณที่บรรจุด้วยอากาศ (Free Space) แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดจะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากค่าเพอิมิตติวิตีของอากาศแต่เมื่อวางวัตถุชนิดหนึ่งแทรกเข้าไปในอากาศ ภายในบริเวณที่มีอิเล็กโทรดติดอยู่โดยรอบแล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดก็จะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ตามค่าเพอิมิตติวิตีของวัตถุที่แทรกอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด และเมื่อย้ายวัตถุชนิดเดิมไปวางในตำแหน่งอื่นๆภายในบริเวณที่มีอิเล็กโทรดติดอยู่โดยรอบจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดเปลี่ยนไปเช่นกัน จากที่กล่าวมานั้นค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดจะเปลี่ยนแปลงตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุ ดังนั้นถ้าหากนำค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดที่ได้ ไปสร้างภาพตัดขวางก็จะพบตำแหน่งของวัตถุที่วางอยู่เช่นกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

จากลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของตัวเก็บประจุจะมีแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกัน และมีฉนวนกั้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวนที่กั้น และ โครงสร้างทางกายภาพของตัวเก็บประจุเท่านั้น แต่สำหรับค่ารีแอกแตนซ์ความจุ (Capacitive Reactance) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ใช้งาน ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณที่มีขนาดและความถี่ที่ผ่านตัวเก็บประจุที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของสัญญาณที่ได้ทางเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้วย สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในระบบ ECT สามารถหาได้โดยคำนวณจากโครงสร้างของตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าจากการคำนวณนี้จะถูกเรียกว่าเซ็นซิวิตี

(Sensitivity) [1,2] ซึ่งหาได้โดยการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของแบบจำลองเซ็นเซอร์ออกเป็นส่วนย่อยๆ (ในภาพแทนหนึ่งจุดภาพ(pixel)) แล้วจึงกำหนดให้หนึ่งส่วนใดๆที่ละส่วนให้มีค่าเพอิมิตติวิตีสูงกว่าส่วนที่เหลือ จากนั้นคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าเพอิมิตติวิตีที่กำหนดให้กระจายอยู่ภายใน พื้นที่ของแบบจำลองเซ็นเซอร์โดยคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายในที่เกิดเนื่องจากการป้อนศักดาไฟฟ้าที่แผ่นอิเล็กโทรด โดยใช้วิธี ผลต่างจำกัด (Finite difference) ในกรณีแบบจำลองเซ็นเซอร์มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม และวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) กับแบบจำลองเซ็นเซอร์ที่มีหน้าตัดกลม และการหาค่าความจุไฟฟ้าอีกวิธีคือการวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยในระบบ ECT จะมีอยู่สองวิธีหลักคือ ชาร์จ- ดิสชาร์จ (Charge /discharge) [3] และ การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้ตัวเก็บประจุซึ่งถูกเรียกว่า เอซี-เบส(AC – Based) [4] สำหรับระบบ ECT ในงานวิจัยนี้จะใช้ วิธีการของ เอซี-เบส ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า ของคู่อิเล็กโทรดที่ติดอยู่โดยรอบของตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของค่าศักดาไฟฟ้า และจะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับ การกระจายของค่าเพอิมิตติวิตีของวัตถุที่อยู่ภายในเซ็นเซอร์ เมื่อได้ค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของ เซนซิวิตี และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดแล้วจากนั้นจะนำค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองชุดที่ได้ไปประมวลผลสร้างภาพตัดขวาง 2 มิติ ด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันและอัลกอริทึมเชิงพีชคณิต

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาวิธีการจำลองค่าความจุไฟฟ้าจากการกำหนดลักษณะการกระจายของค่าเพอิมิตติวิตีของวัตถุ โดยใช้แบบจำลองของเซ็นเซอร์ทรงกระบอกที่มีลักษณะหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดแบบวงกลม และศึกษาวิธีการสร้างภาพตัดขวาง 2 มิติจากข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จาก ระบบ จากนั้นจะออกแบบวงจรและสร้างระบบ ECT เพื่อใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุจากแบบจำลองเซ็นเซอร์ทั้งสองแบบ ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบ ECT ก็จะถูกนำไปประมวลผลสร้างภาพกลับโดยวิธี วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน รวมทั้งการปรับปรุงคุณภาพของภาพโดยใช้การเทรซโฮลด์และการทำซ้ำ

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐาน แนวความคิดของงานวิจัย และขอบเขตของงานวิจัย
 บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดพื้นฐานและหลักการของการสร้างภาพตัดขวาง 2 มิติด้วยวิธีต่างๆ ที่ถูกใช้ในทางการแพทย์และในทางอุตสาหกรรม

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบ ECT รวมทั้งแสดงรูปแบบโมเดลเซ็นเซอร์
ของงานวิจัย โครงสร้างของระบบและวงจรส่วนต่างๆของระบบ

บทที่ 4 อธิบายถึงหลักการ การสร้างภาพกลับของภาพตัดขวางค่าความจุไฟฟ้า ด้วยวิธี
ลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน และการหาเส้นซิติวิตีจากค่าความจุไฟฟ้า

บทที่ 5 แสดงขั้นตอนของการทดลอง วิธีการทดสอบกระบวนการ การสร้างภาพกลับ
และผลการทดลองของการสร้างภาพกลับด้วยวิธีต่างๆ

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

บทที่ 2

การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุ (Tomography)

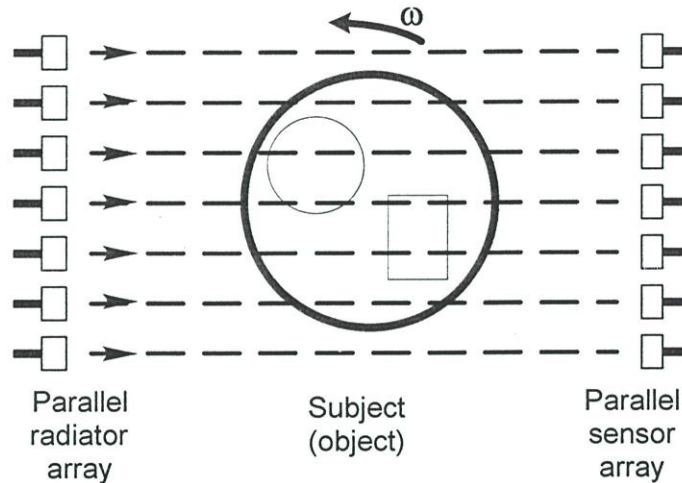
2.1 แนวคิดพื้นฐาน

การสร้างภาพตัดขวางเป็นวิธีการที่ใช้เพื่อสังเกตลักษณะรูปร่างและโครงสร้างภายในของวัตถุซึ่งจะมีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบวัตถุต่างๆ วิธีการที่ง่ายที่สุดเพื่อที่จะทราบถึงลักษณะรูปร่างและโครงสร้างภายในของวัตถุเหล่านั้น คือ การผ่าวัตถุตามแนวขวางให้ผ่านส่วนที่ต้องการตรวจสอบ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติในกรณีต่างๆ เช่น การวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ การทดสอบในทางอุตสาหกรรมแบบไม่ทำลาย เป็นต้น จะไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอเทคนิคที่เรียกว่า โทโมกราฟี (Tomography) [5] หรือการสร้างภาพตัดขวางภายในวัตถุเพื่อแก้ปัญหาที่เทคนิคนี้จะทำให้เห็นถึงโครงสร้างภายใน และลักษณะคุณสมบัติบางอย่างของวัตถุโดยไม่ต้องทำลายวัตถุนั้น

หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี คือการวัดข้อมูลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัตถุกับตัวกลางของการวัดโดยเซ็นเซอร์ที่อยู่ภายนอกวัตถุ ในมุมต่างๆ ของระนาบหนึ่ง ซึ่งทำได้โดยการหมุนชุดของเซ็นเซอร์ หรือหมุนวัตถุที่ต้องการวัด ข้อมูลนี้จะสัมพันธ์กับคุณสมบัติตามธรรมชาติที่แตกต่างกันของส่วนประกอบต่างๆ ที่ตอบสนองต่อตัวกลางหรือสื่อสัญญาณที่ส่งเข้าไป จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ในหลายๆ ทิศทางนี้มาประมวลผลด้วยคณิตศาสตร์ขั้นสูง ก็สามารถสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงการกระจายขององค์ประกอบต่างๆภายในวัตถุได้ ดังรูปที่ 2.1 การใช้สื่อสัญญาณแต่ละชนิดนั้นมีข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัด และขั้นตอนการประมวลผลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ ลักษณะของภาพที่ต้องการ และรูปแบบของการประยุกต์ใช้งาน เป็นต้น

วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยไม่ทำลายวัตถุ แบ่งออกตามหลักการกว้างๆ ได้ 3 วิธี คือ การส่งผ่าน (Transmission) การแผ่ (Emission) และการสะท้อน (Reflection) ในการส่งผ่านจะใช้รังสีเอ็กซ์ ถ้าอิเล็กทรอนิกส์ ความร้อนหรือแสง หรือพลังงานใดๆก็ได้ที่มีพฤติกรรมตามกฎของการดูดซึม (Absorption law) โดยพลังงานที่ผ่านเข้าไปในวัตถุจะถูกดูดซับในส่วนต่างๆของวัตถุไม่เท่ากัน พลังงานส่วนที่ทะลุออกมา เรียกว่า โปรเจกชัน และตัวอย่างภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้ คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ สำหรับวิธีการแผ่จะฉีดสารที่มีกัมมันตภาพรังสีเป็นส่วนประกอบ เมื่อสารนี้ไปยังอวัยวะที่สนใจก็จะแผ่รังสีแกมมาในทิศทางที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเดินทางของรังสีแกมมาที่ผ่านตำแหน่งเดียวกัน จะสามารถนำไป

ประมวลผลหาตำแหน่งของจุดนั้นได้ ภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้ คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องโพซิตรอนอิมิตชันโทโมกราฟี (Positron Emission Tomography หรือ P.E.T) และ เครื่องซึ่งเกิดโฟตอนอิมิตชันโทโมกราฟี (Single Photon Emission Computed Tomography หรือ S.P.E.C.T) ส่วนการสะท้อนจะใช้คุณสมบัติการสะท้อนของโครงสร้างของวัตถุมาตรวจสอบหาลักษณะของวัตถุได้ ตัวอย่างที่ใช้ เช่น แสง ลำอิเล็กตรอน เรดาร์ หรือ อัลตราโซนิค ภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องอัลตราซาวด์



รูปที่ 2.1 หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี

2.2 ตัวอย่างหลักการสร้างภาพ

การสร้างภาพตัดขวางนั้นมีอยู่หลายวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในที่นี้จะสรุปหลักการสร้างภาพตัดขวางเพื่อเป็นตัวอย่างเพียง 3 วิธีด้วยกัน คือ การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้รังสีเอ็กซ์ การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้หลักการกำหนดแม่เหล็ก และหลักการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ความต้านทานไฟฟ้า

2.2.1 การสร้างภาพตัดขวางโดยรังสีเอ็กซ์ (Computed Tomography (CT))

มีการค้นพบรังสีเอ็กซ์ เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1895 โดยศาสตราจารย์วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Wilhelm Konrad Roenigen) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน รังสีที่เรินต์เกนค้นพบนี้ถูกเรียกว่า รังสีเอ็กซ์ หรือ เอ็กซ์เรย์

รังสีเอ็กซ์ เป็นพลังงานรูปหนึ่งเช่นเดียวกับแสงสว่าง แต่เป็นชนิดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รังสีเอ็กซ์พบได้น้อยตามธรรมชาติ แต่สามารถสร้างได้จากเครื่องมือชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า เครื่องเอ็กซ์เรย์ โดยรังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติทางกายภาพหลายอย่างที่ทำให้มีลักษณะที่ทั้ง

เหมือนและแตกต่างจากรังสีอื่นๆ เรินต์เกนพบว่า รังสีเอ็กซ์สามารถฉายทะลุวัตถุทึบแสง เช่น ร่างกายมนุษย์ได้ เขาจึงลองเอารังสีเอ็กซ์มาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ผ่านมือคน เนื้อ เอ็น และกระดูกในมือคน ซึ่งจะกั้นรังสีเอาไว้ ส่วนเนื้อและเอ็นกั้นรังสีได้น้อยมากก็มีรังสีออกมามาก กระดูกกั้นรังสีได้มากก็มีรังสีผ่านออกมาน้อย รังสีทั้งหมดที่ผ่านมือออกมาจะมีความเข้มต่อพื้นที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเป็นรูปแบบ (Pattern) ของความเข้มของรังสีเป็นมือขึ้น เมื่อเอารังสีที่มีรูปแบบแล้วนี้ไปกระทบกับวัสดุที่ไวต่อแสง (Photographic material) เช่น ฟิล์มถ่ายรูปหรือกระดาษอัดรูป แล้วนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างรูป ก็จะเกิดภาพของมือที่มีกระดูกซ่อนอยู่ในเนื้อ แพทย์จึงสามารถบอกได้ว่ากระดูกข้างในมือนั้นผิดปกติหรือไม่ โดยไม่จำเป็นต้องผ่าเอาเนื้อที่หุ้มกระดูกออกมาดู นั่นคือเป็นที่มาของภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์

ปัญหาสำคัญของการวินิจฉัยโรคด้วยภาพถ่ายเอ็กซ์เรย์นี้คือ การซ้อนทับกันของเงาของอวัยวะใน 3 มิติบนฟิล์ม 2 มิติ, ไม่สามารถแยกความแตกต่างของซอฟต์แวร์ทึบ (Soft tissue) ได้ และไม่สามารถบอกความหนาแน่นที่แตกต่างกันของสารองค์ประกอบของโครงสร้างภายในร่างกายได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1922 นายแพทย์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โบกาจ (Bocage) ได้เสนอเทคนิคการถ่ายภาพที่เรียกว่า โทโมกราฟี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับการซ้อนทับกันของเงาของอวัยวะในแบบ 3 มิติบนฟิล์ม 2 มิติได้แต่ไม่สมบูรณ์นัก หลายสิบปีต่อมาได้มีการตั้งข้อสังเกตว่าถ้ายังรังสีเอ็กซ์ลำเล็กๆ ทะลุผ่านผู้ป่วยเลยไปยังหัววัดแล้วกวาดทั้งระบบไปในระนาบหนึ่งของผู้ป่วยที่ต้องการตรวจ และทำซ้ำกันโดยบิดมุมของระบบไป ข้อมูลความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่บันทึกได้โดยหัววัดน่าจะสามารถนำไปใช้ศึกษาการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงภายในระนาบนั้นได้ นั่นหมายความว่า จะสามารถสร้างภาพของระนาบที่สนใจได้ เพราะความหนาแน่นของเนื้อเยื่อมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การลดลงและการคำนวณก็จะต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย ซึ่งต่อมาข้อสังเกตดังกล่าวก็ได้กลายเป็นจริง และถูกเรียกว่า เครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray Computed Tomography ; X-ray CT) ซึ่งถูกสร้างขึ้นจริงในปี ค.ศ. 1972 โดยค็อกเตอร์กอดเฟรย์ นิวโบลด์ เฮนส์ฟิลด์ (Dr. Godfrey Newbold Hounsfield) วิศวกรไฟฟ้าชาวอังกฤษ

ทฤษฎีการสร้างภาพของเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาการจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอ็กซ์ที่ทะลุผ่านร่างกายผู้ป่วยขึ้นบางอย่างออกมาในทิศทางต่างๆ จำนวนมาก การจำแนกของสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอ็กซ์สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ถ้าตัวกลางเป็นวัตถุชิ้นเดียว มีความหนา x เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้ม I_0 ผ่านเข้าไป รังสีที่ทะลุออกมาจะมีความเข้มลดลงเป็น I โดยมีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอ็กซ์ในตัวกลาง

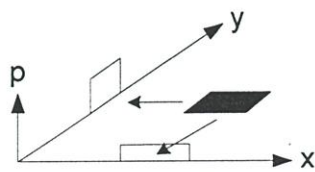
$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \quad (2.2)$$

$$p(r, \phi) = -\ln \frac{I}{I_0} = \int_{r, \phi} \mu(x, y) ds \quad (2.3)$$

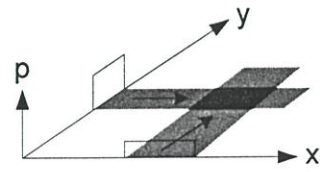
กรณีที่ตัวกลางไม่ใช่สารเนื้อเดียว ความสัมพันธ์จะเป็นดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) โดยค่า $\mu(x, y)$ เป็นค่าคงที่ของตัวกลางหนึ่งๆ ตรงจุด (x, y) ถ้า $\mu(x, y)$ มีค่าสูงแสดงว่าตัวกลางนั้นมีความหนาแน่นสูงและดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่าตัวกลางนั้นมีความหนาแน่นต่ำและดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้น้อย ถ้าสามารถคำนวณหาค่า $\mu(x, y)$ บนทุกๆ จุดในระนาบได้ ก็จะสามารถสร้างภาพได้ด้วยการใช้ค่า $\mu(x, y)$ มาเรียงกันตามตำแหน่งบนระนาบจริงนั้น

$p(r, \phi)$ เรียกว่า เรย์ซัม หรือเรย์โปรเจกชัน (Ray-projection) หมายถึง การอินทิเกรต $\mu(x, y)$ ตามเส้นทางของรังสีเอ็กซ์ลำแคบที่มีโคออร์ดิเนต (r, ϕ) เมื่อ r คือ ระยะทางในแนวเคลื่อนตัด และ ϕ คือ มุมที่แนวรังสีเอ็กซ์ทำกับแกน y

หลักการสร้างภาพตัดขวางที่ง่ายที่สุด มีความยุ่งยากทางคณิตศาสตร์น้อย และเป็นพื้นฐานสำคัญในการสร้างภาพของเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ คือ วิธีแบ็กโปรเจกชัน (Backprojection) วิธีการนี้เป็นการนำเอาค่าโปรเจกชันทั้งหมดมารวมกันบนทุกๆ จุดตามเส้นทางของลำรังสีเอ็กซ์ ข้อมูลโปรเจกชันทั้งหมดหาได้โดย ให้ ϕ มีค่าคงที่ และให้รังสีเอ็กซ์เคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงไปในระนาบของร่างกายหรือตัวกลางใดๆ 1 ครั้ง จะได้เซตของเรย์ซัมหรือ $p(r, \phi)$ จำนวนหนึ่งสำหรับมุม ϕ นั้น เซตดังกล่าวนี้เรียกว่า โปรไฟล์ (Profile) หรือ โปรเจกชัน ทำการบิดแนวรังสีเอ็กซ์ไปจากแนวเดิมทีละ 1 องศา จนครบ 180 องศา จะได้ 180 โปรไฟล์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการสร้างภาพตัดขวางตามวิธีการแบ็กโปรเจกชัน (ก) โปรเจกชันของวัตถุในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกน x และแกน y (ข) การแบ็กโปรเจกข้อมูลโปรเจกชันไปยังระนาบของภาพ

พิจารณารูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการสร้างภาพตัดขวางตามวิธีการแบ็กโปรเจกชัน โดยใช้ข้อมูลเพียง 2 โปรไฟล์ (หรือ 2 โปรเจกชัน) ซึ่งตั้งฉากกับแกน x และแกน y เมื่อนำโปรไฟล์ทั้งสองมาซ้อนทับกัน หรือแบ็กโปรเจกไปยังระนาบของภาพ จะเห็นว่าตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุที่มีค่าสูงมากจะรวมกันหรือเสริมกันทำให้เด่นเป็นภาพของวัตถุขึ้น

การสร้างภาพอีกวิธีหนึ่งคือ คือการสร้างภาพด้วยเทคนิคอิตเทอเรชัน (Iterative techniques) เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้ในการแก้สมการเมทริกซ์มานานแล้ว ต่อมาเฮานสฟิลด์ได้นำวิธีการนี้มาสร้างภาพตัดขวางของร่างกายผู้ป่วย หลักการของวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการสมมุติค่าความหนาแน่นค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอ็กซ์ในตัวกลาง แล้วทำการคำนวณค่าโปรเจกชันทั้งหมด นำค่าโปรเจกชันที่คำนวณได้นี้มาเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลโปรเจกชันที่วัดได้ ซึ่งค่าความแตกต่างของข้อมูล 2 ข้อมูลนี้จะถูกใช้เพื่อหาค่าแก้สำหรับค่าความหนาแน่นนั้นในการทำซ้ำครั้งต่อไป การคำนวณการสร้างภาพโดยอาศัยเทคนิคอิตเทอเรชันนี้ สิ่งที่สำคัญคือการคำนวณหาค่าแก้ดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบโดยมีชื่อเรียกต่างกัน เช่น Algebraic Reconstruction Technique (ART), Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT) และ Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART) เป็นต้น

2.2.2 การสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า

การวัดความต้านทานหรือความนำไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบวัตถุต่างๆ ในทางการแพทย์เช่น ใช้การวัดความต้านทานไฟฟ้าบริเวณทรวงอกแบบ 2 อิเล็กโทรดเพื่อวัดอัตราการหายใจสำหรับเฝ้าระวังการหยุดหายใจของทารกในระหว่างหลับ และเครื่องมือแบบ 4 อิเล็กโทรดสำหรับวัดการย่อยอาหาร

การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยใช้ความต้านทานไฟฟ้า [6] คือการคำนวณหาค่าการกระจายของความต้านทานทางไฟฟ้าภายใน เพื่อนำข้อมูลที่คำนวณได้ไปสร้างเป็นภาพแสดงการกระจายของความต้านทานภายในวัตถุนั้น โดยใช้สีหรือระดับความเข้มเป็นตัวแสดงความแตกต่าง

เนื่องจากวัตถุที่มีสารหรือเนื้อเยื่อต่างชนิดกัน จะมีค่าความต้านทานจำเพาะที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อทำการฉายกระแสคงที่แล้ววัดค่าศักดาไฟฟ้าในแต่ละจุดโดยรอบผิววัตถุ ค่าศักดาไฟฟ้านั้นจะให้ผลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วัดและ โครงสร้างภายในของวัตถุนั้น ค่าศักดาไฟฟ้านี้คล้ายกับการดูชัดของวัตถุแต่ละชนิดต่อรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน นำค่าศักดาไฟฟ้านี้มาคำนวณหาค่าการกระจายของความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ และใช้ระดับความเข้มของสีในจอภาพคอมพิวเตอร์ ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในวัตถุหรือร่างกายได้

เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางของ EIT นี้มีอยู่หลายวิธี เช่น

- วิธี Perturbation วิธีการนี้ใช้หลักการของการจ่ายศักดาไฟฟ้าคงที่ แล้ววัดค่ากระแส ทำการคำนวณหา Perturbation matrix โดยการเปลี่ยนค่าความต้านจำเพาะของอิลิเมนต์ แล้วคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุดวัดด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (FEM) จากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกระแสจาก Perturbation matrix ไปใช้คำนวณหาการกระจายของความต้านทานด้วยวิธีแบ็กโปรเจคชัน
- วิธี Double constraint วิธีการนี้แก้สมการของปัวซอง (Poisson) โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ร่วมกับวิธีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต Neumann และ Dirichlet แล้วนำผลไปใช้ในการคำนวณปรับค่าความต้านทานจำเพาะ
- วิธี Backprojection between equipotential line มีหลักการคำนวณคล้ายกับวิธีแบ็กโปรเจคชันของ X-ray CT
- วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) วิธีการนี้ทำการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าที่ผิววัตถุด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ สลับกับการปรับค่าความต้านทานจำเพาะด้วยวิธีการนิวตัน-ราฟสัน

2.3 การสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรม (Industrial process tomography)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม [5] เริ่มต้นและถูกเสนอขึ้นในปี 1970 โดยเริ่มต้นจากการใช้รังสีเอ็กซ์เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงาน ซึ่งการใช้รังสีเอ็กซ์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมนี้ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริงเนื่องจากอุปกรณ์มีราคาสูงและความไม่ปลอดภัยต่อรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้วิธีการอื่นๆ ที่อาศัยหลักการแผ่รังสีหรือการกระจายคลื่น (Radiation) ยังไม่สามารถใช้ได้กับการตรวจสอบวัตถุที่มีลักษณะไม่คงที่ได้ ซึ่งหมายถึงไม่สามารถแสดงผลในลักษณะเวลาจริง (Real time) ได้เนื่องจากคุณสมบัติของ Exposure time

ต่อมา กลางปี 1980 มหาวิทยาลัย University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) ได้พัฒนาระบบการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การวัดค่าความจุไฟฟ้าขึ้น ซึ่งใช้สำหรับการสร้างภาพตัดขวางการไหลของวัสดุ 2 ชนิดในท่อจากบ่อน้ำมัน เช่น ก๊าซ/น้ำมัน ซึ่งระบบนี้ได้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบการสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ในเวลาเดียวกันกลุ่มของ Morgantown Energy Technology Center แห่งสหรัฐอเมริกาได้ทำการออกแบบระบบ ECT นี้สำหรับการวัดสัดส่วนการกระจายของ Gas fluidized bed ระบบ ECT ของทั้งสองในขณะนั้นใช้ได้เฉพาะกับระบบที่ส่วนภายนอกไม่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าเท่านั้น

ในปัจจุบัน ได้มีผู้เสนอเทคนิคการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้หลักการต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนของกระบวนการและคุณสมบัติของสิ่งที่ตรวจสอบ เช่น หลักการอินฟราเรด (Infrared), Optical, PET, MRI, อัลตราโซนิค (Ultrasonic) หรือการวัด

คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Resistance, Capacitance และ Impedance) ซึ่งแต่ละหลักการเหล่านี้มีทั้งข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ และข้อจำกัดต่างๆกัน การเลือกหลักการต่างๆ ให้เหมาะกับการใช้งานจะขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย เช่น คุณสมบัติทางกายภาพของสิ่งที่ตรวจสอบ ความละเอียดของภาพที่ต้องการ ราคาของอุปกรณ์ ทรัพยากรบุคคลในการทำงาน หรืออันตรายที่เกิดจากคุณสมบัติของเครื่องมือ เป็นต้น

จุดประสงค์ของการสร้างภาพตัดขวางของกระบวนการ (Process Tomography) มีลักษณะคล้ายกับจุดประสงค์ของการสร้างภาพตัดขวางในทางการแพทย์ เช่น การตรวจสอบร่างกายมนุษย์ แต่การสร้างภาพตัดขวางของกระบวนการถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรม (Industrial Process) เช่น การตรวจสอบวัตถุดิบในแทงค์ (Tank) หรือท่อ (Pipe) โดยมีหลักการคือการใช้ชุดของเซ็นเซอร์ติดตั้งอยู่รอบๆ ภาชนะที่ภายในมีวัตถุที่ต้องการตรวจสอบอยู่ จะทำให้สามารถสร้างภาพการกระจายตัว ความเข้มข้นหรือการเคลื่อนตัวของวัตถุที่อยู่ภายในได้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกสร้างเป็นภาพ 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อใช้ในการสังเกต (Monitoring) กระบวนการ, ตรวจสอบผลการผลิต, ตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพ หรือการส่งข้อมูลที่ถูกประมวลผลแล้วกลับไปควบคุมระบบ และยังสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการ และการออกแบบกระบวนการการทำงานให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

อย่างไรก็ตามเครื่องมือสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรมนี้จะต้องมีคุณลักษณะคือ ราคาถูก, การวัดมีความเร็วสูง, ระบบเซ็นเซอร์จะต้องไม่ทำให้เกิดรอยแตกหรือทำลายภาชนะหรือวัตถุที่กำลังตรวจสอบ (Non invasive) ซึ่งสามารถทำให้ใช้ได้กับกระบวนการที่มีการกัดกร่อนสูง และต้องไม่รบกวนหรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ (Non intrusive) เช่น การไหลของน้ำมันในท่อ เป็นต้น

กระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ถูกประยุกต์ใช้เช่น การขนส่งภายในท่อ (น้ำมัน ก๊าซของแข็งหรือของไหล) Stirred reactor หรือ กระบวนการการแยกและการผสม (Mixer and Separator) เป็นต้น ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือการสร้างภาพตัดขวางทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องมือวัด (Hardware) และส่วนของการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดแล้วแสดงผล (Software) ส่วนของเครื่องมือวัดนั้นจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์และสัญญาณควบคุม ส่วนของการประมวลผลข้อมูลจะประกอบด้วยการสร้างกลับ การแสดงผล และส่วนกำเนิดสัญญาณควบคุม

บทที่ 3

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

3.1 หลักการพื้นฐาน

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้คุณลักษณะการกระจายตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ภายในวัตถุในรูปแบบของภาพตัดขวาง 2 มิติ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การไหลหรือการกระจายตัวของ ก๊าซ/น้ำมัน ในท่อส่งน้ำมัน กระบวนการการแยก/ผสมทางเคมี เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่รบกวน หรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ มีความปลอดภัยสูง มีความเร็วในการสร้างภาพ เครื่องมือสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก มีขนาดเล็กและสะดวกกว่าเมื่อเทียบกับ MRI หรือ X-ray CT

ระบบ ECT แตกต่างจากระบบ EIT คือ ระบบ EIT ใช้แสดงภาพตัดขวางภายในวัตถุโดยอาศัยความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยการป้อนกระแสเข้าไปที่ผิวหน้าของวัตถุ แล้วใช้อิเล็กโทรดวัดศักดาไฟฟ้าโดยรอบ จากนั้นคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ภายใน ที่ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมโดยรอบนั้น ปัญหาของ EIT คืออิเล็กโทรดต้องสัมผัสโดยตรงกับตัวนำภายในวัตถุ ซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรม ที่โครงสร้างภายนอกวัตถุมีลักษณะเป็นฉนวนและยุ่งยากในการทำให้อิเล็กโทรดสัมผัสโดยตรงกับสารในวัตถุ

ระบบ ECT อาศัยการวัดความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ติดอยู่รอบๆ วัตถุที่จะวัด ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าเพอmittiviti ของสารองค์ประกอบในวัตถุนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้มาสร้างเป็นภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ แสดงถึงความแตกต่างของค่าเพอmittiviti ของวัตถุ ด้วยขั้นตอนการสร้างภาพต่างๆที่เหมาะสม ดังนั้นระบบ ECT จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่ทำการวัด วัตถุนี้จะมีลักษณะเป็นฉนวนทางไฟฟ้าหรือมีค่าความเป็นตัวนำทางไฟฟ้าต่ำ

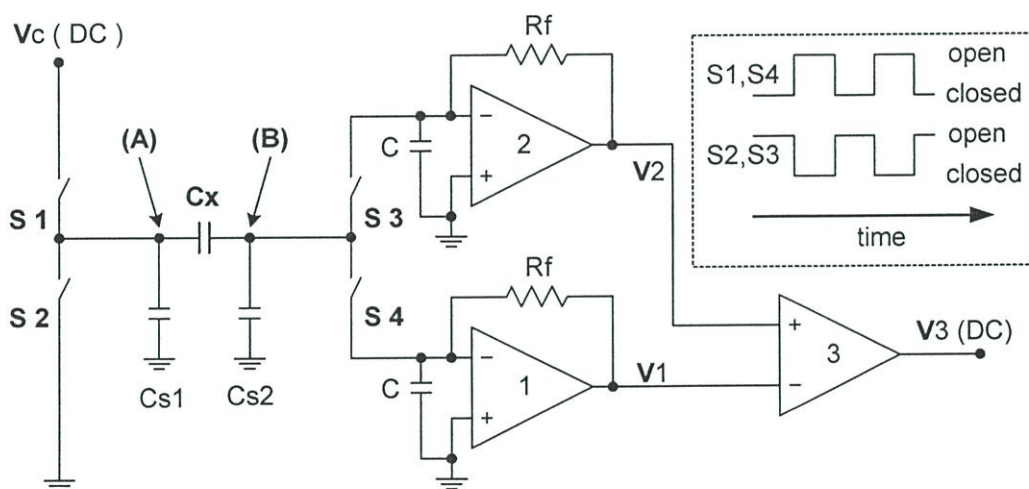
3.2 วงจรพื้นฐานที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าในระบบ ECT เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากคู่อิเล็กโทรดซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะวางอยู่ห่างกัน จึงส่งผลให้ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดมีค่าน้อย และยากต่อการวัดค่าให้มีความแม่นยำ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการนั้น เป็นค่าความแตกต่างหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวกลางที่แทรกอยู่ระหว่างคู่อิเล็กโทรด

อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเดิมได้มีการออกแบบวงจรที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบ ECT โดยวิธีหลักๆ 2 วิธี คือ วิธีการ ชาร์จ - ดิสชาร์จ (Charge / Discharge) [3] ประจุผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด และวิธีการป้อนสัญญาณไซน์ (AC – Based) [4] ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด

3.2.1 วงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี ชาร์จ-ดิสชาร์จ [3] นั้นจะใช้หลักการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เข้าที่ตัวเก็บประจุ ทั้งขั้วบวก และขั้วลบ สลับกันซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุอยู่ในสถานะ ชาร์จประจุ และดิสชาร์จประจุสลับกัน ส่วนแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ถูกวัด โดยในระบบ ECT นี้ ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่อยู่ในรูปของศักดาไฟฟ้า ซึ่งจากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจร ชาร์จ - ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit)

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงของสายส่งหรือสายนำสัญญาณ (Stray Capacitance) จะถูกขูปรวมกันเป็น C_{s1} และ C_{s2} การทำงานในแต่ละรอบจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงของการชาร์จ และช่วงของการดิสชาร์จ โดยที่ในขณะที่ชาร์จ สวิตช์ $S1$ และ $S4$ จะปิด จุด A ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดัน และจุด B ถูกต่อเข้ากับอินพุทลบของออปแอมป์ 1 ขณะเดียวกันที่ $S2$ และ $S3$ จะเปิด ส่งผลให้กระแสชาร์จไหลจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_c (DC) ผ่านตัวเก็บประจุที่ทำกรวัด (C_x) ไปยังออปแอมป์ 1 โดยที่ประจุที่ชาร์จเข้าตัวเก็บประจุ C_x แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$Q_1 = V_c C_x \quad (3.1)$$

การชาร์จและดิสชาร์จสลับกันอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่คงที่ จึงต้องพิจารณาเรื่องของความถี่ด้วย โดยกระแสที่ชาร์จประจุ ที่ผ่านไปยัง ออปแอมป์1 จะแสดงดังสมการที่ (3.2)

$$I_1 = fQ_1 = fV_C C_X \quad (3.2)$$

ออปแอมป์1 จะทำหน้าที่แปลงกระแสชาร์จ I_1 ให้อยู่ในรูปของแรงดัน V_1 ที่เอาท์พุท ดังสมการที่ (3.3) และเมื่อคิดค่าแรงดัน Offset จะแสดงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$V_1 = -I_1 R_f = -fV_C C_X R_f \quad (3.3)$$

$$V_1 = -fV_C C_X R_f + e_1 \quad (3.4)$$

และเช่นเดียวกันในช่วงของการดิสชาร์จ สวิตช์ S2 และ S3 จะปิด โดยที่สวิตช์ S1 และ S4 จะเปิด ประจุที่เก็บอยู่ใน C_X จะถูกดิสชาร์จ เนื่องจากจุด A จะถูกต่อลงกราวด์ และจุด B จะถูกต่อเข้ากับอินพุทลบของ ออปแอมป์2 เป็นผลให้ กระแสดิสชาร์จประจุของ C_X ถูกดึงจาก ออปแอมป์2 และ ออปแอมป์2 จะแปลงกระแสนั้นเป็นแรงดัน V_2 ดังสมการที่ (3.5)

$$V_2 = fV_C C_X R_f + e_2 \quad (3.5)$$

เมื่อ e_1 และ e_2 คือ แรงดันออฟเซทของออปแอมป์ (Offset Voltage)

สำหรับ ออปแอมป์3 จะทำหน้าที่รวมสัญญาณเพื่อให้ได้ค่าศักดาไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_X ที่ถูกวัด โดยที่ออปแอมป์3 จะมีอัตราขยายเท่ากับ K และค่าศักดาไฟฟ้าเอาท์พุท V_3 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.5)

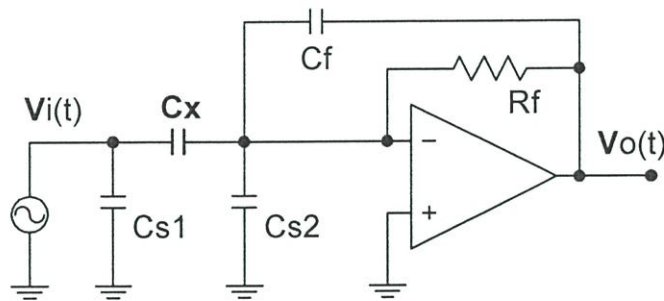
$$V_3 = K(V_2 - V_1) = 2KfV_C C_X R_f + K(e_2 - e_1) \quad (3.6)$$

ในรูปที่ 3.1 ค่าความจุไฟฟ้าแฝง C_{s1} จะถูกต่อเข้าโดยตรงกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_C (DC) หรือต่อกับกราวด์สลับไปมา โดยที่ C_{s1} นั้นไม่ได้สร้างกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่กำลังถูกวัด C_X ดังนั้น C_{s1} จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของ C_X ในขณะเดียวกัน C_{s2} จะถูกต่ออยู่กับอินพุทของออปแอมป์ทั้งสองตัวซึ่งจะเป็นกราวด์เสมือน และค่าแรงดันตกคร่อมจึงเป็น 0 จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของ C_X เช่นกัน

สำหรับความเร็วในการสวิตช์จะถูกจำกัดโดยตัว CMOS ที่ถูกเลือกมาใช้ทำสวิตช์ และตัวออปแอมป์เองก็จะมีค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) เป็นข้อจำกัด

3.2.2 วงจรเอซี-เบส (AC - Based Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี เอซี-เบส [4] นั้นจะใช้หลักการป้อนสัญญาณไซน์ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด C_x ในลักษณะเหมือนกับการ คัปปลิง (Coupling) สัญญาณ โดยสัญญาณ ไซน์ที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_x จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x ที่ต้องการวัด ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรเอซี - เบส (AC - Based Circuit)

จากรูปที่ 3.2 สัญญาณ ไซน์ $V_i(t)$ จะถูกป้อนให้กับ C_x ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดค่า จากนั้นสัญญาณที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_x จะถูกขยาย โดยออปแอมป์ และได้ $V_o(t)$ ตามสมการที่ (3.7)

$$-V_o = \frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_i \quad (3.7)$$

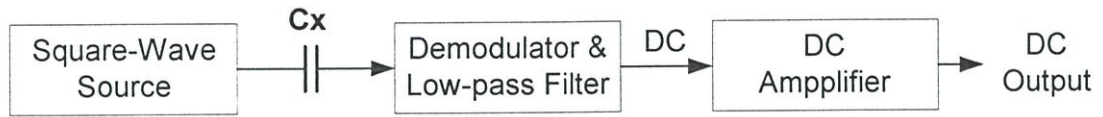
และหากเลือก R_f ที่มีค่ามากๆ $j\omega C_f R_f \gg 1$ จะทำให้ค่า “1” ในสมการที่ (3.7) ไม่มีผลต่อค่า V_o จึงเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$-V_o = \frac{C_x}{C_f} V_i \quad (3.8)$$

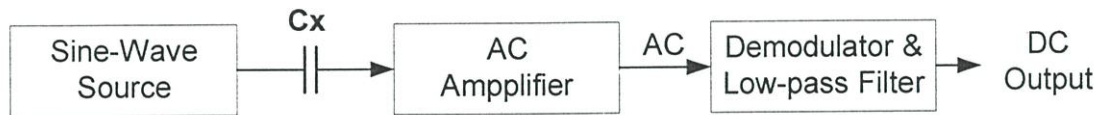
$$-\frac{V_o}{V_i} = \frac{C_x}{C_f} \quad (3.9)$$

ในรูปที่ 4 สำหรับค่าความจุไฟฟ้าแฝง C_{s1} จะถูกต่อขนานอยู่กับแหล่งจ่ายสัญญาณ ไซน์ จึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x และในขณะเดียวกัน C_{s2} ก็ถูกต่อเข้ากับ อินพุทลบของออปแอมป์ ซึ่งจะเป็นกราวด์เสมือนจึงไม่มีผลต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x เช่นกัน

จากวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบที่มีวิธีในการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ต่างกันและสำหรับข้อดี และข้อเสีย รวมถึงผลของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นั้นแตกต่างกันอย่างไร วงจรทั้งสองแบบจึงถูกนำมาทดลองและเปรียบเทียบ [7] จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3



Charge/Discharge Block Diagrams



AC - Based Block Diagrams

รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบ ชาร์จ - ดิสชาร์จ และ เอซี - เบส

จากรูปที่ 3.1 สวิตช์ S1 และ S2 จะทำหน้าที่มอดูเลต (Modulate) สัญญาณแบบสี่เหลี่ยม (Square Wave) ไปยังตัวเก็บประจุ ที่ต้องการวัดค่า (C_x) ส่วนสวิตช์ S3 และ S4 จะทำหน้าที่เหมือน ดีมอดูเลเตอร์ (Demodulator) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) สำหรับสัญญาณที่ได้จากการชาร์จและดิสชาร์จจะถูกนำไปขยายด้วยวงจร ดีซีแอมป์ (DC-Amplifier) เพื่อให้มีขนาดเพียงพอกับความถี่ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 รูปบน

และจากรูปที่ 3.2 นั้นเนื่องจาก C_f มีค่ามากกว่า C_x อัตราขยายของวงจร จากสมการที่ (3.9) จึงมีค่าน้อยกว่า 1 เอาต์พุตของวงจรจึงเป็นสัญญาณเอซีที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นต้องมีวงจรขยายสัญญาณเอซีเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการก่อน จากนั้นจึงจะนำสัญญาณไปดีมอดูเลต และกรองความถี่ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันดีซี ซึ่งใช้แทนค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าได้ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 รูปล่าง

ข้อแตกต่างของวงจรทั้งสองแบบคือ ตำแหน่งการวางของ ดีมอดูเลเตอร์ในแบบ ชาร์จ-ดิสชาร์จนั้น อินพุตของตัว ดีมอดูเลเตอร์จะรับสัญญาณทุกอย่าง จากตัวเก็บประจุ C_x แต่สำหรับใน เอซี-เบส นั้น สัญญาณเอซีที่รับจากตัวเก็บประจุ C_x จะถูกขยายก่อนจากนั้นจึงจะทำการดีมอดูเลต

เนื่องจากวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบนี้ได้ใช้วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังนั้นผลที่ได้จากวงจรทั้งสองแบบจึงมีทั้งข้อดี และข้อเสียที่ต่างกันออกไป โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ และวงจรเอซี-เบส โดย [7]

	วงจรชาร์จ - ดิสชาร์จ	วงจรเอซี-เบส
คุณสมบัติ	<ul style="list-style-type: none"> (1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง (stay-immune) (2) สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าละเอียดได้ที่ขนาด 0.3 fF [1] (3) ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (4) ความถี่ที่ใช้ในการชาร์จ-ดิสชาร์จ สูงถึง 2.5 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> (1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง (2) สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าละเอียดได้ที่ขนาด 0.4 fF [16] (3) ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์ หรือ การมอดูเลตด้วยการเปลี่ยนแปลงเฟส PSD(phase sensitive demodulator) หรือ ค่าการเก็บประจุ และ/หรือ ค่าความนำ (4) ความถี่ที่ใช้กระตุ้นสามารถสูงได้ถึง 1 MHz
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> (1) ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> (1) มีจุดทำงาน (drift) ต่ำเนื่องจากใช้วงจรขยายแบบเอซี แทนวงจรขยายแบบดีซี (2) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มีค่าสูง
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> (1) ประจุที่เกิดจากช่วงการชาร์จของสวิตช์ซิมอส (2) เนื่องจากการใช้วงจรขยายแบบดีซี (ดูรูปที่ 3.3) ทำให้ได้รับค่าที่เกิดจากการเลื่อน (drift problem) (3) ผลกระทบจากการสูญเสียสภาพการนำ 	<ul style="list-style-type: none"> (1) มีความยุ่งยากและมีราคาสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่ความถี่สูง

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในตารางที่ 3.1 วงจรแบบ เอซี-เบส จะมีข้อดีมากกว่าวงจรแบบ ชาร์จ-ดิสชาร์จ และขณะเดียวกันทางด้านคุณสมบัติของวงจรแบบเอซี-เบส ก็ไม่ด้อยกว่า ส่วนในเรื่องข้อเสียของวงจรแบบเอซี-เบส นั้นจะมีความซับซ้อนยุ่งยากและราคาที่สูงกว่าวงจรแบบชาร์จ-ดิสชาร์จ แต่ถึงอย่างไรในระบบ ECT ก็ยังมีต้นทุนที่ต่ำและความซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าระบบสร้างภาพตัดขวางแบบอื่นๆ

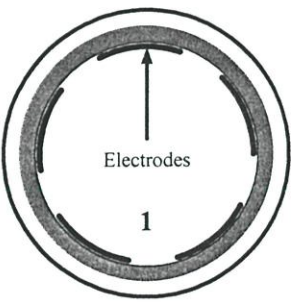
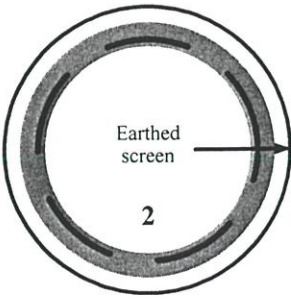
จากการศึกษาวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้ถูกนำมาใช้กับระบบ ECT และได้เปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรทั้งสองแบบ ดังนั้นการทดลองในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบ เอซี-เบส และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบ สร้างระบบจึงได้ตัดวงจรบางส่วนที่ไม่มีผลมากนักต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยใช้วงจร เอซี-เบส และเอซี-แอมป์ เพียงชุดเดียว ซึ่งเดิม [7] ได้ใช้วงจร เอซี-เบส และ เอซี-แอมป์ หนึ่งชุดต่ออิเล็กโทรดหนึ่งตัว

3.3 รูปแบบการวางอิเล็กโทรดในระบบ ECT

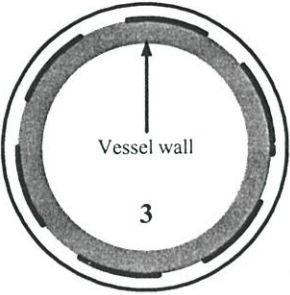
ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในระบบ ECT จะอยู่ในรูปแบบที่ 3 เนื่องจากความง่ายต่อการสร้าง และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่นำมาตรวจสอบ ดังนั้นอิเล็กโทรด จะไม่ถูกกัดกร่อนในกรณีที่วัตถุภายในเซ็นเซอร์มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนและที่สำคัญไม่มีผลกระทบต่อวัตถุหรือรบกวนต่อการไหลของระบบ ซึ่งได้อธิบายข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

1. ติดอยู่ด้านในของท่อ (Internal electrodes)
2. ฝังอยู่ภายในของท่อ (Embedded electrodes)
3. ติดอยู่ด้านนอกของท่อ (External electrode)

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของการติดอิเล็กโทรดแต่ละลักษณะ

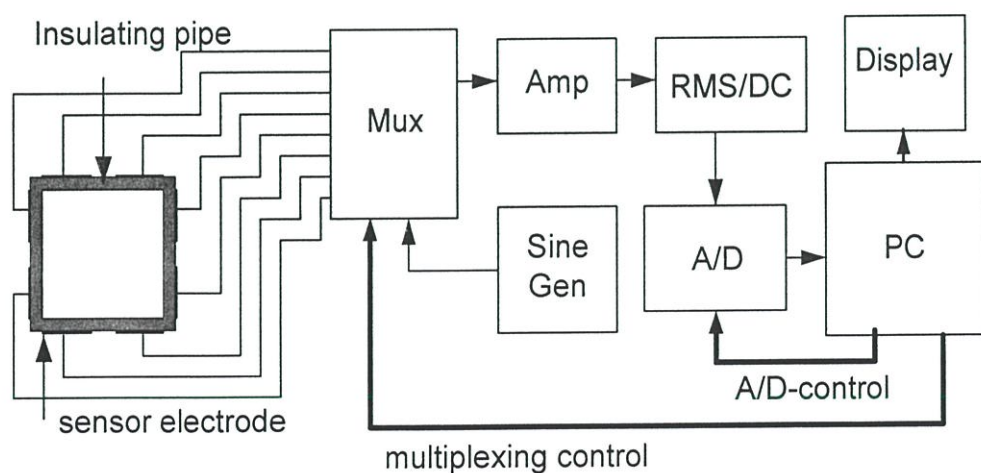
ลักษณะอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ทำท่อไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าสูง - วัสดุที่ใช้ทำท่อสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้า 	<ul style="list-style-type: none"> - อิเล็กโทรดอาจถูกกัดกร่อน - รบกวนการไหลของระบบ - ยากต่อการสร้าง
	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่รบกวนการไหลของระบบ - อิเล็กโทรดมีความแข็งแรง - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย) 	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ทำท่อมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า - ยากต่อการสร้าง

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ลักษณะอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่รบกวนการไหลของระบบ - ง่ายต่อการสร้าง - ราคาถูก - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย) 	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

3.4 โครงสร้างของระบบ ECT

ระบบ ECT พื้นฐานจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับส่วนที่จะวัด (Primary sensor) ซึ่งประกอบไปด้วย อิเล็กโทรดและส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า Earth screen อิเล็กโทรดของระบบ ECT โดยส่วนใหญ่จะถูกติดตั้งด้านนอกของส่วนที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ใช้วัดค่าสัญญาณไฟฟ้าและ เปลี่ยนค่าเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แล้วจึงแปลงเป็นค่าความจุไฟฟ้า ส่วนที่สาม คือ ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างภาพกลับซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Image reconstruction computer) โดยโครงสร้างระบบทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



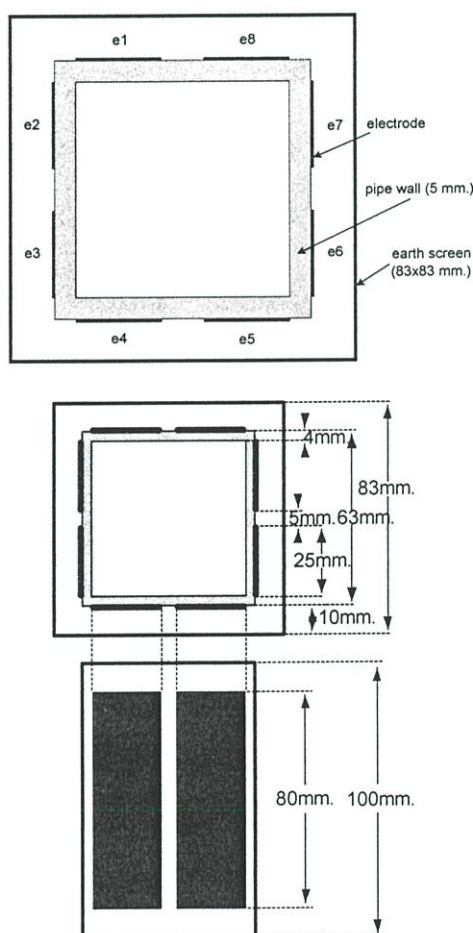
รูปที่ 3.4 โครงสร้างระบบ ECT

3.5 ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทดลองในระบบ ECT นี้จะมี 2 แบบด้วยกันคือ แบบทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม และ แบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม ซึ่งทั้งสองแบบนี้จะมีลักษณะของการติดอิเล็กโทรดตามโครงสร้างดังในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.7

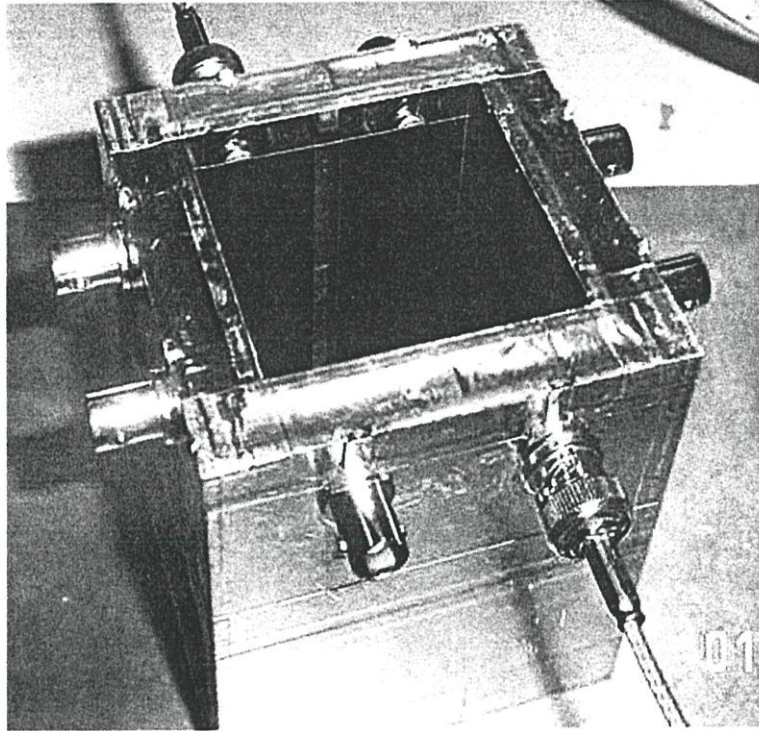
3.5.1 เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

โครงสร้างของเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกออกแบบให้มีขนาดตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นทองแดงจำนวน 8 อิเล็กโทรด (e1-e8) ขนาดความกว้าง 25 มม. และมีความยาว 80 มม. โดยอิเล็กโทรดแต่ละตัวจะวางห่างกัน 5 มม. และวางอยู่ติดกับส่วนนอกของกรอบด้านใน (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 5 มม. กรอบด้านนอก (Earth screen) ทำจากอะลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์โดยมีขนาด 83 x 83 มม. ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด

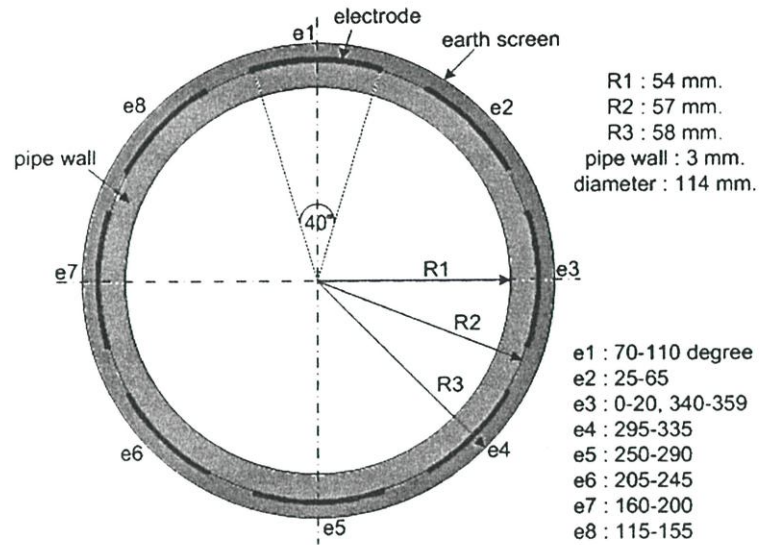
กรอบด้านในทำมาจากแผ่นอะครีลิก(Acrylic plate) โดยมีค่าเพอมีตดิวิตีเท่ากับ 3 ในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอกถูกบรรจุอากาศ ซึ่งมีค่าเพอมีตดิวิตีเท่ากับ 1 ค่าเพอมีตดิวิตีของส่วนประกอบต่างๆเหล่านี้จะถูกกำหนดลงในส่วนของการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าเพื่อสร้างเซนซิวิตีของระบบ ECT สำหรับตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



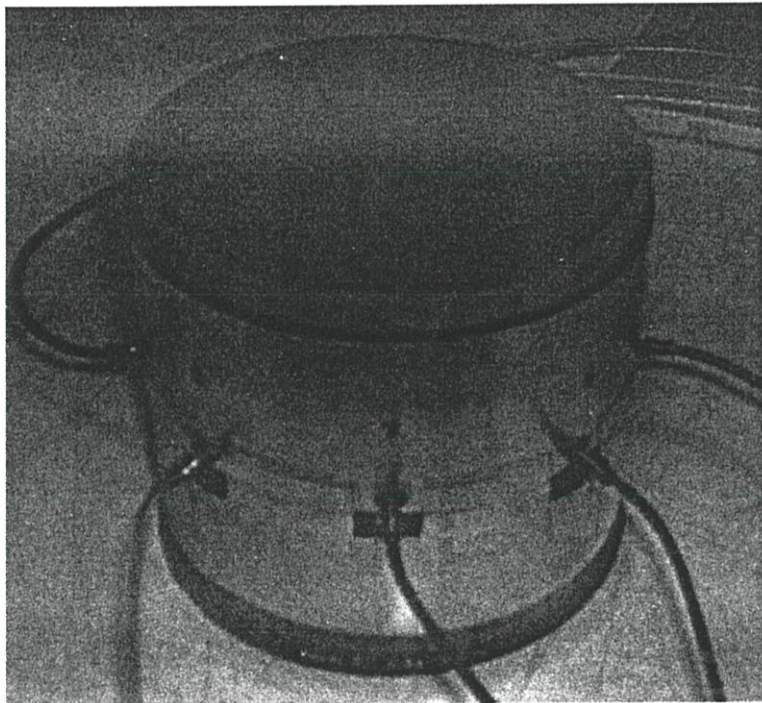
รูปที่ 3.6 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง

3.5.2 เซ็นเซอร์แบบหน้าตัดวงกลม

โครงสร้างของเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละอิเล็กโทรดจะทำมุมกับจุดศูนย์กลางเท่ากับ 40 องศา และวางติดอยู่กับส่วนนอกของกรอบด้านใน (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 3 มม. ตำแหน่งของส่วนต่างๆแสดงไว้ดังรูป ขนาดของรัศมี R1 เท่ากับ 54 มม. ขนาดของ R2 เท่ากับ 57 มม. และขนาดของ R3 เท่ากับ 58 มม. กรอบด้านนอก (Earth screen) ทำจากอะลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์ ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบตามเข็มนาฬิกากรอบด้านในทำมาจากวัสดุ PVC (Polyvinyl chloride) โดยมีค่าเพอมีตดิวิตีเท่ากับ 2.7 และในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอกจะถูกกั้นด้วยอะครีลิก ซึ่งมีค่าเพอมีตดิวิตีเท่ากับ 3 สำหรับตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด

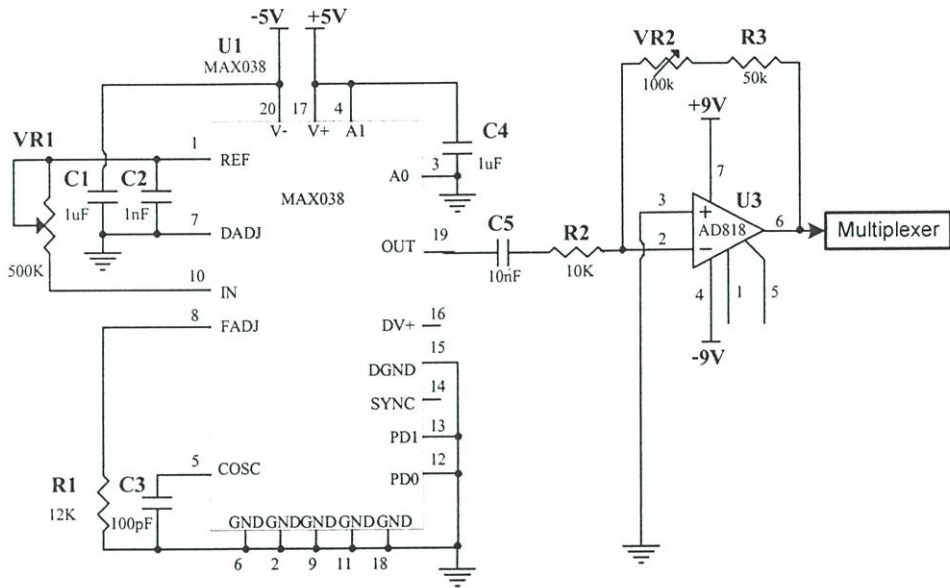


รูปที่ 3.8 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลอง

3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์(Sine Wave Generator)

วงจรในรูปที่ 3.9 จะใช้ไอซี MAX 308 ในการกำเนิดความถี่ ไอซี MAX 038 เป็นไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Waveform Generator) โดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในรูปแบบสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth Wave)

สัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) การกำหนดชนิดของสัญญาณสามารถกำหนดได้โดยขา A0 (ขา3) และ ขา A1 (ขา4) ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.9 วงจรไซน์เวฟเจนเนอเรเตอร์โดยใช้ไอซี MAX038

ตารางที่3.3 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี MAX 038

A0	A1	ชนิดของสัญญาณ
X	1	สัญญาณ ไซน์
0	0	สัญญาณสี่เหลี่ยม
1	0	สัญญาณสามเหลี่ยม

ไอซี MAX 038 สามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 0.1 Hz ถึง 20 MHz สำหรับวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.9 ค่าความถี่ของวงจรจะถูกควบคุมโดย VR₁ และ C₃ โดยความถี่เอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.10) ในระบบนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณ ไซน์ความถี่ 1 MHz และสัญญาณที่ได้จะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นประมาณ 13Vp-p โดย AD818 (U3) ก่อนส่งเข้าอิเล็กทรอนิกส์โดยผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์

$$f_o = \frac{V_m}{(R_m \times C_f)} \tag{3.10}$$

จากวงจรในรูปที่ 3.9 $C_f = C_3$, $V_{in} = 5 \text{ V}$, $R_{in} = VR_1$ ต้องการความถี่เอาต์พุต 1 MHz ดังนั้น จากสมการที่ (3.10) จะได้ว่า

$$1 \times 10^6 = \frac{5}{VR_1 \times C_3} \quad (3.11)$$

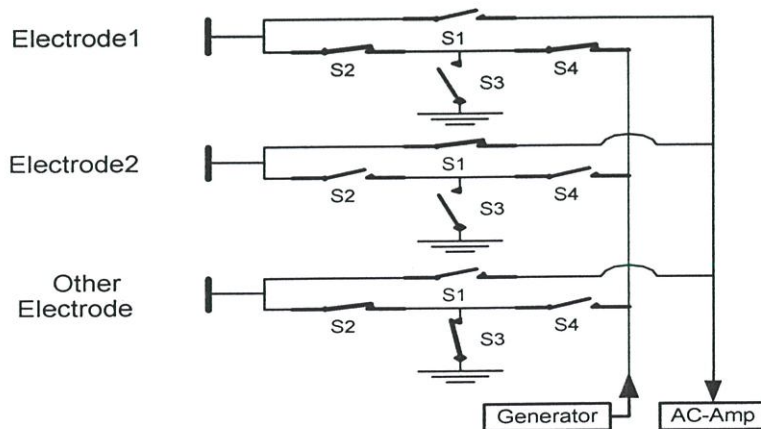
$$VR_1 \times C_3 = \frac{5}{1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-6} \quad (3.12)$$

แต่เนื่องจากค่าตัวชี้ท (Datasheet) กำหนด VR_1 ครอบคลุมในช่วง $12.5 \text{ k}\Omega - 500 \text{ k}\Omega$ \therefore ที่ความถี่ที่ต้องการจะกำหนดให้ VR_1 มีค่า $50 \text{ k}\Omega$ \therefore หาค่า C_3 ได้ดังสมการที่ (3.13)

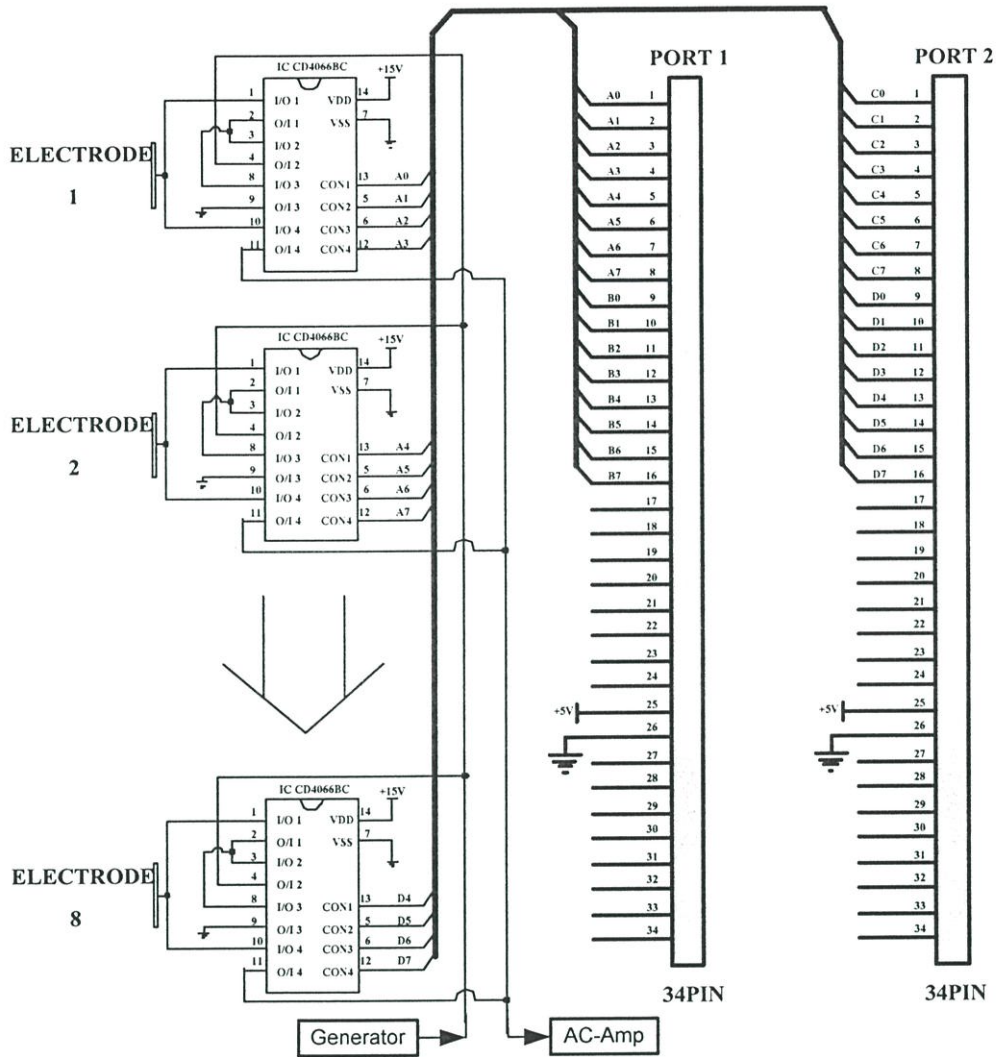
$$C_3 = \frac{5 \times 10^{-6}}{50 \times 10^3} = 100 \times 10^{-12} = 100 \text{ pF} \quad (3.13)$$

3.7 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer)

วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์จะใช้ไอซี CD4066BC เป็นไอซีซีมอสที่ภายในจะประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัวซึ่งจะถูกต่อไว้ดังรูปที่ 3.10 เพื่อทำหน้าที่สวิตช์เลือก อิเล็กโทรดตัวส่ง (Tx) และอิเล็กโทรดตัวรับ (Rx) ที่จะทำการวัด และเนื่องจากสวิตช์มีจำนวนมาก อีกทั้ง เพื่อให้วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ทำงานสัมพันธ์กันกับการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าจากวงจรอนุล็อก/ดิจิตอล จึงต้องอาศัยการ์ด 8255 มาช่วยควบคุมการทำงานซึ่งจะต่อที่ I/O Port1 และ Port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และสถานะสวิตช์จะถูกกำหนดไว้ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.10 รูปแบบการต่อสวิตช์ในวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์



รูปที่ 3.11 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer)

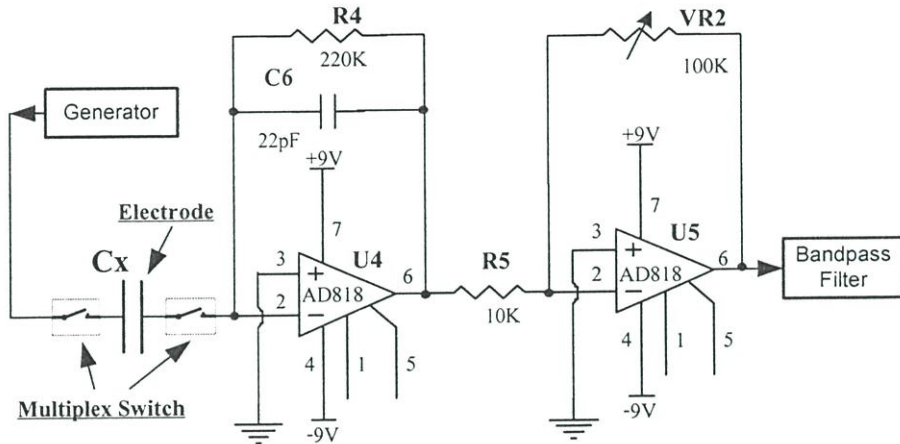
ตารางที่ 3.4 สถานะสวิทช์

Electrode	S1	S2	S3	S4
Tx	Off	On	Off	On
Rx	On	Off	Off	Off
Other	Off	On	On	Off

3.8 วงจรขยายสัญญาณ (AC-Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณ จะรับสัญญาณขาอินพุตที่ผ่านคู่อิเล็กโทรดที่ถูกเลือกโดยวงจรมัลติเพล็กซ์ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด (C_x) มีค่าน้อยมาก อยู่ในช่วง $0.1\text{pf} - 3\text{pf}$ สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของ U4 จึงมีขนาดที่เล็ก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มวงจรขยาย U5 และเนื่องจากสัญญาณก่อนขยายมี

ขนาดเล็กใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยาย U5 จึงมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่มาก ดังนั้นสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปกรองโดยวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ เมื่อกำหนดให้ C_x (Electrode Capacitance) เป็นอินพุตของวงจร และไม่คิดผลของวงจรมัลติเพล็กซ์ อัตราขยายของ U4 (Gain) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ C_x, C_6 และอัตราขยาย U5 คือ $-V_o/V_i = VR_2/R_5$



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณ (AC Amplifier)

อัตราขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ C_x เป็นอินพุตของวงจรสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$-V_i(j\omega C_x) - \frac{V_o \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_6} \right)}{\frac{R_4}{j\omega C_6}} = 0 \quad (3.14)$$

$$-V_i(j\omega C_x) - V_o(j\omega C_6 R_4 + 1) \frac{1}{R_4} = 0 \quad (3.15)$$

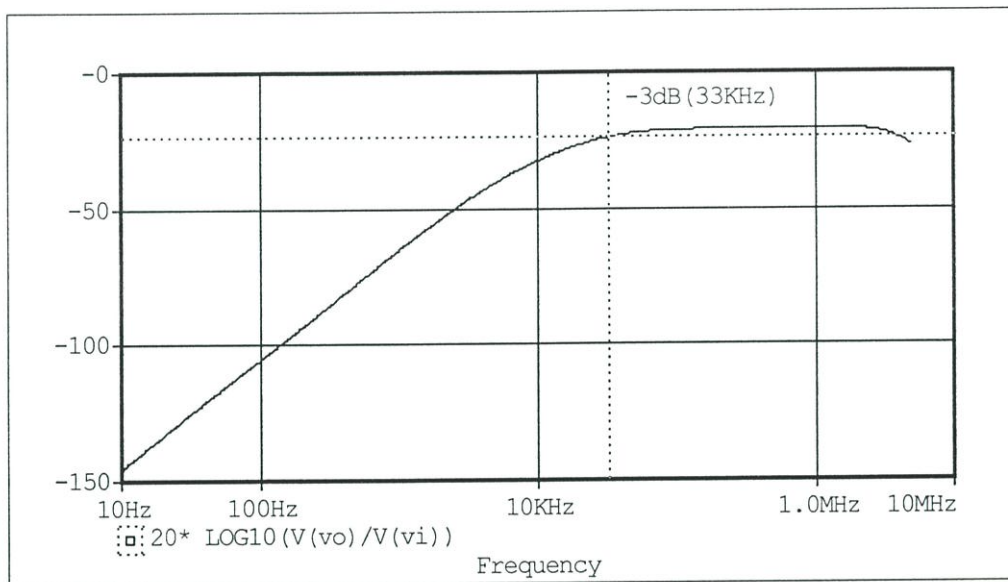
$$-V_o \left(j\omega C_6 + \frac{1}{R_4} \right) = V_i(j\omega C_x) \quad (3.16)$$

$$-\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega C_x}{j\omega C_6 + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_4 j\omega C_x}{R_4 j\omega C_6 + 1} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.17) เมื่อ $R_4 \gg 1/(j\omega C_6)$ จะได้อัตราขยายตามสมการที่ (3.18)

$$-\frac{V_o}{V_i} \cong \frac{C_x}{C_6} \quad (3.18)$$

จุดตัดความถี่ของวงจร (cut off frequency) สามารถหาได้ จากสมการที่ (3.17) ซึ่งจะได้
ค่า $\omega = 1/(C_6 R_4)$ หรือจะได้ $f_c = 1/(2\pi C_6 R_4)$

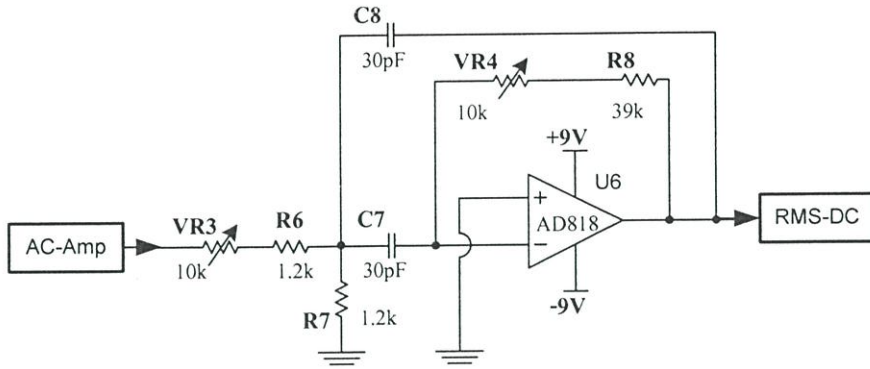


รูปที่ 3.13 แสดงจุดตัดความถี่ของวงจรขยาย U4 และความถี่ที่ใช้งาน

สำหรับกราฟในรูปที่ 3.13 เป็น กราฟที่ได้จากการ ซิมูเลท (Simulate) โดยโปรแกรม PSpice ซึ่งแสดงให้เห็นการตอบสนองความถี่ ของวงจรขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ $C_x = 2\text{pf}$ ความถี่ที่ใช้ในระบบนี้คือ 1 MHz จากกราฟจะเห็นว่าความถี่ 1 MHz จะอยู่สูงกว่าจุดตัดความถี่ของวงจร ซึ่งในวงจรนี้จะมีจุดตัดที่ประมาณ 33 KHz หรือ $\omega = 1/(C_6 R_4)$

3.9 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ (Multiple Feedback Bandpass Filter)

สัญญาณที่ผ่านการขยายยังมีขนาดเล็ก และมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยค่อนข้างมาก วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ [8,9] จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนทิ้ง โดยให้ผ่านเฉพาะสัญญาณไซน์ ความถี่ 1 MHz ซึ่งซิมูเลทโดย PSpice ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.15 และเงื่อนไขที่ต้องการของวงจร ในรูปที่ 3.14 คือ จะเลือกค่า $Q = 4$ อัตราขยายประมาณ 16 เท่า ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 3.14 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์แบบมัลติเฟีดแบค (Multiple Feedback Bandpass Filter)

เมื่อกำหนดให้ $C_7 = C_8 = C = 30 \text{ pF}$; $Q = 4$; $A = 16$; $f_0 = 1 \text{ MHz}$

$R_i = VR_3 + R_6$; $R_2 = R_7$; และ $R_f = VR_4 + R_8$

$$Q = \frac{f_0}{f_h - f_l} \quad (3.19)$$

$$R_i = \frac{Q}{A \cdot 2 \pi f_0 C} \quad (3.20)$$

$$R_7 = \frac{Q}{(2Q^2 - A) 2 \pi f_0 C} \quad (3.21)$$

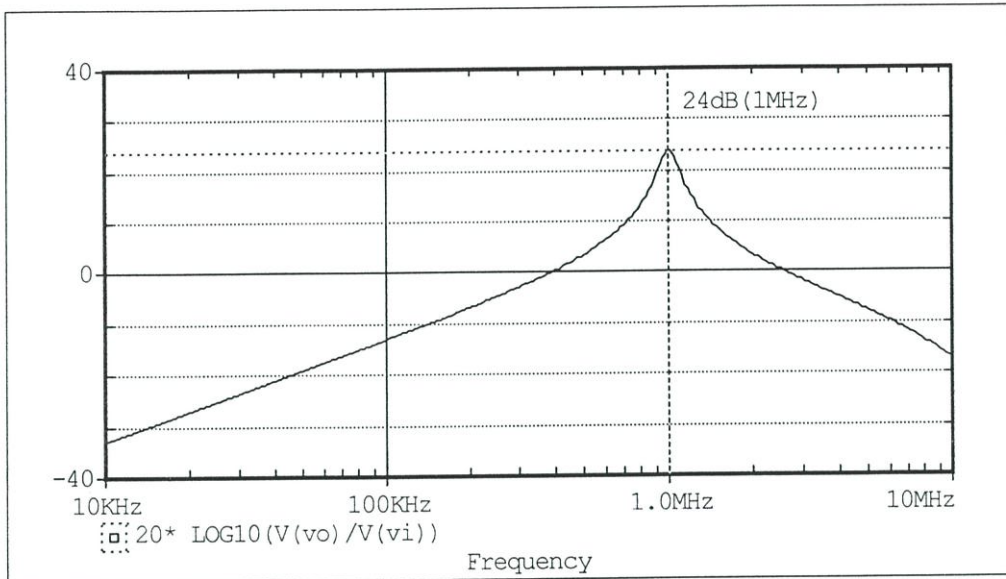
$$R_f = \frac{Q}{\pi f_0 C} \quad (3.22)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนดและสมการที่ (3.20), (3.21), (3.22) จะสามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทานในวงจรได้ดังสมการที่ (3.23), (3.24) และ (3.25) คือ

$$R_i = \frac{4}{16 \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326 \text{ k}\Omega \quad (3.23)$$

$$R_7 = \frac{4}{(2 \times 4^2 - 16) \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326 \text{ k}\Omega \quad (3.24)$$

$$R_f = \frac{4}{\pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 42.441 \text{ k}\Omega \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.15 การตอบสนองความถี่ของวงจรแบบพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.14

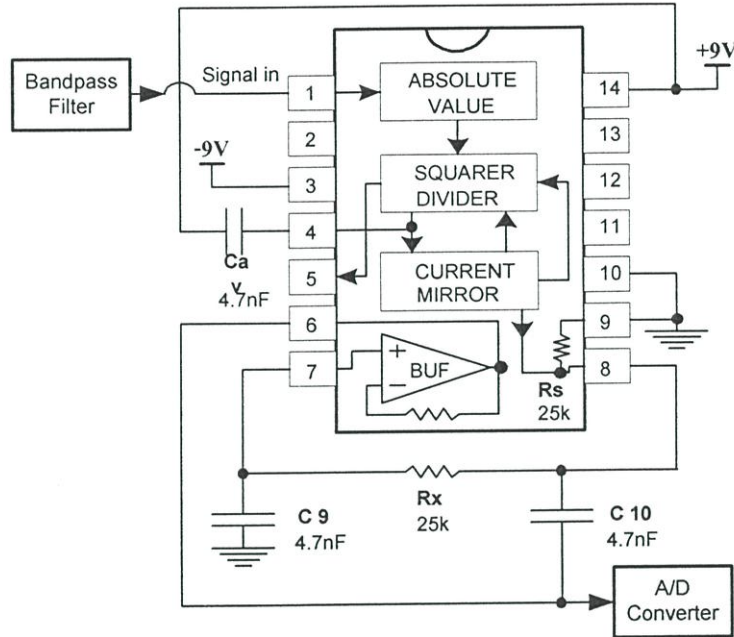
3.10 วงจรแปลงแรงดันเอซี เป็นแรงดันดีซี (RMS to DC Converter)

วงจรอาร์เอ็มเอส- ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.16 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไซน์ ความถี่ 1 Mhz ที่รับมาจากวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.14 ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟ ดีซี (DC) ซึ่งขนาดของแรงดัน ดีซี ที่ได้จะมีค่าเทียบเท่ากับ โวลท์อาร์เอ็มเอส (Volt RMS) ของสัญญาณอินพุท (V_{in}) จากนั้นนำระดับสัญญาณ ดีซี ที่ได้ไปเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิทัลและนำข้อมูลส่งต่อไปเก็บยังเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทาง พอร์ต I/O โดยอยู่ในรูปของเท็กซ์ไฟล์ก่อนจะนำไปสร้างภาพกลับ

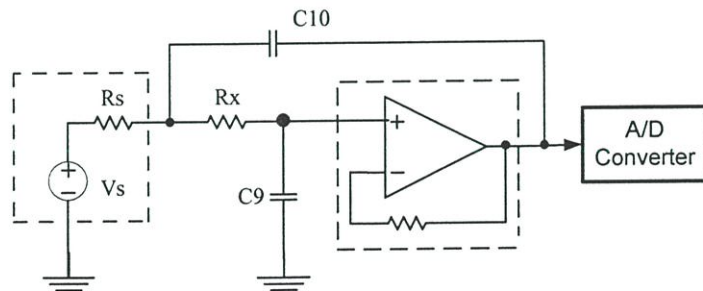
จากคาส์ซิท และวงจรฟิลเตอร์ [8,9] จะสามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในรูปที่ 3.17 ได้ จากสมการที่ (3.26) ในส่วนเอาต์พุท ของวงจรเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับสอง (Second-Order Low Pass Filter) ซึ่งจะได้ ค่าความชัน (Slope) -40 dB/decade และจุดตัดความถี่จะถูกกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความเร็วของการสวิตช์เลือกอิเล็กทรอนิกส์ของวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ในการทดลองจากการอ่านค่าข้อมูล 28 ค่า (28 Conversion) เวลาที่ใช้ในการแปลงรวมกับเวลาการอ่านค่าในแต่ละค่าจะใช้เวลาประมาณ 1.2ms ดังนั้นความถี่ในการอ่านค่าคือ $1 / 1.2\text{ms} = 833\text{Hz}$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{R_s \times R_x \times C_9 \times C_{10}}} \quad (3.26)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{25 \times 10^3 \times 25 \times 10^3 \times 4.7 \times 10^{-9} \times 4.7 \times 10^{-9}}} = 1.354 \text{ kHz} \quad (3.27)$$



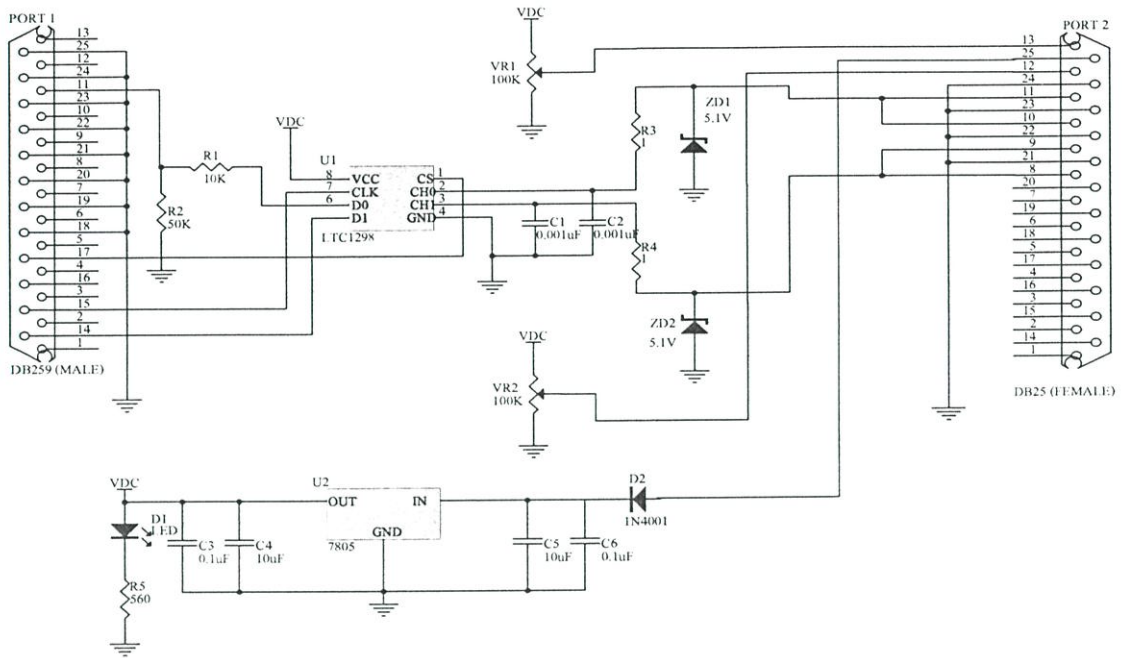
รูปที่ 3.16 วงจรแปลง อาร์เอ็มเอส เป็น แรงดันไฟตรง (RMS to DC Converter)



รูปที่ 3.17 เอ้าท์พุทของวงจรในรูปที่ 3.16 เมื่อวัดใหม่

3.11 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (A to D Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะใช้บอร์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจร ดังรูปที่ 3.18 และตารางที่ 3.5



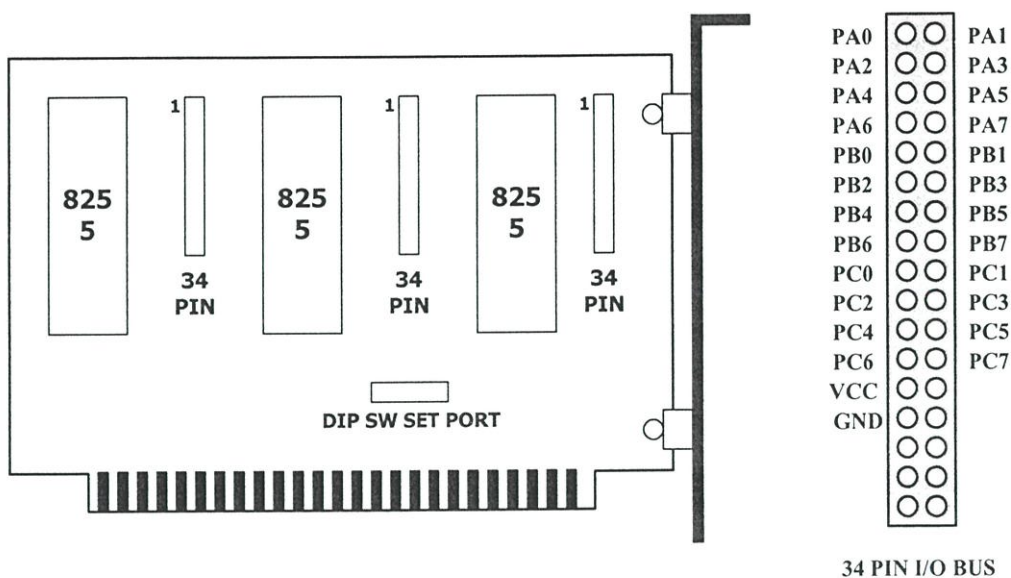
รูปที่ 3.18 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

CONVERTION TIME	60µS
SAMPLING RATE	11.1 KHz
INPUT CHANNEL	2 CHANNEL
GAIN ERROR	+/- 2 LSB
ANALOG INPUT RANGE	-0.05 V TO +5.05 V
+VCC SUPPLY	+9 VDC

3.12 การ์ดอินเทอร์เฟซ 8255 (ET-8255 Interface Card)

การ์ดอินเทอร์เฟซ 8255 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเทอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการ์ดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุตพอร์ทและเอาต์พุตพอร์ทเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเทอร์เฟซนี้จะมีพอร์ทให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ท หรือ 72 บิต (1 พอร์ทมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 3.19 และตารางที่ 3.6



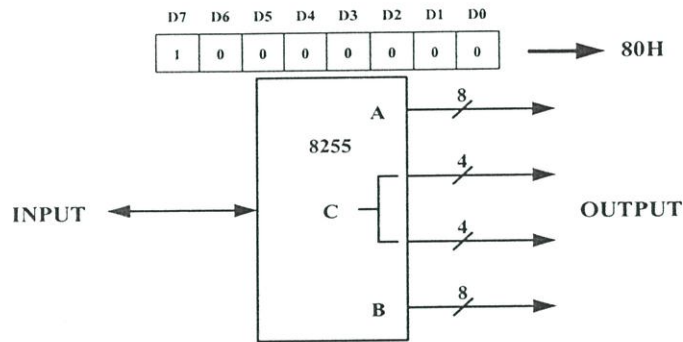
รูปที่ 3.19 ลักษณะของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

สำหรับรูปที่ 3.21 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ทและเอาต์พุทพอร์ท และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ท คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และคิพสวิทช์

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

คุณสมบัติของของบอร์ด ET-8255	
INPUT LOGIC LOW	MIN = -0.5 VOLTS , MAX = 0.8 VOLTS
INPUT LOGIC HIGH	MIN = 2.0 VOLTS , MAX = 5 VOLTS
OUTPUT LOW VOLTAGE PORTS (I-SINK = 1.7 mA)	0.45 VOLTS
OUTPUT HIGH VOLTAGE PORTS (I-SOURCE = 200 uA)	2.4 VOLTS
POWER CONSUMPTION	300 mA
DECODE PORT	8 POSITION DIP SW.
PORT	3 (8255 I/O PORT 3 X 8 BIT)

ในส่วนในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ต โดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 เราจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ตทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ตหรือเอาต์พุทพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุทพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด (Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

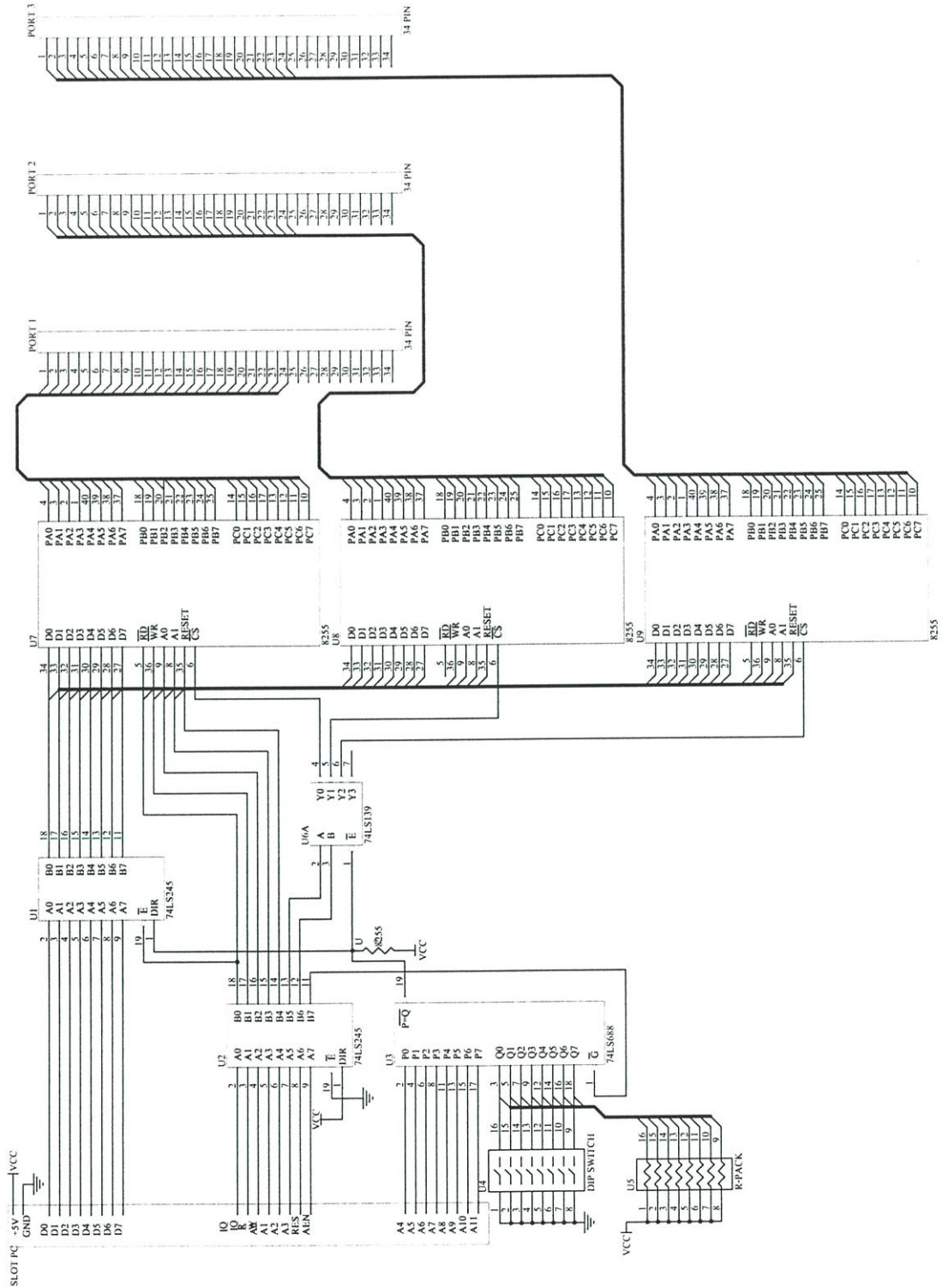
ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรส สามารถแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET - 8255

ตารางการใช้พอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของการ์ด ET-8255	
หมายเลขพอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	การใช้งานพอร์ตของการ์ด ET-8255
300H	PORT A 8255#1
301H	PORT B 8255#1
302H	PORT C 8255#1
303H	CONTROL PORT 8255#1
304H	PORT A 8255#2
305H	PORT B 8255#2
306H	PORT C 8255#2
307H	CONTROL PORT 8255#2
308H	PORT A 8255#3
309H	PORT B 8255#3

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255

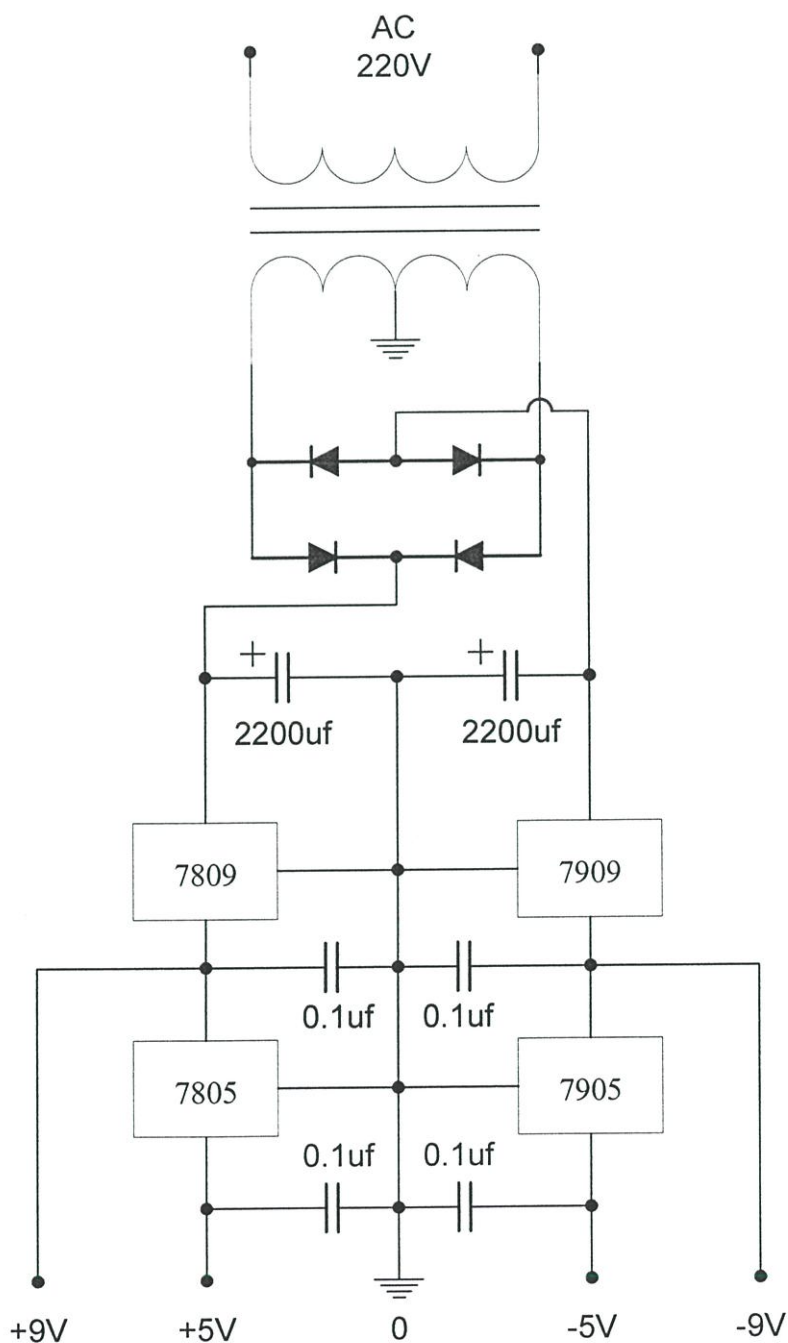
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3



รูปที่ 3.21 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

3.13 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)

วงจรภาคจ่ายไฟ(Power supply) ที่ใช้ในระบบจะประกอบด้วยไฟสองชุด คือ +9V, 0, -9V และ +5V, 0, -5V โดยใช้ ไอซีเร็กกูเลต LM 7809, LM7805 ในซีกบวก และ LM 7909, LM 7905 ในซีกลบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply)

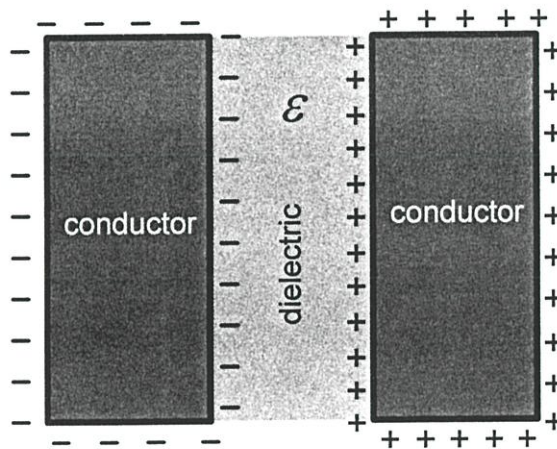
บทที่ 4

การสร้างภาพกลับ

(Image reconstruction)

4.1 หลักการพื้นฐาน

ตัวนำสองตัวนำใดๆ เมื่อถูกแยกหรือถูกขึ้นด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1 จะมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำนั้นๆ เมื่อป้อนค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองก็จะเกิดประจุบวกขึ้นที่ตัวนำหนึ่ง และจะเกิดประจุลบขึ้นที่ตัวนำอีกตัวหนึ่ง ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสัมบูรณ์ของประจุไฟฟ้าและค่าสัมบูรณ์ของค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนนั้น [10, 11] แสดงได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 รูปตัวนำสองตัวเมื่อวางอยู่ระหว่างวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4.1)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad ; F),

Q คือ ค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดในงานวิจัยนี้

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กัค่าประจุไฟฟ้าและค่าศักดาไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ จะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของปริมาณทั้งสองจึงมี

ค่าคงที่ แต่ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวนำและค่าเพอิมิตติวิตีของวัสดุที่เป็นตัวกลาง โดยค่าเพอิมิตติวิตี (ϵ) แสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.2)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ เพอิมิตติวิตีของอวกาศอิสระ (Permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ เพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric constant) โดยไม่มีหน่วย

ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (4.1) โดยการคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรดตัวรับ [10] แต่เนื่องจากโดยทั่วไปจะไม่สามารถทราบค่าการกระจายของประจุไฟฟ้านั้นล่วงหน้าได้ และข้อมูลเบื้องต้นที่มีอยู่คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรดซึ่งจะเท่ากับค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อน และค่าเพอิมิตติวิตีซึ่งจะถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าสามารถหาได้จากค่าความเข้มสนามไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ

$$Q = \oint D \cdot dS = \oint \epsilon E \cdot dS \quad (4.3)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)

S คือ พื้นผิวของเกาส์ (Gaussian Surface)

สมการที่ (4.3) คือสูตรคณิตศาสตร์ของเกาส์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตบนพื้นผิวปิดล้อมรอบอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าผ่านพื้นผิวเล็กๆ (dS) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าหาได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$E = -\nabla \phi \quad (4.4)$$

เมื่อ ∇ คือ ตัวปฏิบัติการเวกเตอร์

ϕ คือ ค่าศักดาไฟฟ้า

สมการที่ (4.4) เรียกว่า เกรเดียนต์ (Gradient) ของฟังก์ชันศักดาไฟฟ้า นั่นคือถ้าสามารถคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าได้ ก็สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้เช่นกัน ดังนั้นการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าจึงมีขั้นตอนดังนี้คือ คำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายใน

วัตถุ จากนั้นคำนวณค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดตัวรับโดยใช้กฎของเกาส์ และคำนวณค่าความจุไฟฟ้าด้วยสมการที่ (4.1)

การหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าอธิบายได้ดังนี้ จากสมการที่ (4.1)-(4.4) จะเห็นว่าเกี่ยวข้องกับปัญหาทางสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของปัวซอง (Poisson's equation) โดยมีความหนาแน่นประจุในตัวกลางเท่ากับศูนย์หรือเรียกว่าสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) [10,11] ซึ่งสมการคือ

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 \epsilon_r(x, y) \nabla \phi(x, y)] = 0 \quad (4.5)$$

เมื่อ $\epsilon_r(x, y)$ คือ ค่าเพอmittivityสัมพัทธ์ของวัสดุในแบบ 2 มิติ

$\phi(x, y)$ คือ ค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

สมการที่ (4.5) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองแบบเอลลิปติก (Elliptic) ซึ่งใช้ในการหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้ อัลกอริทึมที่มีอยู่เดิม [1,2] และอัลกอริทึมนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณเชิงเลข (Numerical method) เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งใช้อยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ วิธีผลต่างจำกัด และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีผลต่างจำกัดนั้นจะถูกใช้กับเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากรูปร่างของตัวครอบและอิเล็กโทรดเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตร และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับเซ็นเซอร์แบบทรงกระบอก เนื่องจากรูปร่างของตัวครอบและอิเล็กโทรดมีความซับซ้อนมากกว่าในการคำนวณนั้นจะถูกคำนวณในแบบ 2 มิติ และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณนี้ คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการกำหนดเงื่อนไขของ พิกเซลใดๆ บนพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปสร้างเซนซitivิตีของระบบ ECT

4.2 วิธีการหาค่าเซนซitivิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT

เซนซitivิตี S ของระบบ ECT จากวิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของพิกเซลต่างๆที่มีต่ออิเล็กโทรดแต่ละคู่ (Relative capacitance change) แสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$S_{ij}(p) = \left[\frac{C_{ij}^{oil, p} - C_{ij}^{empty}}{C_{ij}^{oil} - C_{ij}^{empty}} \right] \left[\frac{1}{\epsilon_{oil} - \epsilon_{empty}} \right] \left[\frac{A_{max}}{A_p} \right] \quad (4.6)$$

เมื่อ $S_{ij}(p)$ คือ เซนซitivิตีของพิกเซล p ที่เป็นของคู่อิเล็กโทรด $i - j$

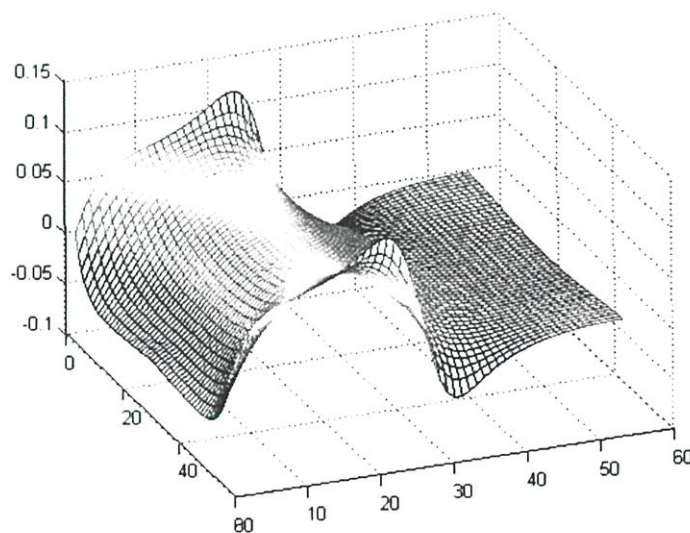
$C_{ij}^{oil,p}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้พิกเซล p มีค่าเพอmittivิตี้ของน้ำมัน และพิกเซลอื่นๆที่เหลือมีค่าเพอmittivิตี้ของอากาศ

ϵ_{oil} และ ϵ_{empty} คือ ค่าเพอmittivิตี้สัมพัทธ์ของน้ำมันและอากาศ ตามลำดับ

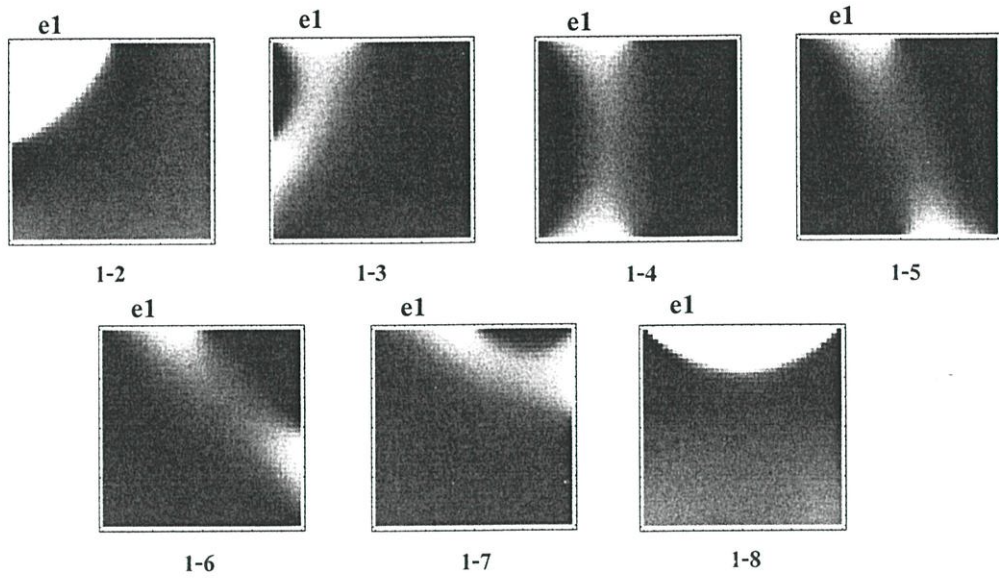
A_{max} และ A_p คือพื้นที่ทั้งหมดของภาพหน้าตัด และพื้นที่ของพิกเซล ตามลำดับ

จากสมการที่ (4.6) แสดงให้เห็นถึง การตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่มีต่อค่าเพอmittivิตี้ของตัวกลางค่าสูงค่าหนึ่งที่อยู่บนพื้นที่จุดเล็กๆในบริเวณของเซ็นเซอร์ที่มีค่าเพอmittivิตี้ของตัวกลางค่าต่ำกว่าซึ่งเป็นผลให้สามารถแสดงค่าของเพอmittivิตี้ค่าสูงบนค่าเพอmittivิตี้ที่ต่ำกว่าได้ค่าเซนซitivิตี้สามารถหาได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.6) โดยการวัดทางกายภาพนั้นจะทำได้ยาก หรือทำไม่ได้เลย เนื่องจากต้องกำหนดค่าเพอmittivิตี้ของพิกเซลใดๆ ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยาก ดังนั้นในระบบ ECT จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณ แต่ปัญหาที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ใช้ประสิทธิภาพของเครื่องคำนวณและเวลาในการคำนวณสูง

เนื่องจากความสมมาตรของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม ทำให้ค่าเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรดที่สมมาตรกันมีค่าเท่ากัน เช่น ค่าเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรด 1-2, 3-4, 5-6 และ 7-8 จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรด จึงสามารถทำได้โดยการคำนวณเฉพาะคู่อิเล็กโตรด 1-2 ถึง 1-8 เท่านั้น และค่าเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรดอื่นๆอีกจำนวน 21 คู่ จะใช้วิธีการหมุน (rotation) เปรียบเทียบคู่ที่เท่ากัน โดยคุณสมบัตินี้จะทำให้สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้อย่างมาก รูปลักษณะการกระจายของเซนซitivิตี้ ที่อยู่ภายในส่วนการแสดงผลของภาพของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม เฉพาะเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรด 1-4 ในแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ส่วนเซนซitivิตี้ของคู่อิเล็กโตรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโตรด 1-8 แสดงได้ดังรูปที่ 4.3

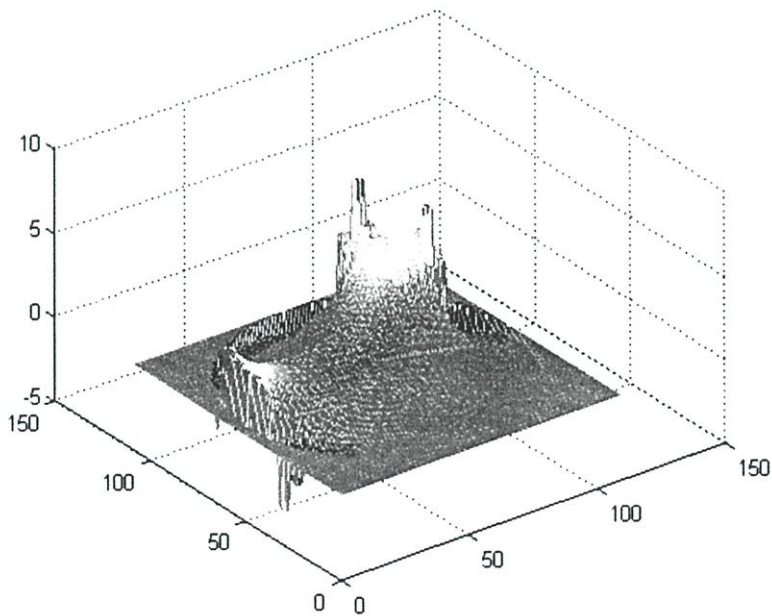


รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซitivิตี้ในแบบ 3 มิติของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะคู่อิเล็กโตรด 1-4

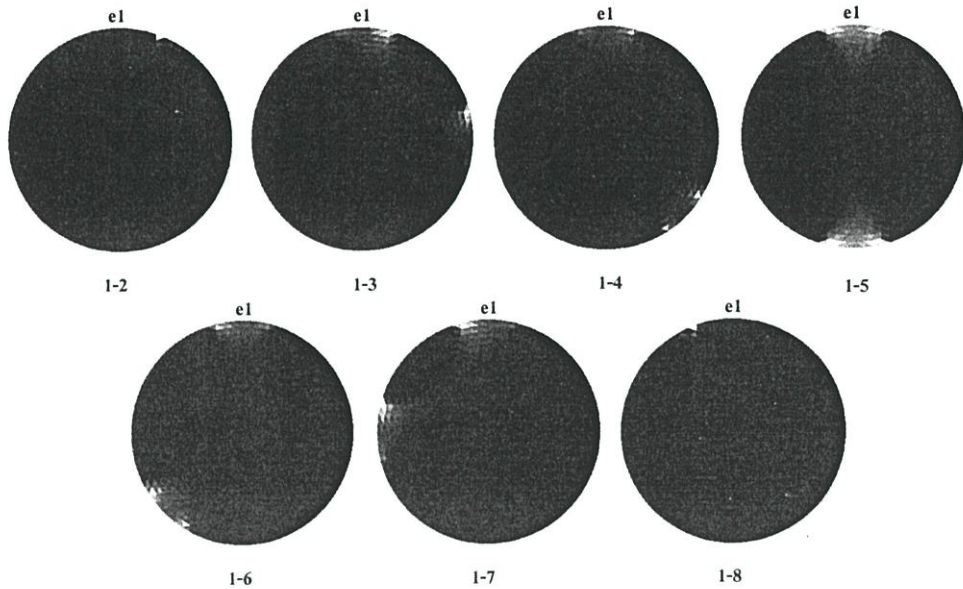


รูปที่ 4.3 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8

ในส่วน of ค่าเซนซิติวิตีของแต่ละคู่อิเล็กโทรดสำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลม จะมีลักษณะเหมือนกับเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ



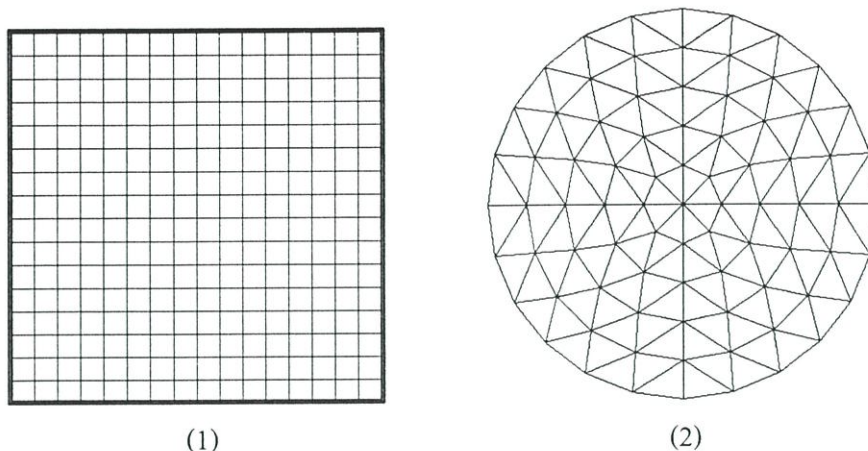
รูปที่ 4.5 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8

จากรูปที่ 4.2 และ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่าของเซนซิวิตีของแต่ละคู่อิเล็กโทรดจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยจะสังเกตเห็นว่า พิกเซลที่อยู่ห่างจากแนวของการกระจายประจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด จะมีค่าระดับเทาที่ต่ำกว่า พิกเซลที่อยู่ในแนวของการกระจายประจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดนั้นๆ ดังนั้นจากหลักการของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำการบวกค่าความจุไฟฟ้าที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าเซนซิวิตีของทุกคู่อิเล็กโทรดเข้าด้วยกัน ค่าระดับเทาของบริเวณที่มีวัตถุจะเด่นชัดขึ้น และที่บริเวณอื่นๆค่าระดับเทาจะมีค่าลดลง

4.3 การสร้างภาพกลับ

4.3.1 การสร้างภาพกลับโดยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน

การสร้างภาพกลับ พื้นที่หน้าตัดของตัวเซ็นเซอร์จะถูกพิจารณาเป็นพิกเซล (p) โดยลักษณะของพิกเซลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซ็นเซอร์ นั่นคือ เซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม พิกเซลจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการแบ่งเป็นตารางของวิธผลต่างจำกัด ซึ่งในส่วนของการแสดงผลภาพ จะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมดคือ 3025 พิกเซล และเซ็นเซอร์แบบวงกลม พิกเซลจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการแบ่งเป็นอิลิเมนต์สามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งในส่วนของการแสดงผลภาพ จะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมดคือ 1436 พิกเซล การแบ่งพื้นที่ย่อยบนพื้นที่หน้าตัดของตัวเซ็นเซอร์แสดงได้ดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของเซ็นเซอร์ออกเป็นพิกเซลย่อยๆ (1) แบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมสำหรับเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม และ (2) แบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมในเซ็นเซอร์แบบวงกลม

หลักการพื้นฐานของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันคือ สมการค่าความจุไฟฟ้าจะถูกแปลง (Transform) ให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ (Matrix equation) ซึ่งเมทริกซ์นี้จะสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า (C) ที่มีต่อค่าพอมิตติวิตีของพิกเซล (G) การแปลงนี้แสดงได้ดังสมการที่ (4.7)

$$C = S.G \quad (4.7)$$

เมื่อ C คือ เมทริกซ์ของค่าความจุไฟฟ้าขนาด $M \times 1$, M เป็นจำนวนคู่ของการวัด

G คือ เมทริกซ์ของจำนวนพิกเซลขนาด $N \times 1$ ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของพอมิตติวิตีภายในเซ็นเซอร์, N เป็นจำนวนของพิกเซล

S คือ เมทริกซ์ของการแปลง โดยในระบบ ECT จะถูกเรียกว่า เซนซิวิตีเมทริกซ์ (Sensitivity matrix) ซึ่งจะมีขนาด $M \times N$ โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดเมื่อค่าพอมิตติวิตีของตัวกลางเปลี่ยนตำแหน่งไป

เมื่อได้เมทริกซ์ของค่าความจุไฟฟ้า C เมทริกซ์การกระจายของพอมิตติวิตี G สามารถได้มาโดยใช้เมทริกซ์ผกผัน (inverse matrix) ของเมทริกซ์ S ดังสมการที่ (4.8)

$$G = S^{-1}.C \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) เมทริกซ์ S^{-1} ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากไม่ใช่เมทริกซ์จัตุรัส ซึ่งระบบ ECT ขนาดของเมทริกซ์ S คือ $M \ll N$ เช่นในงานวิจัยนี้ $M = 28$ และ $N = 3025$ ดังนั้นในวิธี ลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน จะใช้ค่าของการสลับเปลี่ยนเมทริกซ์ (Transpose matrix) ของ

S หรือ S^T ซึ่งมีขนาด $N \times M$ แทน และ ค่าของเมทริกซ์ G หรือค่าของแต่ละพิกเซล ($g_n : n = 1 \dots N$) จะเท่ากับการบวก (หรือการแบ็กโปรเจก) ของค่าความจุไฟฟ้า c_m ($m = 1 \dots M$) ของทุกคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (Weight) ด้วยค่าเซนซิติวิตีของแต่ละพิกเซลในแต่ละคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่สอดคล้องกัน แสดงได้ดังสมการที่ (4.9)

$$g_n = \sum_{m=1}^M c_m s_{nm} \quad (4.9)$$

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี ลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันในการสร้างภาพกลับ และได้แบ่งพื้นที่หน้าตัดของตัวเซ็นเซอร์ออกเป็นพิกเซลย่อยๆ ส่วนที่ถูกแสดงผลเป็นภาพจะอยู่ภายในกรอบด้านในของเซ็นเซอร์ และจะถูกแสดงผลด้วยค่าระดับเทา (Grey level : $G(p)$) เพื่อแสดงถึงค่าประมาณของค่าพอมิตติวิตีของตัวกลาง ค่าระดับเทาของภาพจะถูกคำนวณจากสมการที่ (4.10)

$$G(p) = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=i+1}^8 C_{ij}^n S_{ij}(p)}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=i+1}^8 S_{ij}(p)} \quad (4.10)$$

เมื่อ p คือ ตำแหน่งของพิกเซลใดๆ

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ติดกัน โดยปกติจะมีค่ามากที่สุด และค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ห่างกันจะมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีย่านกว้าง ดังนั้นจึงต้องทำการนอร์มอไลซ์ค่าความจุไฟฟ้าเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0 (เมื่อเซ็นเซอร์มีค่าพอมิตติวิตีเฉพาะอากาศ) และ 1 (เมื่อเซ็นเซอร์มีค่าพอมิตติวิตีเฉพาะน้ำมัน) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4.11)

$$C_{ij}^n = \frac{C_{ij}^m - C_{ij}^{empty}}{C_{ij}^{oil} - C_{ij}^{empty}} ; i = 1..7, j = i+1..8 \quad (4.11)$$

เมื่อ i คือ อันดับของอิเล็กทรอนิกส์ตัวส่ง และ j คือ อันดับของอิเล็กทรอนิกส์ตัวรับ

C_{ij}^n คือค่านอร์มอไลซ์ของค่าความจุไฟฟ้า (Normalized capacitance) ของคู่อิเล็กทรอนิกส์ $i - j$

C_{ij}^m คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กทรอนิกส์ $i - j$ ที่วัดได้จากระบบเมื่อมีวัตถุที่ต้องการตรวจสอบอยู่ในเซ็นเซอร์

C_{ij}^{empty} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด $i-j$ ที่วัดได้จากระบบเมื่อภายใน เซ็นเซอร์ถูกบรรจุด้วยอากาศ

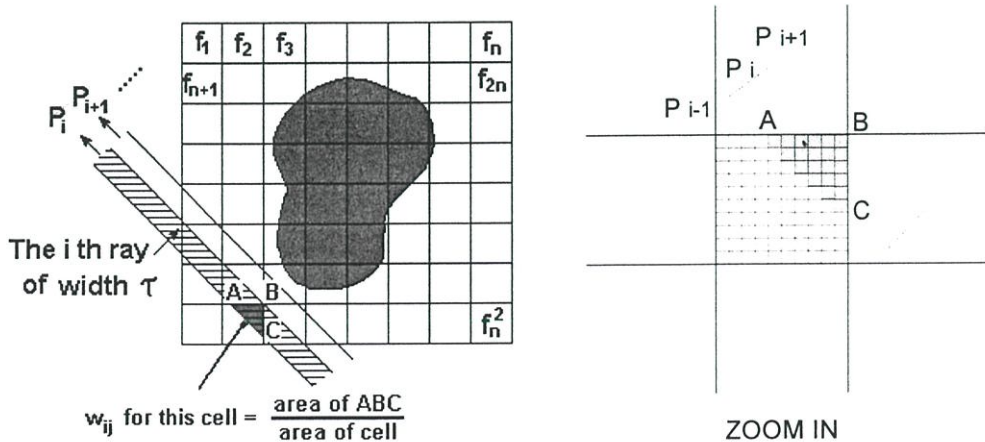
C_{ij}^{oil} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด $i-j$ ที่วัดได้จากระบบเมื่อภายใน เซ็นเซอร์ถูกบรรจุด้วยน้ำมัน

4.3.2 การสร้างภาพกลับโดยใช้วิธี Algebraic Reconstruction Technique (ART)

จากหลักการพื้นฐานการสร้างภาพตัดขวางของ CT โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตนั้น จะ สมมุติให้วัตถุที่ต้องการสร้างกลับ (ภาพตัดขวางใน 2 มิติ หรือ ปริมาตรใน 3 มิติ) เป็นเมตริกซ์ของ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และจากนั้นทำการแก้สมการทางพีชคณิตเพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจากค่า โปรเจกชันที่วัดได้ ในที่นี้จะพิจารณาการสร้างกลับของวัตถุเฉพาะใน 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยที่ จะสมมุติให้ภาพประกอบด้วยเซตของเซลล์ (cell) $f(x,y)$ โดยที่ในแต่ละเซลล์ ฟังก์ชัน $f(x,y)$ เป็นค่าคงที่ กำหนดให้ f_j เป็นค่าคงที่ที่เซลล์ที่ j^{th} และให้ N เป็นจำนวนทั้งหมดของเซลล์ ให้ p_i แทนค่าโปรเจกชันของรังสีเส้นที่ i^{th} ที่วัดได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง f_j และ p_i คือ

$$\sum_{j=1}^N w_{ij} f_j = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.12)$$

เมื่อ M คือ จำนวนรังสีทั้งหมด w_{ij} คือ ค่าแฟกเตอร์น้ำหนัก (Weighting factor) ที่แทน ผลของเซลล์ที่ j^{th} ที่มีต่อรังสีเส้นที่ i^{th} โดยแฟกเตอร์ w_{ij} มีค่าเท่ากับสัดส่วนของพื้นที่ของเซลล์ที่ j^{th} ที่ตัดกับรังสี i^{th} ซึ่งจากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าทุกเซลล์จะถูกแบ่งเป็น 100 เซลล์ย่อย โดยจะมีเพียง 21 เซลล์ย่อยเท่านั้นที่อยู่บนเส้นทางเดินแสง ดังนั้นเซลล์นี้จะมีค่าแฟกเตอร์น้ำหนักเท่ากับ $21/100 = 0.21$



รูปที่ 4.7 รูปแบบการฉายแสง และการคำนวณค่าแฟกเตอร์น้ำหนักของอัลกอริทึมเชิงพีชคณิต

สำหรับ M และ N ที่มีค่ามาก มีวิธีการทำซ้ำที่ใช้ในการแก้สมการที่(4.12) คือ วิธีของโปรเจกชัน (Method of Projection) ซึ่งเสนอโดยคาร์แมร์ซ อธิบายได้โดย
จากสมการที่ (4.12) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ขยายออกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} w_{11}f_1 + w_{12}f_2 + \dots + w_{1N}f_N &= p_1 \\ w_{21}f_1 + w_{22}f_2 + \dots + w_{2N}f_N &= p_2 \\ &\vdots \\ w_{M1}f_1 + w_{M2}f_2 + \dots + w_{MN}f_N &= p_M \end{aligned} \quad (4.13)$$

ภาพที่ถูกแทนด้วย (f_1, f_2, \dots, f_N) จะถูกพิจารณาว่าเป็นจุดในสเปซ (Space) N มิติ ในสเปซ ดังกล่าว แต่ละสมการจะแทน Hyperplane เมื่อระบบสมการสามารถหาผลเฉลยที่เป็นหนึ่งเดียว (Unique Solution) ได้ จุดตัดของ Hyperplane ทั้งหมดจะเป็นจุดๆเดียวและเป็นค่าผลเฉลยของสมการ

วิธีของคาร์แมร์ซคือ ต้องทำการเดาค่าเริ่มต้น โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็น $f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \dots, f_N^{(0)}$ และสามารถเขียนแทนแบบเวกเตอร์ได้เป็น $\vec{f}^{(0)}$ ในสเปซ N มิติ และในกรณีส่วนใหญ่ เพื่อความง่ายจะกำหนดให้ค่าเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด ค่าเริ่มต้นนี้จะถูกโปรเจกไปบน Hyperplane ซึ่งก็คือสมการแรกใน (4.13) จะได้เป็น $\vec{f}^{(1)}$ จากนั้น $\vec{f}^{(1)}$ จะถูกโปรเจกไปบน Hyperplane ที่แทนด้วยสมการที่สองใน (4.13) และจะได้เป็น $\vec{f}^{(2)}$ จากนั้นทำต่อไปเรื่อยๆ โดยที่ $\vec{f}^{(i-1)}$ จะถูกโปรเจกไปบน Hyperplane ที่แทนด้วยสมการที่ i^{th} ใน (4.13) จะได้เป็น $\vec{f}^{(i)}$ ซึ่งกระบวนการนี้เราสามารถเขียนแทนในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$\vec{f}^{(i)} = \vec{f}^{(i-1)} - \frac{(\vec{f}^{(i-1)} \cdot \vec{w}_i - p_i)}{\vec{w}_i \cdot \vec{w}_i} \vec{w}_i \quad (4.14)$$

เมื่อ $\vec{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN})$ และ $\vec{w}_i \cdot \vec{w}_i$ เป็นผลคูณเวกเตอร์ (Dot product) ของ \vec{w}_i

ในการประยุกต์ใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องมีจำนวนของโปรเจกชันจำนวนมาก และภาพที่ต้องการสร้างกลับมีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้สมการที่ (4.14) เนื่องมาจากปัญหาเรื่องของการคำนวณ เนื้อที่หน่วยความจำ และการเรียกใช้อย่างรวดเร็วของสัมประสิทธิ์น้ำหนัก w_{ij} โดยพิจารณากรณีของการสร้างภาพขนาด 100×100 พิกเซลด้วยข้อมูล 150 โปรเจกชัน และแต่ละโปรเจกชันมีจำนวนรังสีเท่ากับ 150 รังสี ดังนั้นจำนวนของสัมประสิทธิ์น้ำหนัก w_{ij} ทั้งหมดที่ต้องใช้จะอยู่ในระดับของ 10^8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นจำนวนที่มหาศาล

เพื่อที่จะแก้ปัญหาค่าความยุ่งยากนั้น วิธีทางพีชคณิตอื่นๆ ได้ถูกนำเสนอ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น การประมาณของสมการที่ (4.14) เพื่อที่จะวิเคราะห์การประมาณที่สามารถคำนวณได้ง่าย สมการที่ (4.14) จะถูกจัดใหม่ในสมการที่ (4.15)

$$f_j^{(i)} = f_j^{(i-1)} + \frac{p_i - q_i}{\sum_{n=1}^N w_n^2} w_{ij} \quad (4.15)$$

$$q_i = \bar{f}^{(i-1)} \cdot \bar{w}_i = \sum_{n=1}^N f_n^{(i-1)} w_{in} \quad (4.16)$$

สมการเหล่านี้กล่าวว่า เมื่อโปรเจกต์ผลเฉลยที่ $(i-1)^{th}$ ไปบน Hyperplane ที่ i^{th} แล้ว ค่า ระดับเทาของเซลล์ที่ j^{th} จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของ $\Delta f_j^{(i)}$ ดังสมการที่ (4.17)

$$\Delta f_j^{(i)} = f_j^{(i)} - f_j^{(i-1)} = \frac{p_i - q_i}{\sum_{n=1}^N w_n^2} w_{ij} \quad (4.17)$$

โดยที่ p_i คือ ผลบวกที่วัดได้ตามแนวรังสีที่ i^{th} , q_i คือ ผลบวกที่คำนวณได้ตามแนว รังสีเดียวกันที่ใช้ผลเฉลยที่ $(i-1)^{th}$ ของภาพ ค่าแก้ไข Δf_j (Correction) สำหรับเซลล์ที่ j^{th} สามารถได้จากการคำนวณผลต่างระหว่างผลบวกที่วัดได้และผลบวกที่คำนวณได้ ค่าความแตกต่าง จะถูกนอร์มอลไลซ์ด้วย $\sum_{n=1}^N w_n^2$ และถูกกำหนดให้กับเซลล์ทุกเซลล์ตามแนวรังสี i^{th} ค่าที่กำหนดให้แต่ละเซลล์จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่า w_{ij} ที่สอดคล้องกัน

วิธี ART นี้ ได้ถูกนำเสนอสำหรับงานด้านการเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ และได้ถูกนำมา ประยุกต์ใช้กับการสร้างภาพตัดขวางของระบบ ECT เพื่อลดจำนวนการทำซ้ำลง ในวิธีนี้ค่าแก้ไขจะถูก ใช้ปรับปรุงกับทุกๆ เซลล์ที่รังสีที่ i^{th} ผ่านก่อนที่จะแก้ไขในรังสีถัดไป (ray-by-ray updating) โดย สมการของ ART แสดงได้โดยสมการที่ (4.18)

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \alpha \frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_n f_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_n^2} w_{ij} \quad (4.18)$$

ขั้นตอนของการคำนวณสำหรับการทำซ้ำที่ k^{th}

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของ $f_j^0 = 0$
2. หาค่าโปรเจกชันของ f_j^k สำหรับรังสีที่ i^{th}
3. หาค่าผิดพลาดของโปรเจกชันของ f_j^k
4. ทำการปรับปรุงค่าของผลเฉลยในแต่ละเซลล์ที่ j^{th}
5. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2-4 จนครบทุกๆรังสี เป็นการเสร็จการคำนวณการทำซ้ำที่ k^{th}

ในการประยุกต์ใช้กับระบบ ECT ทำได้โดย ในสมการที่ (4.18) แทนค่า p , ด้วยค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรด กล่าวคือ ค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดของระบบ ECT จะเปรียบเสมือนกับค่าการลดทอนของรังสีของระบบ X-ray ที่วัดได้ และแทนค่า w_{ij} ด้วยค่าเซนซิวิตี $S_{ij}(p)$ ตัวแปร i และ j ของ X-ray จะหมายถึง รังสีที่ i^{th} ของเซลล์ที่ j^{th} แต่ในระบบ ECT นั้นจะหมายถึง ค่าเซนซิวิตีของคู่อิเล็กโทรด $i - j$ จากนั้นจะได้สมการใหม่ที่ใช้ในระบบ ECT ดังสมการที่ (4.19)

$$G_{k+1}(p) = G_k(p) + \alpha \frac{C_{ij} - \sum_{n=1}^N S_{ij}(n)G_k(n)}{\sum_{n=1}^N S_{ij}^2(n)} S_{ij}(p) ; p = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.19)$$

ขั้นตอนของการคำนวณสำหรับการทำซ้ำที่ k ในสมการที่ (4.19) คือ

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของ $G_0(p)$ โดยใช้ค่าเริ่มต้นที่ได้จากวิธี วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันในสมการที่ (4.10)
2. กำหนดคู่อิเล็กโทรดคู่แรกคือ $i - j = 1 - 2$ แล้วจึงคำนวณให้ครบทุกพิกเซล $p = 1, 2, 3, \dots, N$ จากนั้นจึงเปลี่ยน $i - j = 1 - 3$ และคำนวณทุกพิกเซล $p = 1, 2, 3, \dots, N$ ซ้ำอีก ทำซ้ำลักษณะนี้จนครบทุกพิกเซลของคู่อิเล็กโทรด $i - j$ ซึ่งระบบ ECT ในงานวิจัยนี้ อิเล็กโทรดคู่สุดท้ายคือ $i - j = 7 - 8$ โดยจะได้ทั้งหมด 28 ครั้ง เป็นการสิ้นสุดขั้นตอนของการคำนวณสำหรับการทำซ้ำที่ k

4.4 การปรับปรุงภาพ

4.4.1 วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักของ Projected Landweber Iteration

การทำซ้ำ (Iterative) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ถูกสร้างกลับให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจากอัลกอริทึม [1, 2] จะเริ่มต้นจากการหาค่าระดับเทา (G_0) โดยจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการ การทำซ้ำ จากนั้นจึงจะนำ G_0 ไปผ่านกระบวนการทำซ้ำในสมการที่ (4.22) โดยสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

หาค่า G_0 โดยจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการ การทำซ้ำ จากนั้นใช้วิธี LFP เพื่อหาค่า D_k เมื่อ D_k คือค่าประมาณของค่าความจุไฟฟ้า (The estimated capacitance vector) ที่ได้จากวิธีลิเนียร์ฟอร์เวิร์ดโพรเจกชัน (Linear Forward Projection : LFP) แสดงได้ดังสมการที่ (4.20) ค่านี้จะแสดงถึงค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดที่ถูกสร้างกลับมาจากค่าระดับเทา (G_k)

$$D_{k,ij} = \frac{\sum_p G_k(p) S_{ij}(p)}{\sum_p S_{ij}(p)} \quad (4.20)$$

จากนั้นหาค่าผลต่างระหว่าง D_k และ C ซึ่งจะได้เป็น $C - SG_k$ ที่แสดงถึงค่าผิดพลาดระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณมาจาก G_k ค่าผิดพลาดนี้จะถูกใช้เพื่อสร้างภาพของค่าผิดพลาด (An error image) โดยใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน ภาพของค่าผิดพลาดจะถูกบวกเข้ากับค่า G_k เพื่อชดเชยหรือเป็นการปรับค่าให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้ายของแต่ละรอบการทำซ้ำคือ การจำกัดค่า G_k ซึ่งถูกเรียกว่า Projected Landweber Method แสดงได้โดยสมการที่ (4.21)

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{if } x > 1 \end{cases} \quad (4.21)$$

เมื่อ x คือ ค่าระดับเทาที่ได้จากกระบวนการ การทำซ้ำครั้งล่าสุด จากขั้นตอนทั้งหมด สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (4.22)

$$\begin{cases} G_0 = \text{reconstruction based on LBP} \\ G_{k+1} = [G_k + \alpha S^T (C - SG_k)] \end{cases} \quad (4.22)$$

เมื่อ C คือ ค่าอันอร์มอลไลซ์ของค่าความจุไฟฟ้า เป็นเมทริกซ์ขนาด $[M \times 1]$

S คือ ค่าเซนซิวิตีติของระบบ เป็นเมทริกซ์ขนาด $[M \times N]$

k คือ การทำซ้ำครั้งที่ k

G คือ การแสดงผลค่าระดับเทา เป็นเมทริกซ์ขนาด $[N \times 1]$

ค่า α จะมีผลต่อความเร็วของการลู่เข้าของผลเฉลยหรือค่าระดับเทาเข้าใกล้ค่าที่ต้องการ โดยถ้า $\alpha < 1$ จะทำให้ความเร็วของการลู่เข้าช้าลง แต่จะช่วยทำให้ผลเฉลยที่กำลังเกิดการลู่ออกให้

ลู่กลับเข้าสู่ผลเฉลยที่แท้จริง และถ้า $\alpha > 1$ จะทำให้ความเร็วของการลู่เข้าเร็วขึ้น แต่จะเป็นสาเหตุของการลู่ออกของผลเฉลย นอกจากนี้ลักษณะการกระจายของพหุคูณในลักษณะต่างๆกัน จะมีค่าที่เหมาะสมของ α ที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกค่า α นั้นจะขึ้นอยู่กับการทำงานทดลอง ในส่วนของงานวิจัยนี้จะใช้ค่า α เท่ากับ 1

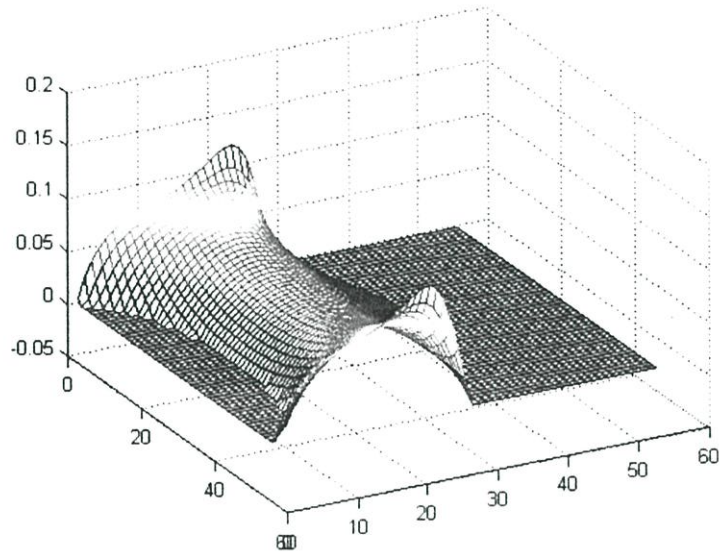
4.4.2 การใช้วิธีเทรซโฮลด์

สำหรับวิธีการปรับปรุง คุณภาพของภาพอิกวีซี ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การเทรซโฮลด์ และกระบวนการตัด (Truncation operation) ระบบ ECT เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้เซนซิติวิตีของระบบที่หาได้จากสมการที่ (4.6) และค่าระดับเทา มีค่ามากกว่า 1 (Overshooting) และต่ำกว่า 0 (Undershooting) และผลเนื่องจากข้อจำกัดของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำให้ค่าระดับเทามีลักษณะไม่คมชัดในส่วนของขอบวัตถุ ดังนั้นค่าระดับเทาของพิกเซลก่อนการแสดงผลจริงจะถูกปรับแต่ง โดยกระบวนการตัด และการเทรซโฮลด์ โดย Overshooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการตัด และ Undershooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยการเทรซโฮลด์ [1, 2] ซึ่งผลที่ได้คือภาพบริเวณขอบของวัตถุจะถูกตัดทิ้งซึ่งจะรวมถึงรายละเอียดบางส่วนของภาพที่มีค่าระดับเทาต่ำๆ ถูกตัดทิ้งด้วย

การใช้เทคนิค การตัด และการเทรซโฮลด์ กับข้อมูลค่าระดับเทาของพิกเซลที่จะนำไปแสดงผลภาพ เป็นผลให้รายละเอียดของภาพบางส่วนถูกตัด ดังนั้นเพื่อแก้ไขส่วนรายละเอียดของภาพที่ถูกตัดทิ้งไป จึงได้นำเอาเทคนิคการตัด และเทรซโฮลด์ไปใช้กับชุดข้อมูลก่อนหน้านั้น คือเซนซิติวิตีของระบบ เนื่องจากเซนซิติวิตีเป็นชุดข้อมูลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของพิกเซลใดๆที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรด และมีผลต่อค่าระดับเทาของพิกเซลที่แสดงผล จากชุดข้อมูลเซนซิติวิตี ในงานวิจัยนี้ข้อมูลส่วนมากจะอยู่ในย่านที่แคบประมาณ 0.0 ถึง 0.9 และจะมีข้อมูลส่วนน้อยบางส่วน มีค่ามากกว่า 0.9 และต่ำกว่า 0.0 ซึ่งข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.9 จะใช้กระบวนการตัด ส่วนข้อมูลที่มีค่าเป็นลบ จะใช้วิธีการเทรซโฮลด์ ตามเงื่อนไขในสมการที่ (4.23)

$$S_{ij}(p) = \begin{cases} 0.9 & ; S_{ij}(p) \geq 0.9 \\ S_{ij}(p) & ; 0 \leq S_{ij}(p) \leq 0.9 \\ 0.0 & ; S_{ij}(p) \leq 0 \end{cases} \quad (4.23)$$

เงื่อนไขของค่าเซนซิติวิตี $S_{ij}(p)$ ในสมการที่ (4.23) ได้ จากการทดลอง ปรับเปลี่ยนค่าที่เหมาะสม โดย สังเกตจากผลของการสร้างภาพกลับที่มีความชัดเจนมากขึ้น และจากผลของการใช้เทคนิคการตัดและการเทรซโฮลด์ของชุดข้อมูลเซนซิติวิตีตามเงื่อนไขในสมการที่ (4.23) จะทำให้ได้ข้อมูลเซนซิติวิตีชุดใหม่โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีในแบบ 3 มิติของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมเฉพาะคู่
อิเล็กทรอนิกส์ 1-4 เมื่อทำเทรซโฮสต์

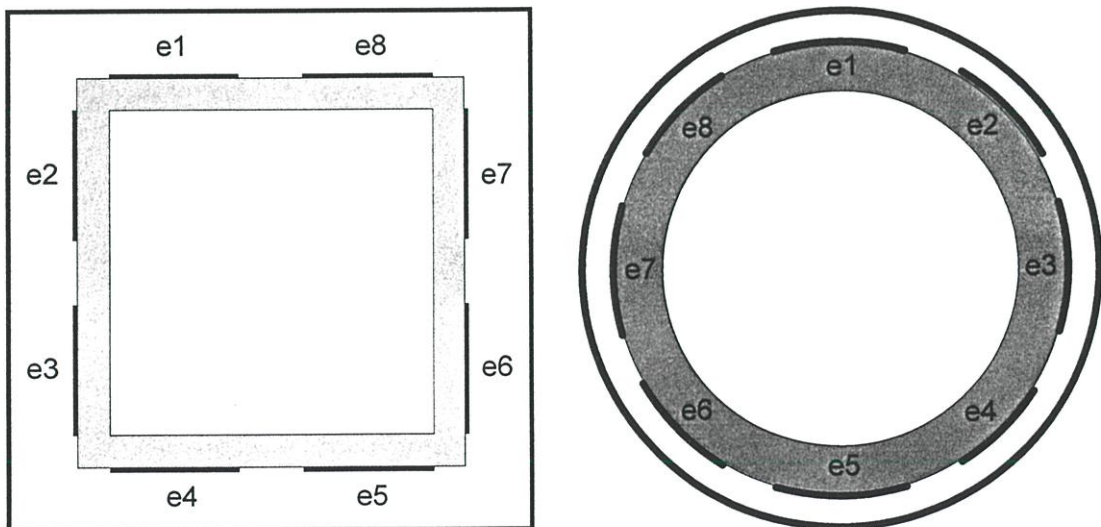
การกระจายเซนซิติวิตีในรูปที่ 4.8 เป็นการนำเอาชุดข้อมูลเซนซิติวิตีที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 มาผ่านกระบวนการตัดและการเทรซโฮสต์ จะสังเกตได้ว่ากราฟการกระจายเซนซิติวิตีที่ได้จะถูกตัดส่วนที่มีค่าต่ำกว่า 0 และสำหรับค่าเซนซิติวิตีของคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ใกล้กันก็จะมีบางค่าสูงกว่า 0.9 ซึ่งก็就会被ตัดเช่นกัน

บทที่ 5

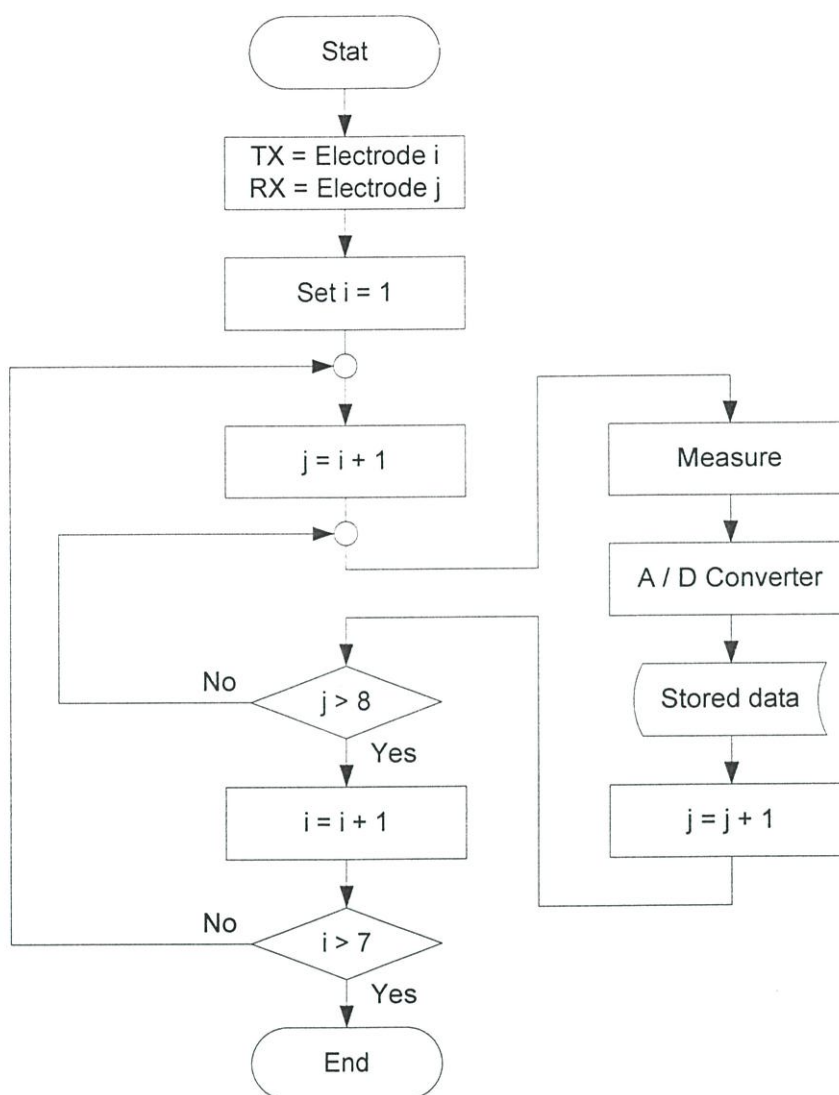
การทดลองและผลการทดลอง

5.1 รูปแบบการวัดค่าความจุไฟฟ้า

วิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าในระบบ ECT ทำได้โดยให้อิเล็กโทรดเพียง 1 อิเล็กโทรดเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า เรียกว่าอิเล็กโทรดตัวส่ง (Source electrode , TX) และให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือ เป็นตัวรับ ซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรดตัวรับ (Detecting electrode , RX) และกรอบด้านนอกต่อลงดิน(Ground)จากนั้นหาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรดต่างๆในลำดับดังต่อไปนี้คือให้อิเล็กโทรดที่ 1 เป็นอิเล็กโทรดตัวส่ง และให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือ 2 , 3 , ...,8 รับสัญญาณทีละตัว และกรอบด้านนอกต่อลงดิน แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรด 1-2, 1-3,..., 1-8 จากนั้นให้อิเล็กโทรดที่ 2 เป็นอิเล็กโทรดตัวส่ง และให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือ 3 , 4 , ...,8 รับสัญญาณทีละตัวและกรอบด้านนอกต่อลงดิน แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรด 2-3, 2-4,..., 2-8 จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกันจนถึงคู่อิเล็กโทรด 7-8 จะได้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด 28 ค่า ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดเขียนเป็นอัลกอริทึม แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 โดยค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตริวิตีของวัตถุที่อยู่ในตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งตำแหน่งของอิเล็กโทรด และการจับคู่อิเล็กโทรดตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นแสดงได้ดังในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รูปภาคตัดขวางของเซ็นเซอร์ทั้งสองแบบ แสดงตำแหน่งของอิเล็กโทรด



รูปที่ 5.2 อัลกอริทึมการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบ ECT

จำนวนของการหาค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของคู่อิเล็กโทรด โดยถ้ามีอิเล็กโทรดจำนวน N อิเล็กโทรดแล้ว จำนวนคู่ของการหาค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ (5.1) คือ

$$M = \frac{N(N-1)}{2} \quad (5.1)$$

เมื่อ M คือ จำนวนคู่ของการหาค่าความจุไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้มีจำนวนอิเล็กโทรดทั้งหมด 8 อิเล็กโทรด ดังนั้นจำนวนคู่ของการหาค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด คือ 28 คู่

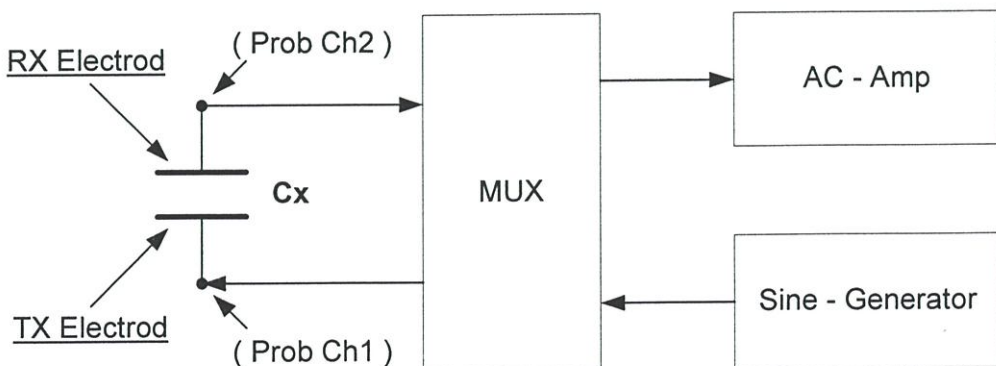
ตารางที่ 5.1 แสดงลำดับการจับคู่ อิเล็กโทรดตัวส่งและตัวรับ

Electrode (i - j)		RX Electrode (j)						
		E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
TX Electrode (i)	E1	1	2	3	4	5	6	7
	E2		8	9	10	11	12	13
	E3			14	15	16	17	18
	E4				19	20	21	22
	E5					23	24	25
	E6						26	27
	E7							28

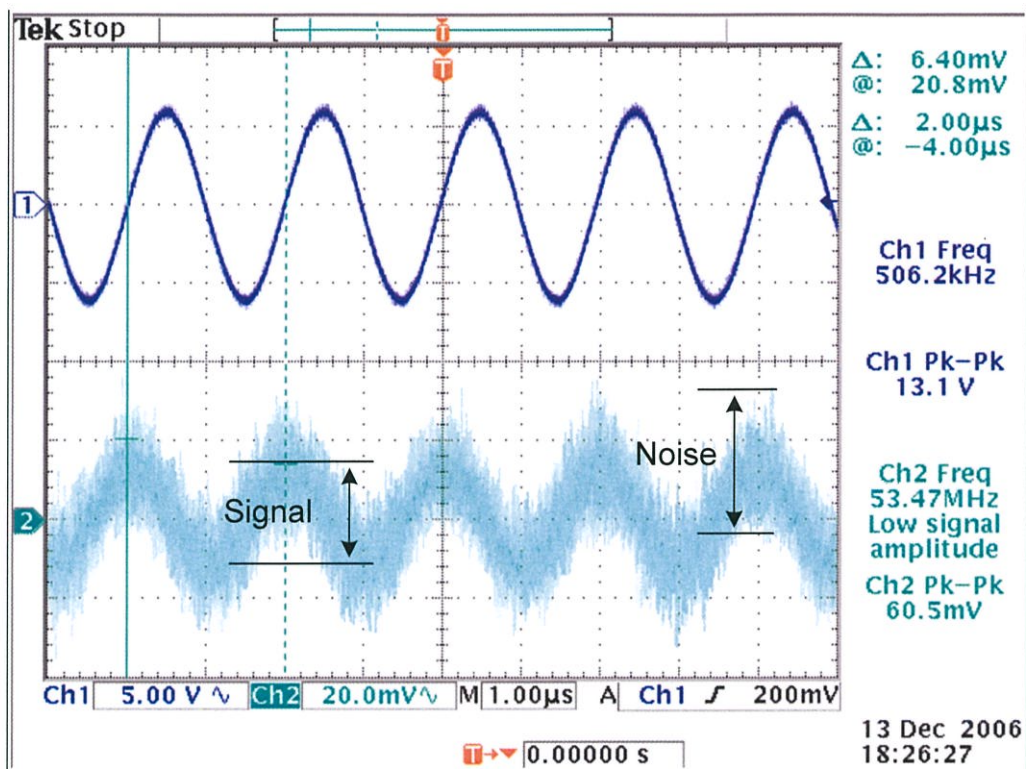
5.2 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

5.2.1 การทดลองการทำงานของระบบ

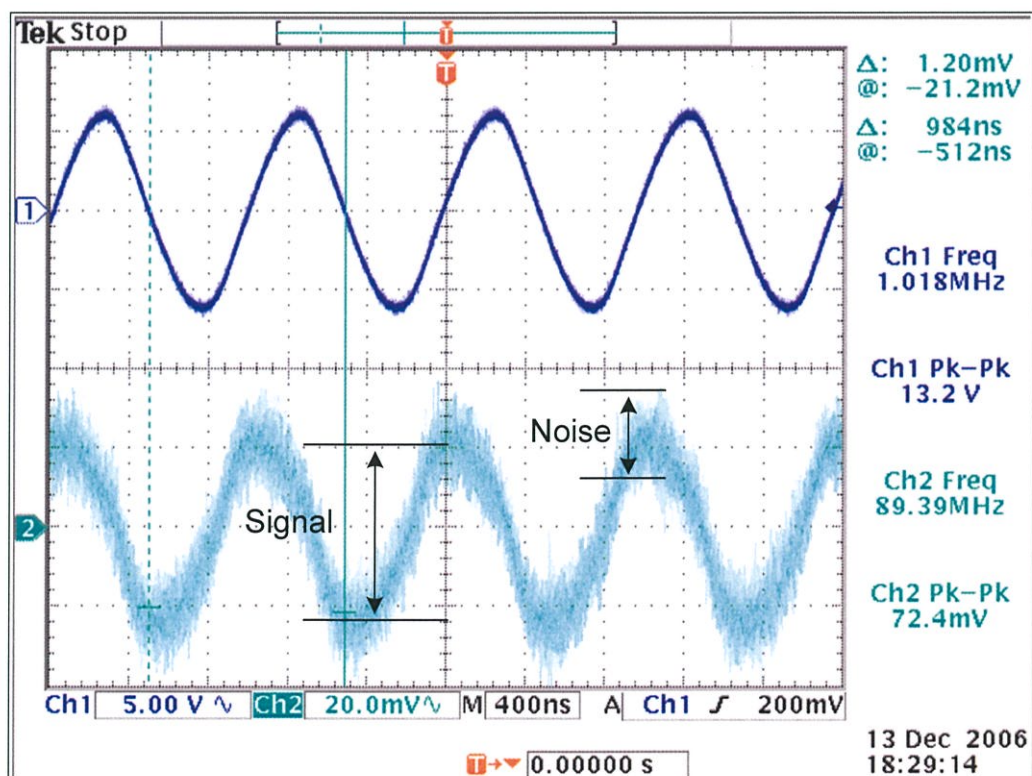
วงจรที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ออกแบบไว้ให้มีความยืดหยุ่นในเรื่องของความถี่และขนาดของสัญญาณที่ใช้งานเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณและความถี่ที่เหมาะสมกับค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดที่ใช้ทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.1pf – 3pf วัดโดย HP 4284A เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดที่ทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นความถี่ที่ใช้จึงควรมีค่ามาก เริ่มการทดลองในรูปที่ 5.3 จะใช้สัญญาณไซน์ขนาด 13 Vp-p ความถี่ 500 KHz ป้อนให้อิเล็กโทรดตัวส่ง (TX) โดยที่ Ch1 ของออสซิลโลสโคป (Scope) จะต่ออยู่กับอิเล็กโทรดตัวส่ง สำหรับ Ch2 จะต่ออยู่ที่อิเล็กโทรดตัวรับ (RX) สัญญาณที่ได้จะแสดงในรูปที่ 5.4 และสำหรับในรูปที่ 5.5 เป็นรูปที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่ของระบบไปเป็น 1 MHz เพื่อเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณ



รูปที่ 5.3 จุดทดสอบสัญญาณของอิเล็กโทรด

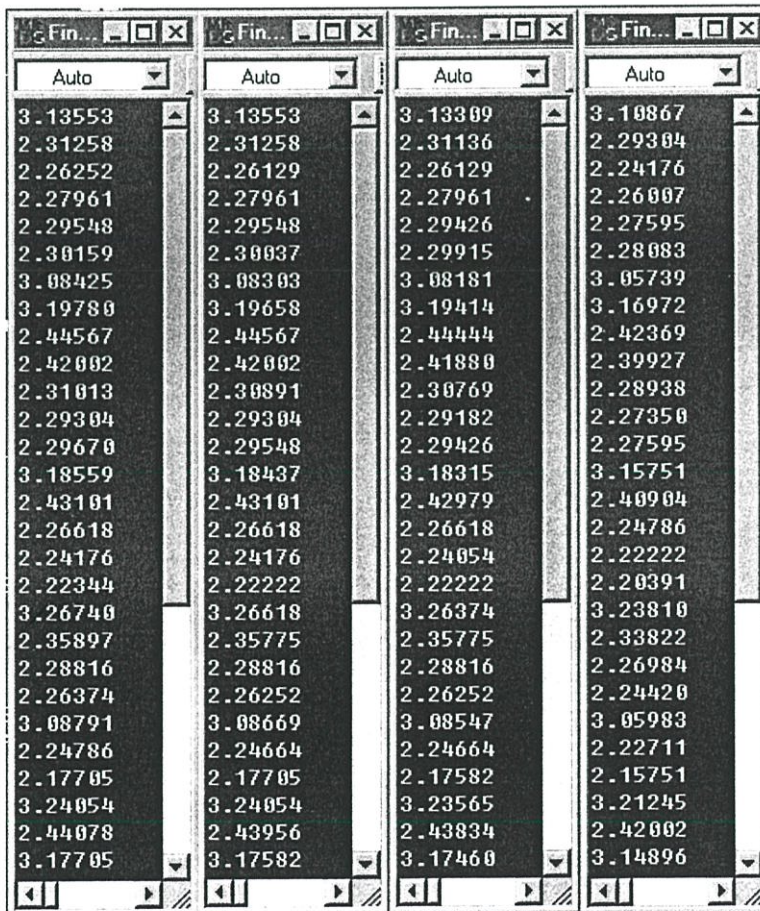


รูปที่ 5.4 รูปของสัญญาณเมื่อใช้ความถี่ของระบบเป็น 500 KHz จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.3

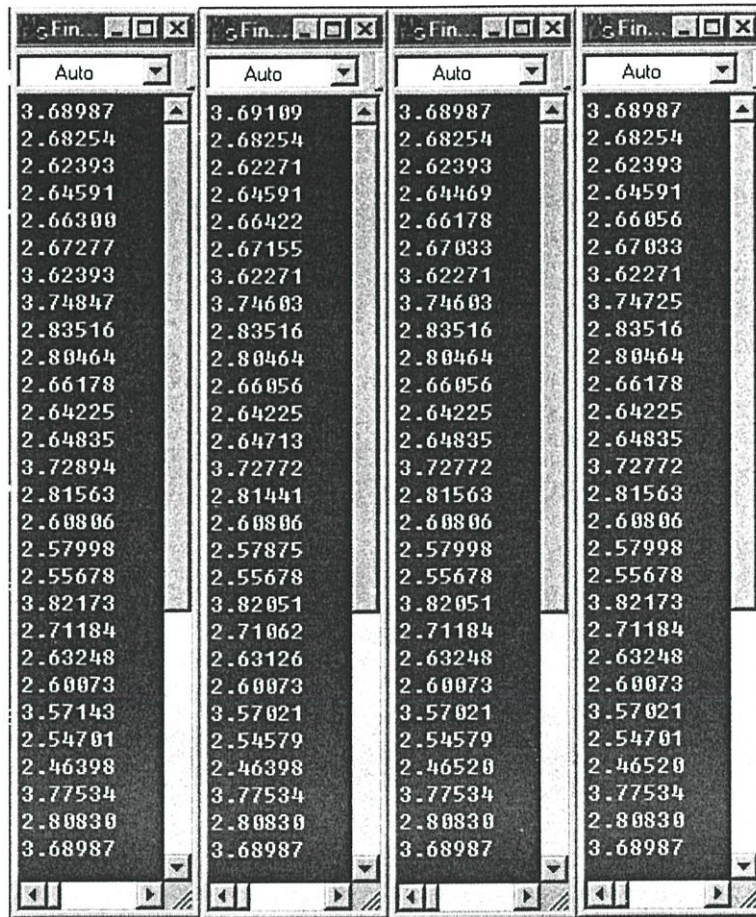


รูปที่ 5.5 รูปของสัญญาณเมื่อใช้ความถี่ของระบบเป็น 1 MHz จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.3

จากรูปที่ 5.4 ขนาดของสัญญาณที่ Ch2 ซึ่งเป็นสัญญาณจากอิลีกโทรคตัวรับเมื่อสังเกต จะพบว่าเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนดังนั้นเมื่อนำสัญญาณที่ได้นี้ไปขยายสัญญาณรบกวนก็จะถูกขยายเป็นสัดส่วนเท่ากันและเมื่อทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของค่าศักดาไฟฟ้าจากการวัด 4 ครั้งซ้ำกัน โดยกำหนดให้อากาศเป็นไดอิลีกทริก ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิลีกโทรคคงที่ แต่ค่าศักดาไฟฟ้าที่ได้จากการวัดหลายค่าไม่เท่ากันดังที่แสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการเพิ่มขนาดของสัญญาณ (Volt p-p) ที่ป้อนให้อิลีกโทรคตัวส่ง แต่การเพิ่มขนาดของสัญญาณจะมีข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์ และ ไฟเลี้ยงวงจร สำหรับการทดลองนี้สัญญาณขนาด 13 Vp-p เป็นขนาดของสัญญาณที่สูงสุดที่สามารถปรับได้ ไม่สามารถปรับเพิ่มได้อีก ดังนั้นจึงใช้วิธีการ ปรับเพิ่มความถี่ของสัญญาณ เนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้น จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุลดลงเป็นผลให้สัญญาณที่วัดได้จากอิลีกโทรคตัวรับจึงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและแตกต่างจากสัญญาณรบกวนมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อทดลองวัดค่าศักดาไฟฟ้า ผลที่ได้ดีขึ้นมากดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.7

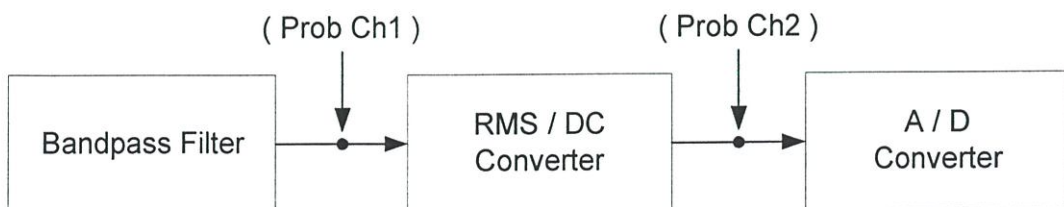


รูปที่ 5.6 ผลจากการวัดค่าศักดาไฟฟ้าซ้ำกัน 4 ครั้ง โดยใช้ความถี่ 500 KHz

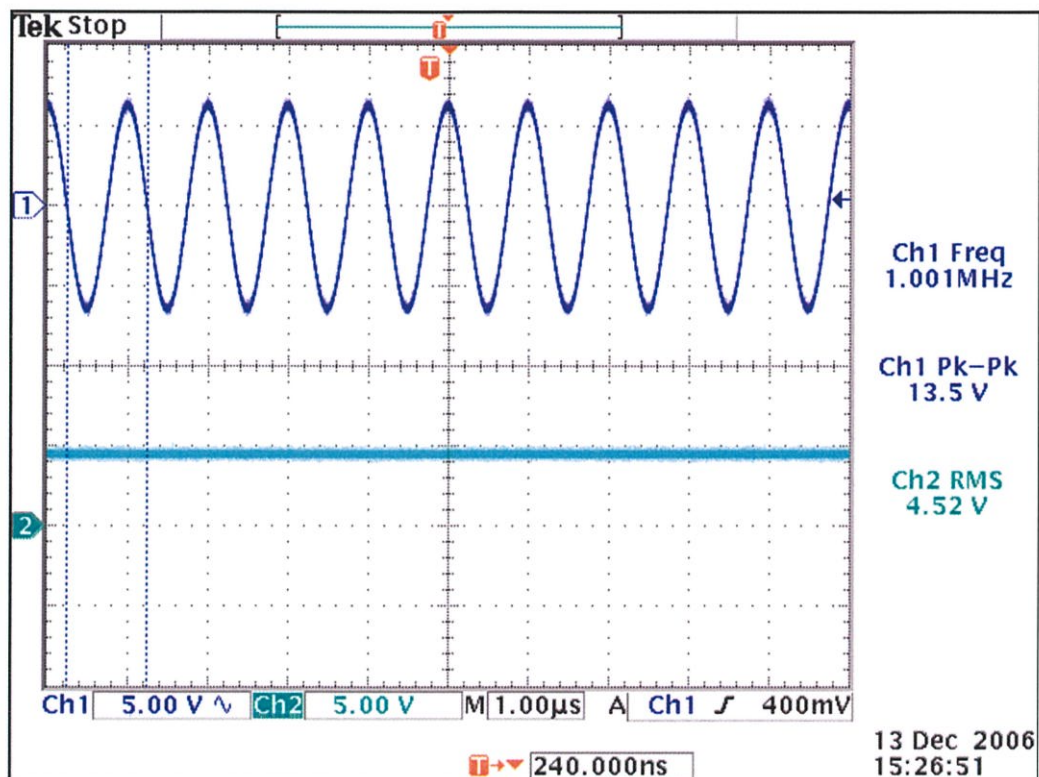


รูปที่ 5.7 ผลจากการวัดค่าคักคาไฟฟ้าซ้ำกัน 4 ครั้งโดยใช้ความถี่ 1 MHz

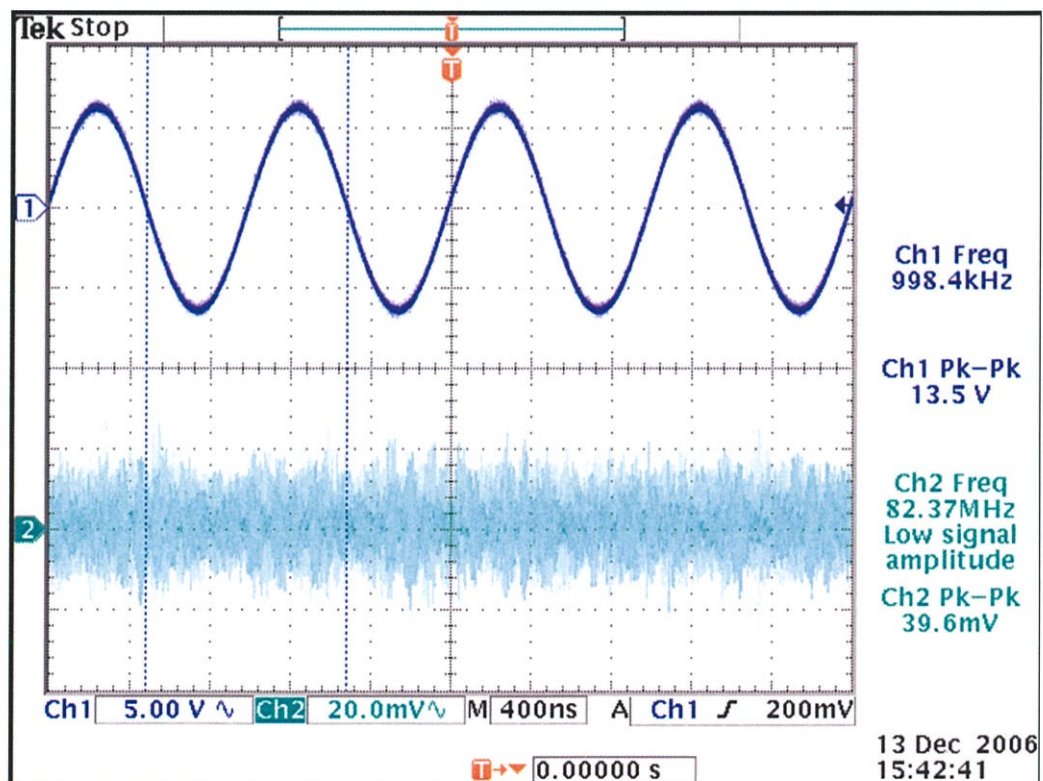
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.7 มีการวัดค่าซ้ำกัน 4 ครั้งและผลที่ได้ส่วนใหญ่จะได้ค่าเดิม และมีส่วนน้อยบางค่าที่ผิดพลาด ซึ่งค่าส่วนน้อยที่ผิดพลาดนั้นจากการทดลองพบว่าเกิดจากสัญญาณรบกวนที่มาจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งลักษณะของสัญญาณรบกวนจะแสดงดังในรูปที่ 5.10 โดยที่จุดทดสอบสัญญาณ Ch1 และ Ch2 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.8 และเนื่องจากการใช้ความถี่ 1MHz ได้ผลที่ดีกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้ความถี่ 1MHz เป็นความถี่ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.8 จุดทดสอบวงจรแปลงสัญญาณ AC เป็นแรงดัน DC



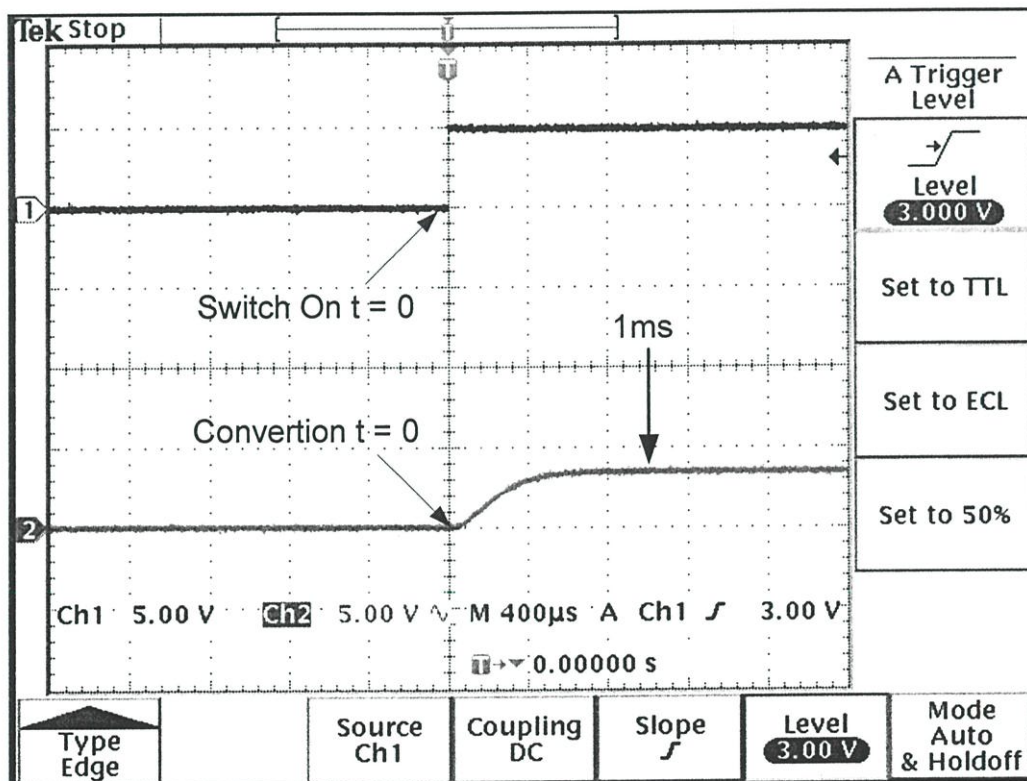
รูปที่ 5.9 สัญญาณไซน์อินพุต (Ch1) และแรงดัน DC เอาท์พุท (Ch2) จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณรบกวนที่ขึ้นอยู่กับแรงดัน DC (Ch2) จากจุดทดสอบในรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.9 Ch1 จะเป็นสัญญาณไซน์ก่อนที่จะแปลงเป็นแรงดันไฟตรง (DC) โดยรับมาจากวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ ส่วน Ch2 จะแสดงขนาดของแรงดันไฟตรง ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจร RMS to DC Converter โดยแรงดันไฟตรงที่ได้ จะมีขนาดเทียบเท่ากับค่า RMS ของสัญญาณไซน์ที่อินพุตของวงจร และ ขณะเดียวกัน บนแรงดันไฟตรงนั้น จะพบว่ามีสัญญาณรบกวนที่อยู่ด้วย ดังแสดง ในรูปที่ 5.10 (Ch2) ซึ่งสัญญาณรบกวนที่แสดงนี้ ได้เป็นสาเหตุของการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าในรูปที่ 5.7 บางค่าผิดพลาด

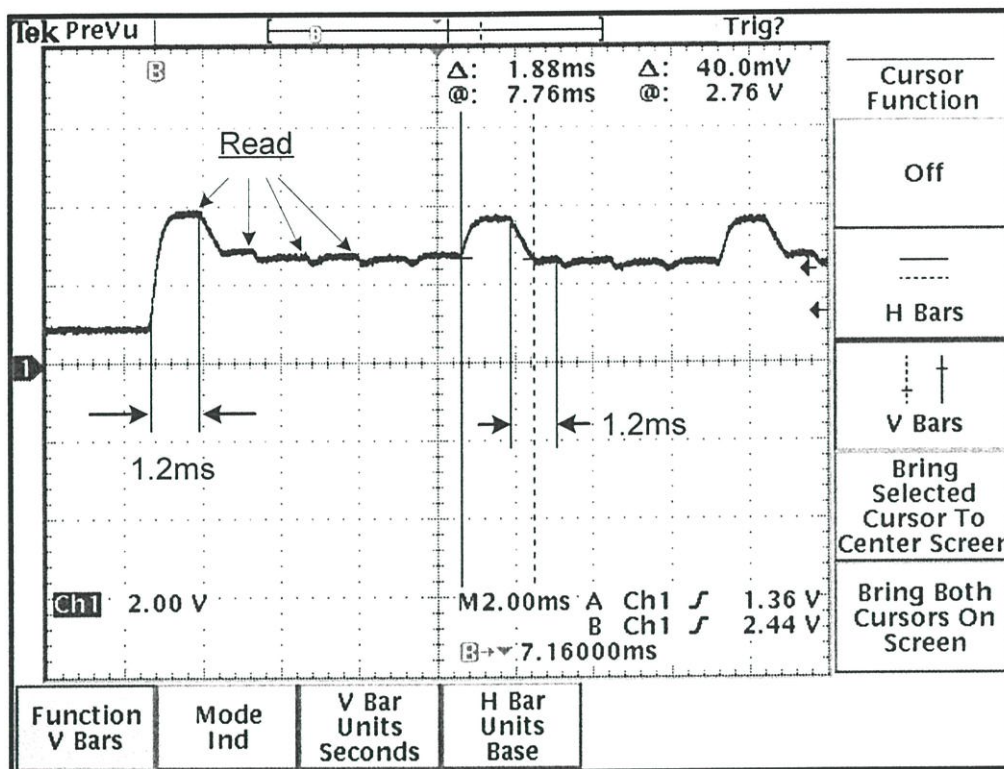
สาเหตุที่ทำให้การอ่านค่าศักดาไฟฟ้าผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือช่วงเวลาการหน่วง (Delay Time) เมื่อสั่งวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ให้สวิตช์เลือกคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่จะทำการวัดแล้ว จากนั้นที่วงจร RMS to DC Converter ต้องใช้เวลาในการแปลงค่า (Conversion Time) อีกระยะเวลาหนึ่งจึงจะได้ค่าศักดาไฟฟ้าที่คงที่ ที่จุดเอาต์พุตของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงขอบขาขึ้นแรงดันเอาต์พุต (Ch2) เมื่อเริ่มสวิตช์ (Ch1) จากจุดทดสอบรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.11 (Ch2) ช่วงเวลาที่ใช้ในการแปลงค่าจากเริ่มสวิตช์ ($t = 0$) จนกระทั่งระดับแรงดันเริ่มคงที่จะใช้เวลาประมาณ 1ms ดังนั้นการกำหนดค่าเวลาหน่วงน้อย จะส่งผลให้สามารถอ่านค่าเร็วแต่ค่าศักดาไฟฟ้าที่อ่านได้จะผิดพลาดเนื่องจากแรงดันยังไม่คงที่ สำหรับการทดลองนี้

หลังจากสวิทช์เลือกแต่ละคู่อิเล็กโทรดที่จะทำการวัดแล้ว จากนั้นจะถูกหน่วงเวลา 1.2ms (Delay Time = 1.2ms) ในทุกๆคู่อิเล็กโทรด ก่อนจะอ่านและเก็บผลค่าศักดาไฟฟ้า



รูปที่ 5.12 ช่วงเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าในแต่ละค่า

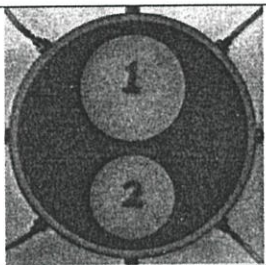
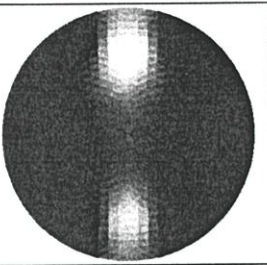
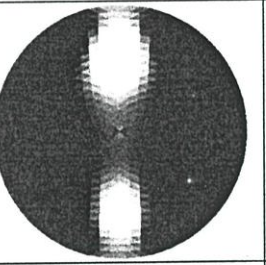
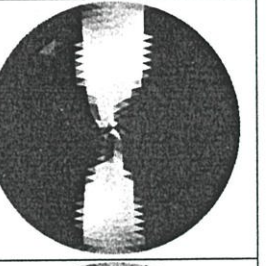
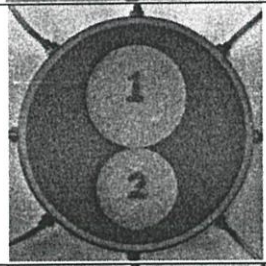
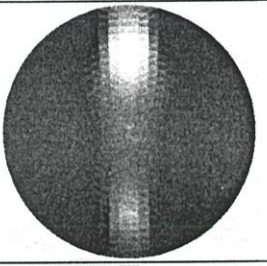
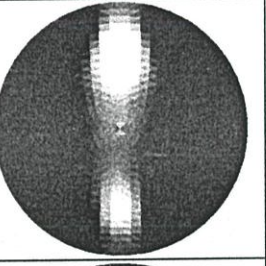
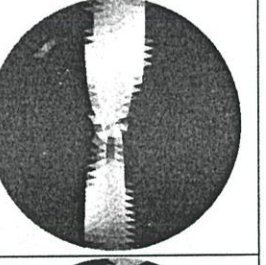
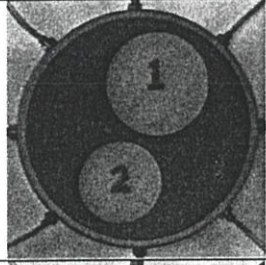
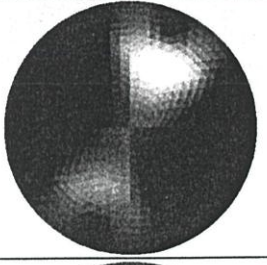
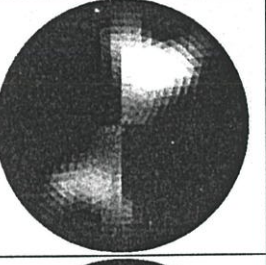
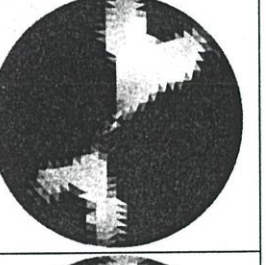
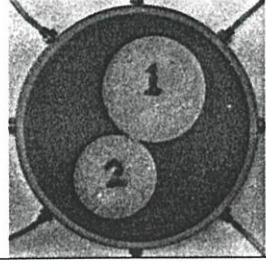
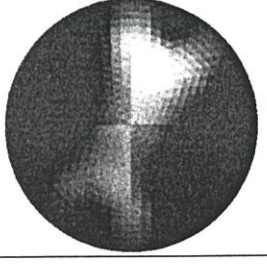
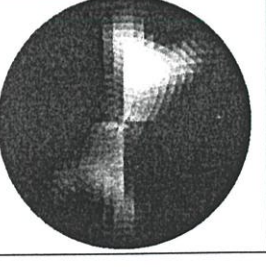
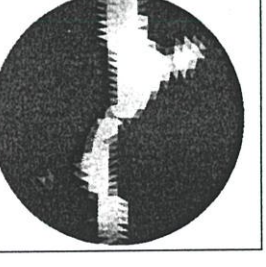
จากรูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณที่เอาท์พุทของวงจร RMS to DC Converter ขณะที่มีการวัดค่าศักดาไฟฟ้า 28 ค่าติดต่อกัน (ข้อมูล 1ชุด = 28ค่า) แต่เพื่อสังเกตช่วงเวลาที่ใช้ในแต่ละค่าของการเปลี่ยนแปลงจึงสามารถแสดงได้เพียง 13 ค่าแรก และสำหรับค่าศักดาไฟฟ้าในแต่ละชุดที่วัดได้นั้น จะถูกนำไปทำ นอร์มอไลซ์เพื่อจำกัด ช่วงของการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงจะนำไปสร้างภาพกลับ โดยอัลกอริทึมสร้างภาพตัดขวางค่าความจุไฟฟ้า [1,2]

5.2.2 การทดลองสร้างภาพตัดขวาง

การสร้างภาพตัดขวางของระบบ ECT จะต้องใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัด 3 ชุดด้วยกันคือ ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ขณะที่ภายในเซ็นเซอร์มีค่าเพอมีติวิตีสูงสุด ในการทดลองนี้จะใช้น้ำมันเต็มเต็มภายในเซ็นเซอร์แล้วทำการวัดตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.1 จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยกำหนดให้ภายในเซ็นเซอร์มีค่าเพอมีติวิตีต่ำสุด โดยจะให้ภายในเซ็นเซอร์เป็นอากาศแล้วทำการวัดซ้ำ ตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.1 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองชุดที่ได้ จะถูกนำไปใช้เพื่อทำ

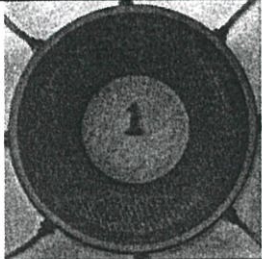
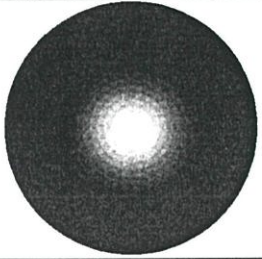
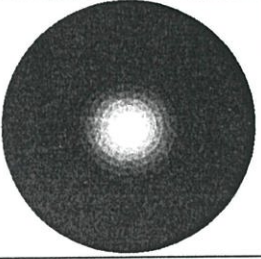
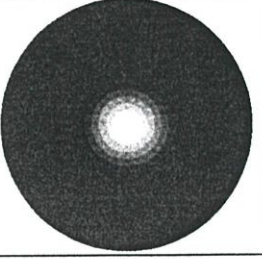
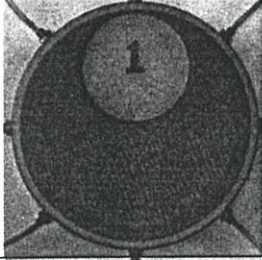
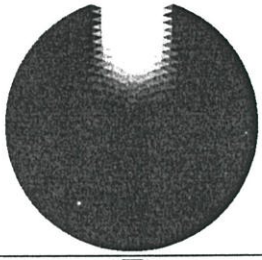
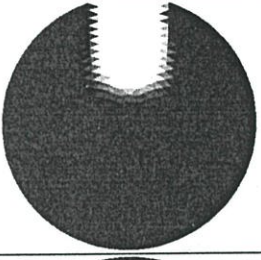
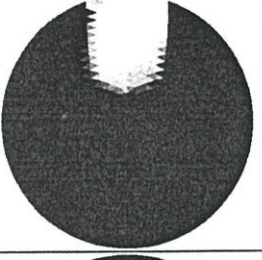
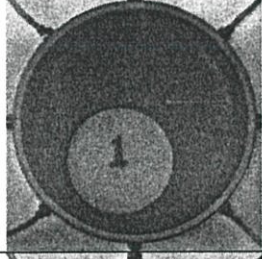
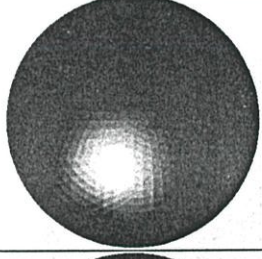
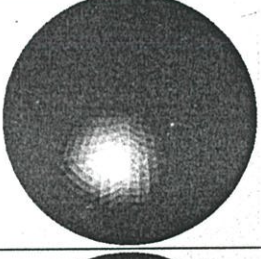
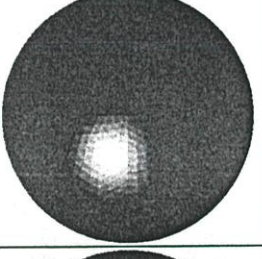
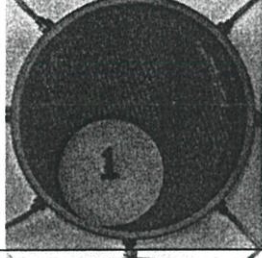
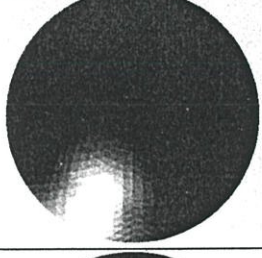
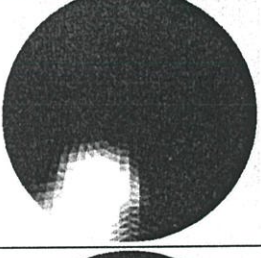
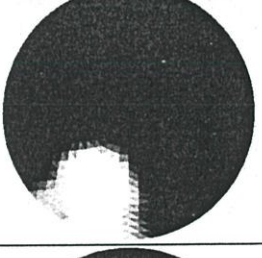
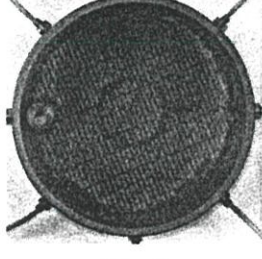
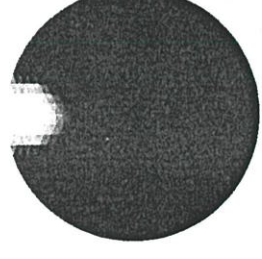
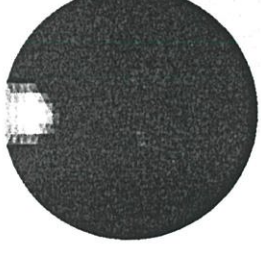
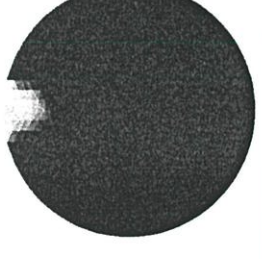
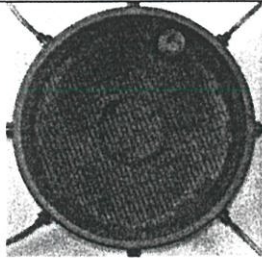
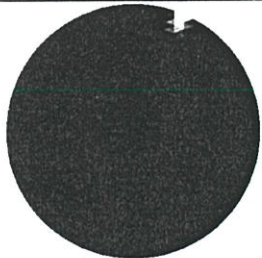
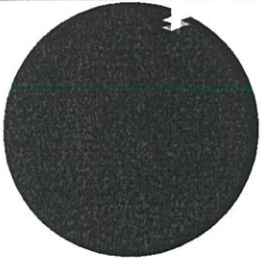
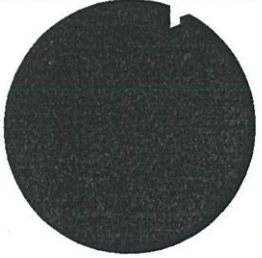
นอร์มอลไลซ์ ค่าความจุไฟฟ้า ส่วนค่าความจุไฟฟ้าอีกชุด คือค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ขณะวางวัตถุที่ต้องการตรวจสอบไว้ภายในเซ็นเซอร์ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในการทดลองนี้จะหมายถึงค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้ในหัวข้อ 5.2.1 โดยที่วัตถุหมายเลข 1, 2 และ 3 คือวัตถุที่ต้องการตรวจสอบในการทดลองนี้จะใช้แท่งเทปลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 , 1.5 และ 0.5 นิ้วตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ 2 ชิ้น ในเซ็นเซอร์หน้าตัดกลม

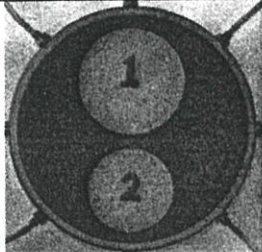
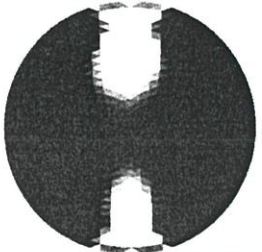
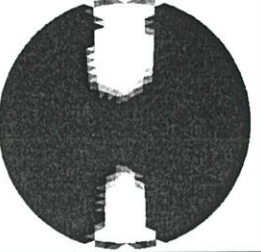
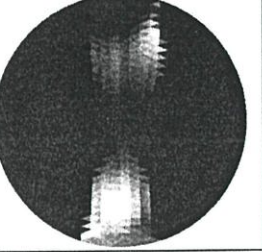
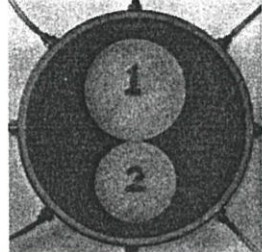
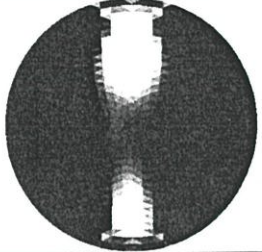
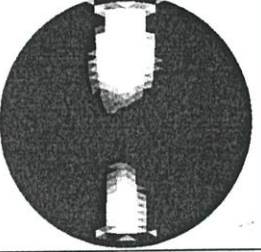
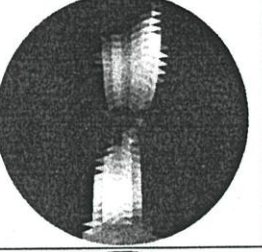
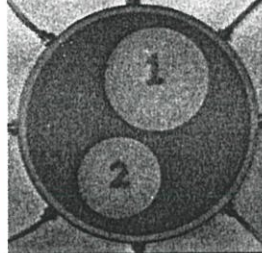
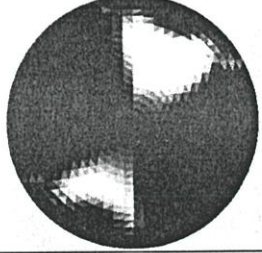
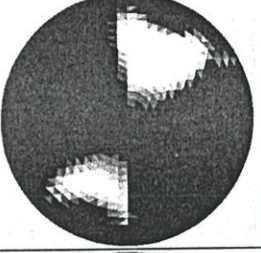
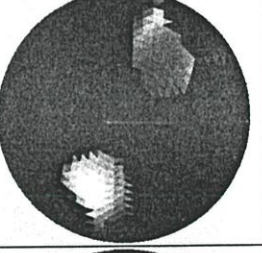
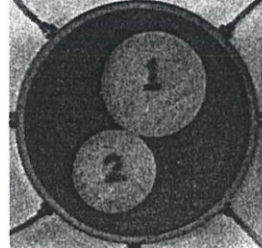
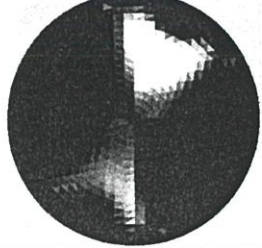
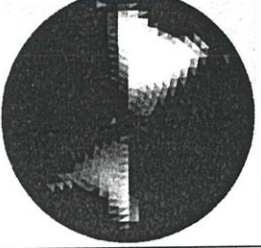
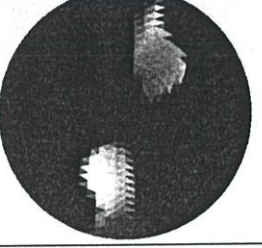
Object	LBP-Iteration = 5	LBP-Iteration = 15	ART-Iteration = 15
			
			
			
			

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.2 และ 5.3 เมื่อทดลองกับวัตถุ 1 ชิ้น ภาพตัดขวางที่ได้จากการสร้างภาพกลับจะมีความชัดเจนมากกว่า ส่วนกรณีวัตถุที่ตรวจสอบมีขนาดเล็ก ระบบยังคงสามารถตรวจสอบและสร้างภาพตัดขวางได้ ถ้าวัตถุนั้นวางอยู่ใกล้อิเล็กโทรด และเมื่อทดสอบกับวัตถุ 2 ชิ้นที่วางอยู่ใกล้กันจากภาพตัดขวางจะพบว่าระบบยังไม่สามารถแยกวัตถุ 2 ชิ้น ออกจากกันได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ 1 ชั้น ในเซ็นเซอร์หน้าตัดกลม

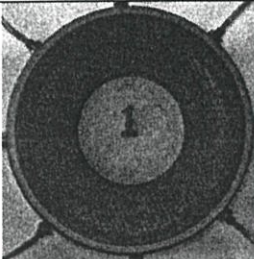
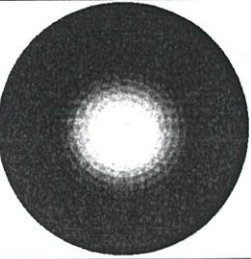
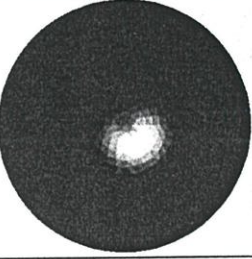
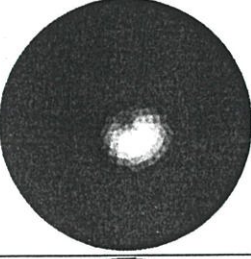
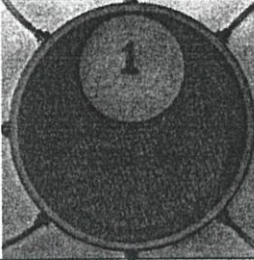
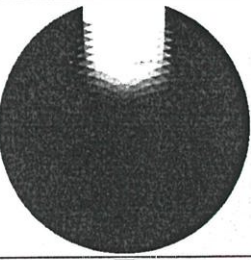
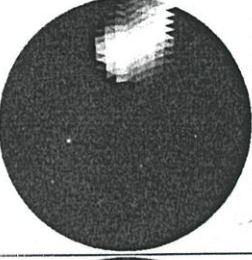
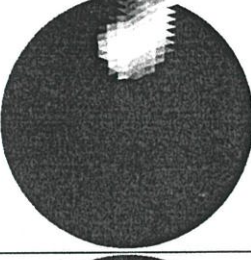
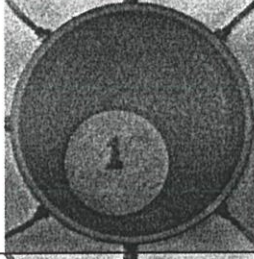
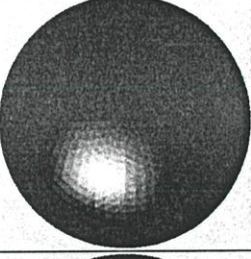
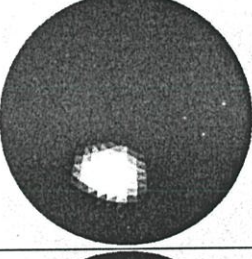
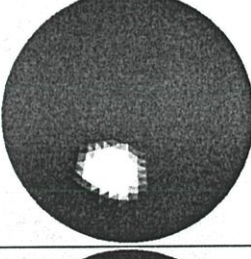
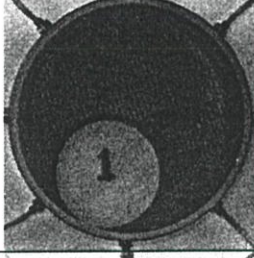
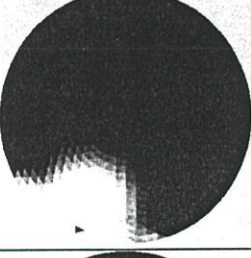
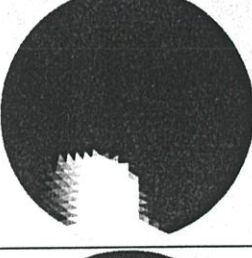
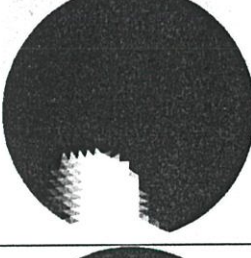
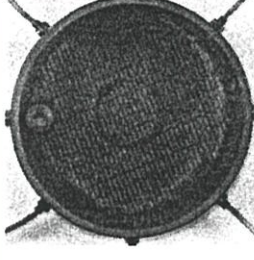

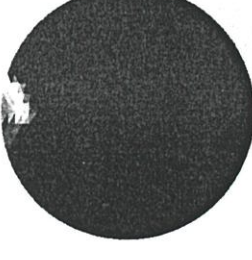
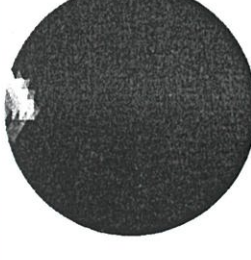
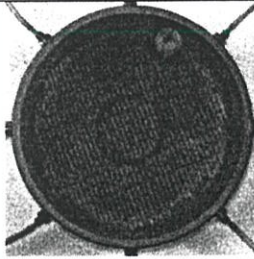


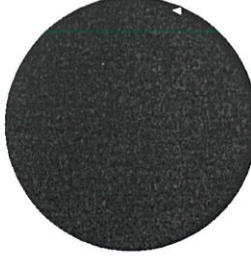
Object	LBP-Iteration = 5	LBP-Iteration = 15	ART-Iteration = 5
			
			
			
			
			
No. 3			
			
No. 3			

ตารางที่ 5.4 การสร้างภาพกลับของวัตถุ 2 ชิ้นโดยทำเทรซโฮลด์เซนซิวิตีในอัลกอริทึมวงกลม

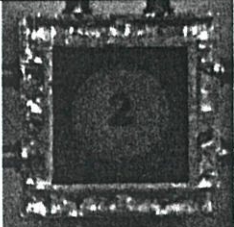
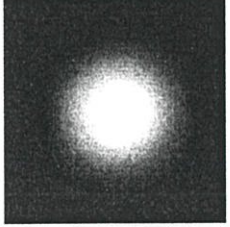
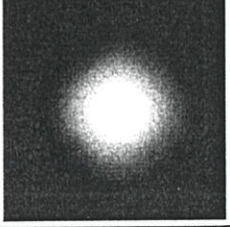
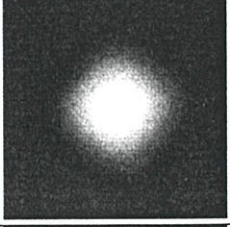
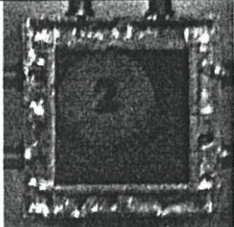
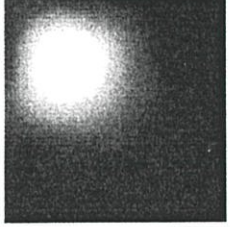
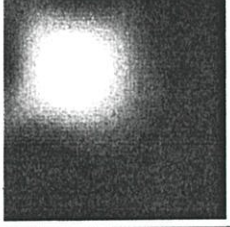
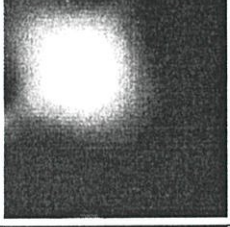
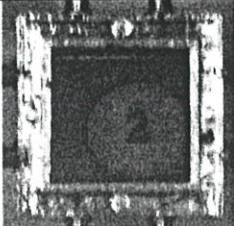
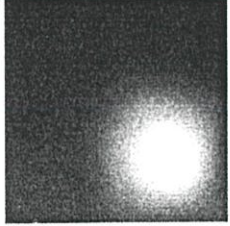
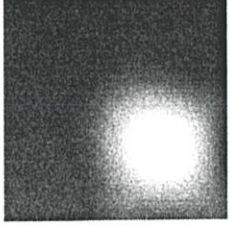
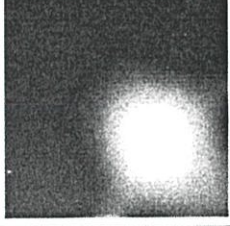
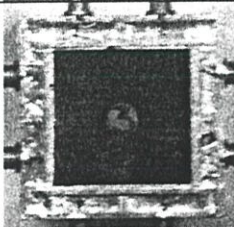
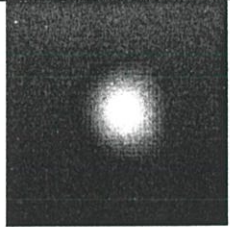
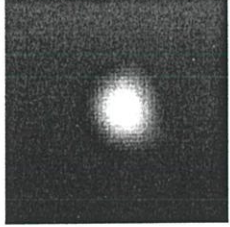
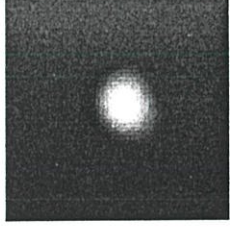
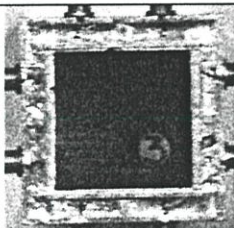
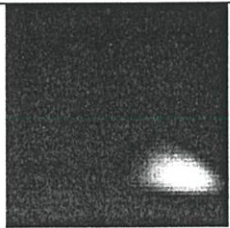
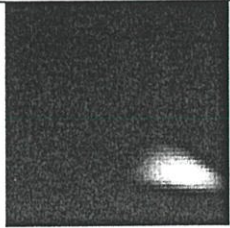
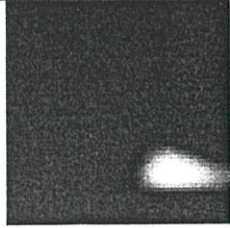
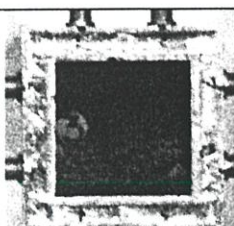

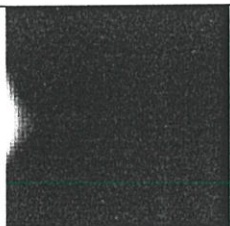

Object	LBP-Iteration = 15	LBP & Thresholding Iteration = 15	ART & Thresholding Iteration = 5
			
			
			
			

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.4 และ 5.5 ในการสร้างภาพกลับจะใช้เทคนิคการทำซ้ำเพื่อปรับปรุงภาพโดยใช้ค่าเซนซิวิตีชุดที่ได้ผ่านการทำเทรซโฮลด์และกระบวนการตัด ในหัวข้อ 4.4.2 และเฉพาะในผลการทดลอง LBP & Thresholding Iteration = 15 และ ART & Thresholding Iteration = 5 นั้น ได้มีการใช้เทคนิคการปรับปรุงภาพโดยการทำเทรซโฮลด์ ค่าระดับเทาของภาพตัดขวางก่อนการแสดงผล [2] ร่วมด้วย โดยผลที่ได้นั้นภาพยังคงมีความผิดเพี้ยนแต่ดีขึ้นและยังสามารถแยกวัตถุสองชิ้นออกจากกันได้ ส่วนผลการทดลองในตารางที่ 5.6 และ 5.7 จะเป็นผลการทดลองของเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยในตารางที่ 5.6 ในการปรับปรุงภาพจะใช้เทคนิคการทำซ้ำ แต่ในตารางที่ 5.7 จะใช้ ชุดข้อมูลเซนซิวิตี ที่ผ่านการทำเทรซโฮลด์และกระบวนการตัดร่วมกับเทคนิคการทำซ้ำ

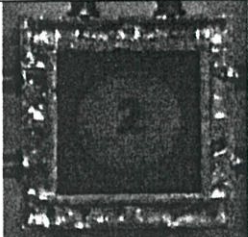
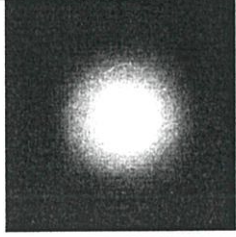
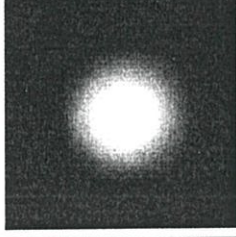
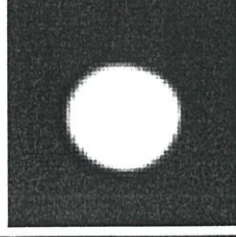
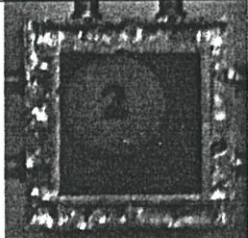

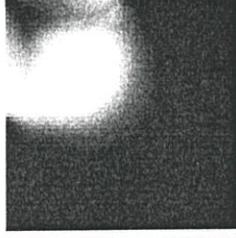

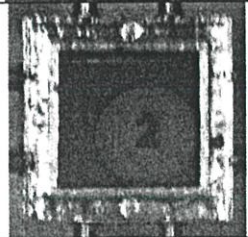
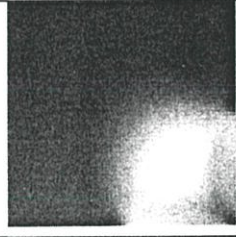
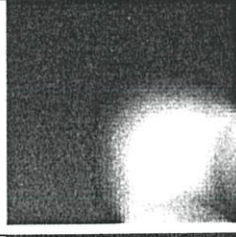
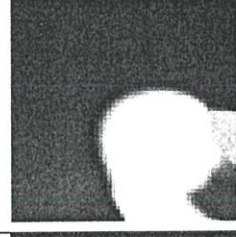
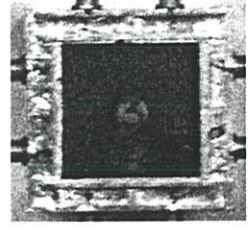



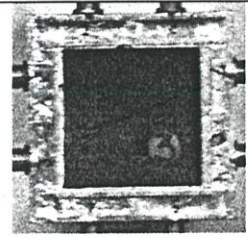
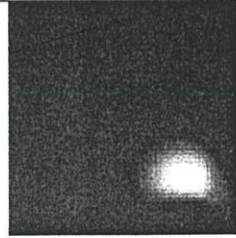
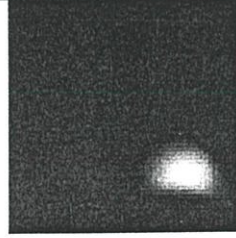
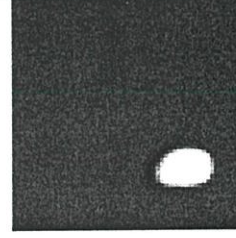
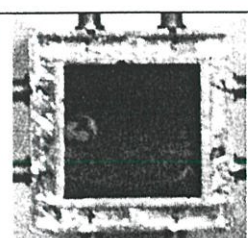
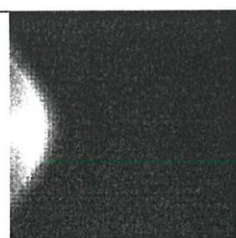
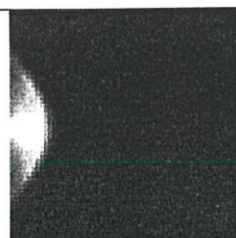
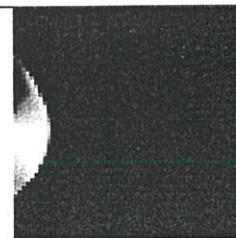
ตารางที่ 5.5 การสร้างภาพกลับของวัตถุ 1 ชิ้นโดยทำเทรซโฮลด์เซนซิวิตีในอัลกอริทึมวงกลม

Object	LBP-Iteration = 5	ART-Iteration = 5	ART & Thresholding Iteration = 5
			
			
			
			
			
No. 3			
			
No. 3			

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองจากการสร้างภาพกลับของวัตถุ ในเซ็นเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยม

Object	LBP-Iteration = 5	LBP-Iteration = 15	ART-Iteration = 5
			
			
			
 No. 3			
 No. 3			
 No. 3			

ตารางที่ 5.7 การสร้างภาพกลับโดยทำเทรซโฮลด์เซนซitiviti ในอัลกอริธึมหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Object	LBP-Iteration = 5	LBP-Iteration = 15	ART-Iteration = 5
			
			
			
 No. 3			
 No. 3			
 No. 3			

จากผลการทดลองของภาพตัดขวางที่ได้ทั้งเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม จะเห็นว่า ลักษณะของขอบภาพจะชัดขึ้นและภาพถูกต้องมากยิ่งขึ้น ถ้าใช้จำนวนการทำซ้ำที่เหมาะสม รวมทั้งการตัดค่าระดับเทาต่างๆที่ไม่ถูกต้องทิ้งไปก็จะช่วยให้ภาพที่ได้ชัดขึ้นด้วย แต่ข้อเสียคือ ถ้ามีวัตถุขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับวัตถุอื่นที่อยู่ภายในพื้นที่ของเซ็นเซอร์เดียวกัน จะทำให้วัตถุนั้นไม่สามารถถูกแสดงผลได้ เนื่องจากค่าระดับเทาที่ตำแหน่งของวัตถุนั้นจะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถตรวจสอบวัตถุสองชิ้นที่มีขนาดที่แตกต่างกันมากๆได้

5.3 เกณฑ์ประเมินสมรรถนะ (Performance evaluation criteria)

สำหรับการประเมินสมรรถนะของกระบวนการ การสร้างภาพตัดขวาง ทำได้โดยการหาค่าความคลาดเคลื่อนระดับเทาของภาพที่ถูกสร้างกลับเทียบกับภาพวัตถุทดสอบโดยสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน [2] คือ

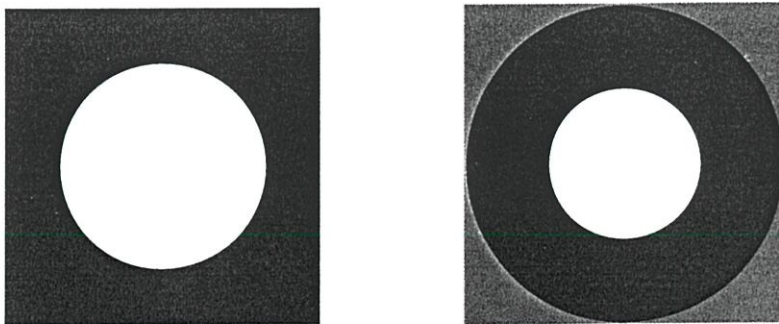
1. Quantitative evaluation เช่น การคำนวณ ค่าความคลาดเคลื่อนนอร์มสัมพัทธ์ของภาพ
2. Qualitative evaluation เช่น การเปรียบเทียบด้วยตา (Visual comparison)

วิธีการสร้างภาพกลับที่ดีจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ซึ่งแสดงถึงคุณภาพของภาพที่ถูกสร้างกลับมีลักษณะใกล้เคียงกับภาพทดสอบมากที่สุด โดยวิธีการสร้างภาพกลับที่ดี ควรจะใช้จำนวนของการทำซ้ำน้อยที่สุด

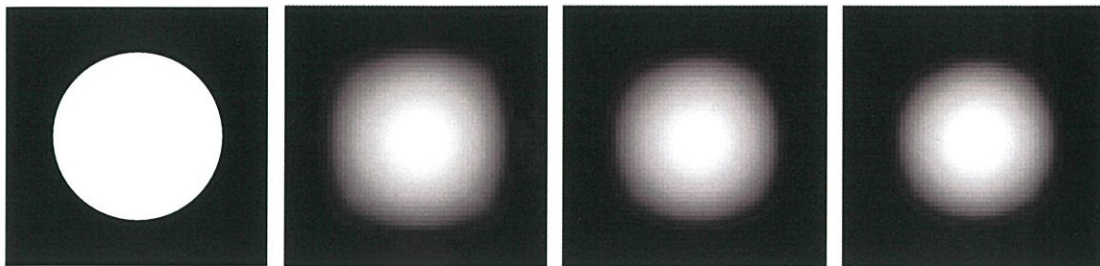
$$error = \frac{\|g - \bar{g}\|_2}{\|g\|_2} \quad (5.2)$$

เมื่อ g คือ เวกเตอร์ค่าระดับเทาของภาพทดสอบ

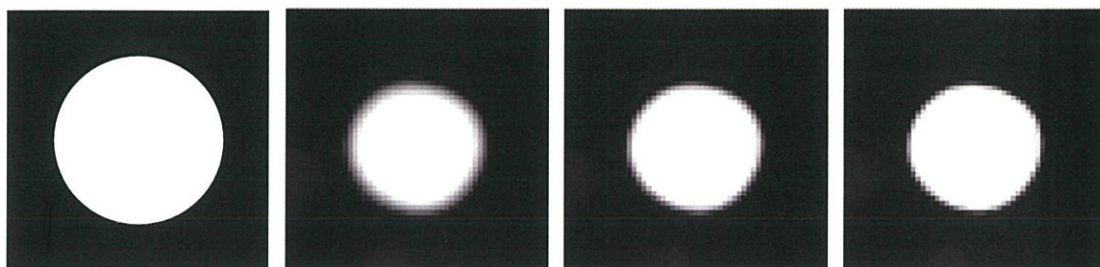
\bar{g} คือ เวกเตอร์ค่าระดับเทาของภาพที่ถูกสร้างกลับ



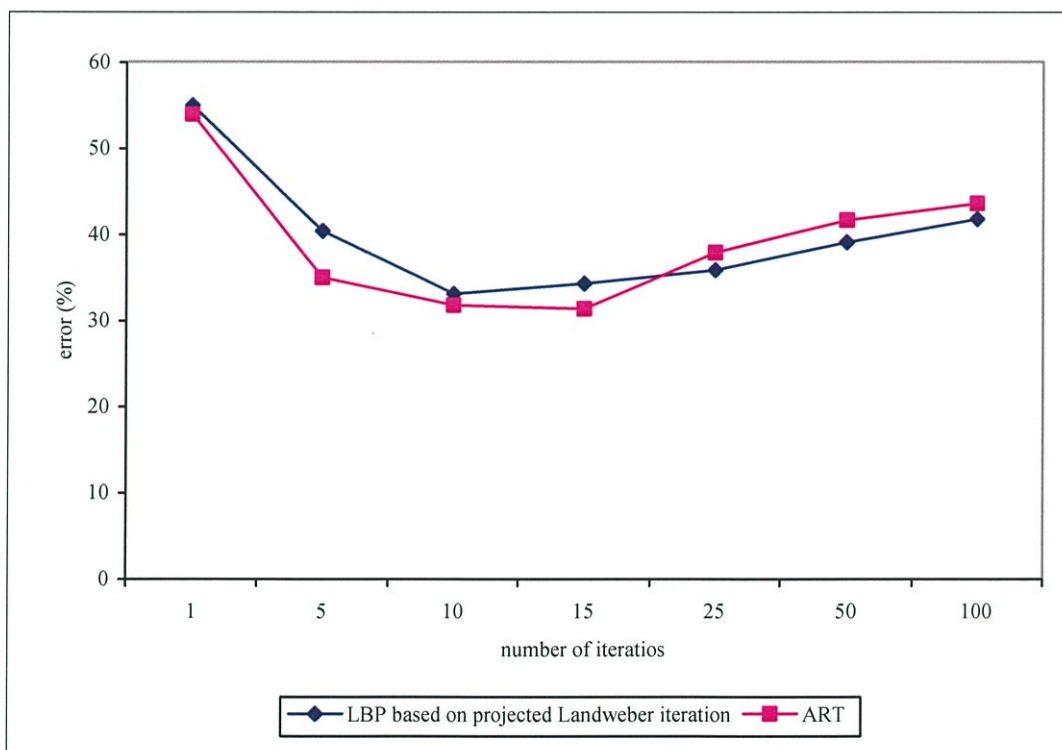
รูปที่ 5.13 ตำแหน่งการวางวัตถุที่ใช้ทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนในเซ็นเซอร์ทั้ง 2 แบบ



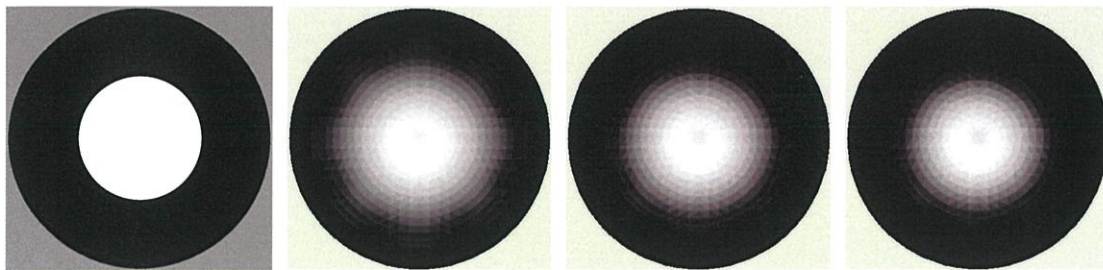
รูปที่ 5.14 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมด้วยวิธี LBP ตามหลักการของ Projected Landweber Iteration โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ



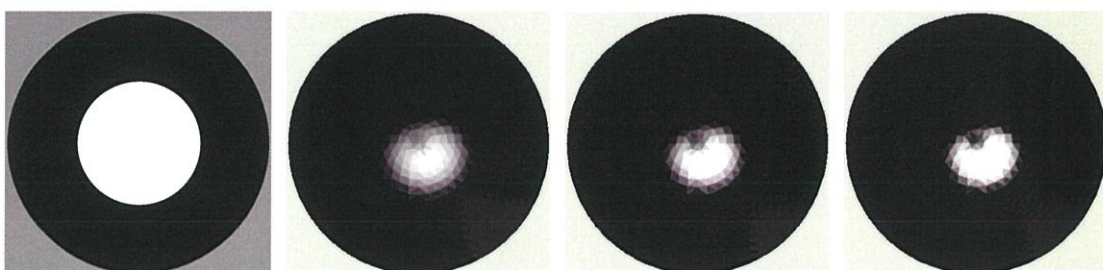
รูปที่ 5.15 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยมด้วยวิธี ART โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ



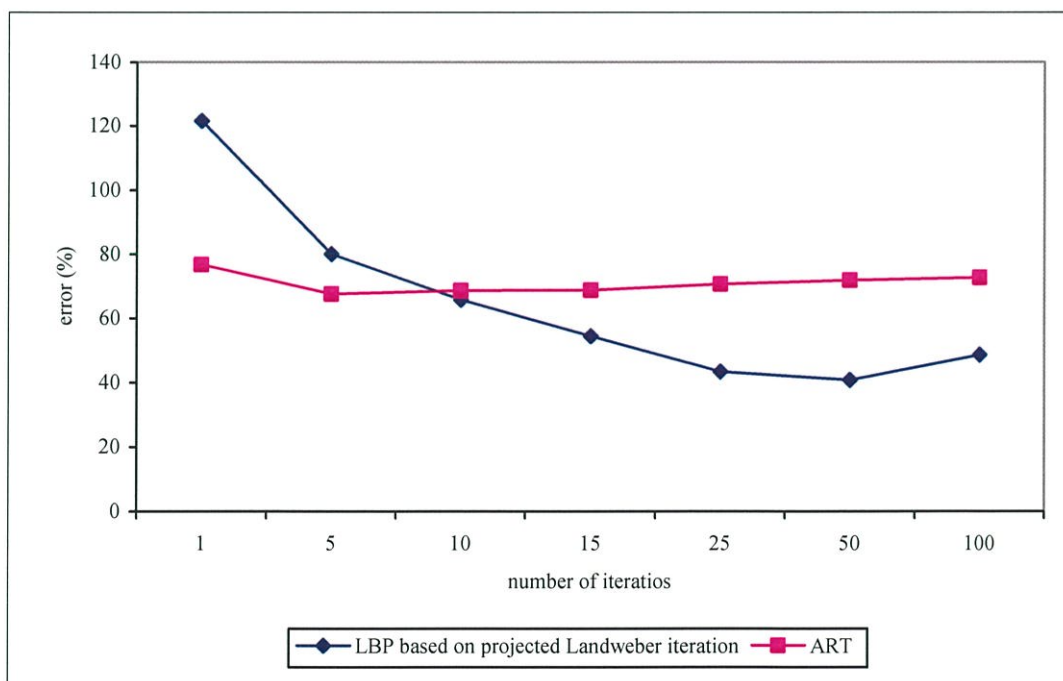
รูปที่ 5.16 รูปกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนนอร์มสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.17 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบกลมด้วยวิธี LBP ตามหลักการของ Projected Landweber Iteration โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 ผลของการสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบกลมด้วยวิธี ART โดยใช้จำนวนการทำซ้ำ 5 , 10 และ 15 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 5.19 รูปกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนนอร์มสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แบบกลม

บทที่ 6

บทสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ภาพตัดขวางค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุสามารถสร้างได้ โดยการตัดอิเล็กโทรดล้อมรอบวัสดุที่ต้องการศึกษาและวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรด แล้วนำค่าความจุที่วัดได้มาสร้างเป็นภาพการกระจายตัวของค่าพหุคูณมิติของวัสดุ โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ข้อดีของวิธีนี้คือ ระบบการวัดไม่ซับซ้อน ไม่แพง ไม่มีผลกระทบหรือรบกวนต่ออุปกรณ์อื่นๆ อุปกรณ์ทั้งระบบมีขนาดเล็ก และสามารถนำไปเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ ส่วนข้อจำกัดคือ วัสดุที่วัดต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยเฉพาะผิวนอกที่ตัดอิเล็กโทรด คุณภาพการแยกแยะการกระจายตัวของค่าพหุคูณมิติจะต่ำทำให้ภาพที่ได้ไม่ดีเท่ากับการใช้เทคนิคภาพตัดขวางที่เป็นมาตรฐานอยู่ในปัจจุบัน เช่น CT MRI หรือ อื่น ๆ ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าว ทำให้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีผิวเป็นฉนวน มีโครงสร้างการกระจายตัวของค่าพหุคูณมิติภายในไม่ซับซ้อน เช่น การดูภาพตัดขวางของวัตถุในท่อส่ง ทางอุตสาหกรรมน้ำมันหรือเม็ดพลาสติก การสังเกตการผสมของสารเคมีในถังกวน เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและสร้างระบบ ECT รวมทั้งปรับปรุงคุณภาพของภาพตัดขวางให้มีความชัดเจนและใกล้เคียงวัตถุจริงมากยิ่งขึ้น โดยได้นำแนวคิดจากเทคนิคเดิมของ W.Q.Yang และ คณะ โดยในส่วนของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าจะใช้หลักการของ AC- Based ซึ่งได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าได้ผลดีกว่าวิธีการ Charge / Discharge และสำหรับการสร้างภาพกลับนั้นจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ Projected Landweber Iteration ที่มีการจำกัดค่าระดับเทาของแต่ละการทำซ้ำให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 กับเซ็นเซอร์แบบทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 50x50 มิลลิเมตร และเซ็นเซอร์แบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมขนาดรัศมี 54 มิลลิเมตร โดยทั้งสองแบบจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรดซึ่งติดอยู่รอบนอกของเซ็นเซอร์ ซึ่งปัญหาของวิธีนี้คือภาพตัดขวางที่ได้มีลักษณะไม่คมชัดบริเวณขอบของภาพ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของวิธีการนี้ ทำให้ต้องใช้จำนวนรอบการทำซ้ำสูง ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการเชิงพีชคณิตในการปรับปรุงคุณภาพของภาพให้ดีขึ้นและลดจำนวนรอบการทำซ้ำนั้นลง โดยใช้เทคนิค ART ซึ่งเหมาะกับการใช้ในการแก้สมการเชิงเส้นขนาดใหญ่

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาหลักการ และออกแบบระบบ ECT ในส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) เพื่อใช้งานร่วมกับอัลกอริทึมของการสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งแต่เดิมใช้การจำลองค่าความจุไฟฟ้าจากวัสดุที่มีโครงสร้างตามแบบจำลอง ที่สามารถเป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ โดยสมมุติให้วัสดุที่ต้องการวัดมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดวงกลม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างระบบ ECT ขึ้น รวมถึงตัวเซ็นเซอร์ ที่มีโครงสร้าง

ตามแบบจำลองเซ็นเซอร์ เพื่อทดลองกับวัตถุจริงและใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จริงจากระบบ แทนค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของค่าศักดาไฟฟ้า

ในส่วนของผลการทดลอง ได้เปรียบเทียบผลของการสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้า จากเซ็นเซอร์ที่มีการวางวัตถุในตำแหน่งที่ต่างกัน และได้เปรียบเทียบการสร้างภาพกลับด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันออกไป โดยสังเกตได้จากผลการทดลองในบทที่ 5

ความถูกต้องของภาพที่ถูกสร้างกลับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตริวิตี ขนาด รูปร่าง ค่าระดับเทา และตำแหน่งที่อยู่ในภาพ คุณภาพของภาพสามารถถูกปรับปรุงได้โดยการเพิ่มจำนวนพิกเซลของภาพ การเพิ่มจำนวนของอิเล็กโทรูด การทำเทรซโฮลด์กับชุดข้อมูลที่เหมาะสม และการเพิ่มจำนวนของการทำซ้ำ แต่ทั้งนี้จำนวนของการทำซ้ำจะต้องสอดคล้องกับการดูเ้าของผลเฉลย และเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Apinai Rerkratn, Chanrit Yossontikul, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil, "Electrical Capacitance Tomography Using Square Sensor", Proc. of The 2003 International Technical Conference On Circuits/Systems Computers and Communications, Phoenix Park, Korea, July 7-9, 2003.
- [2] Chanrit Yossontikul, Phittaya Ungpinitpong, Kitiphol Chitsakul, Manas Sangworasil, "Image Reconstruction for Electrical Capacitance Tomography using SART Method.", Proc. of The 2003 International Technical Conference On Circuits/Systems Computers and Communications, Phoenix Park, Korea, July 7-9, 2003.
- [3] W.Q. Yang Charge injection compensation for Charge/Discharge capacitance measuring circuit used in tomography systems Sci. Meas. Technol.7, 1996, pp.1073-1078.
- [4] W.Q. Yang and T.A. York New AC-Based capacitance tomography system Proc. IEE Sci. Meas. Technol., Vol.146, January 1999, pp.47-53.
- [5] R.A. Williams, M. S. Beck, Process Tomography: Principles, Techniques and Applications, Butterworth-Heinemann, 1995.
- [6] เทอดชัย ชเนศวโรดม กิติพล ชิตสกุล ประภากร สุวรรณณะ มนต์ สัจวรศิลป์ " การสร้างภาพตัดขวาง แสดงความต้านทานไฟฟ้าภายในของวัตถุ " วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16, หน้า 19-24, ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2542
- [7] W.Q. Yang Hardware design of electrical capacitance tomography systems Sci. Meas. Technol.7, 1996, pp.225-232.
- [8] Howard M. Berlin, Design of OP-AMP Circuits with Experiments, Macmillan, Carmel, IN., 1989.
- [9] Ramakant A. and Gayakwad, OP-AMP and Linear integrated circuits, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
- [10] W.H. Hayt Jr. Engineering Electromagnetics. 5th Ed. New York : McGraw-Hill. 1989.
- [11] Joseph A. Edminister. Theory and Problems of Electromagnetics, 2nd Ed. McGraw-Hill, Singapore, 1993.

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ธนากร เลิศภักดี, อภินัย ฤกษ์รัตน์ และ กิติพล ชิตสกุล “ ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON28) 20-21 ตุลาคม 2548, หน้าที่ 1-4
2. Apinai Rerkratn, Chanrit Yossontikul, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil, “*Electrical Capacitance Tomography Using Square Sensor*”, Proc. of The 2003 International Technical Conference On Circuits/Systems Computers and Communications, Phoenix Park, Korea, July 7-9, 2003.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชนากร เลิศภักดี
วัน เดือน ปีเกิด	12 ธันวาคม 2517 ที่ขอนแก่น
ที่อยู่	53/74 หมู่ 8 ถ.ติวานนท์ ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	2543 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ปัจจุบัน	พนักงานรัฐวิสาหกิจ บ.กสท โทรคมนาคมจำกัด (มหาชน)