

รายงานการวิจัย

เครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ
Electrical Capacitance Tomography System

จัดทำโดย

นาย อภินัย ฤกษ์รัตน์

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCM

RC

48.7

Tb

02545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 69960

วัน,เดือน,ปี..... 21 ก.พ. 2550

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ปีงบประมาณ 2549

b.....	1170 ก.พ. 50
i.....	

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) “เครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ”
(ภาษาอังกฤษ) “Electrical Capacitance Tomography System”

ชื่อผู้วิจัย (ภาษาไทย) นาย อภินัย ฤกษ์รัตน์
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Apinai Rerkratn

หน่วยงานที่รับผิดชอบงานวิจัย และที่อยู่

แผนก/ภาควิชา ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ กอง/คณะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
กรม/มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กระทรวง/ทบวง กระทรวงศึกษาธิการ
ที่อยู่ ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ประจำปี.....2549..... จำนวนเงิน.....355,000.....บาท
ระยะเวลาการทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่.....1.....ตุลาคม..2548....ถึง.....30.....กันยายน..2549

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะประกอบด้วยระบบเก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าและอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า สำหรับระบบเก็บข้อมูลจะประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์, วงจรขยายสัญญาณ, วงจรตรวจจับสัญญาณ, วงจรกรองสัญญาณ, วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี และ วงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล ข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณโดยอัลกอริทึมเพื่อสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจคชัน (Linear back-projection) และใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative method) ช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพตัดขวางให้ดีขึ้น จากผลการวิจัยพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากคู่อิเล็กโทรดของเซนเซอร์จะอยู่ในช่วง 0.1245 พิกโกฟารัด ถึง 2.6760 พิกโกฟารัด โดยเมื่อนำข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไปสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภาพที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับหน้าตัดของวัตถุทดสอบหากวัตถุทดสอบเป็นวัตถุชิ้นใหญ่ ในขณะที่หากวัตถุทดสอบมีขนาดเล็กกลง จะทำให้การสร้างภาพกลับมีความคลาดเคลื่อนได้

ABSTRACT

An Electrical capacitance tomography system has been developed. The system consists of data collection system and reconstruction algorithm. The data collection system consists of sine wave generator circuit, amplifier circuit, detector circuit, filter circuit, RMS-to-DC converter circuit and A/D converter circuit. Capacitance data from data collection system used for reconstruction cross-section image of object by linear back projection algorithm. An iterative method has been also used to improve the image quality. In experiments the minimum and maximum capacitance between the electrode pairs was found about 0.1245 pF and 2.6760 pF respectively. The reconstructed images of the large size of object closely resemble the cross-section of the specific test phantom more than small one.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือเป็นอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำและข้อมูลต่างๆจากบุคคลต่อไปนี้

1. ดร. กิติพล ชิตสกุล ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาในการทำโครงการวิจัย
2. นายชาญฤทธิ์ ยศสันติกุล ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับเขียนรายงานโครงการวิจัย
3. นาย ธนากร เลิศภักดี ที่ช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

อภินิย ฤกษ์รัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุ	1
1.1 การสร้างภาพตัดขวาง	1
1.2 การสร้างภาพตัดขวางในกระบวนการทางอุตสาหกรรม	2
บทที่ 2 ระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า	5
2.1 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า	6
2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า	9
บทที่ 3 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ	12
3.1 โครงสร้างของระบบเก็บข้อมูลแบบ 8 อีเล็กโทรด	12
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต	13
3.3 วงจรขยายสัญญาณ	15
3.4 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณขนาด 8X2 แชนแนล	15
3.5 การ์ดอินเตอร์เฟส	16
3.6 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล	22
3.7 วงจรตรวจจับสัญญาณ(Detector Circuit)	23
3.8 วงจรขยายสัญญาณ	24
3.9 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์	24
3.10 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี	25
3.11 อีเล็กโทรด	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การจำลองค่าความจุไฟฟ้า	24
4.1 ค่าความจุไฟฟ้า	29
4.2 วิธีการจำลองค่าความจุไฟฟ้า	30
4.3 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลม	32
4.3.1 การคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	32
4.3.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	33
4.3.3 การหาค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลม	38
บทที่ 5 การสร้างภาพกลับ	40
5.1 แนวคิดพื้นฐาน	41
5.2 วิธีการหาค่าเซนซิติวิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT	42
5.3 การสร้างภาพกลับด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันและการเทรซโฮลด์	44
5.4 การสร้างภาพกลับด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ Projected Landweber iteration	45
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	47
6.1 การทดสอบ ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า	47
6.2 การทดลองระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นกับถังบรรจุน้ำมันพืช	50
6.3 การทดสอบอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าจำลองที่ได้จากการคำนวณ	51
6.3.1 การกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอมิตติวิตี	51
6.3.2 การทดลองการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า	53
6.3.3 การทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลม	55
6.4 การทดสอบอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริง	57
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก ก เครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ	70
ภาคผนวก ข บทควมวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ระหว่างการทำโครงการวิจัย	72

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า	5
3.1	การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี MAX 038	14
3.2	คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET – 8255	19
3.3	การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255	21
3.4	คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12	22
3.5	ข้อดีและข้อเสียของการติดอิเล็คโทรูดแต่ละแบบ	26

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี	1
1.2	องค์ประกอบโดยทั่วไปของเครื่องมือการสร้างภาพตัดขวางทางอุตสาหกรรม	4
2.1	การวัดหาค่าความต้านทาน	7
2.2	ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ	8
2.3	ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ	9
2.4	แสดงระบบพื้นฐานของ ECT	10
2.5	ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ	11
3.1	ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเก็บข้อมูลแบบ 8 อิเล็กโทรด	12
3.2	วงจรกำเนิดสัญญาณ 500 กิโลเฮิร์ต	13
3.3	วงจรขยายสัญญาณ	15
3.4	ลักษณะของการต่อวงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชลแนลเข้ากับเซนเซอร์	16
3.5	ลักษณะของวงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชลแนล	17
3.6	วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชลแนลที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง	18
3.7	ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET – 8255	19
3.8	วงจรภายในของการ์ด ET-8255	20
3.9	ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม	21
3.10	วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12	22
3.11	วงจรตรวจจับสัญญาณ	23
3.12	วงจรขยายสัญญาณ	24
3.13	วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 500 กิโลเฮิร์ต	24
3.14	วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี	25
3.15	ลักษณะการติดอิเล็กโทรดลงในส่วนที่จะวัด	26
3.16	รูปเซ็นเซอร์แบบวงกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด	27
3.17	ลักษณะเซนเซอร์ขนาด 8 อิเล็กโทรด (ด้านข้าง) ที่สร้างขึ้น	28
3.18	ลักษณะเซนเซอร์ขนาด 8 อิเล็กโทรด (ด้านบน) ที่สร้างขึ้น	28
4.1	รูปแสดงตัวนำสองตัวใดๆ เมื่อวางอยู่ในวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า	29
4.2	รูปการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมย่อยๆ	33
4.3	รูปแสดงการแบ่งตัวเซ็นเซอร์ออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆรูปสามเหลี่ยม	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมแบบสองมิติ	34
4.5	บริเวณขอบเขตแบบไม่เอกพันธ์และการกำหนดค่าพหุมิติติวิตีของแต่ละอิลิเมนต์	38
5.1	รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโตรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโตรด 1-8	43
5.2	รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโตรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ	43
5.3	ขั้นตอนวิธี วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber iteration	45
6.1	ลักษณะของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง	47
6.2	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ 500 กิโลเฮิร์ต	47
6.3	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ	48
6.4	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรดีเทคเตอร์	48
6.5	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ	49
6.6	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 500 กิโลเฮิร์ต	49
6.7	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี	50
6.8	กราฟความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของระบบ และค่าระดับความสูงของน้ำมันพืช	50
6.9	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโตรดที่ทำการวัด	51
6.10	บริเวณที่มีลักษณะลายเฉียงคือบริเวณที่ถูกกำหนดลักษณะการกระจายตัวของพหุมิติติวิตีของตัวกลางเซ็นเซอร์แบบวงกลม	52
6.11	ลักษณะการกระจายตัวของพหุมิติติวิตีของตัวกลางสำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลม	52
6.12	ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 1	53
6.13	ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 2	53
6.14	ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 3	54
6.15	ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 4	54
6.16	ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเมื่อเซ็นเซอร์มีเฉพาะก๊าซ และน้ำมันอยู่เต็ม	55
6.17	รูปผลการทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลมด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน	55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.18	รูปผลการทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลมด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ตามหลักการของ projected Landweber iteration	56
6.19	เซ็นเซอร์แบบวงกลมที่ใช้ในการทดลอง	57
6.20	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 1	58
6.21	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 2	59
6.22	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 3	59
6.23	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 4	60
6.24	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 5	60
6.25	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 6	61
6.26	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 7	61
6.27	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 8	62
6.28	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชั้น แบบที่ 9	62
6.29	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 1	63
6.30	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 2	63
6.31	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 3	64
6.32	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 4	64
6.33	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 5	65
6.34	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 6	65
6.35	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 7	66
6.36	เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 2 ชั้น แบบที่ 8	66

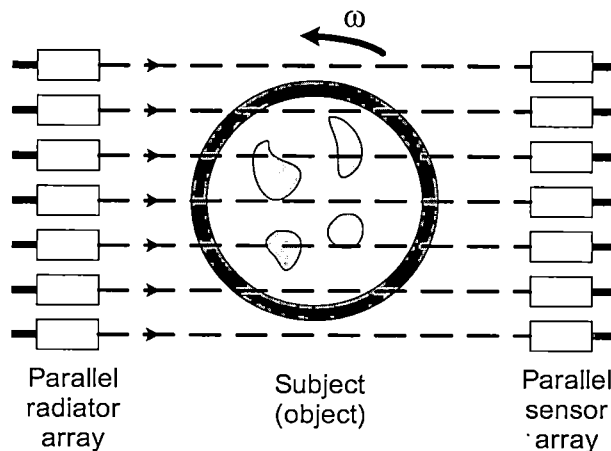
บทที่ 1

การสร้างภาพตัดขวางของวัตถุ (Tomography)

1.1 การสร้างภาพตัดขวาง

ข้อมูลโครงสร้างภายใน และคุณสมบัติต่างๆของวัตถุ มีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมาก ในการตรวจสอบวัตถุนั้น วิธีการที่ง่ายที่สุดเพื่อที่จะได้ข้อมูลเหล่านั้น คือ การผ่าวัตถุตามแนวขวาง ให้ผ่านส่วนที่ต้องการตรวจสอบ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติในกรณีต่างๆ เช่น การวินิจฉัยโรคทาง การแพทย์ การสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ การทดสอบในทางอุตสาหกรรมแบบไม่ทำลาย เป็นต้น จะไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอเทคนิคที่เรียกว่า โทโมกราฟี (Tomography) [1] หรือการสร้างภาพตัดขวางภายในวัตถุเพื่อแก้ปัญหานี้ ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้เห็น ถึงโครงสร้างภายใน และลักษณะสมบัติบางอย่างของวัตถุโดยไม่ต้องทำลายวัตถุนั้น

หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี คือการวัดข้อมูลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัตถุกับตัวกลาง ของการวัดโดยเซ็นเซอร์ที่อยู่ภายนอกวัตถุ ในมุมต่างๆ ของระนาบหนึ่ง ซึ่งทำได้โดยการหมุนชุด ของเซ็นเซอร์ หรือหมุนวัตถุที่ต้องการวัด ข้อมูลนี้จะสัมพันธ์กับคุณสมบัติตามธรรมชาติที่แตกต่าง กันของส่วนประกอบต่างๆ ที่ตอบสนองต่อตัวกลางหรือสื่อสัญญาณที่ส่งเข้าไป จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ ในหลายๆทิศทางนี้มาประมวลผลด้วยคณิตศาสตร์ขั้นสูง ก็สามารถสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดง การกระจายขององค์ประกอบต่างๆภายในวัตถุได้ ดังรูปที่ 1.1 การใช้สื่อสัญญาณแต่ละชนิดนั้นมีข้อ ดี ข้อเสีย ข้อจำกัด และขั้นตอนการประมวลผลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่ต้องการ ตรวจสอบ ลักษณะของภาพที่ต้องการ และรูปแบบของการประยุกต์ใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 1.1 หลักการของเทคนิคโทโมกราฟี

วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยไม่ทำลายวัตถุ แบ่งออกตามหลักการกว้างๆ ได้ 3 วิธี คือ การส่งผ่าน (Transmission) การแผ่ (Emission) และการสะท้อน (Reflection) ในการส่งผ่านจะใช้รังสีเอ็กซ์ ลำอิเล็กตรอน ความร้อนหรือแสง หรือพลังงานใดๆ ก็ได้ที่มีพฤติกรรมตามกฎของการดูดซึม (Absorption law) โดยพลังงานที่ผ่านเข้าไปในวัตถุจะถูกดูดซับในส่วนต่างๆ ของวัตถุไม่เท่ากัน พลังงานส่วนที่ทะลุออกมา เรียกว่า โปรเจกชัน และภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้ คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ สำหรับอีกวิธีจะใช้หลักการแผ่รังสีโดยจะฉีดสารที่มีกัมมันตภาพรังสีเป็นส่วนประกอบ เมื่อสารนี้ไปยังอวัยวะที่สนใจก็จะแผ่รังสีแกมมาในทิศทางที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเดินทางของรังสีแกมมาที่ผ่านตำแหน่งเดียวกัน จะสามารถนำไปประมวลผลหาตำแหน่งของจุดนั้นได้ ภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้ คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องโพซิตรอนอิมิตชันโทโมกราฟี (Positron Emission Tomography หรือ P.E.T) และ เครื่องซิงเกิลโฟตอนอิมิตชันโทโมกราฟี (Single Photon Emission Computed Tomography หรือ S.P.E.C.T) ส่วนการสะท้อนจะใช้คุณสมบัติการสะท้อนของผิวหน้าของวัตถุมาตรวจสอบหาลักษณะของวัตถุได้ ตัวอย่างที่ใช้ เช่น แสง ลำอิเล็กตรอน เรดาร์ หรือ อัลตราโซนิค ภาพตัดขวางที่ได้จากวิธีนี้ คือ ภาพตัดขวางจากเครื่องอัลตราซาวด์ เป็นต้น

1.2 การสร้างภาพตัดขวางในกระบวนการทางอุตสาหกรรม (Industrial process tomography)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม [1, 2, 3] เริ่มต้นและถูกเสนอขึ้นในปี 1970 โดยเริ่มต้นจากการใช้รังสีเอ็กซ์เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงาน ซึ่งการใช้รังสีเอ็กซ์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมนี้ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาสูงและความไม่ปลอดภัยต่อรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้วิธีการอื่นๆ ที่อาศัยหลักการแผ่รังสีหรือการกระจายคลื่น (Radiation) ยังไม่สามารถใช้ได้กับการตรวจสอบวัตถุที่มีลักษณะไม่คงที่ได้ ซึ่งหมายถึงไม่สามารถแสดงผลในลักษณะเวลาจริง (Real time) ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของ Exposure time

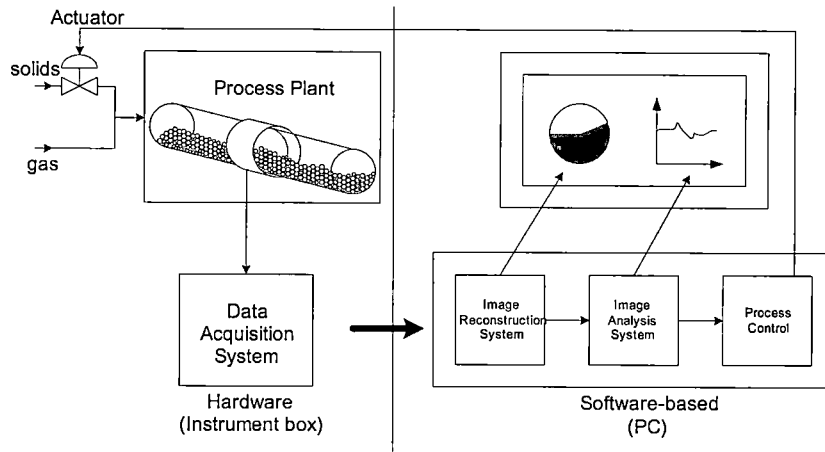
ต่อมา กลางปี 1980 มหาวิทยาลัย University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) ได้พัฒนาระบบการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การวัดค่าความจุไฟฟ้าขึ้น ซึ่งใช้สำหรับการสร้างภาพตัดขวางการไหลของวัสดุ 2 ชนิดในท่อจากบ่อน้ำมัน เช่น ก๊าซ/น้ำมัน ซึ่งระบบนี้ได้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบการสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน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

ในปัจจุบันได้มีผู้เสนอเทคนิคการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้หลักการต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนของกระบวนการและคุณสมบัติของสิ่งที่ตรวจสอบ เช่น หลักการอินฟราเรด(Infrared), Optical, PET, MRI, อัลตราโซนิก (Ultrasonic) หรือการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Resistance, Capacitance และ Impedance) ซึ่งแต่ละหลักการเหล่านี้มีทั้งข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ และข้อจำกัดต่าง ๆ กัน การเลือกหลักการต่างๆ ให้เหมาะกับการใช้งานจะขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย เช่น คุณสมบัติทางกายภาพของสิ่งที่ตรวจสอบ ความละเอียดของภาพที่ต้องการ ราคาของอุปกรณ์ ทรัพยากรบุคคลในการทำงาน หรืออันตรายที่เกิดจากคุณสมบัติของเครื่องมือ เป็นต้น

จุดประสงค์ของการสร้างภาพตัดขวางของกระบวนการ (Process Tomography) มีลักษณะคล้ายกับจุดประสงค์ของการสร้างภาพตัดขวางในทางการแพทย์ เช่น การตรวจสอบร่างกายมนุษย์ แต่การสร้างภาพตัดขวางของกระบวนการถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรม (Industrial Process) เช่น การตรวจสอบวัตถุภายในแท็งก์ (tank) หรือท่อ (pipe) โดยมีหลักการคือการใช้ชุดของเซ็นเซอร์ติดอยู่รอบ ๆ ภาชนะที่ภายในมีวัตถุที่ต้องการตรวจสอบอยู่ จะทำให้สามารถสร้างภาพการกระจายตัว ความเข้มข้นหรือการเคลื่อนตัวของวัตถุที่อยู่ภายในได้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกสร้างเป็นภาพ 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อใช้ในการสังเกต (monitoring) กระบวนการ, ตรวจสอบผลการผลิต, ตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพ หรือการส่งข้อมูลที่ถูกประมวลผลแล้วกลับไปควบคุมระบบ และยังสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการ และการออกแบบกระบวนการการทำงานให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

อย่างไรก็ตามเครื่องมือสร้างภาพตัดขวางในทางอุตสาหกรรมนี้จะต้องมีคุณลักษณะคือ ราคาถูก, การวัดมีความเร็วสูง, ระบบเซ็นเซอร์จะต้องไม่ทำให้เกิดรอยแตกหรือทำลายภาชนะหรือวัตถุที่กำลังตรวจสอบ (non-invasive) ซึ่งสามารถทำให้ใช้ได้กับกระบวนการที่มีการกักความร้อนสูง และต้องไม่รบกวนหรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ (non-intrusive) เช่น การไหลของน้ำมันในท่อ เป็นต้น

กระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ถูกประยุกต์ใช้เช่น การขนส่งภายในท่อ (น้ำมัน ก๊าซ ของแข็ง หรือของไหล) stirred reactor หรือ กระบวนการการแยกและการผสม (mixer and separator) เป็นต้น ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือการสร้างภาพตัดขวางทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องมือวัด (hardware) และส่วนของการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดแล้วแสดงผล (software) ส่วนของเครื่องมือวัดนั้นจะประกอบด้วย เซ็นเซอร์และสัญญาณควบคุม ส่วนของการประมวลผลข้อมูลจะประกอบด้วย การสร้างกลับของสัญญาณ, การแสดงผล และส่วนกำเนิดสัญญาณควบคุม



รูปที่ 1.2 องค์ประกอบโดยทั่วไปของเครื่องมือการสร้างภาพตัดขวางทางอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า

(Electrical Tomography)

หัวใจหลักของระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าก็คือระบบเซนเซอร์ (Sensor System) ซึ่งจะมีเทคนิคและวิธีการแตกต่างกันไป โดยแต่ละเทคนิคที่จะใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่ต้องการนำมาสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในของวัตถุนั้น สำหรับระบบเซนเซอร์ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า [1] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า [1]

Principle	Spatial resolution (%)	Practical realization	Comment
Electromagnetic radiation.	1	Optical	Fast. Optical access required.
		X-ray and γ -ray	Slow. Radiation containment.
		Positron emission	Labelled particle. Not on-line.
		Magnetic resonance.	Fast. Expensive for large vessels.
Acoustic.	3	Ultrasonic.	Sonic speed limitation. Complex to use.
Measurement of electrical properties.	10	Capacitive. Conductive. Inductive.	Fast. Low cost. Suitable for small and large vessels.

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าแต่ละระบบเซนเซอร์จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งในการเลือกใช้ระบบเซนเซอร์แต่ละชนิดจะต้องพิจารณาในด้านต่างๆ ดังนี้

- ธรรมชาติของวัตถุที่ต้องการนำมาสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในวัตถุ เช่น เป็นท่อ ภาชนะ ของแข็ง ของเหลว หรือวัตถุที่มีคุณสมบัติอื่นๆ

- คุณสมบัติของภาพที่ต้องการ ได้แก่

- ภาพที่ต้องการเป็นไดนามิก (Dynamic) หรือ สแตติก (Static)

- ขนาดรีโซลูชัน (Resolution) ของภาพ

- เซนส์ซิวิตี (Sensitivity) ที่ต้องการ

- สภาพแวดล้อมของวัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวาง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นในขณะทำงาน , ความปลอดภัยของระบบ ตลอดจนการซ่อมบำรุงระบบ

- ขนาดของวัตถุที่จะทำการสร้างภาพตัดขวาง

สำหรับในโครงการวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าที่ใช้เทคนิคของการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Measurement of electrical properties) เท่านั้น ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือความเร็วในการทำงานสูง ระบบมีราคาไม่สูงมาก และระบบสามารถใช้ได้กับวัตถุที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ได้ สำหรับการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคของการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุมีด้วยกัน 3 วิธีคือ

- ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography)

- ระบบสร้างภาพตัดขวางอินดักแตนซ์ไฟฟ้า (Electrical Inductance Tomography)

- ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

สำหรับรายละเอียดของระบบจะนำเสนอเฉพาะระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า และระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าเท่านั้น โดยรายละเอียดของแต่ละระบบมีดังนี้

2.1 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography)

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ(EIT) นั้นอาศัยหลักการพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และความต้านทาน ตามกฎของโอห์มดังสมการที่ (2.1)

$$V = IR \quad (2.1)$$

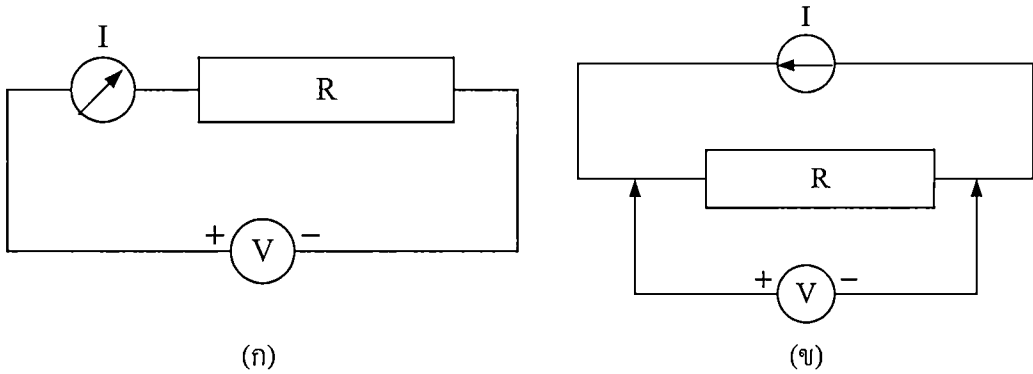
เมื่อ V = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

จากสมการหากรู้ค่ากระแสและค่าแรงดันก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานได้ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ 2 รูปแบบซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 คือ

- การจ่ายค่าแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส
- การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน



รูปที่ 2.1 การวัดหาค่าความต้านทาน

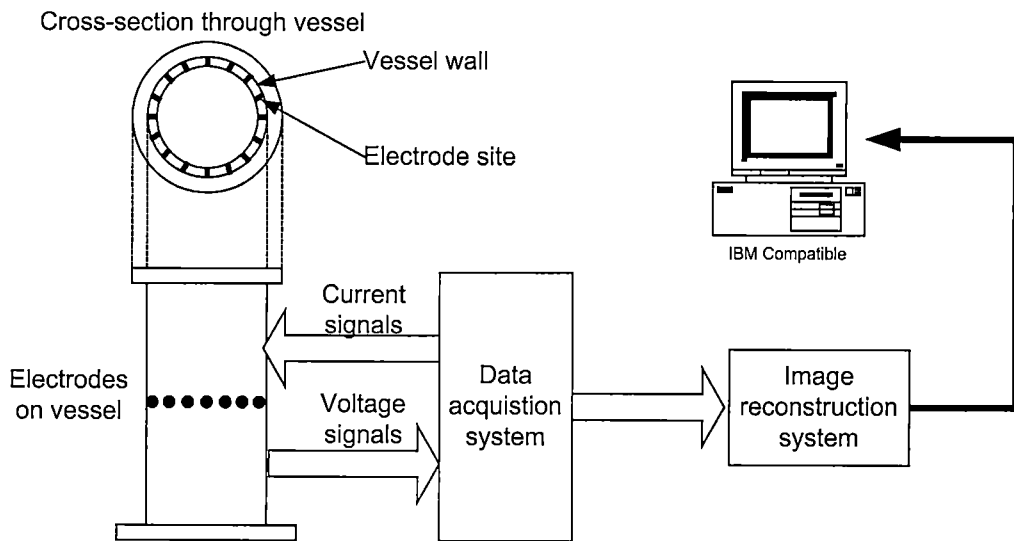
- (ก) การจ่ายค่าแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส
- (ข) การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน

จากการวัดดังรูปที่ 2.1 เราสามารถนำค่าของกระแสและแรงดันที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุนั้นจากกฎของโอห์ม แต่เนื่องจากผลของค่าความต้านทานระหว่างผิววัตถุกับแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งไม่ทราบค่าที่แน่นอนมีผลอย่างมากในกรณีใช้วิธีการจ่ายแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส ดังนั้นในกรณีที่ใช้งานทั่วไปจึงนิยมใช้วิธีการจ่ายกระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดันที่ให้เกิดผลของการวัดที่มีความถูกต้องมากกว่า โดยจะเห็นว่าในกรณีที่วัตถุมีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นแท่งยาวๆเราจะอนุมานได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลในทิศทางเดียวจากจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าไปจุดอ้างอิง และยังอนุมานได้ว่าวัตถุมีโครงสร้างเป็นแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานของวัตถุนั้นได้จากกฎของโอห์ม แต่อย่างไรก็ดีในกรณีที่วัตถุมีขนาดใหญ่และมักจะมีโครงสร้างแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Non Homogeneous) ในการวัดค่าแรงดันในแต่ละจุดโดยรอบวัตถุจะให้ค่าแรงดันที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วัดและโครงสร้างภายในที่ไม่เป็นแบบเอกพันธ์ จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าบนผิววัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวางโดยรอบเมื่อป้อนกระแสที่ตำแหน่งต่างๆกัน ความแตกต่างของแรงดันที่วัดได้แสดงถึงความแตกต่างของค่าสภาพความต้านทานภายในวัตถุนั้น ดังนั้นจากการที่สารหรือเนื้อเยื่อต่างชนิดกันมีค่าสภาพความต้านทานที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นเมื่อนำค่าการ

กระจายของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้ไปสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงระดับของค่าสภาพความต้านทานโดยใช้ระดับความเข้มของสีในจอภาพคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในวัตถุหรือร่างกายได้

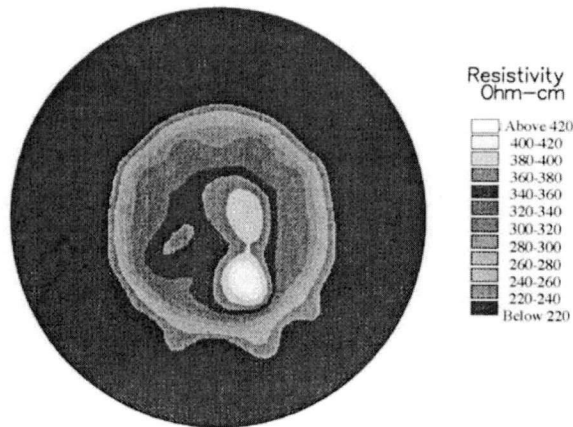
สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุนั้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.2 คือ

- วงจรจ่ายกระแส วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการจ่ายกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า
- เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและแสดงผล
- วัตถุที่จะทำการสร้างภาพตัดขวาง



รูปที่ 2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1]

จากรูปที่ 2.2 วงจรจ่ายกระแสและวงจรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโดยตรงกับวัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า โดยผ่านการควบคุมจากวงจรควบคุม (Control Circuit) เพื่อทำการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลของแรงดันที่วัดได้ในแต่ละอิเล็กโทรดแล้วส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและแสดงเป็นภาพตัดขวางแสดงความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1]

สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจะนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์และอุตสาหกรรม เช่น แสดงภาพตัดขวางของปอดหรือกระเพาะ , แสดงภาพตัดขวางของของผสมเพื่อดูการกระจายตัวของสาร เป็นต้น

2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

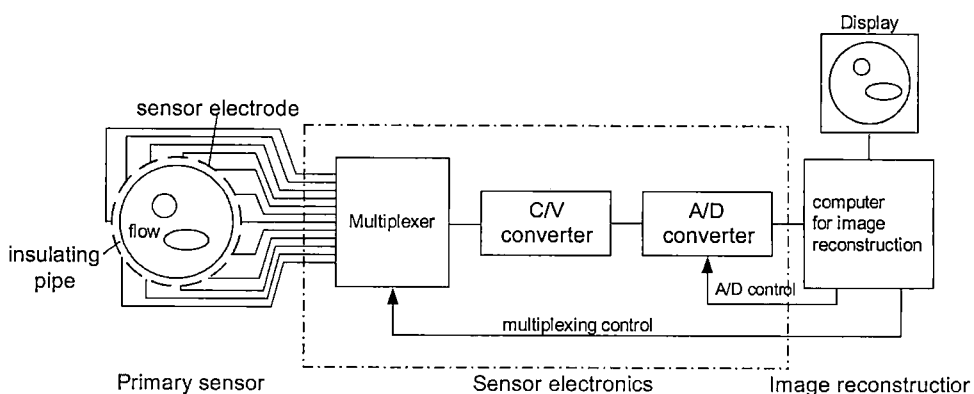
ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า(ECT) [4, 5] ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ดูลักษณะการกระจายของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ภายในวัตถุในรูปแบบของภาพตัดขวาง 2 มิติ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การไหลหรือการกระจายตัวของ gas/oil ในท่อส่งน้ำมัน กระบวนการแยก/ผสมทางเคมี หรือสังเกตการเกิดของเปลวไฟ [6] เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่รบกวน หรือส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ มีความปลอดภัยสูง มีความเร็วในการสร้างภาพสูง เครื่องมือสร้างได้ง่าย มีราคาถูก และมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ MRI หรือ X-ray CT

ระบบ ECT แตกต่างจากระบบ EIT คือ ระบบ EIT ใช้แสดงภาพตัดขวางภายในวัตถุโดยอาศัยความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยการป้อนกระแสเข้าไปที่ผิวภายนอกของวัตถุแล้วใช้อิเล็กโทรดวัดศักดาโดยรอบ จากนั้นคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ภายในที่ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมโดยรอบนั้น ปัญหาของ EIT คืออิเล็กโทรดต้องสัมผัสโดยตรงกับตัวนำภายในวัตถุ ซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรมที่โครงสร้างภายนอกวัตถุมีลักษณะเป็นฉนวนและยุ่งยากในการทำให้อิเล็กโทรดสัมผัสโดยตรงกับสารในวัตถุ

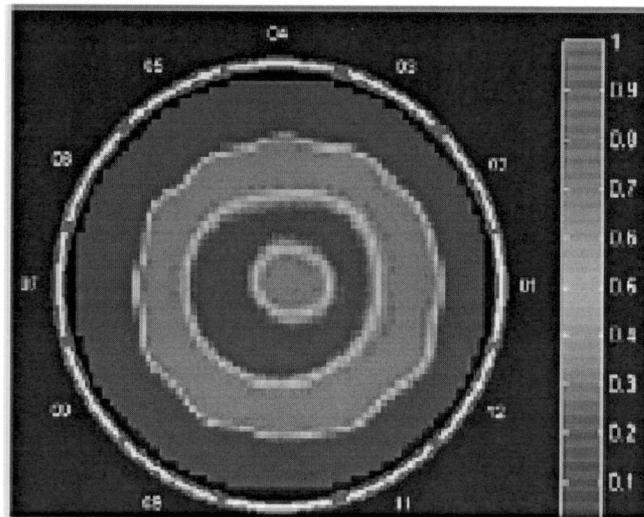
ระบบ ECT อาศัยการวัดความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้า ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ติดอยู่รอบๆ วัตถุที่จะวัด ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าพอมิตติวิตีของสารองค์ประกอบในวัตถุนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้ออกมาสร้างเป็นภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ แสดงถึง

ความแตกต่างของค่าพหุมิติวิถีของบรรจุภัณฑ์ ด้วยขั้นตอนการสร้างภาพต่างๆที่เหมาะสม ดังนั้นทำให้สามารถใช้ได้กับวัตถุที่ภายนอกเป็นฉนวน และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับสารภายในวัตถุได้ วัตถุนี้จะมีลักษณะเป็นฉนวนทางไฟฟ้าหรือมีค่าความเป็นตัวนำทางไฟฟ้าต่ำ

ระบบ ECT เดิมถูกพัฒนาในรูปแบบของโมเดลที่เป็นภาคตัดขวางแบบวงกลม แต่เนื่องจากต้องการตรวจสอบวัตถุเช่น Industrial boilers หรือ Circulating fluidised beds ในอุตสาหกรรมเฉพาะด้านที่ต้องใช้โมเดลที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม จึงมีผู้เสนอระบบ ECT ด้วยโมเดลที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม[7] ข้อดีประการหนึ่งคือสามารถใช้วิธีผลต่างจำกัด ในการคำนวณหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า ทำให้ลดความยุ่งยากและเวลาที่ใช้ในการคำนวณลงได้มาก สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและทดลองใช้โมเดลแบบวงกลม โดยจำลองการสร้างภาพตัดขวางโดยกำหนดรูปแบบการกระจายตัวของค่าพหุมิติวิถีที่แตกต่างกันและคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของระบบทั้งหมด จากนั้นใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชันตามหลักการของ Projected landweber iteration นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิธี Thresholding ในการลดส่วนของ Grey level ระดับต่ำ ๆ ลง ทำให้ภาพที่ได้ใกล้เคียงกับภาพจำลองมากขึ้น โดยในการทดลองจริงจะทำการทดลองสร้างภาพตัดขวางจากข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริงโดยใช้ระบบเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในบทต่อไป สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของระบบ ECT [1]จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับส่วนที่จะวัด (Primary sensor) ซึ่งประกอบไปด้วย อิเล็กโทรดและส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า Earth screen อิเล็กโทรดของระบบ ECT โดยส่วนใหญ่จะถูกติดตั้งอยู่นอกของส่วนที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และเปลี่ยนค่าเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล และส่วนเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สาม คือ ส่วนที่ใช้ในการสร้างภาพกลับที่สัมพันธ์กับค่าที่วัดได้ โดยทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Image reconstruction computer) โดยระบบทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงระบบพื้นฐานของ ECT



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ [6]

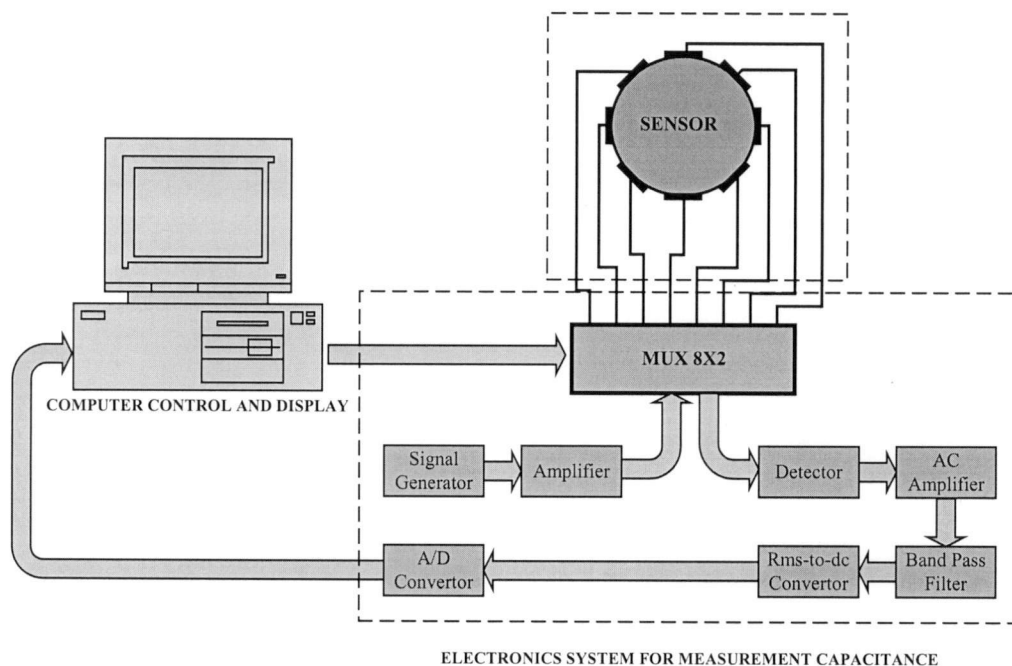
บทที่ 3

ระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ (Data Collection System For Electrical Capacitance Tomography)

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าขนาด 8 อิเล็กโทรด (8 Electrode Data Collection System) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าความจุไฟฟ้าจำนวน 28 ค่า พร้อมทั้งจะนำไปคำนวณโดยอัลกอริทึม ในการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าต่อไป สำหรับรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 โครงสร้างของระบบเก็บข้อมูลแบบ 8 อิเล็กโทรด

ระบบเก็บข้อมูลเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้ง 8 อิเล็กโทรดตลอดจนบันทึกค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เก็บลงไฟล์โดยระบบเก็บข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

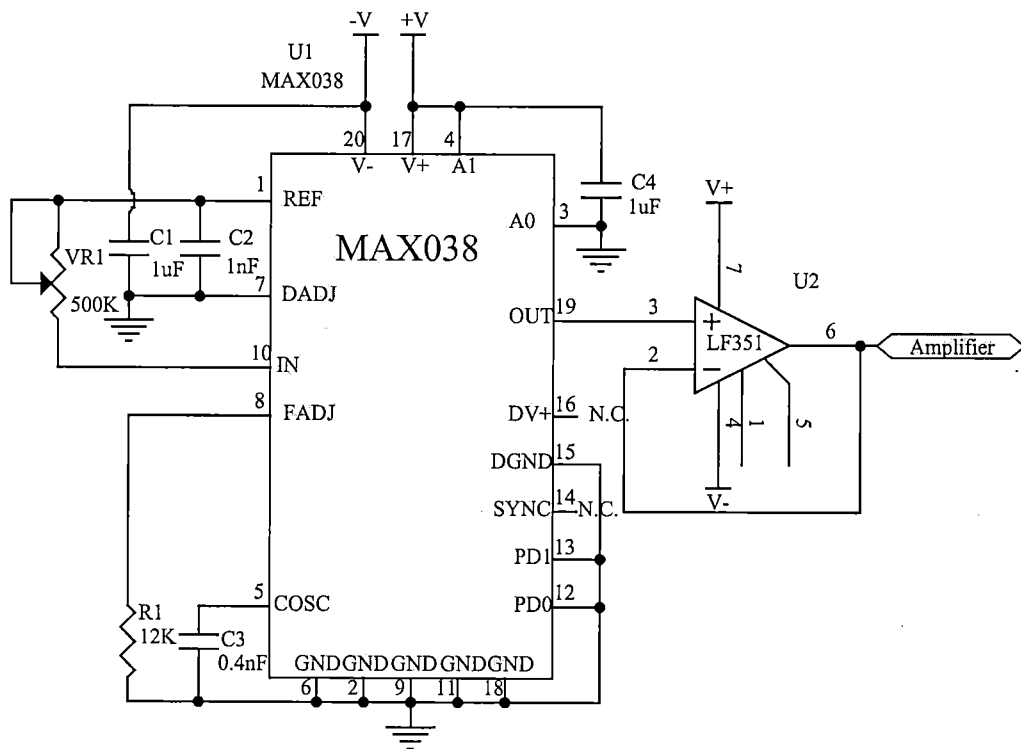


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเก็บข้อมูลแบบ 8 อิเล็กโทรด

สำหรับรายละเอียดของวงจรต่างๆ ที่ออกแบบขึ้นมีดังนี้

3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต

วงจรนี้เป็นวงจรสร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ตที่แรงดันเอาต์พุต 2 โวลต์ พีค-ทู-พีค (V_{p-p}) เพื่อป้อนให้กับวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit) โดยลักษณะของวงจรสร้างสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ 500 กิโลเฮิร์ต

จากวงจรในรูป 3.2 จะใช้ไอซี MAX 308 ในการกำเนิดความถี่ ไอซี MAX 038 เป็นไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Waveform Generator) โดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในรูปแบบสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth Wave) สัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) และการกำหนดชนิดของสัญญาณสามารถกำหนดได้โดยขา A0 (ขา 13) และ ขา A1 (ขา 14) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของ ไอซี MAX 038

A0	A1	ชนิดของสัญญาณ
x	1	สัญญาณไซน์
0	0	สัญญาณสี่เหลี่ยม
1	0	สัญญาณสามเหลี่ยม

ไอซี MAX 038 สามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 0.1 เฮิร์ต ถึง 20 เมกกะเฮิร์ต สำหรับในวงจรดังรูปที่ 3.2 ค่าความถี่ของวงจรควบคุมโดย VR₁ และ C₃ โดยความถี่ของเอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.1)

$$F_o = V_{in} / [R_{in} \times C_F] \quad (3.1)$$

จากวงจรดังรูปที่ 3.2 $C_F = C_3$, $V_{in} = 5 \text{ V}$, $R_{in} = VR_1$ ต้องการความถี่เอาต์พุตสูงสุด 1 เมกกะเฮิร์ต \therefore จากสมการที่ (3.1) จะได้

$$1 \times 10^6 = 5 / [VR_1 \times C_3] \quad (3.2)$$

$$VR_1 \times C_3 = 5 / 1 \times 10^6 = 5 \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

แต่เนื่องจากค่าตัวชี้ท (Datasheet) กำหนด VR₁ ควรอยู่ในช่วง 12.5 K Ω -500K Ω \therefore ที่ความถี่สูงสุดจะต้องปรับ VR₁ ต่ำสุดมาอยู่ที่ 12.5 K Ω \therefore หาค่า C₃ ได้ดังสมการ (3.4)

$$C_3 = 5 \times 10^{-6} / 12.5 \times 10^{-3} = 0.4 \times 10^{-9} = 0.4 \text{ nF} \quad (3.4)$$

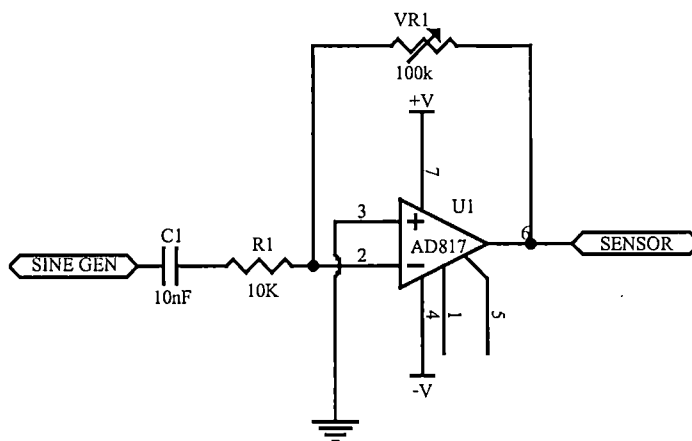
เลือก VR₁ = 500 K Ω \therefore ความถี่เอาต์พุตของวงจรเมื่อปรับค่า VR₁ สูงสุด 500 K Ω ได้ดังนี้

$$F_o = 5 / (500 \times 10^3 \times 0.4 \times 10^{-9}) = 25000 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

\therefore วงจรในรูปที่ 3.2 สามารถผลิตความถี่ 25 กิโลเฮิร์ต ถึง 1 เมกกะเฮิร์ต โดยในการใช้งานจริงเราจะทำการปรับ VR₁ ให้ความถี่เอาต์พุตประมาณ 500 กิโลเฮิร์ต

3.3 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)

วงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยลักษณะของวงจรถ่ายสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

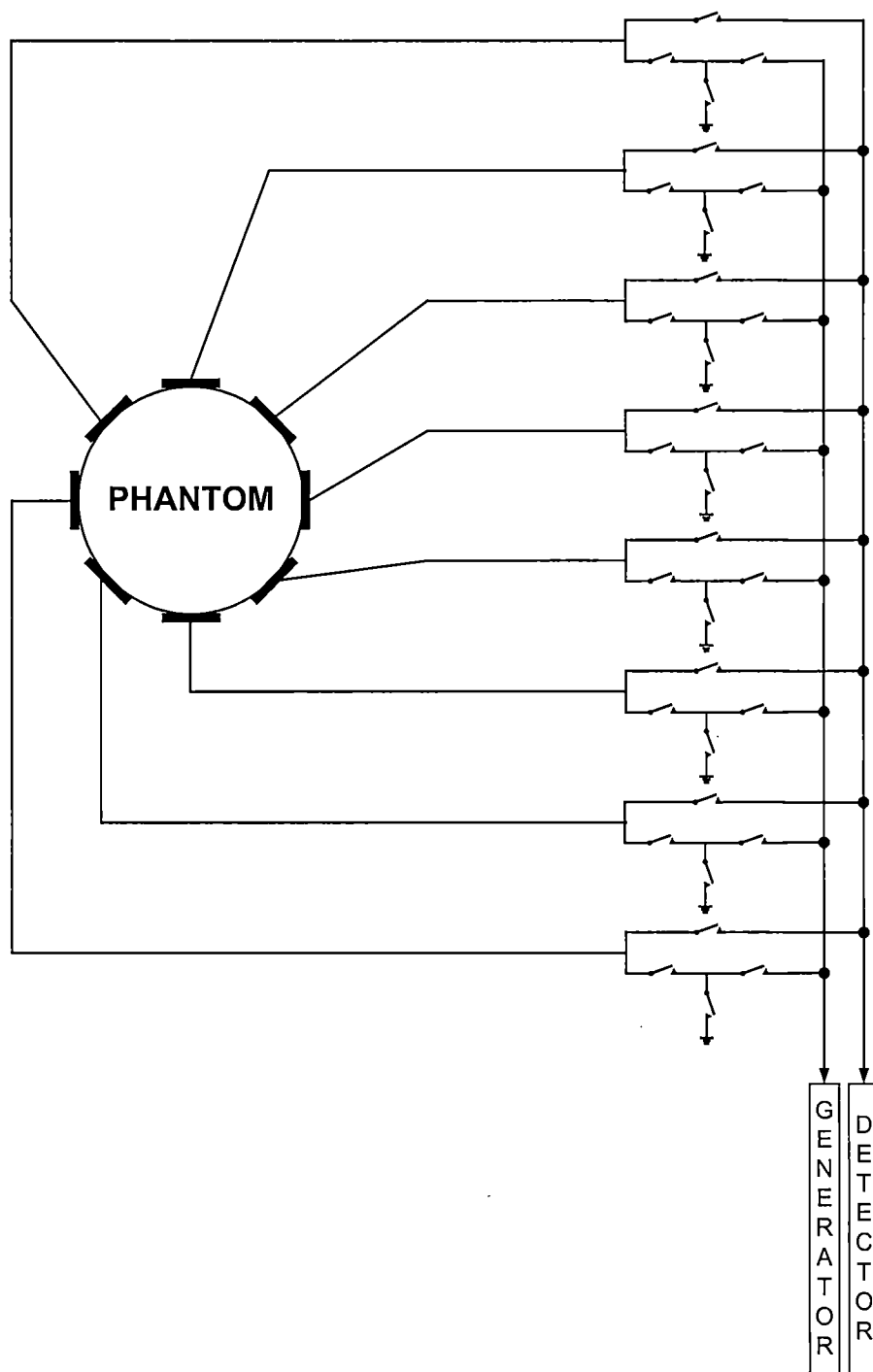


รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.3 IC AD817 ซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์ โดยมี R_1 และ VR_1 เป็นตัวกำหนดเกณฑ์การขยายของวงจร โดยจากวงจรรูปที่ 3.3 จะปรับอัตราขยายให้เท่ากับ ≈ 6 เท่า เพื่อให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตของวงจรเท่ากับ 12 โวลต์ พิก-ทู-พิก (V_{p-p}) เพื่อป้อนให้กับเซนเซอร์ที่เราต้องการวัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งจะผ่านการจัดรูปแบบในการวัดโดยวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

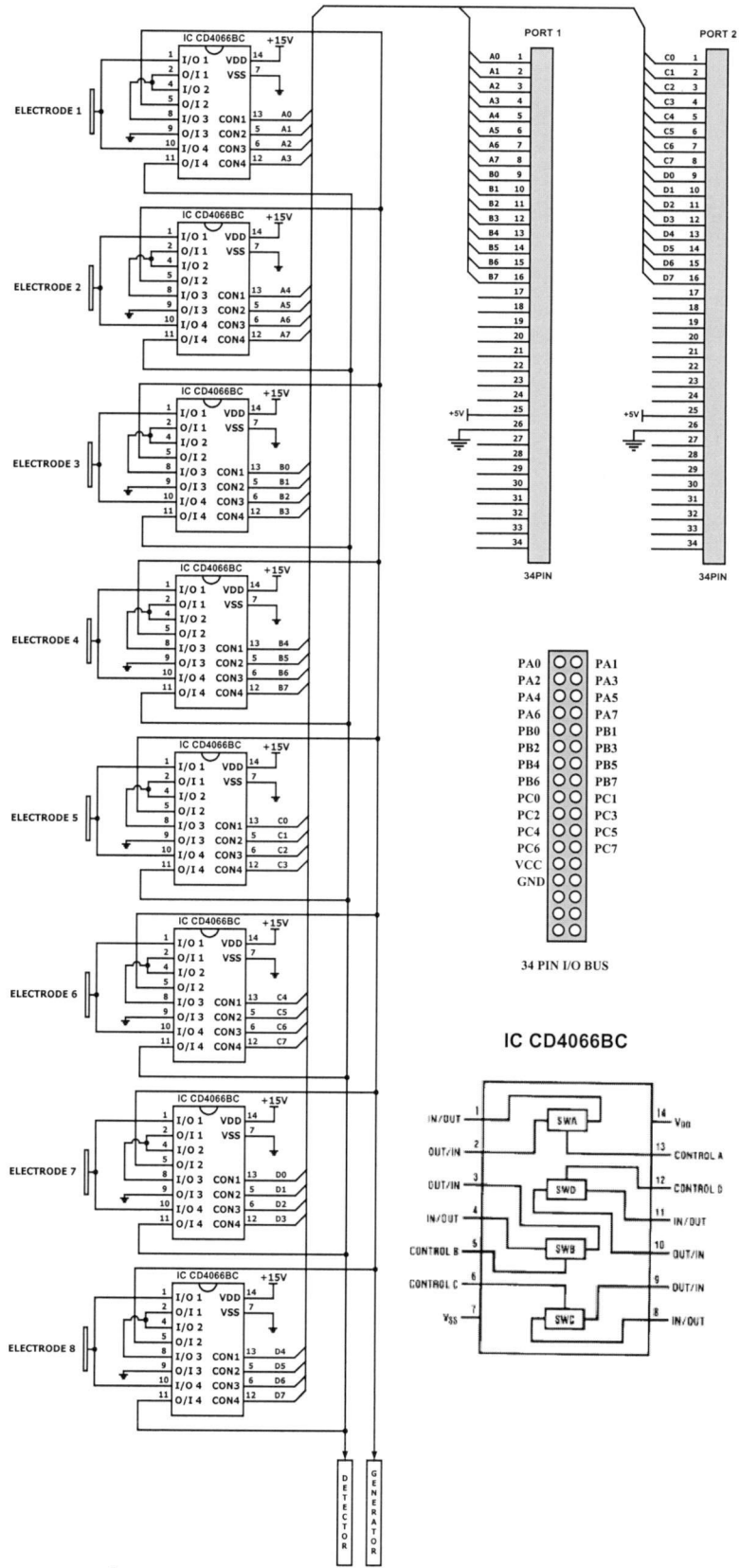
3.4 วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณขนาด 8X2 แชนแนล (8X2 Channel Multiplexer Circuit)

วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณขนาด 8X2 แชนแนล จะทำหน้าที่จัดรูปแบบการวัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรูดต่างๆของเซนเซอร์ให้กับวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งนี้เพื่อใช้วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าเพียงวงจรเดียวในการวัดค่าความจุไฟฟ้าในแต่ละคู่อิเล็กโทรูด โดยลักษณะของวงจรมัลติเพล็กซ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



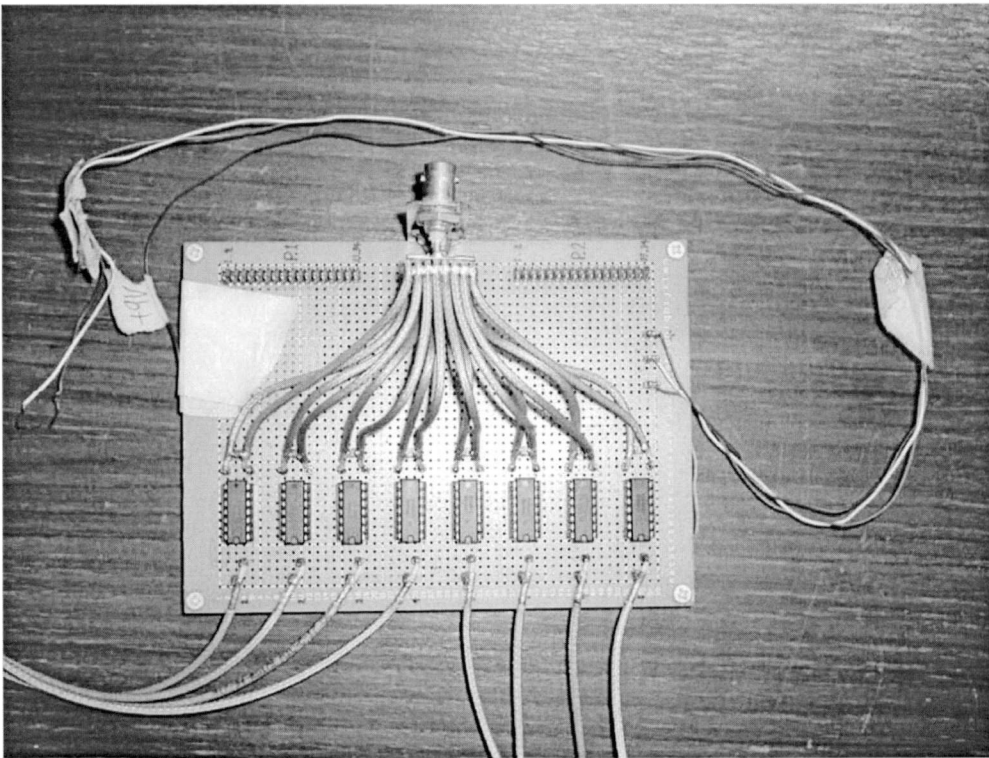
รูปที่ 3.4 ลักษณะของการต่อวงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชนแนลเข้ากับเซนเซอร์

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.5 ลักษณะของวงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชนแนล

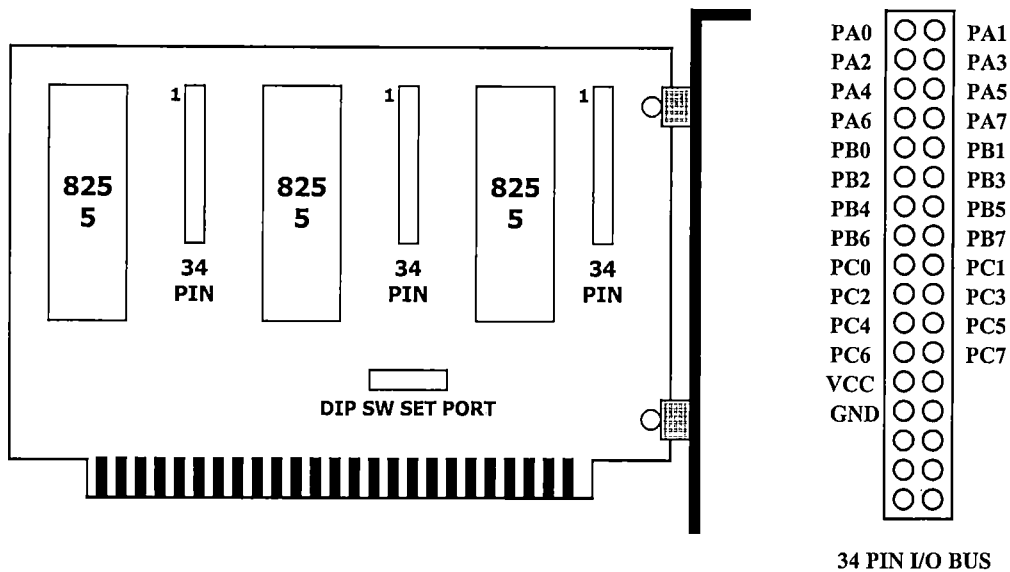
จากวงจรในรูปที่ 3.5 วงจรมัลติเพล็กซ์ที่สร้างขึ้นจะใช้ไอซีแอนาล็อกสวิตช์ เบอร์ CD 4066BC ต่อเป็นวงมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชนแนล สำหรับการควบคุมการตัดต่อของสวิตช์จะใช้สัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซ โดยรายละเอียดของการ์ดอินเตอร์เฟซจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อต่อไป สำหรับวงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชนแนล ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 8X2 แชนแนลที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง

3.5 การ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface Card)

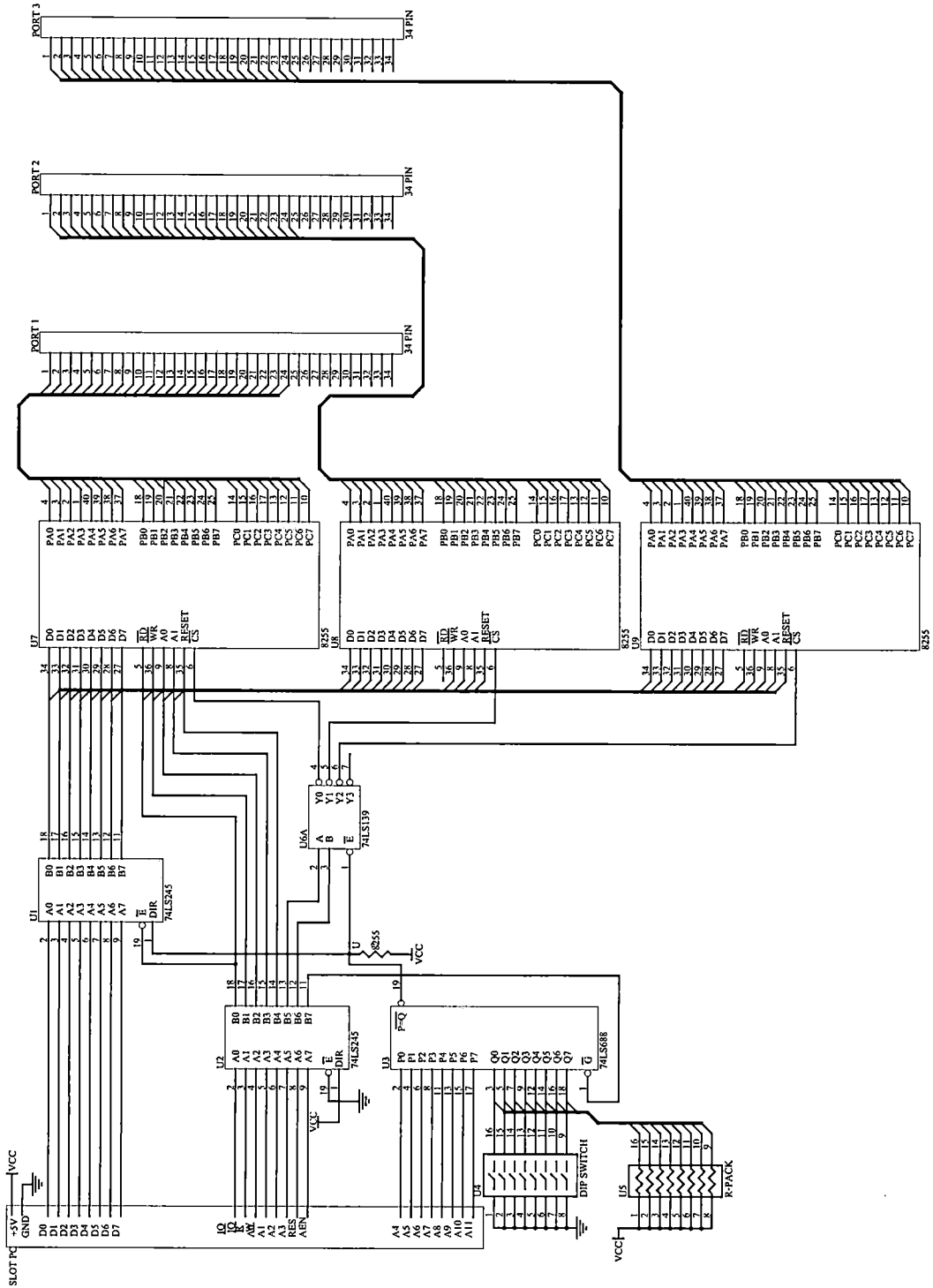
การ์ดอินเตอร์เฟซทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการ์ดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ตเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเตอร์เฟซนี้จะมีพอร์ตให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ต หรือ 72 บิต (1 พอร์ตมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.7 ลักษณะของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของการ์ดอินเทอร์เฟซรุ่น ET – 8255

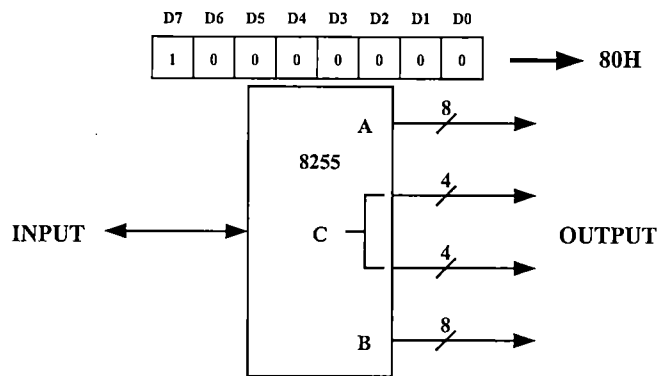
คุณสมบัติของของบอร์ด ET-8255	
INPUT LOGIC LOW	MIN = -0.5 VOLTS , MAX = 0.8 VOLTS
INPUT LOGIC HIGH	MIN = 2.0 VOLTS , MAX = 5 VOLTS
OUTPUT LOW VOLTAGE PORTS (I-SINK = 1.7 mA)	0.45 VOLTS
OUTPUT HIGH VOLTAGE PORTS (I-SOURCE = 200 uA)	2.4 VOLTS
POWER CONSUMPTION	300 mA
SIZE	HALF SLOT (13 X 11 CM).
PORT	3 (8255 I/O PORT 3 X 8 BIT)
CONNECTOR	3 (34 PIN)
DECODE PORT	8 POSITION DIP SW.



รูปที่ 3.8 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

สำหรับรูปที่ 3.8 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ต และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ต คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และดิพสวิทช์

ในส่วนในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ตโดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 เราจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ตทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ตหรือเอาต์พุตพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุตพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด(Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

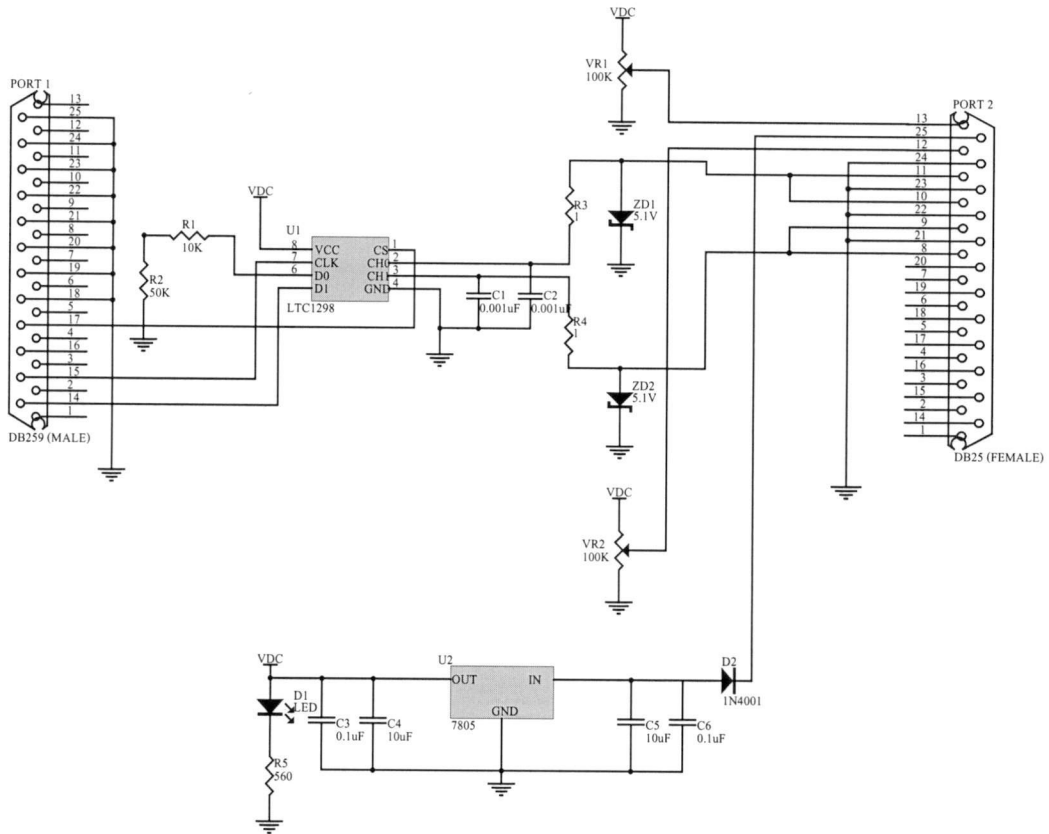
ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรสสามารถแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 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
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3

3.6 วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A TO D Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะใช้บอร์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นบอร์ดแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจรดังรูปที่ 3.10 และตารางที่ 3.4



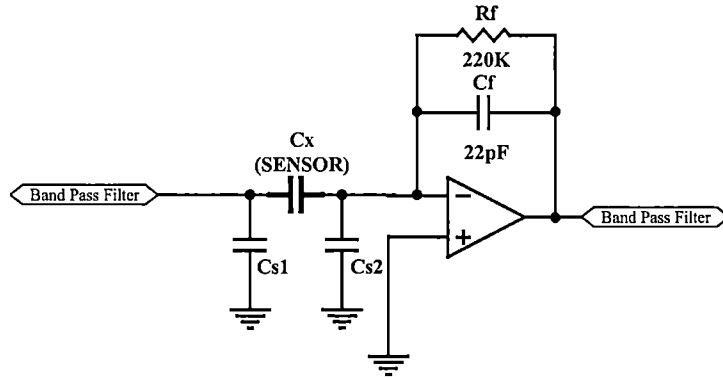
รูปที่ 3.10 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

คุณสมบัติของของบอร์ด 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

3.7 วงจรตรวจจับสัญญาณ (Detector Circuit)

วงจรตรวจจับสัญญาณทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณที่ผ่านเซนเซอร์โดยลักษณะของวงจรตรวจจับสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรตรวจจับสัญญาณ

จากวงจรในรูปที่ 3.11 เราสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้จากสมการที่ 3.6

$$V_o = -\frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} * V_i \quad (3.6)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

V_i คือ แรงดันที่ป้อนให้กับเซนเซอร์ (โวลต์)

V_o คือ แรงดันเอาต์พุต (โวลต์)

R_f คือ ค่าความต้านทานป้อนกลับ (Feedback Resistor) (โอห์ม)

C_f คือ ค่าคาร์ปาซิแตนที่ใช้ในการป้อนกลับ (Feedback Capacitor) (ฟาร์ัด)

C_x คือ ค่าคาร์ปาซิแตนซ์ของเซนเซอร์ (ฟาร์ัด)

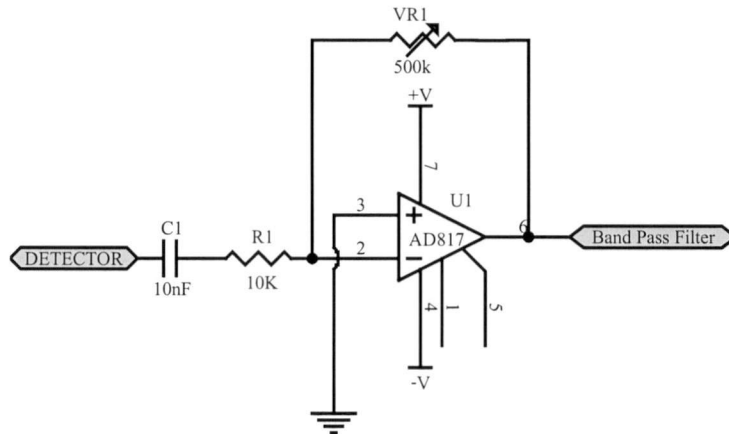
จากสมการที่ (6) ถ้า $1/\omega C_f \ll R_f$ เราสามารถหา V_o ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$V_o = -\frac{C_x}{C_f} V_i \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) แรงดันเอาต์พุตของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าของ C_x และ C_f เอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณจะถูกนำไปขยายโดยวงจรขยายสัญญาณต่อไป

3.8 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)

วงจขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรตรวจจับสัญญาณ โดยลักษณะของวงจขยายสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12

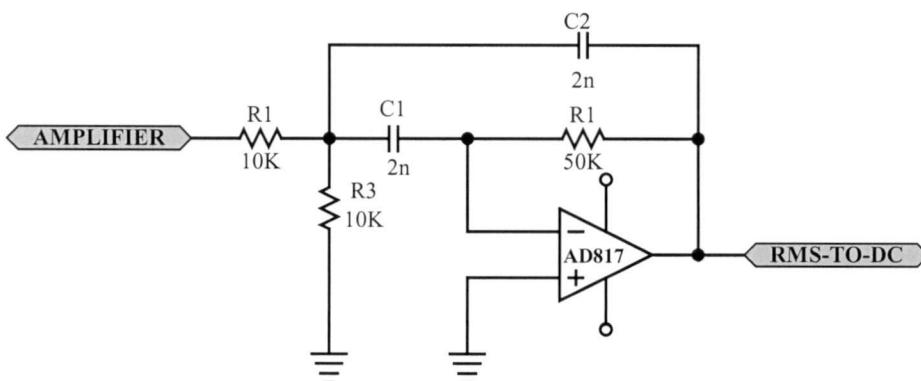


รูปที่ 3.12 วงจขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.12 IC AD817 ซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์ โดยมี R_1 และ VR_1 เป็นตัวกำหนดเกณฑ์การขยายของวงจร โดยจากรูปที่ 3.12 จะปรับอัตราขยายให้เท่ากับ ≈ 50 เท่า เพื่อขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณก่อนที่จะป้อนให้กับวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Band Pass Filter) ต่อไป

3.9 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Band Pass Filter Circuit)

สำหรับวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า นั้นจะตั้งความถี่ไว้ที่ประมาณ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน โดยลักษณะของวงจรจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.13

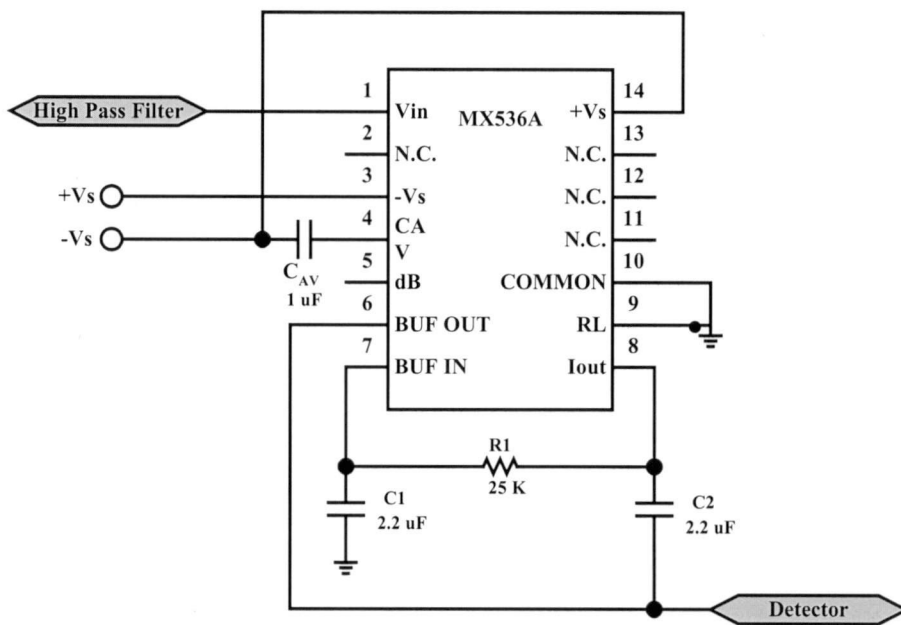


รูปที่ 3.13 วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 500 กิโลเฮิร์ตซ์

เอาต์พุตจากวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์จะถูกส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีต่อไป

3.10 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี (RMS-TO-DC Circuit)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีชนิดที่ 1 ในระบบนี้จะใช้ไอซีสำเร็จรูปของบริษัท MAXIM เบอร์ MX536A ซึ่งรองรับแรงดันอินพุตได้ในช่วง 0 – 7 โวลท์อาร์เอ็มเอส (V_{RMS}) สำหรับลักษณะของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีโดย MX536A จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.14



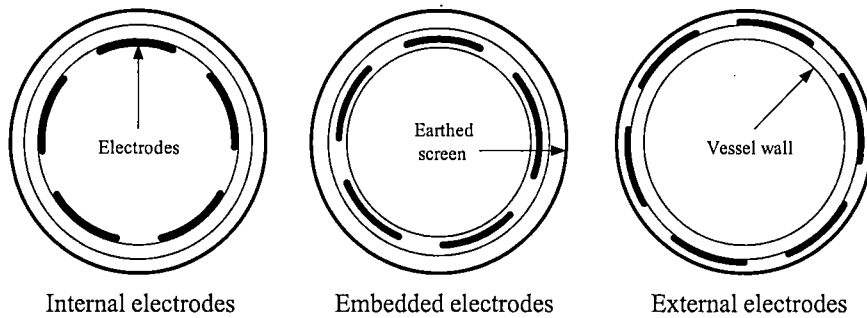
รูปที่ 3.14 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี

เอาท์พุทจากวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีจะถูกส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัดต่อไป

3.11 อิเล็กโทรด (Electrodes)

ลักษณะการติดอิเล็กโทรด [8, 9] ลงในส่วนที่จะวัด ตัวอย่างเช่น ท่อ ของระบบ ECT สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

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

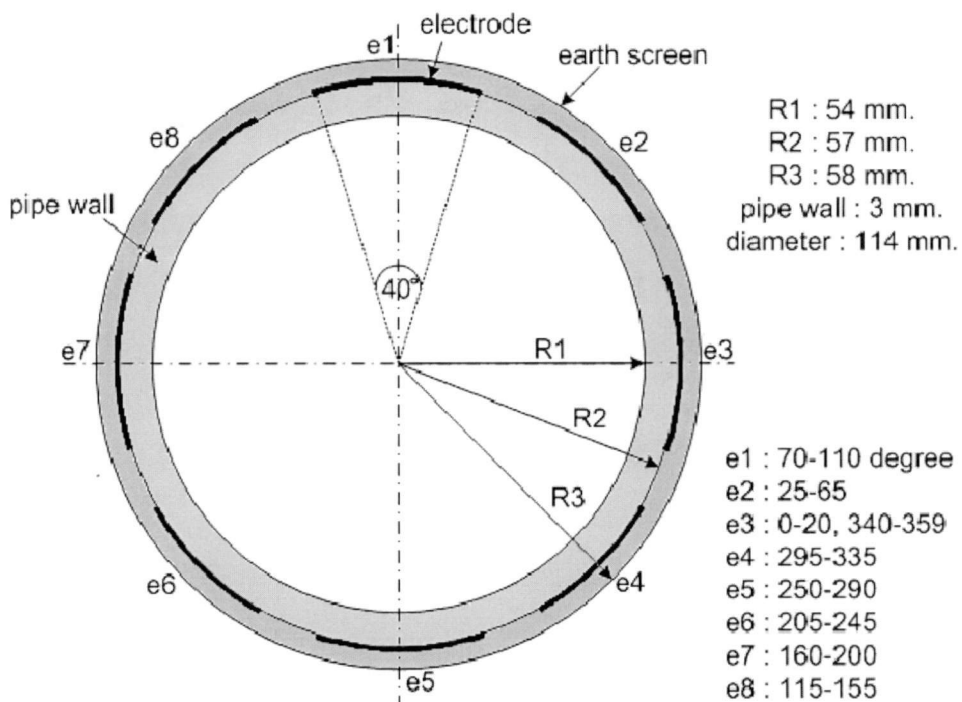


รูปที่ 3.15 ลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดลงในส่วนที่จะวัด

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อดีและข้อเสียของการติดตั้งอิเล็กโทรดแต่ละแบบ

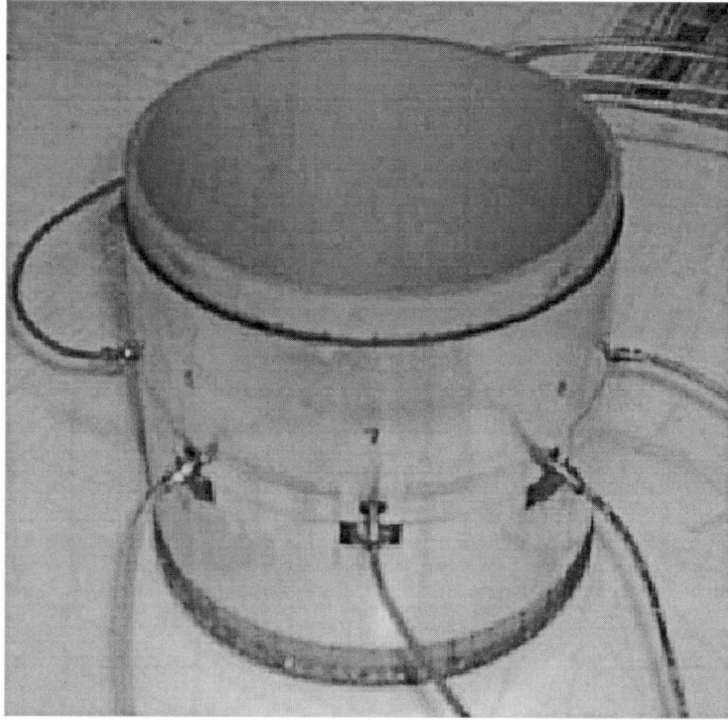
แบบที่	ข้อดี	ข้อเสีย
1	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ทำท่อไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าสูง - วัสดุที่ใช้ทำท่อสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้า 	<ul style="list-style-type: none"> - อิเล็กโทรดอาจถูกกัดกร่อน - ระบายการไหลของระบบ - ยากต่อการสร้าง
2	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ระบายการไหลของระบบ - อิเล็กโทรดมีความแข็งแรง - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย) 	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ทำท่อไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า - ยากต่อการสร้าง
3	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ระบายการไหลของระบบ - ง่ายต่อการสร้าง - ราคาถูก - อิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับวัตถุ (วัตถุไม่เสียหาย) 	<ul style="list-style-type: none"> - ระบบมีความไวต่อค่าความจุไฟฟ้าต่ำ - วัสดุที่ใช้ทำท่อไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า - วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

สำหรับในโครงการวิจัยนี้จะใช้เซ็นเซอร์แบบวงกลมโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละอิเล็กโทรดจะทำมุมกับจุดศูนย์กลางเท่ากับ 40 องศา และวางติดอยู่กับส่วนนอกของกรอบด้านใน (pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 3 มม. โดยมีตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 3 ขนาดของรัศมี R1 เท่ากับ 54 มม. ขนาดของ R2 เท่ากับ 57 มม. และขนาดของ R3 เท่ากับ 58 มม. กรอบด้านนอก (earth screen) ทำจากทองแดงล้อมรอบเซ็นเซอร์ ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบตามเข็มนาฬิกา

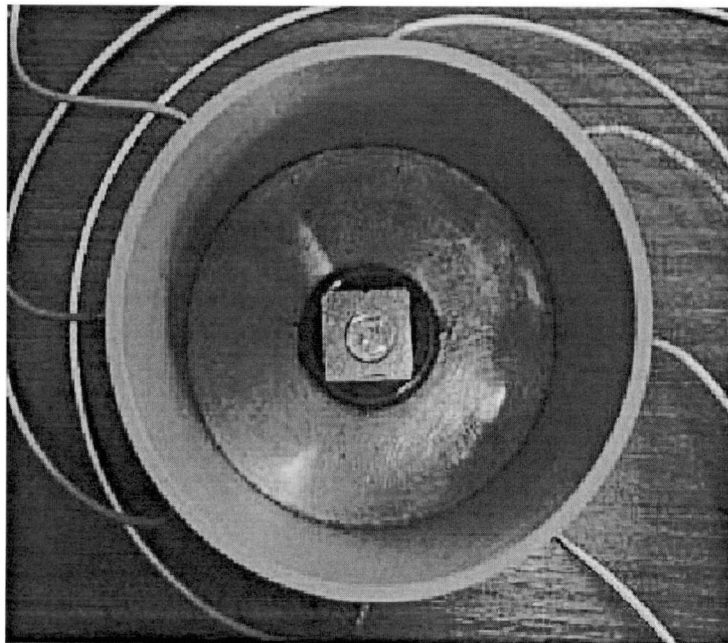


รูปที่ 3.16 รูปเซ็นเซอร์แบบวงกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด

กรอบด้านในจะทำมาจากวัสดุ PVC (polyvinyl chloride) โดยมีค่าพอมิตติวิตีเท่ากับ 2.7 และในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอกจะถูกบรรจุด้วยอิฟ็อกซีเรซิน ซึ่งมีค่าพอมิตติวิตีเท่ากับ 3.7 สำหรับลักษณะเซ็นเซอร์ขนาด 8 อิเล็กโทรดที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ลักษณะเซนเซอร์ขนาด 8 อิลีกโทรด (ด้านข้าง) ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.18 ลักษณะเซนเซอร์ขนาด 8 อิลีกโทรด (ด้านบน) ที่สร้างขึ้น

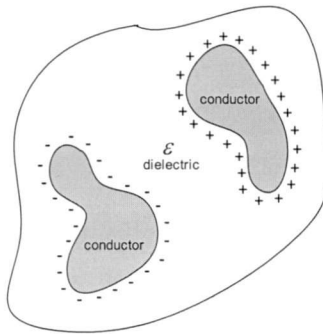
บทที่ 4

การจำลองค่าความจุไฟฟ้า

(Capacitance Simulation)

4.1 ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)

ตัวนำสองตัวนำใดๆ เมื่อถูกแยกหรือถูกคั่นด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1 จะมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำนั้น เมื่อป้อนค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองจะเกิดประจุบวกขึ้นที่ตัวนำหนึ่ง และจะเกิดประจุลบขึ้นที่ตัวนำอีกตัวหนึ่ง ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสัมบูรณ์ของประจุไฟฟ้าและค่าสัมบูรณ์ของค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนนั้น [10, 11] แสดงได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 รูปแสดงตัวนำสองตัวใดๆ เมื่อวางอยู่ในวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

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

โดย C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (farad ; F), Q คือ ค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดในงานวิจัยนี้ และ V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าประจุไฟฟ้าและค่าศักดาไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ จะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของปริมาณทั้งสองจึงมีค่าคงที่ แต่ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวนำและค่าเพอมีตริวิตีของวัสดุที่เป็นตัวกลาง

ค่าเพอมีตริวิตี (ϵ) แสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

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

โดย ϵ_0 คือ ค่าเพอมีตติวิตีของอวกาศอิสระ (Permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m และ ϵ_r คือ ค่าเพอมีตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric constant) โดยไม่มีหน่วย

4.2 วิธีการจำลองค่าความจุไฟฟ้า

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการกระจายตัวของสารองค์ประกอบของวัตถุนั้น ข้อมูลค่าความจุไฟฟ้านี้สามารถได้มาโดยการสร้างเครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้าจริง หรือการจำลองค่าความจุไฟฟ้าโดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการจำลองค่าความจุไฟฟ้าและ ข้อมูลจริงที่ได้จากระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นมาทำการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับการจำลองค่าความจุไฟฟ้าในงานวิจัยนี้คือ การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซ็นเซอร์และรูปแบบการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีที่ถูกกำหนดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ขั้นตอนการจำลองค่าความจุไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนคือ

1. ออกแบบโมเดลของระบบ ECT
2. กำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตติวิตี
3. คำนวณค่าความจุไฟฟ้า

ในขั้นตอนที่ 1 นั้นได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดรูปแบบการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีซึ่งใช้ในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าสำหรับเป็นภาพทดสอบซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทของการทดลอง ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนที่ 3 โดยขั้นตอนเหล่านี้จะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของโมเดล

ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (4.1) โดยการคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรดตัวรับ [5] แต่เนื่องจากโดยทั่วไปเราไม่สามารถทราบค่าการกระจายของประจุไฟฟ้านั้นล่วงหน้าได้ และข้อมูลเบื้องต้นที่มีอยู่คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรดซึ่งจะเท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน และค่าเพอมีตติวิตีซึ่งจะถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าสามารถหาได้จากค่าความเข้มสนามไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ

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

โดย D คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สนามไฟฟ้า (Electric flux density), E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) และ S คือ พื้นผิวของเกาส์ (Gaussian Surface) สมการที่ (4.3) คือสูตรคณิตศาสตร์ของเกาส์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยการอิน

ทีเกรทบนพื้นผิวปิดล้อมรอบอิเล็กโทรด์ที่ซึ่งมีสนามไฟฟ้าผ่านพื้นผิวเล็กๆ (dS) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าหาได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้คือ

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

โดย ∇ คือ ตัวปฏิบัติการเวกเตอร์ และ ϕ คือ ค่าศักดาไฟฟ้า สมการที่ (4.4) เรียกว่า เกรเดียนต์ (Gradient) ของฟังก์ชันศักดาไฟฟ้า นั่นคือถ้าสามารถคำนวณหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าได้ ก็ สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้เช่นกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจึงมีขั้นตอนดังนี้ คือ คำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายในวัตถุ จากนั้นคำนวณค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรด์ตัวรับ โดยใช้กฎของเกาส์ และคำนวณค่าความจุไฟฟ้าด้วยสมการที่ (4.1)

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

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

โดย $\epsilon_r(x, y)$ คือ ค่าเพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุในแบบ 2 มิติ และ $\phi(x, y)$ คือ ค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าแบบ 2 มิติ สมการที่ (4.5) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองแบบเอลลิปติก (elliptic) ซึ่งใช้ในการหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า แต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของโมเดลและอิเล็กโทรด์ทำให้การคำนวณหาผลเฉลยของสมการที่ (4.5) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ (Analytical method) นั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการคำนวณเชิงเลข (Numerical method) เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับโมเดลของเซ็นเซอร์แบบวงกลม เนื่องจากรูปร่างของตัวรอบและอิเล็กโทรด์มีความซับซ้อนมากกว่า และการคำนวณนั้นจะถูกคำนวณในแบบ 2 มิติ

ในหัวข้อถัดไปเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า ค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรด์และค่าความจุไฟฟ้า

4.3 การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลม

ขั้นตอนการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของโมเดลแบบวงกลมนั้น เริ่มจากการคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายในเซ็นเซอร์ จากนั้นคือการคำนวณค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดตัวรับ และใช้สมการที่ (4.1) คำนวณค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดโดยวิธีการคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า ซึ่งจะใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เนื่องจากรูปร่างของโมเดล รวมถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าพหุคูณมิติของตัวกลางมีความซับซ้อนมากกว่าโมเดลแบบอื่น ดังนั้นวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จึงถูกใช้ในการประมาณค่าของผลเฉลยหรือประมาณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า ซึ่งให้ความถูกต้องและแม่นยำของผลเฉลยมากกว่า

4.3.1 การคำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

หลังจากกำหนดค่าการกระจายของค่าพหุคูณมิติของตัวกลาง ด้วยวิธีเดียวกันกับโมเดลแบบสี่เหลี่ยมแล้ว จะเกิดเป็นเงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกัน แต่หลักการ การหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นั้นจะแตกต่างกัน

หลักการของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ [12,13, 14] คือ การแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งมีลักษณะและขนาดต่างๆกัน และผลเฉลยของแต่ละอิลิเมนต์จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆ โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาอิลิเมนต์ที่ละอิลิเมนต์ ทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่สร้างขึ้นนั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงในระบบสมการรวม จากนั้นจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหาที่ต้องการนั้น

สมการไฟไนต์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ สามารถสร้างได้โดยวิธีการแปรผัน (Variational method) โดยหลักการของวิธีการแปรผันคือ ถ้าสามารถสร้างฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับปัญหาที่ต้องการแก้ได้ แล้วทำการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของฟังก์ชันนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับแก้สมการเชิงอนุพันธ์พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมของปัญหานั้น ฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการลาปลาซซึ่งเกี่ยวข้องกับปัญหาทางสนามไฟฟ้าคือ สมการพลังงานไฟฟ้า (The electric energy) แสดงได้โดย

$$W = \frac{1}{2} \int E \cdot D dS \quad (4.6)$$

4.3.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

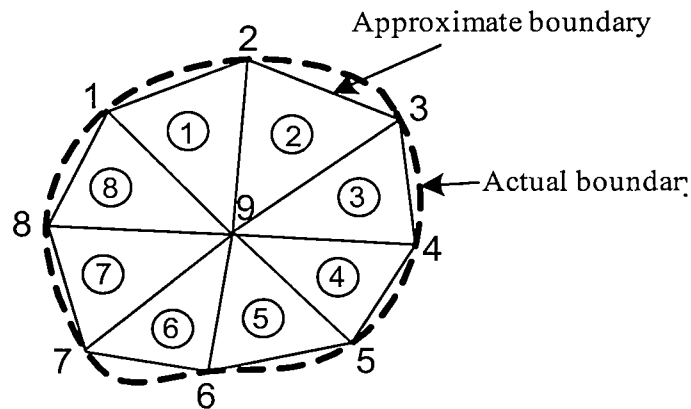
ขั้นตอนวิธีการคำนวณและสมการของไฟไนต์อิลิเมนต์บนพื้นฐานของวิธีการแปรผัน อธิบายได้ดังนี้

- แบ่งขอบเขตเนื้อที่ของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ เช่นรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.2 โดยที่ตัวเลขที่อยู่จุดต่อหรือ โหนดจะถูกเรียกว่า global node และตัวเลขที่อยู่ภายในอิลิเมนต์สามเหลี่ยมจะแสดงถึงลำดับของอิลิเมนต์

ฟังก์ชันการประมาณสำหรับค่าศักดาไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์คือ

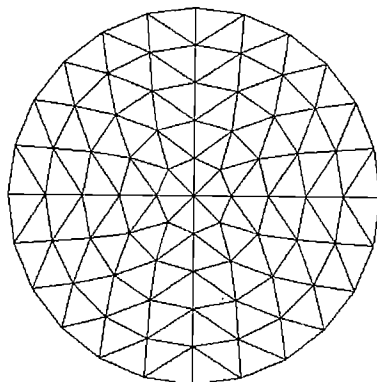
$$\phi_e(x, y) = a + bx + cy \quad (4.7)$$

โดย e คือ อิลิเมนต์ และ a, b และ c คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ สมการที่ (4.7) จะเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของศักดาไฟฟ้า (Linear variation of potential) ภายในอิลิเมนต์



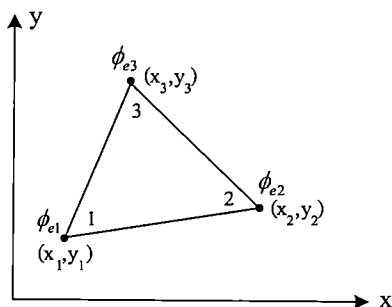
รูปที่ 4.2 รูปการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมย่อยๆ

จากรูปร่างของโมเดลแบบวงกลมที่แสดงในรูปที่ 3.16 สามารถแบ่งพื้นที่หน้าตัดของระบบวัดให้เป็นอิลิเมนต์ย่อยๆรูปสามเหลี่ยมโดยมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 และแทนแต่ละจุดของสามเหลี่ยมด้วยโหนดของศักดาไฟฟ้า คือ ϕ_1, ϕ_2 ถึง ϕ_n โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมออกเป็นจำนวน 2108 อิลิเมนต์ ซึ่งจะได้จำนวนโหนด (n) ทั้งหมด 1101 โหนด



รูปที่ 4.3 รูปแสดงการแบ่งตัวเซ้นเซอร์ออกเป็นอิเลเมนต์ย่อยๆรูปสามเหลี่ยม

- สร้างสมการไฟไนต์อิเลเมนต์สำหรับแต่ละอิเลเมนต์ พิจารณาอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยตัวเลขที่อยู่ภายในอิเลเมนต์จะถูกเรียกว่า local node และมีการเรียงในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.4 อิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมแบบสองมิติ

ค่าศักดาไฟฟ้า ϕ_{e1} , ϕ_{e2} และ ϕ_{e3} ที่โหนด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (4.7) นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} \phi_{e1} \\ \phi_{e2} \\ \phi_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

โดยสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ a , b และ c หาได้โดย

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{e1} \\ \phi_{e2} \\ \phi_{e3} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

แทน (4.9) ลงใน (4.7) จะได้

$$\phi_e = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{e1} \\ \phi_{e2} \\ \phi_{e3} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

หรือจัดเรียงสมการใหม่จะได้

$$\phi_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) \phi_{ei} \quad (4.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{aligned} \quad (4.12)$$

α_i ถูกเรียกว่า element shape functions และ A คือ พื้นที่ของอีลิเมนต์ หาได้โดย

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (4.13)$$

หลังจากได้ฟังก์ชันการประมาณสำหรับค่าศักดาไฟฟ้าภายในอีลิเมนต์แล้ว ฟังก์ชันที่จะถูกทำการหาค่าต่ำสุดตามหลักการของวิธีการแปรผันเพื่อสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์คือ สมการพลังงานไฟฟ้า นั่นคือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int_A \varepsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int_A \varepsilon |\nabla \phi_e|^2 dS \quad (4.14)$$

และจากสมการที่ (4.11) ดังนั้น

$$\nabla \phi_e = \sum_{i=1}^3 \phi_{ei} \nabla \alpha_i \quad (4.15)$$

แทน (4.15) ลงใน (4.14) จะได้

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon \phi_{ei} \left[\int_A \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] \phi_{ej} \quad (4.16)$$

โดยกำหนดให้

$$C_{ij}^{(e)} = \int_A \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.16) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [\phi_e]^T [C^{(e)}] [\phi_e] \quad (4.18)$$

เมื่อ T คือ การสลับเปลี่ยนของเมตริกซ์ (The transpose of the matrix) และ

$$[\phi_e] = \begin{bmatrix} \phi_{e1} \\ \phi_{e2} \\ \phi_{e3} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ $C^{(e)}$ ถูกเรียกว่า เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์ (element coefficient matrix) โดยสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์หาได้ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned}
C_{12}^{(e)} &= \int_A \nabla \alpha_1 \cdot \nabla \alpha_2 dS \\
&= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int_A dS \\
&= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)]
\end{aligned} \tag{4.20}$$

และสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ตัวอื่นๆจะหาได้ในทำนองเดียวกัน

- ทำการรวมสมการของทุกๆอิเลิเมนต์เข้าด้วยกัน จะได้ระบบสมการรวม

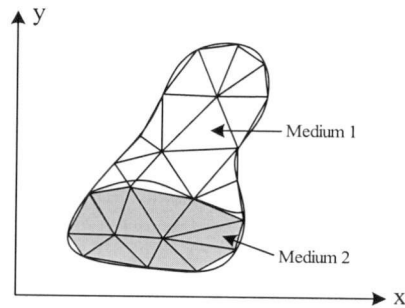
$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [\phi]^T [C] [\phi] \tag{4.21}$$

โดยที่

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \tag{4.22}$$

เมื่อ n คือ จำนวนของโหนด N คือ จำนวนของอิเลิเมนต์ $[\phi]$ คือ เมตริกซ์ของค่าศักดาไฟฟ้าที่โหนดต่างๆ $[C]$ คือ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์รวม (global coefficient matrix) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์ทั้งหมด และจะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์รวมที่มีขนาดเท่ากับ $n \times n$

สำหรับการคำนวณเกี่ยวกับเงื่อนไขขอบเขตแบบเอกพันธ์และแบบไม่เอกพันธ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำหนดค่าพหุคูณของตัวกลางด้วยวิธีไฟไนต์อิเลิเมนต์นั้น ทำได้โดยการคูณสมการที่ (4.17) ด้วยค่า ε_r ของตัวกลางของอิเลิเมนต์นั้นก่อนที่จะทำการรวมเป็นระบบสมการรวม และคูณเมตริกซ์สัมประสิทธิ์รวมในสมการที่ (4.21) ด้วยค่า ε_0 ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการของวิธีไฟไนต์อิเลิเมนต์เป็นการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิเลิเมนต์ย่อยๆ ดังนั้นค่าพหุคูณของตัวกลางที่บริเวณต่างๆ จะถูกกำหนดลงไปให้แก่แต่ละอิเลิเมนต์นั้นๆ และจะเกิดเป็นเพียงเงื่อนไขขอบเขตแบบเอกพันธ์เท่านั้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 บริเวณขอบเขตแบบไม่เอกพันธ์และการกำหนดค่าพหุมิตติวิธีของแต่ละอิเลเมนต์

- หาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันพลังงานไฟฟ้า โดยเทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าที่โหนด แล้วให้เท่ากับศูนย์ แสดงได้โดย

$$\frac{\partial W}{\partial \phi_k} = 0, \text{ for } k = 1, 2, \dots, n \quad (4.23)$$

ซึ่งเขียนในรูปแบบทั่วไปได้คือ

$$\sum_{i=1}^n C_{ki} \phi_i = 0, \text{ for } k = 1, 2, \dots, n \quad (4.23)$$

สมการที่ (4.23)-(4.24) แสดงให้เห็นว่า ผลเฉลยจะสอดคล้องกับสมการลาปลาซเมื่อพลังงานไฟฟ้ารวมในบริเวณขอบเขตของปัญหามีค่าต่ำสุด เมื่อทำการหาค่าของสมการ (4.24) สำหรับทุกโหนดแล้ว จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ และเมื่อแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตของศักดาไฟฟ้าที่ทราบค่าแล้ว จากนั้นแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าของ ϕ ด้วยวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล ก็จะสามารถหาค่าของศักดาไฟฟ้าที่โหนดต่างๆหรือภายในบริเวณขอบเขตของปัญหาได้

4.3.3 การหาค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลม

เมื่อได้ค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายในตัวกลางแล้ว ค่าประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดตัวรับสามารถคำนวณหาได้โดยใช้วิธี Charge method [15] ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$Q_j = \sum_{n_j} (C\phi)_{n_j} \quad (4.25)$$

โดย $(C\phi)_{n_j}$ คือ การคูณกันระหว่างแถวที่ n_j ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์รวม $[C]$ ที่สอดคล้องกับ โหนด j บนอิเล็กทรอนิกส์ตัวรับ ด้วยเมตริกซ์ของค่าศักดาไฟฟ้าที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ หรือ $[\phi]$ ในสมการที่ (4.22) สมการที่ (4.25) แสดงถึง ค่าประจุสุทธิที่อยู่บนอิเล็กทรอนิกส์ตัวรับ จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของคู่อิเล็กทรอนิกส์สามารถหาได้โดยสมการที่ (4.1)

บทที่ 5

การสร้างภาพกลับ

(Image reconstruction)

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างภาพกลับจากค่าความจุไฟฟ้าโดย วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน และวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ Projected landweber iteration รวมถึง ได้อธิบายวิธีการหาค่าเซนซิวิตีของระบบและวิธีการเทรซโฮลด์ด้วยเช่นกัน

5.1 แนวคิดพื้นฐาน

การสร้างภาพกลับของระบบ ECT เป็นการสร้างภาพลักษณะการกระจายของไดอิเล็กตริกจากค่าความจุทางไฟฟ้าทั้งหมด 28 ค่าที่วัดได้จากระบบเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมา (หรือค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองค่าขึ้นมา) ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (จำนวนพิกเซล (pixel) ของภาพ เช่น 1600 พิกเซล) มีจำนวนมากกว่าตัวแปรที่ทราบค่า (ค่าความจุทางไฟฟ้า 28 ค่า) และผลเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามไฟฟ้าเนื่องจากการกระจายตัวของเพอมีตติวิตี ทำให้การคำนวณแบบแม่นยำในการคำนวณย้อนกลับของสมการที่ (4.1) เป็นไปได้อย่างหรือทำไม่ได้เลย ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการประมาณค่าในการสร้างภาพกลับ และวิธีที่ใช้คือ วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน (Linear backprojection : LBP) [4, 5]

การสร้างภาพกลับในงานวิจัยนี้ เซ็นเซอร์จะถูกพิจารณาเป็นพิกเซล (p) โดยลักษณะของพิกเซลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซ็นเซอร์ สำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลม พิกเซลจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการแบ่งเป็นอิลิเมนต์สามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งในส่วนของ การแสดงผลภาพ จะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมดคือ 1436 พิกเซล

หลักการพื้นฐานของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันคือ สมการค่าความจุไฟฟ้าจะถูกแปลง (Transform) ให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ (Matrix equation) ซึ่งเมทริกซ์นี้จะสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า (C) ที่วัดได้หรือที่ได้จากการคำนวณ ที่มีต่อค่าเพอมีตติวิตีของพิกเซล (G) การแปลงนี้แสดงได้โดย

$$C = S.G \quad (5.1)$$

โดย C คือ เมทริกซ์ของค่าความจุไฟฟ้าขนาด $M \times 1$, M เป็นจำนวนคู่ของการวัด G คือ เมทริกซ์ของจำนวนพิกเซลขนาด $N \times 1$ ซึ่งแสดงถึงการกระจายของเพอมีตติวิตีภายในเซ็นเซอร์,

N คือ จำนวนของพิกเซล และ S คือ เมทริกซ์ของการแปลง โดยในระบบ ECT จะถูกเรียกว่า เซนซิติวิตีเมทริกซ์ (Sensitivity matrix) ซึ่งจะมีขนาด $M \times N$ โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโตรดเมื่อค่าพอมิตติวิตีของตัวกลางเปลี่ยนตำแหน่งไป

เมื่อได้เมทริกซ์ของค่าความจุไฟฟ้า C เมทริกซ์การกระจายของพอมิตติวิตี G สามารถได้มาโดยใช้เมทริกซ์ผกผัน (inverse matrix) ของเมทริกซ์ S ดังสมการ

$$G = S^{-1} \cdot C \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.2) เมทริกซ์ S^{-1} ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากไม่ใช่เมทริกซ์จัตุรัส ($M = N$) ซึ่งระบบ ECT โดยทั่วไปแล้วขนาดของเมทริกซ์ S คือ $M \ll N$ เช่น $M = 28$ และ $N = 1600$ ดังนั้นในวิธีลีนีเยร์แบ็กโปรเจกชันจะใช้ค่าของการสลับเปลี่ยนเมทริกซ์ (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 ($m = 1 \dots M$) ของทุกคู่อิเล็กโตรดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (weight) ด้วยค่าเซนซิติวิตีของแต่ละพิกเซลในแต่ละคู่อิเล็กโตรดที่สอดคล้องกัน แสดงได้ดังสมการ

$$g_n = \sum_{m=1}^M c_m s_{nm} \quad (5.3)$$

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรดที่อยู่ติดกัน โดยปกติจะมีค่ามากที่สุด และค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรดที่อยู่ตรงข้ามกันจะมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีย่านกว้าง ดังนั้นจึงต้องทำการนอร์มอไลซ์ค่าความจุไฟฟ้าเหล่านี้ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0 (เมื่อเซ็นเซอร์มีค่าพอมิตติวิตีเฉพาะก๊าซ) และ 1 (เมื่อเซ็นเซอร์มีค่าพอมิตติวิตีเฉพาะน้ำมัน) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$C_{ij}^n = \frac{C_{ij}^m - C_{ij}^{gas}}{C_{ij}^{oil} - C_{ij}^{gas}} ; i = 1..7, j = i + 1..8 \quad (5.4)$$

โดย i คือ อันดับของอิเล็กโตรดตัวส่ง j คือ อันดับของอิเล็กโตรดตัวรับ C_{ij}^n คือ ค่านอร์มอไลซ์ของค่าความจุไฟฟ้า (Normalised capacitance) ของคู่อิเล็กโตรด $i - j$, C_{ij}^m คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรด $i - j$ ที่คำนวณได้จากการกำหนดลักษณะการกระจายตัวของค่าพอมิตติวิตีของตัวกลาง C_{ij}^{gas} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรด $i - j$ ที่คำนวณได้เมื่อกำหนดให้ทุกพิก

เซล (ในส่วนของผลการแสดงผล) มีค่าเพอมีตติวิตีของก๊าซ และ C_{ij}^{oil} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรด $i-j$ ที่คำนวณได้เมื่อกำหนดให้ทุกพิกเซล (ในส่วนของผลการแสดงผล) มีค่าเพอมีตติวิตีของน้ำมัน

5.2 วิธีการหาค่าเซนซิวิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT

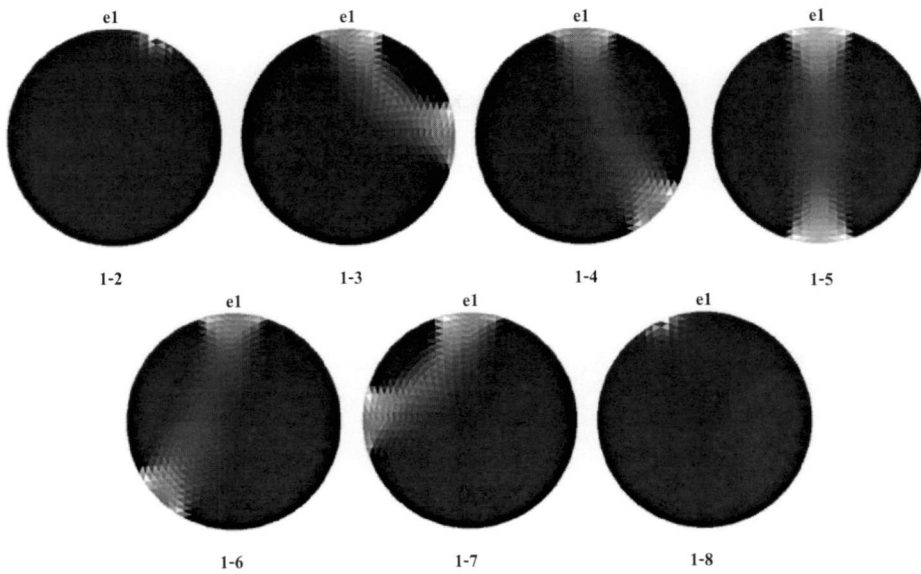
เซนซิวิตี S ของระบบ ECT จากวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของพิกเซลต่างๆที่มีต่ออิเล็กโตรดแต่ละคู่ (Relative capacitance change) [16] แสดงได้ดังสมการ

$$S_{ij}(p) = \left[\frac{C_{ij}^{oil,p} - C_{ij}^{gas}}{C_{ij}^{oil} - C_{ij}^{gas}} \right] \left[\frac{1}{\epsilon_{oil} - \epsilon_{gas}} \right] \left[\frac{A_{max}}{A_p} \right] \quad (5.5)$$

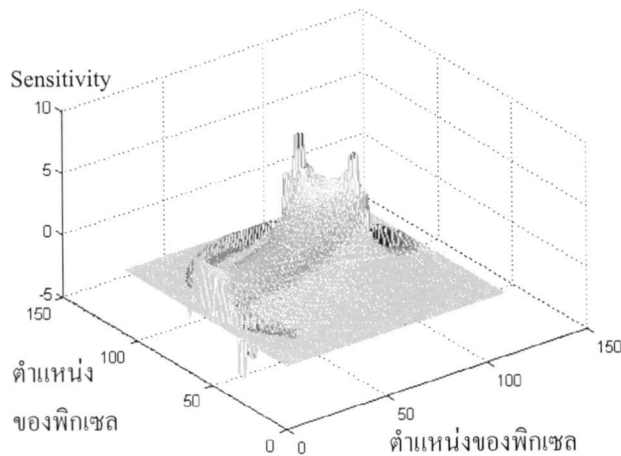
โดย $S_{ij}(p)$ คือ เซนซิวิตีของพิกเซล p ที่เป็นของคู่อิเล็กโตรด $i-j$, $C_{ij}^{oil,p}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้พิกเซล p มีค่าเพอมีตติวิตีของน้ำมัน และพิกเซลอื่นๆที่เหลือมีค่าเพอมีตติวิตีของก๊าซ ϵ_{oil} และ ϵ_{gas} คือ ค่าเพอมีตติวิตีสัมพัทธ์ของน้ำมันและก๊าซ ตามลำดับ A_{max} คือ พื้นที่ทั้งหมดของภาพที่ใช้แสดงผล และ A_p คือ พื้นที่ของพิกเซล

จากสมการที่ (5.5) แสดงให้เห็นถึง การตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่มีต่อค่าเพอมีตติวิตีของตัวกลางค่าสูงค่าหนึ่งที่อยู่บนพื้นที่จุดเล็กๆในบริเวณของเซ็นเซอร์ที่มีค่าเพอมีตติวิตีของตัวกลางค่าต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลให้สามารถแสดงค่าของเพอมีตติวิตีค่าสูงบนค่าเพอมีตติวิตีที่ต่ำกว่าได้ ค่าเซนซิวิตีสามารถได้มาโดยการวัดทางกายภาพ หรือจากการคำนวณด้วยสมการที่ 5.5 โดยการวัดทางกายภาพนั้นจะทำได้ยาก หรือทำไม่ได้เลย ดังนั้นในระบบ ECT จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณ แต่ปัญหาที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ใช้ประสิทธิภาพของเครื่องคำนวณและเวลาในการคำนวณสูง

รูปลักษณะการกระจายของเซนซิวิตีที่อยู่ภายในส่วนของผลการแสดงผลของภาพของเซ็นเซอร์แบบวงกลม เฉพาะเซนซิวิตีของคู่อิเล็กโตรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโตรด 1-8 แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และเซนซิวิตีของเฉพาะคู่อิเล็กโตรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซitivิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อีเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อีเล็กโทรด 1-8



รูปที่ 5.2 รูปลักษณะการกระจายของค่าเซนซitivิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อีเล็กโทรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นได้ว่า ค่าของเซนซitivิตีของแต่ละคู่อีเล็กโทรดจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยจะสังเกตเห็นว่า ถ้าวัดอยู่ภายนอกบริเวณที่มีค่าเป็นบวกของคู่อีเล็กโทรดคู่หนึ่งแล้ว ค่า

ระดับเทาในบริเวณนี้ที่เกิดจากคู่อเล็กโทรดคู่นี้จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจากหลักการของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำให้การบวกค่าความจุไฟฟ้าที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าเซนซิวิตีของทุกคู่อเล็กโทรดเข้าด้วยกัน ค่าระดับเทาของบริเวณที่มีวัตถุจะเด่นชัดขึ้น และที่บริเวณอื่นๆ ค่าระดับเทาจะมีค่าลดลงเนื่องจากค่าที่เป็นลบนั่น

5.3 การสร้างภาพกลับด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันและการเทรซโฮลด์

เนื่องจากเซ็นเซอร์ถูกแบ่งเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งรูปแบบจะขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณ ส่วนที่ถูกแสดงผลเป็นภาพซึ่งอยู่ภายในกรอบด้านในของเซ็นเซอร์ จะถูกแสดงผลด้วยระดับเทา (Grey level : $G(p)$) เพื่อแสดงถึงค่าประมาณของค่าพอมิตติวิตีของตัวกลาง ระดับเทาของภาพถูกคำนวณด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ดังสมการ

$$G(p) = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=i+1}^8 C_{ij}^n S_{ij}(p)}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=i+1}^8 S_{ij}(p)} \quad (5.6)$$

โดย p คือ ตำแหน่งของพิกเซล ค่าระดับเทาของแต่ละพิกเซลในสมการที่ (5.6) จะถูกคำนวณ โดยการบวกกันของค่าออร์มอลไฮซ์ของค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม

เนื่องจากระบบ ECT เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้ค่าออร์มอลไฮซ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าระดับเทา มีค่ามากกว่า 1 (Overshooting) และต่ำกว่า 0 (Undershooting) และผลเนื่องจากข้อจำกัดของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำให้ค่าระดับเทา มีลักษณะไม่คมชัด ดังนั้นค่าระดับเทาของพิกเซลก่อนการแสดงผลจริง จะผ่านกระบวนการคือ การตัด (truncation operation) และการเทรซโฮลด์ [5] โดย Overshooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการตัด ถ้า C_{ij}^n ในสมการที่ (5.4) มีค่ามากกว่า 1 ให้ $C_{ij}^n = 1$ และ Undershooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยการเทรซโฮลด์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} TH &= (1 - 0.9th_1)th_2 \\ th_1 &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M C_m^n \\ th_2 &= \frac{1}{P^+} \sum_{p=1}^{P^+} g_p \end{aligned} \quad (5.7)$$

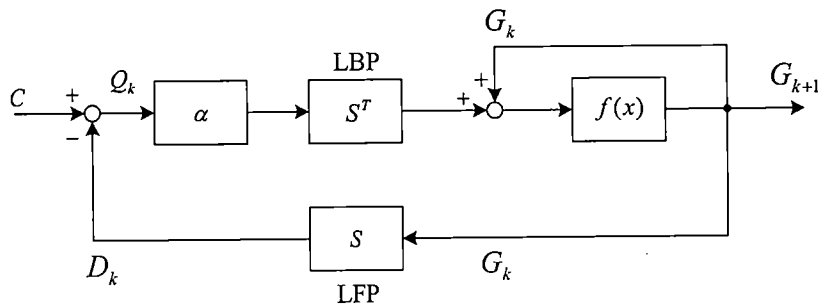
โดย TH คือ ค่าระดับเทรชโฮลด์ m คือ ลำดับของคู่อิเล็กโทรด $i-j$, M คือ จำนวนทั้งหมดของคู่อิเล็กโทรด g_p คือ ค่าระดับเทาของพิกเซล p ขณะที่ยังไม่ถูกแสดงผล P^+ คือ จำนวนทั้งหมดของพิกเซลที่มีค่ามากกว่า 0 และค่า 0.9 ได้จากการทดลอง จากสมการที่ (5.7) จะสังเกตเห็นว่า ค่าระดับเทรชโฮลด์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายของเพอมีตริวิตีและสัดส่วนของเพอมีตริวิตี ค่าระดับเทาของพิกเซลจะถูกแสดงผลด้วยตัวเลขจำนวนเต็ม 0-255 แสดงได้ดังสมการ

$$G(p) = \begin{cases} 0 & : g_p < TH \\ g_p & : TH \leq g_p \leq 1 \\ 1 & : g_p > 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

5.4 การสร้างภาพกลับด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber

iteration

ขั้นตอนวิธีการทำซ้ำ (Iterative algorithm) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ถูกสร้างกลับให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนดังรูป



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนวิธี วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber iteration

ขั้นตอนวิธีในรูปที่ 5.3 คือ วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber iteration โดย k คือ การทำซ้ำครั้งที่ k , α คือ ค่าผ่อนปรน (Relaxation parameter), C คือ ค่าอนุกรมอิลซ์ของค่าความจุไฟฟ้า S คือ ค่าเซนซิวิตีของระบบ D_k คือ เวกเตอร์ค่าประมาณของค่าความจุไฟฟ้า (the estimated capacitance vector) ที่ได้จากวิธีลิเนียร์ฟอร์เวิร์ดโปรเจกชัน (Linear forward projection : LFP) แสดงได้ดังสมการที่ (5.9) และ Q_k คือ เวกเตอร์ผลต่างของค่าความจุไฟฟ้า (the error capacitance vector)

$$D_{k,ij} = \frac{\sum_p G_k(p) S_{ij}(p)}{\sum_p S_{ij}(p)} \quad (5.9)$$

จากรูปที่ 5.5 เริ่มต้นด้วยการหาค่า G_0 โดยจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการ การทำซ้ำ จากนั้นใช้วิธี LFP เพื่อหาค่า D_k ค่านี้จะแสดงถึงค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละคู่อิเล็กโทรดที่ถูกสร้างกลับมาจากค่าระดับเทา (G_k) จากนั้นหาค่าผลต่างระหว่าง D_k และ C ซึ่งจะได้เป็น Q_k ที่แสดงถึงค่าผิดพลาดระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณมาจาก G_k ค่าผิดพลาดนี้จะถูกใช้เพื่อสร้างภาพของค่าผิดพลาด (an error image) โดยใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน ภาพของค่าผิดพลาดจะถูกบวกเข้ากับค่า G_k เพื่อชดเชยหรือเป็นการปรับค่าให้เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง และขั้นตอนสุดท้ายของแต่ละรอบการทำซ้ำคือ การจำกัดค่า G_k ซึ่งถูกเรียกว่า projected Landweber method แสดงได้โดย

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{if } x > 1 \end{cases} \quad (5.10)$$

โดย x คือ ค่าระดับเทาที่ได้จากกระบวนการ การทำซ้ำครั้งล่าสุด

ค่า α จะมีผลต่อความเร็วของการลู่เข้าของผลเฉลยหรือค่าระดับเทาเข้าใกล้ค่าที่ถูกต้อง โดยถ้า $\alpha < 1$ จะทำให้ความเร็วของการลู่เข้าช้าลง แต่จะช่วยทำให้ผลเฉลยที่กำลังเกิดการลู่ออกให้ลู่กลับเข้าสู่ผลเฉลยที่แท้จริง และถ้า $\alpha > 1$ จะทำให้ความเร็วของการลู่เข้าเร็วขึ้น แต่จะเป็นสาเหตุของการลู่ออกของผลเฉลย นอกจากนี้ลักษณะการกระจายของเพอเมิตติวิตีในลักษณะต่าง ๆ กัน จะมีค่าที่เหมาะสมของ α ที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกค่า α นั้นจะขึ้นอยู่กับ การทดลอง ในส่วนของงานวิจัยนี้จะใช้ค่า α เท่ากับ 1

ดังนั้นจากขั้นตอนทั้งหมด สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\begin{cases} G_0 = \text{reconstruction based on LBP} \\ G_{k+1} = f[G_k + \alpha S^T (C - S G_k)] \end{cases} \quad (5.11)$$

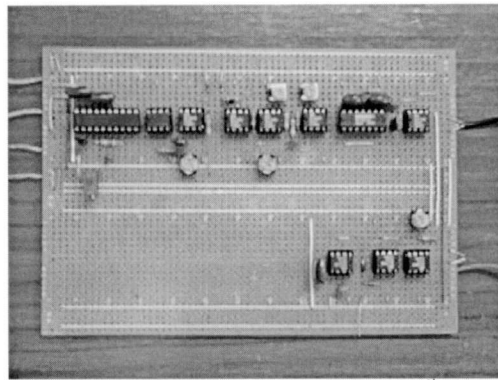
บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับในส่วนของการทดลองและผลการทดลองจะแยกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

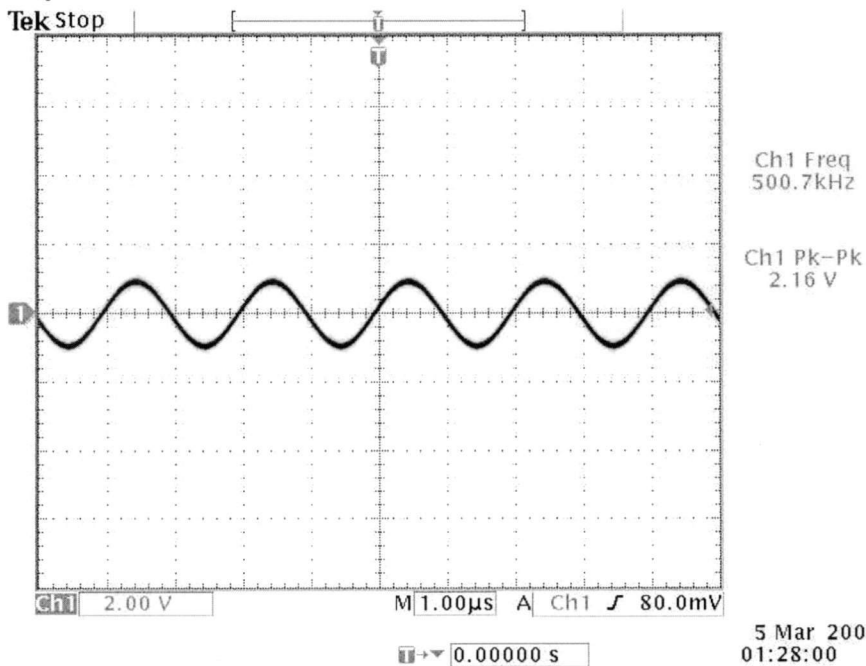
6.1 การทดสอบ ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า

จากวงจรที่เราออกแบบขึ้น เรานำมาต่อจริงเพื่อทำการทดสอบ โดยลักษณะของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.1

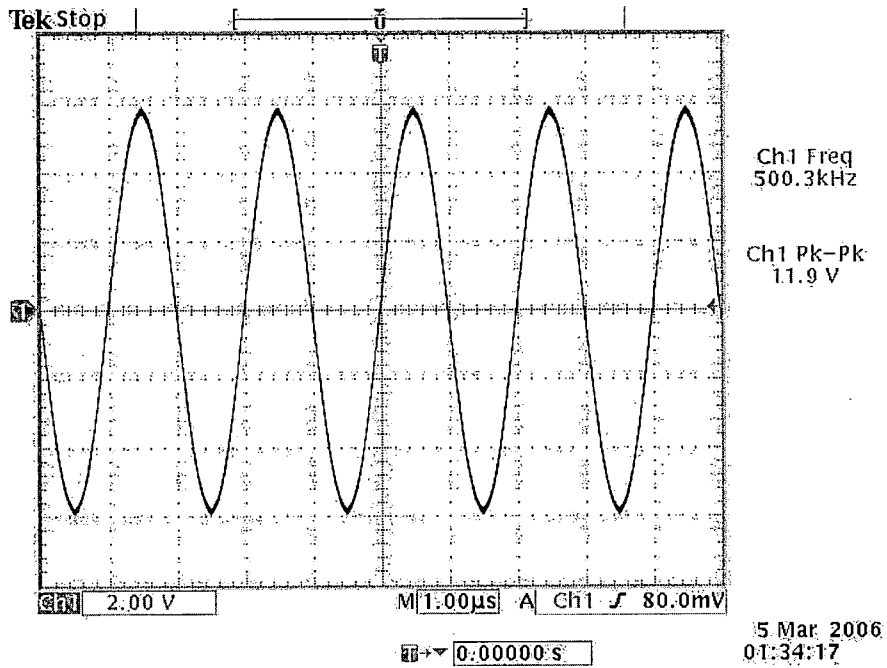


รูปที่ 6.1 ลักษณะของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง

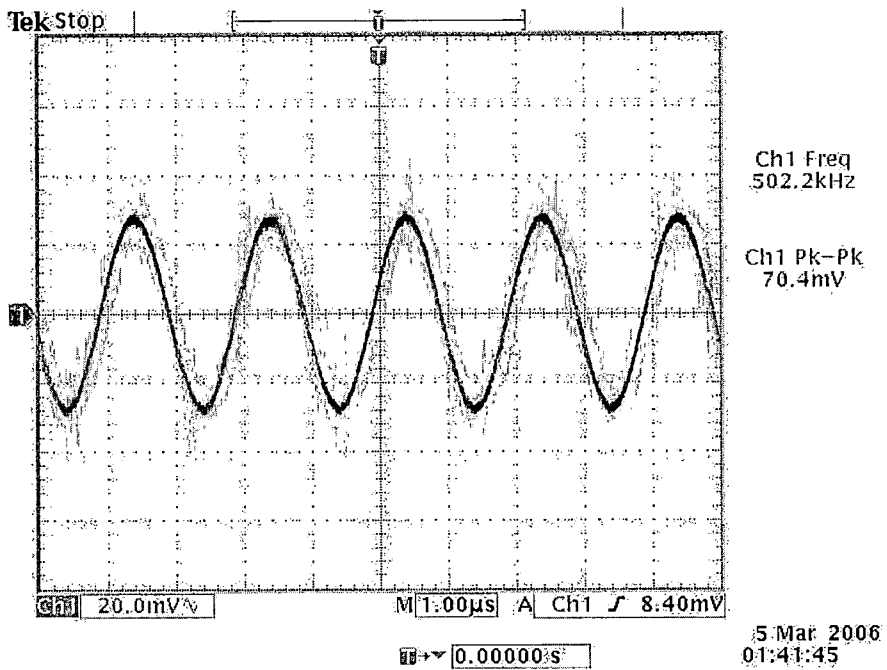
สำหรับการทดสอบสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.7 ดังนี้



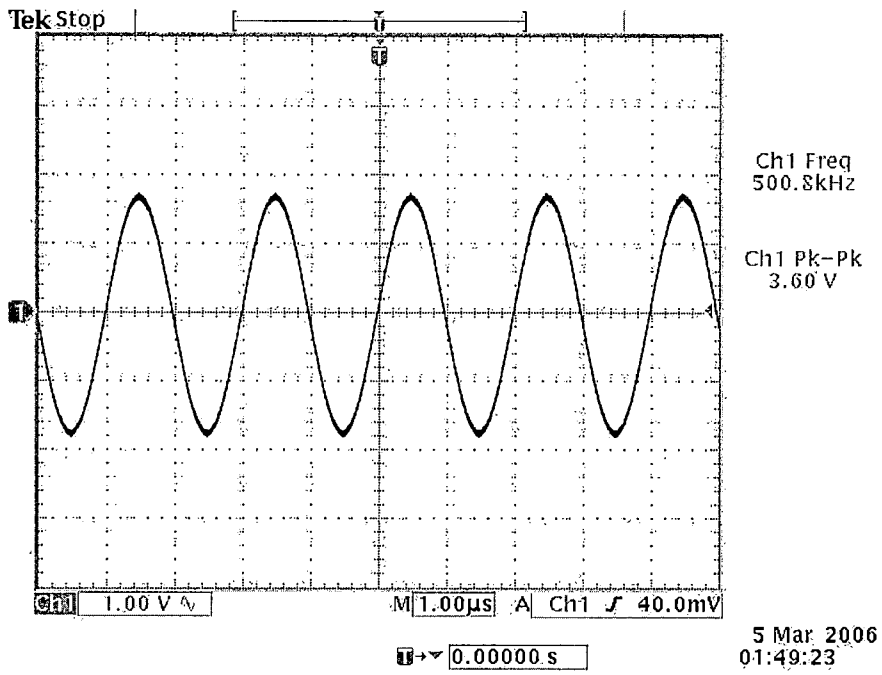
รูปที่ 6.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ 500 กิโลเฮิร์ต



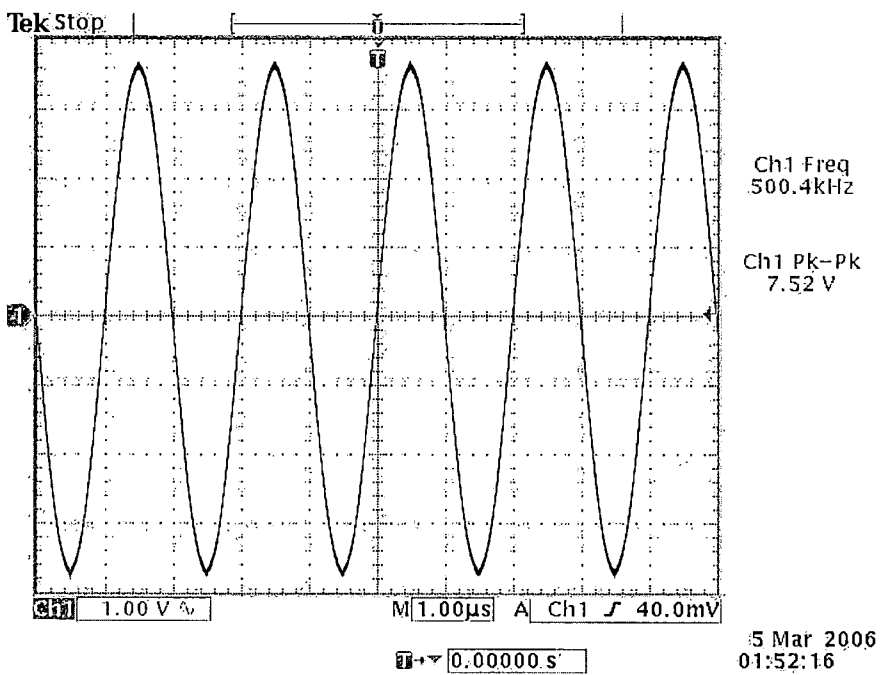
รูปที่ 6.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ



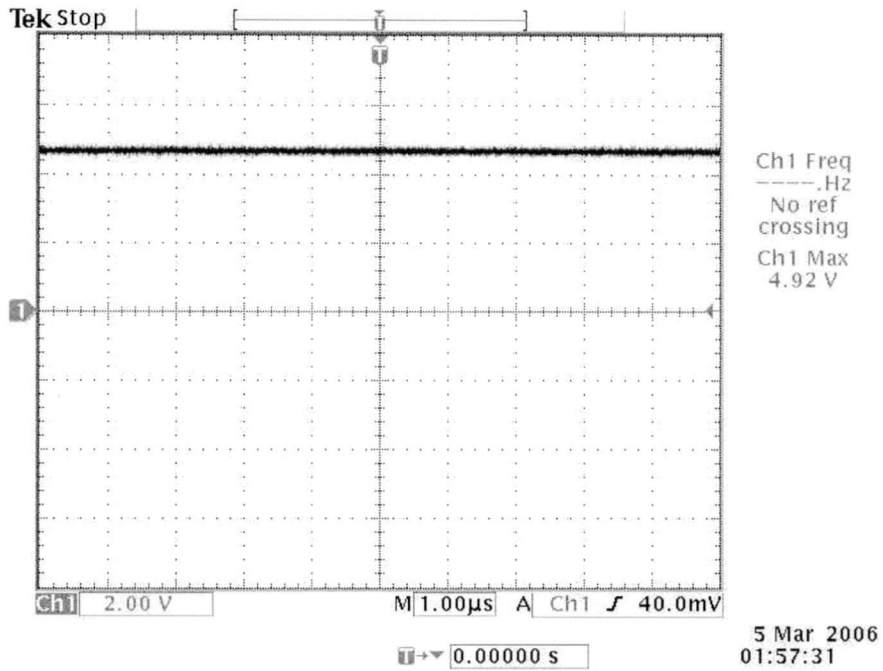
รูปที่ 6.4 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถิเทคเตอร์



รูปที่ 6.5 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 6.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 500 กิโลเฮิร์ต

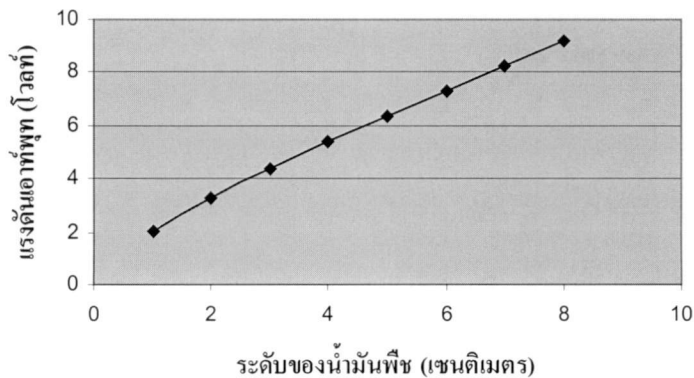


รูปที่ 6.7 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี

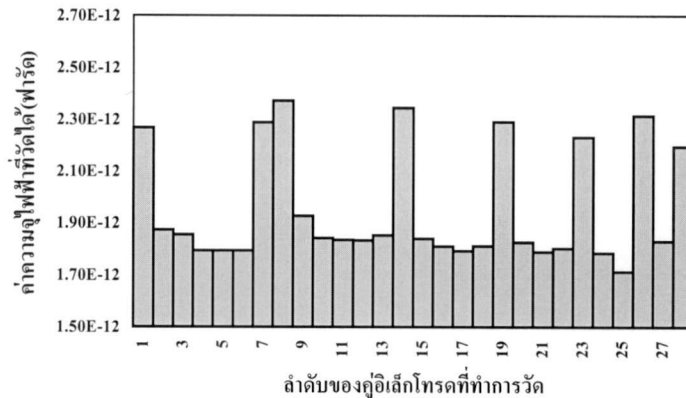
จากการทดสอบวงจรในส่วนต่างๆ ผลปรากฏว่าวงจรในแต่ละส่วนของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

6.2 การทดลองระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นกับถังบรรจุน้ำมันพืช

สำหรับการทดสอบระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นเราจะใช้น้ำมันพืชที่มีค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนต์ ประมาณ 3.7 เดิมลงในเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นที่ระดับความสูงต่างๆ จากนั้นจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยระบบที่สร้างขึ้น สำหรับกราฟความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของระบบ และค่าระดับความสูงของน้ำมันพืชสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.8 และ 6.9



รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตของระบบ และ ค่าระดับความสูงของน้ำมันพืช



รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับขั้วเล็กโทรดที่ทำกราวด์

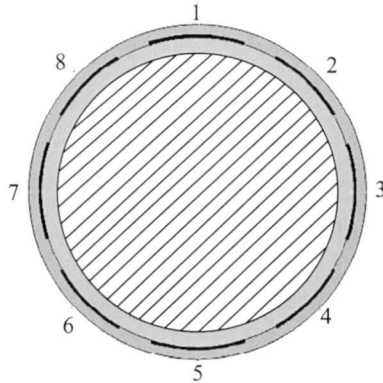
จากการทดสอบวงจรในส่วนต่างๆ ผลปรากฏว่าวงจรในแต่ละส่วนของระบบวัดและเก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

6.3 การทดสอบอัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าจำลองที่ได้จากการคำนวณ

ในการทดลองนี้จะประกอบด้วย การคำนวณค่าความจุไฟฟ้า การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโมเดลแบบวงกลม โดยใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ Projected Landweber iteration ในการทดลองนี้กระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel® Pentium4 1.8 GHz หน่วยความจำขนาด 256 MB ชนิด RDRAM และใช้โปรแกรมภาษา Delphi® ในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าและการสร้างภาพกลับ

6.3.1 การกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอเมิตติวิตี

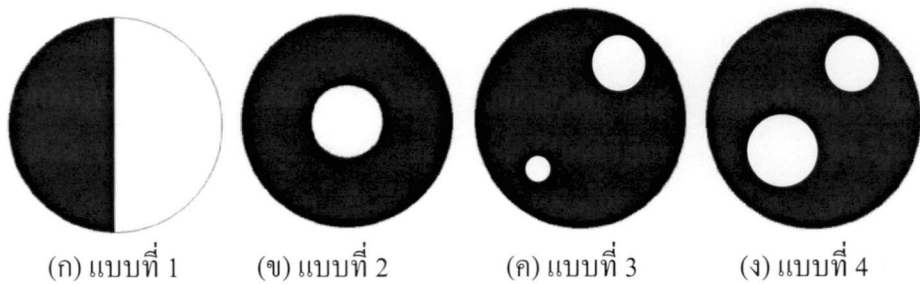
การทดสอบกระบวนการสร้างภาพตัดขวาง จำเป็นต้องกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอเมิตติวิตีของตัวกลาง หรือเรียกว่าภาพทดสอบ เพื่อใช้ในการจำลองค่าความจุไฟฟ้าจากโมเดลที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยโมเดลของเซ็นเซอร์แบบวงกลม บริเวณที่ถูกกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอเมิตติวิตีจะอยู่ภายในบริเวณรอบด้านในที่มีขนาดของรัศมี R1 เท่ากับ 54 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 โดยบริเวณที่มีลักษณะลายเนียงคือบริเวณที่ถูกกำหนด และตัวกลางในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 2 ชนิดคือ น้ำมัน (oil) ซึ่งมีค่าเพอเมิตติวิตีเท่ากับ 3 และก๊าซ (gas) ซึ่งมีค่าเพอเมิตติวิตีเท่ากับ 1



รูปที่ 6.10 บริเวณที่มีลักษณะลายเฉียงคือบริเวณที่ถูกกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีของตัวกลางเซ็นเซอร์แบบวงกลม

ลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีของตัวกลางที่ถูกกำหนดในงานวิจัยนี้สำหรับ โมเดลของเซ็นเซอร์แบบวงกลมจะประกอบด้วย 4 แบบ แสดงดังรูปที่ 6.11 โดยทั้ง 4 รูปนี้จะอยู่ภายในบริเวณที่มีลักษณะลายเฉียงในรูปที่ 6.11 สีขาวและสีดำแทนลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีของน้ำมันและก๊าซตามลำดับ

การทดสอบของทั้ง 4 แบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะในการสร้างภาพกลับของการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีในลักษณะต่างๆ โดย 1. เพื่อสังเกตผลของสัดส่วนของเพอมีตติวิตี 2. เพื่อทดสอบผลของตำแหน่งของเพอมีตติวิตี และ 3. เพื่อทดสอบความสามารถในการแยกแยะวัตถุที่มีมากกว่าหนึ่งวัตถุ



(ก) แบบที่ 1

(ข) แบบที่ 2

(ค) แบบที่ 3

(ง) แบบที่ 4

รูปที่ 6.11 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีของตัวกลางสำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลม

(ก) แบบที่ 1

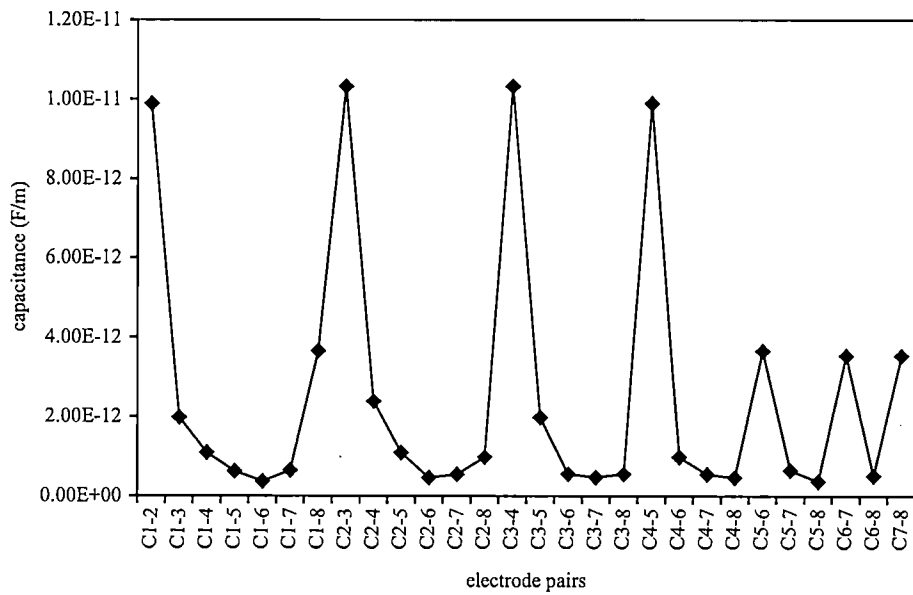
(ข) แบบที่ 2

(ค) แบบที่ 3

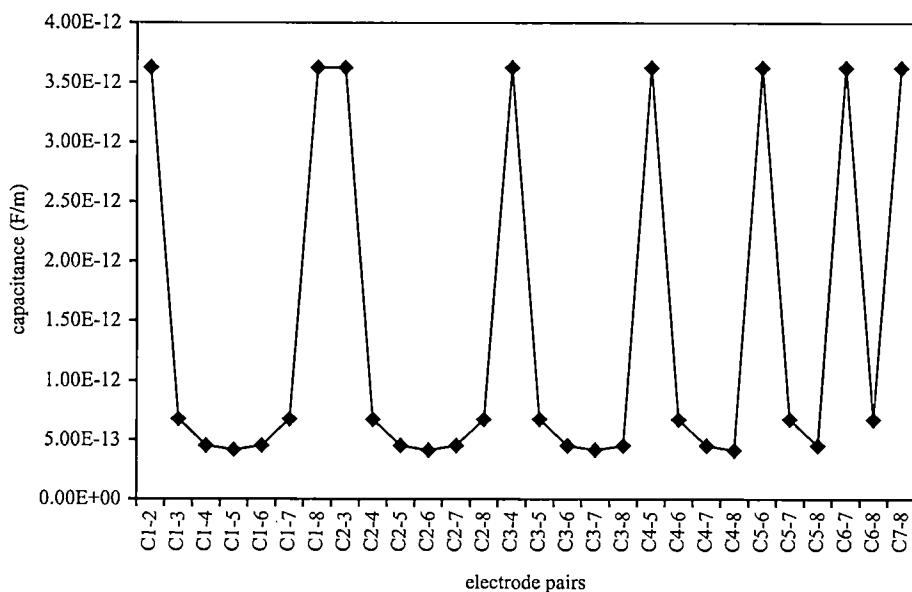
(ง) แบบที่ 4

6.3.2 การทดลองการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า

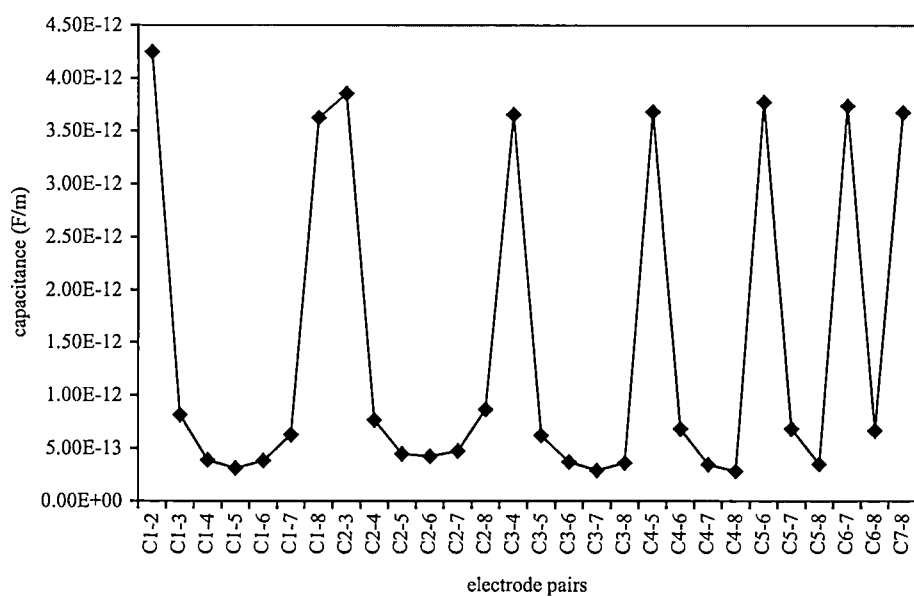
ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกคำนวณตามหลักการในบทที่ 4 โดยใช้ลักษณะการกระจายตัวของพหุวัตติวิติในรูปแบบที่ 1 ถึง 4 และเมื่อเซ็นเซอร์มีเฉพาะก๊าซ และน้ำมันอยู่เต็ม โดยค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ในสถานะต่างๆ สำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.12 ถึงรูปที่ 6.16



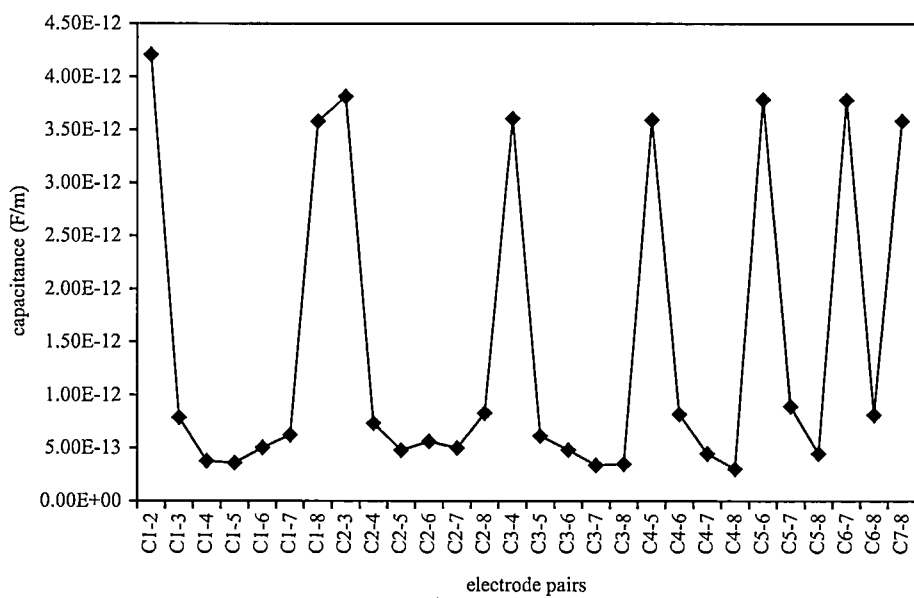
รูปที่ 6.12 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 1



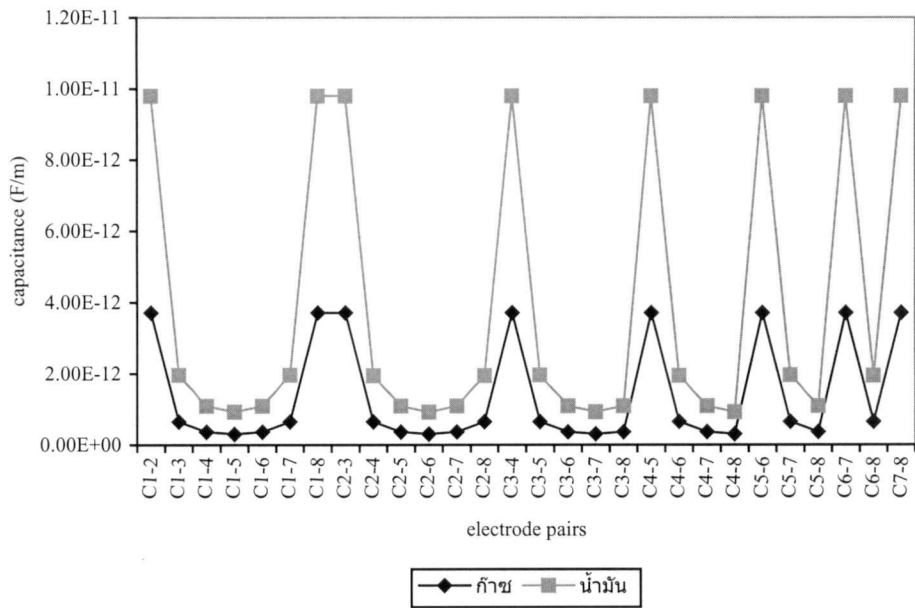
รูปที่ 6.13 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 2



รูปที่ 6.14 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 3



รูปที่ 6.15 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมในแบบที่ 4

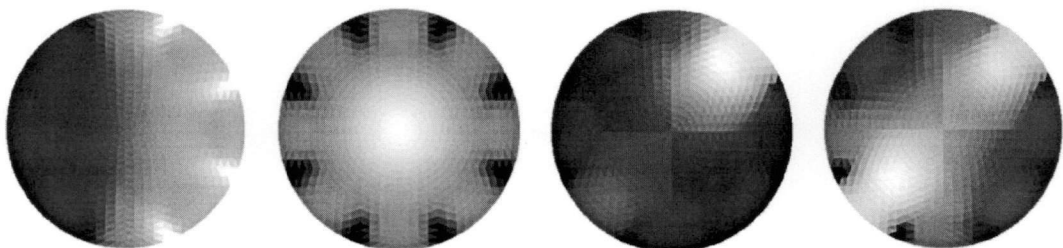


รูปที่ 6.16 ค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเมื่อเซ็นเซอร์มีเฉพาะก๊าซ และน้ำมันอยู่เต็ม

จากค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์แบบวงกลม จะเห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างต่ำมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดที่อยู่ตรงข้ามกัน ดังนั้นเครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้าจริงที่จะถูกสร้างขึ้นจะต้องมีคุณสมบัติคือ ต้องมีความไวสูงเพียงพอที่จะสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากนี้ได้ และรวมถึงการไม่ไวต่อสัญญาณรบกวนอื่นๆ ด้วยเช่นกัน

6.3.3 การทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลม

การสร้างภาพตัดขวางจากค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แบบวงกลมโดยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber iteration สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.17 ถึงรูปที่ 6.18



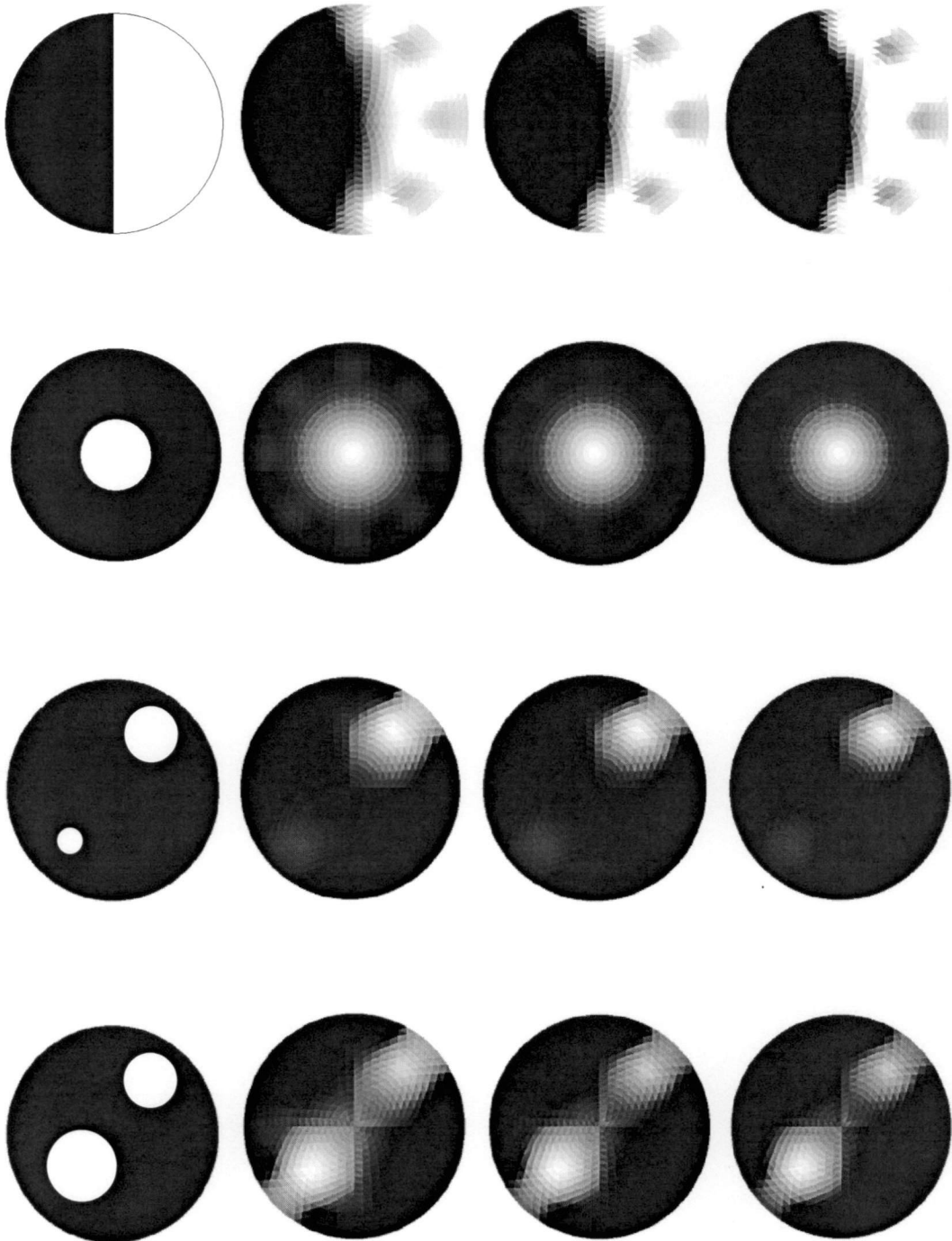
แบบที่ 1

แบบที่ 2

แบบที่ 3

แบบที่ 4

รูปที่ 6.17 รูปผลการทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลมด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน

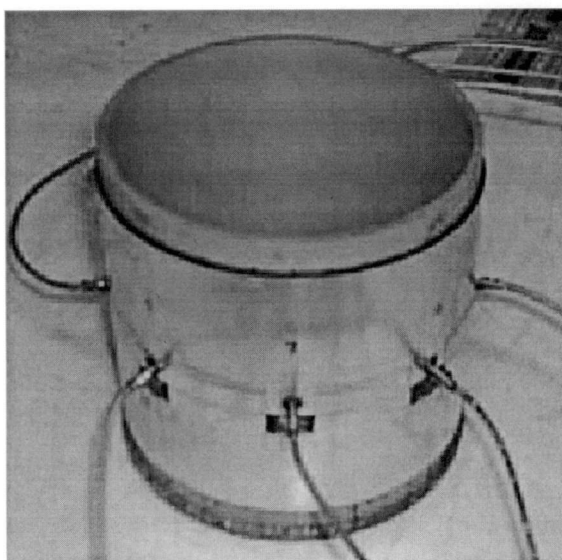


รูปที่ 6.18 รูปผลการทดลองสร้างภาพตัดขวางของเซ็นเซอร์แบบวงกลมด้วยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจค
 ชั้นตามหลักการของ projected Landweber iteration

6.4 การทดสอบอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจริง

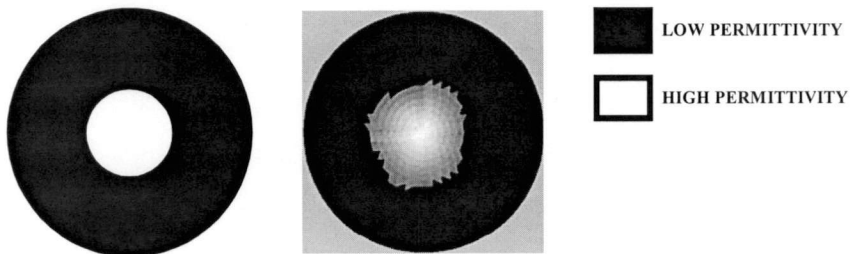
สำหรับในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมากับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงจากระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้น โดยเซ็นเซอร์ที่ใช้ทดลองจะเป็นเซ็นเซอร์วงกลมทำจากท่อพีวีซี (PVC) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 ตัว แต่ละอิเล็กโทรดจะทำมุมกับ จุดศูนย์กลางเท่ากับ 40 องศา และวางติดอยู่กับส่วนนอกของท่อ (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 3 มม. และมีค่าเพอมีตติวิตีสัมพัทธ์เท่ากับ 2.7 ขนาดของรัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงอิเล็กโทรดเท่ากับ 57 มม. และรัศมีเมื่อวัดถึงกรอบนอก(earth screen) เท่ากับ 58 มม. ซึ่ง ทำจากอลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์

สำหรับวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าในระบบ ECT นั้น ทำได้โดยการให้อิเล็กโทรดเพียง 1 อิเล็กโทรด เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณขาขึ้นซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรดตัวส่ง (Sending Electrode) โดยให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือเป็นตัวรับ ซึ่งเรียกว่าอิเล็กโทรดตัวรับ (Detecting Electrode) และกรอบด้านนอกต่อลงดิน (Ground) จากนั้นหาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรดต่างๆในลำดับดังต่อไปนี้ คือให้อิเล็กโทรดที่ 1 เป็นอิเล็กโทรดตัวส่ง โดยให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือ และกรอบด้านนอกต่อลงดิน และทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรด 1-2, 1-3, ... , 1-8 จากนั้นให้อิเล็กโทรดที่ 2 เป็นอิเล็กโทรดตัวส่ง และให้อิเล็กโทรดส่วนที่เหลือและกรอบด้านนอกต่อลงดิน แล้วทำการหาค่าความจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรด 2-3, 2-4, ... , 2-8 จากนั้นทำการวัด ค่าด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกันจนถึงคู่อิเล็กโทรด 7-8 ก็จะได้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด 28 ค่า ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายไดอิเล็กทริกของวัตถุที่อยู่ภายในตัวเซ็นเซอร์



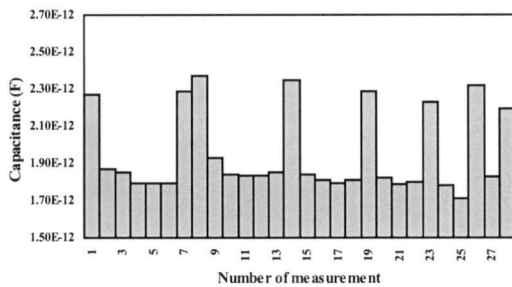
รูปที่ 6.19 เซ็นเซอร์แบบวงกลมที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับในการทดลองนั้นแท่งเทปลอน ($\epsilon_r=2.76$) ถูกวางแทรกเข้าไปภายในตัวเซ็นเซอร์แบบวงกลมในรูปแบบต่างๆ จากนั้นจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดคู่ต่างๆ จากแต่ละคู่ของอิเล็กโทรดซึ่งจะได้ทั้งหมด 28 ค่า ผลที่ได้จากการวัดนี้จะถูกส่งเข้าไปประมวลผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าแล้วทำการสร้างภาพกลับ แสดงผลด้วยค่าระดับเทา และใช้จำนวนการทำซ้ำอยู่ที่ 5 รอบโดยใช้โปรแกรมภาษา Delphi เป็นซอฟต์แวร์ช่วยในการเก็บข้อมูล ประมวลผลและสร้างภาพ



ก) ตำแหน่งวัสดุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



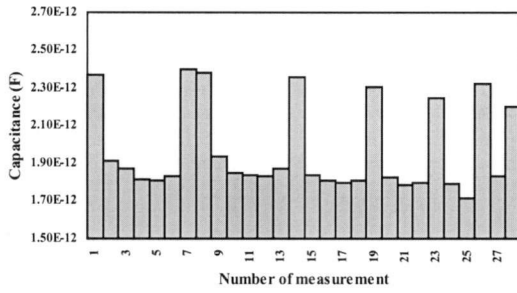
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.20 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 1 ชั้น แบบที่ 1



ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



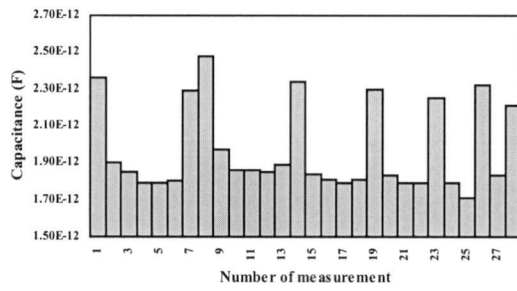
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.21 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 2



ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



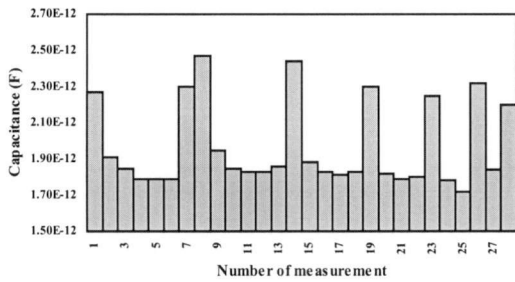
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.22 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 3



ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



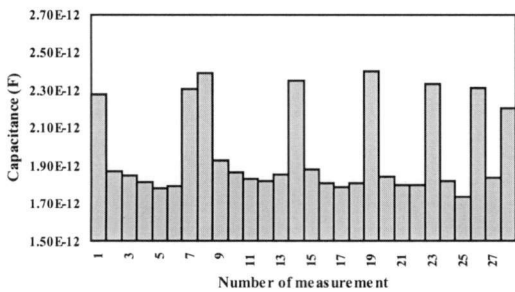
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.23 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 4



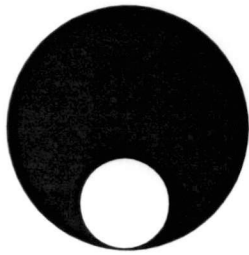
ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ

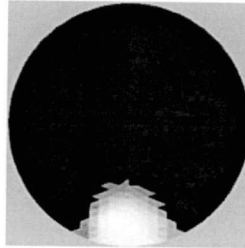


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

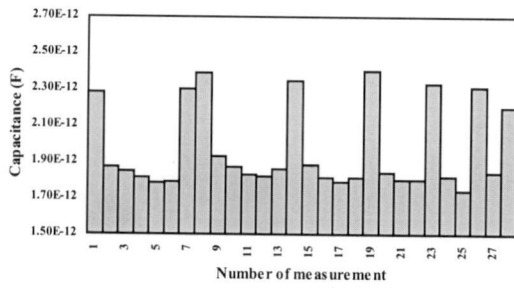
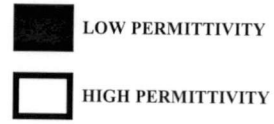
รูปที่ 6.24 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 5



ก) ตำแหน่งวัสดุ



ข) ผลการสร้างภาพกลับ

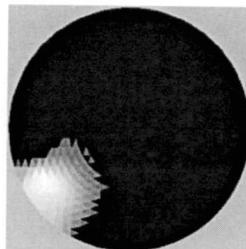


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

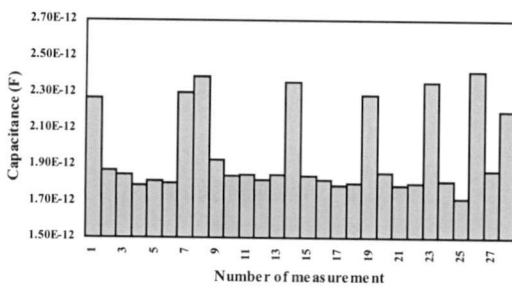
รูปที่ 6.25 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 1 ชั้น แบบที่ 6



ก) ตำแหน่งวัสดุ



ข) ผลการสร้างภาพกลับ



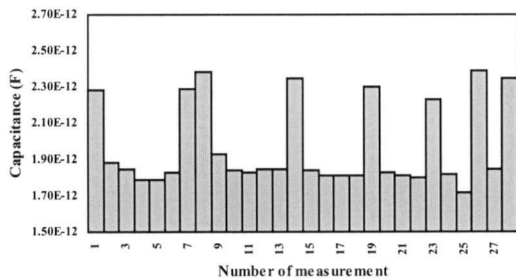
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.26 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 1 ชั้น แบบที่ 7



ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



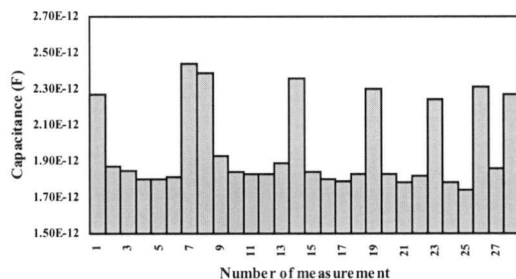
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.27 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 8



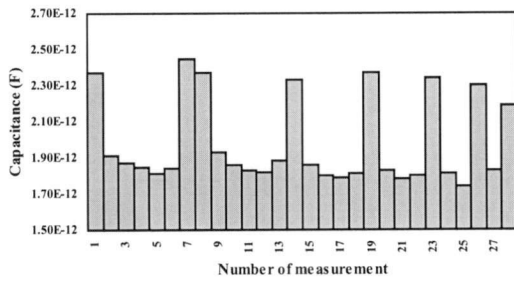
ก) ตำแหน่งวัตถุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



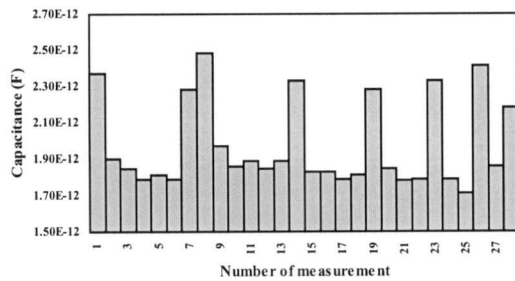
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.28 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัตถุ 1 ชิ้น แบบที่ 9



ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.29 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุขั้วต่อ 2 ชั้น แบบที่ 1

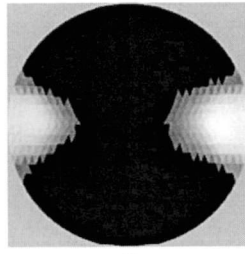


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

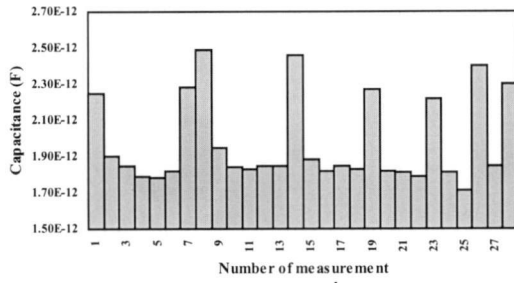
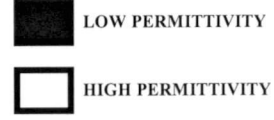
รูปที่ 6.30 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุขั้วต่อ 2 ชั้น แบบที่ 2



ก) ตำแหน่งวัสดุ

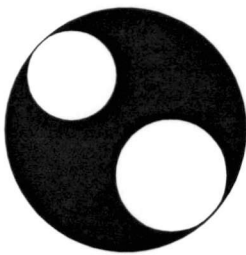


ข) ผลการสร้างภาพกลับ

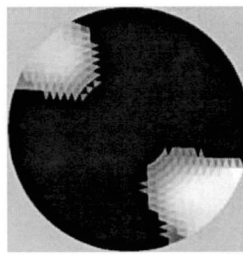


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

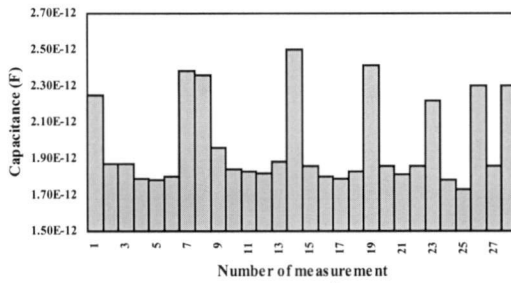
รูปที่ 6.31 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 3



ก) ตำแหน่งวัสดุ

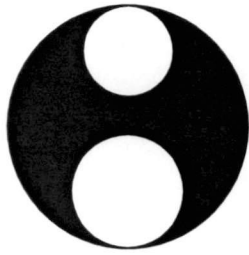


ข) ผลการสร้างภาพกลับ

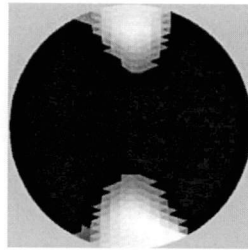


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

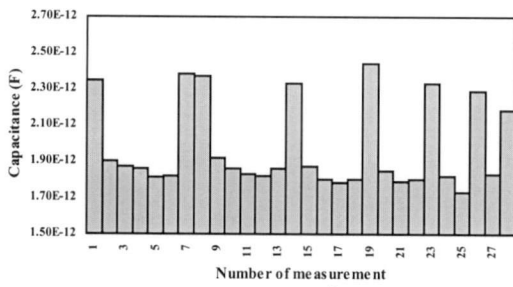
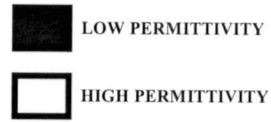
รูปที่ 6.32 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 4



ก) ตำแหน่งวัสดุ

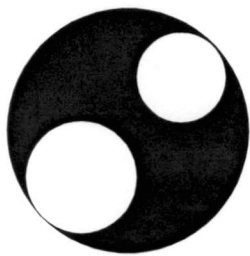


ข) ผลการสร้างภาพกลับ

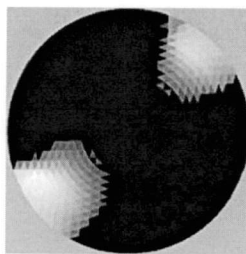


ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

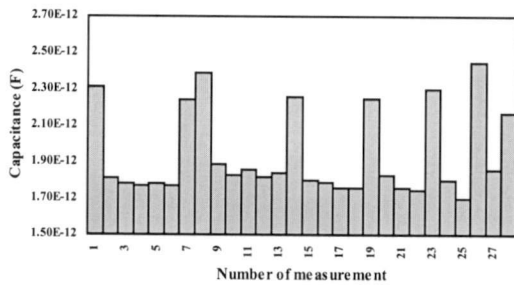
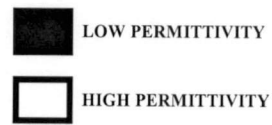
รูปที่ 6.33 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 5



ก) ตำแหน่งวัสดุ



ข) ผลการสร้างภาพกลับ



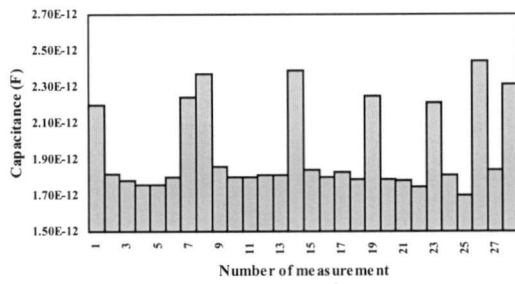
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.34 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 6



ก) ตำแหน่งวัสดุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



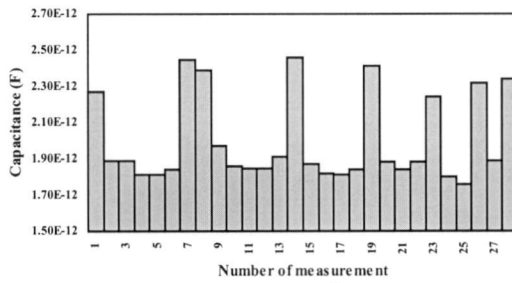
ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.35 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 7



ก) ตำแหน่งวัสดุ

ข) ผลการสร้างภาพกลับ



ค) กราฟความจุไฟฟ้าที่วัดได้

รูปที่ 6.36 เซ็นเซอร์แบบกลมบรรจุวัสดุ 2 ชั้น แบบที่ 8

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

ระบบ ECT ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเป็นระบบซึ่งใช้เซ็นเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบวงกลมแบบ 8 อิเล็กโทรด ใช้โปรแกรมภาษา Delphi เป็นซอฟต์แวร์ช่วยในการประมวลผลและสร้างภาพโดยใช้ อัลกอริธึม LBP ที่มีการเพิ่มค่าการทำซ้ำจากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ 28 ค่าของแต่ละคู่ของอิเล็กโทรด ในการทดลองใช้แท่งเทฟลอนวางแทรกในอากาศตำแหน่งต่างๆกันภายในของตัวอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ที่ใช้ทดลอง และในอัลกอริธึมของการสร้างภาพกลับเพื่อเพิ่มคุณภาพในการสร้างภาพในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ค่าการทำซ้ำอยู่ที่จำนวน 5 รอบ

จากผลการทดลองค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าต่ำสุด และสูงสุดระหว่างคู่อิเล็กโทรดใดๆของ เซ็นเซอร์แบบวงกลมจะอยู่ระหว่าง 0.1245pF และ 2.676 pF ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นทั้งระบบที่ใช้ ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะต้องมีความไวในการวัดสูงมาก ในขณะเดียวกันจะต้องทนทานกับ สัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ดี

ภาพที่ได้จากการสร้างภาพกลับ จะมีความใกล้เคียงกับหน้าตัดวัตถุทดสอบหากวัตถุที่ใช้ ทดสอบเป็นวัตถุชิ้นใหญ่ ในขณะที่หากวัตถุที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กและวางบริเวณขอบ เซ็นเซอร์ จะทำให้การสร้างภาพกลับมีความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งจากการทดลองได้แสดงถึงความไว ของระบบ และข้อจำกัดของอัลกอริธึมวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักการของ projected Landweber iteration ที่ใช้ เราสามารถเพิ่มคุณภาพของการสร้างภาพกลับด้วยการใช้วิธีเทรชโฮลด์ (Thresholding) ภาพหรือเพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำที่เหมาะสม

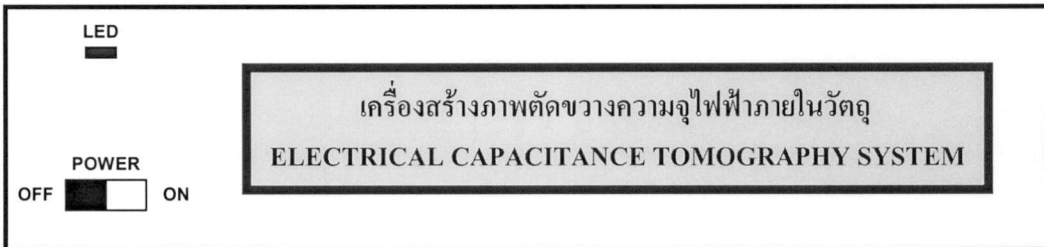
เอกสารอ้างอิง

- [1] R.A. Williams, M.S. Beck. Process Tomography Principles, Techniques and Applications. UK : Butterworth-Heinemann. 1995.
- [2] Beck. et.al. Tomographic Techniques for Process Design and Operation. UK : The Cromwell Press Ltd. 1993.
- [3] F.J. Dickin. et.al. "Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications." IEE Proc. G, vol. 139, no. 1, February 1992. pp. 72-82.
- [4] C.G. Xie, A. Plaskowski and M.S. Beck. "8-electrode capacitance system for two-component flow identification Part 1 : Tomographic flow imaging." IEE Proc., vol. 136, no. 4, July 1989. pp. 173-183.
- [5] C.G. Xie. et.al. "Electrical capacitance tomography for flow imaging : system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors." IEE Proc. G, vol. 139, no. 1, February 1992.
- [6] R.C. Waterfall, R. He, P. Wolanski and Z. Gut. "Monitoring Flame Position and Stability in Combustion Cans Using ECT." Proc. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Greater Manchester, April 1999.
- [7] W.Q. Yang, S. Liu. "Electrical capacitance tomography with a square sensor." Proc. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Greater Manchester, April 1999.
- [8] M.C. Byars. "Developments in Electrical Capacitance Tomography." Proc. 2nd World Congress on Industrial Process Tomography, Hannover, August 2001.
- [9] W.Q. Yang. "Modelling of capacitance tomography sensors." IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., vol. 144, no. 5, September 1997.
- [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. Singapore : McGraw-Hill. 1993.
- [12] ปราโมทย์ เจริญอำไพ. ไฟฟ้าสถิตและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [13] Peter P. Silvester, Ronald L. Ferrari. Finite elements for electrical engineers. 3rd Ed. New York : Cambridge University Press. 1996.

- [14] Curtis F. Gerald, Patrick O. Wheatley. Applied Numerical Analysis. 6th Ed. Addison-Wesley. 1999.
- [15] H. Yan, F.Q. Shao and S. wang. "Fast calculation of sensitivity distribution of capacitance tomography sensors." Electronics Letters, vol. 34, 1998. pp. 1936-1937.
- [16] S.M. Huang, A.B. Plaskowski, C.G. Xie and M.S. Beck. "Capacitance-Based Tomographic Flow Imaging System." Electronics Letters, vol. 24, no. 7, March 1988. pp. 418-419.

ภาคผนวก ก

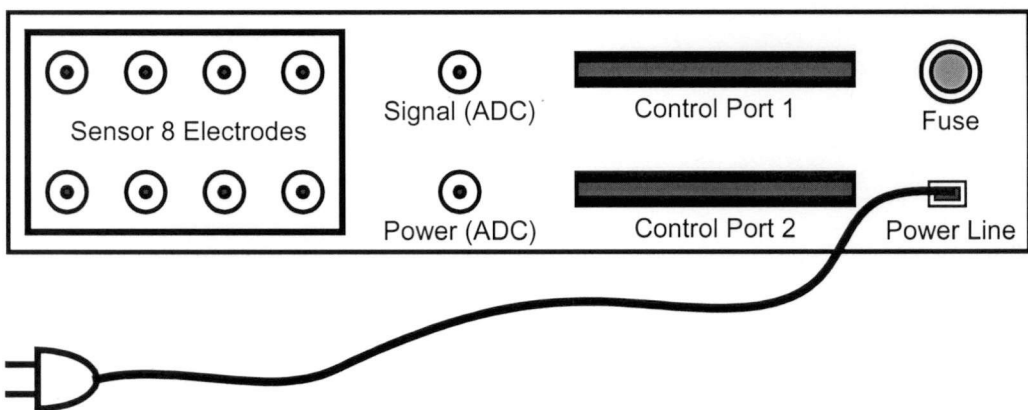
เครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุ
(Electrical Capacitance Tomography System)



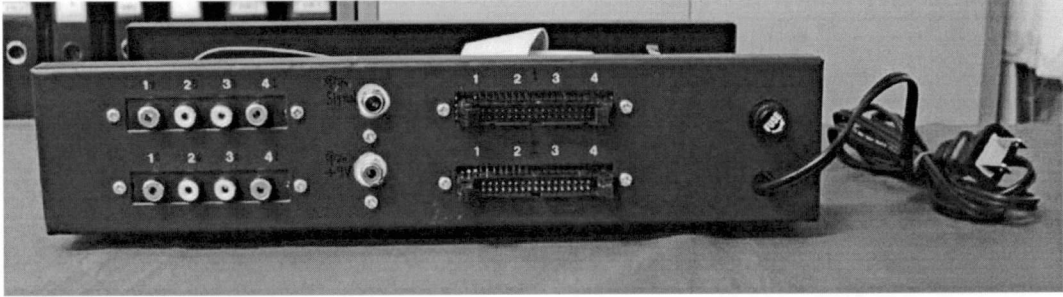
รูปที่ ก.1 เลขเอาท์ของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น (ด้านหน้า)



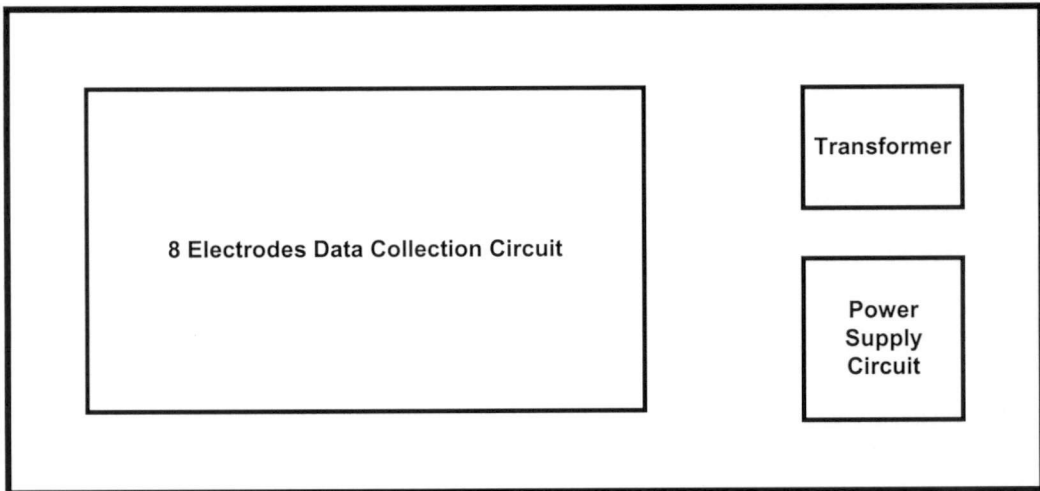
รูปที่ ก.2 ด้านหน้าของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น



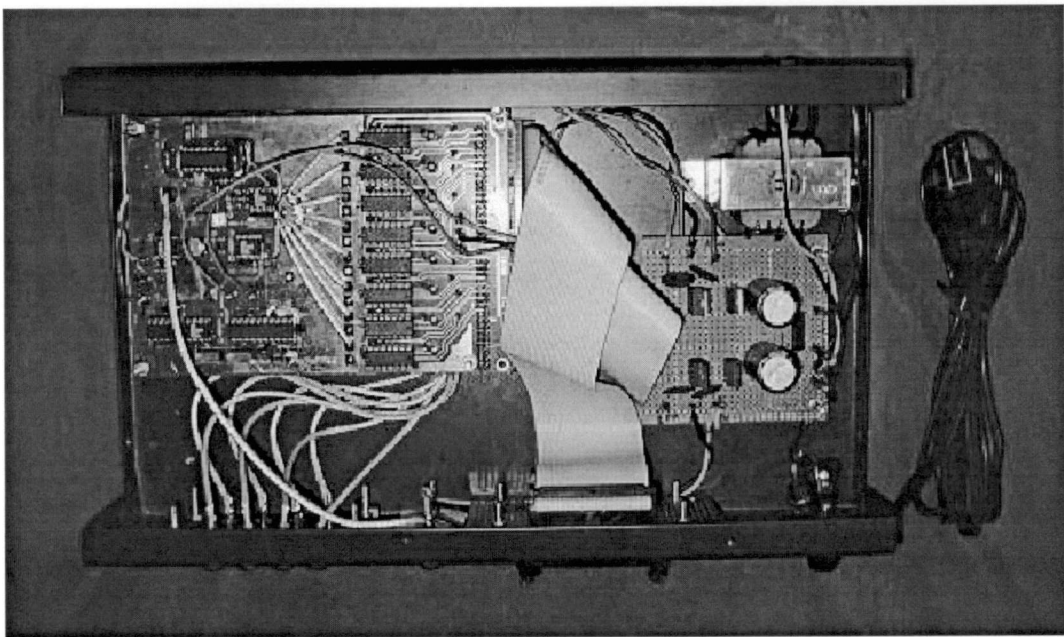
รูปที่ ก.3 เลขเอาท์ของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น (ด้านหลัง)



รูปที่ ก.4 ด้านหลังของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น



รูปที่ ก.5 เลย์เอาท์ของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น (ด้านบน)



รูปที่ ก.6 ด้านบนของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าภายในวัตถุที่สร้างขึ้น

ภาคผนวก ข

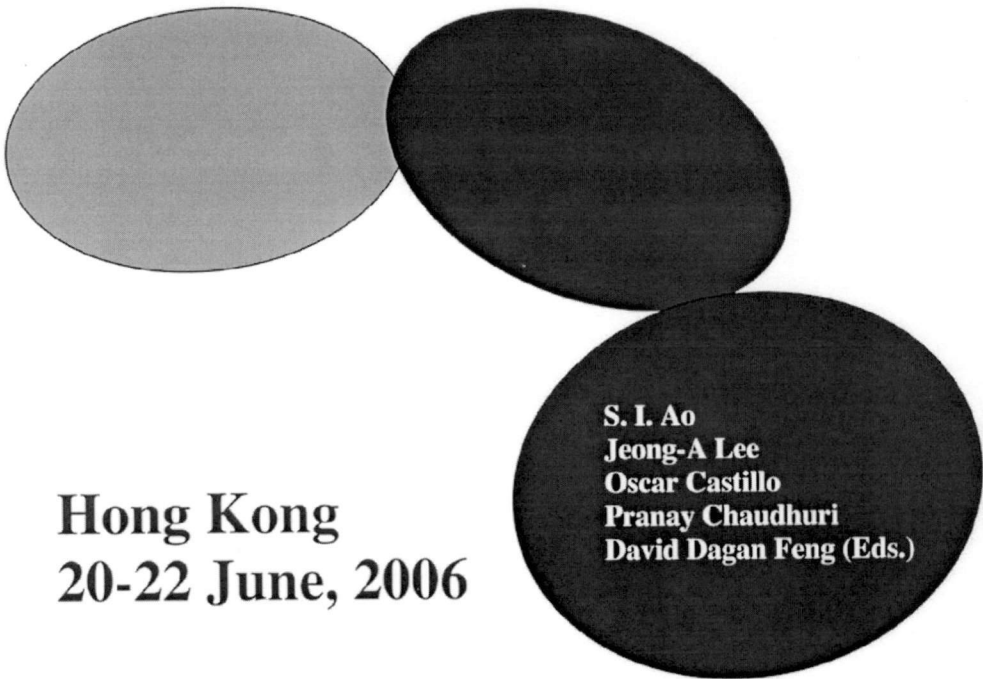
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ระหว่างการทำโครงการวิจัย

[1] Apinai Rerkratn, Chanrit Yossontiku, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil. “Electrical Capacitance Tomography System For Industrial Applications.” International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2006, Hongkong, 20-22 June, 2006. pp. 558-561.

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2006

International MultiConference of
**Engineers and Computer
Scientists 2006**



**Hong Kong
20-22 June, 2006**

**S. I. Ao
Jeong-A Lee
Oscar Castillo
Pranay Chaudhuri
David Dagan Feng (Eds.)**

IA ENG

International Association of Engineers

ISBN-10: 988-98671-3-3

ISBN-13: 978-988-98671-3-3

International MultiConference of
Engineers and Computer Scientists

IMECS 2006

20-22 June, 2006

Regal Kowloon Hotel, Kowloon, Hong Kong

Organizing Association:

IAENG

International Association of Engineers



International Association of Engineers
ISBN-10: 988-98671-3-3
ISBN-13: 978-988-98671-3-3

Proceedings

International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2006
--

The papers in the book consist of the proceedings of the conference mentioned above. They reflected the authors' opinions and their inclusion in the publication does not necessarily constitute endorsement by the conference committees and the International Association of Engineers.

Copyright and Reprint Policy:

Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries may photocopy the articles for private use of patrons in this proceedings publication. Copying of individual articles for non-commercial purposes is permitted without a fee, provided that credit to the source is given. For other copying, reprint, or republication permission purposes, permission from the publisher should be obtained.

Publisher:

Newswood Limited
International Association of Engineers

ISBN-10: 988-98671-3-3
ISBN-13: 978-988-98671-3-3

Additional copies may be ordered from:
Newswood Limited
Unit 1, 1/F, 37-39 Hung To Road, Kwun Tong, Hong Kong



International Association of Engineers

Watermarking Method for Copyright Protection and Retrieval of 2D/3D Model <i>Mahfuzur Rahman, and Harada Koichi</i>	548
Efficient Proposals in Reversible Jump MCMC for Disk Detection <i>Yuan Shen, and Elke Thonnes</i>	552
Electrical Capacitance Tomography System For Industrial Applications <i>Apinai Rerkratin, Chanrit Yossontiku, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul, and Manas Sangworasil</i>	558
A Survey of 3D Reconstruction Algorithms from 2D Images <i>Hassan Hajjdiab</i>	562
Video Object Retrieval using Color Features <i>Jau-Ling Shih, and Chih-Hao Chen</i>	568
Smooth Model from 3-D Surface Construction <i>Ahsan Ullah, and Koichi Harada</i>	574
An MPEG-4 Texture Coding Approach Using Refined Boundary Block Merging and Adaptive SA-DCT <i>Jau-Ling Shih, Chang-Hsing Lee, and Yen-Yi Chiang</i>	578
Image Processing Application in Toll collection <i>Yu-fai Fung, Homan Lee, and M. Fikret Ercan</i>	584
Vision Based Lane Detection using Genetic Algorithm <i>F. Samadzadegan, A. Sarafraz, and M. Tabibi</i>	589
A Biplane-Based Approach to Knee Joint Reconstruction without Calibration <i>Jiann-Shu Lee, Yung-Nien Sun, Chwin-Min Weng, Chii-Jeng Lin, Shih-Hao Yeh, and Hung-Chun Lee</i>	595
Low Complexity Design on H.263 Resolution Downscaling using Partial Loop Architecture <i>Tsung-Han Tsai, and Hsueh-Yi Lin</i>	599
Development of Bill-Counterfeit Prevention Technology for Multi-Function Peripherals <i>Yo-Chen Wang, Ya-Wen Chiang, Yan-Yau Jiang, and Yuan-Hsiang Chang</i>	603
Image Storage, Indexing and Recognition with Finite State Automata <i>Marian Mindek, and Michal Burda</i>	609
Progressive Videotext Regions Inpainting Based on Edge Detection and Statistic Method <i>Tsung-Han Tsai, Chih-Lun Fang, and Hsueh-Yi Lin</i>	614
A Scheme for (t, n)-Threshold Secret Image Sharing <i>Chao-Wen Chan, and Chin-Chen Chang</i>	619

Electrical Capacitance Tomography System For Industrial Applications

Apinai Rerkkratn, Chanrit Yossontiku, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil

Abstract—An electrical capacitance tomography system (ECT) has been developed. The system consists of a circular sensor with 8 electrodes. A charge generator injects charges into the sensor filled with objects different dielectric constants. The charges, in the form of potential dropped, on another electrode are measured and acquired digitally to a PC for calculating the capacitance and estimating the dielectric distribution. Linear back-projection algorithm (LBP) with iterations is applied for reconstructing cross sectional images of the sensor. Some experiments as the sensor filled with vegetable oil and a Teflon bar placed on a specified area was carried on. We have found that the minimum and maximum capacitance between the electrode pairs is about 0.1245 pF and 2.6760 pF respectively. These very low capacitance values suggested that the measuring circuit being implemented should have high sensitivity and also be insensitive to noise. The reconstructed images of the object closely resemble the cross-section of the specific test phantom. The low gray level artifacts, however often present in the reconstructed image because of the limitation of the LBP algorithm. This may be improved by using image thresholding or using suitable number of iterations.

Index Terms— ECT, Capacitance Measurement, Process Monitoring, Process Tomography.

I. INTRODUCTION

Electrical Capacitance Tomography is a modality used to visualize a cross section of an object filled in a defined sensor. Based on detection of electric charges on an electrode as another one used to inject the electric charges into the object, the method has been developed for visualizing the dielectric distribution in industrial two-component flow processes [1]-[3], such as oil/gas or water/oil flow in pipelines. It has advantages of being noninvasive, inexpensive, simple to implement and enabling high-speed image reconstruction. We propose in this paper a simple and inexpensive system by which validity has been shown promising results.

Manuscript received March 25, 2006. The Research Project was supported by National Research Council of Thailand.

Apinai Rerkkratn is with Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalalongkrung Rd, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand. (Phone: 662-739-0643; Fax: 662-739-0643; e-mail: apinai@yahoo.com).

Chanrit Yossontiku, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil are with Department of Electronic, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalalongkrung Rd, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand. (Phone: 662-739-0643; Fax: 662-739-0643; e-mail: krapinai@hotmail.com).

II. CALCULATION OF POTENTIAL DISTRIBUTIONS AND THE CAPACITANCE

Review Stage Our problems involve electrostatic fields and can be characterized by Laplace's equation,

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 \epsilon_r(x, y) \nabla \phi(x, y)] = 0 \quad (1)$$

where ϵ_0 is the permittivity of free space.

$\epsilon_r(x, y)$ is the relative permittivity of medium in two dimensions.

$\phi(x, y)$ is the potential distributions in two dimensions.

Due to the physical model, the finite element method is employed to calculate numerically the potential distributions in the objects filled in the sensor. The capacitance used for developing the sensitivity distribution are estimated from the number of charges on the detecting electrodes using the obtained potential distributions and done through Gauss's law in two dimensions. The capacitance are given by,

$$C = \frac{q}{V_c} \quad (2)$$

where V_c is the potential difference between the source electrode and the detecting electrodes.

q are the charges distributed on the detecting electrodes.

III. IMAGE RECONSTRUCTION

Linear back-projection algorithm (LBP) [4] is used for approximating the dielectric distribution in cross-sectional image. To improve the image quality, the iteration is applied. In reconstructing process, the image area is divided into 3025 pixels with gray levels represented by $G(p)$. The gray level for the p^{th} pixel can be calculated from the following equation,

$$G(p) = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^8 C_{ij}^p S_{ij}(p)}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^8 S_{ij}(p)} \quad (3)$$

where p is the sequence number of pixels.

i is the sequence number of the source electrode.
 j is the sequence number of the detecting electrode
 C_y^m is the normalized capacitance given by,

$$C_y^m = \frac{C_y^m - C_y^{Substance1}}{C_y^{Substance2} - C_y^{Substance1}} ; i = 1..7, j = i+1..8 \quad (4)$$

where C_y^m is the measured capacitance.
 $C_y^{Substance1}$ and $C_y^{Substance2}$ are the capacitance when the sensor is filled with different substances.

$S_y(p)$ is the relative capacitance change between electrode pair i - j and given by,

$$S_y(p) = \left[\frac{C_y^{Substance2,p} - C_y^{Substance1}}{C_y^{Substance2} - C_y^{Substance1}} \right] \left[\frac{I}{E_{Substance2} - E_{Substance1}} \right] \left[\frac{A_{max}}{A_p} \right] \quad (5)$$

where $C_y^{Substance2,p}$ is the capacitance between electrode pair i - j when only the pixel p is assigned to has the relative permittivity of substance2 and the remaining pixels have that of substance1.

$E_{Substance1}$ and $E_{Substance2}$ is the relative permittivity of filled substance no.1 and substance no.2 respectively.

A_{max} is the cross-sectional image area.

A_p is the area of pixel p .

Linear back-projection based on iterative algorithm can be written as

$$G_{k+1} = G_k + \alpha S (C - SG_k) \quad (6)$$

where k is the k^{th} iteration.
 α is the relaxation parameter of the iteration.
 C is the normalized capacitance.
 S is the relative capacitance change.

The gray level is displayed by the number of integer 0-255, and is calculated as mentioned above.

IV. SENSOR FOR EXPERIMENTS

The sensor used in our experiments is a circular cross section sensor made from a polyvinyl chloride pipe of 114 mm in diameter. The 8 electrodes made from copper sheets are symmetrically mounted on the periphery around the pipe with 5 mm. apart from neighboring and covered by 1 mm. thick epoxy resin. The size of each electrode is 100 mm. in length and 40 mm. in width. Besides, a copper shield is placed on the outer surface of the frame for resisting any electrical interferences.

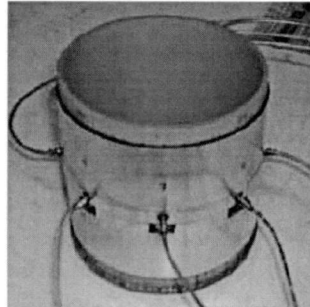


Fig. 1 Sensor used in the experiments

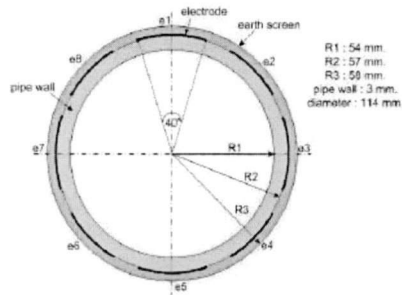


Fig. 2 Dimension of the sensor.

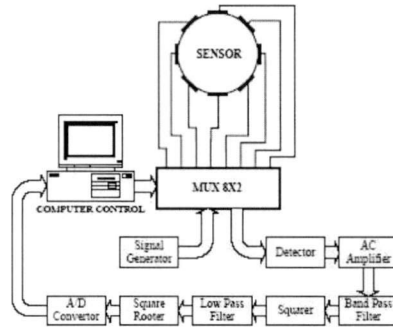


Fig. 3 Data collection system

V. DATA COLLECTION SYSTEM

Data collection system consists of 8X2 multiplexer circuit used to define the patterns of charge injection and potential measurement. A signal generator applies 500 KHz sine-wave through a pair of electrode which the other side attached to a stray-immune detector [5]-[6]. Then alternating current flows to the detector providing voltage at the output. The voltage from detector will be amplified before sending to band pass filter (500 KHz) for rejecting any interference. An analogue multiplier circuit based on a square law technique consequently provides demodulated signal from the band pass filter. Squared amplitude signals from the multiplier circuit consist of DC and 1 MHz sine-wave components. A low-pass filter with cut-off frequency 10 KHz is used to reject 1 MHz component. The DC signal from low-pass filter is sent to a square rooter circuit to obtain the DC level corresponding to the capacitance of under measuring. The capacitance measurements are performed by the following manner. Only one electrode, called the source electrode, is applied by a positive potential, another one, called the detecting electrode, is switched to detector circuit and the rest electrodes are kept at earth potential as the copper shielding. The charges between electrode pair 1-2, 1-3, ..., 1-8 are measured. Subsequently, the charges between electrode pairs of 2-3, 2-4, ..., 2-8 are measured. The remaining independent charge measurements are achieved in this manner. Finally a total of 28 measurements are performed.

VI. EXPERIMENTAL RESULTS

A Teflon bar ($\epsilon_r=2.76$) was placed in the sensor filled with a vegetable oil ($\epsilon_r=3$). Then the 28 charge measurements between the electrode pairs were carried on with data collection. The data were sent to a microcomputer for image reconstruction by using typically 10 iterations. The results are displayed in gray level.

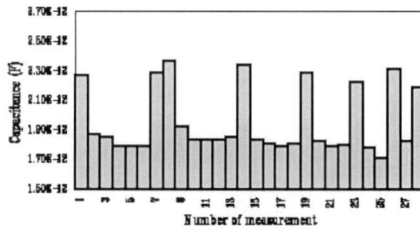


Fig. 4 Capacitance of measurement

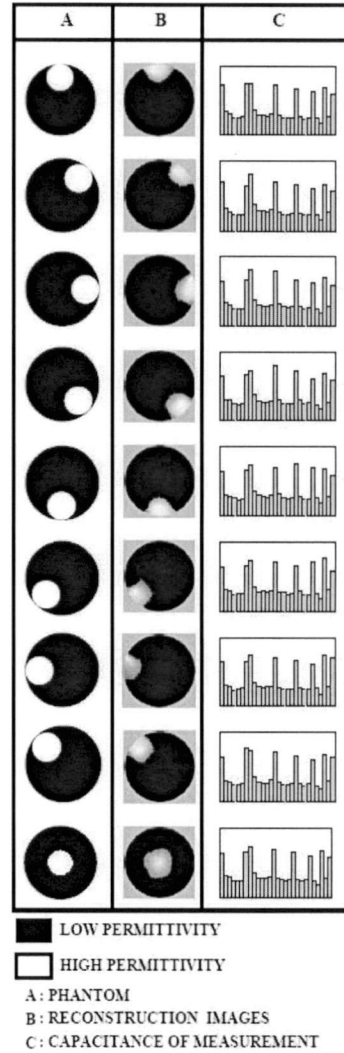


Fig. 5 Phantom, Reconstruction images and capacitance of measurement (1 object).

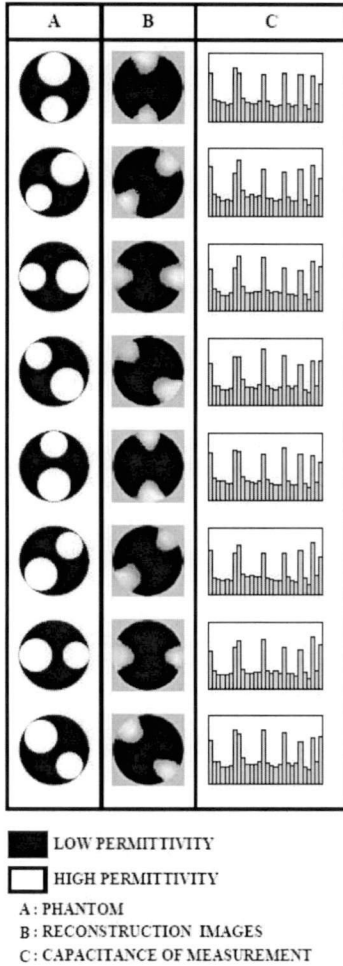


Fig. 6 Phantom, Reconstruction images and capacitance of measurement (2 object).

VII. CONCLUSIONS AND DISCUSSION

The ECT system has briefly described in this paper. The main components are circular cross section sensor with 8 electrodes, electronic systems for charge injection and for acquiring the data. The LBP algorithm based on iterations was implemented using Delphi® programming language for

reconstructing the images on a PC. The capacitance values between 28 electrode pairs were measured as the sensor filled with vegetable oil and a Teflon bar placed on specified area. To improve image quality, 10 typical iterations of image reconstruction were performed. In the experiments the minimum and maximum capacitance between the electrode pairs was found about 0.1245 and 2.6760 pF respectively. These very low capacitance values suggested that the measuring circuit should have high sensitivity and also be insensitive to noise. The reconstructed images of the large size of object closely resemble the cross-section of the specific test phantom more than the small one. The low gray level artifacts often present in the reconstructed image because of the limitation of the LBP, but this can be improved by using a thresholding method or using suitable number of iterations.

REFERENCES

- [1] T. Dyakowski, R. B. Edwards, C. G. Xie and R. A. Williams, "Application of capacitance tomography to gas-solid flows" *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, No. 13, 1997, pp. 2099-2110.
- [2] Zhiyao Huang, Baoliang Wang and Haiqing Li, "Application of Electrical Capacitance Tomography to the Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow" *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary*, May 21-23, 2001 pp. 341-345.
- [3] Anton Fuchs, Bernhard Brandstätter, Daniel Watzzenig, Gert Holler and Bernhard Kortschak, "Flow Profile Estimator for Closed Pipes Based on Electrical Capacitance Tomography Techniques" *IMTC 2004: Instrumentation and Measurement Conference, Como*, 18-20 May 2004, pp. 2326-2331.
- [4] R. A. Williams, M. S. Beck, "Process Tomography: Principles, Techniques and Applications" Butterworth-Heinemann, 1995.
- [5] W.Q. Yang, T.A. York "New AC-based capacitance tomography system" *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 146 No. 1, January 1999.
- [6] H.Hahnel, W.Q. Yang and T.A. York "An AC-based capacitance measuring circuit for tomography systems and its silicon chip design" *IEE Colloquium: Advances in sensors*, London, 7 Dec. 1995.