

รายงานการวิจัย

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหล
ภายในท่อแบบเวลาจริง

**Electrical Capacitance Tomography System for Real-Time
Flow Monitoring in Pipe**

จัดทำโดย

นายอภินัย ฤกษ์รัตน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

RCH สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RC

78.7

.T6

๐๒๕๕๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **105788**
วัน,เดือน,ปี..... - 2 S.ค. 2552

b. 10160891
i.....

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) "ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหล ภายในท่อแบบเวลาจริง"

(ภาษาอังกฤษ) "Electrical Capacitance Tomography System for Real-Time Flow Monitoring in Pipe"

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

หน่วยงานที่รับผิดชอบงานวิจัย และที่อยู่

กอง/คณะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
กรม/มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กระทรวง/ทบวง กระทรวงศึกษาธิการ
ที่อยู่ ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 0-2739-2407 โทรสาร 0-2739-2406

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง โดยโครงสร้างของระบบจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ทรงกระบอกหน้าตัดเป็นวงกลมซึ่งติดตั้งอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรดโดยรอบ วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า เก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า และทำการประมวลผลก่อนที่จะแสดงผลออกมาเป็นภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณการกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่โหนดของพื้นที่ย่อยๆ ของภาคตัดขวางภายในวัตถุนั้น โดยจะใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์และวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน (Linear back-projection Algorithm) สำหรับการสร้างภาพกลับแสดงการกระจายตัวของไดอิเล็กทริกของวัตถุที่เป็นองค์ประกอบภายในที่มีค่าเพอมีตริวิตีแตกต่างกัน โดยสามารถแสดงเป็นภาพตัดขวางของวัตถุภายในท่อ และเพื่อให้ภาพที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นจะใช้อัลกอริทึมการทำซ้ำ (Iterative Algorithm) และการทำเทรซโฮลด์เข้ามาช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพ จากผลการทดลองกับท่อที่บรรจุน้ำมันและอากาศที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกันพบว่าระบบสามารถแสดงภาพตัดขวางระดับเทา (Gray Level) ของวัตถุได้ใกล้เคียงกับภาพตัดขวางจริงของวัตถุภายในท่อ

ABSTRACT

This research project presents the system development for real-time flow monitoring in pipe. The system consists of a cylindrical sensor installing 8 electrodes surrounding the external surface of pipe, capacitance measuring circuit, signal multiplexer circuit, A/D converter circuit and computer for controlling capacitance measurement and processing the image reconstruction. The cross-section image reconstruction of dielectric distribution in pipe is based on the finite element method and linear back-projection algorithm (LBP) method. The iterative algorithm and threshold method also have been used to improve the image quality. The experimental results of the sensor filled with two different permittivity (air and oil) test phantoms have been displayed in gray level. The reconstructed images are closely resemble with the cross-section of the real object in pipe.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือเป็นอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำและข้อมูลต่างๆจากบุคคลต่อไปนี้

1. ดร. กิติพล ชิตสกุล ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษาในการทำโครงการวิจัย
2. นายชาญฤทธิ ยศสันติกุล ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับเขียนรายงานโครงการวิจัย
3. นาย ธนากร เลิศภักดี ที่ช่วยให้คำปรึกษา เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับเขียนรายงานโครงการวิจัย และช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

อภิไฉย ฤกษ์รัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 คุณสมบัติ และ รายละเอียดการทำงานของชิ้นงานใน โครงการวิจัย.....	3
1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน โครงการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	8
2.1 โครงสร้างของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	10
2.1.1 เซนเซอร์คาร์ปาซิแตนซ์(Capacitance Sensor).....	10
2.1.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	12
2.1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการวัดและประมวลผลสัญญาณ.....	14
บทที่ 3 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	15
3.1 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์(Sine Wave Generator).....	17
3.3 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์(Multiplexer).....	18
3.4 วงจรขยายสัญญาณ (AC-Amplifier).....	20
3.5 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ (Multiple Feedback Bandpass Filter).....	22
3.6 วงจรแปลงอาร์เอ็มเอสเป็นแรงดันดีซี (RMS to DC Converter).....	23
3.7 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิตอล (A to D Converter).....	25
3.8 การ์ดอินเทอร์เฟซ 8255 (ET-8255 Interface Card).....	25
3.9 ภาคจ่ายไฟ(Power Supply).....	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 โปรแกรมสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	30
4.1 หลักการพื้นฐาน.....	30
4.2 วิธีการหาค่าเซนซิวิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT.....	32
4.3 การสร้างภาพกลับ.....	34
4.3.1 การสร้างภาพกลับโดยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน.....	34
4.3.2 การสร้างภาพกลับโดยใช้วิธี ART.....	37
4.4 การปรับปรุงภาพ.....	40
4.4.1 วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลัก projected Landweber iteration.....	40
4.4.2 การใช้วิธีเทอร์ชโฮลด์.....	42
4.5 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	43
บทที่ 5 การออกแบบระบบจำลองสำหรับทดสอบระบบ.....	50
5.1 ส่วนสำหรับเติมของเหลวเข้าไปในท่อ (น้ำ, น้ำมัน).....	51
5.2 ส่วนของท่อสำหรับนำมาทดสอบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ.....	51
5.3 ส่วนที่ใช้สำหรับการปล่อยน้ำหรือน้ำมันออกจากท่อเพื่อทำการทดสอบการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อในรูปแบบต่างๆ.....	52
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง.....	55
6.1 การทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมากับระบบจำลอง.....	55
6.2 การทดสอบ โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าจากการวัดจริง.....	59
บทที่ 7 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก ก ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของการติดอิเล็คโทรดแต่ละลักษณะ	11
2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอาร์จ-คิสอาร์จ และวงจรเอช-เบส.....	13
3.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุทของไอซี MAX 038.....	17
3.2 สถานะสวิทช์.....	20
3.3 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12.....	25
3.4 คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET – 8255.....	26
3.5 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255.....	27

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงระบบพื้นฐานของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง.....	2
1.2 เซนเซอร์ที่ติดกับวัตถุที่จะทำการวัด(ท่อ).....	3
1.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้ารอบๆท่อ.....	4
1.4 ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้น.....	4
1.5 ส่วนประกอบทั้งหมดของชิ้นงานที่จะส่งมอบให้คณะ.....	5
2.1 การประยุกต์ใช้ระบบ ECT ในการมอนิเตอร์การไหลของ น้ำมัน/แก๊ส.....	8
2.2 การประยุกต์ใช้ระบบ ECT ในการมอนิเตอร์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง.....	8
2.3 ตัวอย่างลักษณะของระบบ ECT ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน.....	9
2.4 ส่วนประกอบของระบบ ECT.....	10
2.5 ตัวอย่างการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบต่างๆเข้ากับท่อที่ทำการทดสอบในการใช้งานจริง.....	12
2.6 ตัวอย่างของลักษณะชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจริง.....	14
2.7 ตัวอย่างของภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	14
3.1 โครงสร้างระบบ ECT.....	15
3.2 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด.....	16
3.3 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้ไอซี MAX038.....	17
3.5 รูปแบบการต่อสวิตช์ในวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์.....	19
3.6 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์(Multiplexer).....	19
3.7 วงจรขยายสัญญาณ (AC Amplifier).....	20
3.8 แสดงจุดตัดความถี่ของวงจรขยาย U4 และความถี่ที่ใช้งาน.....	21
3.9 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์แบบมัลติเฟดแบค(Multiple Feedback Bandpass Filter).....	22
3.10 การตอบสนองความถี่ของวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ในรูปแบบที่ 3.14.....	23
3.11 วงจรแปลงอาร์เอ็มเอสเป็นแรงดันดีซี(RMS to DC Converter).....	24
3.12 เอาท์พุทของวงจรในรูปแบบที่ 3.16 เมื่อवादใหม่.....	24
3.13 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลรุ่น ET-AD12.....	25
3.14 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET - 8255.....	26
3.15 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม.....	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 วงจรภายในของการ์ด ET-8255.....	28
3.17 วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply).....	29
4.1 ตัวนำสองตัวเมื่อวางอยู่ระหว่างวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า.....	30
4.2 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ.....	33
4.3 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8	34
4.4 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของเซ็นเซอร์ออกเป็นพิคเซลย่อยๆในเซ็นเซอร์แบบวงกลม.....	35
4.5 รูปแบบการฉายแสง และการคำนวณค่าแฟกเตอร์น้ำหนักของอัลกอริทึมเชิงพีชคณิต.....	37
4.6 ลักษณะของหน้าจอ โปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	43
4.7 หน้าจอของ โปรแกรม Electrical Capacitance Tomography System for Real-Time Flow Monitoring in Pipe เมื่อเปิดไฟล์ ECT.EXE.....	44
4.8 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Setting.....	45
4.9 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OK.....	45
4.10 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Normalized C.....	46
4.11 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OPEN.....	46
4.12 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม SAVE.....	47
4.13 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OK.....	47
4.14 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกรอกตัวเลขจำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ.....	48
4.15 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Grey Level	48
4.16 หน้าจอของ โปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OPEN เพื่อทำการสร้างภาพ.....	49
5.1 ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้น.....	50
5.2 ลักษณะของส่วนที่ใช้เดิมของเหลวลงไปในท่อ.....	51
5.3 ลักษณะของท่อพีวีซีที่ใช้ในการทดสอบระบบ.....	51
5.4 ลักษณะของส่วนประกอบสำหรับสร้างระบบจำลองสำหรับทดสอบระบบ.....	52
5.5 เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
5.6 ลักษณะของฝาปิดท่อที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้สังเกตลักษณะของวัตถุภายในท่อ.....	53
5.7 ลักษณะของวาล์วที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำหรือน้ำมัน.....	53

5.8	ลักษณะของแท่นสำหรับยึดแบบจำลองและภาชนะที่ใช้ในการบรรจุน้ำมัน.....	54
5.9	ลักษณะของระบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมา.....	54
6.1	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ารวมที่วัดได้และ ค่าของระดับปริมาณน้ำมันพีชที่อยู่ในท่อที่ระดับต่างๆ.....	55
6.2	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 100% (เต็มท่อ).....	56
6.3	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 65%.....	56
6.4	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 50%.....	57
6.5	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 25%.....	57
6.6	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 0%.....	58
6.7	กราฟความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็ก โทรดที่ทำการวัดเมื่อระดับน้ำมันปริมาณมีค่าต่างๆ.....	58
6.8	โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมา	59
6.9	ระบบจำลองที่สร้างขึ้นมาทดสอบโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า.....	60
6.10	ระบบทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง.....	60
6.11	ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 100%.....	61
6.12	ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 65%.....	62
6.13	ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 50%.....	63
6.14	ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 30%.....	64
6.15	ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 0%.....	65
ก1	ลักษณะของระบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมา.....	68
ก2	ต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง.....	68

บทที่ 1

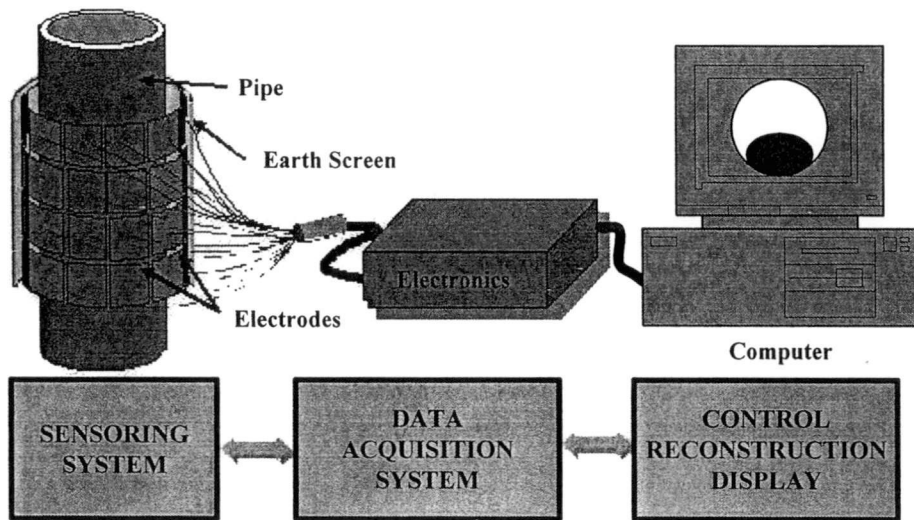
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสังเกตพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อ เช่น น้ำมัน เม็ดพลาสติก หรือน้ำที่ไหลภายในท่อจะต้องอาศัยการใช้ท่อที่เป็นพลาสติกใสหรือแก้ว ซึ่งเมื่อมีการใช้งานไปนานๆ ก็จะเกิดคราบสิ่งสกปรกต่างๆเกาะอยู่ทำให้การสังเกตพฤติกรรมการไหลของวัตถุภายในท่อเป็นไปได้ยาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า สำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง โดยใช้เทคนิคการวัดค่าคาร์ปาซิแตนซ์จากภายนอกรอบๆท่อที่ต้องการสังเกตพฤติกรรมการไหลของวัตถุภายในท่อ สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography System; ECT) ที่ทางผู้วิจัยนำเสนอ มีข้อดีคือ ระบบที่พัฒนาขึ้นมาจะไม่ส่งผลกระทบต่อหรือรบกวนการไหลของวัตถุภายในท่อที่ทำการวัด ระบบมีขนาดเล็ก มีความปลอดภัยสูง มีความเร็วในการสร้างภาพสูง เป็นเครื่องมือสามารถสร้างได้โดยราคาต่ำกว่าการสร้างภาพตัดขวางแบบอื่นๆ โดยระบบมีความเหมาะสมสำหรับสร้างภาพตัดขวางเพื่อดูลักษณะการกระจายของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ภายในท่อในรูปแบบของภาพตัดขวาง 2 มิติในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้สังเกตการไหลหรือการกระจายตัวของก๊าซ/น้ำมันในท่อ หรือใช้สำหรับสังเกตการแยก/ผสมสารในกระบวนการทางเคมี เป็นต้น

ในโครงการวิจัยนี้กล่าวถึงการพัฒนาด้านแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า สำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงเพื่อนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม จากการศึกษาในเบื้องต้นทำให้ทราบว่าองค์ประกอบพื้นฐานของระบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเซ็นเซอร์ที่ติดกับวัตถุที่จะวัด (Primary sensor) ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าต่างๆ จากภายนอก ซึ่งเรียกว่า Earth screen และ อิเล็กโทรดซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ด้านนอกของวัตถุที่ต้องการนำมาสร้างภาพตัดขวาง ส่วนที่สองคือวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล ตลอดจนวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และส่วนที่สามคือ อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางที่สัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยส่วนประกอบของระบบทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1

Electrical Capacitance Tomography System



รูปที่ 1.1 แสดงระบบพื้นฐานของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง[1]

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเน้นการออกแบบสร้างในส่วนของฮาร์ดแวร์ พัฒนาและอิมพลีเมนต์ อัลกอริทึมเพื่อเป็นเครื่องต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงโดยส่วนของฮาร์ดแวร์จะออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า, วงจรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล ตลอดจนวงจรจัดรูปแบบในการวัดให้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อเก็บข้อมูลอย่างอัตโนมัติและลดเวลาในการเก็บข้อมูลลง สำหรับในส่วนของซอฟต์แวร์จะพัฒนาอัลกอริทึมโดยใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน (Linear Backprojection) ร่วมกับเทคนิคการทำซ้ำ (iteration) ในการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

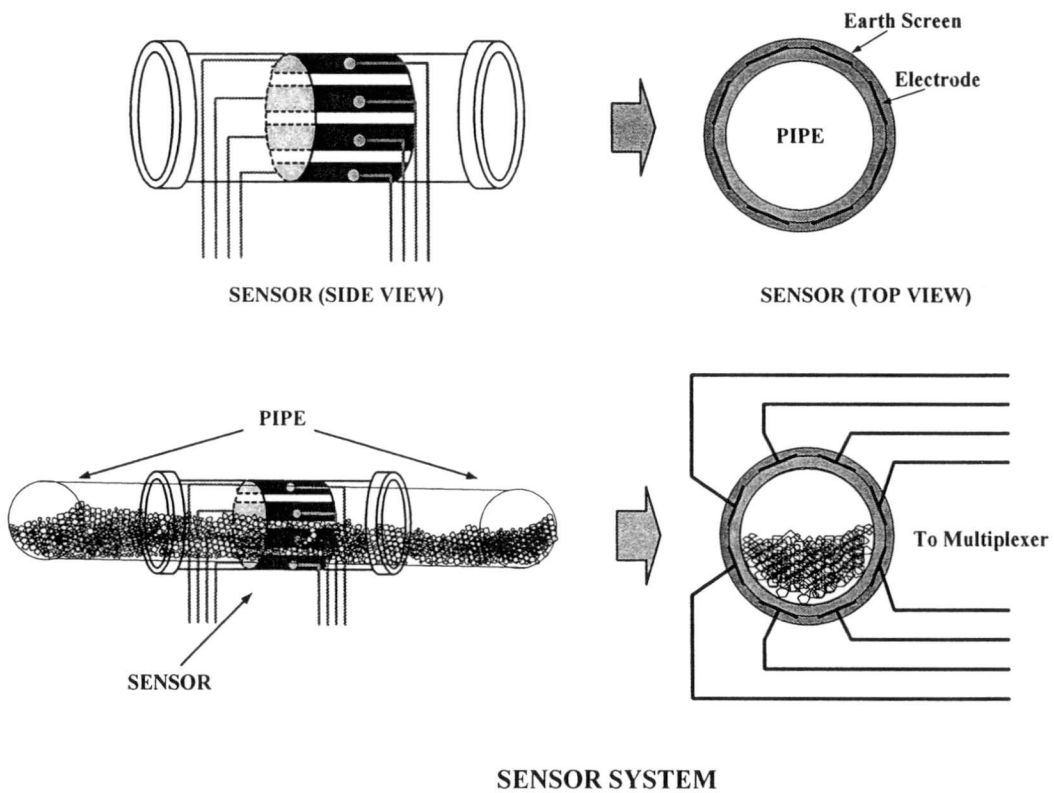
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงโดยใช้เทคนิคการวัดค่าคาร์ปาคิตีแตนซ์จากภายนอก
2. พัฒนาเทคนิคในการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุโดยอาศัยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าขององค์ประกอบภายในวัตถุ
3. สร้างบุคลากรทางเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์
4. พัฒนาเทคนิคในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing)

1.3 คุณสมบัติ และ รายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย

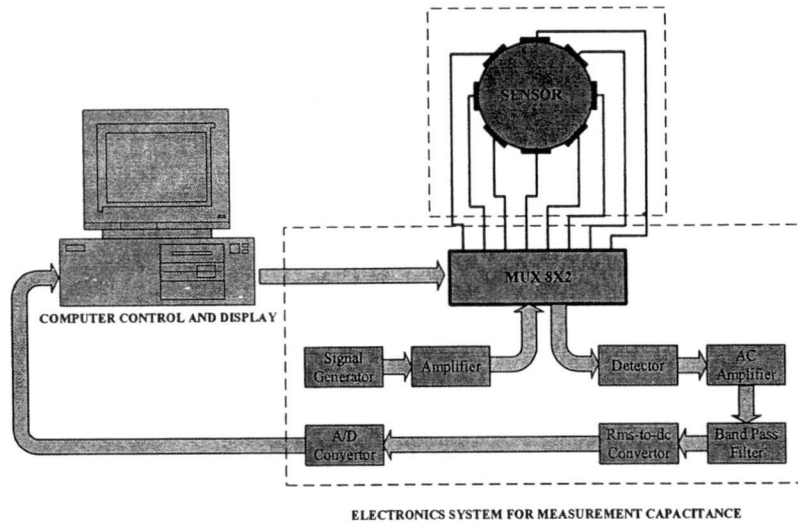
สำหรับรายละเอียดของโครงการวิจัยที่นำเสนอจะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. เซนเซอร์ที่ติดกับวัตถุที่จะทำการวัด (ท่อ) ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าต่างๆ จากภายนอก และอิเล็กโทรดซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่รอบๆท่อที่จะนำมาสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เซนเซอร์ที่ติดกับวัตถุที่จะทำการวัด (ท่อ)

2. วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้ารอบๆท่อที่จะสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ วงจรขยายสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดจะทำหน้าที่วัดและส่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณและสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ

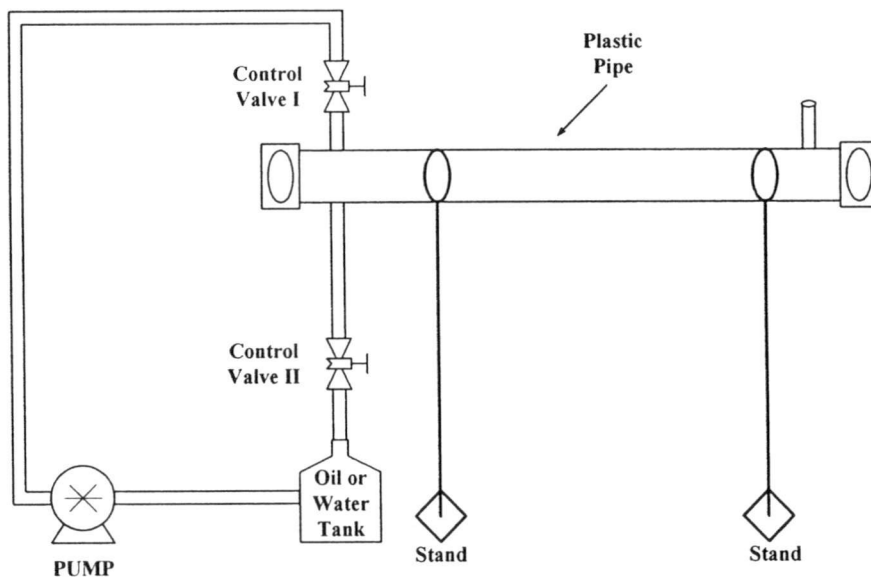


รูปที่ 1.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้ารอบๆท่อ

3. อัลกอริทึมในการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อแบบเวลาจริงจากค่าคาร์ปาคิแทนซ์ที่วัดได้ โดยอัลกอริทึมจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโพรเจกชัน (Linear Backprojection) ร่วมกับเทคนิคการทำซ้ำ (iteration) ในการสร้างภาพตัดขวาง

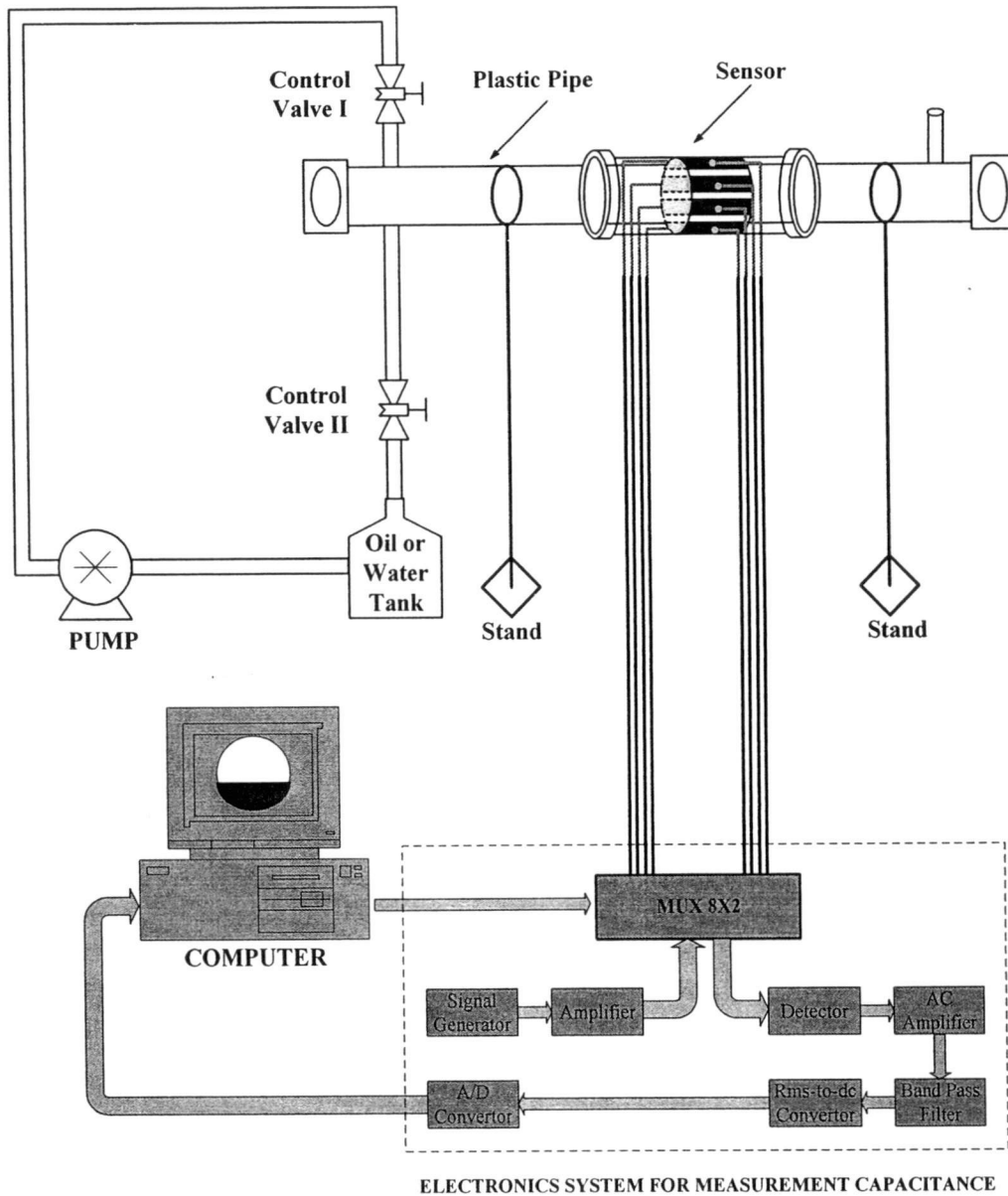
4. ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นซึ่งจะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- 4.1 ส่วนของปั๊ม(Pump)สำหรับควบคุมระดับของเหลวภายในท่อ (น้ำ, น้ำมัน)
- 4.2 ส่วนของท่อส่งน้ำหรือน้ำมันสำหรับนำมาทดสอบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ (น้ำ, น้ำมัน)
- 4.3 ส่วนที่ใช้สำหรับการปล่อยน้ำหรือน้ำมันออกจากท่อเพื่อทำการทดสอบการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 1.4 ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้น

สำหรับส่วนประกอบทั้งหมดของชิ้นงานที่จะส่งมอบให้คณะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 1.5 ส่วนประกอบทั้งหมดของชิ้นงานที่จะส่งมอบให้คณะ

1.4 ระยะเวลาดำเนินงานโครงการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงสำเร็จรวดเร็วภายในระยะเวลาที่กำหนดประมาณ 12 เดือน จึงขอแบ่งวิธีการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปตลอดจนเทคนิคของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

เป็นการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงได้แก่ วงจรสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าจากวัตถุ, วงจรสำหรับจัดรูปแบบในการวัด, วงจรสำหรับเก็บข้อมูลจากวัตถุที่ต้องการจะสร้างภาพ ตลอดจนแนวทางในการประยุกต์ใช้งานระบบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อในด้านต่างๆ

2. ศึกษาอัลกอริทึมในการสร้างภาพของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

เป็นการศึกษาวิธีการสร้างภาพของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงจากข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ ซึ่งต้องการอัลกอริทึมที่ให้ความถูกต้องของภาพและความเร็วในการสร้างภาพที่ค่อนข้างสูง โดยในโครงการวิจัยนี้จะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจคชัน(Linear Backprojection) ร่วมกับเทคนิคการทำซ้ำ(iteration) ในการสร้างภาพตัดขวาง

3. ออกแบบและสร้างระบบเก็บข้อมูล

เป็นการออกแบบและสร้างในส่วนของฮาร์ดแวร์ได้แก่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจัดรูปแบบในการวัด, วงจรสำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าจากวัตถุ, วงจรสำหรับเก็บข้อมูลจากวัตถุที่ต้องการจะสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อแบบเวลาจริงซึ่งวงจรเหล่านี้ต้องการความแม่นยำของการวัดสูงรวมทั้งความเร็วในการเก็บข้อมูลที่สูง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อที่มีความถูกต้องและรวดเร็ว

4. ทดสอบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

เป็นการทดสอบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบคุณสมบัติของระบบทั้งหมดที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมา

5. ปรับปรุงคุณภาพของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

เป็นการปรับปรุงระบบเก็บข้อมูลและอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริงเพื่อให้ข้อมูลที่วัดได้มีความสอดคล้องกับอัลกอริทึม ในการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อเพื่อให้ภาพที่สร้างได้มีความถูกต้องและชัดเจนยิ่งขึ้น

6. สร้างต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

เป็นการสร้างต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง, ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง รวมทั้งออกข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือที่สร้างขึ้น

7. สรุปและประเมินผล

สำหรับการทำวิจัยจะเริ่มตั้งแต่วันที่ได้รับการอนุมัติโครงการจนเสร็จสิ้นโครงการโดยใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 12 เดือน ตามแผนการดำเนินการตลอดโครงการวิจัยดังนี้

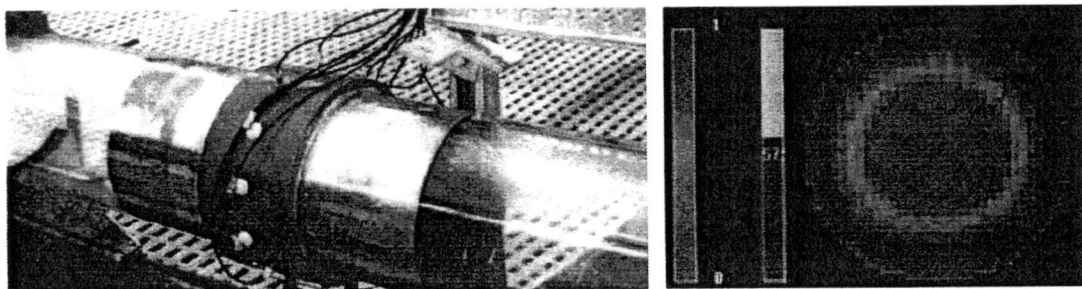
แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ช่วงระยะเวลาการดำเนินงาน(งบประมาณปี 2551)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปตลอดจนเทคนิคของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง													
2. ศึกษาอัลกอริทึมในการสร้างภาพของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง													
3. ออกแบบและสร้างระบบเก็บข้อมูล													
4. ทดสอบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง													
5. ปรับปรุงคุณภาพของระบบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ													
6. สร้างต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง													
7. สรุปและประเมินผล													

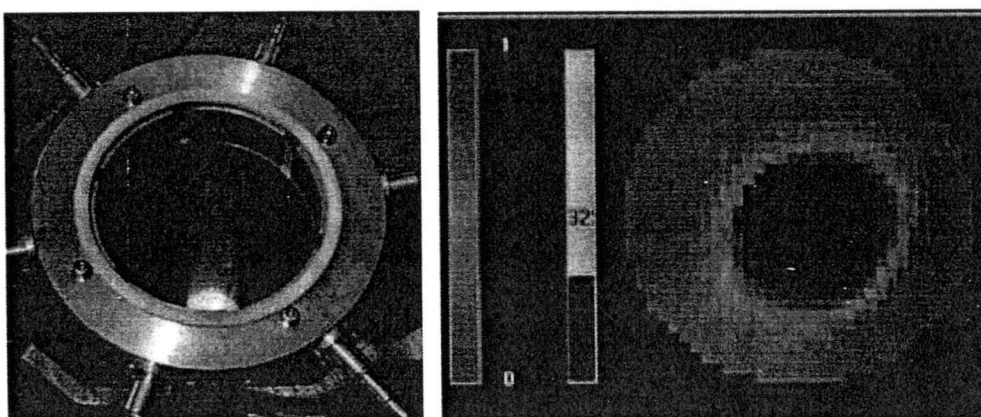
บทที่ 2

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า(Electrical Capacitance Tomography: ECT) เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้สังเกตหรือมอนิเตอร์การกระจายตัวของส่วนผสมที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกันภายในท่อหรือภาชนะที่ต้องการตรวจสอบโดยใช้การวัดคุณสมบัติทางความจุไฟฟ้าระหว่างคู่ของอิเล็กโทรดที่ติดอยู่รอบผิวของท่อหรือภาชนะที่นำมาตรวจสอบ จากนั้นจึงนำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มาทำการคำนวณโดยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงการกระจายตัวของวัตถุที่อยู่ภายในท่อหรือภาชนะที่ทำการทดสอบ ระบบ ECT สามารถประยุกต์ใช้งานกับท่อหรือภาชนะที่มีลักษณะไม่เป็นตัวนำ(Non-conducting material) เช่น พลาสติก, ไฮโดรคาร์บอน(Hydrocarbon) หรือแก้ว เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้นิยมใช้เป็นภาชนะในการผสมสารหรือวัสดุต่างๆในทางอุตสาหกรรม ทำให้ในปัจจุบันมีการนำเอาระบบ ECT มาใช้ในการมอนิเตอร์ขบวนการต่างๆในทางอุตสาหกรรมมากขึ้นดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2

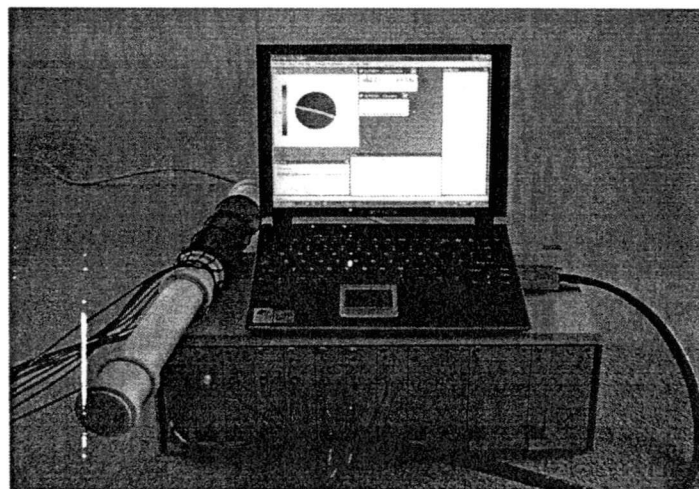
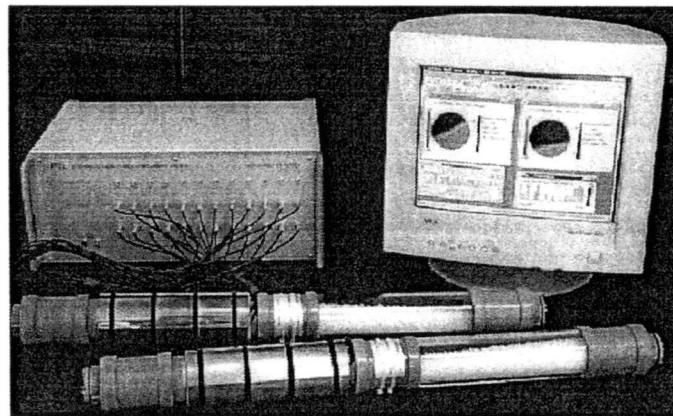
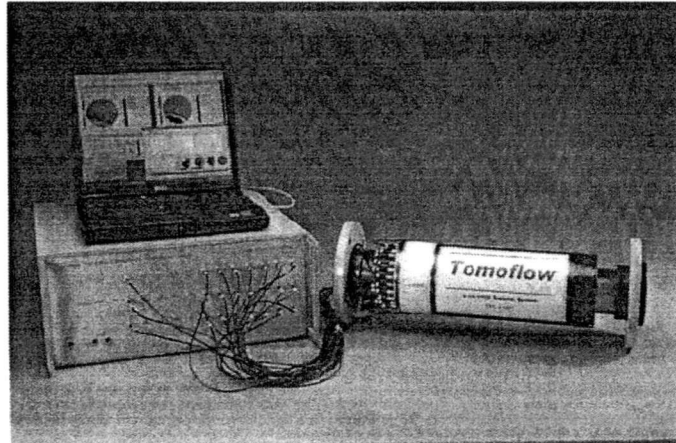


รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้ระบบ ECT ในการมอนิเตอร์การไหลของ น้ำมัน/แก๊ส[2]



รูปที่ 2.2 การประยุกต์ใช้ระบบ ECT ในการมอนิเตอร์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง[2]

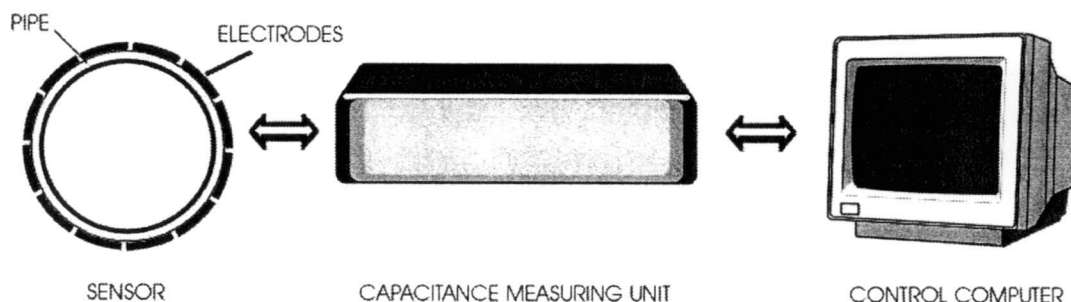
สำหรับค่าความละเอียด(Resolution) ของภาพตัดขวางที่ได้จากระบบ ECT จะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้ารอบๆท่อหรือภาชนะที่นำมาทดสอบ ซึ่งโดยปกติแล้วระบบ ECT จะให้ความละเอียดของภาพตัดขวางไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามระบบสามารถพัฒนาให้มีความเร็วในการสร้างภาพที่สูง(High frame rates) ซึ่งในปัจจุบันสามารถพัฒนาให้มีความเร็วในการสร้างภาพสูงมากกว่า 100 fps (frame per sec) โดยลักษณะของระบบ ECT ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะของระบบ ECT ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน[2-3]

2.1 โครงสร้างของระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

โครงสร้างของระบบ ECT จะประกอบไปด้วยตัวเซนเซอร์คาร์ปาซิแตนซ์ (Capacitance Sensor), วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการวัดและประมวลผลสัญญาณ โดยส่วนประกอบของระบบ ECT สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของระบบ ECT[2]

รายละเอียดของส่วนประกอบของระบบ ECT สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1.1 เซนเซอร์คาร์ปาซิแตนซ์ (Capacitance Sensor)

สำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ในระบบ ECT จะทำการสร้างโดยการติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้ากับท่อหรือภาชนะที่ต้องการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้ารอบวัตถุ โดยลักษณะของการติดตั้งอิเล็กโทรดที่นิยมใช้กันจะมีอยู่ 3 รูปแบบคือ

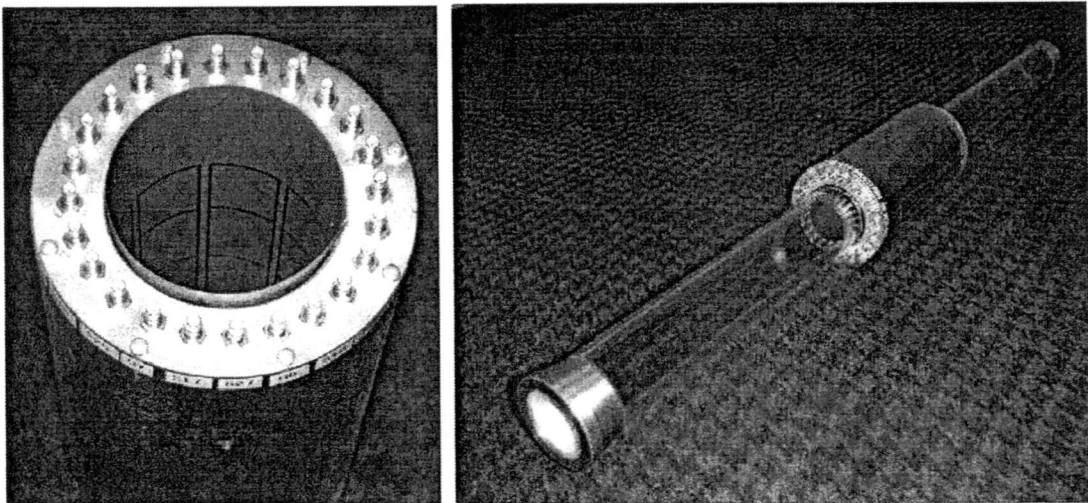
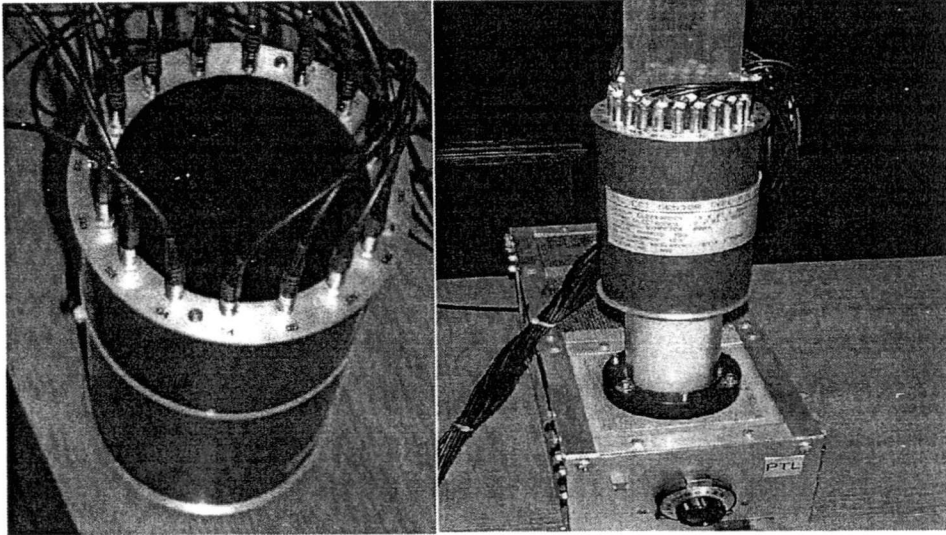
1. อิเล็กโทรดถูกติดตั้งอยู่ด้านในของท่อ (Internal electrodes)
2. อิเล็กโทรดถูกฝังอยู่ภายในของท่อ (Embedded electrodes)
3. อิเล็กโทรดถูกติดตั้งอยู่ด้านนอกของท่อ (External electrode)

สำหรับข้อดีและข้อเสียของการติดตั้งอิเล็กโทรดแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของการติดตั้งอิเล็กโทรดแต่ละลักษณะ

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

จากข้อดีและข้อเสียของการติดตั้งอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ในตารางที่ 2.1 จะพบว่า การติดตั้งในรูปแบบที่ 3 เป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากความง่ายต่อการสร้าง และอิเล็กโทรดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่นำมาตรวจสอบ ดังนั้นอิเล็กโทรดจะไม่ถูกกัดกร่อนในกรณีที่วัตถุภายใน เช่น เซอร์มิคอนดักทีบิลในการกักเก็บและที่สำคัญไม่มีผลกระทบต่อวัตถุหรือระบบควบคุมการไหลของระบบ โดยตัวอย่างการติดตั้งอิเล็กโทรดแบบต่างๆ เข้ากับท่อที่ทำการทดสอบในการใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการติดตั้งอิเล็กโทรดแบบต่างๆเข้ากับท่อที่ทำกรทดสอบในการใช้งานจริง[2]

2.1.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้า

วงจรที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบ ECT โดยวิธีหลักๆ 2 วิธี คือ วิธีการชาร์จ - ดิสชาร์จ (Charge / Discharge) ประจุผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด และวิธีการป้อนสัญญาณไซน์ (AC - Based) ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด สำหรับรายละเอียดแต่ละเทคนิคสามารถแสดงได้ดังนี้

1. วงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ (Charge / Discharge Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี ชาร์จ-ดิสชาร์จ[4,5] นั้นจะใช้หลักการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(DC) เข้าที่ตัวเก็บประจุ ทั้งขั้วบวก และกราวด์ สลับกันซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะ ชาร์จประจุ และดิสชาร์จประจุสลับกัน ส่วนแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ถูกวัด โดยในระบบ ECT นี้ ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เอาท์พุทคือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่อยู่ในรูปของศักดาไฟฟ้า

2. วงจรเอซี-เบส (AC - Based Circuit)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธี เอซี-เบส [4,5] นั้นจะใช้หลักการป้อนสัญญาณไซน์ผ่านตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด C_x ในลักษณะเหมือนกับการ คัปปลิ่ง (Coupling) สัญญาณ โดยสัญญาณ ไซน์ที่ผ่านตัวเก็บประจุ C_x จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_x ที่ต้องการวัดสำหรับข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรชาร์จ-ดิสชาร์จ และวงจรเอซี-เบส โดย [4]

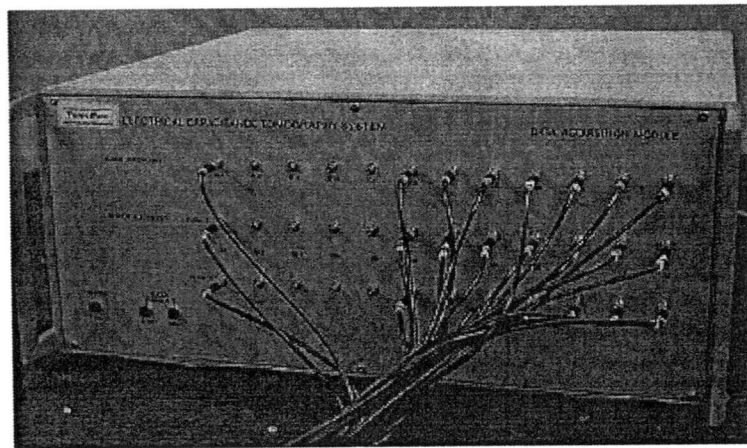
	วงจรชาร์จ - ดิสชาร์จ	วงจรเอซี-เบส
คุณสมบัติ	<ul style="list-style-type: none"> (1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง (stay-immune) (2) สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าละเอียดได้ที่ขนาด 0.3 fF (3) ใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (4) ความถี่ที่ใช้ในการชาร์จ-ดิสชาร์จ สูงถึง 2.5 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> (1) สามารถต้านทานต่อประจุไฟฟ้าแฝง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

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในตารางที่ 3.1 วงจรแบบ เอซี-เบส จะมีข้อดีมากกว่าวงจรแบบ ชาร์จ-ดิสชาร์จ และขณะเดียวกันทางด้านคุณสมบัติของวงจรแบบเอซี-เบส ก็ไม่ด้อยกว่า

ส่วนในเรื่องข้อเสียของวงจรแบบเอซี-เบส นั้นจะมีความซับซ้อนยุ่งยากและราคาที่สูงกว่าวงจรแบบชาร์จ-ดิสชาร์จ แต่ถึงอย่างไรในระบบ ECT ก็ยังมีต้นทุนที่ต่ำและความซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าระบบสร้างภาพตัดขวางแบบอื่นๆ

จากการศึกษาวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้ถูกนำมาใช้กับระบบ ECT และได้เปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรทั้งสองแบบ ดังนั้นการทดลองในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบ เอซี-เบส และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบ สร้างระบบจึงได้ตัดวงจรบางส่วนที่ไม่มีผลมากนักต่อค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยใช้วงจร เอซี-เบส และเอซี-แอมป์เพียงชุดเดียว ซึ่งเดิม [4] ได้ใช้วงจร เอซี-เบส และ เอซี-แอมป์ หนึ่งชุดต่ออิมพีแดนซ์ทรานส์ดิวเซอร์

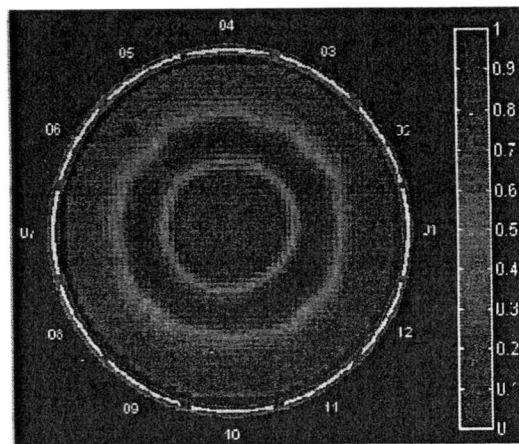
สำหรับตัวอย่างของลักษณะชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของลักษณะชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจริง [2]

2.1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการวัดและประมวลผลสัญญาณ

คอมพิวเตอร์จะใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า เก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า และทำการประมวลผลก่อนที่จะแสดงผลออกมาเป็นภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7

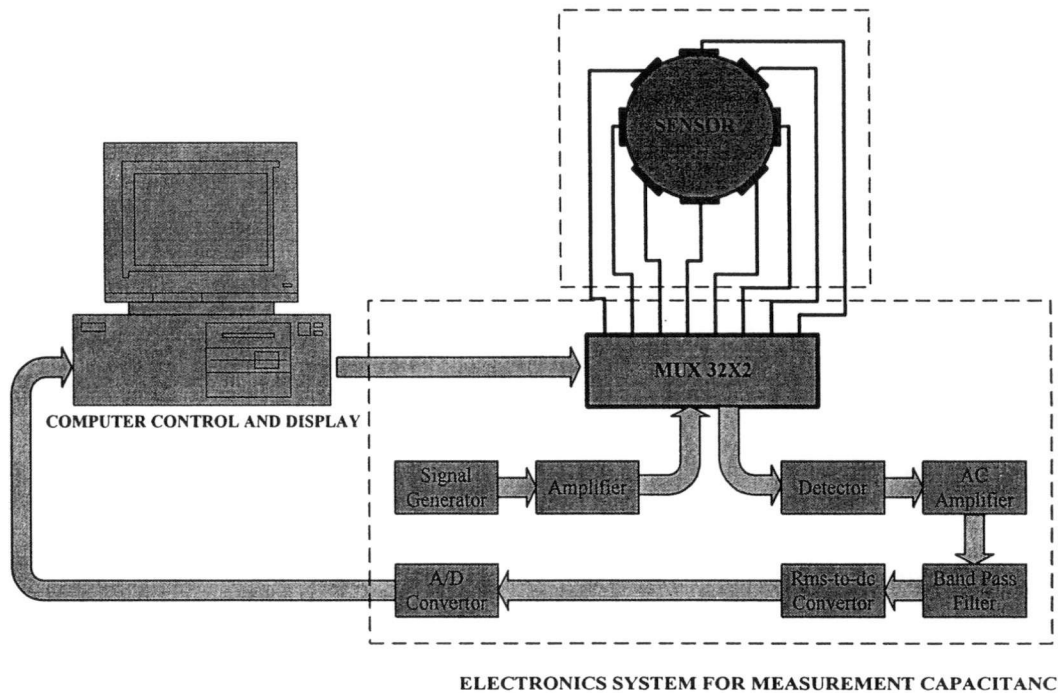


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า[2]

บทที่ 3

ระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

สำหรับระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จะใช้ระบบที่พัฒนามาจากโครงการวิจัยปี 2550 เรื่อง “ การพัฒนาระบบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ”[5] โดยระบบ ECT จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับส่วนที่จะวัด (Primary sensor) ซึ่งประกอบไปด้วย อิเล็กโทรดและส่วนที่ใช้ป้องกันสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่า Earth screen อิเล็กโทรดของระบบ ECT โดยส่วนใหญ่จะถูกติดอยู่ด้านนอกของส่วนที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ใช้วัดค่าสัญญาณไฟฟ้า และ เปลี่ยนค่าเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลทางดิจิทัล เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แล้วจึงแปลงเป็นค่าความจุไฟฟ้า ส่วนที่สาม คือ ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างภาพกลับซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ โดยทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Image reconstruction computer) โดยโครงสร้างระบบทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

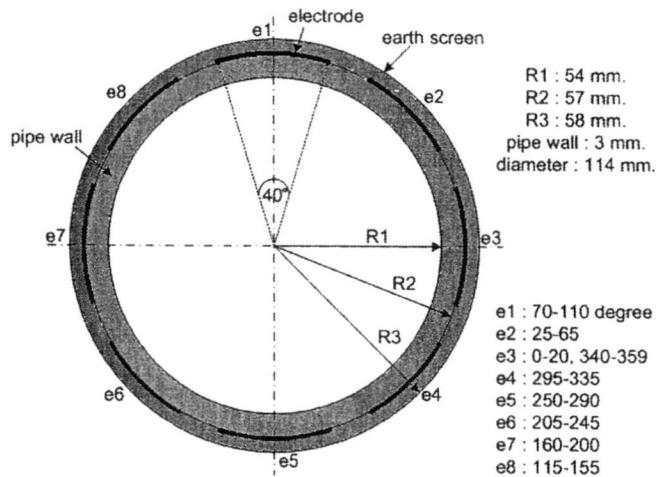


รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบ ECT

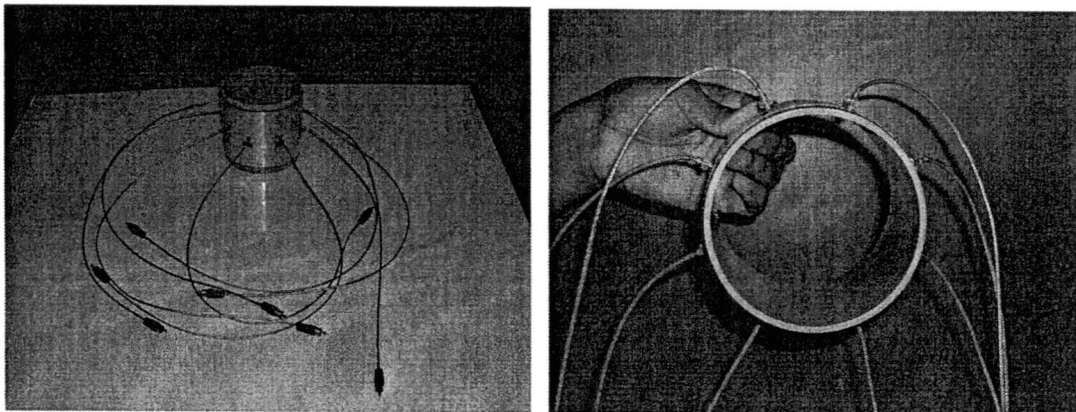
สำหรับรายละเอียดในการออกแบบวงจรผู้วิจัยอ้างอิงจากโครงการวิจัยปี 2550 เรื่อง “ การพัฒนาระบบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ”[5] โดยลักษณะของส่วนประกอบของวงจรแต่ละส่วนสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทดลองในระบบ ECT นี้จะเป็น แบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม ซึ่งจะมีลักษณะของการติดตั้งอิเล็กโทรดตามโครงสร้างดังในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมและลักษณะของตำแหน่งอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.3 ตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลอง

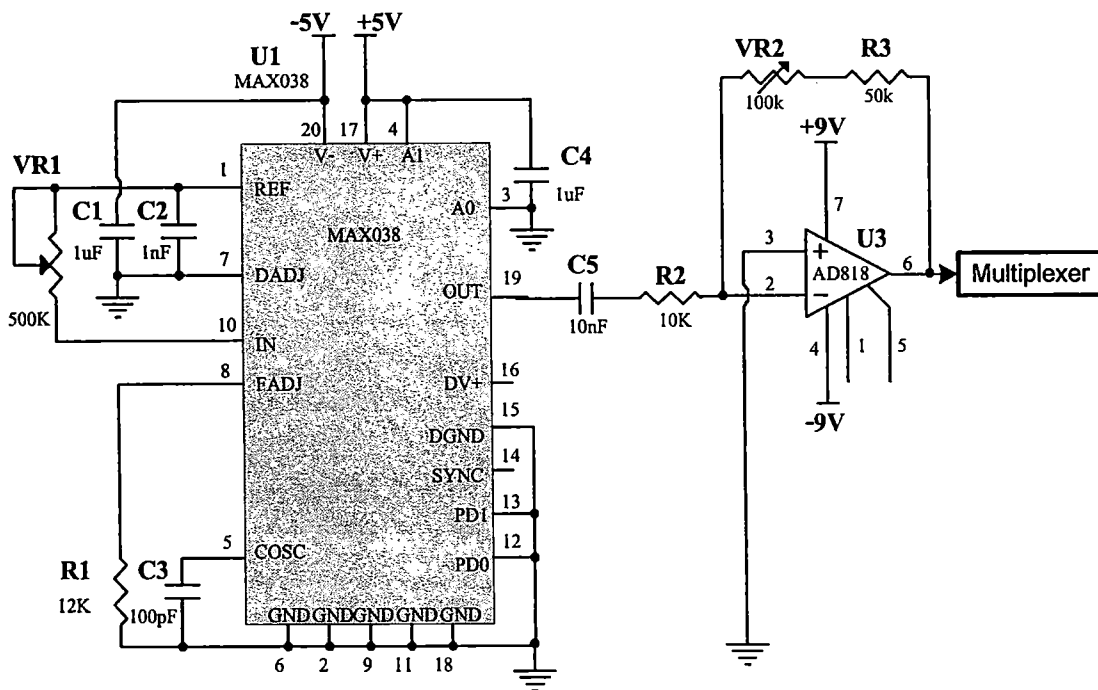
โครงสร้างของเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 8 อิเล็กโทรด ซึ่งแต่ละอิเล็กโทรดจะทำมุมกับจุดศูนย์กลางเท่ากับ 40 องศา และวางติดอยู่กับส่วนนอกของกรอบด้านใน (Pipe wall) ที่มีขนาดความหนา 3 มม. ตำแหน่งของส่วนต่างๆแสดงไว้ดังรูป ขนาดของรัศมี R1 เท่ากับ 54 มม. ขนาดของ R2 เท่ากับ 57 มม. และขนาดของ R3 เท่ากับ 58 มม. กรอบด้านนอก (Earth screen) ทำจากอะลูมิเนียมล้อมรอบเซ็นเซอร์ ตัวเลขที่ใช้กำกับบนตัวอิเล็กโทรดกำหนดให้เป็นแบบตามเข็มนาฬิกากรอบด้านในทำมาจากวัสดุ PVC (Polyvinyl chloride) โดยมีค่าพอมิตติวิตีเท่ากับ 2.7 และในช่องว่างระหว่างกรอบด้านในและกรอบด้านนอก

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จะถูกกั้นด้วยอะครีติก ซึ่งมีค่าเพอมีตริวิตีเท่ากับ 3 สำหรับตัวเซ็นเซอร์หน้าตัดกลมที่ใช้ในการทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์(Sine Wave Generator)

วงจรในรูปที่ 3.4 จะใช้ไอซี MAX038 ในการกำเนิดความถี่ ไอซี MAX038 เป็นไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Waveform Generator) โดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในรูปแบบสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth Wave) สัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) การกำหนดชนิดของสัญญาณสามารถกำหนดได้โดยขา A0 (ขา3) และ ขา A1 (ขา4) ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โดยใช้ไอซี MAX038

ตารางที่ 3.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุทของไอซี MAX038

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

ไอซี MAX038 สามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 0.1 Hz ถึง 20 MHz สำหรับวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.4 ค่าความถี่ของวงจรจะถูกควบคุมโดย VR_1 และ C_3 โดยความถี่เอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) ในระบบนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณ ไซน์ความถี่ 1 MHz และสัญญาณที่ได้จะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นประมาณ 13Vp-p โดย AD818 (U3) ก่อนส่งเข้าอิลีกโทรคโดยผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์

$$fo = \frac{V_{in}}{(R_{in} \times C_f)} \quad (3.1)$$

จากวงจรในรูปที่ 3.9 $C_f = C_3$, $V_{in} = 5 \text{ V}$, $R_{in} = VR_1$ ต้องการความถี่เอาต์พุต 1 MHz ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) จะได้

$$1 \times 10^6 = \frac{5}{VR_1 \times C_3} \quad (3.2)$$

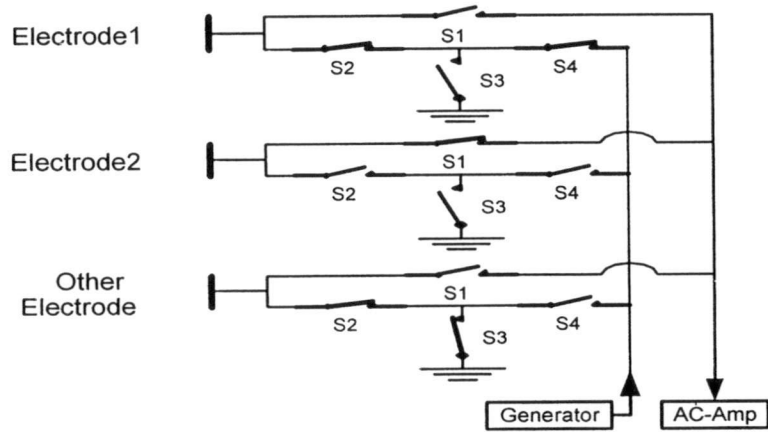
$$VR_1 \times C_3 = \frac{5}{1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

แต่เนื่องจากค่าตัวชี้ท (Datasheet) กำหนด VR_1 ควรอยู่ในช่วง 12.5 k Ω -500k Ω . \therefore ที่ความถี่ที่ต้องการจะกำหนดให้ VR_1 มีค่า 50k Ω . \therefore หาค่า C_3 ได้ดังสมการที่ (3.4)

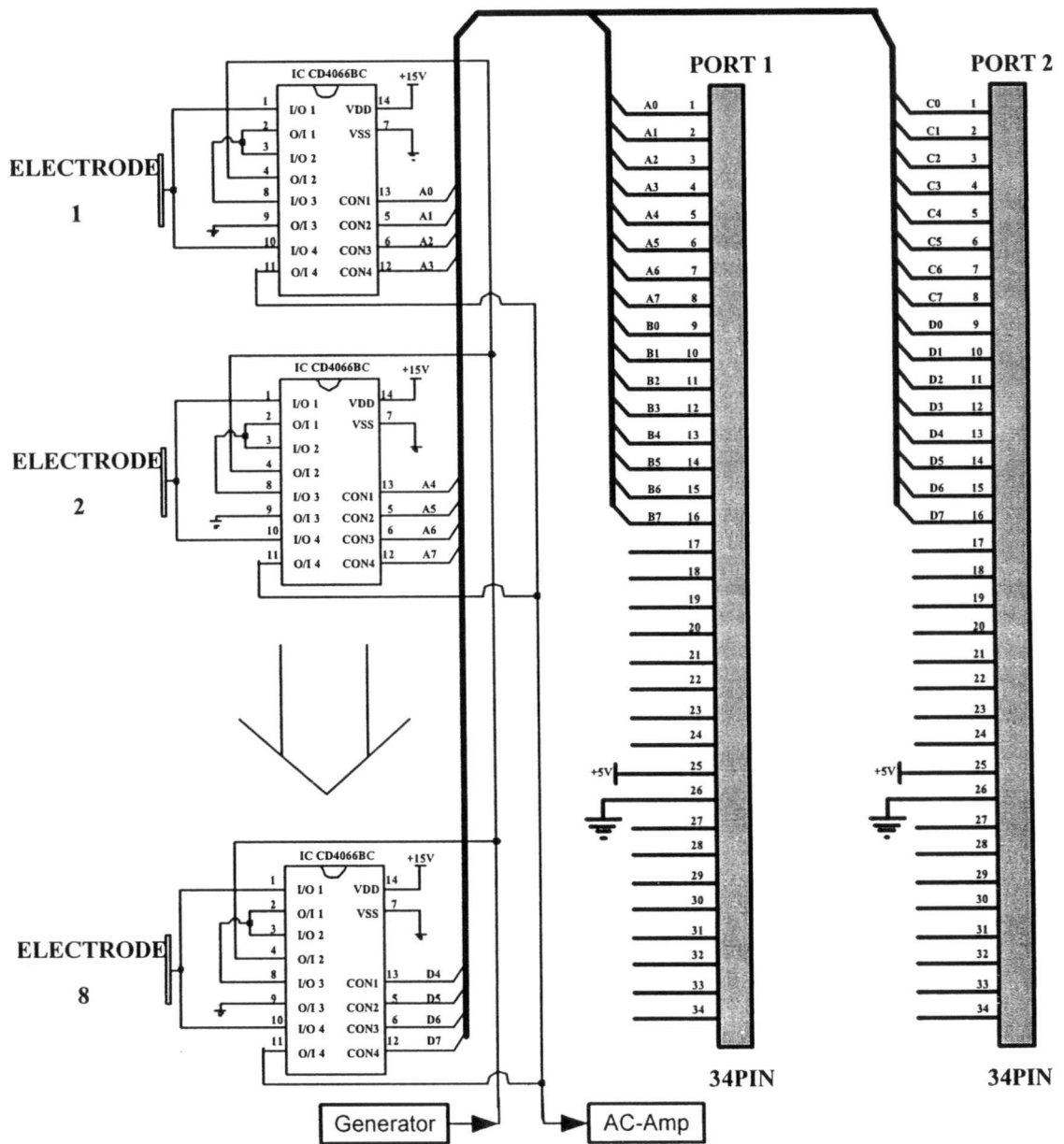
$$C_3 = \frac{5 \times 10^{-6}}{50 \times 10^3} = 100 \times 10^{-12} = 100 \text{ pF} \quad (3.4)$$

3.3 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์(Multiplexer)

วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์จะใช้ไอซี CD4066BC เป็นไอซีซีมอสที่ภายในจะประกอบด้วย สวิตช์ 4 ตัวซึ่งจะถูกต่อไว้ดังรูปที่ 3.5 เพื่อทำหน้าที่สวิตช์เลือก อิลีกโทรคตัวส่ง(Tx) และ อิลีกโทรคตัวรับ(Rx) ที่จะทำการวัด และ เนื่องจากสวิตช์มีจำนวนมาก อีกทั้ง เพื่อให้วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ทำงานสัมพันธ์กันกับการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล จึงต้องอาศัยการ์ด 8255 มาช่วยควบคุมการทำงานซึ่งจะต่อที่ I/O Port1 และ Port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และสถานะเวริทซ์จะถูกกำหนดไว้ตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 รูปแบบการต่อสวิตช์ในวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์



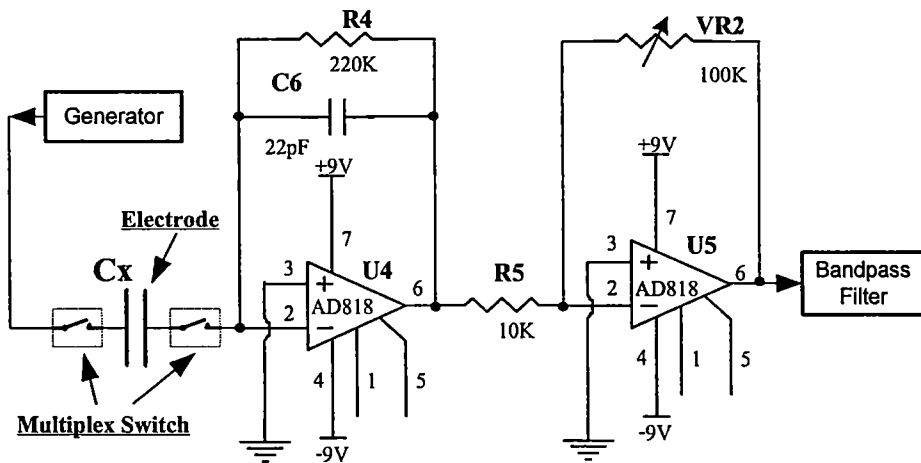
รูปที่ 3.6 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexer)

ตารางที่ 3.2 สถานะสวิทช์

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

3.4 วงจรขยายสัญญาณ(AC-Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณ จะรับสัญญาณไซน์ที่ผ่านคู่อิเล็กโทรดที่ถูกเลือกโดยวงจรมัลติเพล็กซ์ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด (C_x) มีค่าน้อยมาก อยู่ในช่วง 0.1pf – 3pf สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของ U4 จึงมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มวงจรขยาย U5 และเนื่องจากสัญญาณก่อนขยายมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยาย U5 จึงมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่มาก ดังนั้นสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำไปกรองโดยวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ เมื่อกำหนดให้ C_x (Electrode Capacitance) เป็นอินพุตของวงจร และไม่คิดผลของวงจรมัลติเพล็กซ์ อัตราขยายของ U4 (Gain) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ C_x , C_6 และอัตราขยาย U5 คือ $-V_o/V_i = VR_2 / R_5$



รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ(AC Amplifier)

อัตราขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ C_x เป็นอินพุตของวงจรสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$-Vi(j\omega C_x) - \frac{Vo \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_6} \right)}{\frac{R_4}{j\omega C_6}} = 0 \quad (3.5)$$

$$-Vi(j\omega C_x) - Vo(j\omega C_6 R_4 + 1) \frac{1}{R_4} = 0 \quad (3.6)$$

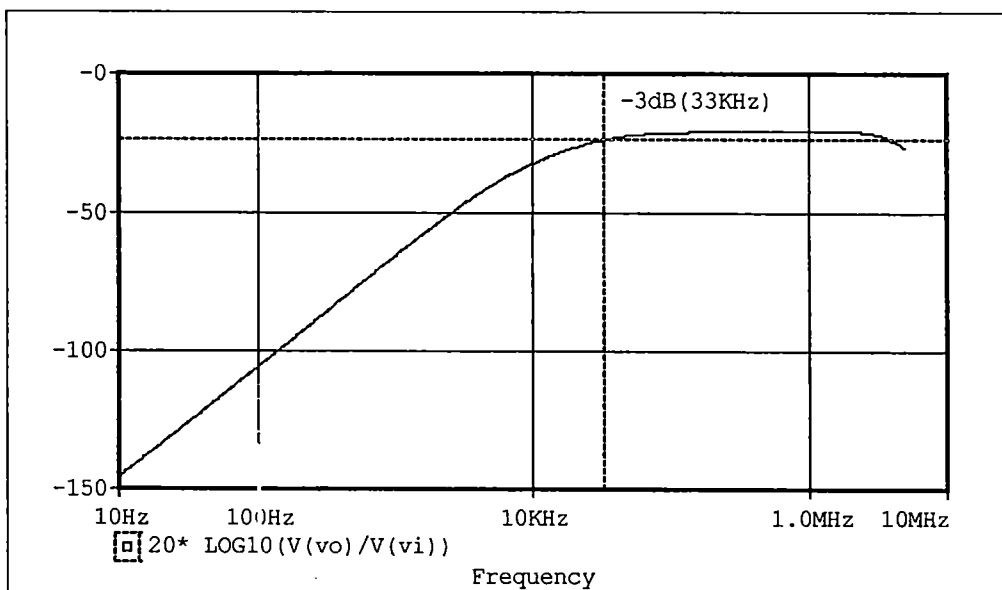
$$-Vo \left(j\omega C_6 + \frac{1}{R_4} \right) = Vi(j\omega C_x) \quad (3.7)$$

$$-\frac{Vo}{Vi} = \frac{j\omega C_x}{j\omega C_6 + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_4 j\omega C_x}{R_4 j\omega C_6 + 1} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) เมื่อ $R_4 \gg 1/(j\omega C_6)$ จะได้อัตราขยายตามสมการที่ (3.9)

$$-\frac{Vo}{Vi} \cong \frac{C_x}{C_6} \quad (3.9)$$

จุดตัดความถี่ของวงจร (cut off frequency) สามารถหาได้ จากสมการที่ (3.8) ซึ่งจะได้ค่า $\omega = 1/(C_6 R_4)$ หรือจะได้ $f_c = 1/(2\pi C_6 R_4)$

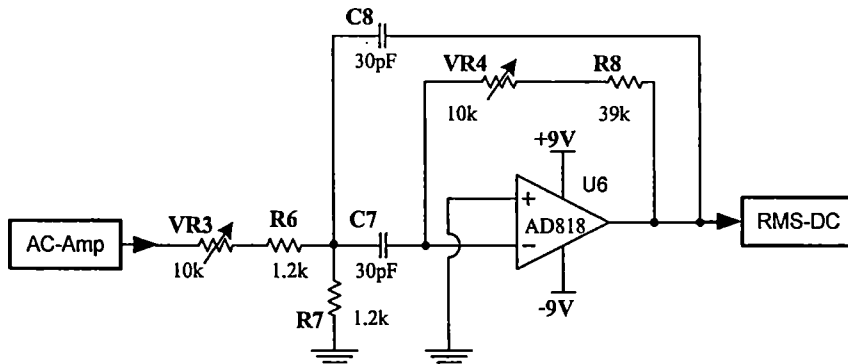


รูปที่ 3.8 แสดงจุดตัดความถี่ของวงจรขยาย U4 และความถี่ที่ใช้งาน

สำหรับกราฟในรูปที่ 3.8 เป็น กราฟที่ได้จากการซิมูเลท(Simulate) โดยโปรแกรม PSpice ซึ่งแสดงให้เห็นการตอบสนองความถี่ ของวงจรขยาย U4 เมื่อกำหนดให้ $C_x = 2\text{pf}$ ความถี่ที่ใช้ในระบบนี้คือ 1 MHz จากกราฟจะเห็นว่าความถี่ 1 MHz จะอยู่สูงกว่าจุดตัดความถี่ของวงจร ซึ่งในวงจรนี้จะมีจุดตัดที่ประมาณ 33 KHz หรือ $\omega = 1/(C_6 R_4)$

3.5 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ (Multiple Feedback Bandpass Filter)

สัญญาณที่ผ่านการขยายยังมีขนาดที่เล็ก และมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยค่อนข้างมาก วงจรแบนพาสฟิลเตอร์ [6-7] จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนทิ้ง โดยให้ผ่านเฉพาะสัญญาณไซน์ ความถี่ 1 MHz ซึ่งซิมูเลทโดย PSpice ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 และเงื่อนไขที่ต้องการของวงจรในรูปที่ 3.9 คือ จะเลือกค่า $Q = 4$ อัตราขยายประมาณ 16 เท่า ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 3.9 วงจรแบนพาสฟิลเตอร์แบบมัลติเฟดแบค (Multiple Feedback Bandpass Filter)

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

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

$$Q = \frac{f_0}{f_h - f_l} \quad (3.10)$$

$$R_i = \frac{Q}{A \cdot 2 \pi f_0 C} \quad (3.11)$$

$$R_7 = \frac{Q}{(2Q^2 - A) 2 \pi f_0 C} \quad (3.12)$$

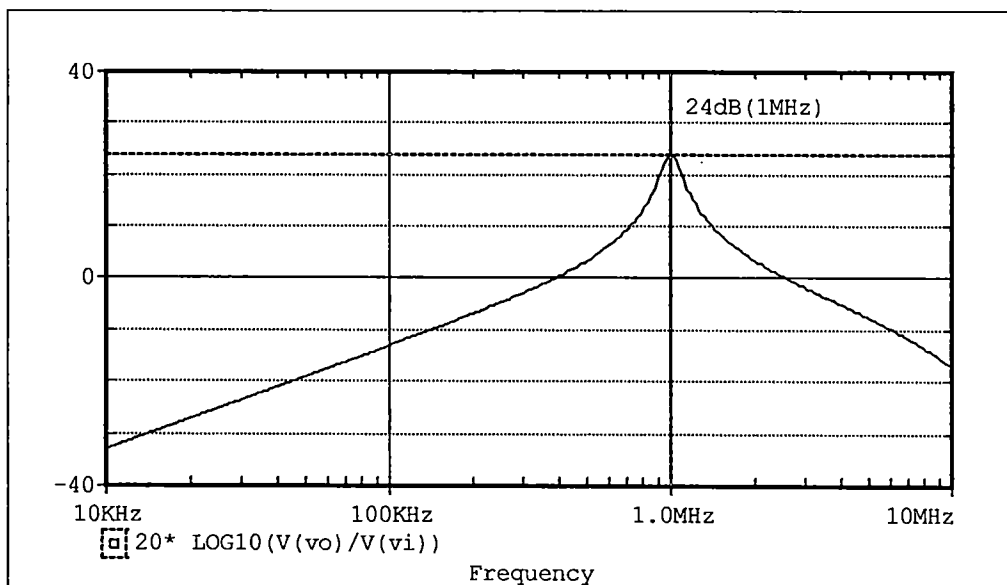
$$R_f = \frac{Q}{\pi f_0 C} \quad (3.13)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนดและสมการที่ (3.11), (3.12), (3.13) จะสามารถคำนวณหา
ค่าตัวต้านทานในวงจรได้ดังสมการที่ (3.14), (3.15) และ (3.16) คือ

$$R_i = \frac{4}{16 \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326 \text{ k}\Omega \quad (3.14)$$

$$R_7 = \frac{4}{(2 \times 4^2 - 16) \times 2 \times \pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 1.326 \text{ k}\Omega \quad (3.15)$$

$$R_f = \frac{4}{\pi \times 1 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-12}} = 42.441 \text{ k}\Omega \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.10 การตอบสนองความถี่ของวงจรแบบพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.12

3.6 วงจรแปลงอาร์เอ็มเอสเป็นแรงดันดีซี (RMS to DC Converter)

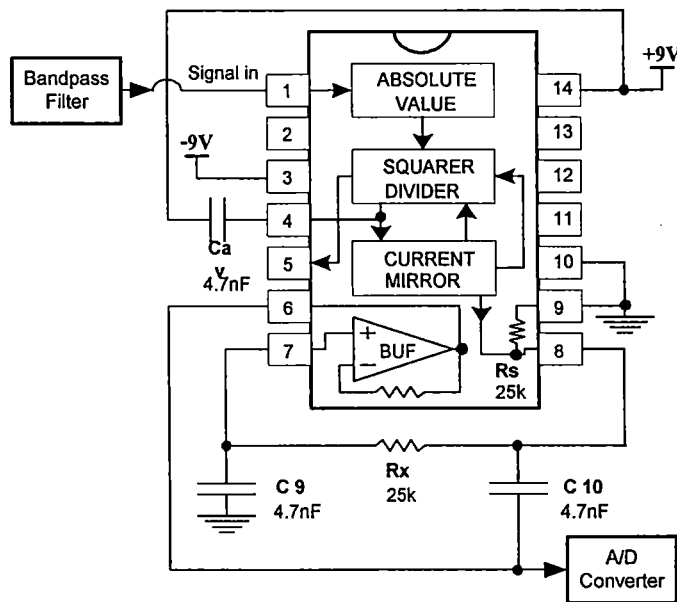
วงจรอาร์เอ็มเอส-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.11 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไซน์ความถี่
1 Mhz ที่รับมาจากวงจรแบนพาสฟิลเตอร์ในรูปที่ 3.12 ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟดีซี(DC) ซึ่งขนาด
ของแรงดันดีซี ที่ได้จะมีค่าเทียบเท่ากับ โวลท์อาร์เอ็มเอส (Volt RMS) ของสัญญาณอินพุท (Vin)
จากนั้นนำระดับสัญญาณดีซีที่ได้ไปเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิทัลและนำข้อมูลส่งต่อไปเก็บยังเครื่อง
คอมพิวเตอร์ผ่านทาง พอร์ต I/O โดยอยู่ในรูปของเท็กซ์ไฟล์ก่อนจะนำไปสร้างภาพกลับ

จากคาค่าซีท และวงจรฟิลเตอร์ [6-7] จะสามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในรูปที่ 3.12 ได้
จากสมการที่ (3.17) ในส่วนเอาต์พุท ของวงจรเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับสอง

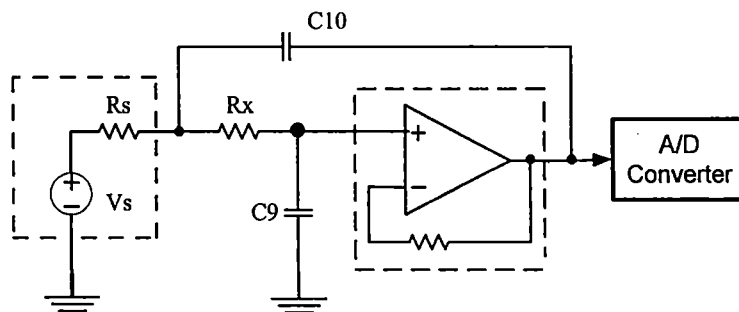
(Second-Order Low Pass Filter) ซึ่งจะได้ ค่าความชัน (Slope) -40 dB/decade และจุดตัดความถี่จะ ถูกกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความเร็วของการสวิตช์เลือกอิเล็กทรอนิกส์ของวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ในการ ทดลองจากการอ่านค่าข้อมูล 28 ค่า(28 Conversion) เวลาที่ใช้ในการแปลงรวมกับเวลาการอ่านค่า ในแต่ละค่าจะใช้เวลาประมาณ 1.2ms ดังนั้นความถี่ในการอ่านค่าคือ $1 / 1.2\text{ms} = 833\text{Hz}$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{R_s \times R_x \times C_9 \times C_{10}}} \quad (3.17)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{25 \times 10^3 \times 25 \times 10^3 \times 4.7 \times 10^{-9} \times 4.7 \times 10^{-9}}} = 1.354\text{kHz} \quad (3.18)$$



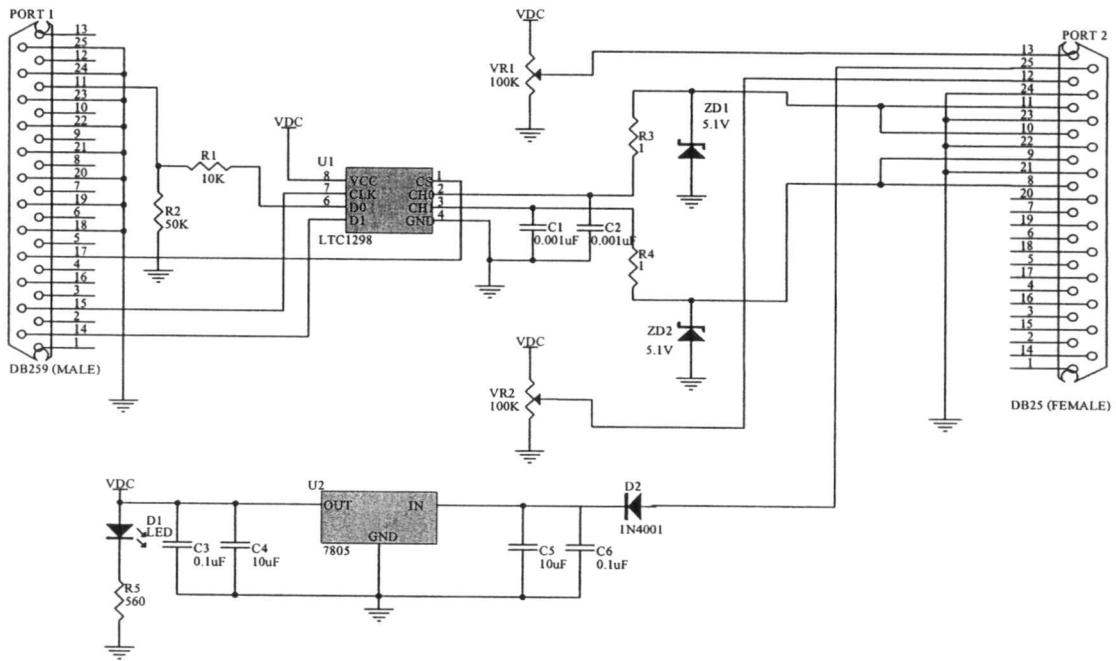
รูปที่ 3.11 วงจรแปลงอาร์เอ็มเอสเป็นแรงดันดีซี(RMS to DC Converter)



รูปที่ 3.12 เอ้าท์พุทของวงจรในรูปที่ 3.11 เมื่อวัดใหม่

3.7 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล(A to D Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะใช้บอร์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจรดังรูปที่ 3.13 และตารางที่ 3.3



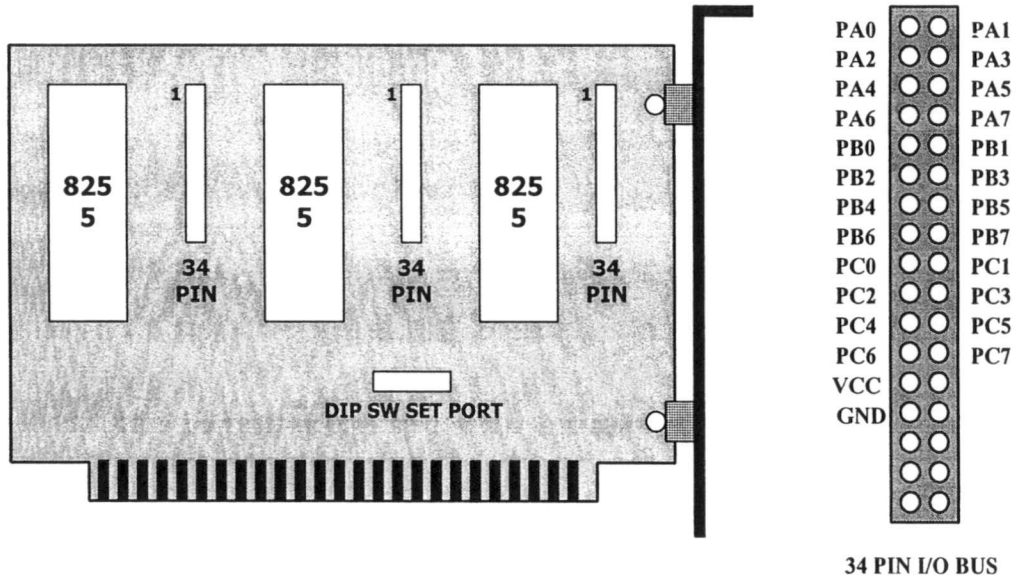
รูปที่ 3.13 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

CONVERTION TIME	60 μ S
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

3.8 การ์ดอินเตอร์เฟซ 8255 (ET-8255 Interface Card)

การ์ดอินเตอร์เฟซ 8255 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการคัดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ตเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วน

ของการ์ดคอนโทรลเฟสนี้จะมีพอร์ตให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ต หรือ 72 บิต (1 พอร์ตมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 3.14 และตารางที่ 3.4



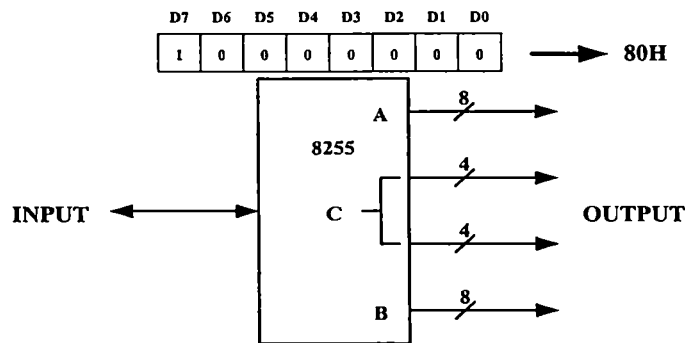
รูปที่ 3.14 ลักษณะของการ์ดคอนโทรลเฟสรุ่น ET – 8255

สำหรับรูปที่ 3.16 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ต และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ต คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และคิพสวิทซ์

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของการ์ดคอนโทรลเฟสรุ่น ET – 8255

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

ในส่วนในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ต โดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 เราจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ตทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ตหรือเอาต์พุทพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุทพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด (Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.15

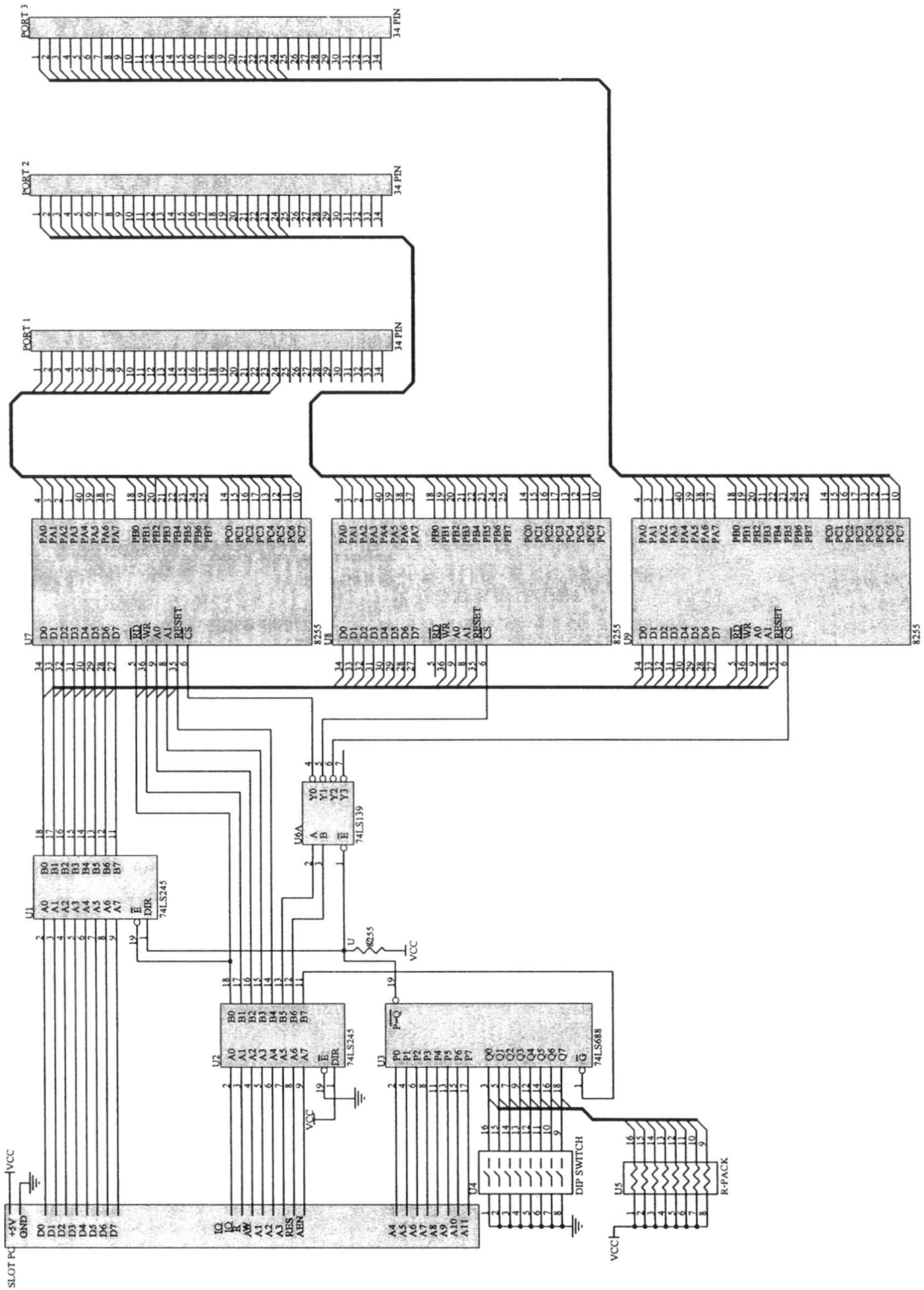


รูปที่ 3.15 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรส สามารถแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET - 8255

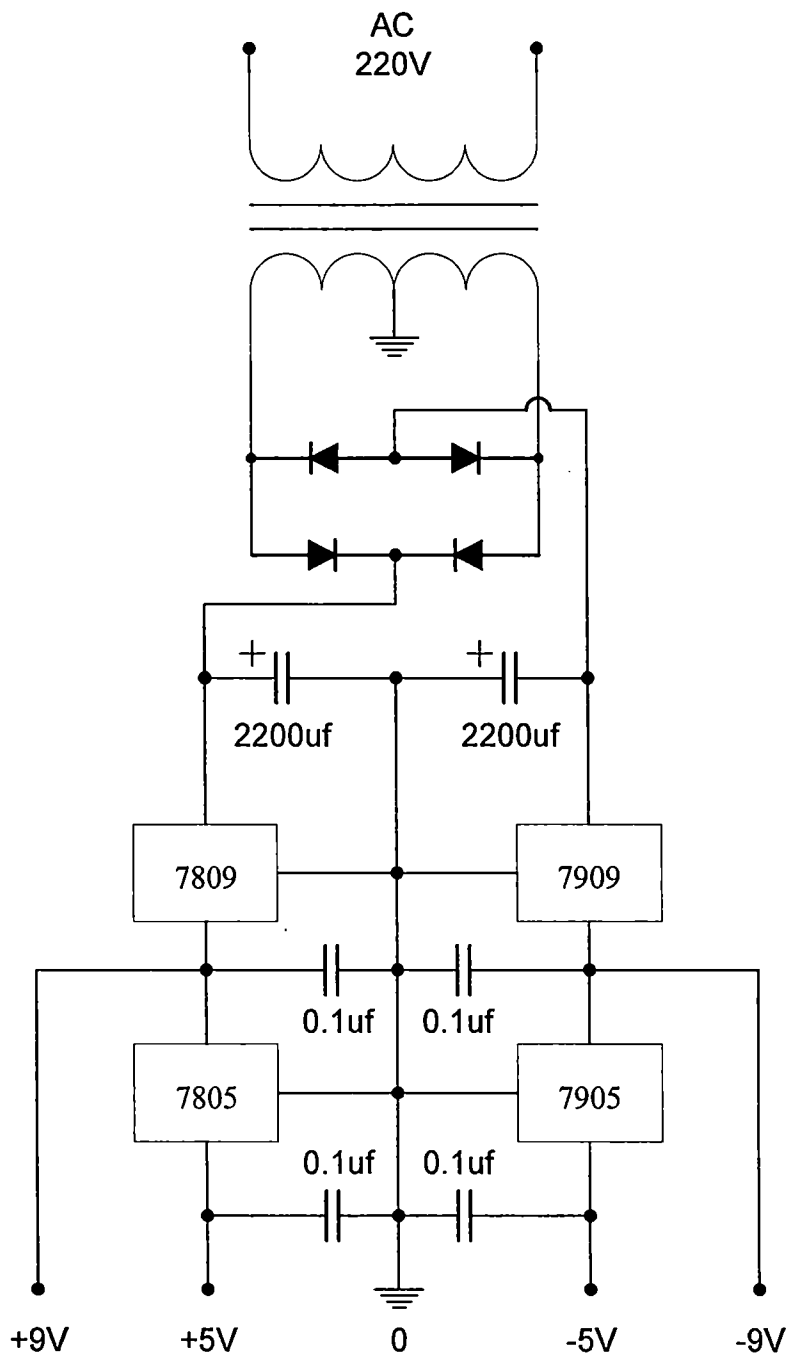
ตารางการใช้พอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของการ์ด ET-8255	
หมายเลขพอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	การใช้งานพอร์ตของการ์ด ET-8255
300H	PORT A 8255#1
301H	PORT B 8255#1
302H	PORT C 8255#1
303H	CONTROL PORT 8255#1
304H	PORT A 8255#2
305H	PORT B 8255#2
306H	PORT C 8255#2
307H	CONTROL PORT 8255#2
308H	PORT A 8255#3
309H	PORT B 8255#3
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3



รูปที่ 3.16 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

3.9 วงจรภาคจ่ายไฟ(Power Supply)

วงจรภาคจ่ายไฟ(Power supply) ที่ใช้ในระบบจะประกอบด้วยไฟสองชุด คือ +9V, 0, -9V และ +5V, 0, -5V โดยใช้ ไอซีเร็กกูเลต LM 7809, LM7805 ในซีกบวค และ LM 7909, LM 7905 ในซีกลบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรภาคจ่ายไฟ(Power Supply)

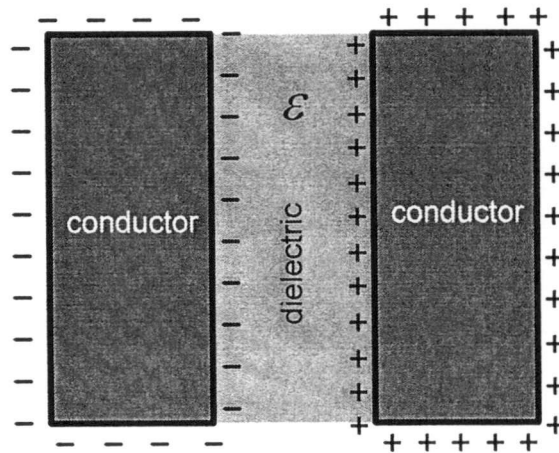
บทที่ 4

โปรแกรมสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

สำหรับโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมที่พัฒนามาจากโครงการวิจัยปี 2550 เรื่อง “ การพัฒนาระบบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ” [5] โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 หลักการพื้นฐาน

ตัวนำสองตัวนำใดๆ เมื่อถูกแยกหรือถูกชั้นด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้างรูปที่ 4.1 จะมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำนั้นๆ เมื่อป้อนค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสองก็จะเกิดประจุบวกขึ้นที่ตัวนำหนึ่ง และจะเกิดประจุลบขึ้นที่ตัวนำอีกตัวหนึ่ง ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสัมบูรณ์ของประจุไฟฟ้าและค่าสัมบูรณ์ของค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนนั้น[8,9] แสดงได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.1 รูปตัวนำสองตัวเมื่อวางอยู่ระหว่างวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

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

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad ; F),
 Q คือ ค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดในงานวิจัยนี้
 V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าประจุไฟฟ้าและค่าศักดาไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ จะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของปริมาณทั้งสองจึงมีค่าคงที่ แต่ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวนำและค่าเพอิมิตติวิตีของวัสดุที่เป็นตัวกลาง โดยค่าเพอิมิตติวิตี (ϵ) แสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

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

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

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

ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (4.1) โดยการคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรดตัวรับ[8] แต่เนื่องจากโดยทั่วไปจะไม่สามารถทราบค่าการกระจายของประจุไฟฟ้านั้นล่วงหน้าได้ และข้อมูลเบื้องต้นที่มีอยู่คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างคู่อิเล็กโทรดซึ่งจะเท่ากับค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนและค่าเพอิมิตติวิตีซึ่งจะถูกกำหนดขึ้น ดังนั้นค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าสามารถหาได้จากค่าความเข้มสนามไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)

S คือ พื้นผิวของเกาส์ (Gaussian Surface)

สมการที่ (4.3) คือสูตรคณิตศาสตร์ของเกาส์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตบนพื้นผิวปิดล้อมรอบอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าผ่านพื้นผิวเล็กๆ (dS) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าหาได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้คือ

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

เมื่อ ∇ คือ ตัวปฏิบัติการเวกเตอร์

ϕ คือ ค่าศักดาไฟฟ้า

สมการที่ (4.4) เรียกว่า เกรเดียนต์ (Gradient) ของฟังก์ชันศักดาไฟฟ้า นั่นคือถ้าสามารถคำนวณหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าได้ ก็สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้เช่นกัน ดังนั้น

การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจึงมีขั้นตอนดังนี้คือ คำนวณค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าภายในวัตถุ จากนั้นคำนวณค่าการกระจายของประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดตัวรับ โดยใช้กฎของเกาส์ และคำนวณค่าความจุไฟฟ้าด้วยสมการที่ (4.1)

การหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้าอธิบายได้ดังนี้ จากสมการที่ (4.1)-(4.4) จะเห็นว่าเกี่ยวข้องกับปัญหาทางสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของปัวซอง (Poisson's equation) โดยมีความหนาแน่นประจุในตัวกลางเท่ากับศูนย์หรือเรียกว่าสมการของลาปลาซ (Laplace's equation)[8,9] ซึ่งสมการคือ

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

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

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

สมการที่ (4.5) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองแบบเอลลิปติก (Elliptic) ซึ่งใช้ในการหาค่าการกระจายของศักดาไฟฟ้า

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้ อัลกอริทึมที่มีอยู่เดิม[5] และอัลกอริทึมนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณเชิงเลข (Numerical method) เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับเซ็นเซอร์แบบทรงกระบอก เนื่องจากรูปร่างของตัวครอบและอิเล็กโทรดมีความซับซ้อน สำหรับการคำนวณนั้นจะถูกคำนวณในแบบ 2 มิติ และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณนี้ คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการกำหนดเงื่อนไขของ พิกเซลใดๆ บนพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์เซ็นเซอร์โดยค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปสร้างเซ็นซิติวิตีของระบบ ECT

4.2 วิธีการหาค่าเซนซิติวิตี (Sensitivity) ของระบบ ECT

เซนซิติวิตี S ของระบบ ECT จากวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของพิกเซลต่างๆที่มีต่ออิเล็กโทรดแต่ละคู่ (Relative capacitance change) แสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

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

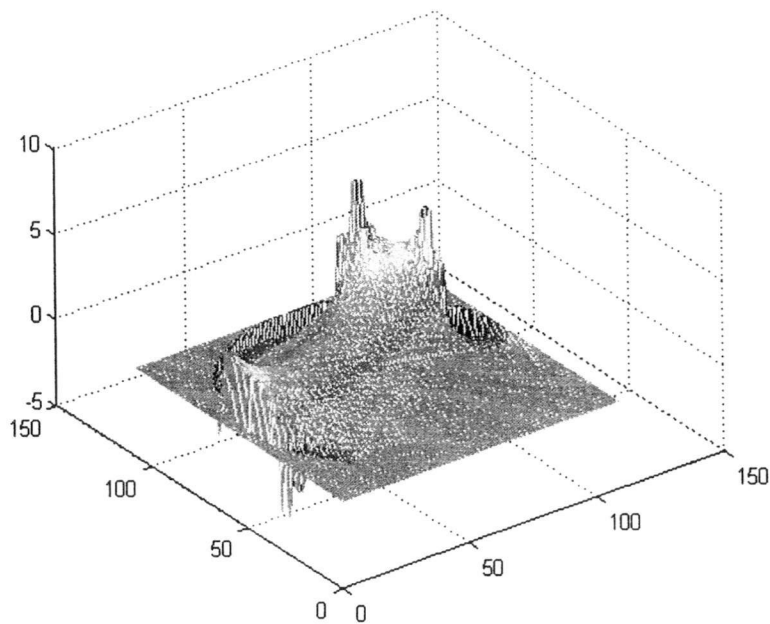
เมื่อ $S_{ij}(p)$ คือ เซนซิติวิตีของพิกเซล p ที่เป็นของคู่อิเล็กโทรด $i-j$

$C_{ij}^{oil,p}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้พิกเซล p มีค่าเพอมีตติวิตีของน้ำมัน และพิกเซลอื่นๆที่เหลือมีค่าเพอมีตติวิตีของอากาศ

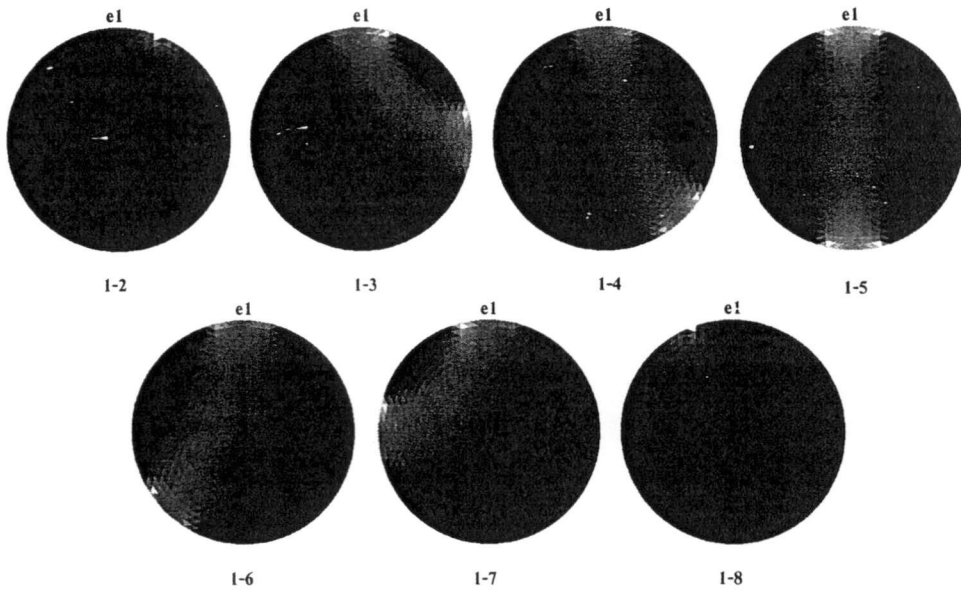
ε_{oil} และ ε_{empty} คือ ค่าเพอมีตริวิตีสัมพัทธ์ของน้ำมันและอากาศ ตามลำดับ
 A_{max} และ A_p คือพื้นที่ทั้งหมดของภาพหน้าตัด และพื้นที่ของพิกเซล ตามลำดับ

จากสมการที่ (4.6) แสดงให้เห็นถึง การตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่มีต่อค่าเพอมีตริวิตีของตัวกลางค่าสูงค่าหนึ่งที่อยู่บนพื้นที่จุดเล็กๆ ในบริเวณของเซ็นเซอร์ที่มีค่าเพอมีตริวิตีของตัวกลางค่าต่ำกว่าซึ่งเป็นผลให้สามารถแสดงค่าของเพอมีตริวิตีค่าสูงบนค่าเพอมีตริวิตีที่ต่ำกว่าได้ค่าเซนซิติวิตีสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยสมการที่(4.6) โดยการวัดทางกายภาพนั้นจะทำได้ยาก หรือทำไม่ได้เลย เนื่องจากต้องกำหนดค่าเพอมีตริวิตีของพิกเซลใดๆ ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยาก ดังนั้นในระบบ ECT จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณ แต่ปัญหาที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ใช้ประสิทธิภาพของเครื่องคำนวณและเวลาในการคำนวณสูง

สำหรับค่าเซนซิติวิตีของแต่ละคู่อิเล็กโทรดสำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลม จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิติวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-6 ในแบบ 3 มิติ



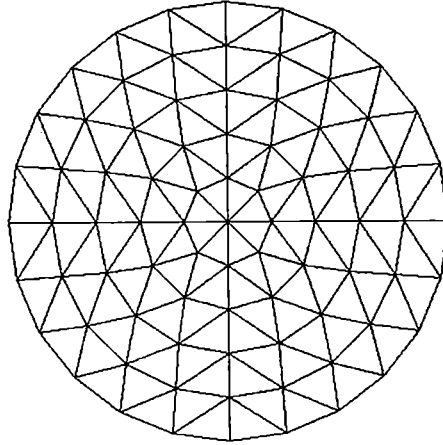
รูปที่ 4.3 ลักษณะการกระจายของค่าเซนซิวิตีของเซ็นเซอร์แบบวงกลมเฉพาะคู่อิเล็กโทรด 1-2 ถึงคู่อิเล็กโทรด 1-8

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าของเซนซิวิตีของแต่ละคู่อิเล็กโทรดจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยจะสังเกตเห็นว่า พิกเซลที่อยู่ห่างจากแนวของการกระจายประจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด จะมีค่าระดับเทาที่ต่ำกว่า พิกเซลที่อยู่ในแนวของการกระจายประจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรดนั้นๆ ดังนั้น จากหลักการของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำการบวกค่าความจุไฟฟ้าที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าเซนซิวิตีของทุกคู่อิเล็กโทรดเข้าด้วยกัน ค่าระดับเทาของบริเวณที่มีวัตถุจะเด่นชัดขึ้น และที่บริเวณอื่นๆค่าระดับเทาจะมีค่าลดลง

4.3 การสร้างภาพกลับ

4.3.1 การสร้างภาพกลับโดยวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน

การสร้างภาพกลับ พื้นที่หน้าตัดของตัวเซ็นเซอร์จะถูกพิจารณาเป็นพิกเซล (p) โดยลักษณะของพิกเซลจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซ็นเซอร์ สำหรับเซ็นเซอร์แบบวงกลมที่เราใช้นั้นพิกเซลจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการแบ่งเป็นอิลิเมนต์สามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งในส่วนของ การแสดงผลภาพ จะได้จำนวนพิกเซลทั้งหมดคือ 1436 พิกเซล การแบ่งพื้นที่ย่อยบนพื้นที่หน้าตัดของตัวเซ็นเซอร์แสดงได้ดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแบ่งพื้นที่หน้าตัดของเซ็นเซอร์ออกเป็นฟิสิกเซลล์ย่อยๆ ในเซ็นเซอร์แบบวงกลม

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

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

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

G คือ เมทริกซ์ของจำนวนฟิสิกเซลล์ขนาด $N \times 1$ ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของเพอมีตติวิตีภายในเซ็นเซอร์, N เป็นจำนวนของฟิสิกเซลล์

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

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

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

จากสมการที่ (4.8) เมทริกซ์ S^{-1} ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากไม่ใช่เมทริกซ์จัตุรัส ซึ่งระบบ ECT ขนาดของเมทริกซ์ S คือ $M \ll N$ เช่นในงานวิจัยนี้ $M = 28$ และ $N = 1436$ ดังนั้นในวิธี ลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน จะใช้ค่าของการสลับเปลี่ยนเมทริกซ์ (Transpose matrix) ของ S หรือ S^T ซึ่งมีขนาด $N \times M$ แทน และ ค่าของเมทริกซ์ G หรือค่าของแต่ละฟิสิกเซลล์ (g_n :

$n = 1 \dots N$) จะเท่ากับการบวก (หรือการแบ่งโปรเจค) ของค่าความจุไฟฟ้า c_m ($m = 1 \dots M$) ของทุกคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก(Weight) ด้วยค่าเซนซิติวิตีของแต่ละพิกเซลในแต่ละคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่สอดคล้องกัน แสดงได้ดังสมการที่ (4.9)

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

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

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

เมื่อ p คือ ตำแหน่งของพิกเซลใดๆ

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

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

เมื่อ i คือ อันดับของอิเล็กทรอนิกส์ตัวส่ง และ j คือ อันดับของอิเล็กทรอนิกส์ตัวรับ

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

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

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

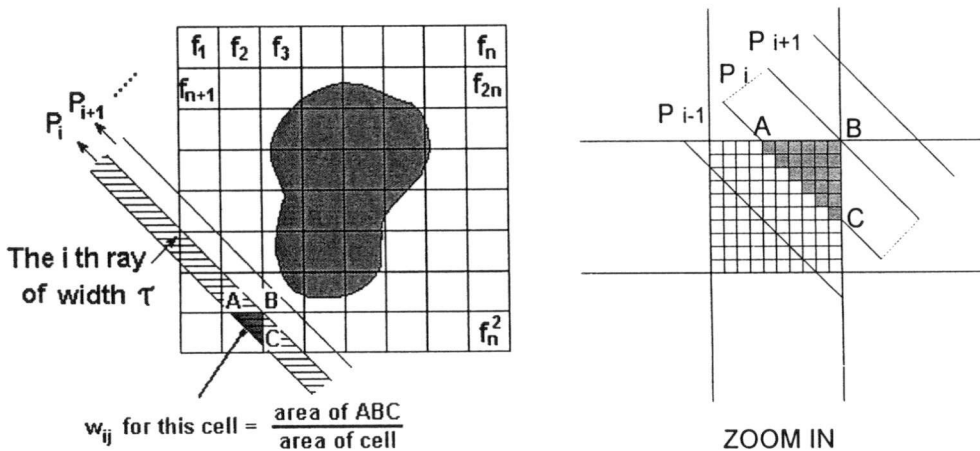
C_{ij}^{oil} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโทรด $i - j$ ที่วัดได้จากระบบเมื่อภายใน เซ็นเซอร์ถูกบรรจุด้วยน้ำมัน

4.3.2 การสร้างภาพกลับโดยใช้วิธี Algebraic Reconstruction Technique (ART)

จากหลักการพื้นฐานการสร้างภาพตัดขวางของ CT โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตนั้น จะสมมุติให้วัตถุที่ต้องการสร้างกลับ (ภาพตัดขวางใน 2 มิติ หรือ ปริมาตรใน 3 มิติ) เป็นเมตริกซ์ของ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และจากนั้นทำการแก้สมการทางพีชคณิตเพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจากค่า โปรเจกชันที่วัดได้ ในที่นี้จะพิจารณาการสร้างกลับของวัตถุเฉพาะใน 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยที่ จะสมมุติให้ภาพประกอบด้วยเซตของเซลล์ (cell) $f(x, y)$ โดยที่ในแต่ละเซลล์ ฟังก์ชัน $f(x, y)$ เป็นค่าคงที่ กำหนดให้ f_j เป็นค่าคงที่ที่เซลล์ที่ j^{th} และให้ N เป็นจำนวนทั้งหมดของเซลล์ ให้ p_i แทนค่าโปรเจกชันของรังสีเส้นที่ i^{th} ที่วัดได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง f_j และ p_i คือ

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

เมื่อ M คือ จำนวนรังสีทั้งหมด w_{ij} คือ ค่าแฟกเตอร์น้ำหนัก (Weighting factor) ที่แทน ผลของเซลล์ที่ j^{th} ที่มีต่อรังสีเส้นที่ i^{th} โดยแฟกเตอร์ w_{ij} มีค่าเท่ากับสัดส่วนของพื้นที่ของเซลล์ที่ j^{th} ที่ตัดกับรังสี i^{th} ซึ่งจากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าทุกเซลล์จะถูกแบ่งเป็น 100 เซลล์ย่อย โดยจะมีเพียง 21 เซลล์ย่อยเท่านั้นที่อยู่ในเส้นทางเดินแสง ดังนั้นเซลล์นี้จะมีค่าแฟกเตอร์น้ำหนักเท่ากับ $21/100 = 0.21$



รูปที่ 4.5 รูปแบบการฉายแสง และการคำนวณค่าแฟกเตอร์น้ำหนักของอัลกอริทึมเชิงพีชคณิต

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

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

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

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

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

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

ในการประยุกต์ใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องมีจำนวนของโปรเจกชันจำนวนมาก และภาพที่ต้องการสร้างกลับมีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้สมการที่ (4.14) เนื่องจากปัญหาเรื่องของการคำนวณ เนื้อที่หน่วยความจำ และการเรียกใช้อย่างรวดเร็วของสัมประสิทธิ์นำหน้า w_{ij} โดยพิจารณากรณีของการสร้างภาพขนาด 100 x 100 พิกเซลด้วยข้อมูล 150 โปรเจกชัน และแต่ละโปรเจกชันมีจำนวนรังสีเท่ากับ 150 รังสี ดังนั้นจำนวนของสัมประสิทธิ์นำหน้า w_{ij} ทั้งหมดที่ต้องใช้จะอยู่ในระดับของ 10^8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นจำนวนที่มหาศาล

เพื่อที่จะแก้ปัญหาค่าความยุ่งยากนั้น วิธีทางพีชคณิตอื่นๆ ได้ถูกนำเสนอ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการประมาณของสมการที่ (4.14) เพื่อที่จะวิเคราะห์การประมาณที่สามารถคำนวณได้ง่าย สมการที่ (4.14) จะถูกจัดใหม่ในสมการที่ (4.15)

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

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

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

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

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

วิธี ART นี้ ได้ถูกนำเสนอสำหรับงานด้านการเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการสร้างภาพตัดขวางของระบบ ECT เพื่อลดจำนวนการทำซ้ำลง ในวิธีนี้ค่าแก้ไขจะถูกใช้ปรับปรุงกับทุกๆ เซลล์ที่รังสีที่ i^{th} ผ่านก่อนที่จะแก้ไขในรังสีถัดไป (ray-by-ray updating) โดยสมการของ ART แสดงได้โดยสมการที่ (4.18)

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

ขั้นตอนของการคำนวณสำหรับการทำซ้ำที่ k^{th}

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

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

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

ขั้นตอนของการคำนวณสำหรับการทำซ้ำที่ k ในสมการที่ (4.19) คือ

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

4.4 การปรับปรุงภาพ

4.4.1 วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชันตามหลักของ Projected Landweber Iteration

การทำซ้ำ (Iterative) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ถูกสร้างกลับให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจากอัลกอริธึม[10,11] จะเริ่มต้นจากการหาค่าระดับเทา (G_0) โดยจะใช้วิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการ การทำซ้ำ จากนั้นจึงจะนำ G_0 ไปผ่านกระบวนการทำซ้ำในสมการที่ (4.22) โดยสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

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

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

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

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

เมื่อ x คือ ค่าระดับเทาที่ได้จากกระบวนการ การทำซ้ำครั้งล่าสุด จากขั้นตอนทั้งหมด สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (4.22)

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

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

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

k คือ การทำซ้ำครั้งที่ k

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

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

คู่กลับเข้าสู่ผลเฉลยที่แท้จริง และถ้า $\alpha > 1$ จะทำให้ความเร็วของการเข้าสู่เร็วขึ้น แต่จะเป็นสาเหตุของการลู่ออกของผลเฉลย นอกจากนี้ลักษณะการกระจายของเพอมีตติวิตีในลักษณะต่างๆกัน จะมีค่าที่เหมาะสมของ α ที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกค่า α นั้นจะขึ้นอยู่กับการทำงานทดลอง ในส่วนของงานวิจัยนี้จะใช้ค่า α เท่ากับ 1

4.4.2 การใช้วิธีเทรซโฮลด์

สำหรับวิธีการปรับปรุง คุณภาพของภาพอีกวิธี ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การเทรซโฮลด์ และกระบวนการตัด (Truncation operation) ระบบ ECT เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้เซนซิวิตีของระบบที่หาได้จากสมการที่ (4.6) และค่าระดับเทา มีค่ามากกว่า 1 (Overshooting) และต่ำกว่า 0 (Undershooting) และผลเนื่องจากข้อจำกัดของวิธีลิเนียร์แบ็กโปรเจกชัน ซึ่งจะทำให้ค่าระดับเทามีลักษณะไม่คมชัดในส่วนของขอบวัตถุ ดังนั้นค่าระดับเทาของพิกเซลก่อนการแสดงผลจริงจะถูกปรับแต่ง โดยกระบวนการตัด และการเทรซโฮลด์ โดย Overshooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยกระบวนการตัด และ Undershooting ของระดับเทาสามารถแก้ไขได้โดยการเทรซโฮลด์ [10,11] ซึ่งผลที่ได้คือภาพบริเวณขอบของวัตถุจะถูกตัดทิ้ง ซึ่งจะรวมถึงรายละเอียดบางส่วนของภาพที่มีค่าระดับเทาต่ำๆ ถูกตัดทิ้งด้วย

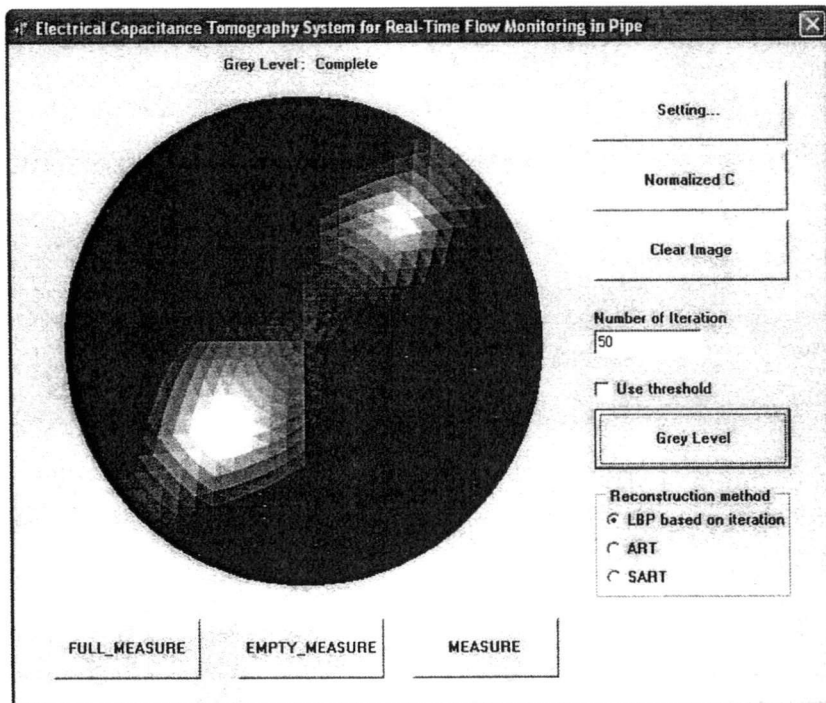
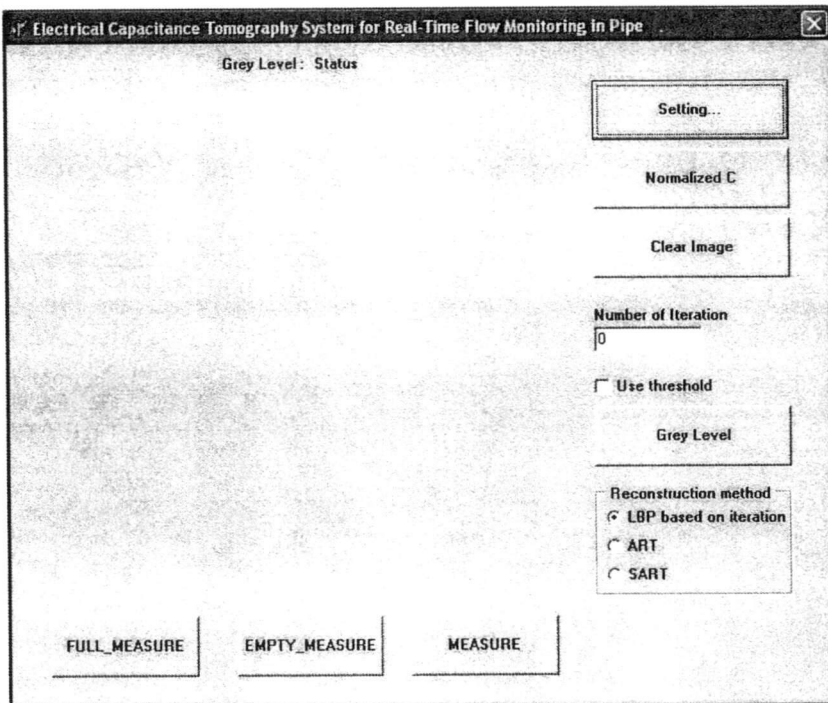
การใช้เทคนิค การตัด และการเทรซโฮลด์ กับข้อมูลค่าระดับเทาของพิกเซลที่จะนำไปแสดงผลภาพ เป็นผลให้รายละเอียดของภาพบางส่วนถูกตัด ดังนั้นเพื่อแก้ไขส่วนรายละเอียดของภาพที่ถูกตัดทิ้งไป จึงได้นำเอาเทคนิคการตัด และเทรซโฮลด์ไปใช้กับชุดข้อมูลก่อนหน้านั้น คือ เซนซิวิตีของระบบ เนื่องจากเซนซิวิตีเป็นชุดข้อมูลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของพิกเซลใดๆที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของคู่อิเล็กโตรด และมีผลต่อค่าระดับเทาของพิกเซลที่แสดงผล จากชุดข้อมูลเซนซิวิตี ในงานวิจัยนี้ข้อมูลส่วนมากจะอยู่ในย่านที่แคบมากประมาณ 0.0 ถึง 0.9 และจะมีข้อมูลส่วนน้อยบางส่วน มีค่ามากกว่า 0.9 และต่ำกว่า 0.0 ซึ่งข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.9 จะใช้กระบวนการตัด ส่วนข้อมูลที่มีค่าเป็นลบ จะใช้วิธีการเทรซโฮลด์ ตามเงื่อนไขในสมการที่ (4.23)

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

เงื่อนไขของค่าเซนซิวิตี $S_{ij}(p)$ ในสมการที่ (4.23) ได้ จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าที่เหมาะสมโดย สังเกตจากผลของการสร้างภาพกลับที่มีความชัดเจนมากขึ้น

4.5 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

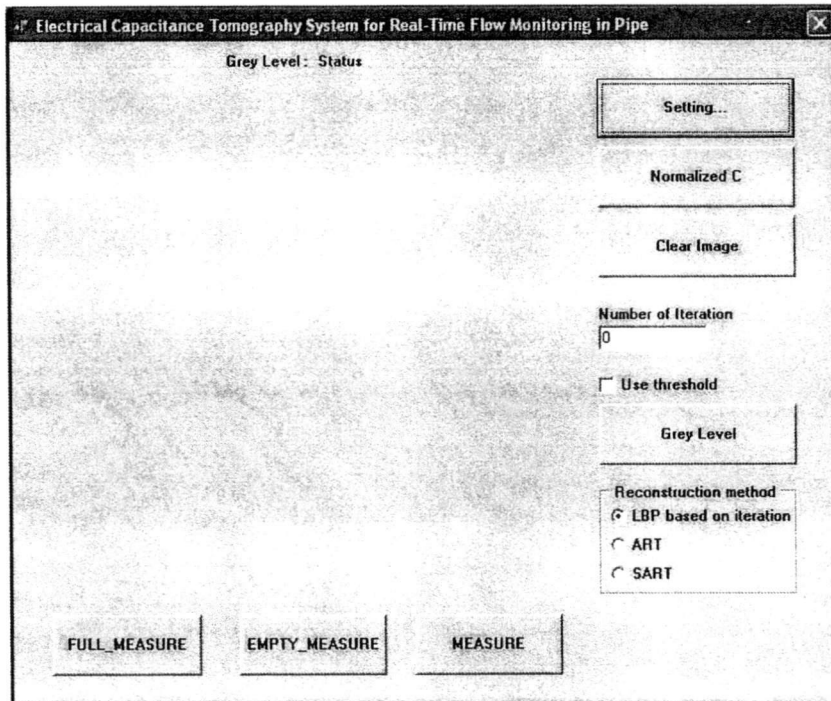
จากอัลกอริทึมที่กล่าวมาข้างต้น จะใช้เป็นพื้นฐานในการนำมาพัฒนาโปรแกรมในการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวาง โดยลักษณะของหน้าจอโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะของหน้าจอ โปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

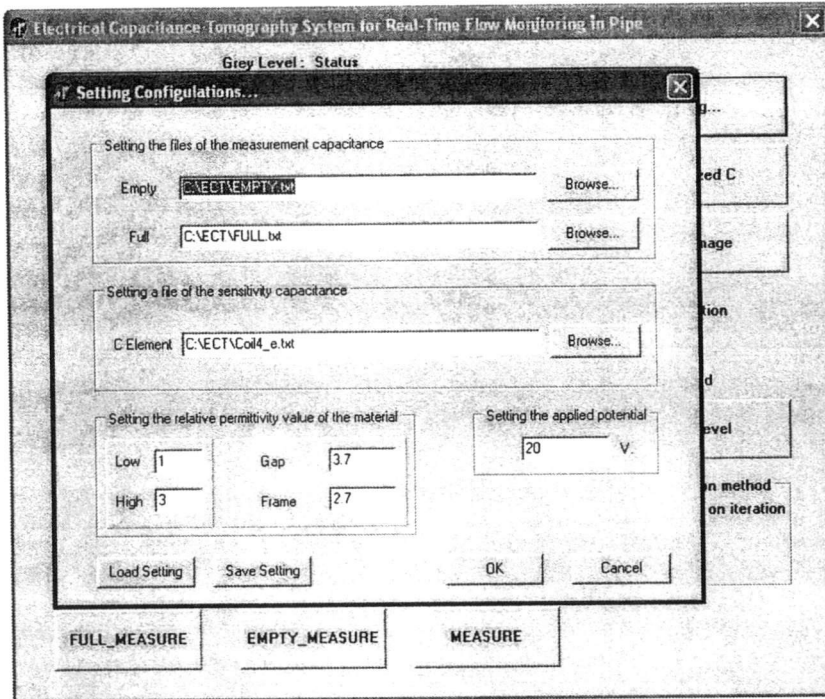
สำหรับวิธีการใช้งาน โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสามารถแสดงรายละเอียดและขั้นตอนในการใช้งานโปรแกรมหดังนี้

1. ทำการเปิดโปรแกรม ECT.EXE หน้าจอจะแสดงโปรแกรม Electrical Capacitance Tomography System for Real-Time Flow Monitoring in Pipe ดังแสดงในรูปที่ 4.7



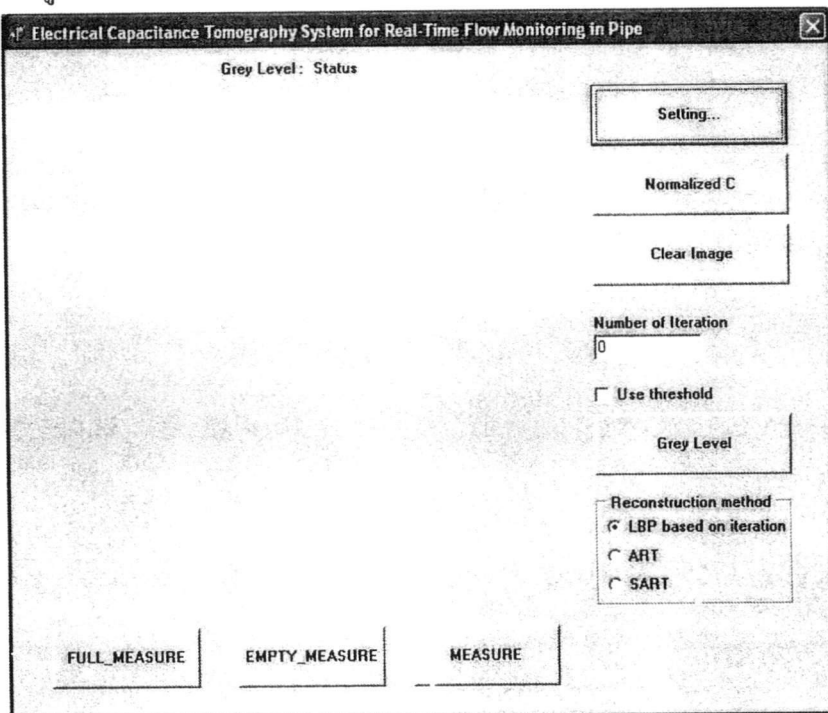
รูปที่ 4.7 หน้าจอของโปรแกรม Electrical Capacitance Tomography System for Real-Time Flow Monitoring in Pipe เมื่อเปิดไฟล์ ECT.EXE

2. ทำการเติมน้ำมันเข้าสู่แบบจำลองให้เต็มเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลขณะน้ำมันเต็มท่อเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง
3. ทำการกดปุ่ม FULL_MEASURE เพื่อทำการเก็บข้อมูลขณะน้ำมันเต็มท่อ
4. ทำการปล่อยน้ำมันออกจากท่อให้หมดเพื่อทำการเก็บข้อมูลขณะไม่มีน้ำมันอยู่ในท่อเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง
5. ทำการกดปุ่ม EMPTY_MEASURE เพื่อทำการเก็บข้อมูลขณะไม่มีน้ำมันอยู่ในท่อ
6. หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม Setting... เพื่อทำการเซตอัพระบบ โดยลักษณะของหน้าจอโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Setting... สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



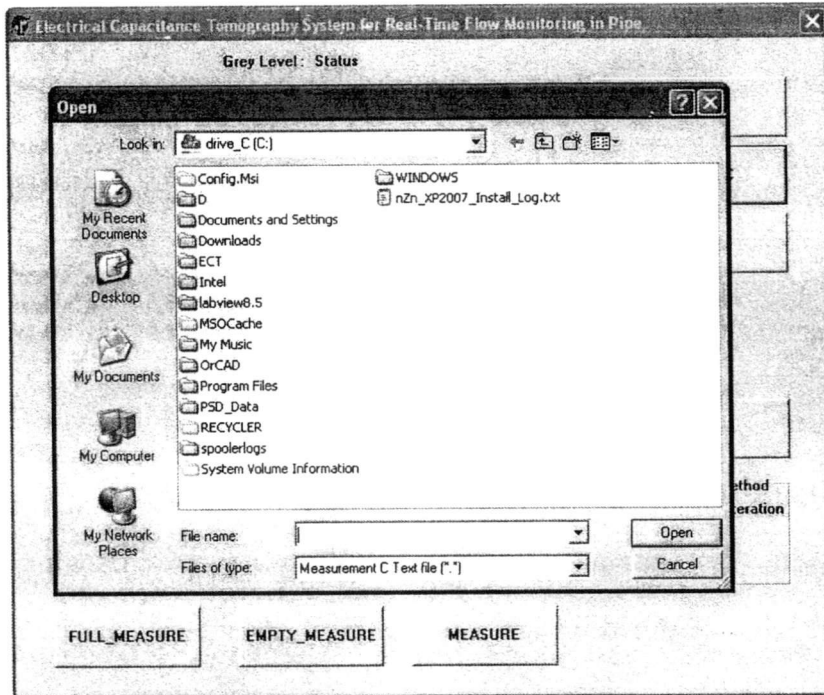
รูปที่ 4.8 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Setting...

- ทำการเส็ตค่าต่างๆของระบบ หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม OK โปรแกรมจะกลับมายังหน้าหลักดังรูปที่ 4.9



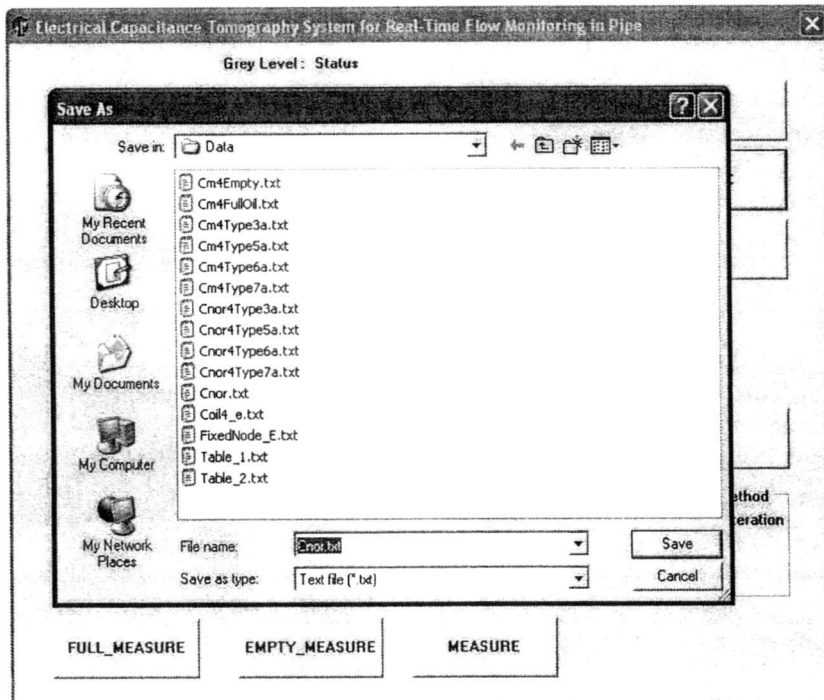
รูปที่ 4.9 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OK

8. จากนั้นทำการ Normalize ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้โดยการกดปุ่ม Normalized ซึ่งลักษณะของหน้าจอโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Normalized C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



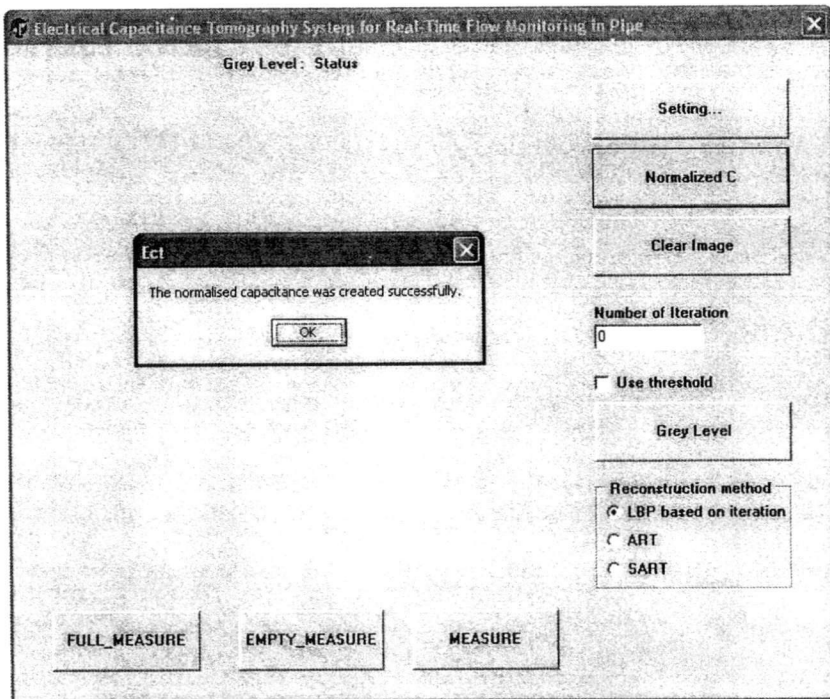
รูปที่ 4.10 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Normalized C

9. หลังจากนั้นทำการเลือกไฟล์ของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดแล้วทำการกดปุ่ม OPEN โปรแกรมทำการเปิดไฟล์ที่เก็บค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ออกมาทำการ Normalize C จากนั้นโปรแกรมจะให้ทำการกำหนดชื่อไฟล์ในการบันทึกค่า Normalize C ดังแสดงในรูปที่ 4.11



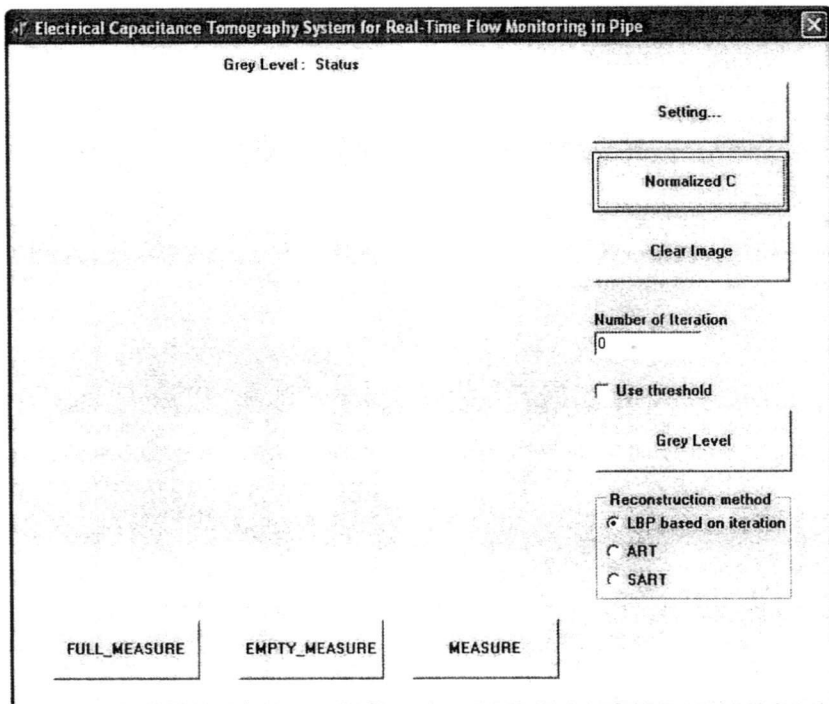
รูปที่ 4.11 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OPEN

10. ทำการกด SAVE โปรแกรมจะเก็บผลการ Normalized C ดังรูปที่ 12



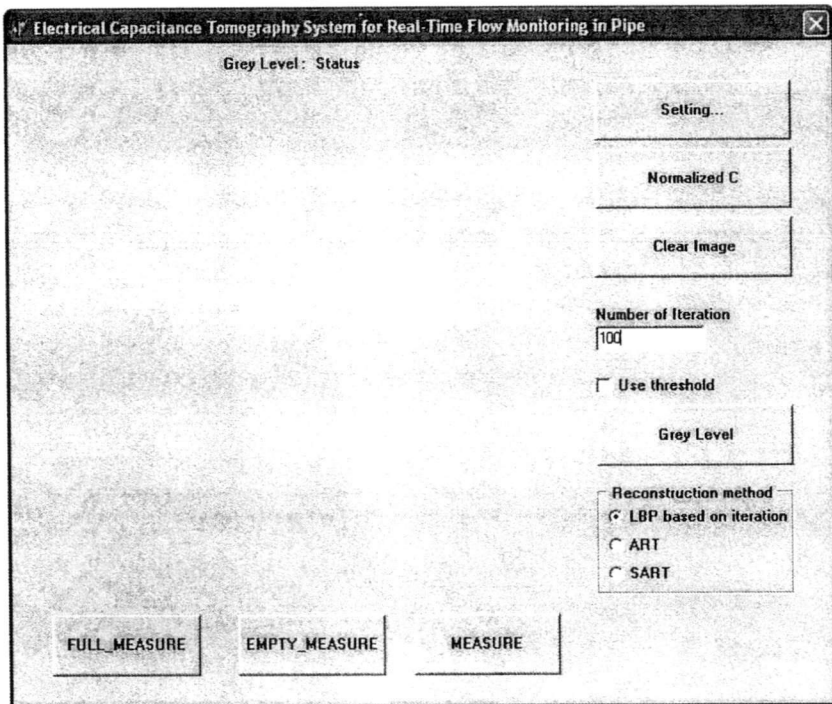
รูปที่ 12 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม SAVE

11. จากนั้นทำการกดปุ่ม OK โปรแกรมจะกลับมายังหน้าจอหลักดังรูปที่ 13



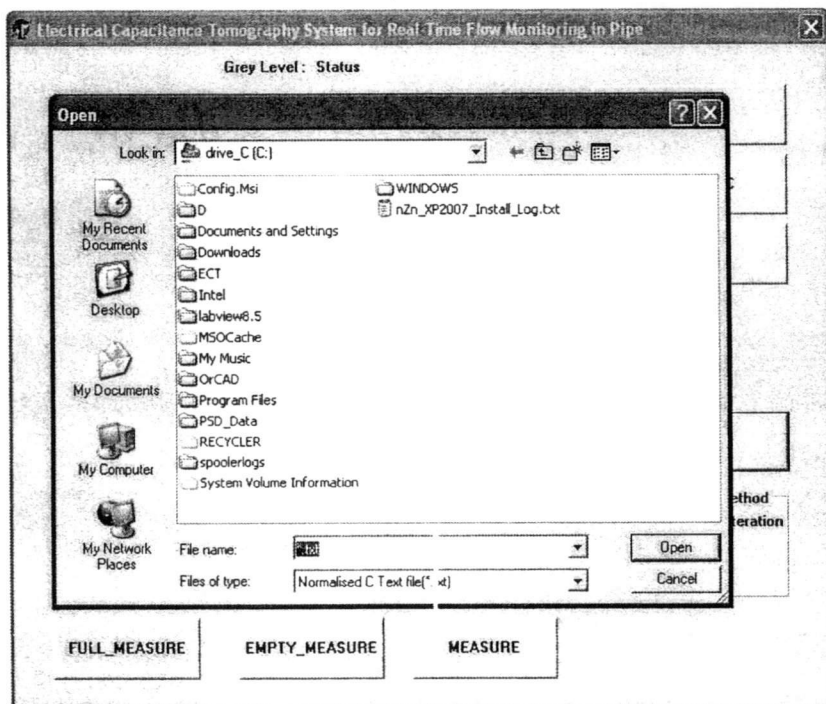
รูปที่ 13 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OK

12. จากนั้นเลือกจำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ (Number of Iteration) โดยกรอกตัวเลขลงไป
ไปในช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 14



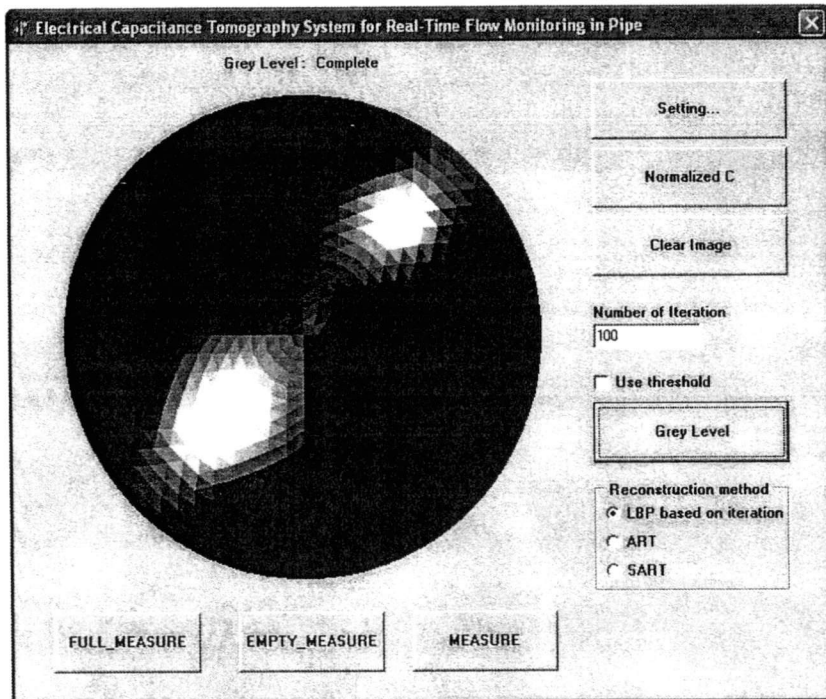
รูปที่ 14 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกรอกตัวเลขจำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ

13. จากนั้นจึงทำการเลือกอัลกอริทึมในการสร้างภาพแล้วทำการกดปุ่ม Grey Level เพื่อ
ทำการเปิดข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าที่ผ่านการ Normalize แล้วมาทำการสร้างภาพ
โดยลักษณะของหน้าจอเมื่อทำการกดปุ่ม Grey Level สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม Grey Level

14. จากนั้นทำการเลือกไฟล์ที่ทำการ Normalize แล้วมาทำการสร้างภาพโดยการกดปุ่ม OPEN โปรแกรมจะทำการประมวลผลและทำการสร้างภาพ โดยลักษณะของหน้าจอ เมื่อทำการกดปุ่ม OPEN สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16



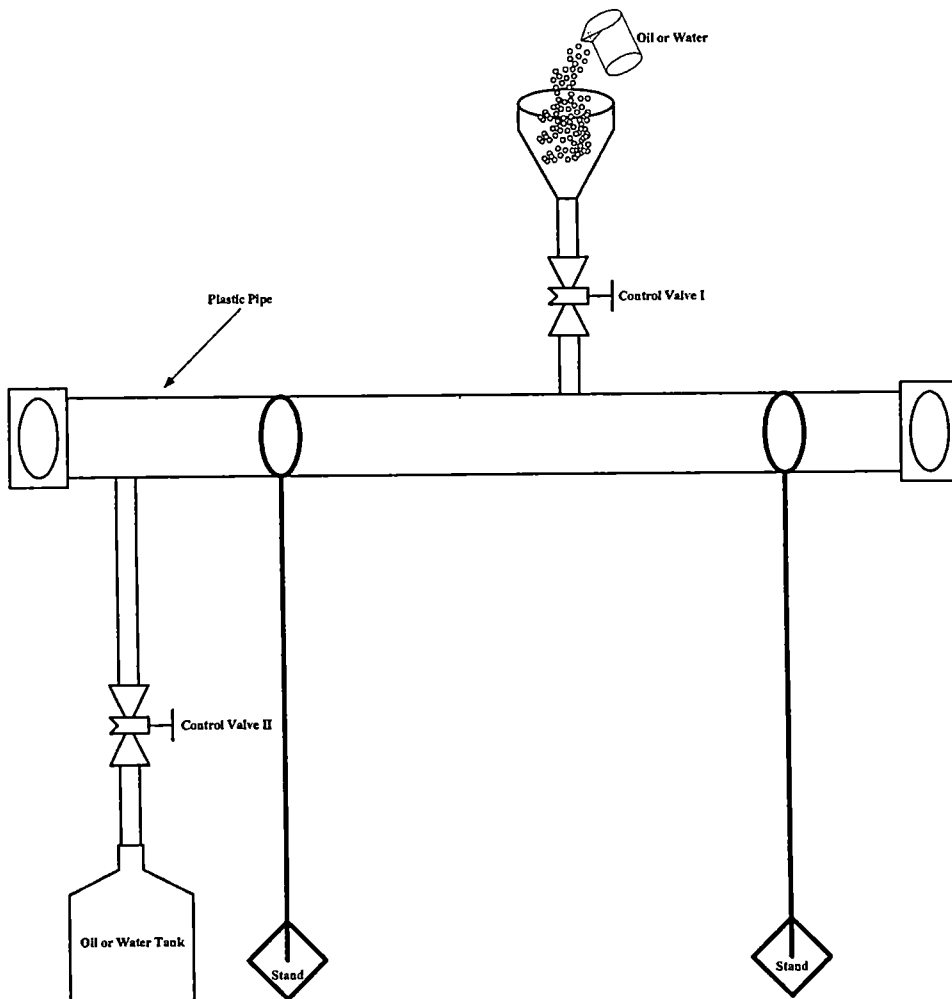
รูปที่ 16 หน้าจอของโปรแกรมเมื่อทำการกดปุ่ม OPEN เพื่อทำการสร้างภาพ

บทที่ 5

การออกแบบระบบจำลองสำหรับทดสอบระบบ

สำหรับบทนี้จะนำเสนอการออกแบบจำลองสำหรับทดสอบโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมา ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นซึ่งจะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- 5.1 ส่วนสำหรับเติมของเหลวเข้าไปในท่อ (น้ำ, น้ำมัน)
- 5.2 ส่วนของท่อส่งน้ำหรือน้ำมันสำหรับนำมาทดสอบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ (น้ำ, น้ำมัน)
- 5.3 ส่วนที่ใช้สำหรับการปล่อยน้ำหรือน้ำมันออกจากท่อเพื่อทำการทดสอบการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อในรูปแบบต่างๆ

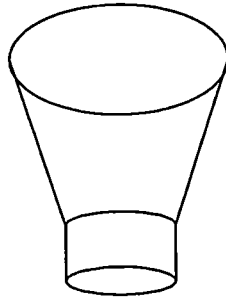


รูปที่ 5.1 ระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้น

โดยรายละเอียดของระบบสำหรับจำลองการไหลของวัตถุภายในท่อสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้

5.1 ส่วนสำหรับเติมของเหลวเข้าไปในท่อ (น้ำ, น้ำมัน)

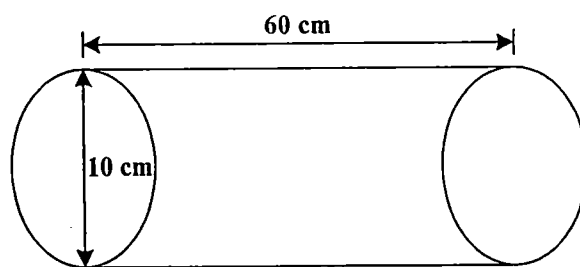
สำหรับในองค์ประกอบส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการเติมของเหลวที่ใช้ในการทดสอบลงไปในพื้นที่ที่ติดเซนเซอร์เอาไว้ ซึ่งเราจะทำการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในท่อเพื่อใช้ทดสอบระบบที่เราได้ทำการพัฒนาขึ้นมา โดยลักษณะของส่วนที่ใช้เติมของเหลวลงไปในท่อจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ลักษณะของส่วนที่ใช้เติมของเหลวลงไปในท่อ

5.2 ส่วนของท่อสำหรับนำมาทดสอบสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ

สำหรับส่วนนี้จะใช้ท่อพีวีซีในการนำมาใช้เป็นท่อสำหรับบรรจุของเหลวสำหรับทดสอบระบบที่พัฒนา โดยขนาดของท่อพีวีซีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ลักษณะของท่อพีวีซีที่ใช้ในการทดสอบระบบ

จากรูปที่ 5.3 เราสามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำมันที่จะใช้ในการทดสอบขณะน้ำมันเต็มท่อได้จากสูตรดังสมการที่ (5.1)

$$V = \pi r^2 h \quad (5.1)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของทรงกระบอก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

r = รัศมีของทรงกระบอก (เซนติเมตร)

h = ความสูงของทรงกระบอก (เซนติเมตร)

ดังนั้นจากรูปที่ 5.3 เราสามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำมันที่จะใช้ในการทดสอบขณะน้ำมันเต็มท่อได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V &= \pi * (5^2) * 60 \\ &= 3.1416 * 25 * 60 \\ &= 4712.4 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ประมาณ 5 ลิตร} \end{aligned}$$

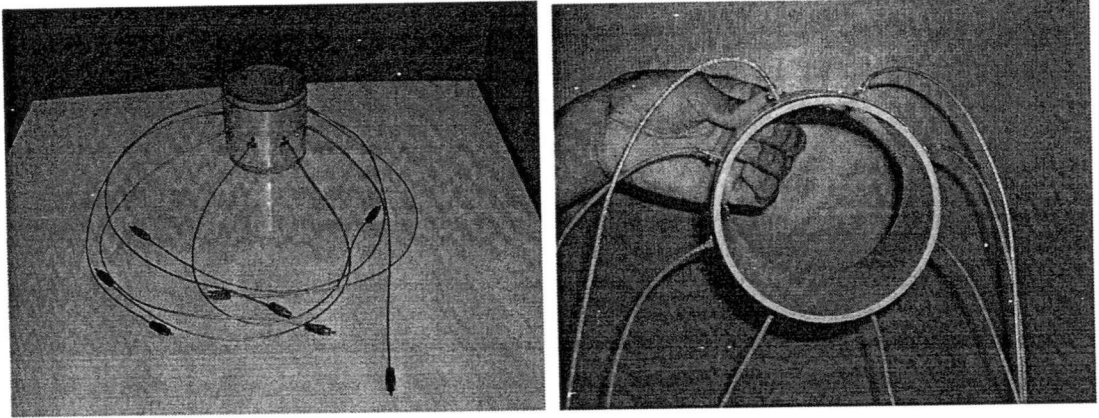
จากการคำนวณเราจะพบว่าระบบที่ทำการออกแบบขึ้นมาจะใช้ปริมาณน้ำมัน 4712.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ประมาณ 5 ลิตร ในการทดสอบขณะน้ำมันเต็มท่อ

5.3 ส่วนที่ใช้สำหรับการปล่อยน้ำหรือน้ำมันออกจากท่อเพื่อทำการทดสอบการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อในรูปแบบต่างๆ

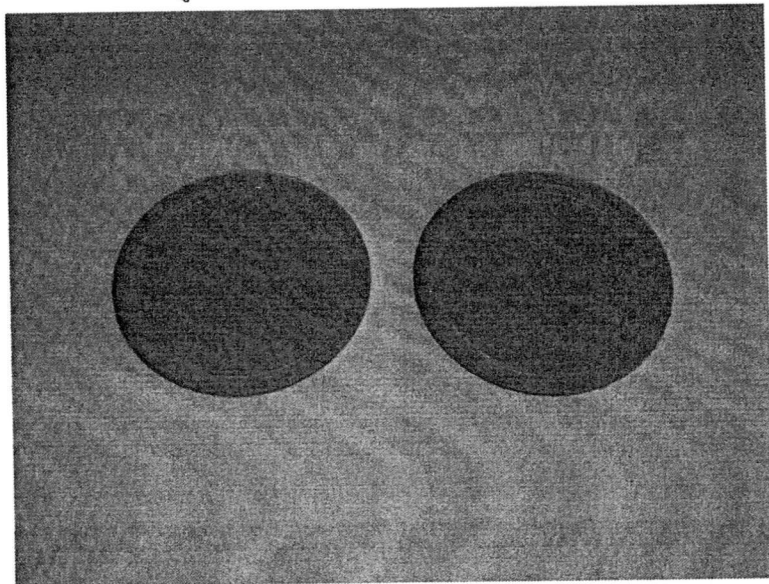
ในส่วนนี้จะใช้วัสดุในการปรับระดับน้ำมันให้ได้ระดับตามที่เราต้องการทดสอบ สำหรับลักษณะของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบระบบการสร้างภาพแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.9



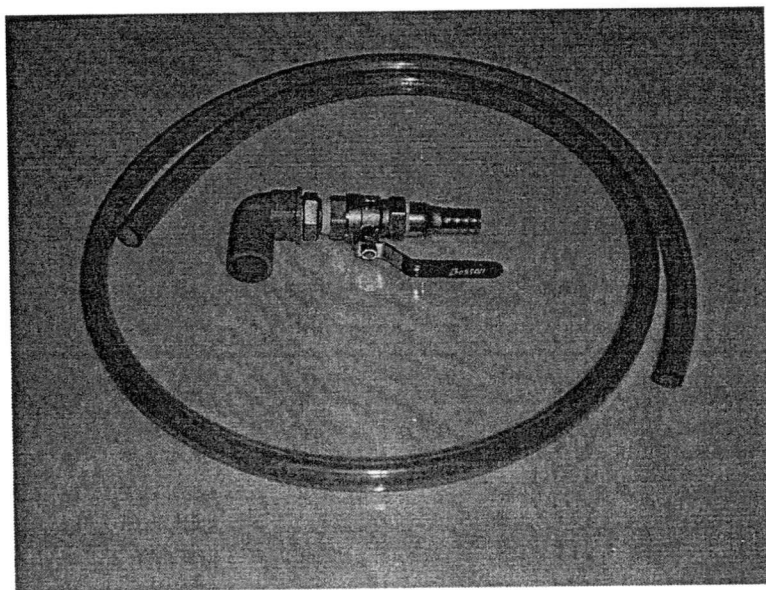
รูปที่ 5.4 ลักษณะของส่วนประกอบสำหรับสร้างระบบจำลองสำหรับทดสอบระบบ



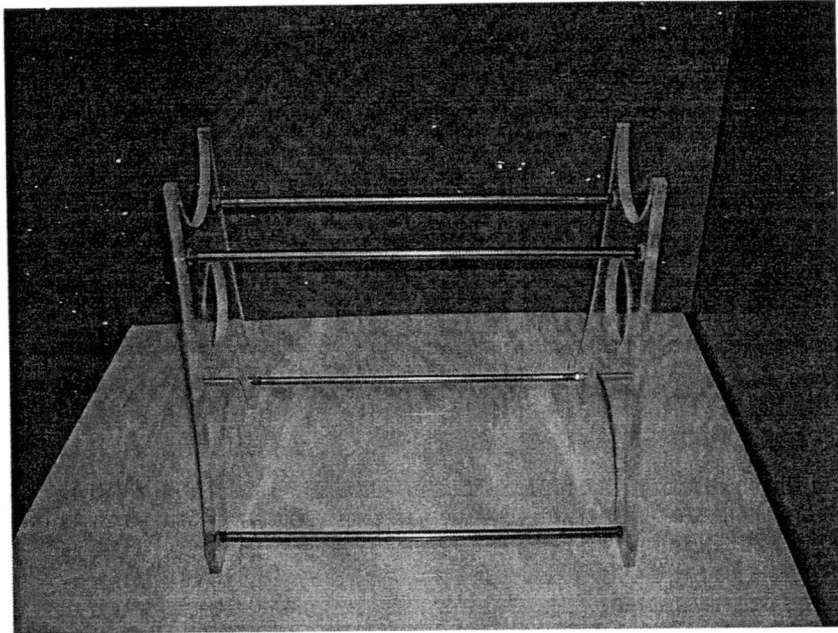
รูปที่ 5.5 เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง



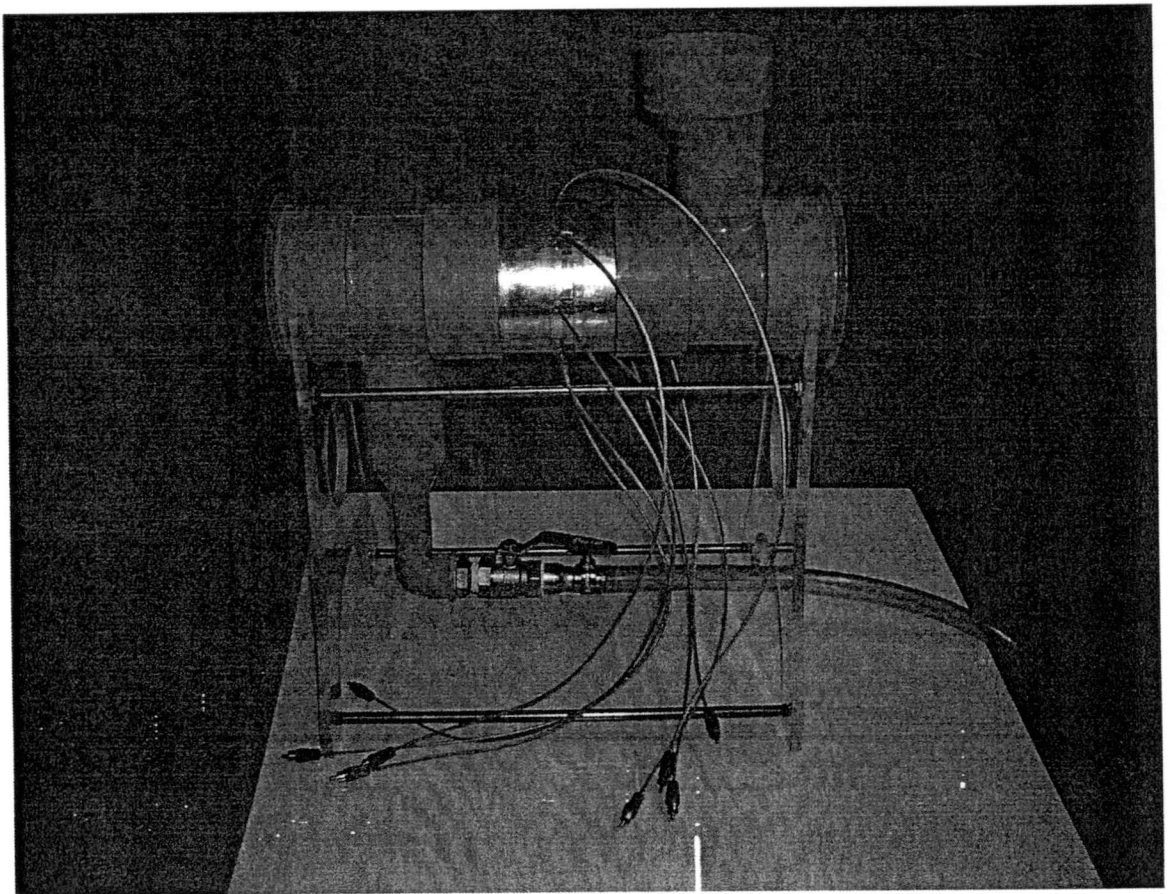
รูปที่ 5.6 ลักษณะของฝาปิดท่อที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถสังเกตลักษณะของวัตถุภายในท่อ



รูปที่ 5.7 ลักษณะของวาล์วที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำหรือน้ำมัน



รูปที่ 5.8 ลักษณะของแท่นสำหรับยึดแบบจำลองและภาชนะที่ใช้ในการบรรจุน้ำมัน



รูปที่ 5.9 ลักษณะของระบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมา

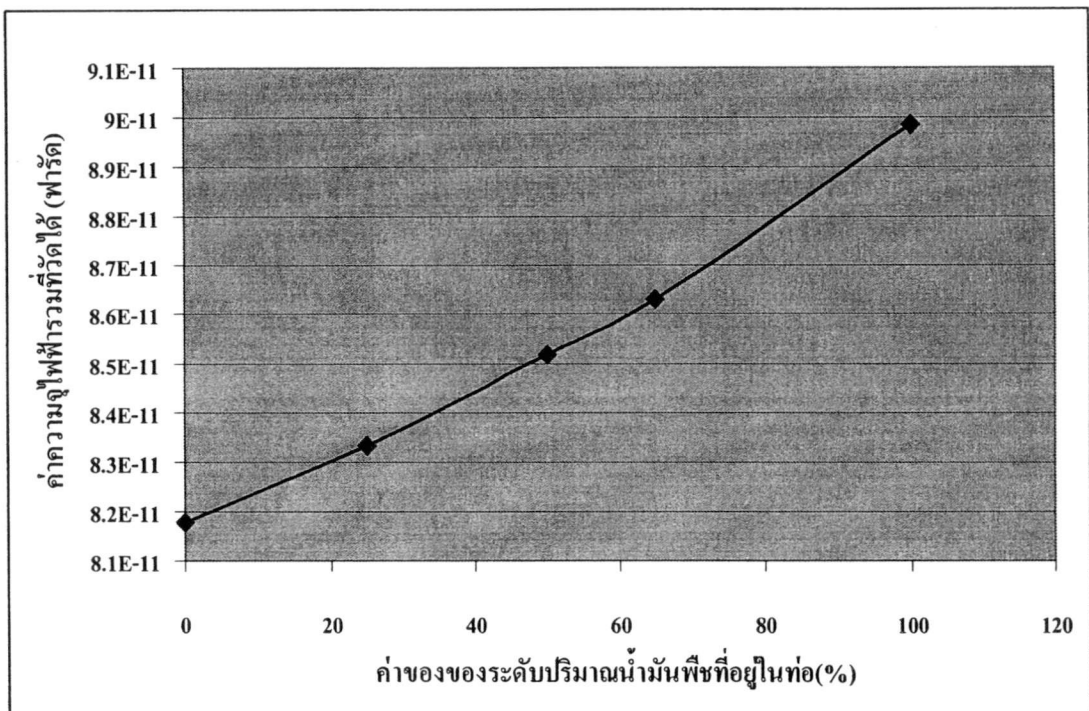
บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับในส่วนของการทดลองและผลการทดลองจะแยกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

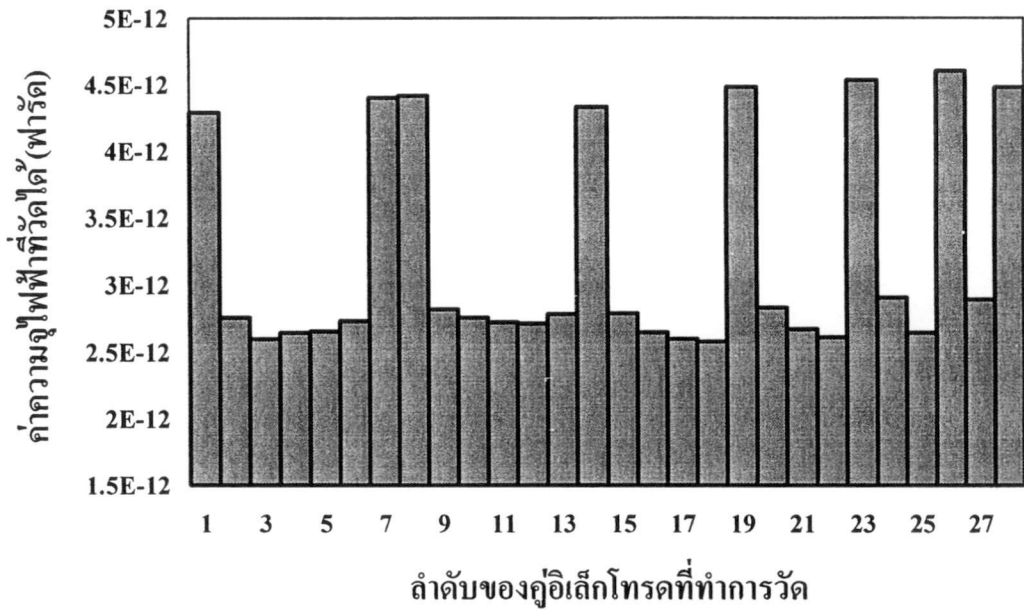
6.1 การทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมากับระบบจำลอง

สำหรับการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมากับระบบจำลองที่สร้างขึ้นเราจะใช้น้ำมันพืชที่มีค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนต์ ประมาณ 3.7 เดิมลงระบบจำลองที่สร้างขึ้นที่ระดับปริมาณต่างๆ จากนั้นจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้ารวมด้วยระบบที่สร้างขึ้น สำหรับกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ารวมที่วัดได้และ ค่าของระดับปริมาณน้ำมันพืชที่อยู่ในท่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1

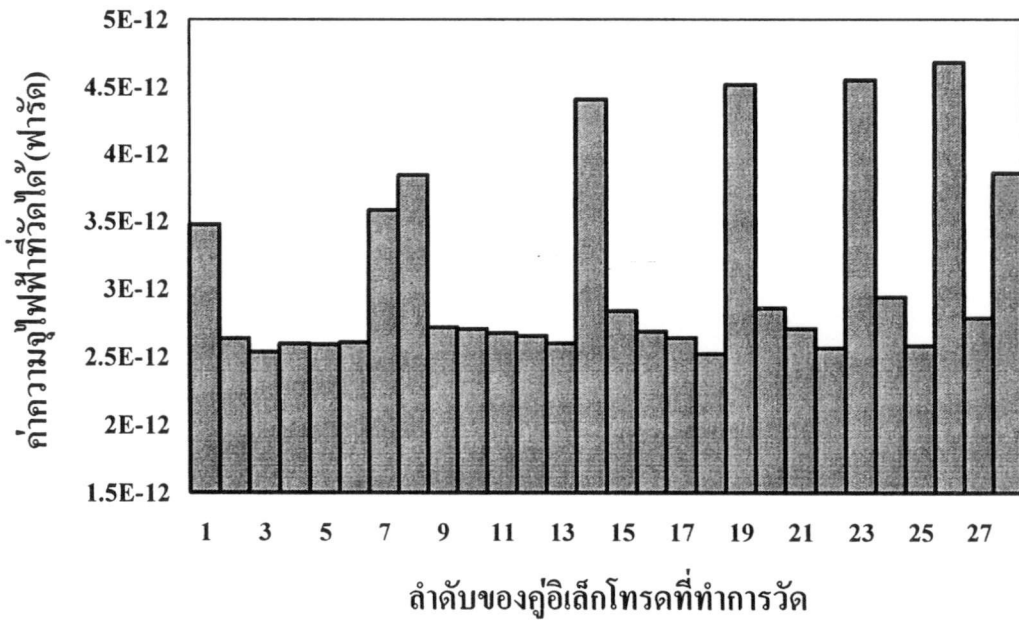


รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ารวมที่วัดได้และ ค่าของระดับปริมาณน้ำมันพืชที่อยู่ในท่อที่ระดับต่างๆ

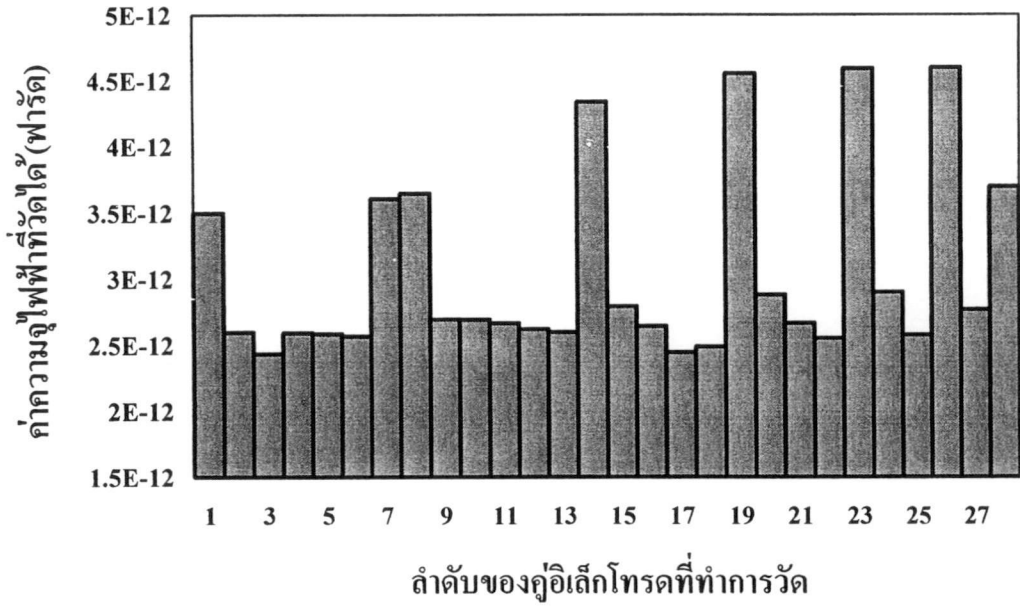
สำหรับกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโทรดที่ทำการวัดเมื่อระดับน้ำมันในท่อที่ระดับต่างๆ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.7



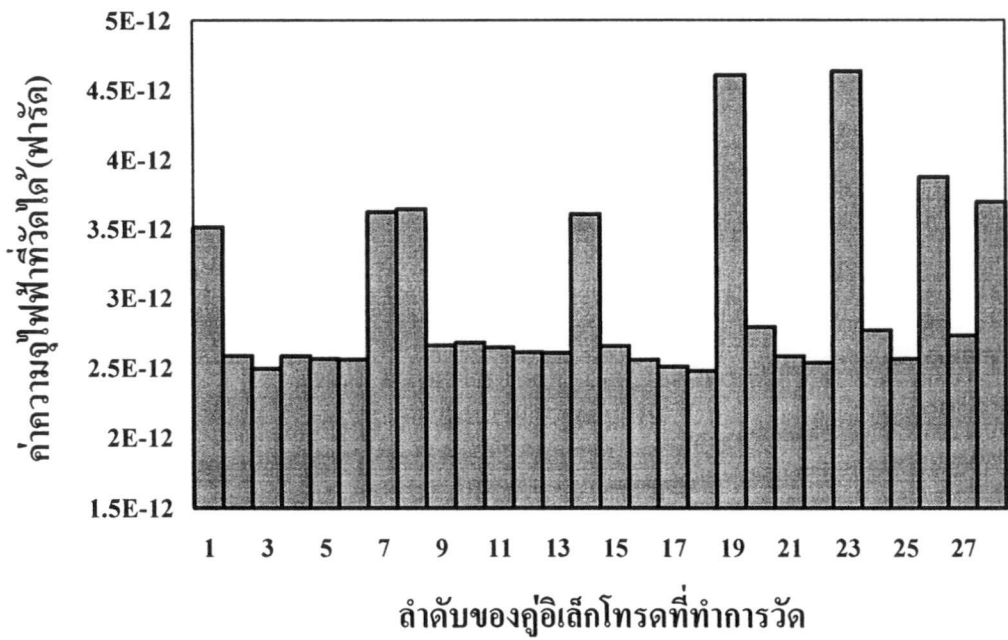
รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโทรดที่ทำการวัดเมื่อ ปริมาณระดับน้ำมัน 100% (เต็มท่อ)



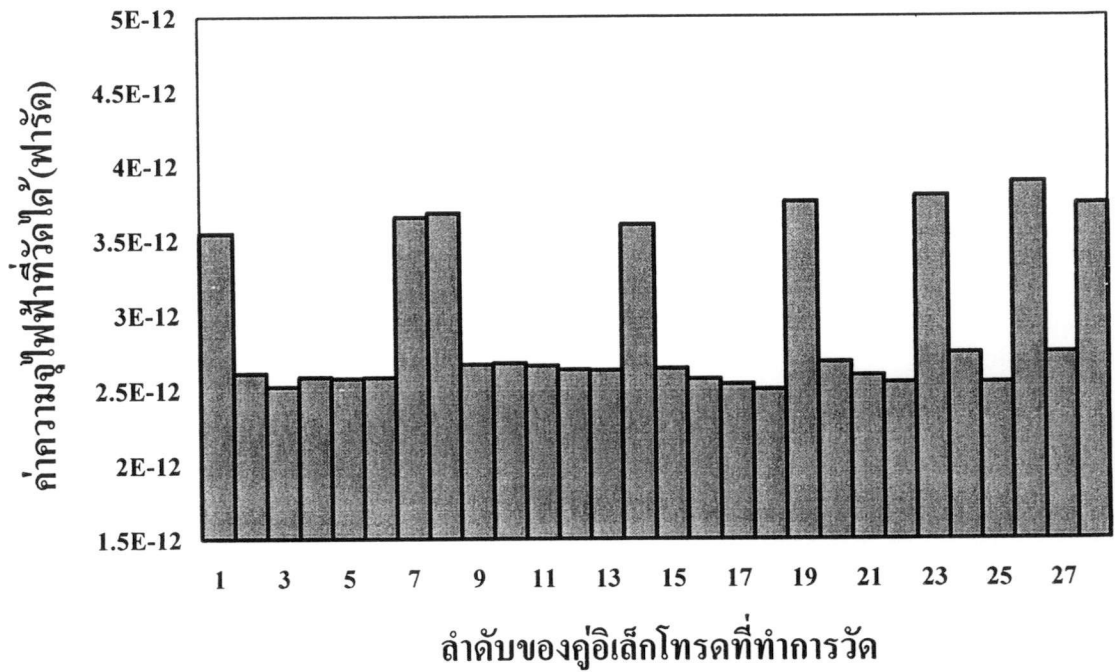
รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับ น้ำมัน 65%



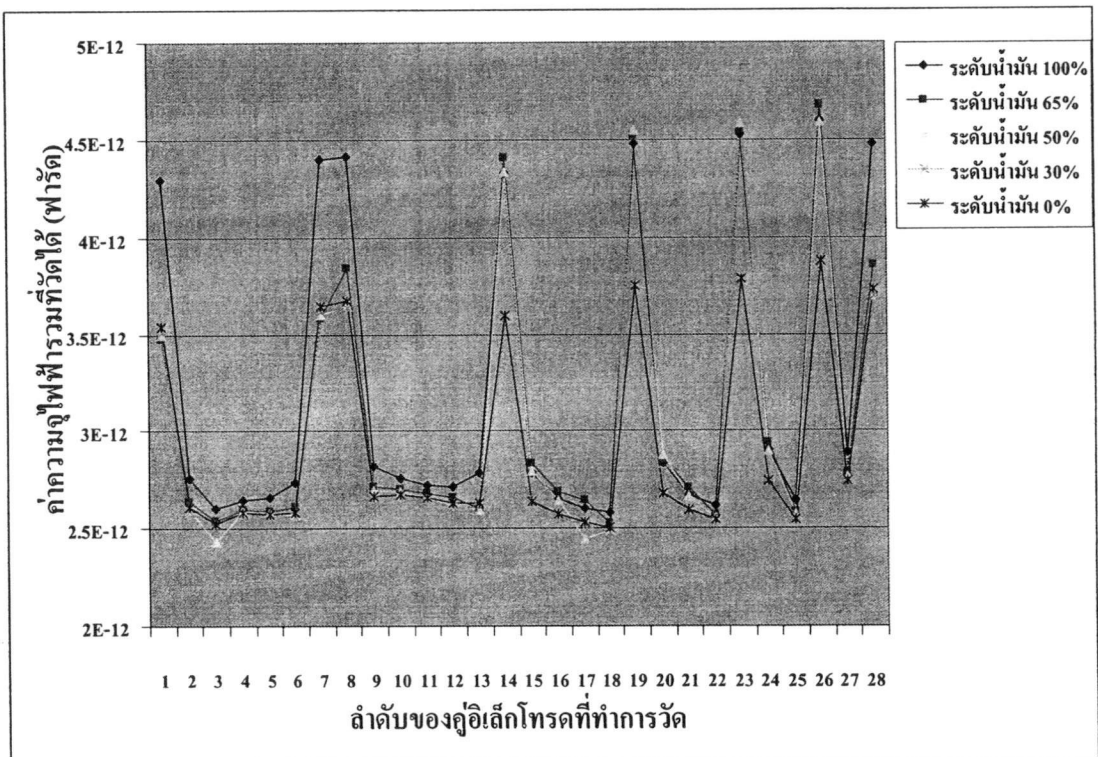
รูปที่ 6.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 50%



รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับคู่อิเล็กโทรดที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 25%



รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับตู้อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการวัดเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 0%

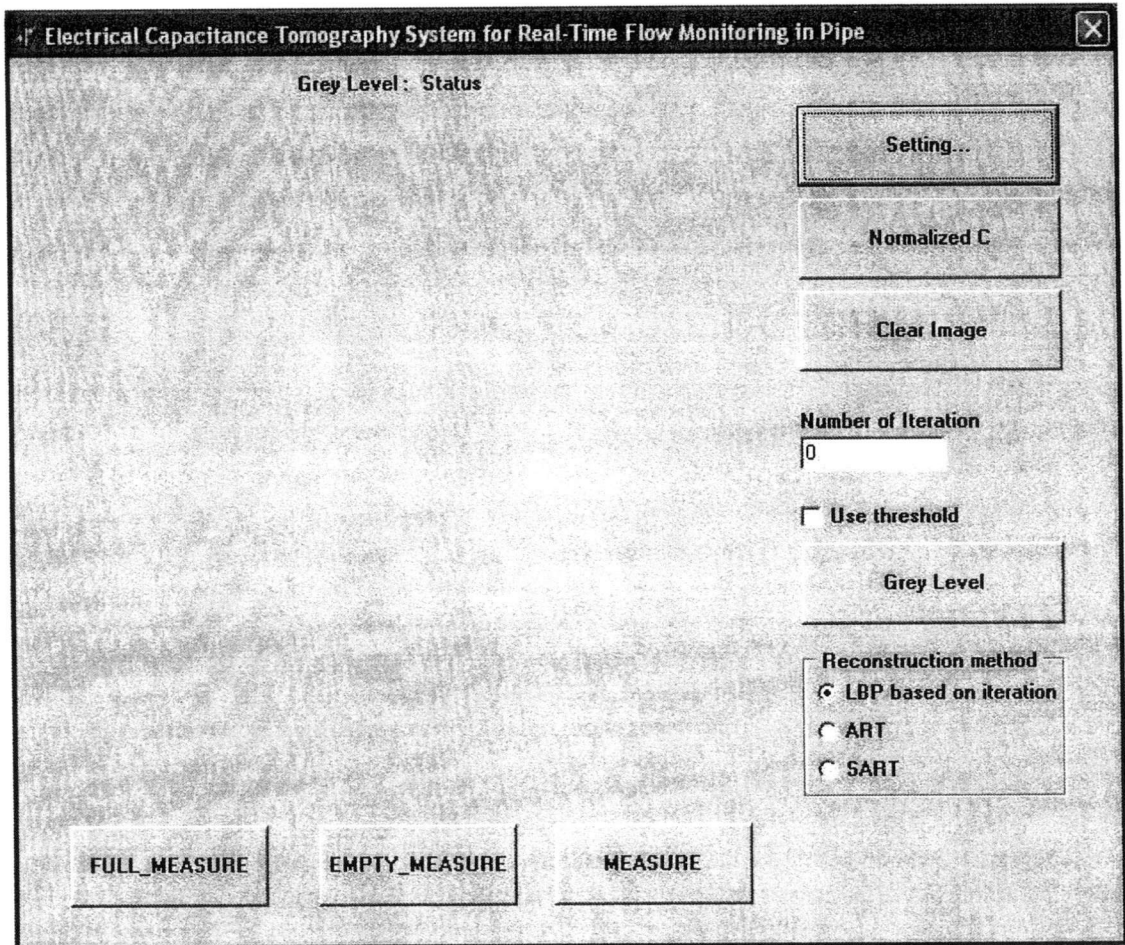


รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับลำดับตู้อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการวัดเมื่อระดับน้ำมันปริมาณมีค่าต่างๆ

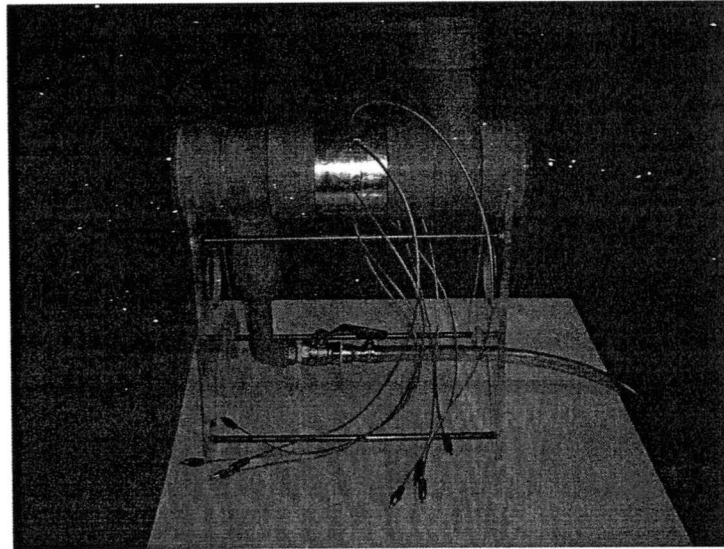
จากการทดสอบวงจรในส่วนต่างๆ ผลปรากฏว่าวงจรในแต่ละส่วนของระบบวัดและเก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

6.2 การทดสอบโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าจากการวัดจริง

สำหรับในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมากับระบบจำลองที่สร้างขึ้นมาดังรูปที่ 6.8 ถึงรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.8 โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูลและสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมา

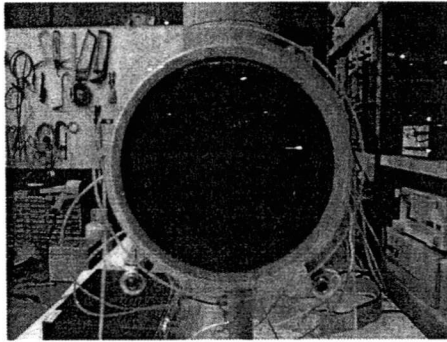


รูปที่ 6.9 ระบบจำลองที่สร้างขึ้นมาทดสอบ โปรแกรมสำหรับการควบคุมการเก็บข้อมูล และสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้า

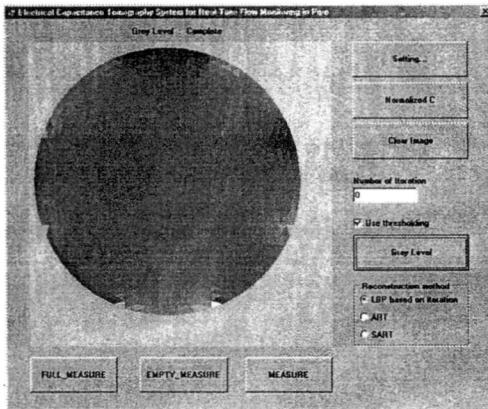


รูปที่ 6.10 ระบบทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

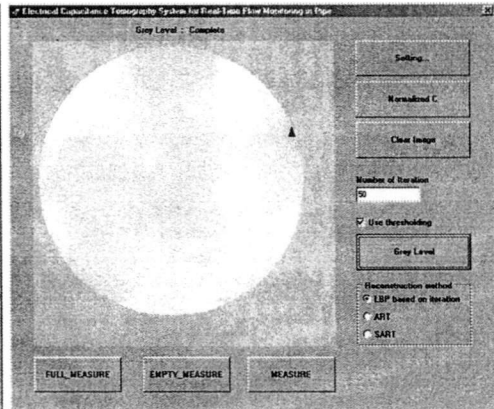
จากระบบที่ใช้ในการทดลองในรูปที่ 6.10 สำหรับในการทดลองนั้นเราจะทำการปรับเปลี่ยนค่าของระดับปริมาณน้ำมันพืชที่อยู่ในท่อของระบบจำลองที่ระดับต่างๆ แล้วทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จากแต่ละคู่ของอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะได้ทั้งหมด 28 ค่าโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ผลที่ได้ ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดนี้จะถูกส่งเข้าไปประมวลผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าความจุไฟฟ้าแล้วทำการสร้างภาพกลับด้วยจำนวนการทำซ้ำอยู่ที่ 0,50,100,500,1000,2000 รอบ โดยผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.15



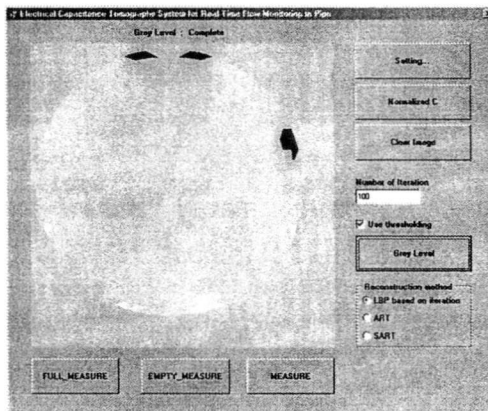
รูปถ่ายระบบจำลอง



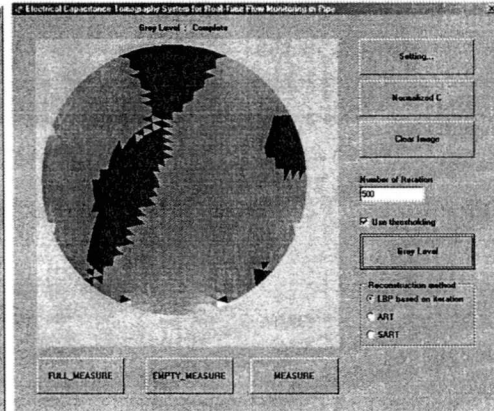
Iteration = 0



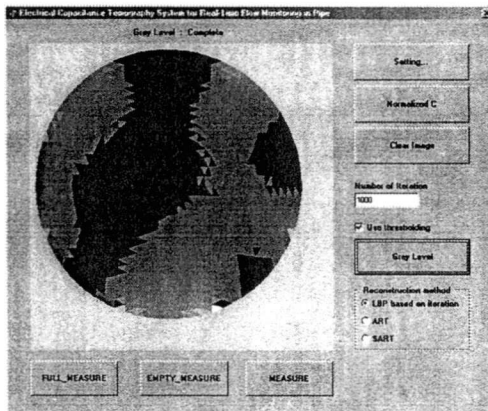
Iteration = 50



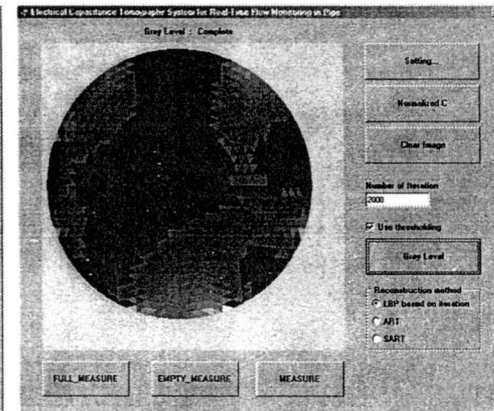
Iteration = 100



Iteration = 500

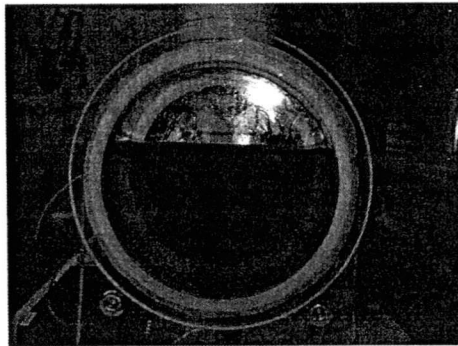


Iteration = 1000

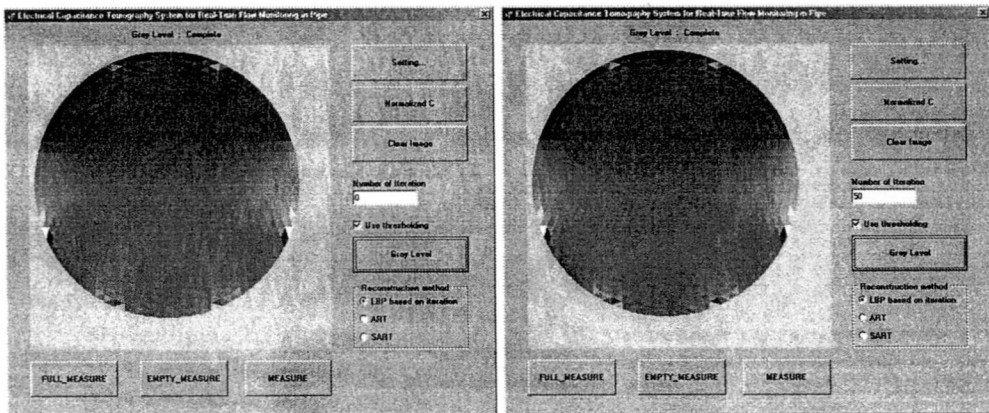


Iteration = 2000

รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 100%

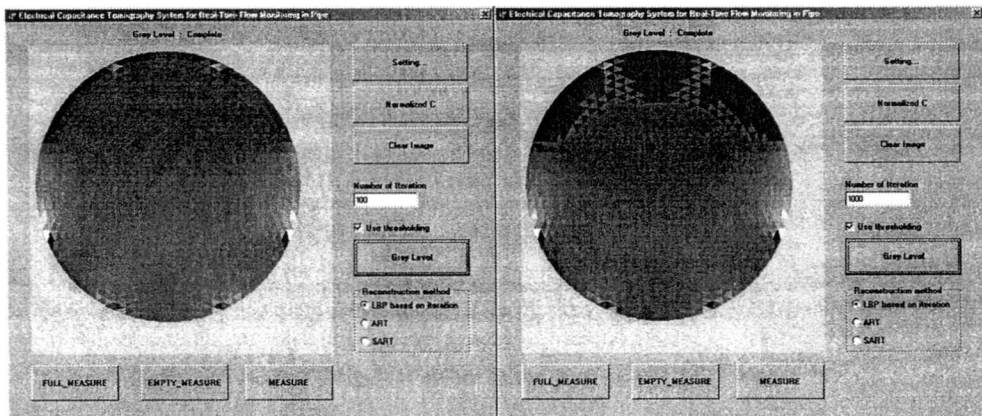


รูปถ่ายระบบจำลอง



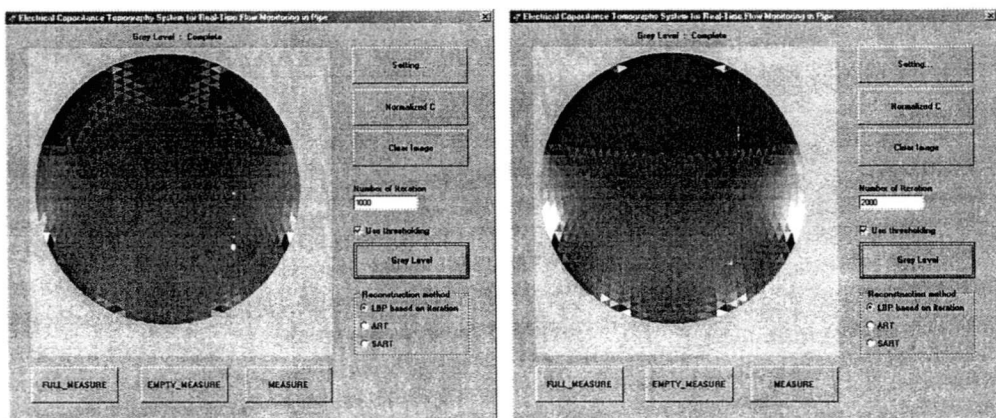
Iteration = 0

Iteration = 50



Iteration = 100

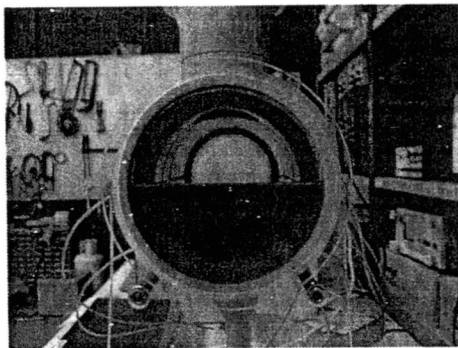
Iteration = 500



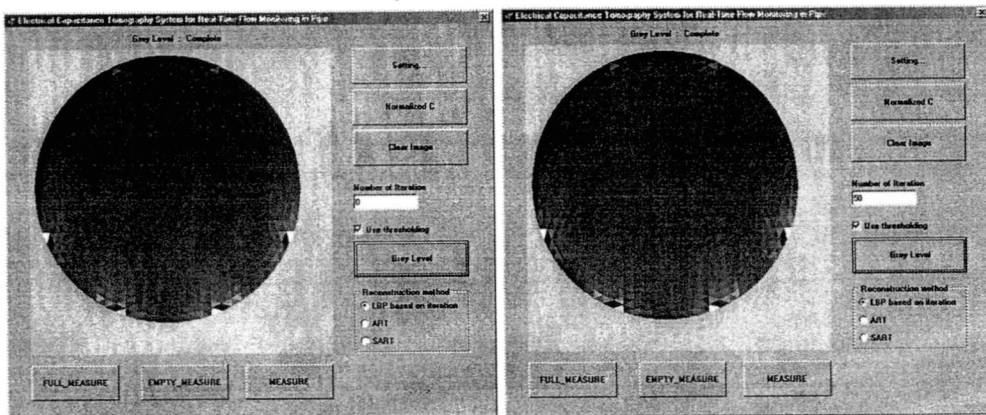
Iteration = 1000

Iteration = 2000

รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 65%

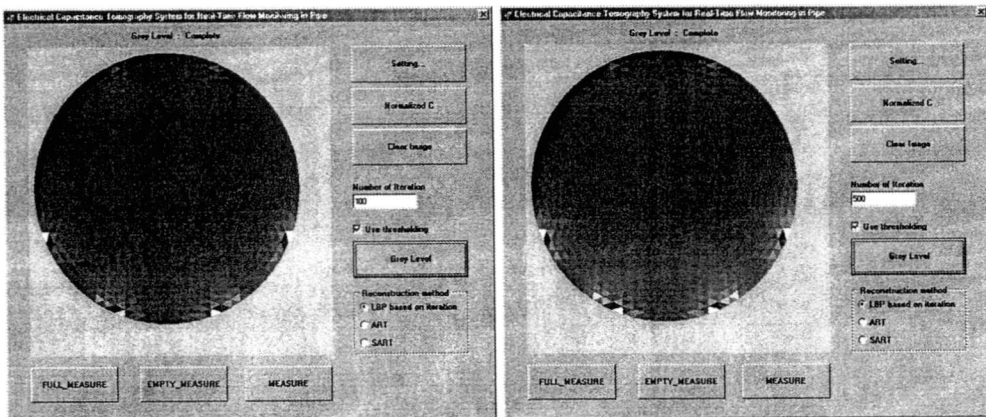


รูปถ่ายระบบจำลอง



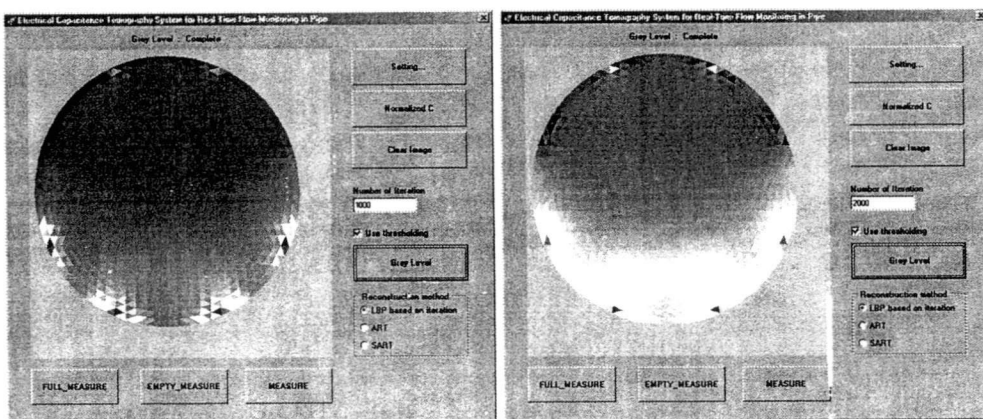
Iteration = 0

Iteration = 50



Iteration = 100

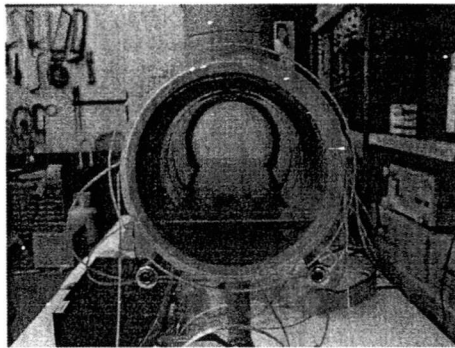
Iteration = 500



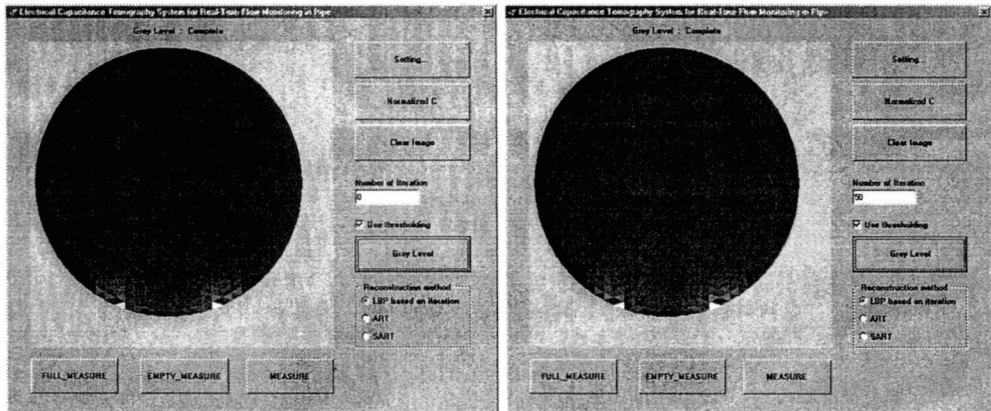
Iteration = 1000

Iteration = 2000

รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 50%

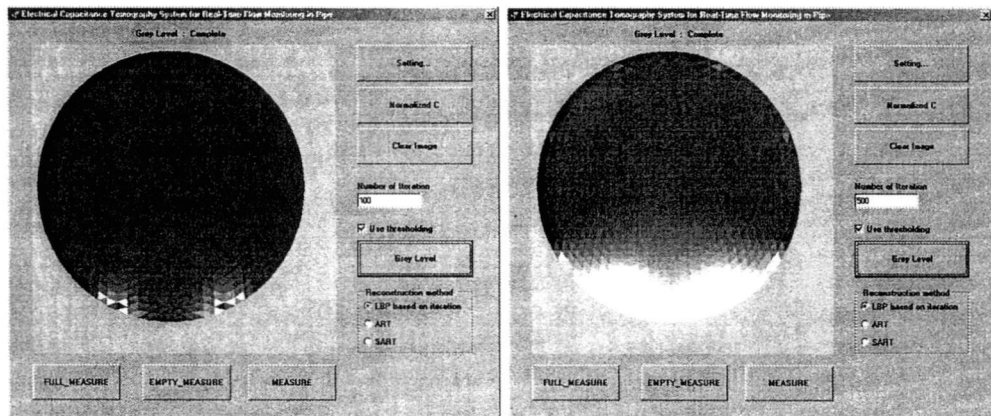


รูปถ่ายระบบจำลอง



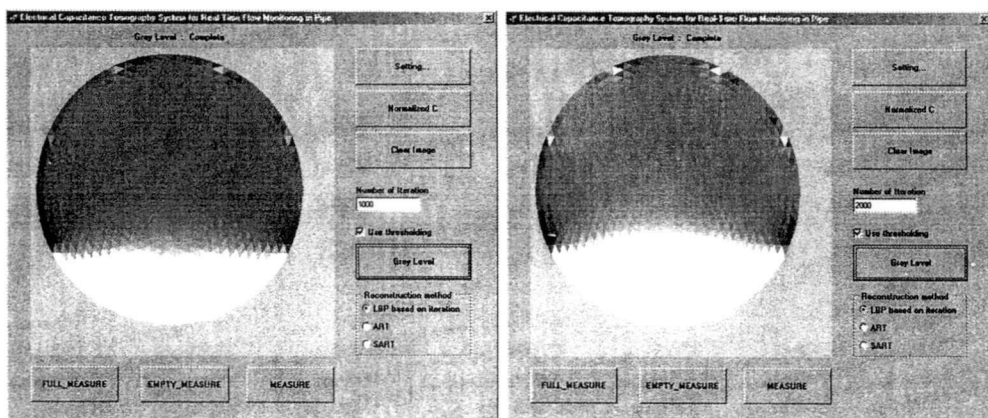
Iteration = 0

Iteration = 50



Iteration = 100

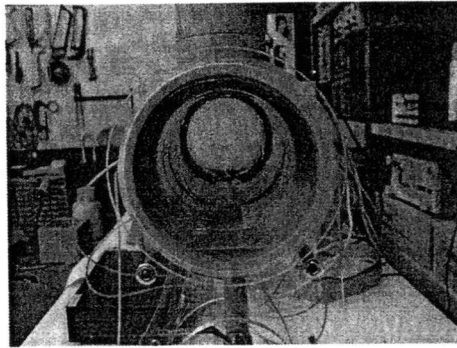
Iteration = 500



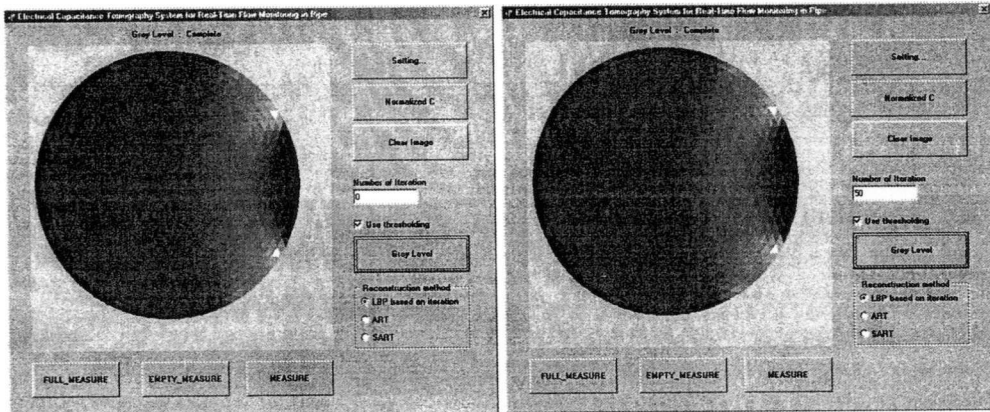
Iteration = 1000

Iteration = 2000

รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 30%

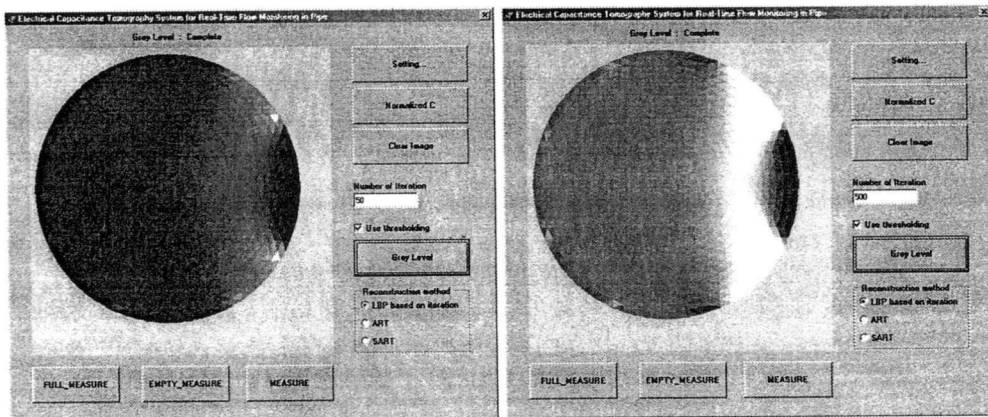


รูปถ่ายระบบจำลอง



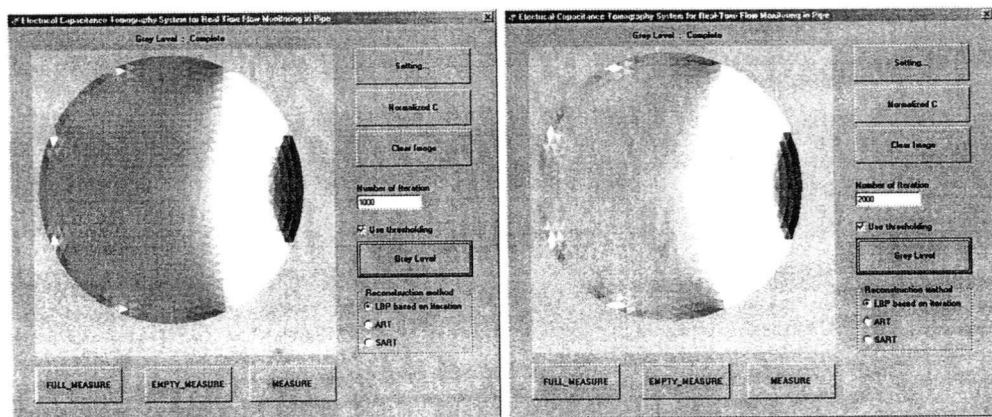
Iteration = 0

Iteration = 50



Iteration = 100

Iteration = 500



Iteration = 1000

Iteration = 2000

รูปที่ 6.15 ผลการทดสอบสร้างภาพของระบบจำลองเมื่อปริมาณระดับน้ำมัน 0%

บทที่ 7

บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหล ภายในท่อแบบเวลาจริงผลปรากฏว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมาสามารถสร้างภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับของไหลของภายในท่อได้ แต่ยังคงมีค่าความผิดพลาดของภาพอยู่บ้าง สำหรับความถูกต้องของภาพที่ถูกสร้างกลับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของเพอมีตริวิตี ขนาด รูปร่าง ค่าระดับเทา และตำแหน่งที่อยู่ในภาพ คุณภาพของภาพสามารถถูกปรับปรุงได้โดยการเพิ่มจำนวนพิกเซลของภาพ การเพิ่มจำนวนของอิเล็กโทโรด การทำเทรซโซลต์กับชุดข้อมูลที่เหมาะสม และการเพิ่มจำนวนของการทำซ้ำ แต่ทั้งนี้จำนวนของการทำซ้ำจะต้องสอดคล้องกับการสูญเสียของผลเฉลย และเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองจะพบว่าระบบจะมีค่าความผิดพลาดของภาพสูงในกรณีที่มีปริมาณระดับของของเหลว(น้ำมัน) มีค่าเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ และ 0 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรท่อ เหตุที่เกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากผลของความจุไฟฟ้าที่วัดได้ขณะนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าในการอ้างอิงของระบบ หากค่าที่วัดได้มีสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้การคำนวณมีความผิดพลาดสูง(ผลเฉลยจะลู่ออก) ดังนั้นการแก้ไขปัญหาจะต้องทำการพัฒนาให้ระบบวัดค่าความจุไฟฟ้ามีความถูกต้องมากเพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มีความถูกต้องและส่งผลให้ภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุจริง

แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมาจะความยุ่งยากในการวัดสัญญาณและการสร้างภาพกลับแต่ระบบนี้มีข้อดีคือ ระบบการวัดไม่ซับซ้อน ไม่แพง ไม่มีผลกระทบหรือรบกวนต่ออุปกรณ์อื่นๆ จึงเหมาะที่จะให้ผู้สนใจนำไปพัฒนาต่อไป

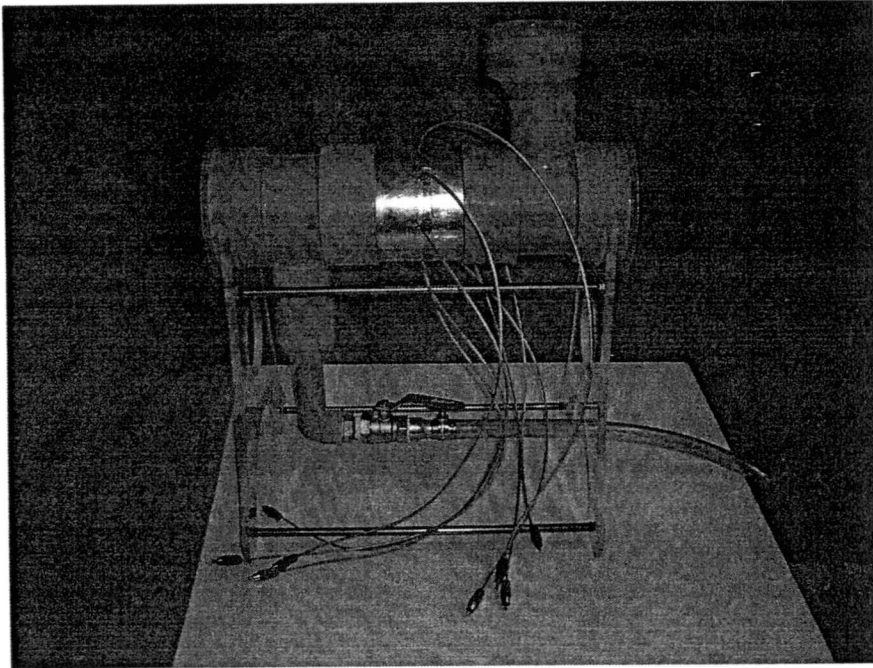
เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.chbmeng.ohio-state.edu/~fan/research/08_ECT.html
- [2] <http://www.tomoflow.com>
- [3] <http://www.ect-instruments.com/images/instra1.jpg>
- [4] W.Q. Yang Hardware design of electrical capacitance tomography systems Sci. Meas. Technol.7, 1996, pp.225-232.
- [5] อภินัย ฤกษ์รัตน์ รายงานโครงการวิจัยโดยเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2550 “การสร้างระบบภาพตัดขวางแสดงการไหลของวัตถุภายในท่อ”, 2550
- [6] Howard M. Berlin, Design of OP-AMP Circuits with Experiments, Macmillan, Carmel, IN., 1989.
- [7] Ramakant A. and Gayakwad, OP-AMP and Linear integrated circuits, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
- [8] W.H. Hayt Jr. Engineering Electromagnetics. 5th Ed. New York : McGraw-Hill. 1989.
- [9] Joseph A. Edminister. Theory and Problems of Electromagnetics, 2nd Ed. McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- [10] Chanrit Yossontikul, Phittaya Ungpinitpong, Kitiphol Chitsakul, Manas Sangworasil, “Image Reconstruction for Electrical Capacitance Tomography using SART Method.”, Proc. of The 2003 International Technical Conference On Circuits/Systems Computers and Communications, Phoenix Park, Korea, July 7-9, 2003.
- [11] Apinai Rerkratn, Chanrit Yossontikul, Thanakorn Lertpakdee, Kitiphol Chitsakul and Manas Sangworasil, “Electrical Capacitance Tomography Using Square Sensor”, Proc. of The 2003 International Technical Conference On Circuits/Systems Computers and Communications, Phoenix Park, Korea, July 7-9, 2003.

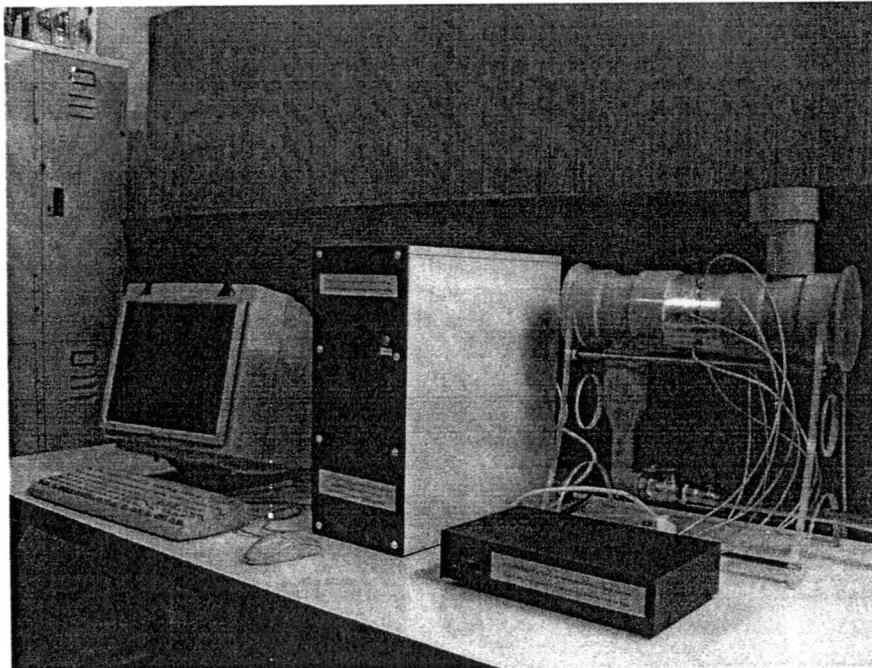
ภาคผนวก ก

ระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง

สำหรับในภาคผนวก ก จะแสดงลักษณะของระบบจำลองสำหรับทดสอบระบบและต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบเวลาจริง โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก1 - ก2



รูปที่ ก1 ลักษณะของระบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นมา



รูปที่ ก2 ต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความจุไฟฟ้าสำหรับมอนิเตอร์การไหลภายในท่อแบบ
เวลาจริง