

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ

ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY SYSTEM

อภินัย ฤกษ์รัตน์

APINAI RERKRATN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-877-5

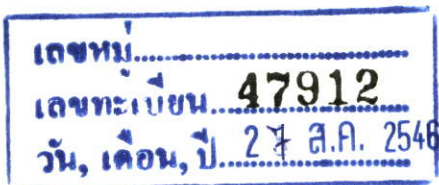
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ

ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY SYSTEM

อภินัย ฤกษ์รัตน์

APINAI RERKRATN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-877-5

**ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY SYSTEM**

**APINAI RERKRATN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974-648-877-5**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ
ชื่อนักศึกษา	นายอภิณัย ฤกษ์รัตน์
รหัสประจำตัว	41061037
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
ชื่ออาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.กิติพล ชิตสกุล

### บทคัดย่อ

การสร้างภาพตัดขวางแสดงความต้านทานไฟฟ้าภายในของวัตถุสามารถทำได้ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่พื้นผิวรอบๆวัตถุ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุแบบ 32 อิเล็กโทรด โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 32X4 แชนแนลในการจัดรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในของวัตถุโดยอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) และวิธีการนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ที่ปรับปรุงใหม่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในของวัตถุที่คำนวณได้จะแสดงผลโดยใช้ระดับความเข้มของจอแสดงผลของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ จากการทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้าระหว่าง 1-10 มิลลิแอมป์ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตกับถ่านน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุที่มีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่างกันในรูปแบบต่างๆ พบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถสร้างภาพตัดขวางที่มีความสามารถในการแยกแยะวัตถุได้

<b>Thesis Title</b>	Electrical Impedance Tomography System
<b>Student</b>	Mr. Apinai Rerkratn
<b>Student ID.</b>	41061037
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Kitiphon Chitsakul

## **ABSTRACT**

Electrical Impedance Tomographic Image of conducting object can be obtained by injecting a small medium frequency current into the object via an array of electrodes attached around the outer surface. The voltage across the internal impedance collected by the same electrodes are used to reconstruct image of cross section of internal impedance on the plane of electrodes. The results of implementations of electrical impedance tomography system are presented in this thesis. The system uses the 32X4 multiplexer to define the patterns of current injection and voltage measurement around the object. Data from voltage measurement are sent to a microcomputer for reconstruction of the image by improved algorithm based on Finite Element and Newton-Raphson Method. Then the impedance image in gray scale is displayed on monitor. In some experiments using current 1-10 mA 100 Khz with saline tank containing the objects with different conductivity and size, the resulting images show the cross-section of the object with distinction.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร. กิตติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ช่วยกรุณาให้คำปรึกษา วางแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนชี้แนะแก้ปัญหาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือเป็นอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำและข้อมูลต่างๆจากบุคคลต่อไปนี้

1. รศ.ดร. มนต์ สวรรค์ศิลป์ อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพฑูริย์ อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. ผศ. ประภากร สุวรรณะ อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4. ดร. ยุทธนา คิดใจเดียว อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. ดร. สุพันธ์ ตั้งจิตกุศลมั่น อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. นาย วุฒิกร จิตรวุฒิชัย นายช่างอิเล็กทรอนิกส์ ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

7. นาย เทอดชัย ฐเนศวโรดม

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ พี่ๆน้องๆทุกคน ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C) ที่ได้สนับสนุนเงินในการทำวิทยานิพนธ์มาถึง 2 ปีการศึกษา

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออนันต์ คุณแม่สุภาพ ฤกษ์รัตน์ และน้องๆผู้ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษากับผู้เขียนมาตลอด

อภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า.....	4
2.1 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography).....	5
บทที่ 3 พื้นฐานของการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า.....	9
3.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว.....	9
3.2 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูล (Data collection method).....	13
3.2.1 แบบ 2 อิเล็กโทรด.....	13
3.2.2 แบบ 4 อิเล็กโทรด.....	13
3.3 ค่าความสภาพความต้านทานภายในองค์ประกอบของร่างกาย.....	15
บทที่ 4 อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า.....	17
4.1 อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า.....	17
4.1.1 วิธี Sensitivity.....	17
4.1.2 วิธี Perturbation.....	17
4.1.3 วิธี Double constraint.....	17
4.1.4 วิธีแบ็ค โปรเจกชัน.....	18

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.5 วิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	18
4.2 อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ร่วมกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	20
4.2.1 แบบจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในตัวกลาง.....	20
4.2.2 วิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ).....	21
4.2.3 วิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ).....	24
4.2.4 การกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้น.....	32
บทที่ 5 ระบบเก็บข้อมูล (DATA COLLECTION SYSTEM).....	33
5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์ (Sine wave Oscillator).....	33
5.1.1 การป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback).....	34
5.1.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเวน-บริดจ์ (Wien-Bridge Oscillator).....	35
5.1.3 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Oscillator).....	36
5.1.4 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบทวินที (Twin-T Oscillator).....	37
5.2 วงจรจ่ายกระแส (Current Generator).....	38
5.2.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบโพลตดิ่งโหลด (Floating Load Current Source).....	40
5.2.2 วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบใช้การป้อนกลับแบบบวก (Positive –Feedback VCCS).....	43
5.2.3 ระบบควบคุมการจ่ายกระแสแบบลูปปิด (Closed Loop Current Controlling System).....	44
5.3 วงจรดีมอดูเลต (Demodulate Circuit).....	47
5.3.1 เอนVELOป ดีเทกเตอร์ (Envelop Detector).....	47
5.3.2 วงจรดีมอดูเลตโดยใช้วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ (AC-To-DC Convertor).....	50
5.3.3 ซิงโครนัสดีเทกเตอร์และเฟสเซนซิทีฟดีเทกเตอร์ (Synchronous Detector and Phase Sensitive Detector : PSD).....	51
5.3.4 การดีมอดูเลตด้วยสัญญาณซิงโครนัส (Demodulation with a Synchronous Reference).....	53

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.5 เฟสเซนซิทีฟดีเทคเตอร์ (Phase Sensitive Detector).....	54
5.4 อิเล็กโทรด (ELECTRODE).....	57
5.4.1 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (MATERIALS).....	57
5.4.2 ผลของความถี่ที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรด.....	59
5.4.3 ขนาด (Size) ของอิเล็กโทรด.....	60
5.5 ความปลอดภัยทางไฟฟ้า (Electrical Safety).....	60
5.5.1 ประเภทของกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำที่ต่อกับร่างกาย.....	61
5.5.2 การป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า.....	63
5.5.2.1 การป้องกันกระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลง กราวด์ และกระแสสลับที่ผ่านไอโซเลชันที่เป็นอันตราย .....	63
5.5.2.2 การป้องกันกระแสรั่วไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อกับร่างกาย ของผู้ถูกวัดขณะใช้งาน.....	64
บทที่ 6 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าแบบ 32 อิเล็กโทรด.....	66
6.1 โครงสร้างของระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรด.....	66
6.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Oscillator)ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต.....	66
6.3 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source).....	68
6.4 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ.....	72
6.5 การ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface Card).....	74
6.6 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A TO D Converter).....	77
6.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล.....	78
6.8 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด (Peak Detector).....	79
6.9 วงจรไอโซเลชัน (Isolation Circuit).....	83
บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง.....	86
7.1 การทดสอบระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรด.....	86
7.1.1 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสคงที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต.....	87
7.1.2 การทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต.....	88

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	94
7.1.4 การทดสอบเสถียรภาพและความถี่ของวงจรคีมอคูเลเตอร์แบบตรวจ จับสัญญาณแรงดันยอด.....	96
7.1.5 การทดสอบสัญญาณรบกวนในสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ได้จากระบบ เก็บข้อมูล.....	100
7.2 การทดสอบระบบเก็บข้อมูลกับแบบจำลอง (Phantom) ขนาด 32 อีเล็กโทรด.....	103
7.2.1 การทดสอบผลของความหนาของระบบจำลองต่อสัญญาณที่วัดได้จาก เก็บข้อมูล .....	108
7.2.2 การทดสอบผลของระดับน้ำเกลือในถึงน้ำเกลือต่อภาพตัดขวางที่สร้างได้.....	109
7.2.3 การทดสอบผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในแบบจำลองต่อสัญญาณที่วัดได้จาก ระบบเก็บข้อมูล.....	111
7.2.4 การทดสอบผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในถึงน้ำเกลือ (แบบจำลอง) ต่อภาพตัด ขวางที่สร้างได้.....	114
7.2.5 การทดสอบผลของค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ต่อความคมชัดของภาพตัดขวางความ ต้านไฟฟ้า.....	115
7.2.6 การทดสอบเวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริทึม.....	122
7.2.7 การทดสอบการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุในรูปแบบต่าง ๆ.....	122
7.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของค่าสภาพความต้านทานที่คำนวณได้ในสภาวะต่างๆ...126	
7.3.1 การทดสอบผลของอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณต่อค่าสภาพความต้านทาน ที่คำนวณได้.....	127
7.3.2 การทดสอบผลของค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ที่ใช้ในการคำนวณต่อค่าสภาพความต้าน ทานที่คำนวณได้.....	130
7.3.3 การทดสอบผลของระดับน้ำเกลือในถึงน้ำเกลือต่อค่าสภาพความต้านทานที่ คำนวณได้.....	133
บทที่ 8 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา.....	136
เอกสารอ้างอิง.....	138
ภาคผนวก ก.....	140

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข.....	143
ประวัติผู้เขียน.....	144

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า.....	4
5.1 ค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่ยอมให้ผ่านร่างกายได้ในแต่ละประเภทตามข้อกำหนด แต่ละองค์กร.....	63
6.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี MAX 038.....	67
6.2 ค่าความต้านทานของ Rselector และกระแสเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแส.....	71
6.3 คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET-8255 .....	74
6.4 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET-8255.....	76
6.5 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-8255.....	77
6.6 ค่าความต้านทานของ Rselector ที่อัตราขยายต่างๆ.....	80
7.1 ค่ากระแสที่จ่ายจริงให้กับโหลดในย่านกระแสต่างๆ.....	88
7.2 ค่าอัตราขยายจริงของวงจรอินสตรูเมนต์แอมพลิไฟร์ที่ใช้งานอยู่ในช่วงอัตราขยายต่างๆ.....	97

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การวัดค่าความต้านทาน (ก) การจ่ายค่าแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส (ข)การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน.....	5
2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ.....	7
2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ.....	8
3.1 การไหลของกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential Line) เมื่อจ่ายกระแสเข้าที่อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Conductor).....	9
3.2 การไหลของกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential line) เมื่อจ่ายกระแสเข้าที่อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Conductor) แล้วทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด E และ F.....	9
3.3 ผลกระทบของการไหลกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียลเมื่อบรรจุวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำไว้ตรงกลาง.....	10
3.4 ผลกระทบของการไหลกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียลเมื่อบรรจุวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานสูงไว้ตรงกลาง.....	12
3.5 การวัดค่าความต้านทานในการใช้งานจริง.....	13
3.6 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บแบบแบบขั้วข้างเคียง.....	14
3.7 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บแบบขั้วตรงข้าม.....	14
3.8 กราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะของอวัยวะส่วนต่างๆในร่างกาย.....	15
3.9 อิมพีแดนซ์ของเนื้อเยื่อผิวหนังของร่างกาย 1 cm <sup>2</sup> ที่ความถี่ต่างๆ.....	16
4.1 แบ็คโปรเจ็คชั่นของค่าศักดาที่วัดได้ที่ผิววัตถุเมื่อจ่ายกระแสเข้าไปด้วยวิธีขั้วข้างเคียง.....	18
4.2 ค่าเออร์เรอร์แต่ละอัลกอริธึม.....	19
4.3 การใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริธึม.....	19
4.4 อธิเม็นต์รูปสามเหลี่ยมการจัดลำดับของโหนดจะเรียงตามทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	21
4.5 ลักษณะของ Shape Function N <sub>1</sub> และ N <sub>2</sub> ของอิธิเม็นต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular).....	23
4.6 อิธิเม็นต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (triangular prism).....	24
4.7 อิธิเม็นต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ).....	27
4.8 อิธิเม็นต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ).....	28
4.9 แบบการวางอิธิเม็นต์สำหรับไฟไนต์อิธิเม็นต์ ขนาด 32 อิเล็กโทรด 141 โหนด 248อิธิเม็นต์.....	30
4.10 โพลีชาร์ตแสดงการทำงานของอัลกอริธึม.....	31

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ระบบเก็บข้อมูล (Data Collection System).....	33
5.2 แนวความคิดพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine wave Oscillator).....	34
5.3 การป้อนกลับแบบบวกเพื่อสร้างสัญญาณไซน์.....	34
5.4 (ก) วงจรลีด-แลกซ์ (Lead-Lag Circuit)(ข) กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรลีด-แลกซ์.....	35
5.5 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเวน-บริดจ์ (Wein-Bridge Oscillator).....	36
5.6 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Oscillator).....	37
5.7 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบทวินที (Twin-T Oscillator).....	37
5.8 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรทวินทีฟิลเตอร์ (Twin-T Filter Response).....	38
5.9 หลักการวัดค่าความต้านทานแบบ 4 ขั้ว.....	39
5.10 โมเดลของแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Model).....	39
5.11 วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบโพลตึงไหลด (Floating Load Current Source).....	41
5.12 การใช้ทรานส์ฟอร์มเมอร์คัปปลิ่งในวงจรจ่ายกระแสแบบโพลตึงไหลด.....	42
5.13 วงจรจ่ายกระแสคงที่ที่ใช้การป้อนกลับแบบบวก(Positive –feedback VCCS).....	43
5.14 วงจรจ่ายกระแสแบบลูปปิด (Close Loop Current Controlling System).....	44
5.15 เอนเวโลปดีเทคเตอร์ (ก)วงจรของเอนเวโลป ดีเทคเตอร์ (ข) สัญญาณเอเอ็มที่อินพุตของวงจรเอนเวโลป ดีเทคเตอร์ (ค)สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรเอนเวโลปดีเทคเตอร์.....	48
5.16 วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาร์ฟเวฟ (Half-Wave AC-TO-DC Convertor).....	50
5.17 วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ชนิดฟูลเวฟ (Full Wave AC-To-DC Convertor).....	50
5.18 ระบบซิงโครนัสดีเทคเตอร์ (Synchronus Detector).....	51
5.19 สัญญาณในระบบซิงโครนัสดีเทคเตอร์ (Synchronous Detector).....	51
5.20 วงจรซิงโครนัสดีเทคเตอร์ที่มีสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณไซน์.....	52
5.21 วงจรซิงโครนัสดีเทคเตอร์ที่ใช้ในงานจริง.....	53
5.22 การทำงานพื้นฐานของเฟสเซนซิติฟดีเทคเตอร์ (PSD).....	54
5.23 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสเหมือนกัน.....	54
5.24 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน	
180 องศา.....	55

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุทและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่าง กัน 90 องศา.....	55
5.26 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุทและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่าง กัน Arbitrary Phase.....	56
5.27 ปฏิกริยาเคมีที่มีรอยต่อผิวหน้ากับอิเล็กโทรด (ก) อิเล็กโทรดชนิดที่ไม่ได้เคลือบ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (ข) อิเล็กโทรดชนิดที่เคลือบซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์.....	57
5.28 อิเล็กโทรดชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ.....	58
5.29 ตัวอย่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในทางการแพทย์.....	59
5.30 ค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นอิเล็กโทรดขนาด 1 cm <sup>2</sup> ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ที่ความถี่ต่างๆ.....	59
5.31 กระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลงกราวด์.....	61
5.32 กระแสสลับที่ผ่านไอโซเลชันที่เป็นอันตรายต่อร่างกายผู้ถูกวัด.....	61
5.33 กระแสที่ไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ต่อกับร่างกายผู้ถูกวัด.....	62
6.1 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวาง.....	66
6.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์.....	67
6.3 วงจรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล.....	70
6.4 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	71
6.5 วงจรภายในของไอซี MAX 306 สัญญาณควบคุมและลักษณะของการมัลติเพิล็กซ์สัญญาณ.....	72
6.6 วงจรมัลติเพิล็กซ์เซอร์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ.....	73
6.7 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟสรุ่น ET -8255.....	74
6.8 วงจรภายในของการ์ด ET -8255.....	75
6.9 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม.....	76
6.10 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12.....	77
6.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล.....	78
6.12 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	79
6.13 ลักษณะการต่อ LM311 ในวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดและลักษณะของสัญญาณ อินพุทและเอาท์พุทที่ได้จาก LM311.....	81
6.14 จุดที่แสดงสัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	82
6.15 ลักษณะของสัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	83

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 วงจรไอโซเลชั่น.....	84
7.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่และวงจรคีมอคูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	86
7.2 สัญญาณในส่วนต่าง ๆ ของวงจรจ่ายกระแสคงที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต.....	87
7.3 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่.....	89
7.4 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 1 - 10โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	90
7.5 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 10 - 100โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	90
7.6 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 100 - 1000โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	91
7.7 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 1000 - 10000 กิโลโอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	91
7.8 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 1 - 10โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	92
7.9 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 10 - 100โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	92
7.10 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 100 - 1000โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	93
7.11 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 1 - 10 กิโลโอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า.....	93
7.12 สัญญาณในส่วนต่างๆของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	94
7.13 สัญญาณในส่วนต่าง ๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด (ต่อ).....	95
7.14 สัญญาณในส่วนต่าง ๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด (ต่อ).....	96
7.15 การต่อวงจรเพื่อวัดความเป็นลิเนียร์ของวงจรคีมอคูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด.....	97
7.16 ความลิเนียร์ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดในช่วงค่าความต้านทานโหลด 1 - 10 โอห์ม.....	98
7.17 ความลิเนียร์ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดในช่วงค่าความต้านทานโหลด 10 - 100 โอห์ม.....	98

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.18 ความถี่ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขดในช่วงค่าความต้านทานโหลด 100 - 1000 โอห์ม.....	99
7.19 ความถี่ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขดในช่วงค่าความต้านทานโหลด 1000 - 10000 โอห์ม.....	99
7.20 การต่อระบบเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสัญญาณรบกวน.....	100
7.21 โพลีชาร์ตของโปรแกรมเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสัญญาณรบกวน.....	101
7.22 กราฟการเบี่ยงเบนของสัญญาณเอาต์พุตได้จากระบบเก็บข้อมูลทั้ง 1024 ครั้งที่ค่าความต้านทานโหลด 1 กิโลโอห์ม.....	102
7.23 การต่อระบบเก็บข้อมูลเข้ากับแบบจำลอง 32 อินพุตเพื่อทำการทดลอง.....	103
7.24 โพลีชาร์ตของโปรแกรมเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า.....	104
7.25 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 1).....	105
7.26 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 8).....	105
7.27 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 16).....	106
7.28 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 24).....	106
7.29 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 32).....	107
7.30 ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียงที่เก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ซึ่งเป็น เมตริกซ์ขนาด 32 x 32.....	107
7.31 ลักษณะของสัญญาณที่ระดับความสูงน้ำเกลือระดับต่าง ๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	108
7.32 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ระดับน้ำเกลือต่าง ๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	109
7.33 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	109
7.34 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นฉนวนและตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	110



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.45 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า $\lambda$ ต่างๆเมื่อวางวัตถุตัวนำไว้ในถังน้ำเกลือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	119
7.46 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า $\lambda$ ต่างๆเมื่อวางวัตถุฉนวนไว้ในถังน้ำเกลือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	120
7.47 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า $\lambda$ ต่างๆเมื่อวางวัตถุฉนวนและตัวนำไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง.....	121
7.48 เวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริทึม.....	122
7.49 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียงจากถังน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุตัวนำในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถังน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร.....	123
7.50 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียงจากถังน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุฉนวนในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถังน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร.....	124
7.51 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียงจากถังน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุตัวนำและฉนวนในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถังน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร.....	125
7.52 ลักษณะการวางวัตถุตัวนำในการทดลองและลักษณะของกราฟแสดงค่าจริง (Real data) ของค่า Resistivity (Ohm-cm) ในแต่ละอิลิเมนต์.....	126
7.53 ลักษณะการวางวัตถุฉนวนในการทดลองและลักษณะของกราฟแสดงค่าจริง (Real data) ของค่า Resistivity (Ohm-cm) ในแต่ละอิลิเมนต์.....	127
7.54 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ.....	128
7.55 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณ โดยองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ.....	128
7.56 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ.....	129
7.57 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณ โดยองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ.....	129

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.58 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำที่ค่าแลมด้าของอัลกอร์ริซึ่มเท่ากับ $e^{-8} - e^{-12}$ .....	130
7.59 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอร์ริซึ่มเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำ.....	131
7.60 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนที่ค่าแลมด้าของอัลกอร์ริซึ่มเท่ากับ $e^{-8} - e^{-12}$ .....	131
7.61 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอร์ริซึ่มเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวน.....	132
7.62 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอร์ริซึ่มเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนหรือตัวนำ (จำนวนการทำซ้ำ = 5).....	132
7.63 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำที่ค่าความสูงของวัตถุต่างๆ.....	133
7.64 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณที่ค่าความหนาของวัตถุต่างๆเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำ.....	134
7.65 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนที่ค่าความสูงของวัตถุต่างๆ.....	134
7.66 กราฟแสดงค่าเออร์เรอร์ของการคำนวณที่ค่าความหนาของวัตถุต่างๆเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวน.....	135
1 ก ระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 บิตเล็ก โทรงค์ที่ใช้ในการทดลอง.....	140
2 ก ด้านหน้าของระบบเก็บข้อมูล.....	140
3 ก ด้านหลังของระบบเก็บข้อมูล.....	140
4 ก ถังบรรจุน้ำเกลือ (Phantom) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 เซนติเมตรที่ใช้ในการทดลอง.....	141
5 ก ถังบรรจุน้ำเกลือ (Phantom) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ใช้ในการทดลอง.....	141
6 ก วัตถุตัวนำ (แท่งอลูมิเนียม) ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	142
7 ก วัตถุฉนวน(แท่งพลาสติก) ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	142

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุเป็นระบบที่กำลังได้รับการพัฒนาในห้วงปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลกทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และอัลกอริธึม โดยเริ่มต้นมีการนำมาใช้สร้างภาพตัดขวางเพื่อแสดงอวัยวะภายในร่างกายในปี 1983 โดย Barber และ Brown [1] โดยทำการติดอิเล็กโทรดรอบปลายแขนของผู้ถูกวัดจำนวน 16 อิเล็กโทรด แล้วทำการสร้างภาพตัดขวางโดยวิธีแบ็คโปรเจกชัน (Backprojection) ต่อมาในปี 1987 Brown , Barber และ Seagar [2] ได้นำระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการย่อยของกระเพาะอาหารโดยใช้ระบบเก็บข้อมูลขนาด 16 อิเล็กโทรด จ่ายกระแสที่ 1 มิลลิแอมป์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต ในปี 1992 Eung Je Woo , Ping Hua และ John G. Webster [3] ได้ใช้ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity) ในปอดโดยใช้ระบบเก็บข้อมูลขนาด 32 อิเล็กโทรดที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต และต่อมาในปี 1995 Robert W. M. Smith , Ian Lesline Freeston และ Brian Hilton Brown [4] ได้สร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าที่สามารถสร้างภาพที่เป็น Real-Time โดยสามารถสร้างภาพได้ 25 เฟรมต่อวินาทีเพื่อใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของปอดในการหายใจโดยใช้ระบบเก็บข้อมูลขนาด 16 อิเล็กโทรดจ่ายกระแส 5 มิลลิแอมป์ ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนาระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าทั้งในด้านความเร็วในการสร้างภาพ คุณภาพของภาพ และการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ถึงแม้ว่าเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงภาพตัดขวางอวัยวะภายในร่างกายที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันอันได้แก่ เอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) และ เครื่อง MRI ซึ่งภาพที่ได้จะแตกต่างกันไปตามเทคนิคที่แตกต่างกัน ภาพจากเอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์ได้จากความแตกต่างของการลดทอนรังสีเอ็กซ์ตามความหนาแน่นของเนื้อเยื่อแต่ละส่วน ภาพจาก MRI ใช้การเรโซแนนซ์แม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่แตกต่างกันของเนื้อเยื่อแล้วทำการสร้างเป็นภาพตัดขวางของอวัยวะที่มีเนื้อเยื่อนั้นๆเป็นองค์ประกอบ

แต่อย่างไรก็ดีเครื่องมือดังกล่าวมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันไปเอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์ และ MRI แม้ให้คุณภาพของภาพสูงแต่ราคาแพงทั้งทางด้านราคาของเครื่อง การติดตั้ง การดำเนินการ และการใช้งานถูกจำกัดให้ใช้กับผู้ป่วยหรือวัตถุที่อยู่ในสถานะอยู่นิ่งกับที่ สำหรับเครื่องสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ เป็นระบบที่กำลังได้รับการพัฒนาในห้วงปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลกทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และอัลกอริธึมเนื่องจากจุดเด่นที่มีความปลอดภัยและ

อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกสามารถสร้างได้โดยเทคโนโลยีไม่สูงนัก จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมแก่การพัฒนาไปใช้งานจริง

ในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ เพื่อศึกษาการนำระบบที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือทางด้านการแพทย์หรืออุตสาหกรรม จากการศึกษาในเบื้องต้นทำให้ทราบว่าองค์ประกอบของระบบคือ

1. ส่วนฮาร์ดแวร์ ได้แก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการจัดรูปแบบการจ่ายกระแสและวัดแรงดันไฟฟ้า วงจรจ่ายกระแส และวงจรวัดแรงดัน ที่ต้องการความแม่นยำของการจ่ายกระแสและวัดแรงดันรวมทั้งความเร็วในการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสร้างภาพตัดขวางที่ชัดเจนถูกต้องรวดเร็ว การออกแบบในส่วนนี้ต้องพิจารณาอย่างรอบครอบ

2. ส่วนซอฟต์แวร์ ได้แก่อัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางจากข้อมูลที่วัดได้ตามเงื่อนไขของการจ่ายกระแสซึ่งต้องการอัลกอริธึมที่ให้ความถูกต้องของภาพและความเร็วในการรีคอนสตรัคชันภาพที่สูง

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นการออกแบบสร้างในส่วนของฮาร์ดแวร์ พัฒนาและอิมพลีเมนต์อัลกอริธึมเพื่อเป็นเครื่องต้นแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆโดยส่วนของฮาร์ดแวร์จะออกแบบวงจรจ่ายกระแส วงจรวัดแรงดัน และวงจรจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสและวัดแรงดันไฟฟ้าให้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อเก็บข้อมูลอย่างอัตโนมัติและลดเวลาในการเก็บข้อมูลลง สำหรับในส่วนของซอฟต์แวร์จะพัฒนาอัลกอริธึมจาก [5] ให้มีความถูกต้องของภาพและความเร็วในการรีคอนสตรัคชันภาพที่สูงขึ้น โดยสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากส่วนของฮาร์ดแวร์โดยใช้เทคนิคของคณิตศาสตร์

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาหลักการและความเป็นไปได้ของระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ โดยการอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าขององค์ประกอบภายในวัตถุ เพื่อเป็นแนวทางในการนำหลักการดังกล่าวไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานต่อไปเป็นเครื่องมือในด้านต่างๆ ได้แก่ ทางด้านการแพทย์ ด้านธรณีวิทยา หรือด้านอุตสาหกรรม ฯลฯ

## 1.3 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการวิจัยนี้มีการศึกษาเป็นขั้นตอนโดยสรุปดังต่อไปนี้

1. ศึกษาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบ 2 มิติ และ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบ 3 มิติ ร่วมกับวิธีการนิวตัน-ราฟสัน โดยใช้รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบข้างเคียง (Neighboring Method)

2. ออกแบบและสร้างระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรด
3. ทดสอบอัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และ อัลกอริธึมแบบ 3 มิติ ด้วยข้อมูลจริงที่ได้จากระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น โดยใช้รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบข้างเคียง (Neighboring Method)
4. ทดลองใช้อัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และ อัลกอริธึมแบบ 3 มิติ กับข้อมูลที่วัดจากถังน้ำเกลือที่มีระดับความสูงของน้ำหลายๆระดับ เพื่อศึกษาผลของความหนาของวัตถุ
5. ทดลองใช้อัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และ อัลกอริธึมแบบ 3 มิติ กับข้อมูลที่วัดจากถังน้ำเกลือที่มีระดับความสูงของน้ำเกลือเท่ากัน โดยเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในถังน้ำเกลือเพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบภายในวัตถุในสถานะต่างๆ

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 8 บท ซึ่งอาจแยกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้
- บทที่ 1 บทนำ
  - บทที่ 2 เป็นทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า
  - บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบสร้างภาพตัดขวางอิมพีแดนซ์ของร่างกายหรือวัตถุรูปแบบการจ่ายกระแสและวัดค่าศักดาไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณ
  - บทที่ 4 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวกับอัลกอริธึมที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้แก่ อัลกอริธึมที่ใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 2 มิติ และ อัลกอริธึมที่ใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ
  - บทที่ 5 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบเก็บข้อมูล
  - บทที่ 6 เป็นรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้น
  - บทที่ 7 เป็นการทดลองและผลการทดลองของระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นกับอัลกอริธึมที่ใช้ในการคำนวณ
  - บทที่ 8 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา

## บทที่ 2

### ระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า

หัวใจหลักของระบบสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าก็คือระบบเซนเซอร์ (Sensor System) ซึ่งจะมีเทคนิคและวิธีการแตกต่างกันไป โดยแต่ละเทคนิคที่จะใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่ต้องการนำมาสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในของวัตถุนั้น สำหรับระบบเซนเซอร์ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า [6] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้า [6]

Principle	Spatial resolution (%)	Practical realization	Comment
Electromagnetic radiation.	1	Optical	Fast. Optical access required.
		X-ray and $\gamma$ -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

- ภาพที่ต้องการเป็น ไดนามิก (Dynamic) หรือ สแตติก (Static)

- ขนาดรีโซลูชัน (Resolution) ของภาพ

- เซนซิวิตี (Sensitivity) ที่ต้องการ

- สภาพแวดล้อมของวัตถุที่จะสร้างตัดขวาง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นในขณะ ที่ระบบทำงาน , ความปลอดภัยของระบบ , การซ่อมบำรุงระบบ

- ขนาดของวัตถุที่จะทำการสร้างภาพตัดขวาง

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าที่ใช้ เทคนิคของการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Measurement of electrical properties) เท่านั้น ซึ่งวิธีการนี้มี ข้อดีคือความเร็วในการทำงานสูง ระบบมีราคาไม่สูงมาก และระบบสามารถใช้ได้กับวัตถุที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ได้ สำหรับการสร้างภาพตัดขวางทางไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคของการวัดคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของวัตถุมีด้วยกัน 3 วิธีคือ

- ระบบสร้างภาพตัดขวางคาปาซิแตนซ์ไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

- ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography)

- ระบบสร้างภาพตัดขวางอินดักแตนซ์ไฟฟ้า (Electrical Inductance Tomography)

สำหรับรายละเอียดของระบบจะนำเสนอเฉพาะระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟ ฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยรายละเอียดของระบบมีดังนี้

## 2.1 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography)

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุนั้นอาศัยหลักการพื้นฐานของ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และความต้านทาน ตามกฎของโอห์มดังสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ  $V$  = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

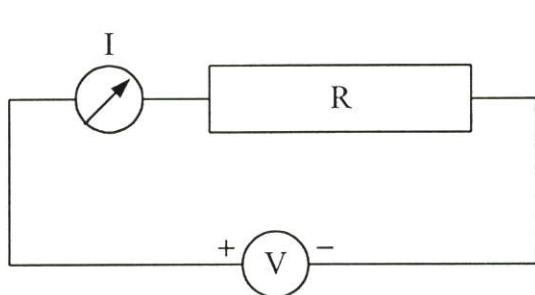
$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

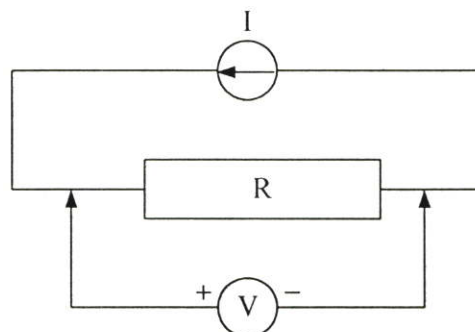
จากสมการหากรู้ค่ากระแสและค่าแรงดันก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานได้ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ 2 รูปแบบซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 คือ

-การจ่ายค่าแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส

-การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน



(ก)



(ข)

### รูปที่ 2.1 การวัดค่าความต้านทาน

(ก) การจ่ายค่าแรงดันคงที่แล้ววัดค่ากระแส

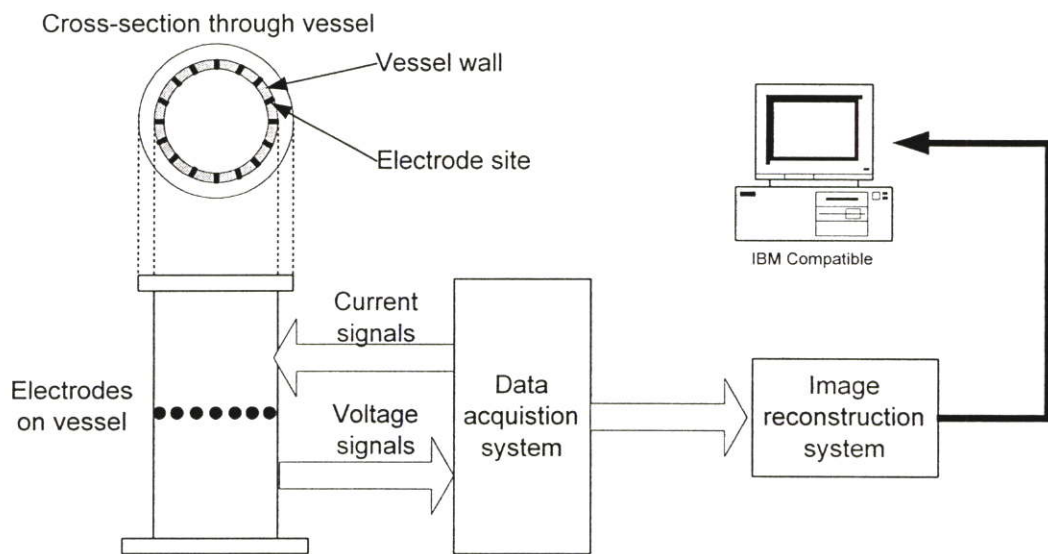
(ข) การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน

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

สภาพความต้านทานโดยใช้ระดับความเข้มของสีในจอภาพคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในวัตถุหรือร่างกายได้

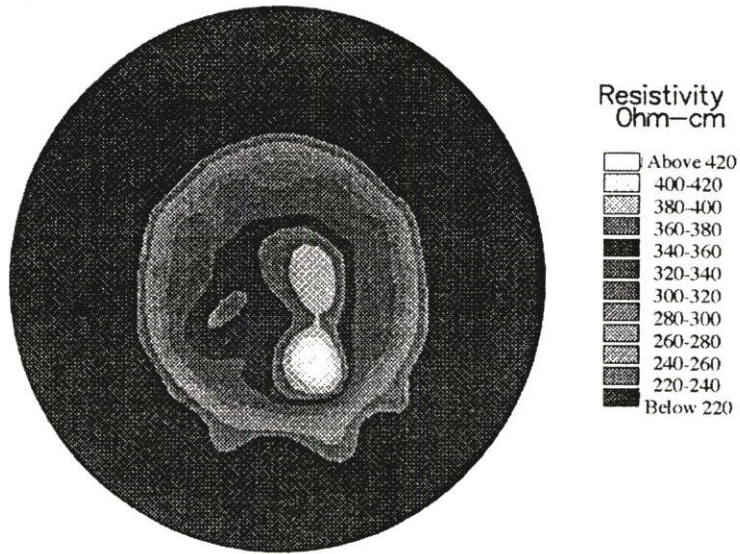
สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุนั้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.2 คือ

- วงจรจ่ายกระแส วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการจ่ายกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า
- เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและแสดงผล
- วัตถุที่จะทำการสร้างภาพตัดขวาง



รูปที่ 2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [6]

จากรูปที่ 2.2 วงจรจ่ายกระแสและวงจรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโดยตรงกับวัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า โดยผ่านการควบคุมจากวงจรควบคุม (Control Circuit) เพื่อทำการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลของแรงดันที่วัดได้ในแต่ละอิเล็กโทรดแล้วส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและแสดงเป็นภาพตัดขวางแสดงความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [6]

สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจะนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์และอุตสาหกรรม เช่น แสดงภาพตัดขวางของปอดหรือกระเพาะ , แสดงภาพตัดขวางของของผสมเพื่อดูการกระจายตัวของสาร เป็นต้น

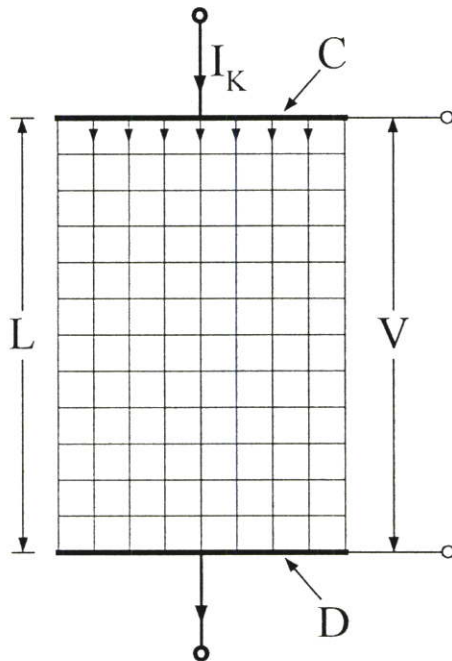
### บทที่ 3

## พื้นฐานของการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า

ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานของระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานของร่างกายหรือวัตถุจะอาศัยพื้นฐานของการวัดค่าความต้านทานของวัตถุแบบ 4 ขั้ว ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

### 3.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุที่อยู่ในรูปแบบสี่เหลี่ยมแบบสี่ขั้ว (Rectangular conductivity) [7] ดังแสดงในรูปแบบ 2 มิติดังรูปที่ 3.1



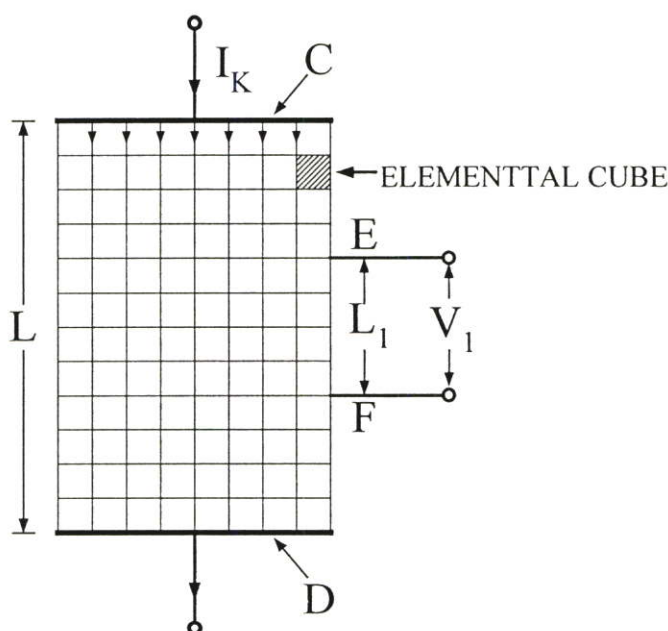
รูปที่ 3.1 การไหลของกระแสและเส้นอควิโพเทนเชียล (Equipotential line) เมื่อจ่ายกระแสเข้าที่อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic conductor)

จากรูปที่ 3.1 วัตถุตัวนำแบบไอโซทรอปิกถูกจ่ายกระแสโดยอิเล็กโทรด C, D (C, D เป็นคอนดักเตอร์ในอุดมคติ (Perfect conductor)) กระแสคงที่  $I_K$  (Constant current :  $I_K$ ) จะไหลผ่านแท่งวัตถุในปริมาณที่เท่ากันทุกส่วนและความหนาแน่นกระแส (Current density) จะมีค่าเท่ากันทุกที่ โดยในรูปแบบนี้เราสามารถหาค่าความต้านทานของวัตถุสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$R = V/I_K = \rho L/A \quad (3.1)$$

- เมื่อ  $R$  = ค่าความต้านทานของวัตถุ  
 $V$  = ค่าแรงดันระหว่างอิเล็กโทรด C และ D  
 $I_K$  = ค่ากระแสที่ไหลผ่านวัตถุ  
 $\rho$  = ค่าสภาพความต้านทานของวัตถุ  
 $L$  = ขนาดความยาวของวัตถุ  
 $A$  = พื้นที่ตัดขวางของวัตถุ

จะเห็นว่าเมื่อค่าสภาพความต้านทานภายในวัตถุภายในวัตถุมีค่าเท่ากันทั้งหมดทุกส่วน (Homogeneous object) ค่าความหนาแน่นของกระแสในแต่ละพื้นที่ทั่วทั้งวัตถุจะมีค่าเท่ากันและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential line) จะตั้งฉากกับเส้นกระแสและจะขนานกันทุกเส้น



**รูปที่ 3.2** การไหลของกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential line) เมื่อจ่ายกระแสเข้าที่อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic conductor) แล้วทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด E และ F

สำหรับรูปที่ 3.2 จะแสดงการวัดค่าความต้านทานของวัตถุโดยการใช้อิเล็กโทรด E และ F (อิเล็กโทรดมีขนาดเล็กมาก) เข้าไปวัดแรงดันบนพื้นผิวของวัตถุ ในแนวระนาบเดียวกันกับเส้นอิควิโพเทนเชียล ซึ่งในทางอุดมคติแล้วอิเล็กโทรดจะต้องไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระจายอยู่ภายในวัตถุ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงดันจะต้องมีความต้านทานที่

สูงมาก (ในอุดมคติจะต้องมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์) ซึ่งสภาพเช่นนี้  $V_1$  ที่ทำการวัดจะไม่ได้รับผลกระทบจากอิเล็กโทรด นั่นคือเราจะสามารถหาค่า  $R_1$  ได้จากสมการที่ (3.2)

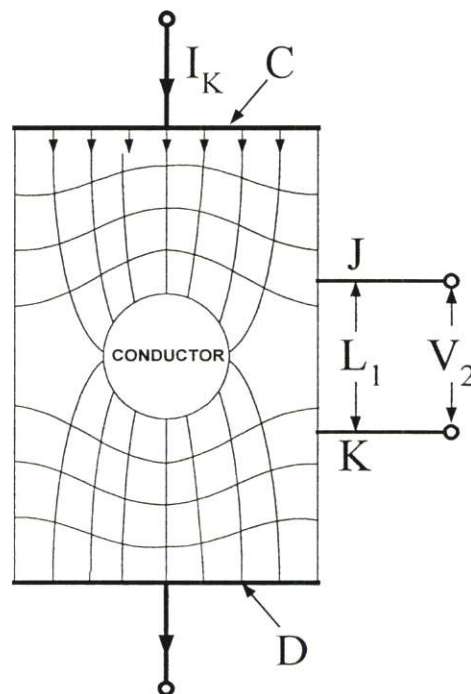
$$R_1 = V_1 / I_K \quad (3.2)$$

และสามารถหาค่าสภาพความต้านทานของวัตถุและค่าความต้านทานของวัตถุได้ดังสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4)

$$\rho = R_1 \cdot A / L_1 \quad (3.3)$$

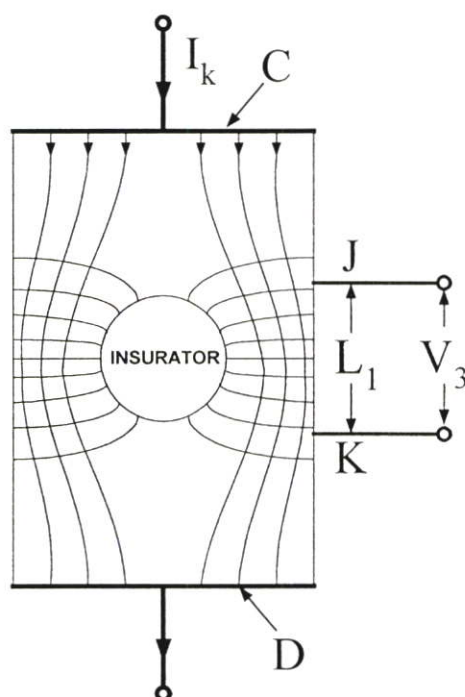
$$R = \rho L / A \quad (3.4)$$

จากวิธีการวัดค่าความต้านทานทั้ง 2 แบบ คือ แบบรูปที่ 3.1 และ แบบรูปที่ 3.2 แบบหลังจะให้ค่าความต้านทานที่ถูกต้องมากกว่าเนื่องจากไม่มีผลกระทบอื่นเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดของการวัดแรงดันจากผลของความต้านทานของผิวที่วัด (Skin contact impedance)



รูปที่ 3.3 ผลกระทบของการไหลของกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียลเมื่อบรรจุวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำไว้ตรงกลาง

จากรูปที่ 3.3 เมื่อทำการวางวัตถุที่มีสภาพความต้านทานต่ำ เช่น ทองแดงไว้ตรงกลาง แล้วทำการจ่ายกระแสที่อิเล็กโทรด C และ D จากนั้นทำการวัดแรงดันโดยใช้อิเล็กโทรด J และ K เราจะพบว่ากระแสที่เคยไหลในพื้นที่แต่ละอิลิเมนต์เท่ากันจะเปลี่ยนไปไหลผ่านวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำซึ่งสัมพันธ์กับเส้นอิกวิโพเทนเชียลที่มีการเลื่อนออกจากวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานต่ำเป็นผลให้ค่าแรงดัน  $V_2$  ที่วัดได้จากอิเล็กโทรด J และ K มีค่าต่ำกว่าแรงดัน  $V_1$  ที่วัดได้ในตอนแรก

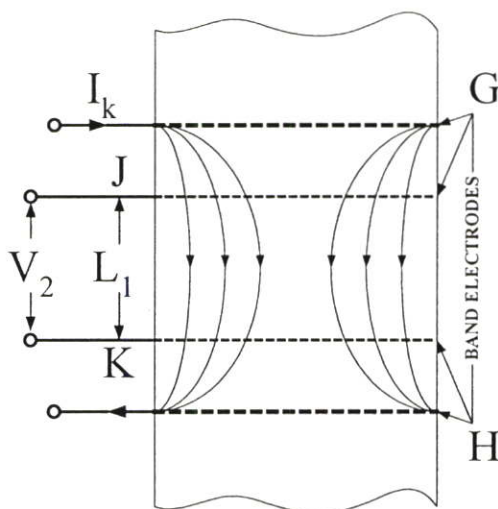


รูปที่ 3.4 ผลกระทบของการไหลกระแสและเส้นอิกวิโพเทนเชียลเมื่อบรรจุวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานสูงไว้ตรงกลาง

สำหรับในรูปที่ 3.4 เราทำการวางวัตถุที่มีค่าสภาพความต้านทานสูง เช่น พลาสติกแทนที่วัตถุที่มีสภาพความต้านทานต่ำ แล้วทำการจ่ายกระแสอิเล็กโทรด C และ D จากนั้นจึงทำการวัดแรงดันโดยใช้อิเล็กโทรด J และ K เราจะพบกระแสจะหลีกเลี่ยงการไหลผ่านพลาสติกแต่จะไหลผ่านส่วนของวัตถุตัวนำที่บรรจุพลาสติกอยู่แทนและส่งผลให้ความแน่นของกระแสบริเวณขอบของวัตถุตัวนำมีค่าสูงสัมพันธ์กับเส้นอิกวิโพเทนเชียลเลื่อนเข้ามาทำให้จำนวนของเส้นอิกวิโพเทนเชียลที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดที่วัดแรงดันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงดัน  $V_3$  ที่วัดได้จากอิเล็กโทรด J และ K มีค่าสูงกว่าแรงดัน  $V_1$  ที่วัดได้ในตอนแรก

จากการจ่ายกระแสและวัดแรงดันพื้นผิวที่เป็นผลให้ค่าแรงดันที่วัดได้แตกต่างกันตามลักษณะการวางของวัตถุและคุณสมบัติสภาพความต้านทานของวัตถุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของวัตถุโดยการจ่ายกระแสเข้าไปที่ผิวของวัตถุและทำการวัดแรงดันที่ผิว

รอบๆ วัตถุ โดยลักษณะการจ่ายกระแสในการใช้งานจริงจะใช้การจ่ายกระแสที่ผิวซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะใช้วิธีการจ่ายกระแสดังในรูปที่ 3.1 , 3.2 , 3.3 และ 3.4 แต่จะใช้วิธีการจ่ายกระแสแบบดังรูปที่ 3.5 แทน โดยจะทำการจ่ายกระแสที่อิเล็กโทรด G และ H และทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด J และ K แทน ซึ่งวิธีการนี้จะให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าถูกต้องมากกว่าการวัดค่าศักดาไฟฟ้าและการจ่ายกระแสที่อิเล็กโทรดคู่เดียวกัน เนื่องจากไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดของการวัดแรงดันจากผลของความต้านทานของผิวที่วัด (Skin contact impedance)



รูปที่ 3.5 การวัดค่าความต้านทานในการใช้งานจริง

### 3.2 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูล (Data collection method)

รูปแบบการจ่ายกระแสและวัดค่าศักดาไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ [5] ดังนี้คือ

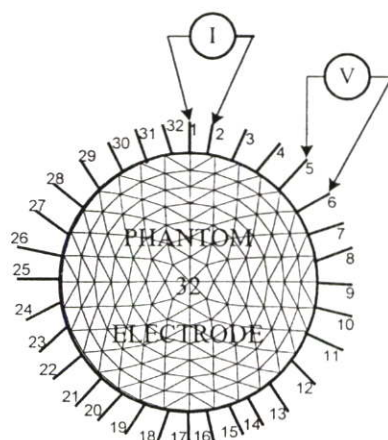
#### 3.2.1 แบบ 2 อิเล็กโทรด

เป็นรูปแบบแรกๆที่ใช้กัน การวัดค่าศักดาไฟฟ้าและการจ่ายกระแสจะทำที่อิเล็กโทรดคู่เดียวกัน ปัญหาก็คือมีค่าศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณรอยต่อระหว่างผิวหนังกับแผ่นอิเล็กโทรด ทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูง

#### 3.2.2 แบบ 4 อิเล็กโทรด

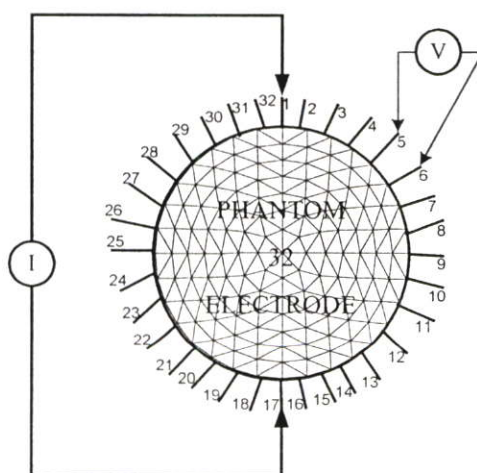
วิธีนี้มีกรวัดค่าศักดาไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดอีกคู่หนึ่งแยกจากคู่ที่ใช้จ่ายกระแส และจะไม่วัดค่าศักดาที่ขั้วที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากวิธีแรกได้ การวัดแบบนี้ยังแบ่งตามลักษณะการจ่ายกระแสและวัดแรงดันเป็นสองแบบ ได้แก่

-แบบขั้วข้างเคียง (Neighboring Method) โดยการจ่ายกระแสที่ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ติดกันคู่หนึ่ง แล้ววัดค่าศักดาที่ขั้วต่างๆ ก็จะได้ข้อมูล 1 โปรเจกชัน (projection) (โปรเจกชัน หมายถึง หนึ่งรูปแบบหรือหนึ่งครั้งของการจ่ายกระแสการเปลี่ยนโหนดที่ใช้จ่ายกระแสถือเป็นอีกโปรเจกชันหนึ่ง) เมื่อทำการหมุนขั้วที่ใช้จ่ายกระแสไปจนครบทั้งหมดก็จะได้ข้อมูลทั้งหมดสำหรับการคำนวณ ถ้าระบบมี  $M$  อิเล็กโทรด จะมี  $M$  โปรเจกชัน



รูปที่ 3.6 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

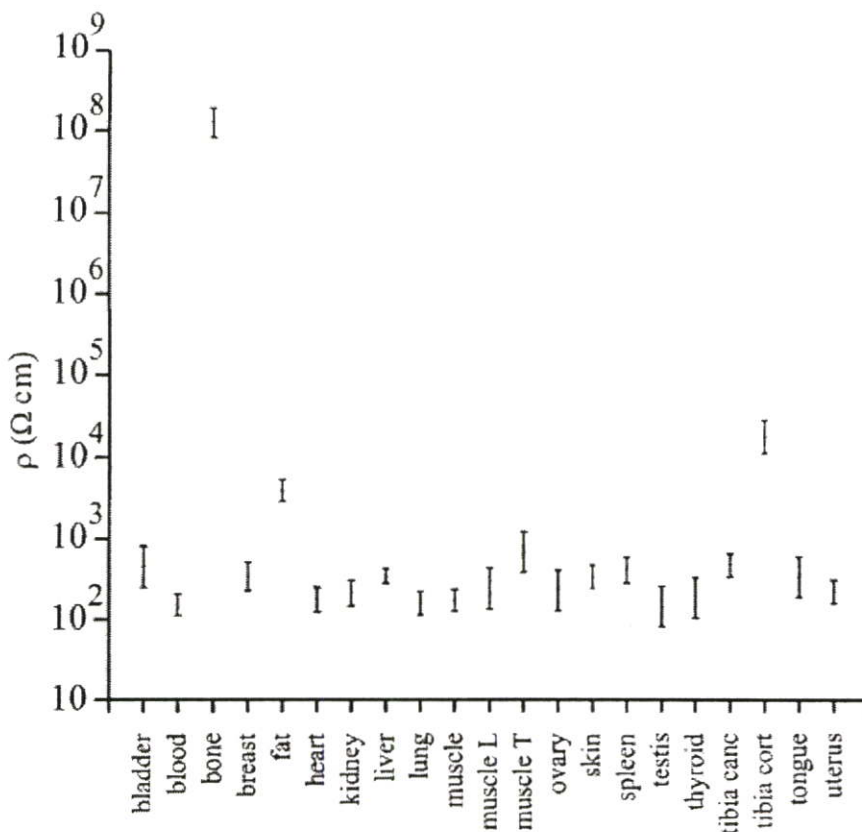
-แบบขั้วตรงข้าม (Opposite Method) โดยการจ่ายกระแสที่ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ตรงข้ามกันคู่หนึ่ง แล้ววัดค่าศักดาที่ขั้วต่างๆ เมื่อทำการหมุนขั้วที่ใช้จ่ายกระแสไปจนครบทั้งหมด ก็จะได้ข้อมูลทั้งหมดสำหรับการคำนวณ ถ้าระบบมี  $M$  อิเล็กโทรด จะมี  $M/2$  โปรเจกชัน



รูปที่ 3.7 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วตรงข้าม

### 3.3 ค่าสภาพความต้านทานภายในองค์ประกอบของร่างกาย

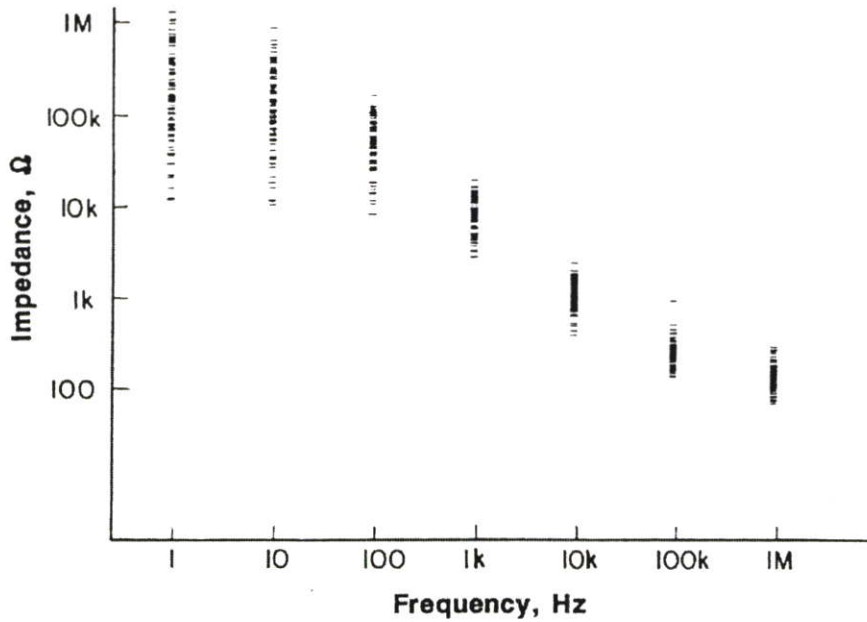
จากการที่องค์ประกอบของร่างกายมีโครงสร้างแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Non Homogeneous) เนื่องจากองค์ประกอบของร่างกาย เช่น เลือดและกล้ามเนื้อมีค่าสภาพความต้านทานในแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ในการวัดค่าแรงดันในแต่ละจุดโดยรอบร่างกายจะให้ค่าแรงดันที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วัดและโครงสร้างภายในที่ไม่เป็นแบบเอกพันธ์ของร่างกาย จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพตัดขวางภายในร่างกายได้ สำหรับตัวอย่างของค่าสภาพความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆ ของร่างกาย [8] สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่าสภาพความต้านทานของอวัยวะส่วนต่างๆ ในร่างกายที่ความถี่ 100 Hz – 10 MHz [8]

จากกราฟรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าค่าสภาพความต้านทานของอวัยวะส่วนต่างๆ ในร่างกายจะมีค่าสภาพความต้านทานแตกต่างกันไม่มากนัก อันเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ภาพที่ได้จากการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้ามีความสามารถในการแยกแยะส่วนประกอบของร่างกายไม่ดี

สำหรับในส่วนของคุณค่าความต้านทานเนื้อเยื่อผิวหนังของร่างกาย  $1 \text{ cm}^2$  [5] ที่ความถี่ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความต้านทานของเนื้อเยื่อผิวหนังของร่างกาย  $1 \text{ cm}^2$  ที่ความถี่ต่างๆ [9]

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำค่าความต้านทานเนื้อเยื่อผิวหนังของร่างกายจะมีค่าสูง แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความต้านทานเนื้อเยื่อผิวหนังของร่างกายจะมีค่าลดลง ฉะนั้นในการออกแบบระบบเก็บข้อมูลจะต้องพิจารณาถึงความถี่ที่ใช้ด้วย แต่โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้ในงานในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในร่างกายจะมีความถี่ในช่วง 20-100 กิโลเฮิร์ต โดยความถี่ต่ำสุดที่จะใช้งานจะถูกจำกัดที่ 20 กิโลเฮิร์ต ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ต่ำกว่า 20 กิโลเฮิร์ต จะเกิดการรบกวนจากความถี่ของสัญญาณที่ผลิตจากร่างกาย เช่น สัญญาณ ECG สัญญาณ EMG เป็นต้น

### อัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า

#### 4.1 อัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า

หลักการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพตัดขวางนั้นมีอยู่หลายวิธี [10] และมีหลักการ โดยสรุปดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 วิธี Sensitivity

Geselowitz's sensitivity theorem อาศัยการเปลี่ยนแปลงแรงดันซึ่งจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า จากผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ทำการวัดทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความต้านทานภายในวัตถุ

##### 4.1.2 วิธี Perturbation

วิธีการนี้ใช้หลักของการจ่ายศักดาคงที่แล้ววัดค่ากระแสทำการคำนวณหา Perturbation matrix โดยการเปลี่ยนค่าสภาพความต้านทานของอิเล็กเมนต์แล้วคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุดวัดด้วยวิธีการไฟไนต์อิเล็กเมนต์จากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกระแสจาก Perturbation matrix ไปใช้คำนวณหาการกระจายของค่าสภาพความต้านทานด้วยวิธี Backprojection แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันว่าวิธีการนี้ให้ความแม่นยำในการคำนวณหาการกระจายของค่าสภาพความต้านทานน้อยกว่าวิธีการจ่ายกระแสแล้ววัดค่าศักดา

##### 4.1.3 วิธี Double constraint

วิธีการนี้แก้สมการของ Poisson โดยใช้วิธีการไฟไนต์อิเล็กเมนต์ประกอบด้วยวิธีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต Neumann และ Dirichlet แล้วนำผลไปใช้ในการคำนวณปรับค่าสภาพความต้านทาน (รายละเอียดของวิธีการไฟไนต์อิเล็กเมนต์และการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตนั้นสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.2) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

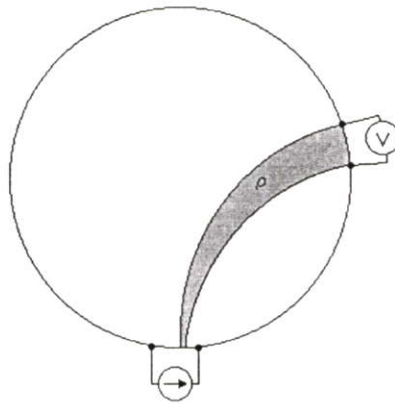
1. คำนวณค่าศักดา  $V$  และความหนาแน่นกระแส  $J$  จากการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต Neumann (จ่ายกระแส)
2. คำนวณค่าศักดา  $V$  และค่า  $-\sigma \nabla V$  จากการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต Neumann (จ่ายกระแส) และ Dirichlet (กำหนดค่าศักดาตามที่วัดได้)
3. คำนวณหาค่าสภาพความต้านทาน โดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และ 2

#### 4.1.4 วิธีแบ็คโพรเจกชัน

วิธีแบ็คโพรเจกชัน (Backprojection) หรือ Backprojection between equipotential line มีหลักการคำนวณคล้ายแบ็คโพรเจกชันของ CT โดยการใช้ค่าความต่างศักย์ที่ผิววัตถุระหว่างเส้นศักย์เท่า 2 เส้นแปลงเป็นค่าสภาพความต้านทานในพื้นที่ระหว่างเส้นศักย์เท่าทั้งสองเส้นนั้นดังรูปที่ 4.1 แล้วคิดค่าเฉลี่ยของค่าสภาพความต้านทานในแต่ละจุดที่ได้จากทุกโพรเจกชันรวมกัน จากนั้นนำข้อมูลภาพที่ได้ไปผ่านกระบวนการฟิลเตอร์เพื่อให้ภาพที่ได้มีความคมชัดขึ้น

วิธีแบ็คโพรเจกชันแยกได้เป็น 2 แบบ คือ Noniterative และ Iterative ซึ่งมีความแตกต่างกันที่วิธีแบบ Noniterative มีการคำนวณหาเส้นศักย์เท่า (equipotential line) เพียงครั้งเดียวก่อนการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานโดยการสมมุติค่าสภาพความต้านทานเป็นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) ส่วนแบบ Iterative จะมีการคำนวณหาเส้นศักย์เท่าทุกๆ Iteration ของการคำนวณปรับค่าการกระจายของค่าสภาพความต้านทาน ดังนั้นแบบ Iterative จึงให้ผลที่มีความแน่นอนแม่นยำมากกว่า แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าด้วย

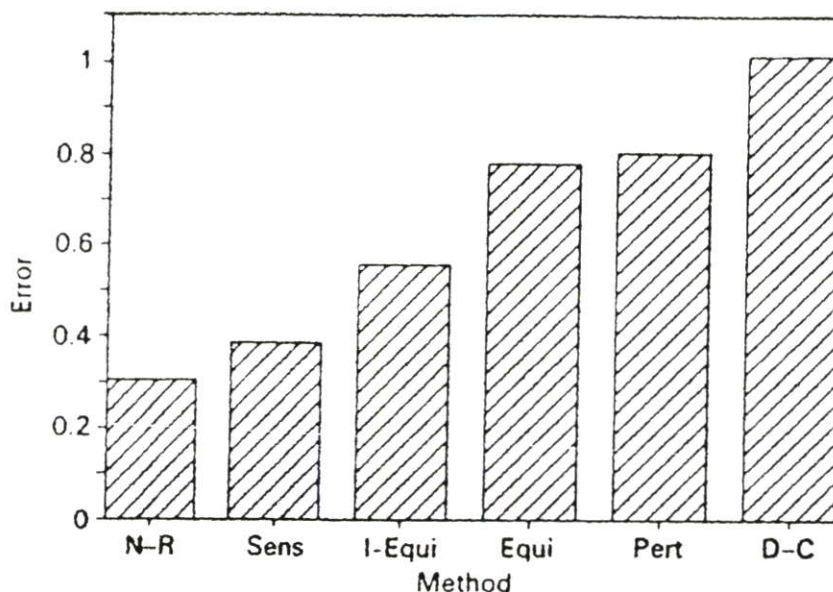
รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลสำหรับวิธีการแบ็คโพรเจกชันนี้จะใช้วิธีแบบขั้วข้างเคียงซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 3.2.2



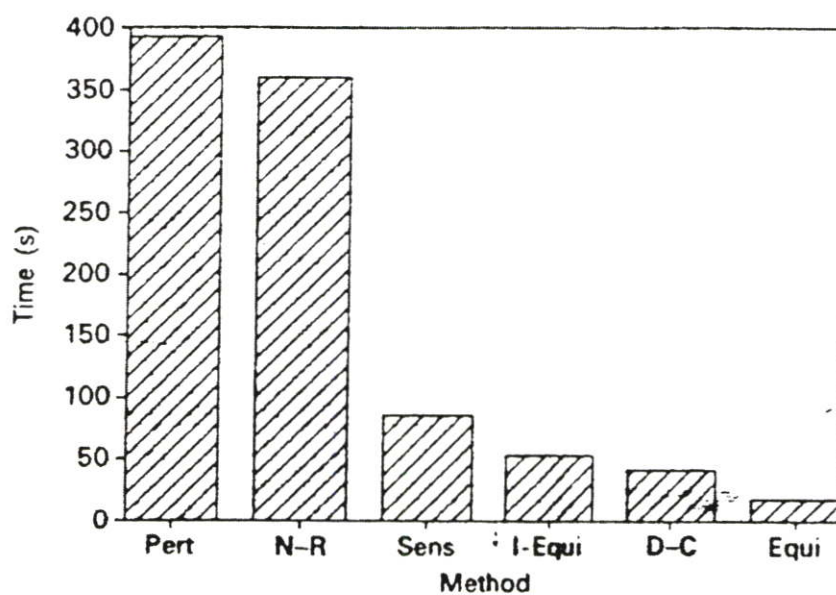
รูปที่ 4.1 แบ็คโพรเจกชันของค่าศักดาที่วัดได้ที่ผิววัตถุเมื่อจ่ายกระแสเข้าไปด้วยวิธีขั้วข้างเคียง

#### 4.1.5 วิธีนิวตัน-ราฟสัน

วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนมากที่สุดวิธีหนึ่งที่มีจุดเด่นที่ความแน่นอนแม่นยำในการคำนวณและมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเลือกได้หลายรูปแบบได้แก่ ลักษณะการแบ่งอิลิเมนต์และรูปแบบการจ่ายกระแส มีขั้นตอนคร่าวๆก็คือ ทำการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ผิววัตถุด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์สลับกับการปรับค่าสภาพความต้านทานด้วยวิธีการนิวตัน-ราฟสัน โดยมีรายละเอียดดังที่จะแสดงต่อไป



รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของแต่ละอัลกอริทึม [11]



รูปที่ 4.3 การใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริทึม [11]

จากอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าแบบต่างๆ ดังกล่าวมาข้างต้นนั้น ในแต่ละอัลกอริทึมจะให้ค่าความผิดพลาดและใช้เวลาในการคำนวณแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ซึ่งอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าก็คือวิธีนิวตัน-ราฟสัน และวิธีแบ็ค โปรเจกชัน โดยเมื่อเทียบกันแล้ววิธีนิวตัน-ราฟสันมีจุดเด่นที่ความแน่นอนแม่นยำในการคำนวณ ส่วนวิธีแบ็ค โปรเจกชันมีจุดเด่นที่ความเร็วในการคำนวณแต่ก็มีจุดด้อยคือจะหาผลลัพธ์ได้ไม่มั่นคงในกรณีที่มีวัตถุภายในกระจายอยู่หลายจุด

## 4.2 อัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน

### 4.2.1 แบบจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในตัวกลาง

สมการของ Maxwell [5] ใช้อธิบายการกระจายของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรงภายในตัวกลางที่เป็นตัวนำและไม่มีแหล่งกำเนิดภายในสามารถลดรูปได้เป็นสมการของ Poisson

$$\nabla(\rho^{-1}\nabla\phi) = \nabla(\sigma\nabla\phi) = 0 \quad (4.2)$$

โดยที่  $\nabla$  คือ  $i\partial/\partial x + j\partial/\partial y$  หรือตัวดำเนินการ Poisson

$\rho$  คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ B

$\sigma$  คือ ค่าสภาพความความนำไฟฟ้า

$\phi$  คือ ศักดาไฟฟ้า

ถ้า  $\sigma$  มีค่าขอบเขตต่ำสุดเป็น  $c$  ( $0 < c \leq \sigma(x)$  ทุกค่าของ  $x$  ในโดเมน B) แล้วสมการ (4.2) จะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเอกพันธ์แบบอิลลิปติก (Homogeneous Elliptic Partial Differential Equation) [5] ที่สามารถใช้คำนวณศักดาไฟฟ้าภายในวัตถุจากค่าความนำ  $\sigma$  และศักดา  $\phi$  ที่ขอบเขต  $\partial B$  ของ B หรือคำนวณจากค่ากระแส  $J = \sigma\nabla\phi \cdot n$  ที่ขอบเขต  $\partial B$  ( $n$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับ  $\partial B$ ) ทั้งสองกรณีรู้จักกันในชื่อว่าปัญหาเงื่อนไขค่าขอบเขต Dirichlet และ Neumann ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (4.2) ตามลำดับ

จากสมการที่ (4.2) ไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์โดยเฉพาะเมื่อโดเมน B มีรูปร่างไม่แน่นอนและตัวกลางใน B เป็นแบบไม่เอกพันธ์ อย่างไรก็ตามก็สามารถหาผลเฉลยเชิงเลขโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้หลักการ Variational Method [5] โดยผลเฉลยของสมการ (4.2) จะสมนัยกับการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนอลต่อไปนี้

$$F(\phi) = \frac{1}{2} \int_B \rho^{-1} |\nabla\phi|^2 dB - \int_{\partial B} J\phi dB = \sum_{n=1}^N F_n \quad (4.3)$$

เมื่อ  $F_n$  คือ พลังงานศักย์ในเอลิเมนต์ที่  $n$  โดย

$$F_n = \frac{1}{2} \int_{B_n} \rho^{-1} |\nabla\phi|^2 dB - \int_{\partial B_n} J\phi dB \quad (4.4)$$

ที่ตำแหน่งใดๆ สักคาในอิลิเมนต์นั้น จะประมาณได้จากฟังก์ชัน

$$\phi = \sum \phi_i f_i \quad (4.5)$$

เมื่อ  $f_i$  คือฟังก์ชันประมาณค่าในช่วง 0 ถึง 1 และ  $\phi_i$  คือสักคาที่โหนดของอิลิเมนต์นั้นๆ โดยสมการที่ (4.5) เขียนในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

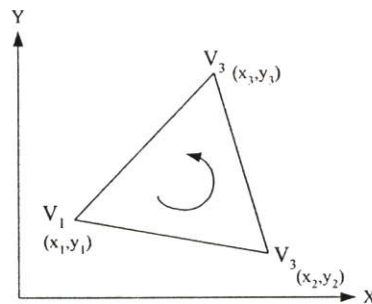
$$F_n = \frac{1}{2} \phi_n^T y_n \phi_n - \phi_n^T c_n \quad (4.6)$$

โดย  $\phi_n$  คือเวกเตอร์ของสักคาที่โหนด  $\phi_i$  ที่สัมพันธ์กัน และ  $y_n$  คือเมตริกซ์ของอิลิเมนต์ ซึ่งคำนวณได้จากสูตร (4.7) หรือ (4.8)

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left( \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} \right) dB \quad (2 \text{ มิติ}) \quad (4.7)$$

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left( \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial z \partial z} \right) dB \quad (3 \text{ มิติ}) \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 วิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ)



รูปที่ 4.4 อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม การจัดลำดับของ โหนดจะเรียงตามทิศทวนเข็มนาฬิกา

การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในตัวกลางสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Poisson

$$\nabla \cdot \rho^{-1} \nabla V = 0 \quad (4.9)$$

จากฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) ของอิเลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม [1] เมื่อ N คือ Shape-function จะได้ว่า

$$V(x, y) = a + bx + cy \quad (4.10)$$

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^3 V_i N_i(x, y) \quad (4.11)$$

จากฟังก์ชันพื้นฐานเมื่อเขียนในรูปของเมตริกซ์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละโหนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

เมื่อคูณด้วย  $[1 \ x \ y]$  ทั้ง 2 ข้างจะได้

$$[1 \ x \ y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ซึ่งก็คือ  $V(x, y)$  จากสมการ (4.10) และ (4.11) นั่นเอง ดังนั้นจะได้ Shape-function มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$[N_1 \ N_2 \ N_3] = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.15)$$

$$N_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + b_1 x + c_1 y] \quad (4.16)$$

$$N_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + b_2 x + c_2 y] \quad (4.17)$$

$$N_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + b_3 x + c_3 y] \quad (4.18)$$

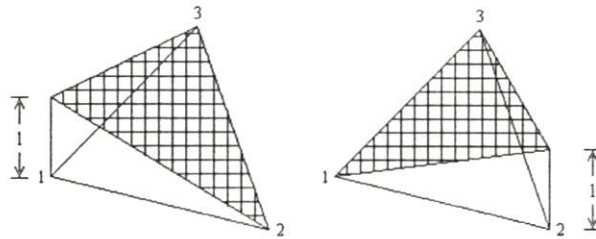
เมื่อ  $b_1 = x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2$   
 $c_1 = y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2$

$N_i$  เป็น Linear interpolation function เรียกว่า Element shape function ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

$$N_i(x_j, y_j) = 1 \quad \text{เมื่อ } i = j \quad (4.19)$$

$$N_i(x_j, y_j) = 0 \quad \text{เมื่อ } i \neq j \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^3 N_i(x, y) = 1 \quad (4.21)$$



รูปที่ 4.5 ลักษณะของ shape function  $N_1$  และ  $N_2$  ของอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular)

นำ Shape-function ที่ได้ไปหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ด้วยวิธีของ Ritz ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธี Variation

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \iint_A \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dA \quad (4.22)$$

ดังนั้นจะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลเมนต์

$$y = \frac{1}{4\rho A} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

เมื่อ  $\rho =$  ค่าสภาพความต้านทานของอิเลิเมนต์,  $A =$  พื้นที่ของอิเลิเมนต์

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

$$b_1 = x_2 - x_3, \quad b_2 = x_3 - x_1, \quad b_3 = x_1 - x_2$$

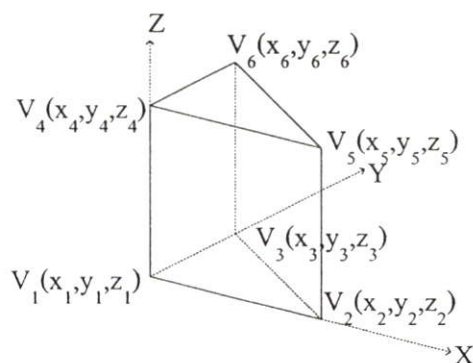
$$c_1 = y_2 - y_3, \quad c_2 = y_3 - y_1, \quad c_3 = y_1 - y_2$$

#### 4.2.3 วิธีกรหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)

จากเมตริกซ์อิเลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์แบบสองมิติ เราสามารถหาเมตริกซ์อิเลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์แบบสามมิติได้โดยคำนวณหาได้จากสูตร

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left( \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial z \partial z} \right) dB \quad (3 \text{ มิติ}) \quad (4.24)$$

โดยวิธีกรหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)จะมีดังนี้ [5]



รูปที่ 4.6 อิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (triangular prism)

จากฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function) ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (Triangular prism) หรือ Six-node pentahedron

$$V(x, y, z) = a + bx + cy + dz + exz + fyz \quad (4.26)$$

$$V(x, y, z) = V_i N_i(x, y, z) \quad (4.27)$$

เมื่อ  $N$  คือ Shape-function จากฟังก์ชันพื้นฐานเมื่อเขียนในรูปของเมตริกซ์จะได้ค่าศักดิ์คาตกร่วมที่แต่ละโหนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

เมื่อคูณด้วย  $[1 \ x \ y \ z \ xz \ yz]$  ทั้งสองข้างจะได้

$$[1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$[1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

ซึ่งก็คือ  $V(x, y, z)$  จากสมการที่ (4.26) และ (4.27) ดังนั้นจะได้ Shape-function ค่าดังสมการต่อไปนี้

$$[N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6] = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1z_1 & y_1z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2z_1 & y_2z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3z_1 & y_3z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1z_4 & y_1z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2z_4 & y_2z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3z_4 & y_3z_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.31)$$

นำ Shape-function ที่ได้ไปหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ด้วยวิธีของ Ritz ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีแปรผัน (Variation method)

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \iiint_V \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \quad (4.32)$$

โดยอาจแทนค่าขอบเขตของการอินทิเกรตได้ดังนี้

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \int_{-1}^4 \int_{-1}^3 \int_{(x-x_1)(y_3-y_1)/(x_3-x_1)+y_3}^{(x-x_3)(y_3-y_1)/(x_3-x_1)+y_3} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dy dx dz \quad (4.33)$$

ก็จะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์

$$y = \frac{A}{12\rho h} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & -2 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 1 & -1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 2 & -1 & -1 & -2 \\ -2 & -1 & -1 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & -1 & 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & -2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h}{24\rho A} \begin{bmatrix} 2(b_1^2 + c_1^2) & 2(b_1b_2 + c_1c_2) & 2(b_1b_3 + c_1c_3) & b_1^2 + c_1^2 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ 2(b_1b_2 + c_1c_2) & 2(b_2^2 + c_2^2) & 2(b_2b_3 + c_2c_3) & b_1b_2 + c_1c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ 2(b_1b_3 + c_1c_3) & 2(b_2b_3 + c_2c_3) & 2(b_3^2 + c_3^2) & b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3^2 + c_3^2 \\ b_1^2 + c_1^2 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 & 2(b_1^2 + c_1^2) & 2(b_1b_2 + c_1c_2) & 2(b_1b_3 + c_1c_3) \\ b_1b_2 + c_1c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2b_3 + c_2c_3 & 2(b_1b_2 + c_1c_2) & 2(b_2^2 + c_2^2) & 2(b_2b_3 + c_2c_3) \\ b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3^2 + c_3^2 & 2(b_1b_3 + c_1c_3) & 2(b_2b_3 + c_2c_3) & 2(b_3^2 + c_3^2) \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } b_1 &= x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2 \\ c_1 &= y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2 \\ h &= z_4 - z_1 \end{aligned}$$

หรือเขียนสมการที่ (4.34) ได้ใหม่ดังสมการที่ (4.35)

$$y = \frac{1}{\rho} \left( \frac{A}{12h} \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha \\ -\alpha & \alpha \end{bmatrix} + \frac{h}{24A} \begin{bmatrix} 2\beta & \beta \\ \beta & 2\beta \end{bmatrix} \right) \quad 4.35$$

เมื่อ  $\rho$  = ค่าสภาพความต้านทานของอิติเมนต์,  $A$  = พื้นที่ของอิติเมนต์

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

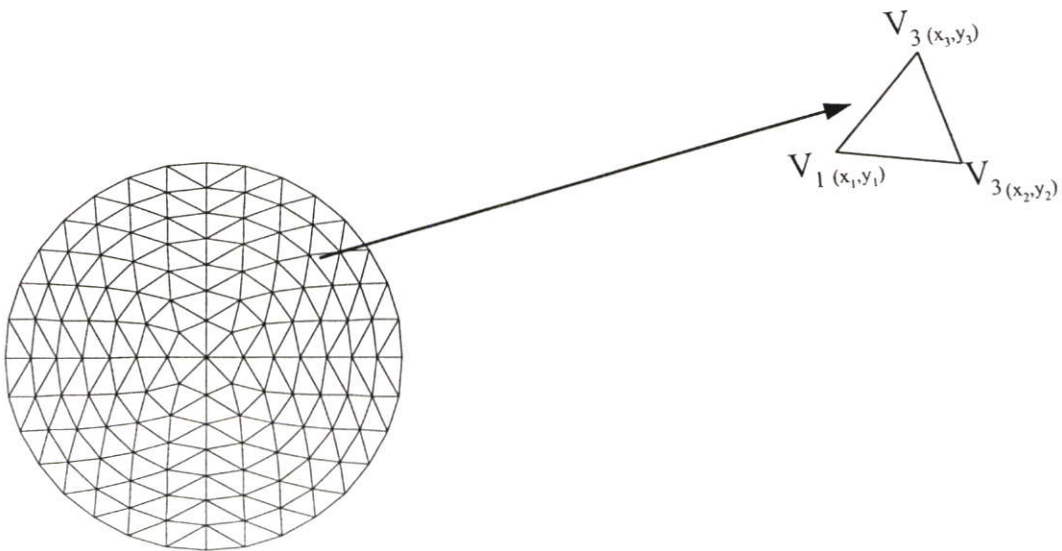
$$\alpha = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \beta = \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix}$$

$$b_1 = x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2, h = z_4 - z_1$$

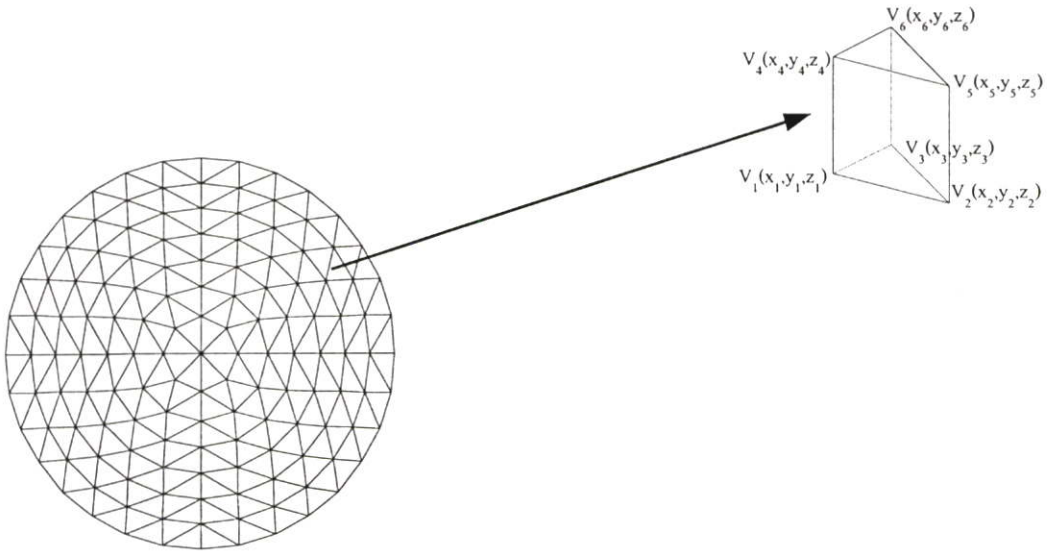
$$c_1 = y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2$$

$$h = z_4 - z_1$$

สำหรับการวางอิติเมนต์ในไฟไนต์อิติเมนต์แต่ละแบบมีลักษณะดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 อิติเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ)



รูปที่ 4.8 อลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)

จากเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของแต่ละโอลิเมนต์ สามารถเขียนเมตริกซ์ของระบบได้ดังสมการที่ (4.36)

$$[Y]_{N \times N} [V]_{N \times 1} = [C]_{N \times 1} \quad (4.36)$$

เมื่อ  $[Y]$  คือ เมตริกซ์ของระบบ ,  $[V]$  คือ โหนดโวลต์เตจเวกเตอร์ ,  $[C]$  คือ โหนดเคอร์เรนซ์เวกเตอร์ และ  $N$  คือ จำนวนโหนด จากสมการที่ (4.36) จะหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละโหนดได้ดังสมการที่ (4.37)

$$[V]_{N \times 1} = [Y]_{N \times N}^{-1} [C]_{N \times 1} \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.37) เราจะได้ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละโหนด แต่เราจะนำค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะโหนดที่เราวัดเท่านั้นไปทำการคำนวณเพื่อปรับค่าสภาพความต้านทานแต่ละโอลิเมนต์ ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$\Phi = \frac{1}{2} [V - V_0]^T [V - V_0] \quad (4.38)$$

$$\Delta p = -[f'(p)^T f'(p)]^{-1} [f'(p)^T] [V - V_0] \quad (4.39)$$

จากสมการ 4.39 เทอมของ  $[f'(\rho)^T f'(\rho)]$  เป็นเมตริกซ์ในรูป Ill-condition ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ Singular matrix มีผลให้การหาค่าอินเวอร์สมีความคลาดเคลื่อนสูง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ต้องทำให้เมตริกซ์เป็น Non-singular โดยทำการปรับค่าเพียงเล็กน้อยก่อนที่จะหาค่าอินเวอร์ส โดยเปลี่ยนเป็น  $f'(\rho)^T f'(\rho) + 2\lambda\Sigma$  จึงมีการเปลี่ยนแปลงสมการที่ (4.38) และ (4.39) เป็นสมการที่ (4.40) และ (4.41) ตามลำดับ

$$\Phi = \frac{1}{2}[V - V_0]^T [V - V_0] + \frac{1}{2}[\lambda\rho^T \Sigma \rho] \quad (4.40)$$

$$\Delta\rho = -[f'(\rho)^T f'(\rho) + 2\lambda\Sigma]^{-1} [f'(\rho)^T] [V - V_0] \quad (4.41)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ จำนวนจริงบวก และ  $\Sigma$  คือ positive-definite

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \cdot & \Sigma_{1R} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \cdot & \Sigma_{2R} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Sigma_{R1} & \Sigma_{R2} & \cdot & \Sigma_{RR} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

การที่สมการที่ 4.42 จะเป็น Positive-definite matrix ได้เมื่อมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [1]

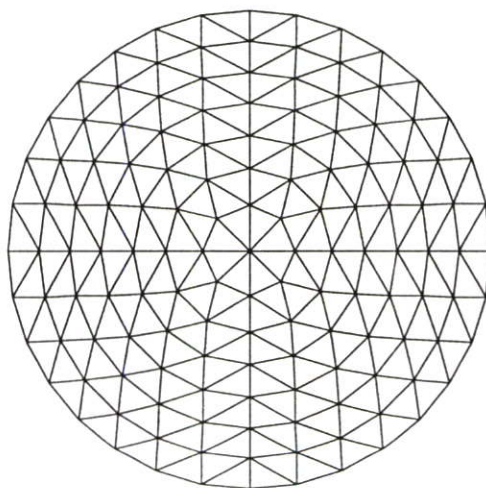
$$|\Sigma_{11}| > 0, \begin{vmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \begin{vmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \cdot & \Sigma_{1R} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \cdot & \Sigma_{2R} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Sigma_{R1} & \Sigma_{R2} & \cdot & \Sigma_{RR} \end{vmatrix} > 0 \quad (4.43)$$

Positive-definite matrix ที่รู้จักกันดี ก็คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) โดยการกำหนดค่า  $\lambda$  ที่เหมาะสมก็มีความสำคัญ เพราะ ถ้าค่า  $\lambda$  น้อยเกินไปก็จะให้ผลน้อย แต่ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง หลังจากคำนวณค่า  $\Delta\rho$  จากสมการที่ 4.41 แล้วจะนำค่า  $\Delta\rho$  ไปปรับค่า  $\rho$  ในแต่ละอิลิเมนต์โดยสมการที่ 4.44

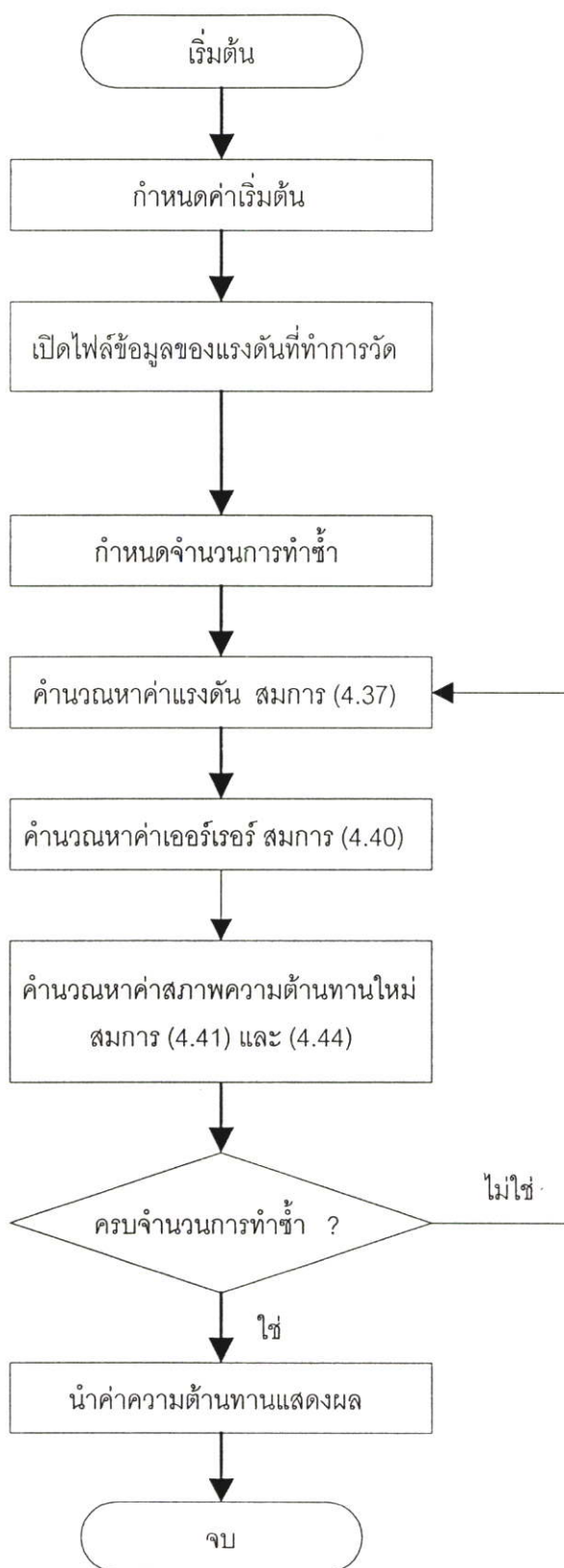
$$\rho_{i+1} = \rho_i + \Delta\rho \quad (4.44)$$

- เมื่อ  $\Phi$  = ค่าความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ระหว่างค่าแรงดันที่ได้จากการวัดกับการคำนวณ
- $f'(\rho)$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่จุดวัดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า  $\rho$  ของแต่ละอิลิเมนต์มีขนาด [MXR]
- $V_0$  = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัดมีขนาด [MX1]
- $\rho$  = ค่าการกระจายของสภาพความต้านทานของระบบมีขนาด [RX1]
- $V$  = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณมีขนาด [MX1]
- $\lambda$  = จำนวนจริงบวก
- $\Sigma$  = เมตริกซ์เอกลักษณะ
- $R$  = จำนวนอิลิเมนต์
- $M$  = จำนวนอิเล็กโทรด

จากค่าสภาพความต้านทานของแต่ละอิลิเมนต์ภายในวัตถุที่คำนวณได้นำมาสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงการแจกแจงของค่าสภาพความต้านทานภายในของวัตถุนั้น โดยใช้ระดับเทาหรือระดับสีของจอแสดงผลของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับการทดลองนี้ใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์ขนาด 32 อิเล็กโทรด 248 อิลิเมนต์ 141 โหนด โดยมีรูปแบบการวางอิลิเมนต์ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งการวางอิลิเมนต์ (Grid generation) ใช้การคำนวณตามหลักเรขาคณิต โดยเราสามารถเขียนโปรแกรมแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 แบบการวางอิลิเมนต์สำหรับไฟไนต์อิลิเมนต์ ขนาด 32 อิเล็กโทรด 141 โหนด 248 อิลิเมนต์



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของอัลกอริธึม

#### 4.2.4 การกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้น

การประมาณค่าสภาพความต้านทานจากการจ่ายกระแสและวัดแรงดัน [5] เป็นลักษณะของปัญหาผกผัน (inverse problem) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประมาณค่าแบบ Newton-Raphson ซึ่งต้องกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้นในการคำนวณ จากการทดลองใช้ข้อมูลที่วัดได้จากถังน้ำเกลือพบว่า การกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญมากต่อการเข้าสู่ของคำตอบในบางจุด ซึ่งอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนหรืออาจไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จึงได้เสนอวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าสภาพความต้านทานขึ้นมาใช้ โดยใช้หลักความจริงที่ว่าศักดาที่วัดได้แปรผันโดยตรงกับค่าสภาพความต้านทานของวัตถุดังนี้

เมื่อกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้น  $\rho$  ขึ้นแล้วปรับด้วยค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของศักดาที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณของทุกโปรเจกชันเขียนเป็นสมการสำเร็จรูปดังสมการที่ (4.45)

$$\rho_0 = \rho \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{V_{cs}^p}{f_{cs}^p(\rho)} \quad (4.45)$$

หรือเมื่อกำหนดให้  $\rho$  เป็น 1 สมการ 4.45 ก็จะเป็นดังสมการที่ (4.46)

$$\rho_0 = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{V_{cs}^p}{f_{cs}^p(1)} \quad (4.46)$$

ถ้าหากขอบเขตของระบบที่ใช้เป็นรูปวงกลมหรือทรงกระบอก  $f_{cs}(1)$  จะมีค่าเท่ากันทุกโปรเจกชัน ดังนั้นจึงลดรูปสมการที่ (4.46) ได้เป็นสมการที่ (4.47)

$$\rho_0 = \frac{1}{P \cdot f_{cs}(1)} \sum_{p=1}^P V_{cs}^p \quad (4.47)$$

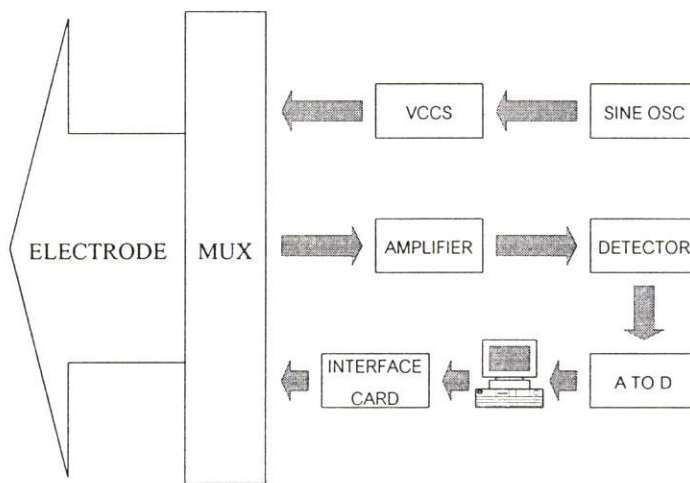
- เมื่อ  $\rho_0$  = ค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้นที่คำนวณได้สำหรับใช้ในการปรับค่าด้วยวิธีนิว-ราฟสันซึ่งเป็นเสมือนค่าสภาพความต้านทานเฉลี่ยของระบบ
- $V_{cs}^p$  = ค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้ที่ขั้วที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (current source) ของโปรเจกชันที่  $p$
- $f_{cs}^p(1)$  = ค่าศักดาไฟฟ้าที่คำนวณได้ที่แหล่งจ่ายกระแสของโปรเจกชันที่  $p$  เมื่อกำหนดค่า  $\rho$  เป็น 1 ทั้งหมด
- $p$  = หมายเลขโปรเจกชัน
- $P$  = จำนวนโปรเจกชันทั้งหมด

## บทที่ 5

### ระบบเก็บข้อมูล

#### (DATA COLLECTION SYSTEM)

ระบบเก็บข้อมูลเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสที่จะป้อนให้กับอิเล็กโทรดที่ต่ออยู่กับวัตถุและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดต่างๆ ตลอดจนบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เก็บลงไฟล์ โดยระบบเก็บข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 5.1

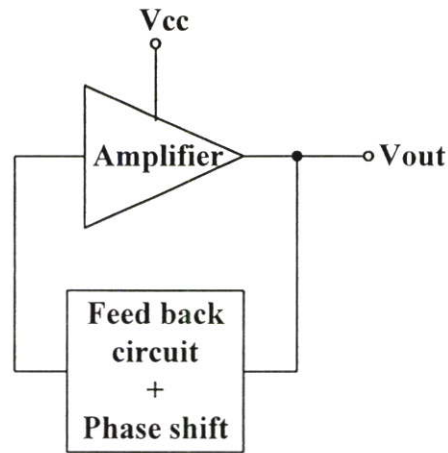


รูปที่ 5.1 ระบบเก็บข้อมูล (Data collection system)

สำหรับรายละเอียดในแต่ละส่วนสามารถแสดงได้ดังนี้

#### 5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์ (Sine Wave Oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillators) คือวงจรที่ผลิตสัญญาณที่เอาต์พุตโดยปราศจากสัญญาณอินพุต โดยอาศัยการทำงานภายใต้พื้นฐานของการป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback) โดยการนำสัญญาณจากเอาต์พุตในอัตราส่วนที่พอเหมาะป้อนกลับไปยังอินพุตเพื่อทำให้วงจรสร้างสัญญาณเอาต์พุตอย่างต่อเนื่อง วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรที่ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร สำหรับแนวความคิดพื้นฐานของวงจรกิจักสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2

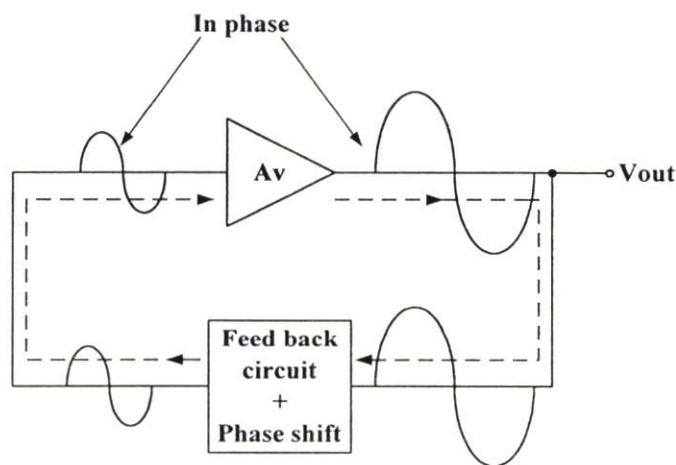


รูปที่ 5.2 แนวความคิดพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Oscillator)

หัวใจของวงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์ ก็คือ การแปลงพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของไฟตรง (DC) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟสลับ (AC) โดยวงจรพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์สัญญาณไซน์จะประกอบด้วยแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) สำหรับขยายสัญญาณและวงจรป้อนกลับแบบบวกเพื่อนำสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับมายังอินพุต เพื่อทำให้วงจรสามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตอย่างต่อเนื่อง

### 5.1.1 การป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback)

การป้อนกลับแบบบวก คือ คุณสมบัติในการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตกลับมายังอินพุต ในอัตราส่วนที่พหุเหมาะกับการขยายสัญญาณ โดยไม่มีการเลื่อนเฟสเพื่อนำมาสร้างสัญญาณเอาต์พุตใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 5.3



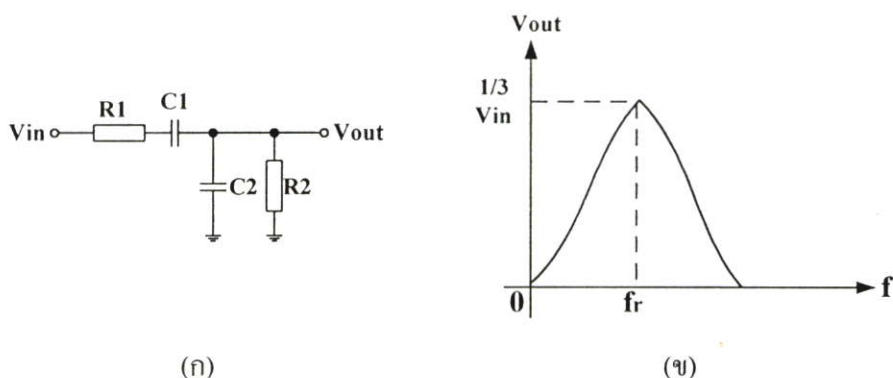
รูปที่ 5.3 การป้อนกลับแบบบวกเพื่อสร้างสัญญาณไซน์

จากรูปที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ไม่มี การเลื่อนเฟสจะถูกป้อนกลับมายังแอมพลิไฟเออร์ เพื่อสร้างสัญญาณไซน์อย่างต่อเนื่อง โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออสซิลเลตมี 2 ประการ คือ

1. การเลื่อนเฟสของลูป (Loop) ป้อนกลับจะต้องเท่ากับ  $0^\circ$
2. อัตราขยายแรงดัน (Voltage gain) ในลูปป้อนกลับจะต้องเท่ากับ 1 (Unity gain)

### 5.1.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเวน-บริดจ์ (Wien-Bridge Oscillator)

องค์ประกอบพื้นฐานของเวน-บริดจ์ออสซิลเลเตอร์ก็คือ วงจรลีด-แลกซ์ (Lead-Lag circuit) ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 (ก) วงจรลีด-แลกซ์ (Lead-Lag Circuit)

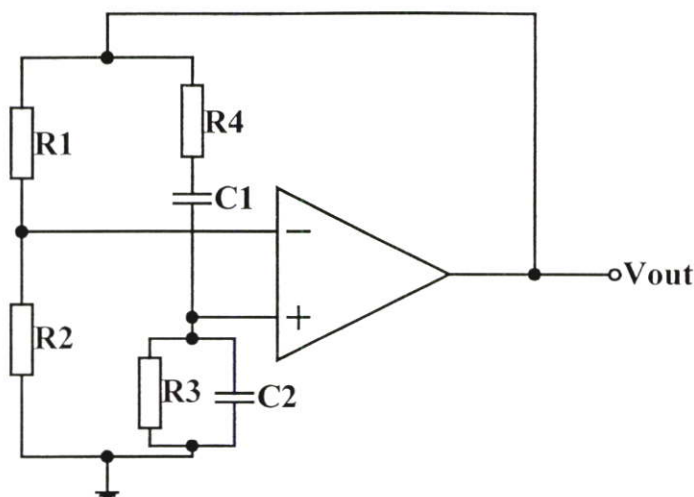
(ข) กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรลีด-แลกซ์

จากรูปที่ 5.4 (ก)  $R_1$  และ  $C_1$  ถูกต่อเป็นวงจรแลกซ์ (Lag circuit) และ  $R_2$  และ  $C_2$  ถูกต่อเป็นวงจรลีด (Lead Circuit) โดยผลตอบสนองความถี่ของวงจรสามารถแสดงดังรูปที่ 5.4 (ข) โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร ( $f_r$ ) ค่าแรงดันที่เอาต์พุตจะมีค่าสูงสุดซึ่ง ณ จุดนี้ค่าแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต ( $V_{out}/V_{in}$ ) ของวงจรจะเป็น  $1/3$  เมื่อ  $R_1 = R_2$  และ  $C_1 = C_2$  และค่าความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (5.1)

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $R_1 = R_2$ ,  $C_1 = C_2$ ,  $f_r$  = ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร

วงจรลีด-แลกซ์ (Lead-Lag Circuit) จะถูกใช้เป็นส่วนป้อนกลับแบบบวกของออปแอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเวน-บริดจ์ (Wein-Bridge Oscillator)

จากรูปที่ 5.5 วงจรแบ่งแรงดันที่ประกอบด้วย  $R_1$  และ  $R_2$  จะใช้เป็นวงจรป้อนกลับแบบลบ โดยวงจรจะถูกต่อเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) ซึ่งสัญญาณอินพุตได้มาจากการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุตผ่านวงจรลีด-แลกซ์ (Lead-Lag Circuit) โดยเราสามารถหาอัตราขยายของวงจรขยาย (Amplifier) ได้จากสมการที่ (5.2)

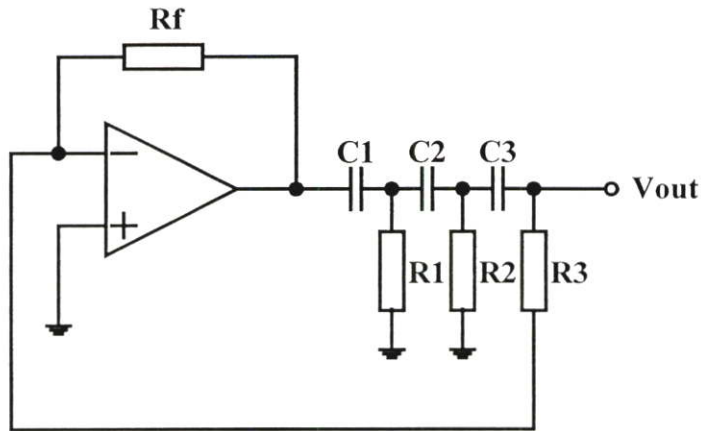
$$A_{cl} = \frac{1}{B} = \frac{1}{R_2 / (R_1 + R_2)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (5.2)$$

### 5.1.3 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟสจะใช้การป้อนกลับของสัญญาณผ่านวงจร RC 3 วงจรเพื่อทำการป้อนกลับและมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณ โดยผลรวมการเลื่อนเฟสของสัญญาณทั้งหมดของวงจร RC จะทำให้เฟสเลื่อนไป 180 องศา ดังนั้นจึงมีเพียงความถี่เดียวเท่านั้นที่ให้ผลของการเลื่อนเฟสรวมเท่ากับ 180 องศาและจะเป็นความถี่ที่วงจรทำการผลิตสัญญาณ (Oscillation) โดยมีความถี่ของวงจรที่ผลิตขึ้นของวงจรจะสามารถหาได้ดังสมการที่ (5.3)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \quad (5.3)$$

สำหรับลักษณะของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

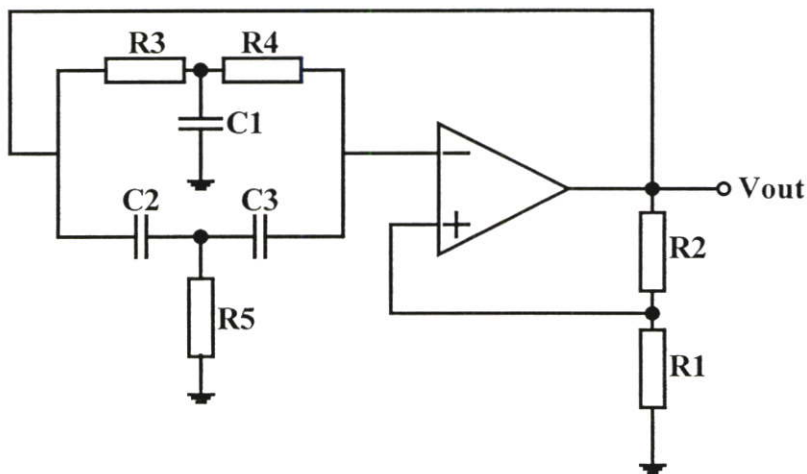


รูปที่ 5.6 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (Phase-Shift Oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟสสามารถสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความเป็นไซน์มากนอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ยังมีเสถียรภาพทางความถี่ และมีแอมพลิจูดคงที่อีกด้วย

#### 5.1.4 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบทวินที (Twin-T Oscillator)

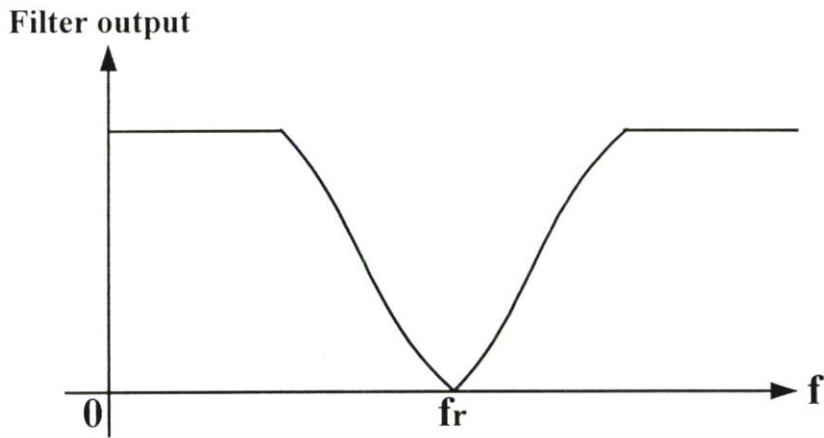
วงจรออสซิลเลเตอร์แบบทวินทีเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ RC รูปแบบหนึ่งโดยลักษณะของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบทวินที (Twin-T Oscillator)

จากวงจรรูปที่ 5.7 วงจรจะประกอบด้วยวงจร RC ฟิเตอร์แบบตัว T (T-Type RC Filters) 2 วงจรต่อขนานกันเพื่อทำการป้อนกลับแบบลบมาทางอินพุต โดยวงจรหนึ่งจะต่อเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter) และอีกวงจรหนึ่งต่อเป็นวงจรกรองความถี่สูง (High-pass

filter) ผลการตอบสนองความถี่ของทั้งสองวงจรซึ่งต่อขนานกันจะสร้างวงจรกรองความถี่แบบนอร์ท (Notch Filter) ที่มีความถี่กลางเท่ากับความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation)



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรทวินทีฟิลเตอร์ (Twin-T filter Response)

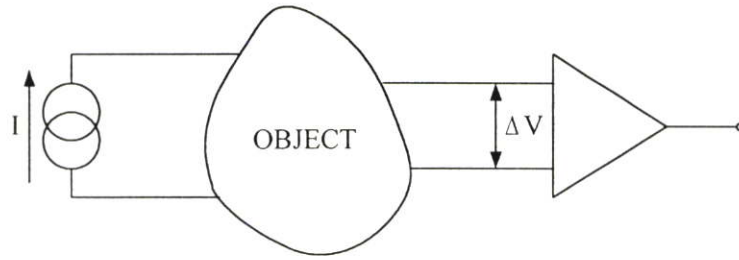
จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าวงจรจะไม่สามารถออสซิลเลตที่ความถี่อื่นนอกจากความถี่ของการออสซิลเลต ( $f_r$ ) เนื่องจากที่ความถี่ที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าความถี่ของการออสซิลเลตจะมีการป้อนกลับแบบลบผ่านฟิลเตอร์ไปได้ โดยสำหรับความถี่ของการออสซิลเลตสามารถหาได้จากสมการที่ (5.4)

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.4)$$

## 5.2 วงจรจ่ายกระแส (Current Generator)

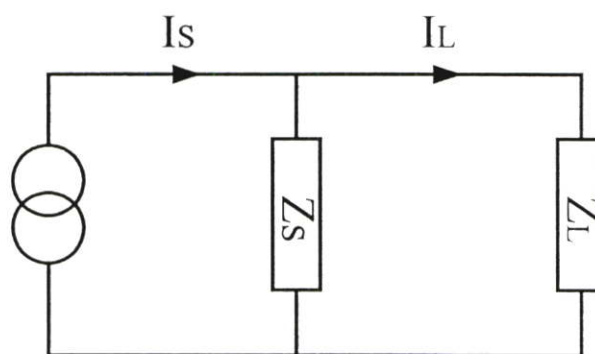
จากหลักการเบื้องต้นของระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า สามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปบนผิววัตถุแล้ววัดค่าแรงดันที่พื้นผิวโดยรอบ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กระแสที่อยู่ในรูปแบบไซน์ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปบนผิววัตถุ ด้วยความต้องการแหล่งจ่ายกระแสแบบไซน์เวฟ (Sine wave) ที่มีค่าความต้านทานของเอาต์พุตสูง ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาออกแบบแหล่งจ่ายกระแสให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

จากพื้นฐานของวงจรวัดค่าความต้านทาน (Impedance Measurement) [12] โดยหลักการวัดแบบ 4 ขั้วสามารถแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 หลักการวัดค่าความต้านทานแบบ 4 ขั้ว

จากรูปจะใช้โอห์มมิเตอร์จำนวน 2 คู่ในการวัดแต่ละครั้ง โดยอัตราส่วนของ  $\Delta V/I$  คือขนาดของอิมพีแดนซ์ในเทอมของ “ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ (Transfer Impedance)” หรือ “มิวชวลอิมพีแดนซ์ (Mutual Impedance)” เราจะเห็นว่ากระแสถูกจ่ายจากโอห์มมิเตอร์ 1 คู่ และถูกวัดโดยโอห์มมิเตอร์อีก 1 คู่ ซึ่งต่ออยู่กับดิฟเฟอเรนเชียลโวลต์มิเตอร์ (Differential Voltmeter) โดยตำแหน่งการจ่ายกระแสและการวัดแรงดันของโอห์มมิเตอร์แต่ละคู่จะถูกเปลี่ยนไปตามลักษณะของการจ่ายกระแสและการวัดแรงดันซึ่งจะยังไม่กล่าวถึงในที่นี้ แต่จุดที่น่าสนใจอยู่ที่การจ่ายกระแสไม่ได้จ่ายไปยังขั้วของวงจรวัดโดยตรง แต่มีผลกระทบของแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วของโอห์มมิเตอร์และขั้วของวัตถุที่จะทำการวัดอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วของโอห์มมิเตอร์และขั้ววัตถุ แต่ถ้าหากค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรจ่ายกระแสเป็นอนันต์ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วของโอห์มมิเตอร์และขั้ววัตถุจะไม่มีผลกระทบต่อกระแสที่ไหลผ่านวัตถุ และในกรณีเดียวกันหากอิมพีแดนซ์ของวงจรดิฟเฟอเรนเชียลโวลต์มิเตอร์มีค่าเป็นอนันต์ (Infinite) ก็จะทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วโอห์มมิเตอร์กับขั้ววัตถุทำให้ค่าแรงดันที่วัดได้มีความถูกต้อง



รูปที่ 5.10 โมเดลของแหล่งจ่ายกระแส ( Current source model )

จากรูปที่ 5.10 แสดงโมเดลของแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติโดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเท่ากับ  $Z_s$  ต่ออยู่กับโหลดที่ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  จากรูปที่ 5.10 เราจะหาค่า  $I_L$  ได้จากสมการที่ (5.5)

$$I_L = I_s \left( \frac{Z_s}{Z_s + Z_L} \right) \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.5) ทำ Partial derivatives เทียบกับ  $Z_L$  จะได้

$$\frac{\partial I_L}{\partial Z_L} = -I_s \frac{Z_s}{(Z_s + Z_L)^2} = \frac{-I_L}{Z_s + Z_L} \approx \frac{-I_L}{Z_s} \quad \text{เมื่อ } Z_s \gg Z_L \quad (5.6)$$

จากสมการที่ (5.6) จะได้

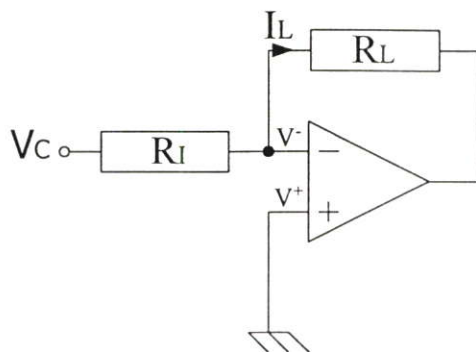
$$Z_s = \frac{-I_L}{\left( \frac{\partial I_L}{\partial Z_L} \right)} - Z_L \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.6) แสดงให้เห็นว่าหากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกระแสมีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมากๆ กระแสที่ผ่านโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

จากเหตุผลดังกล่าวมาทั้งหมดวงจรจ่ายกระแสสำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้เป็นกระแสไฟฟ้าในรูปแบบไซน์เวฟ (Sine wave) มีความถี่ขึ้นต่ำ และมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งโดยทั่วไปวงจรจ่ายกระแสสำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าจะใช้โอปแอมป์ในการออกแบบเนื่องจากมีความสะดวกในการออกแบบและควบคุมกระแสที่มีขนาดไม่สูงมากนัก (ในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กระแสในช่วง 0.1-10 มิลลิแอมป์) สำหรับวงจรจ่ายกระแสแบบต่างๆ [13] ที่นิยมใช้ในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

### 5.2.1 วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบโฟลตติ้งโหลด (Floating load Current Source)

วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบโฟลตติ้งโหลดถูกออกแบบให้จ่ายกระแสที่มีความถูกต้องแม่นยำโดยการผ่านโฟลตติ้งโหลด (Floating Load) ดังแสดงในรูป 5.11



รูปที่ 5.11 วงจรจ่ายกระแสคงที่แบบโพลตึงโหลด (Floating Load Current Source)

จากวงจรในรูปที่ 5.11 เมื่อให้ค่าอัตราขยายลูปเปิดของออปแอมป์เท่ากับ  $A_o$  ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_o = -A_o(V^- - V^+) = -A_oV^- \quad (5.8)$$

$$I_L = \frac{V^- - V_o}{Z_L} = \frac{(A_o + 1)V^-}{Z_L} \quad (5.9)$$

$$V^- = V_c - R_i I_L \quad (5.10)$$

$$I_L = \frac{(A_o + 1)(V_c - R_i I_L)}{Z_L} \quad (5.11)$$

$$I_L = \frac{V_c}{R_i + \frac{Z_L}{(A_o + 1)}} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial Z_L} = \frac{1}{(A_o + 1)} \frac{-V_c}{\left(R_i + \frac{Z_L}{A_o + 1}\right)^2} = \frac{-I_L}{(A_o + 1)R_i + Z_L} \quad (5.13)$$

จากสมการที่ (5.7) จะได้ว่า

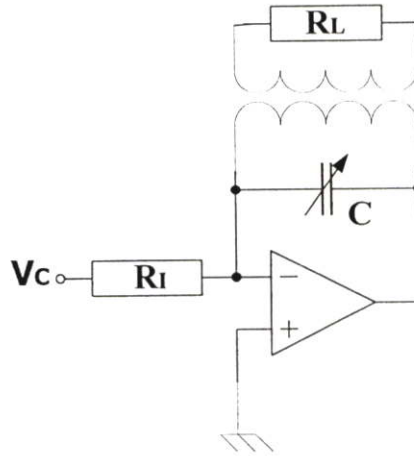
$$Z_s = (A_o + 1)R_i \quad (5.14)$$

เมื่อ  $Z_s$  = ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจร

$R_i$  = ค่าความต้านทานอินพุต

$A_o$  = อัตราขยายรูปเปิดของออปแอมป์

วงจรจ่ายกระแสแรงดันที่แบบโพลตึงโหลดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างวงจรจ่ายกระแสของระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าได้แต่เนื่องจากระบบต้องการวงจรจ่ายกระแสที่มีการไอโซเลชัน (Isolation) จากอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการจ่ายกระแส ดังนั้นจึงมีการออกแบบวงจรให้เป็นแบบซิงเกิลเอนด์ (Single-end) โดยใช้การคัปปลิง (Coupling) กระแสไปยังโหลดโดยผ่านทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) ดังแสดงในรูปที่ 5.12



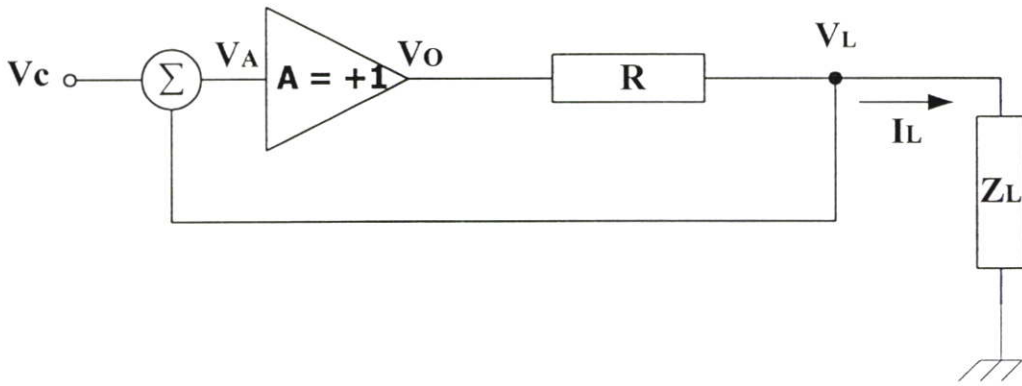
รูปที่ 5.12 การใช้ทรานส์ฟอร์มเมอร์คัปปลิงในวงจรจ่ายกระแสแบบโพลตึงโหลด

สำหรับข้อจำกัดของวงจรแบบนี้คือคุณสมบัติของทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่นำมาใช้ เนื่องจากวงจรต้องการเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่สูง โดยค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานส์ฟอร์มเมอร์จะสามารถกำหนดได้จากค่าของทริมเมอร์ปาซิเตอร์ (Trim Capacitor) และค่าเซลส์อินดักแตนซ์ (Self Inductance) ของทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งในการใช้งานเราจะต้องทำการปรับทริมเมอร์ปาซิเตอร์ให้ได้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงสุด

จากความจำเป็นที่จะต้องทำการจูน (Tune) ค่าทริมเมอร์ปาซิเตอร์เพื่อทำการปรับค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ทำให้มีปัญหาในการนำไปใช้งานในระบบแบบหลายความถี่ นอกจากนี้เนื่องจากทรานส์ฟอร์มเมอร์มีขนาดใหญ่ในการนำไปออกแบบเป็นไอซีจะมีความยากลำบาก วงจรแบบนี้จึงไม่เหมาะแก่การนำไปออกแบบเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

### 5.2.2 วงจรจ่ายกระแสแสดงที่ใช้การป้อนกลับแบบบวก (Positive-feedback VCCS)

วงจรจ่ายกระแสแสดงที่ใช้หลักการป้อนกลับแบบบวกเป็นวงจรชนิดที่สองที่นิยมใช้กันในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า โดยลักษณะการทำงานของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 วงจรจ่ายกระแสแสดงที่ใช้การป้อนกลับแบบบวก (Positive –feedback VCCS)

จากรูปที่ 5.13 จะใช้ออปแอมป์ขับ (Driver) กระแสให้โหลด (Load) โดยผ่านรีซิสเตอร์ R ที่ต่ออนุกรมกับเอาต์พุตของออปแอมป์ แรงดันที่เอาต์พุตของออปแอมป์จะเท่ากับ  $V_c + V_L$  เนื่องจากออปแอมป์ถูกต่อเป็นบัฟเฟอร์ (อัตราขยายเท่ากับ 1) หรือยูนิตีเกน (Unity gain) เพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์ R จะเท่ากับ  $V_c + V_L - V_L = V_c$  และเราจะหากระแสที่ไหลผ่านโหลดได้จาก  $V_c/R$  ดังนั้นเราสามารถกำหนดค่ากระแสของเอาต์พุตได้เมื่อทราบค่าของ  $V_c$  และ R และเราสามารถหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_s$ ) ของวงจรได้จากสมการดังนี้

$$V_A = V_c + V_L \quad (5.15)$$

$$V_o = AV_A = A(V_c + V_L) = V_L + I_L R \quad (5.16)$$

$$I_L = \frac{V_L(A-1) + AV_c}{R} = \frac{I_L Z_L(A-1) + AV_c}{R} \quad (5.17)$$

$$I_L = \frac{-AV_c}{(R + Z_L(1-A))} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial Z_L} = \frac{AV_c(1-A)}{(R + Z_L(1-A))^2} \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial Z_L} = \frac{-I_L}{\frac{R}{(1-A)} + Z_L} \quad (5.20)$$

จากสมการที่ (5.7) จะได้

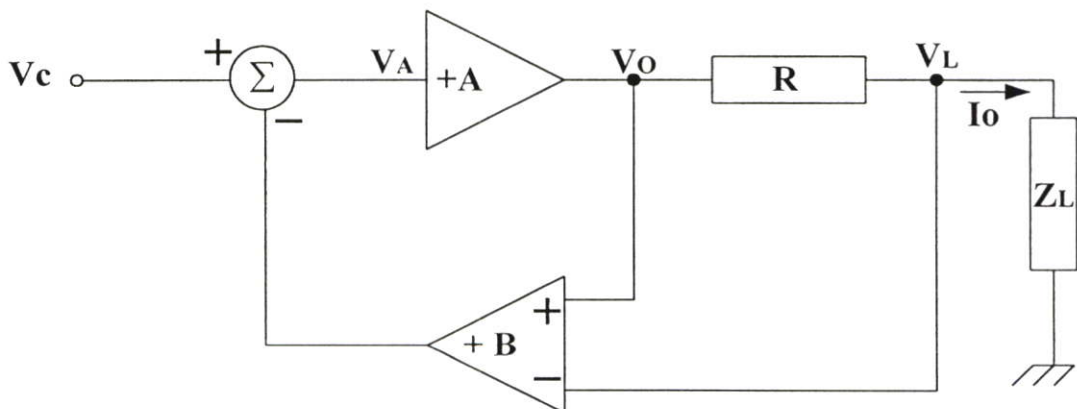
$$Z_S = \frac{R}{(1-A)} \quad (5.21)$$

เมื่อ  $Z_S$  = ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจร  
 $R$  = ค่าความต้านทาน  
 $A$  = อัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์

โดยในทางทฤษฎีแล้ววงจรจะให้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นอนันต์ (Infinite) ถ้าแอมพลิไฟเออร์มีอัตราขยายเท่ากับ 1 คงที่แน่นอน แต่ข้อจำกัดของวงจรก็คืออัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 หรือยูนิตีเกน (Unity gain) วงจรจึงจะให้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงสุด

### 5.2.3 ระบบควบคุมการจ่ายกระแสแบบลูปปิด (Closed loop current controlling system)

สำหรับวงจรจ่ายกระแสแบบลูปปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 วงจรจ่ายกระแสแบบลูปปิด (Close loop current controlling system)

จากวงจรที่แสดงดังรูปที่ 5.14 วงจรจ่ายกระแสให้กับโหลดโดยมีการป้อนกลับ(Feedback) แรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์ซึ่งต่ออนุกรมกับโหลด สิ่งสำคัญคืออินพุตทั้งคู่ของแอมพลิไฟเออร์ B จะต้องมียุติแอมป์สูงเพื่อป้องกันผลกระทบต่อรีซิสเตอร์ซึ่งต่ออนุกรมกับโหลด โดยค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$V_o = AV_c = A(V_c + B_D(V_L - V_o)) \quad (5.22)$$

$$V_o = \frac{A(V_c + B_D V_L)}{(1 + AB_D)} \quad (5.23)$$

$$V_L = I_L Z_L = V_o - I_L R = \frac{A(V_c + B_D V_L)}{(1 + AB_D)} - I_L R = \frac{A(V_c + B_D I_L Z_L)}{(1 + AB_D)} - I_L R \quad (5.24)$$

$$I_L = \frac{AV_c}{(Z_L + R)(1 + AB_D) - (AB_D Z_L)} = \frac{AV_c}{Z_L + (1 + AB_D)R} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial Z_L} = \frac{-AV_c}{(Z_L + (1 + AB_D)R)^2} = \frac{-I_L}{Z_L + (1 + AB_D)R} \quad (5.26)$$

จากสมการที่ 5.7 จะได้

$$Z_s = R(1 + AB_D) \quad (5.27)$$

เมื่อ  $I_L$  = กระแสที่ไหลผ่านโหลด

$V_c$  = แรงดันอินพุต

$Z_s$  = ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจร

$A$  = อัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์ A

$B_D$  = อัตราขยายดิฟเฟอเรนเชียล ( Differential gain)ของ แอมพลิไฟเออร์ B

$Z_L$  = ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

$R$  = ค่าความต้านทานของรีซิสเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับเอาต์พุตของแอมพลิไฟเออร์ A

ถ้า  $A \gg 1$  และ  $R$  มีค่าเท่ากับค่าแมกนิจูด ( Magnitude ) ของ  $Z_L$  เราจะสามารถประมาณสมการที่ (5.26) และ (5.27) ได้ดังสมการ (5.28) และ (5.29)

$$I_L = V_C / B_D R \quad (5.28)$$

$$Z_S = A B_D R \quad (5.29)$$

จากวงจรจะเห็นว่ามีความยุ่งยากไม่มากนักแต่สามารถให้ค่ากระแสที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามหากเราพิจารณาถึงค่าอัตราขยายคอมมอน โหมดของแอมพลิไฟเออร์ B ด้วยแล้ว เราจะหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรได้ดังสมการที่ (5.36)

$$V_O = A V_I = A \left( V_C + B_D (V_L - V_O) - \frac{B_C}{2} (V_L + V_O) \right) \quad (5.30)$$

$$V_O = \frac{A \left( V_C + \left( B_D - \frac{B_C}{2} \right) V_L \right)}{\left( 1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right) \right)} \quad (5.31)$$

$$V_L = I_L Z_L = V_O - I_L R = \frac{A \left( V_C + \left( B_D - \frac{B_C}{2} \right) V_L \right)}{\left( 1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right) \right)} - I_L R \quad (5.32)$$

$$I_L Z_L = \frac{A \left( V_C + \left( B_D - \frac{B_C}{2} \right) I_L Z_L \right)}{\left( 1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right) \right)} - I_L R \quad (5.33)$$

$$I_L = \frac{\frac{A V_C}{\left( 1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right) \right)}}{Z_L \left[ 1 - \frac{\left( B_D - \frac{B_C}{2} \right) A}{1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right)} \right] + R} = \frac{A V_C}{Z_L (1 + A B_C) + \left( 1 + A \left( B_D + \frac{B_C}{2} \right) \right) R} \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Z_L} = \frac{-AV_c(1+ABc)}{\left(Z_L(1+ABc) + \left(1 + A\left(B_D + \frac{B_C}{2}\right)\right)R\right)^2} = \frac{-IL(1+ABc)}{Z_L(1+ABc) + \left(1 + A\left(B_D + \frac{B_C}{2}\right)\right)R} \quad (5.35)$$

$$Z_S = \frac{\left(1 + A\left(B_D + \frac{B_C}{2}\right)\right)R}{(1+ABc)} \quad (5.36)$$

เมื่อ  $B_D =$  อัตราขยายคิฟเฟอเรนเชียลของออปแอมป์ B

$B_C =$  อัตราขยายคอมมอน โหมดของออปแอมป์ B

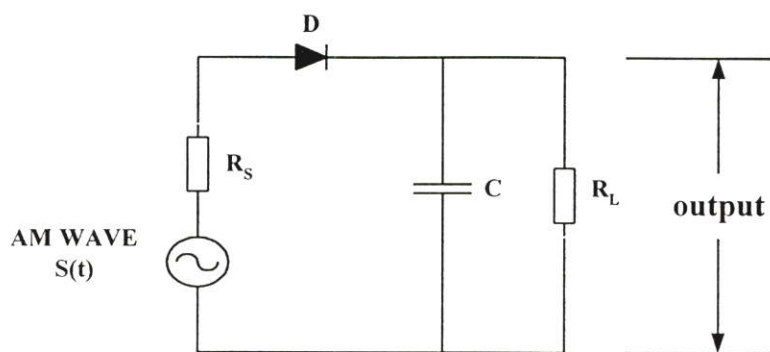
จากสมการที่ (5.36) จะเห็นว่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรจะไม่ลดลงตามอัตราขยายคอมมอนโหมดเมื่อ  $B_C$  มีค่าไม่เกิน  $1/A$  หรือน้อยกว่า ฉะนั้นเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรจะไม่ถูกจำกัดโดยค่าความถูกต้องของอัตราขยายที่เซตไว้แต่จะขึ้นอยู่กับคอมมอน โหมดรีเจกชันเรโซ (Common-mode rejection ratio) ของออปแอมป์ที่ใช้งาน ซึ่งจะถูกลimit โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ สำหรับข้อเสียของวงจรชนิดนี้คือในการใช้งานในสัญญาณไฟตรง (DC) ค่า CMRR ของออปแอมป์จะมีค่าสูงแต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่า CMRR ของออปแอมป์จะลดลงส่งผลให้ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง เพราะฉะนั้นในการใช้งานวงจรแบบนี้จะต้องพิจารณาค่า CMRR ที่ความถี่ที่ใช้งานด้วย

### 5.3 วงจรดีมอดูเลต (Demodulate Circuit)

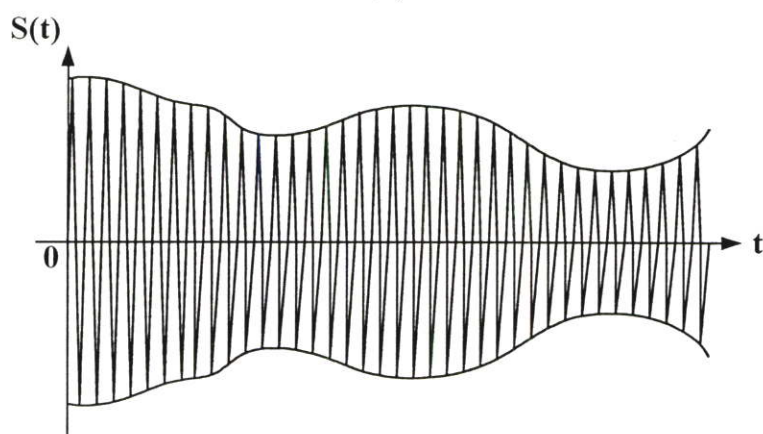
วงจรดีมอดูเลเตอร์ (DEMODULATOR) ทำหน้าที่ในการดีมอดูเลตสัญญาณไซน์ที่รับจากวงจรมอดูเลเตอร์และแปลงให้เป็นแรงดันคิซี เพื่อส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล โดยวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบต่างๆที่นิยมใช้ในระบบสร้างภาพตัดขวางความดันทานไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

#### 5.3.1 เอนVELOป ดีเทคเตอร์ (Envelope Detector)

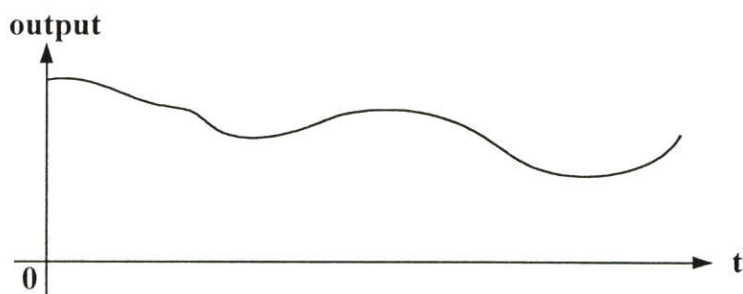
เอนVELOปดีเทคเตอร์เป็นการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอ็ม (AM Signal) แบบง่ายและยังให้ประสิทธิภาพในการดีมอดูเลตสัญญาณเอเอ็มแบบแบนด์แคบ (Narrow-band AM Wave) (ความถี่พาหะ(Carrier frequency)มีความถี่สูงเมื่อเทียบกับความถี่ของสัญญาณข่าวสารที่จะส่ง (Message band width)) ซึ่งจะต้องมีเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตน้อยกว่า 100 % โดยในทางอุดมคติแล้วเอนVELOปดีเทคเตอร์จะสามารถผลิตสัญญาณเอาท์พุทที่สัมพันธ์กับสัญญาณอินพุท ซึ่งในปัจจุบันยังคงมีการใช้งานดีเทคเตอร์ชนิดนี้ในเครื่องรับวิทยุเอเอ็มที่ผลิตขายเพื่อการค้า



(ก)



(ข)



(ค)

### รูปที่ 5.15 เอนเวโลปดีเทคเตอร์

- (ก) วงจรของเอนเวโลป ดีเทคเตอร์
- (ข) สัญญาณเอเอ็มที่อินพุทของวงจรเอนเวโลป ดีเทคเตอร์
- (ง) สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากวงจรเอนเวโลปดีเทคเตอร์

จากรูปที่ 5.15 แสดงลักษณะของวงจรตลอดจนสัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาต์พุทของวงจรเอนเวโลปดีเทคเตอร์ โดยการทำงานของวงจรเอนเวโลปดีเทคเตอร์จะมีดังนี้

ในช่วงที่สัญญาณช่วงบวก (Position half-cycle) ของสัญญาณอินพุตเข้ามาไดโอดจะได้รับการไบอัสตรง (Forward bias) ทำให้คาร์ปาซิเตอร์ทำการเก็บประจุอย่างรวดเร็วจนระดับแรงดันเท่ากับค่าสูงสุดของสัญญาณอินพุต (Peak value of input signal) แต่เมื่อสัญญาณอินพุตลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันที่คาร์ปาซิเตอร์เก็บประจุไว้ไดโอดจะถูกไบอัสกลับ (Reverse bias) และคาร์ปาซิเตอร์จะทำการคายประจุ (Discharges) อย่างช้าๆผ่านโหลดซึ่งเป็นรีซิสเตอร์ การคายประจุของคาร์ปาซิเตอร์จะดำเนินการไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีสัญญาณช่วงบวกเข้ามามากกว่าแรงดันที่ตกคร่อมคาร์ปาซิเตอร์อยู่ ซึ่งไดโอดจะนำกระแสและขบวนการต่างๆ ก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

สมมติว่าไดโอดที่ใช้เป็นไดโอดในอุดมคติ ซึ่งจะมีค่าความต้านทานภายในตัวเป็นศูนย์ในขณะที่ได้รับการไบอัสตรงและมีค่าความต้านทานในตัวเป็นอนันต์ในขณะที่ได้รับการไบอัสกลับ และสมมติให้สัญญาณเอเอ็มที่ป้อนเข้ามาถูกจ่ายโดยโวลต์เตจเซอร์สที่มีค่าความต้านทานภายในเป็น  $R_s$  เพราะฉะนั้นคาบเวลาในการเก็บประจุ (Charging times constant) จะต้องมีค่าน้อยกว่าคาบเวลาของสัญญาณคลื่นพาหะ หรือ  $1/f_c$  ดังสมการที่ (5.37)

$$R_s * C \leq 1/f_c \quad (5.37)$$

เนื่องจากคาร์ปาซิเตอร์จะต้องทำการเก็บประจุอย่างรวดเร็วให้ได้ค่าสูงสุดของสัญญาณอินพุต ในขณะที่ไดโอดนำกระแส และค่าคาบเวลาของ  $RL * C$  จะต้องเพียงพอที่จะทำให้คาร์ปาซิเตอร์คายประจุอย่างช้าๆ ผ่าน  $R_L$  ในระหว่างช่วงลบของสัญญาณอินพุต แต่ค่าคาบเวลาของ  $RL * C$  ก็จะต้องไม่นานเกินไป โดยค่าคาบเวลา  $RL * C$  ที่เหมาะสมจะเป็นดังสมการที่ (5.38)

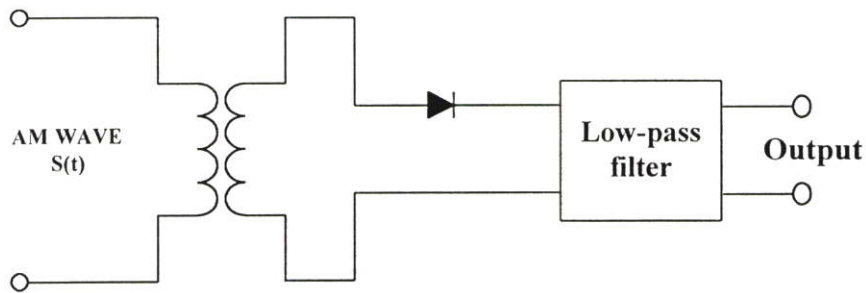
$$1/f_c \leq R_L * C \leq 1/W \quad (5.38)$$

- เมื่อ  $f_c$  = ความถี่พาหะ (Carrier frequency)  
 $W$  = แบนด์วิดส์ของสัญญาณข่าวสาร (Message bandwidth)  
 $RL$  = ค่าความต้านทานของโหลด  
 $C$  = ค่าคาร์ปาซิเตอร์ของตัวเก็บประจุ

สัญญาณเอาต์พุตของเอนเวโลปดีเทคเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าเอนเวโลปของสัญญาณเอเอ็มดังแสดงในรูป 5.15 (ข) และ 5.15 (ค) โดยค่าเอาต์พุตของเอนเวโลปดีเทคเตอร์จะมีค่าริปเปิล (Ripple) ที่ความถี่ของคลื่นพาหะ โดยเราสามารถกำจัดค่าริปเปิลนี้โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter)

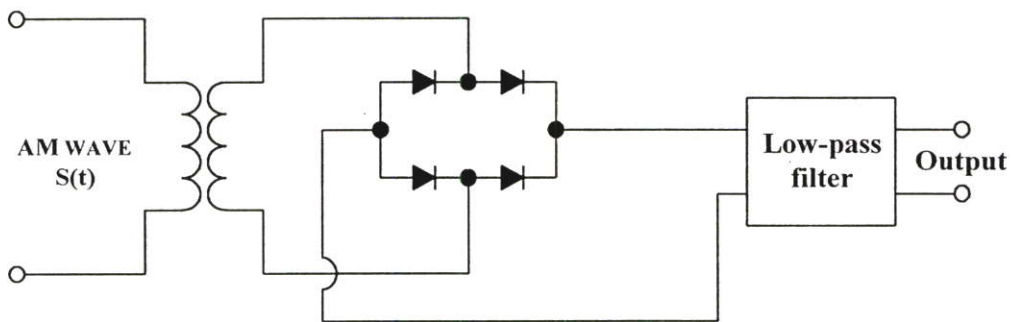
### 5.3.2 วงจรตีมอดูเลตโดยใช้วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ (AC-To-DC Converter)

เอซี-ทู-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ เป็นวิธีหนึ่งในการดีเทค (Detect) สัญญาณเอเอ็มโดยใช้ไดโอด เร็คติไฟเออร์และวงจรฟิลเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณไฟตรงที่เอาท์พุทสำหรับลักษณะของวงจร สามารถแสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาร์ฟเวฟ (Half-Wave AC-TO-DC Converter)

จากวงจรที่ 5.16 วงจรเนื่องจากวงจรเอซี-ทู-ดีซี เป็นแบบฮาร์ฟเวฟ (Half wave) จึงให้ค่า ริปเปิล (Ripple) ที่เอาท์พุทสูง สำหรับวงจรที่ให้ค่าสัญญาณเอาท์พุทที่ดีกว่าจะใช้วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลเวฟ (Full wave) ดังแสดงในรูปที่ 5.17

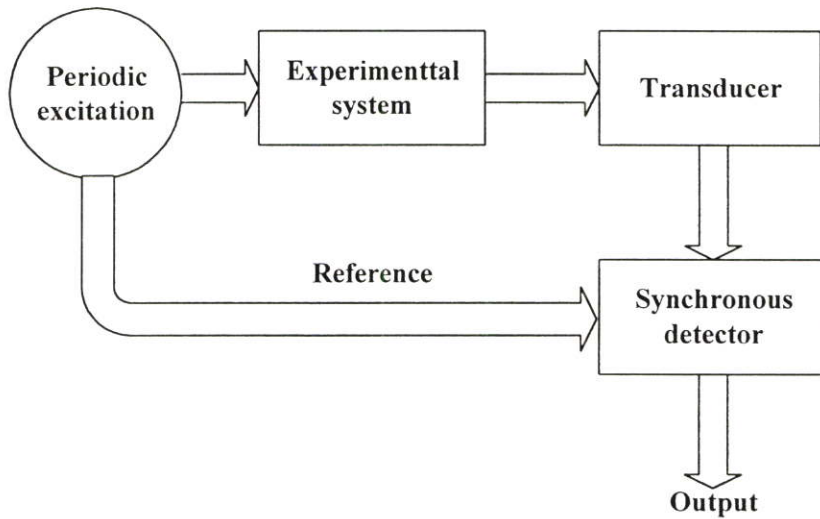


รูปที่ 5.17 วงจรเอซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ชนิดฟูลเวฟ (Full wave AC-To-DC Converter)

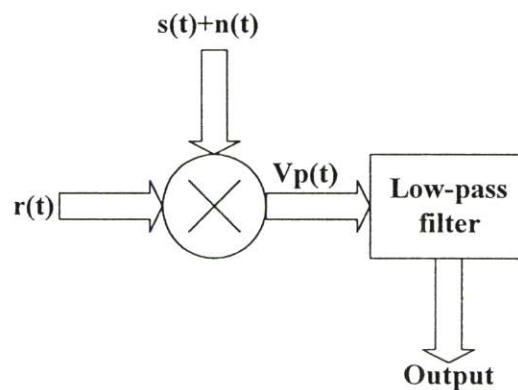
การตีมอดูเลต โดยใช้ไดโอดเร็คติไฟเออร์นี้ไม่เหมาะกับการตีมอดูเลตสัญญาณขนาดเล็ก (ระดับสัญญาณมีค่าน้อยกว่า 0.6 โวลต์) และยังมีค่าความถูกต้องของสัญญาณที่ได้จากการตีมอดูเลตต่ำจึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้งานในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า

### 5.3.3 ซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์และเฟสเซนซิทีฟดีเทคเตอร์ (Synchronous Detector and Phase Sensitive Detector : PSD)

เทคนิคการดีมอดูเลต (Demodulation) [14] แบบนี้จะต้องใช้สัญญาณอ้างอิงที่คงที่และต้องซิงโครไนส์ (Synchronize) กับสัญญาณที่ต้องการดีมอดูเลต โดยลักษณะของระบบซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์สามารถแสดงดังรูปที่ 5.18



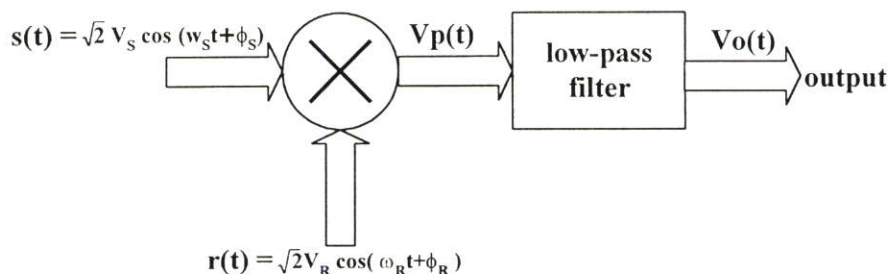
รูปที่ 5.18 ระบบซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์ (Synchronous Detector)



รูปที่ 5.19 สัญญาณในระบบซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์ (Synchronous Detector)

จากรูปที่ 5.19  $s(t)$  เป็นสัญญาณที่ต้องการนำมาดีมอดูเลตซึ่งมีสัญญาณรบกวน  $n(t)$  รวมอยู่ด้วยถูกส่งเข้าไปคูณกับสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  ผลคูณของสัญญาณจะถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ (Lowpass filter) เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปของแรงดันไฟตรง (DC) ในทางอุดมคติแล้วสัญญาณเอาต์พุตซึ่งได้จากผลคูณระหว่างสัญญาณ  $s(t)$  กับสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  ผ่านวงจรกรอง

ความถี่ต่ำจะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรง (DC) ที่มีขนาด (Amplitude) เปลี่ยนไปตามลักษณะความสัมพันธ์ของขนาดและเฟสระหว่างสัญญาณ  $s(t)$  กับสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากผลคูณระหว่างสัญญาณรบกวน  $n(t)$  กับสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  จะเป็นศูนย์เสมอ สำหรับการดำเนินงานของวงจรซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 วงจรซิงโครไนส์ดีเทคเตอร์ที่มีสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณไซน์

จากรูป 5.20 ผลคูณของสัญญาณ ( $V_p(t)$ ) ระหว่างสัญญาณอินพุต  $s(t)$  และสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.39)

$$V_p(t) = V_s V_R \cos[(W_s + W_R)t + \phi_s + \phi_R] + V_s V_R \cos[(W_s - W_R)t + \phi_s - \phi_R] \quad (5.39)$$

จากสมการที่ 5.39 สมมติว่าที่ส่วนของวงจรรองความถี่ต่ำคัทออฟ (cut off) ที่ความถี่น้อยกว่า  $W_R$  มากๆ ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบของความถี่ที่รวมกันถูกจำกัดออกไปจากเอาต์พุตดังสมการ (5.40)

$$V_p(t) = V_s V_R \cos[(W_s - W_R)t + \phi_s - \phi_R] \quad (5.40)$$

จากสมการที่ (5.40) ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับขนาดของความถี่ที่ต่างกัน คือ  $\Delta W = |W_s - W_R|$  ซึ่งถ้าค่า  $\Delta W$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแบนด์วิธ (Band Width) ของวงจรรองความถี่ต่ำเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปไฟสลับที่มีความถี่เท่ากับ  $\Delta W$  โดยค่าของระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรมันจะขึ้นอยู่กับผลการตอบสนองความถี่ (Frequency response) ของวงจรรองความถี่ต่ำ ดังสมการที่ 5.41

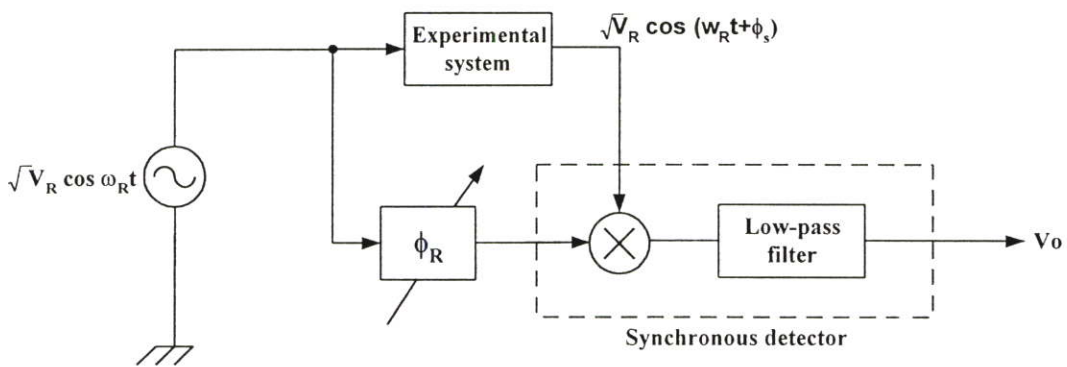
$$|V_o| = V_s V_R A_L(\Delta W) \quad (5.41)$$

$$A_L(W) = |H_L(jW)| \quad (5.42)$$

จากสมการที่ (5.41) และ (5.42) หาก  $A_L(\omega)$  คัทออฟ (cut off) ที่ความถี่ต่ำกว่า  $\omega_R$  มาก ๆ เราจะพบว่าระบบสามารถรับได้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่อ้างอิงมาก ๆ ซึ่งให้ผลเหมือนกับวงจรนอร์ทฟิลเตอร์ (North filter) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองความถี่เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่อ้างอิงเท่านั้น

### 5.3.4 การดีมอดูเลตด้วยสัญญาณซิงโครนัส (Demodulation with a Synchronous Reference)

ในการใช้งานโดยทั่วไปสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงจะได้มาจากแหล่งจ่ายเดียวกัน ซึ่งรูปแบบของวงจรจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 วงจรซิงโครนัสดีเทคเตอร์ที่ใช้ในงานจริง

จากรูปที่ 5.21 สัญญาณจากวงจรออสซิลเลเตอร์ผลิตความถี่  $\omega_R$  ถูกใช้เป็นสัญญาณในการทดลองและใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการดีมอดูเลตสัญญาณที่เอาท์พุท โดยสัญญาณที่ออสซิลเลเตอร์เมื่อผ่านระบบจะเลื่อนเฟสไปเป็นมุม  $\phi_s$  และสัญญาณอ้างอิงสามารถปรับเฟส  $\phi_R$  ได้ ดังนั้นเราจะสามารถหาค่าเอาท์พุทของวงจรที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำโดยให้  $\omega_s = \omega_R$  ดังสมการที่ (5.43)

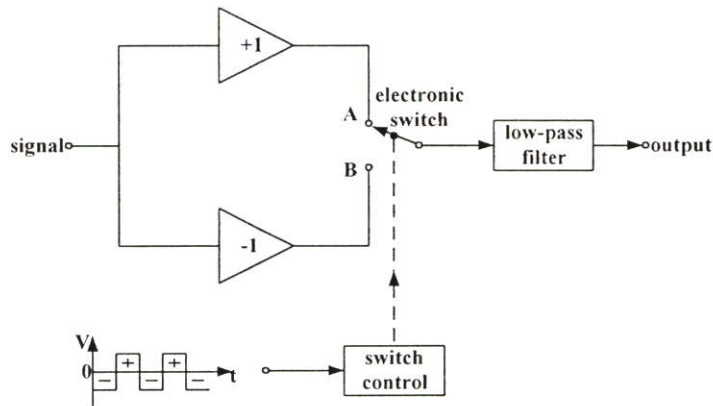
$$V_o = K_R V_s \cos \phi \quad (5.43)$$

$$\phi = \phi_s - \phi_R, K_R = V_s A_L(0) \quad (5.44)$$

ปกติค่าขนาดของสัญญาณอ้างอิงจะคงที่ ดังนั้น  $K_R$  จะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นระดับสัญญาณของเอาท์พุทจะขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณอินพุทที่ได้จากระบบและขนาดของความต่างเฟสระหว่างเฟสของสัญญาณอินพุทที่ได้จากระบบและเฟสของสัญญาณอ้างอิง

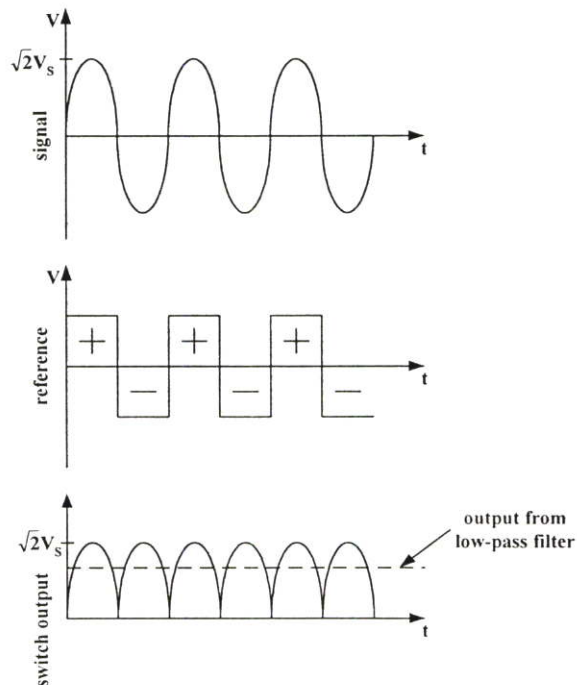
### 5.3.5 เฟสเซนซิติฟดีเทคเตอร์ (Phase Sensitive Detector)

การทำงานของเฟสเซนซิติฟดีเทคเตอร์จะมีลักษณะเป็นสวิตช์ซึ่ง(Switching) 2 จังหวะ ซึ่งถูกควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สัญญาณอ้างอิงในการควบคุมสวิตช์จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างจุด A และ B ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายระหว่าง +1 และ -1 ตามสัญญาณอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 5.22

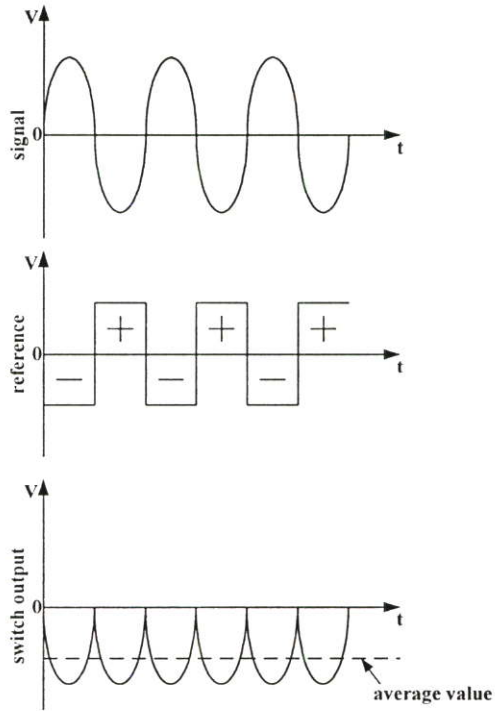


รูปที่ 5.22 การทำงานพื้นฐานของเฟสเซนซิติฟดีเทคเตอร์ (PSD)

สำหรับลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเฟสเซนซิติฟดีเทคเตอร์สามารถแสดงดังรูปที่ 5.23 ถึง 5.26

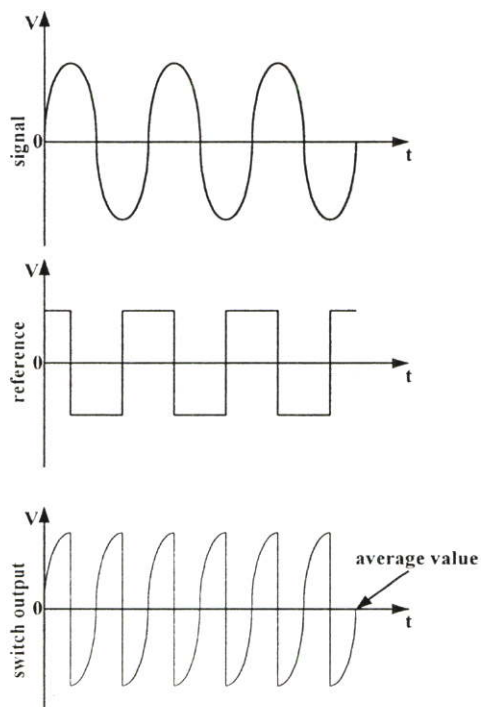


รูปที่ 5.23 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุต และสัญญาณอ้างอิงมีเฟสเหมือนกัน



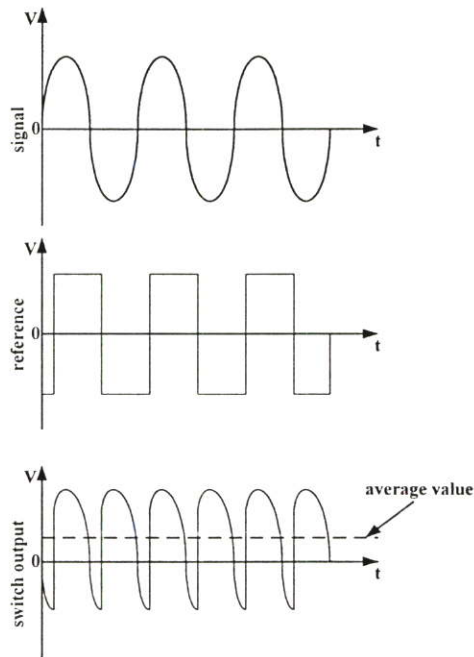
รูปที่ 5.24 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน

180 องศา



รูปที่ 5.25 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน

90 องศา



รูปที่ 5.26 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน  
Arbitrary phase

จากลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเฟสเซนซิติฟิคเทคเตอร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.23 สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณเอาต์พุตก่อนเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปเต็มคลื่น (Full wave) สัญญาณที่ได้นี้จะส่งผ่านไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำซึ่งเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำจะมีลักษณะเป็นแรงดันไฟตรงที่มีค่าริปเปิล (Ripple) เล็กน้อย โดยระดับของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าระดับสัญญาณของสัญญาณอินพุต

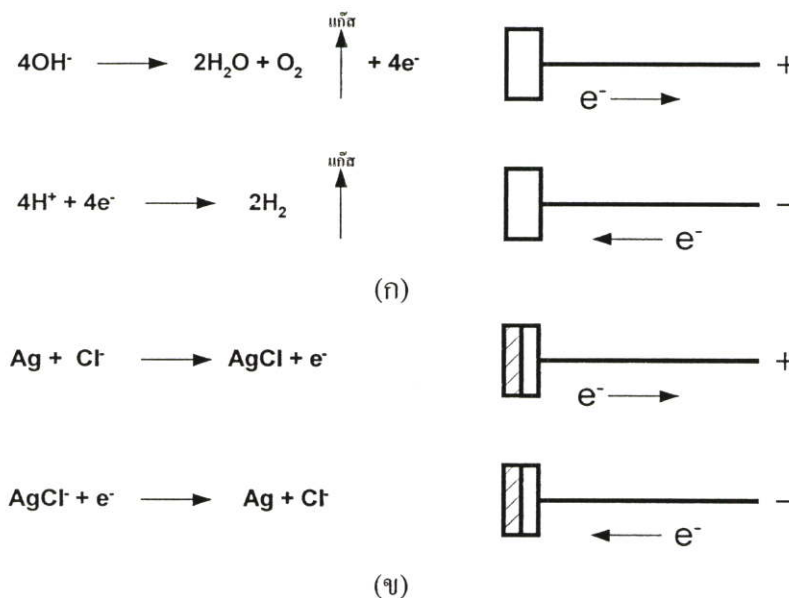
แต่สำหรับในทางปฏิบัติแล้วสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงจะมาถึงไม่พร้อมกันทำให้เฟสของสัญญาณทั้งสองไม่ตรงกันซึ่งในรูปที่ 5.24 แสดงผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร PSD เมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีเฟสต่างกัน 180 องศา ซึ่งจะได้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟตรง (DC) ที่มีค่าเป็นลบ สำหรับในรูปที่ 5.25 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งจะได้เอาต์พุตที่ได้จากการสวิตช์มีลักษณะเป็นสองขั้วและให้ค่าเฉลี่ย (Average) ของสัญญาณเอาต์พุตของ PSD เป็นศูนย์ ส่วนในรูปที่ 5.26 สัญญาณเอาต์พุตของ PSD จะมีระดับสัญญาณเปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณอินพุตและขนาดความแตกต่างระหว่างเฟสของสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิง

## 5.4 อิเล็กโทรด (ELECTRODE)

อิเล็กโทรด คือ ทรานสดิวเซอร์ (transducer) สำหรับทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำให้เป็นไอออนิกเคอร์เรนต์ (Ionic Current) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ตัวอย่างเช่น เนื้อเยื่อในร่างกายมนุษย์ เป็นต้น สำหรับค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดกับเนื้อเยื่อหรือค่าคอนแทกอิมพีแดนซ์ (Contact impedance) จะต้องมีค่าน้อยๆ โดยเราจะต้องเลือกขนาดและชนิดของอิเล็กโทรดตลอดจนวิธีการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดและเนื้อเยื่อให้เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อลดสัญญาณรบกวนให้มีย่าน้อยที่สุด ซึ่งเราจะทำการพิจารณาเป็นส่วนตัวๆ ได้ดังนี้

### 5.4.1 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (MATERIALS)

อิเล็กโทรด[15] [16] ในการใช้งานส่วนใหญ่จะถูกสร้างจากโลหะเนื่องจากมีความสะดวกในการเชื่อมต่อสายตัวนำจากเครื่องมือวัดเข้ากับอิเล็กโทรด แต่สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้ อิเล็กโทรดสำหรับใช้ในระบบเก็บข้อมูลของเครื่องสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าก็คือ ถ้าใช้โลหะต่างๆ ไปมาทำอิเล็กโทรดจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงดังรูปที่ 5.27



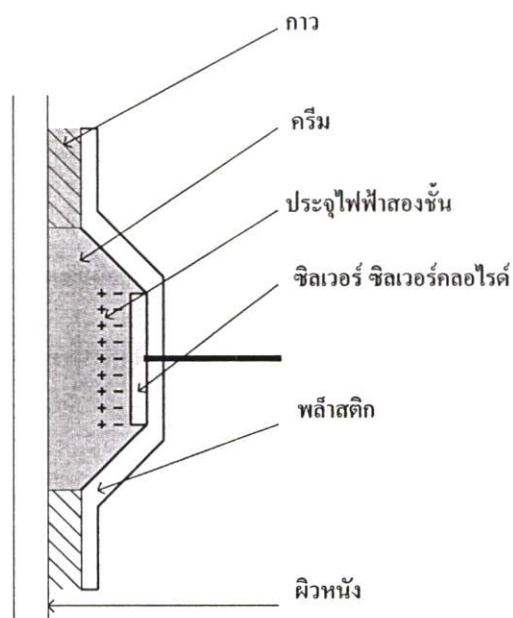
รูปที่ 5.27 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อผิวหน้ากับอิเล็กโทรด

(ก) อิเล็กโทรดชนิดที่ไม่ได้เคลือบซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

(ข) อิเล็กโทรดชนิดที่เคลือบซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

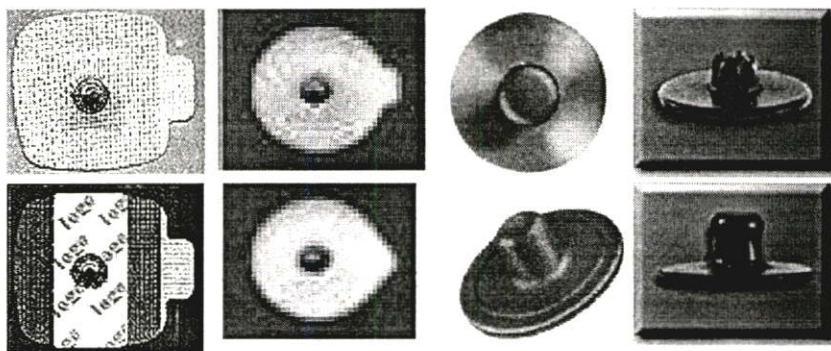
จากรูปที่ 5.27 ก ที่ขั้วหนึ่งของอิเล็กโทรดหรือทั้งสองขั้วจะเกิดฟองก๊าซเนื่องจากขบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) และเป็นผลทำให้การทำหน้าที่ของอิเล็กโทรดไม่เสถียรทางไฟฟ้า

การไม่เสถียรทางไฟฟ้านี้ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนและเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อของสารละลายกับอิเล็กโทรดทำให้ค่าแรงดันที่วัดได้มีค่าผิดพลาด ซึ่งปัญหานี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้อิเล็กโทรดชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver-Silver Chloride) ดังรูปที่ 5.27 ข อิเล็กโทรดชนิดนี้สามารถทำขึ้นได้ง่ายโดยการเคลือบซิลเวอร์คลอไรด์ลงบนอิเล็กโทรดที่เป็นเงินบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านอิเล็กโทรดชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ได้อย่างรวดเร็วมาก โดยซิลเวอร์คลอไรด์ที่เคลือบบนอิเล็กโทรดในขณะที่ใช้งานที่ขั้วหนึ่งจะบางลง ส่วนอีกขั้วหนึ่งจะเคลือบหนาขึ้นโดยไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น และไม่มีสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รอยต่อของสารละลายกับอิเล็กโทรด ด้วยเหตุผลนี้อิเล็กโทรดชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์จึงเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับระบบเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า สำหรับในการใช้งานจริงนั้นอิเล็กโทรดจะถูกติดอยู่ห่างออกจากผิวหนังเพื่อป้องกันการรบกวนของชั้นประจุไฟฟ้าเมื่อผิวหนังเคลื่อนไหวโดยช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวหนังจะเติมด้วยครีมที่นำกระแสไฟฟ้าได้จนเต็ม



รูปที่ 5.28 อิเล็กโทรดชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ

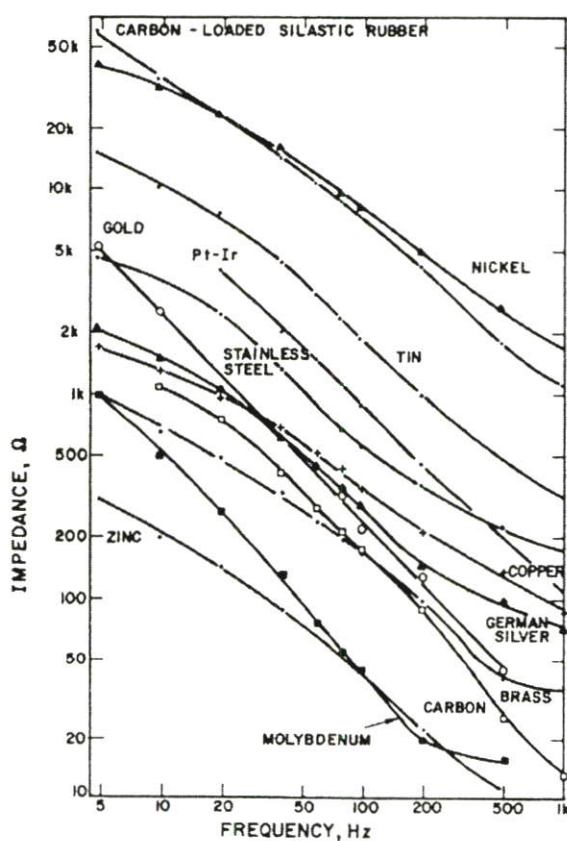
จากรูปที่ 5.28 ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับอิเล็กโทรดจะเกิดขึ้นของประจุไฟฟ้าบวกและลบ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนจากชั้นของประจุไฟฟ้าทั้งสองเมื่อร่างกายของผู้ถูกวัดเคลื่อนไหว ดังนั้นอิเล็กโทรดโลหะจึงอยู่แยกห่างออกจากผิวหนังและช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวหนังจะถูกเติมด้วยครีมที่เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยเปลือกนอกที่เป็นพลาสติกจะติดกับผิวหนังด้วยแผ่นกาว



รูปที่ 5.29 ตัวอย่างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในทางการแพทย์

#### 5.4.2 ผลของความถี่ที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์

ในการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุอิเล็กทรอนิกส์จะถูกใช้งานในช่วงความถี่ประมาณ 12-100 กิโลเฮิร์ต ซึ่งในช่วงความถี่ต่างๆนี้ โลหะที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกันไปตามความถี่ของสัญญาณที่ใช้ โดยเราสามารถแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากโลหะต่างๆ ต่อความถี่ของสัญญาณที่ใช้งาน [10] ได้ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 ค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ขนาด  $1 \text{ cm}^2$  ที่ทำจากวัสดุต่างๆ ที่ความถี่ต่างๆ [10]

จากรูป 2.11 จะเห็นว่านิเกิล (Nickel) และดีบุก (Tin) จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแผ่นอิเล็กโทรดแต่สำหรับเงิน (Silver) จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเหมาะแก่การนำมาทำแผ่นอิเล็กโทรด

### 5.4.3 ขนาด (Size) ของอิเล็กโทรด

ค่าความนำของอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นเป็นลิเนียร์กับขนาดของพื้นที่ผิวของแผ่นอิเล็กโทรด โดยเมื่อเรากำหนดให้ค่าความนำของแผ่นอิเล็กโทรดในหน่วยของซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{Scm}^{-2}$ ) เราสามารถหาค่าความนำของแผ่นอิเล็กโทรดได้ดังสมการที่ (5.45)

$$Y (\text{อิเล็กโทรด}) = Y (\text{เนื้อสาร}) \times A (\text{พื้นที่ของอิเล็กโทรด}) \quad (5.45)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Y (\text{อิเล็กโทรด}) &= \text{ค่าความนำของแผ่นอิเล็กโทรด (S)} \\ Y (\text{เนื้อสาร}) &= \text{ค่าความนำของโลหะที่ใช้ทำแผ่นอิเล็กโทรด (Scm}^{-2}\text{)} \\ A &= \text{พื้นที่ของอิเล็กโทรด (cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 5.44 เราจะเห็นว่าเมื่อพื้นที่ของแผ่นอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นค่าความนำของแผ่นอิเล็กโทรดก็จะเพิ่มขึ้นตาม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของแผ่นอิเล็กโทรดจะต้องคำนึงถึงขนาดของวัตถุที่จะทำการวัดและจำนวนของอิเล็กโทรดที่จะใช้ด้วย เนื่องจากการเพิ่มขนาดของแผ่นอิเล็กโทรดจะทำให้ดีดอิเล็กโทรดได้น้อยลง

## 5.5 ความปลอดภัยทางไฟฟ้า (Electrical Safety)

สำหรับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในทางการแพทย์จะเคร่งครัดในเรื่องกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าก็เช่นเดียวกัน โดยในการกำหนดหลักการด้านความปลอดภัยของระบบจะกำหนดตามองค์กรต่างๆ ดังนี้

- National Fire Protection Association (NFPA)
- Association for the Advance of Medical Instrumentation
- Underwriters Laboratories (UL)
- International Electrotechnical Commission (IEC)

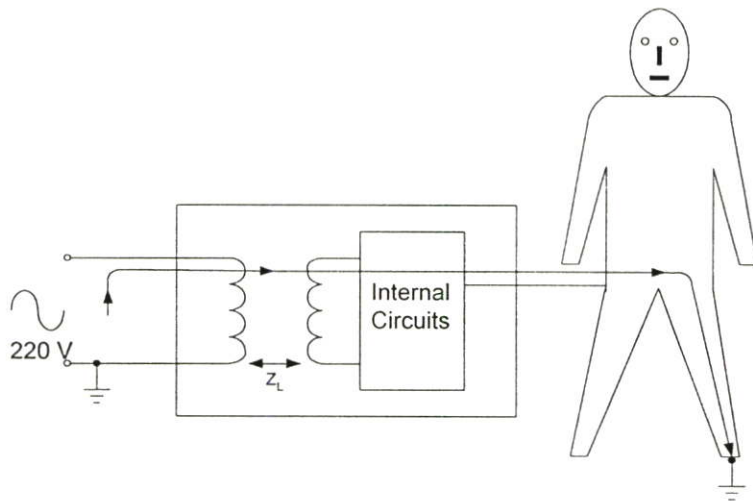
โดยองค์กรทั้งหมดจะมีมาตรฐานในการพิจารณาที่คล้ายกันถึงแม้ว่าจะมีข้อกำหนดกำหนดบางอย่างแตกต่างกันไปดังนี้

### 5.5.1 ประเภทของกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำที่ต่อกับร่างกาย

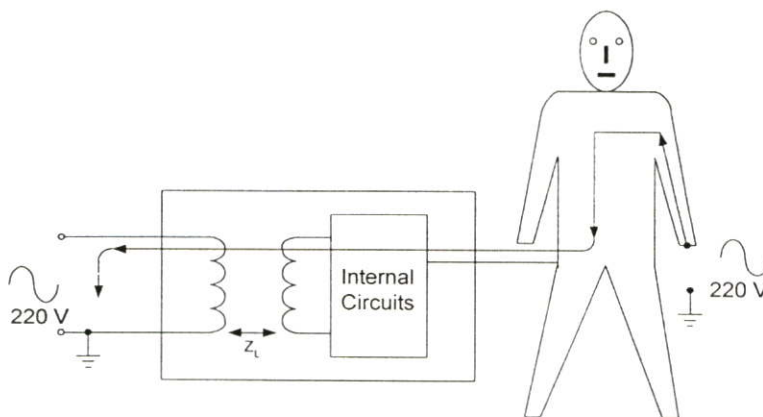
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ในระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้ามีอยู่ 2 ประเภทคือ กระแสที่ใช้ในระบบซึ่งประกอบด้วยกระแสรูปไซน์ความถี่ 10-100 kHz ที่ถูกจ่ายโดยเคอร์เรนท์ซอร์จและกระแสรั่วไหลจากตัวนำจากแหล่งจ่ายไฟซึ่งสามารถแบ่งโดยหน่วยงาน National Fire Protection Association (NFPA) [10] ได้เป็น 3 ประเภทคือ

- กระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลงกราวด์ (Patient Lead to ground)
- กระแสสลับที่ผ่านไอโซเลชันที่เป็นอันตราย (AC isolation (risk) current)
- กระแสที่ไหลระหว่างขั้วของอิเล็กโทรดที่ต่อกับร่างกายผู้ถูกวัด (Leakage current between patient Leads)

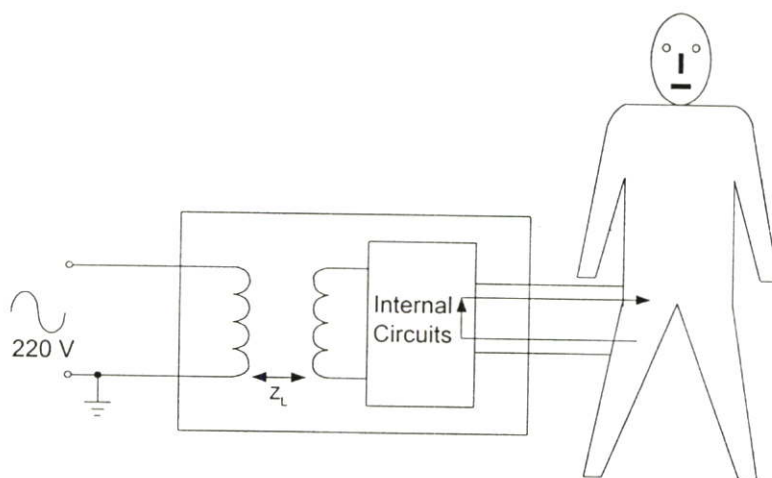
โดยลักษณะของกระแสรั่วไหลแต่ละแบบสามารถแสดงดังรูปที่ 5.31 ,5.32 และรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.31 กระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลงกราวด์



รูปที่ 5.32 กระแสสลับที่ผ่านไอโซเลชันที่เป็นอันตรายต่อร่างกายผู้ถูกวัด



รูปที่ 5.33 กระแสที่ไหลระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อกับร่างกายผู้ป่วย

จากรูปที่ 5.31 จะเห็นว่าหากร่างกายของผู้ป่วยยืนอยู่บนพื้นกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านร่างกายของผู้ป่วยลงสู่กราวด์ได้ แต่ถ้าค่าลิกเกอิมพีแดนซ์ (Leakage Impedance :  $Z_L$ ) ระหว่างตัวนำที่ต่อกับผู้ป่วย (Patient-connected circuitry) และตัวนำที่ต่อกับไฟเลี้ยงของระบบ (220) มีค่าสูงก็จะทำให้ค่ากระแสรั่วไหล (Leakage Current) มีค่าน้อยลง สำหรับในรูปที่ 5.32 จะเห็นว่าถ้าร่างกายของผู้ป่วยสัมผัสกับไฟ 220 V กระแสไฟฟ้าสามารถไหลจากสายไฟ 220 V ผ่านร่างกายของผู้ป่วยและลิกเกอิมพีแดนซ์  $Z_L$  ลงกราวด์ที่กล่องหรือตัวถัง (Case) ของตัวเครื่องได้ เพราะฉะนั้นในการป้องกันอันตรายจะต้องให้ค่าลิกเกอิมพีแดนซ์  $Z_L$  มีค่าสูงเพื่อลดขนาดของกระแสรั่วไหลไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ป่วย ส่วนรูปที่ 5.33 เป็นรูปแสดงกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของผู้ป่วยจากคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการจ่ายกระแสและวัดแรงดัน

สำหรับค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่ยอมให้ผ่านร่างกายได้ในแต่ละประเภทตามข้อกำหนดของแต่ละองค์กรสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

จากข้อกำหนดดังตารางที่ 5.1 เครื่องมือทางการแพทย์ทุกชนิดจะต้องออกแบบให้มีค่ากระแสรั่วไหลที่ผ่านร่างกายผู้ป่วยต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดยอุปกรณ์ที่จะใช้ทางการแพทย์จะต้องผ่านการทดสอบภายใต้ข้อกำหนดของสมาคมต่างๆ ดังที่กล่าวมาก่อนผลิตจำหน่ายให้แก่แพทย์ผู้ใช้

**ตารางที่ 5.1** ค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดที่ยอมให้ผ่านร่างกายได้ในแต่ละประเภทตามข้อกำหนดแต่ละองค์กร

Type of current	NFPA	AAMI UL <sup>a</sup>	IEC
Leakage figure 5.31	Lead-to-ground leakage 10(100)	Patient-Patient source connection 10(50)	Patient leakage 10(100)
Leakage figure 5.32	AC isolation or risk 10 <sup>b</sup> (N/A)	Patient-Patient sink connection 10 <sup>b</sup> (N/A)	Patient leakage 10(N/A)
Leakage figure 5.33	Leakage between leads 10(50)	Patient-Patient source connection 10(50)	Patient auxiliary 10(100)
Injected figure 5.33	Leakage between leads 10(50)	Patient-Patient source connection 10(50)	Patient auxiliary 10(100)

<sup>a</sup> Multiply all the UL values by 1.4 for DC quantities.

<sup>b</sup> This value is the maximal limit at the input terminals of the device . When there is a connection cable between the instrument and the patient , the current at the patient end of the connection may be up to 20  $\mu$ A to allow for some leakage to the cable shield.

### 5.5.2 การป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า

เนื่องจากระบบสร้างตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุต้องมีเครื่องคอมพิวเตอร์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการจ่ายกระแสและวัดแรงดันซึ่งเชื่อมต่อกับร่างกายของผู้ถูกวัดโดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันกระแสรั่วไหลประเภทต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นซึ่งรายละเอียดของการป้องกันกระแสรั่วไหลประเภทต่างๆ มีดังนี้

#### 5.5.2.1 การป้องกันกระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลงกราวด์และกระแสสลับที่ผ่านไอโซเลชันที่เป็นอันตราย

เมื่อเราต่ออิเล็กทรอนิกส์ของวงจรจ่ายกระแสและวงจรวัดแรงดันเข้ากับร่างกายของผู้ถูกวัดที่มีค่าความต้านทานน้อย ซึ่งในรูปแบบนี้ดูป (Loop) ของกระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายผู้ถูกวัดลงกราวด์จะประกอบด้วยไลน์โวลเตจ (Line Voltage) ต่ออนุกรมอยู่กับ ZL

ด้วยเหตุนี้ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่ต้องการสำหรับไอโซเลชัน (Isolation) ระหว่างวงจรหรือเครื่องคอมพิวเตอร์กับกราวด์ของโลก (Earth ground) จะประมาณได้ดังสมการ

$$Z_L = V_L / 10\mu A \quad (5.45)$$

เมื่อ  $Z_L$  = ลีคเกอิมพีแดนซ์ (Leakage Impedance)

$V_L$  = ไลน์โวลเตจ (Line Voltage)

\*ในกรณีที่เครื่องมือทางการแพทย์ถูกใช้ใน USA ซึ่งค่าไลน์โวลเตจเท่ากับ 120 Vrms 60 Hz เพราะฉะนั้นค่าลีคเกอิมพีแดนซ์ต่ำสุด ( $Z_L(\text{minimal})$ ) =  $120/10\mu A = 12 M\Omega$

\*ในกรณีที่เครื่องมือทางการแพทย์ถูกใช้ในยุโรปหรือประเทศไทยซึ่งมีค่าไลน์โวลเตจเท่ากับ 220Vrms 50 Hz เพราะฉะนั้นค่าลีคเกอิมพีแดนซ์ต่ำสุด ( $Z_L(\text{minimal})$ ) =  $220/10\mu A = 22 M\Omega$

นอกจากนี้ด้วยเหตุที่ลีคเกอิมพีแดนซ์ ส่วนใหญ่เป็นค่าคาปาซิทีฟ (Capacitive) ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าลีคเกอิมพีแดนซ์ (Leakage Capacitance : CL) ซึ่งเป็นค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างสองด้านของไอโซเลเตอร์ (Isolator) ไม่ให้เกิน 221 pF สำหรับเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้ใน USA และไม่เกิน 133 pF สำหรับเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้ในยุโรปและไทย เพราะฉะนั้นในการออกแบบวงจรในการป้องกันกระแสรั่วไหลจากวงจรภายนอกผ่านร่างกายของผู้ถูกวัดลงกราวด์โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นไอโซเลชันทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Isolation transformers), ออปโตไอโซเลเตอร์ (Optoisolators) หรือ ดีซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) เป็นต้น จะต้องเลือกใช้ อุปกรณ์ที่มีค่า  $Z_L$  และ CL ตามที่กำหนดทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยของผู้ถูกวัด

### 5.5.2.2 การป้องกันกระแสรั่วไหลระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อกับร่างกายของผู้ถูกวัดขณะใช้งาน

เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าเป็นกระแสสลับความถี่ในช่วง 10-100 กิโลเฮิร์ต ซึ่งตามข้อกำหนดทางการแพทย์ได้กำหนดไว้ว่า “การใช้กระแสสลับทางการแพทย์จะต้องมีขนาดไม่เกิน 10 ไมโครแอมป์ (RMS) คูณด้วยความถี่ของกระแสสลับที่ใช้ในหน่วยกิโลเฮิร์ต ในกรณีที่กระแสสลับนั้นมีการไหลผ่านหัวใจของผู้ถูกวัด และไม่เกิน 100 ไมโครแอมป์ (RMS) คูณด้วยความถี่ของกระแสสลับที่ใช้ในหน่วยกิโลเฮิร์ต สำหรับกรณีที่กระแสสลับนั้นไม่มีการไหลผ่านหัวใจ” ดังนั้นสำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้งานที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต ดังนั้นค่ากระแสที่ปลอดภัยสำหรับจ่ายให้กับร่างกายผู้ถูกวัดสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ค่ากระแสที่ปลอดภัย (มีการไหลผ่านหัวใจ)} = 10\mu\text{Arms} \times 100\text{KHz} = 1 \text{ mArms}$$

$$\text{ค่ากระแสที่ปลอดภัย (ไม่มีการไหลผ่านหัวใจ)} = 100\mu\text{Arms} \times 100\text{KHz} = 10 \text{ mArms}$$

ดังนั้นในการออกแบบวงจรจำกัดกระแสที่ใช้งานจะต้องจำกัดกระแสที่จ่ายให้  
 แก่แต่ละอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกิน 1 mArms (ในกรณีกระแสสลับที่ใช้มีการไหลผ่านหัวใจสำหรับความถี่  
 ใช้งาน 100 กิโลเฮิร์ต) และไม่เกิน 10 mArms (ในกรณีที่ไม่มีกระแสสลับไหลผ่านหัวใจสำหรับ  
 ความถี่ใช้งาน 100 กิโลเฮิร์ต)

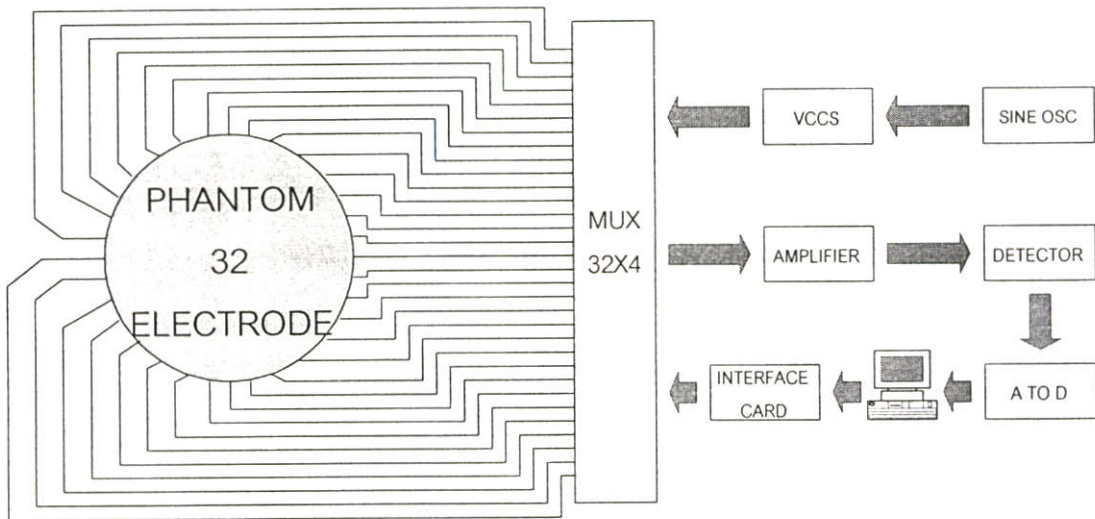
## บทที่ 6

# ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า แบบ 32 อิเล็กโทรด

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าขนาด 32 อิเล็กโทรด (32 Electrode Data Collection System) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ขนาด 32x32 พร้อมทั้งจะนำไปคำนวณโดยอัลกอริทึม ในการสร้างภาพตัดขวางด้านทานไฟฟ้าต่อไป สำหรับรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

### 6.1 โครงสร้างของระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรด

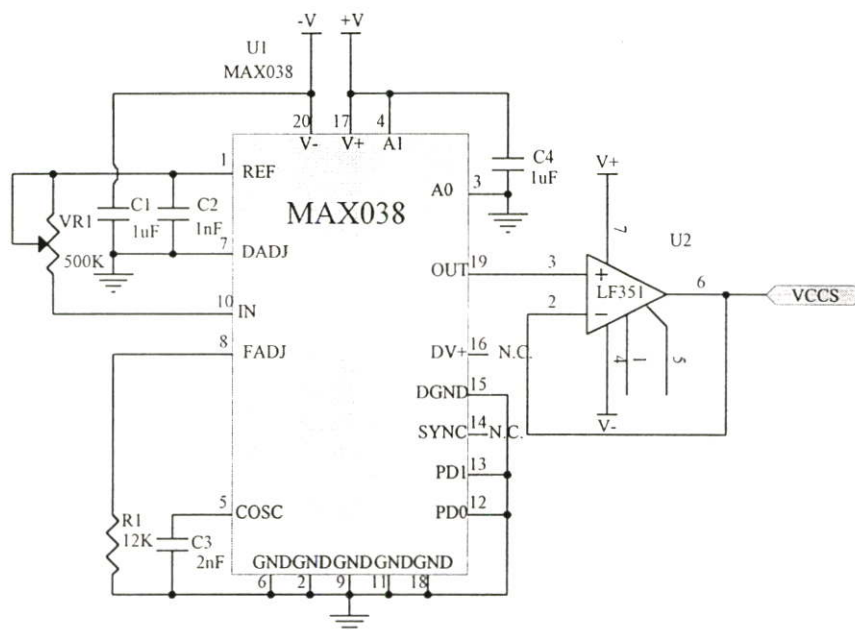
ระบบเก็บข้อมูลเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้ง 32 อิเล็กโทรดตลอดจนบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เก็บลงไฟล์ โดยระบบเก็บข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางแบบ 32 อิเล็กโทรด

### 6.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

วงจรนี้เป็นวงจรสร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตเพื่อป้อนให้กับวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source) โดยลักษณะของวงจรสร้างสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

จากวงจรในรูป 6.2 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 (ขา3) และ ขา A1 (ขา4) ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี 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 6.2 ค่าความถี่ของวงจรควบคุมโดย VR1 และ C3 โดยความถี่ของเอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณจากสมการที่ (6.1)

$$F_o = V_{in} / [R_{in} \times C_F] \quad (6.1)$$

จากวงจรดังรูปที่ 2  $C_F = C_3$ ,  $V_{in} = 5 \text{ V}$ ,  $R_{in} = VR_1$  ต้องการความถี่เอาต์พุตสูงสุด 200 กิโลเฮิร์ต  $\therefore$  จากสมการที่ (6.1) จะได้

$$200 \times 10^3 = 5 / [VR_1 \times C_3] \quad (6.2)$$

$$VR_1 \times C_3 = 5 / 200 \times 10^3 = 25 \times 10^{-6} \quad (6.3)$$

แต่เนื่องจากค่าตัวชี้ท (Datasheet) กำหนด  $VR_1$  ครอบอยู่ในช่วง  $12.5 \text{ K}\Omega$ - $500 \text{ K}\Omega$   $\therefore$  ที่ความถี่สูงสุดจะต้องปรับ  $VR_1$  ต่ำสุดมาอยู่ที่  $12.5 \text{ K}\Omega$   $\therefore$  หาค่า  $C_3$  ได้ดังสมการ (6.4)

$$C_3 = 25 \times 10^{-6} / 12.5 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-9} = 2 \text{ nF} \quad (6.4)$$

เลือก  $VR_1 = 500 \text{ K}\Omega$   $\therefore$  ความถี่เอาต์พุตของวงจรเมื่อปรับค่า  $VR_1$  สูงสุด  $500 \text{ K}\Omega$  ได้ดังนี้

$$F_o = 5 / (500 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-9}) = 5000 \text{ Hz} \quad (6.5)$$

$\therefore$  วงจรในรูปที่ 6.2 สามารถผลิตความถี่ 5 กิโลเฮิร์ต ถึง 200 กิโลเฮิร์ต

### 6.3 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source)

วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันทำหน้าที่ในการกำหนดกระแสคงที่ที่จะจ่ายให้กับอิล็กโทรด์ทั้ง 32 อิล็กโทรด์ โดยวงจรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูลนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 6.3

โดยการทำงานของวงจรจากรูปที่ 6.3 ซึ่งเป็นวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดันมีดังนี้ สัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต แอมพลิจูด  $2 V_{p,p}$  ซึ่งได้จากวงจรผลิตสัญญาณไซน์จะถูกป้อนให้กับ  $U1$  ซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์ โดยมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $VR_1$  เป็นตัวกำหนดเกณฑ์การขยายโดยจากวงจรรูปที่ 6.3 จะปรับอัตราขยายให้เท่ากับ  $\approx 10$  เท่า เพื่อให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตของ  $U1$  เท่ากับ  $20 V_{p,p}$  เพื่อป้อนให้กับ  $U2$  ซึ่งต่อเป็นวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดันโดยเราสามารถกำหนดค่ากระแสที่จะทำการจ่ายให้กับอิล็กโทรด์ได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานของ  $R_{selector}$  ซึ่งเราสามารถที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานที่จะใช้เป็น  $R_{selector}$  ได้โดยอ้างอิงวงจรรูปที่ 6.4 โดยจากรูปที่ 6.4 เราจะได้

$$V_{O1} = A(V_{O2} - V_{in}) \quad (6.6)$$

เมื่อให้ ความต้านทานในวงจรมีค่าเท่ากันหมดจะได้

$$A = R/R = 1 \quad (6.7)$$

∴ สมการที่ 6.6 สามารถเขียนได้ดังสมการ (6.8)

$$V_{O1} = (V_{O2} - V_{in}) \quad (6.8)$$

$$-V_{in} = V_{O1} - V_{O2} \quad (6.9)$$

$$V_{in} = V_{O2} - V_{O1} \quad (6.10)$$

$$V_{O2} - V_{O1} = V_{in} \quad (6.11)$$

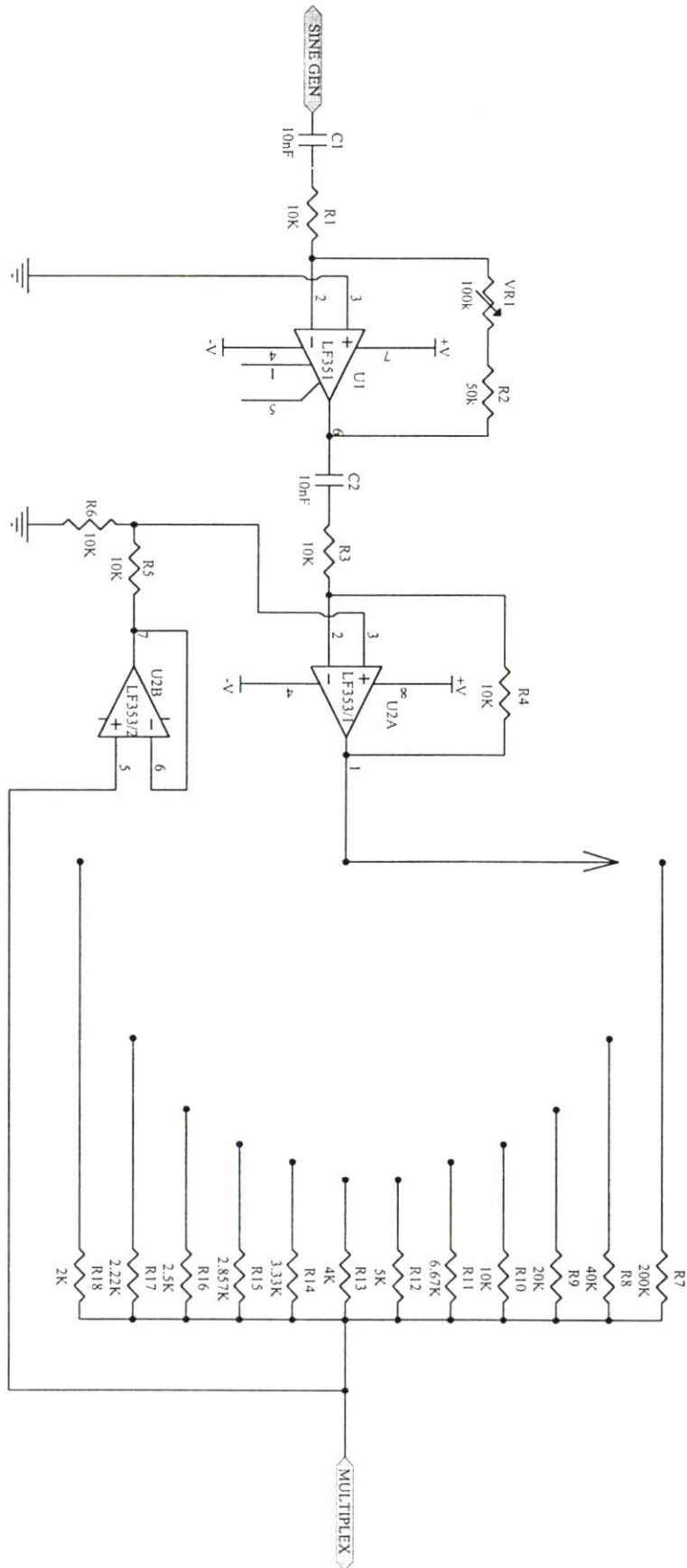
จากสมการที่ 6.11 ค่าแรงดัน  $V_{in}$  ก็คือค่าแรงดันตกคร่อม  $R_{selector}$  ∴ เราสามารถกำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดได้ดังสมการที่ (6.12)

$$I_O = V_{O2} - V_{O1} / R_{selector} \quad (6.12)$$

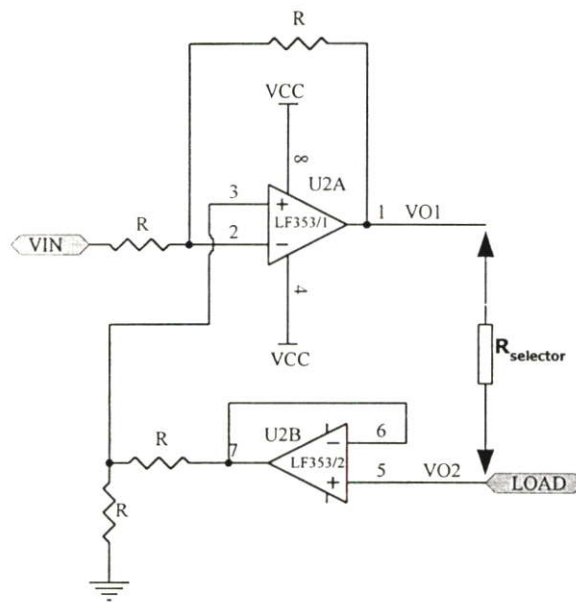
$$R_{selector} = V_{in} / I_O \quad (6.13)$$

เมื่อ  $R_{selector}$  = ค่าความต้านทานสำหรับกำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด  
 $V_{in}$  = ค่าแรงดันอินพุทของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน  
 $I_O$  = ค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด

จากสมการที่ (6.13) เราสามารถหาค่าความต้านทานที่จะใช้เป็น  $R_{selector}$  ได้จากค่าแรงดันอินพุท ( $V_{in} = 20 V_{p-p}$ ) และค่ากระแสเอาต์พุทที่ต้องการซึ่งในระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นนี้ กำหนดกระแสไว้ 12 ค่า คือ 0.1 mAp-p , 0.5 mAp-p , 1 mAp-p , 2 mAp-p , 3 mAp-p , 4 mAp-p , 5 mAp-p , 6 mAp-p , 7 mAp-p , 8 mAp-p , 9 mAp-p และ 10 mAp-p ซึ่งจะสามารถหาค่าความต้านทานของ  $R_{selector}$  ได้ดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.3 วงจรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล



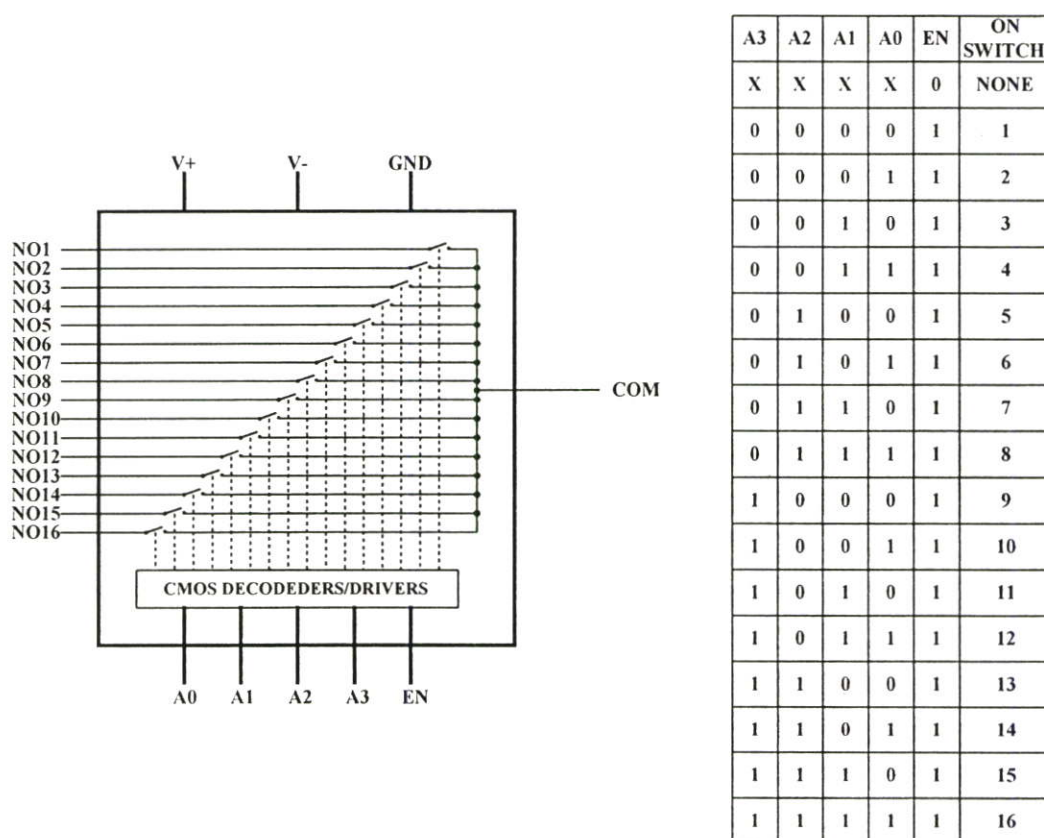
รูปที่ 6.4 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

ตารางที่ 6.2 ค่าความต้านทานของ  $R_{\text{selector}}$  และกระแสเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแส

ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดกระแส	
ความต้านทาน (โอห์ม)	กระแส (แอมป์)
200 K	100 u
40 K	500 u
20 K	1 m
10 K	2 m
6.67 K	3 m
5 K	4 m
4 K	5 m
3.33 K	6 m
2.857 K	7 m
2.5 K	8 m
2.22 K	9 m
2 K	10 m

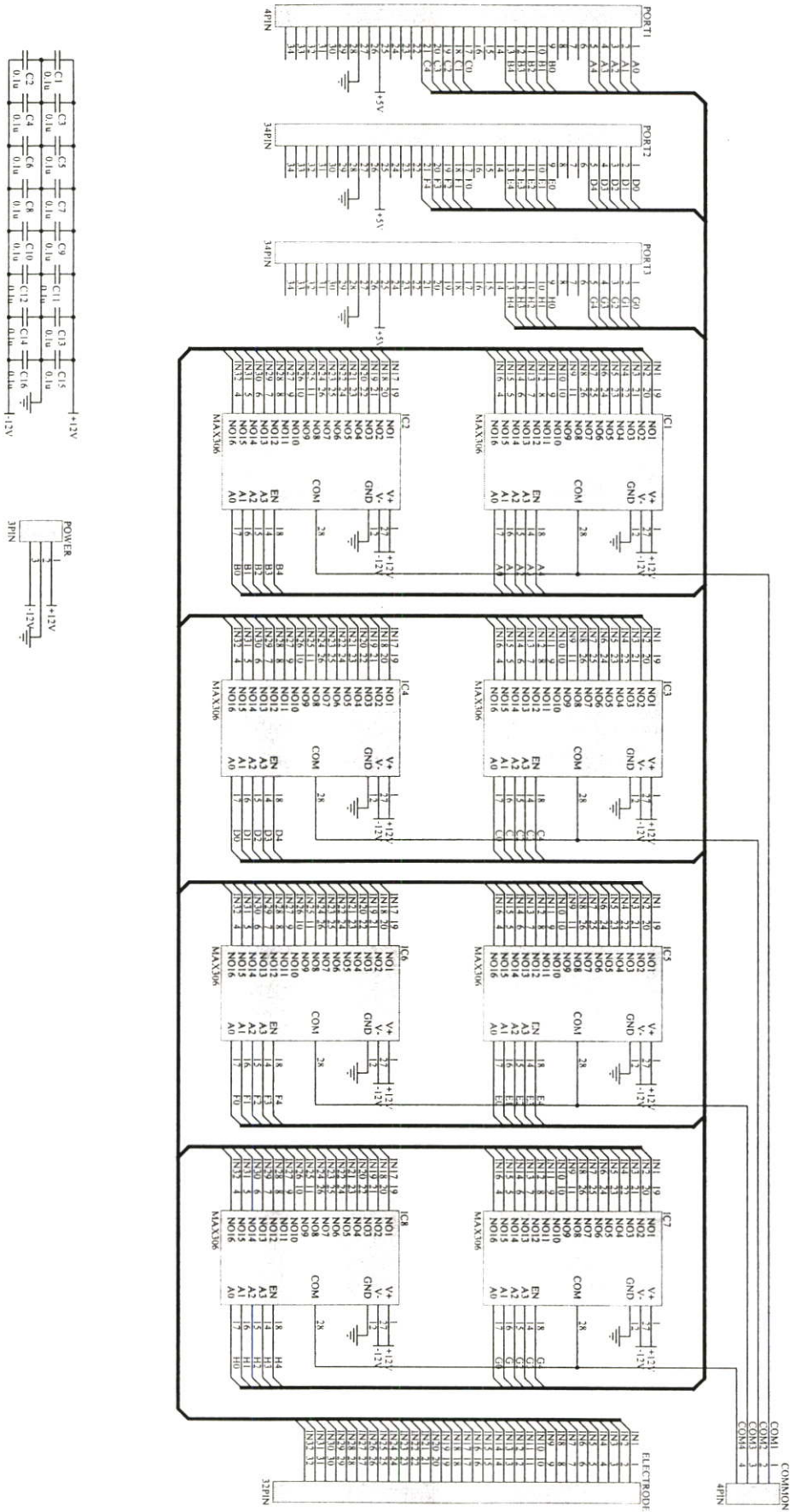
## 6.4 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ขนาด 32X4 ช่องสัญญาณ

วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสและการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าให้แก่อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 32 อิเล็กทรอนิกส์ โดยการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟสโดยใช้ไอซี MAX306 ซึ่งเป็นไอซีมัลติเพล็กซ์เซอร์ขนาด 16X1 ช่องสัญญาณ จำนวน 8 ตัว เพื่อใช้ในการสร้างมัลติเพล็กซ์เซอร์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ สำหรับใน ส่วนของการควบคุมการมัลติเพล็กซ์สัญญาณจะใช้สัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม ภาษาซีเขียนฟังก์ชันควบคุมผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส โดยจะใช้สัญญาณควบคุมจำนวน 5 บิตต่อไอซี MAX306 1 ตัว ซึ่งในส่วนของสัญญาณควบคุมและลักษณะของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณสามารถ แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 วงจรภายในของไอซี MAX 306 สัญญาณควบคุมและลักษณะของการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

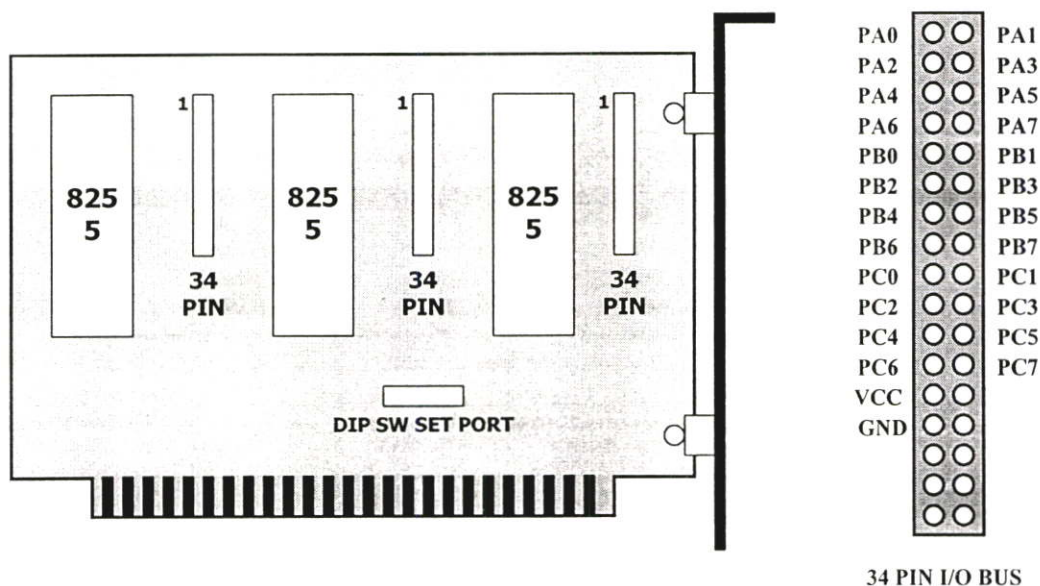
สำหรับวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูลนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 วงจรมัลติเพล็กซ์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ

## 6.5 การ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface Card)

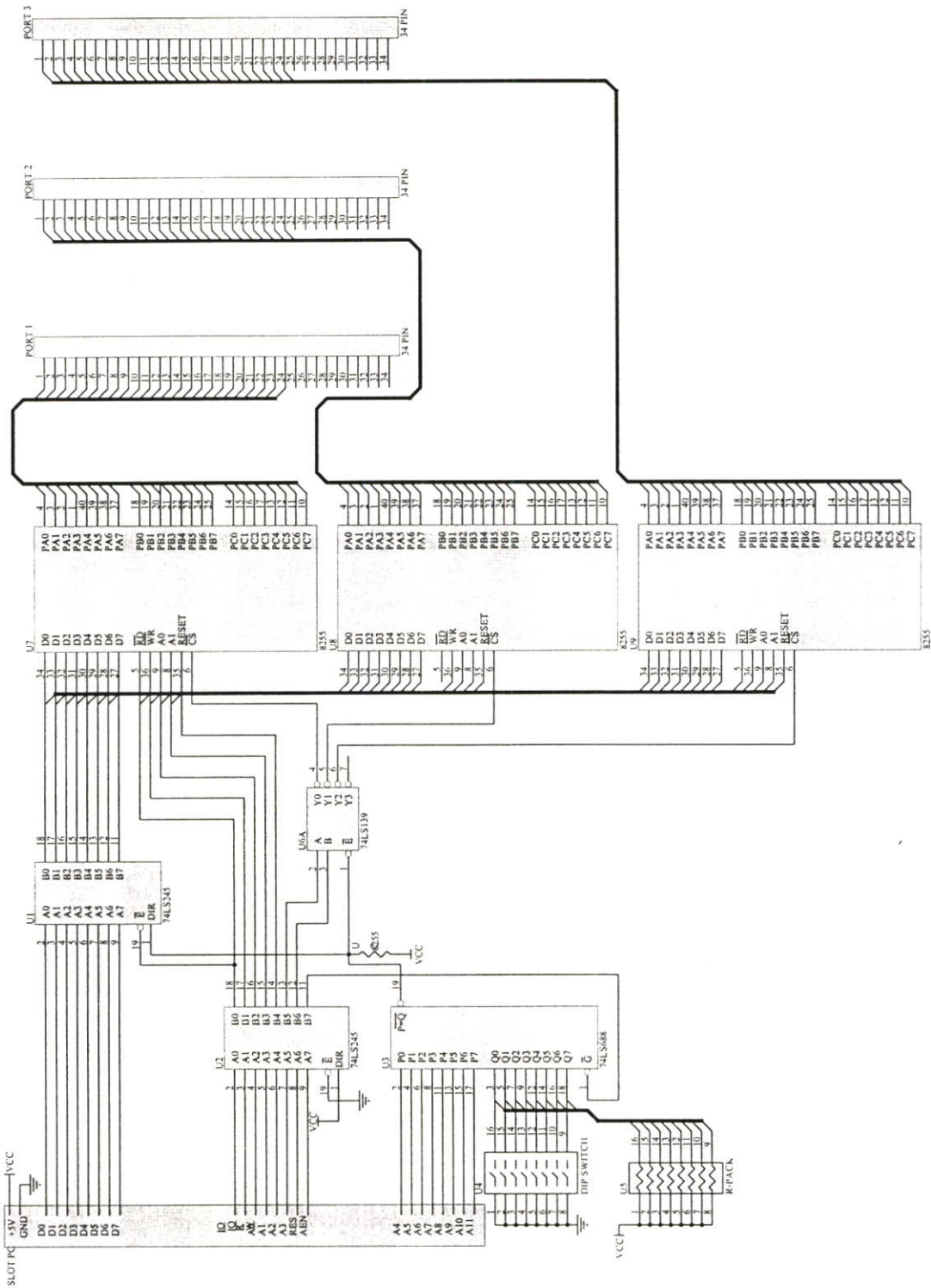
การ์ดอินเตอร์เฟซทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการดัดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุทพอร์ทและเอาต์พุทพอร์ทเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเตอร์เฟซนี้จะมีพอร์ทให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ท หรือ 72 บิต (1 พอร์ทมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 6.7 และตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.7 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET - 8255

ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET - 8255

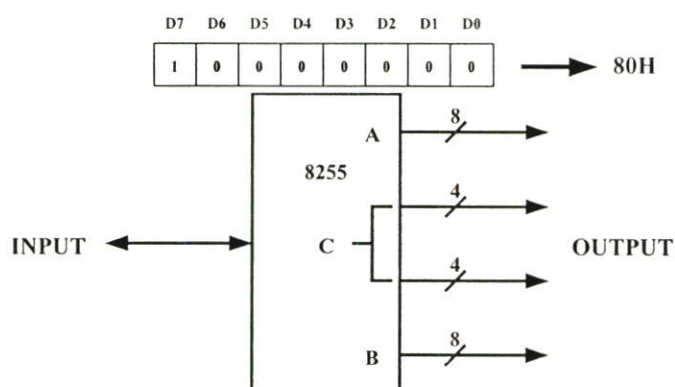
คุณสมบัติของของบอร์ด ET-8255	
INPUT LOGIC LOW	MIN = -0.5 VOLTS , MAX = 0.8 VOLTS
INPUT LOGIC HIGH	MIN = 2.0 VOLTS , MAX = 5 VOLTS
OUTPUT LOW VOLTAGE PORTS (I-SINK = 1.7 mA)	0.45 VOLTS
OUTPUT HIGH VOLTAGE PORTS (I-SOURCE = 200 $\mu$ A)	2.4 VOLTS
POWER CONSUMPTION	300 mA
SIZE	HALF SLOT (13 X 11 CM).
PORT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



รูปที่ 6.8 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

สำหรับรูปที่ 6.8 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ทและเอาต์พุทพอร์ท และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ท คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และคิพสวิตช์

ในส่วนในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ต โดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 เราจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ตทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ตหรือเอาต์พุตพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุตพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด (Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรสสามารถแสดงดังตารางที่ 6.4

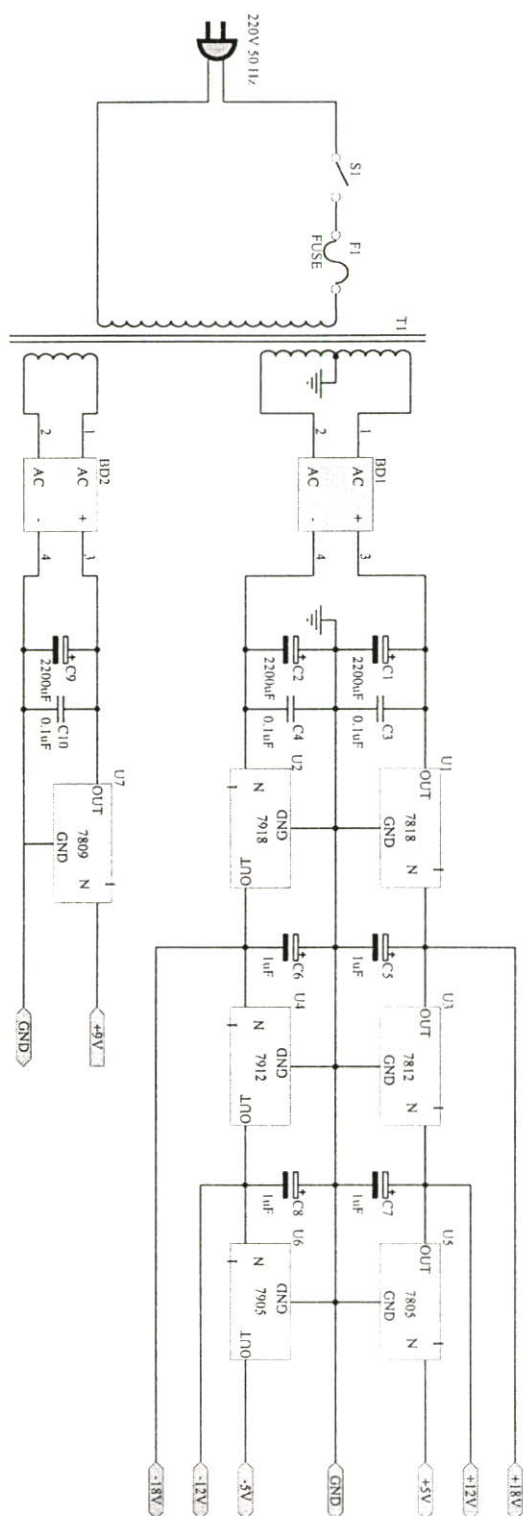
ตารางที่ 6.4 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET - 8255

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



## 6.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล

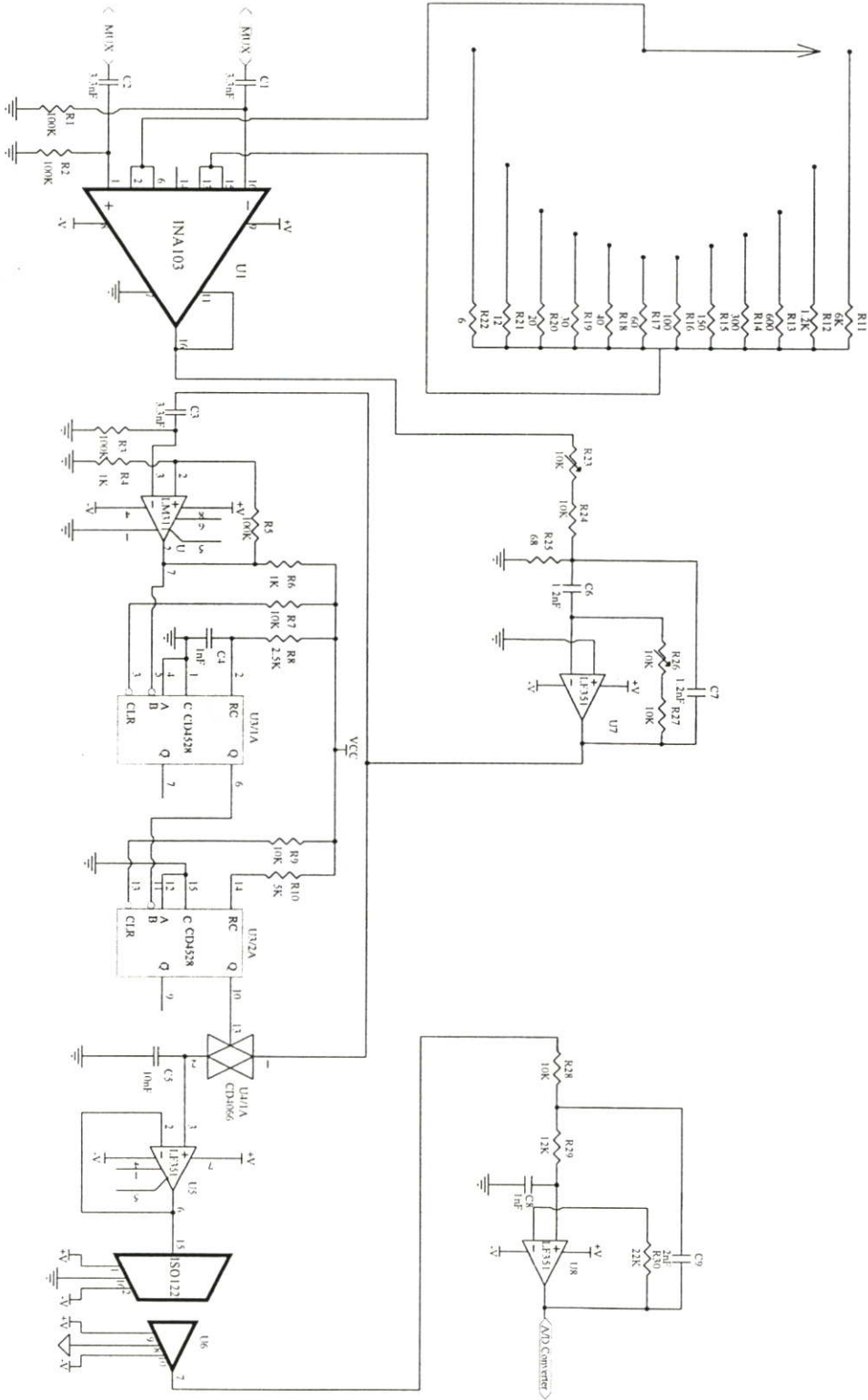
วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล สามารถแสดงดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล

### 6.8 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด (Peak Detector)

วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันยอดของสัญญาณไซน์ที่ได้รับจากวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ เพื่อนำค่าแรงดันยอดที่ได้ส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยลักษณะของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด

จากรูปที่ 6.12 ลักษณะของวงจรจะใช้การตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดที่ใช้เทคนิคของการแซมปลิงแอนด์โฮลด์ (Sampling and Hold) โดยการทำงานของวงจรมีดังนี้คือสัญญาณที่ได้จากวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์จะถูกป้อนเข้าสู่อินพุทของ U1 INA 103 ซึ่งเป็นไอซีอินทรูเมนเตชันแอมพลิไฟเออร์ (Instrumentation Amplifier) ของบริษัท BURR-BROWN เพื่อทำการขยายสัญญาณที่ได้รับจากวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ให้มีแอมพลิจูดของสัญญาณสูงขึ้น โดยจากวงจรรูปที่ 6.12 เราสามารถปรับอัตราขยายของ U1 โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานของ Rselector (RG) ซึ่งเราสามารถคำนวณค่าความต้านทานสำหรับนำมาต่อเพื่อปรับอัตราขยายของ U1 จากสมการที่ (6.7) และสมการที่ (6.8)

$$G = 1 + 6K\Omega/RG \quad (6.7)$$

∴ จากสมการที่ (6.7) จะได้

$$RG = 6K\Omega/(G-1) \quad (6.8)$$

เมื่อ  $G =$  อัตราขยายของอินทรูเมนเตชัน แอมพลิไฟเออร์

$RG =$  ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่นำมาต่อเพื่อปรับอัตราขยาย

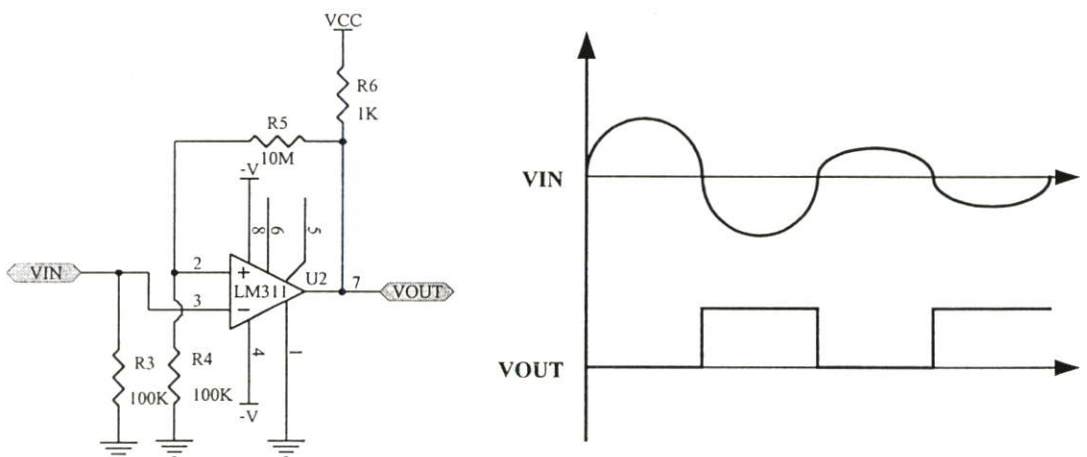
วงจรรูปที่ 6.12 จะปรับอัตราขยายของ U1 ได้ 12 ค่าคือ 2 , 6 , 11 , 21 , 41 , 61 , 101 , 151 , 201, 301 , 501 และ 1001 เท่า ซึ่งค่าความต้านทานของ Rselector ที่นำมาต่อเพื่อให้ได้อัตราขยายที่กล่าวไว้นั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ค่าความต้านทานของ Rselector ที่อัตราขยายต่าง ๆ

ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดอัตราขยาย	
ความต้านทาน (โอห์ม)	อัตราขยาย (เท่า)
6 K	2
1.2 K	6
600	11
300	21
150	41
100	61
60	101
40	151
30	201
20	301
12	501
6	1001

สัญญาณที่ถูกขยายโดย U1 จะถูกป้อนให้กับ U7 ซึ่งใช้ LF351 ต่อเป็นวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน(Band Pass Filter) 100 กิโลเฮิร์ตเพื่อลดสัญญาณรบกวน สัญญาณเอาต์พุตจาก U7 จะถูกป้อนให้กับ U2 ซึ่งใช้ LM311 ต่อเป็นวงจรตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าเมื่อผ่านศูนย์โวลต์ชนิดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting Zero – crossing Detector)

จากคุณสมบัติของ IC LM311 ซึ่งทางด้านเอาต์พุตมีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์ ที่ขา 7 สามารถต่อกับแหล่งจ่ายไฟอื่นที่มีขนาดสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟลบ (ขา 4) ได้ถึง 40 โวลต์ แต่ในส่วนของวงจรนี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ โดยมี R6 ต่อไว้เพื่อจำกัดกระแสเอาต์พุต โดยจากลักษณะการทำงานแบบสวิตช์นั้นเมื่อ ขา 2 มีแรงดันสูงกว่า 3 จะทำให้สวิตช์เปิดวงจรแรงดันที่เอาต์พุตจะเท่ากับแหล่งจ่ายไฟที่ต่อกับขา 7 ซึ่งก็คือ 5 โวลต์ แต่เมื่อแรงดันที่ขา 2 ต่ำกว่าที่ขา 3 ก็จะทำให้สวิตช์ปิดวงจรเอาต์พุตที่ขา 7 ก็จะถูกต่อกับขา 1 ซึ่งต่ออยู่กับกราวด์ แรงดันเอาต์พุตก็จะเป็น 0 ด้วย โดยลักษณะการทำงานของ LM311 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.13



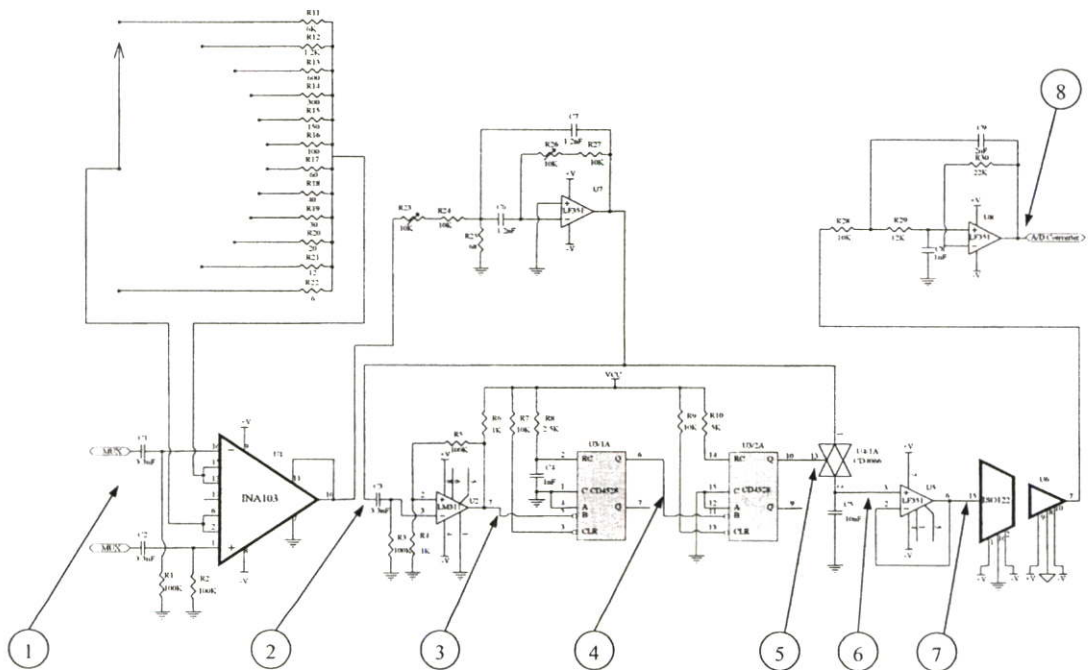
รูปที่ 6.13 ลักษณะการต่อ LM311 ในวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขอดและลักษณะของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จาก LM311

จากรูปที่ 6.13 จะเห็นว่าสัญญาณไซน์ที่อินพุตซึ่งมีทั้งช่วงบวกและช่วงลบจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลที่อยู่ในช่วง 0 กับ 5 โวลต์ ซึ่งเหมาะสมในการนำไปควบคุมไอซีที่ใช้ในงานดิจิทัล จากรูปที่ 6.13 จะต่อ R5 และ R6 ไว้เพื่อกำหนดแรงดันฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ไว้ที่ประมาณ 50 มิลลิโวลต์ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน

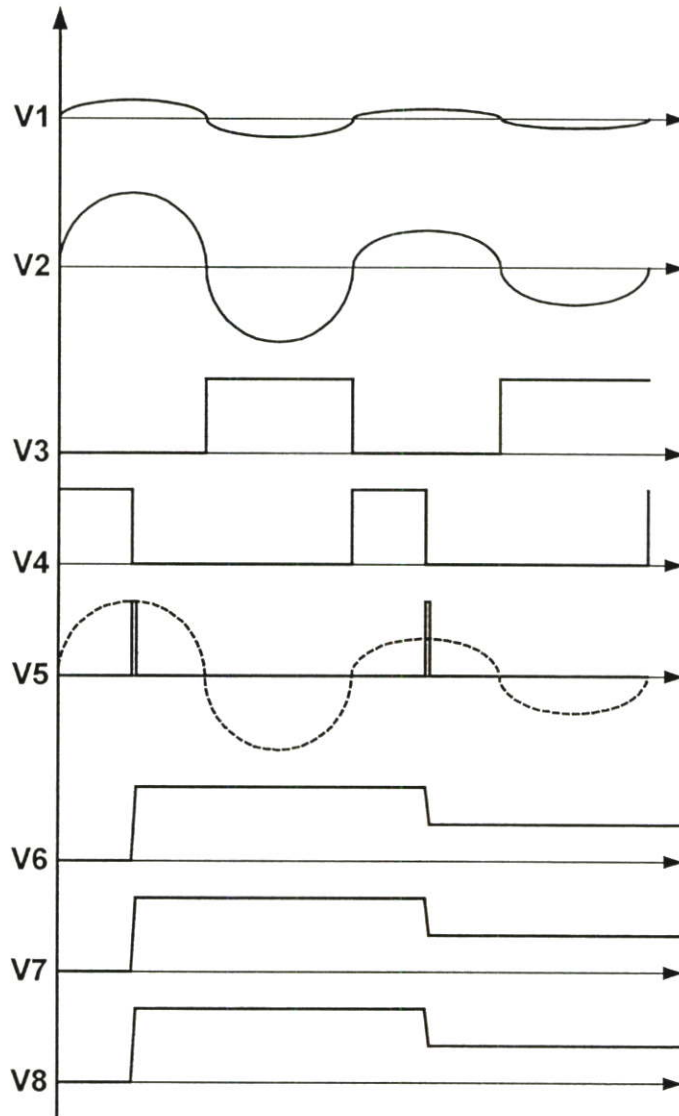
สัญญาณดิจิทัล (0 กับ 5 โวลต์) ที่ได้จากเอาต์พุตของ U2 จะถูกป้อนให้กับ U3 ไอซี CD4528 ต่อเป็นวงจรโมนอสเตเบิลที่กำหนดการทำงานที่ขอบขาลง (Negative-going Transition) ของอินพุต โดยกำหนดให้คาบเวลาของวงจรโมนอสเตเบิลเท่ากับ  $T/4$  เมื่อ  $T$  คือคาบเวลาของสัญญาณอินพุต เนื่องจากในวงจรนี้ความถี่ของสัญญาณอินพุตเท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะได้

ค่าคาบเวลาของโมโนสเตเบิลเท่ากับ  $T/4 = 1/4 \times 100 \times 10^3 = 2.5$  ไมโครวินาที สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิลตัวที่ 1 จะถูกป้อนให้กับอินพุตของวงจรโมโนสเตเบิลตัวที่ 2 ที่กำหนดการทำงานที่ขอบขาลงเช่นเดียวกับกับวงจรโมโนสเตเบิลตัวที่ 1 โดยมีค่าคาบเวลาของพัลส์เอาต์พุตเท่ากับ 400 นาโนวินาทีโดยพัลส์เอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลตัวที่ 2 นี้จะถูกส่งไปควบคุมให้ U4 ไอซี CD4066 ซึ่งเป็นอะนาล็อกสวิตช์ทำการปิดวงจรเพื่อทำการแซมปลิ่ง (Sampling) สัญญาณอินพุตที่ได้จาก U1 ไปเก็บประจุที่ C5 แรงดันที่ตกคร่อม C5 จะถูกส่งผ่าน U5 ไอซี LF351 ซึ่งต่อเป็นบัฟเฟอร์ไปยัง U6 ไอซี ISO 122P ซึ่งเป็นไอโซเลชัน แอมพลิไฟเออร์ ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 (Unity Gain) ทำการส่งระดับแรงดันที่ได้ทางอินพุตไปยังวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยผ่าน U8 ซึ่งต่อเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่ความถี่คัทออฟประมาณ 10 กิโลเฮิร์ตเพื่อลดค่าริบเบิลที่เกิดจาก U6 ซึ่งทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิตอลที่ต่ออยู่กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขอดซึ่งในขณะวัดจะถูกต่ออยู่กับร่างกายของผู้ถูกวัดผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ทั้งนี้เพื่อป้องกันกระแสไฟที่อาจรั่วไหลมาจากเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

สำหรับลักษณะของสัญญาณในแต่ละส่วนและการทำงานของวงจรทั้งหมดของวงจรตรวจจับแรงดันขอดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.14 รูปที่ 6.15



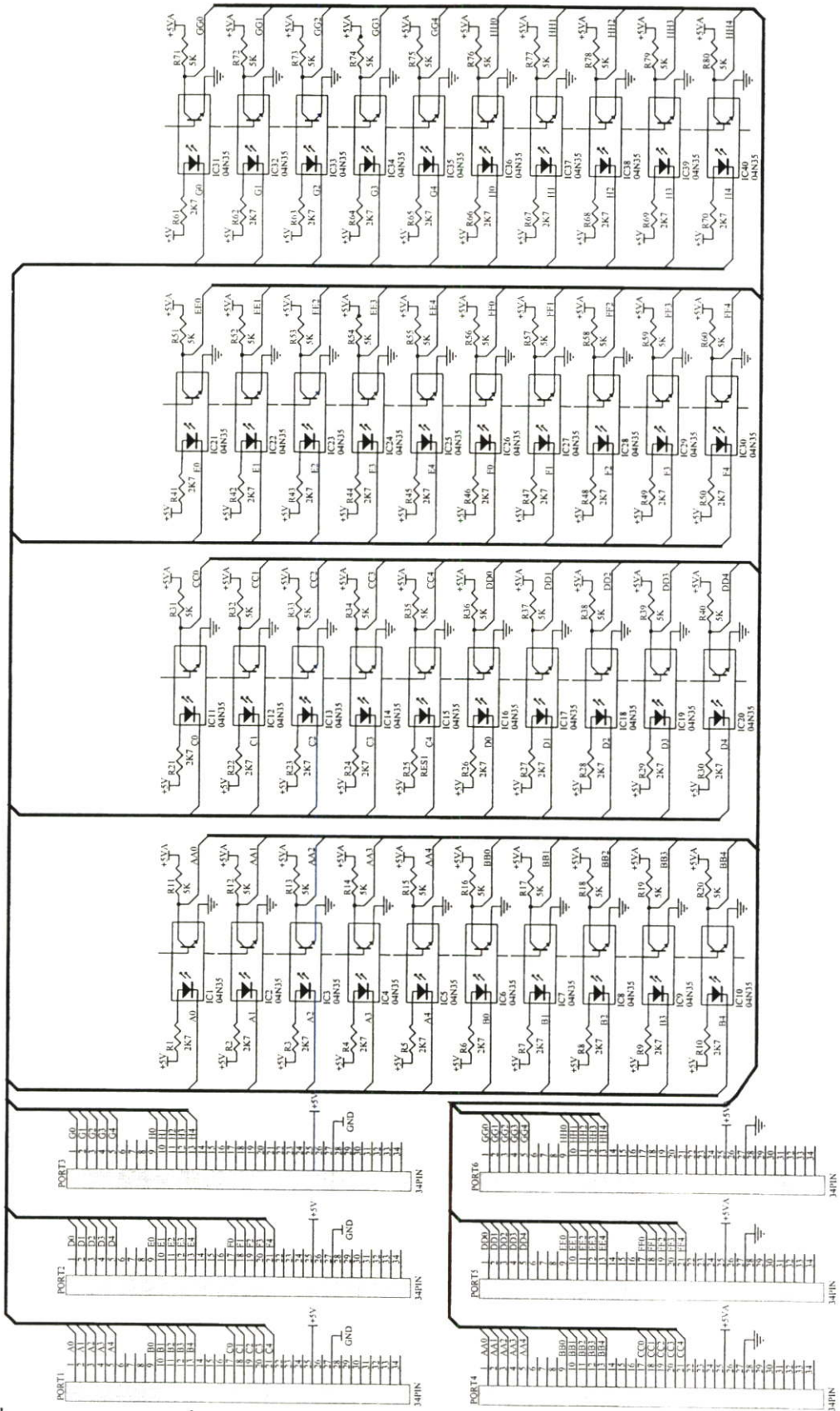
รูปที่ 6.14 จุดที่แสดงสัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรตรวจจับแรงดันขอด



รูปที่ 6.15 ลักษณะของสัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรตรวจจับแรงดันขด

### 6.9 วงจรไอโซเลชัน (Isolation Circuit)

วงจรไอโซเลชันทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างวงจรอินเทอร์เฟซที่ต่ออยู่กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และ วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ เนื่องจากในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าของอวัยวะมนุษย์วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์จะถูกต้องอยู่กับร่างกายของผู้ถูกวัด ดังนั้นจำเป็นต้องแยกกราวด์ของสัญญาณควบคุมที่มาจากการ์ดอินเตอร์เฟซเพื่อป้องกันกระแสรั่วไหลจากเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซเข้าสู่ร่างกายผู้ถูกวัด ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ถูกวัดได้ โดยในการป้องกันจะเชื่อมต่อสัญญาณควบคุมจากการ์ดอินเตอร์เฟซไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์โดยออปโตไอโซเลเตอร์ (Opto-Isolator) โดยลักษณะของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูป 6.16



รูปที่ 6.16 วงจรไอซีเลขขึ้น

จากรูปที่ 6.16 สัญญาณเอาต์พุตจากบิตต่างๆของวงจรรีจิสเตอร์เฟสจะถูกป้อนเข้าสู่อินพุตของวงจรถ่ายโอนไอโซเลชันอันประกอบด้วย PORT 1 , PORT 2 และ PORT 3 โดยอินพุตแต่ละบิตจะถูกส่งไปยังออปโตไอโซเลเตอร์  $U_1-U_{40}$  ซึ่งลักษณะการต่อของออปโตไอโซเลเตอร์แต่ละตัวจะต่อแบบอินเฟสคือสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของออปโตไอโซเลเตอร์จะมีลักษณะเหมือนกัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากออปโตไอโซเลเตอร์แต่ละตัวจะถูกส่งไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ผ่านทาง PORT 4 , PORT 5 และ PORT 6 ตามลำดับ

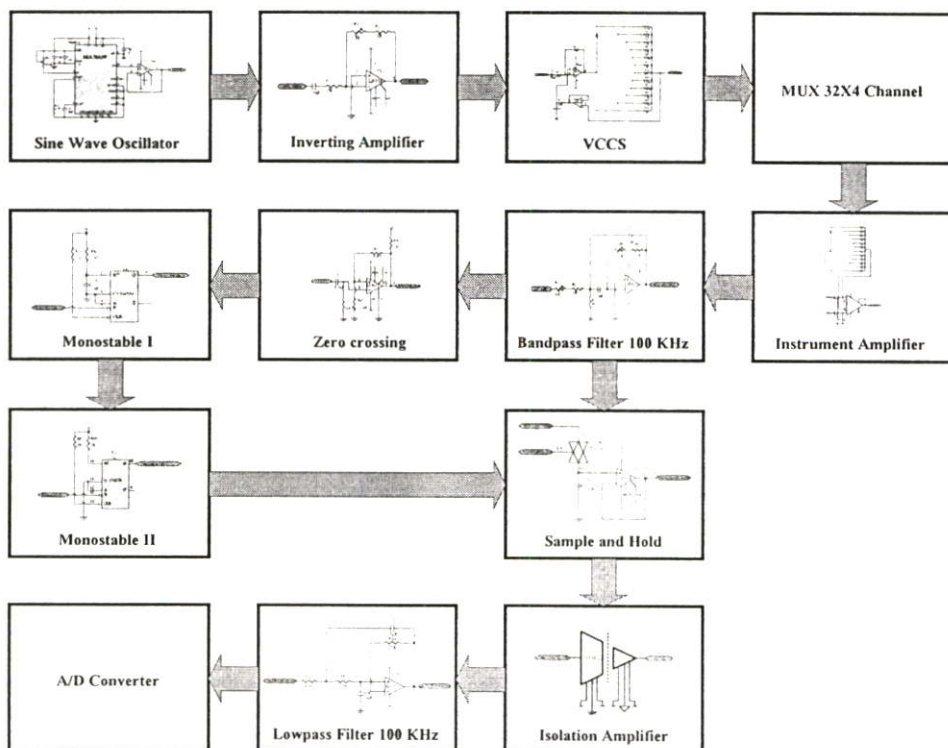
# บทที่ 7

## การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้จะแสดงถึงการทดสอบระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อีเล็กโทรดที่สร้างขึ้น โดยจะทำการทดลองแยกเป็นส่วนๆตามระบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อทดสอบคุณสมบัติของวงจรในแต่ละภาคว่ามี การทำงานตรงความต้องการหรือไม่จากนั้นจึงนำระบบเก็บข้อมูลไปทดสอบเก็บข้อมูลกับแบบจำลองซึ่งเป็นถังบรรจุน้ำเกลือที่ติดอีเล็กโทรด 32 อีเล็กโทรดโดยรอบที่ระยะห่างแต่ละอีเล็กโทรดเท่าๆกันภายใต้เงื่อนไขในสภาวะต่างๆของถังน้ำเกลือ เพื่อศึกษาผลของสภาวะต่างๆของถังน้ำเกลือที่มีผลต่อข้อมูลหรือสัญญาณที่วัดได้ สุดท้ายจึงนำข้อมูลที่วัดได้มาทำการสร้างภาพตัดขวางโดยอัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และอัลกอริธึมแบบ 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบจากข้อมูลที่วัดต่อภาพตัดขวางที่สร้างได้ ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้คือ

### 7.1 การทดสอบระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อีเล็กโทรดความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

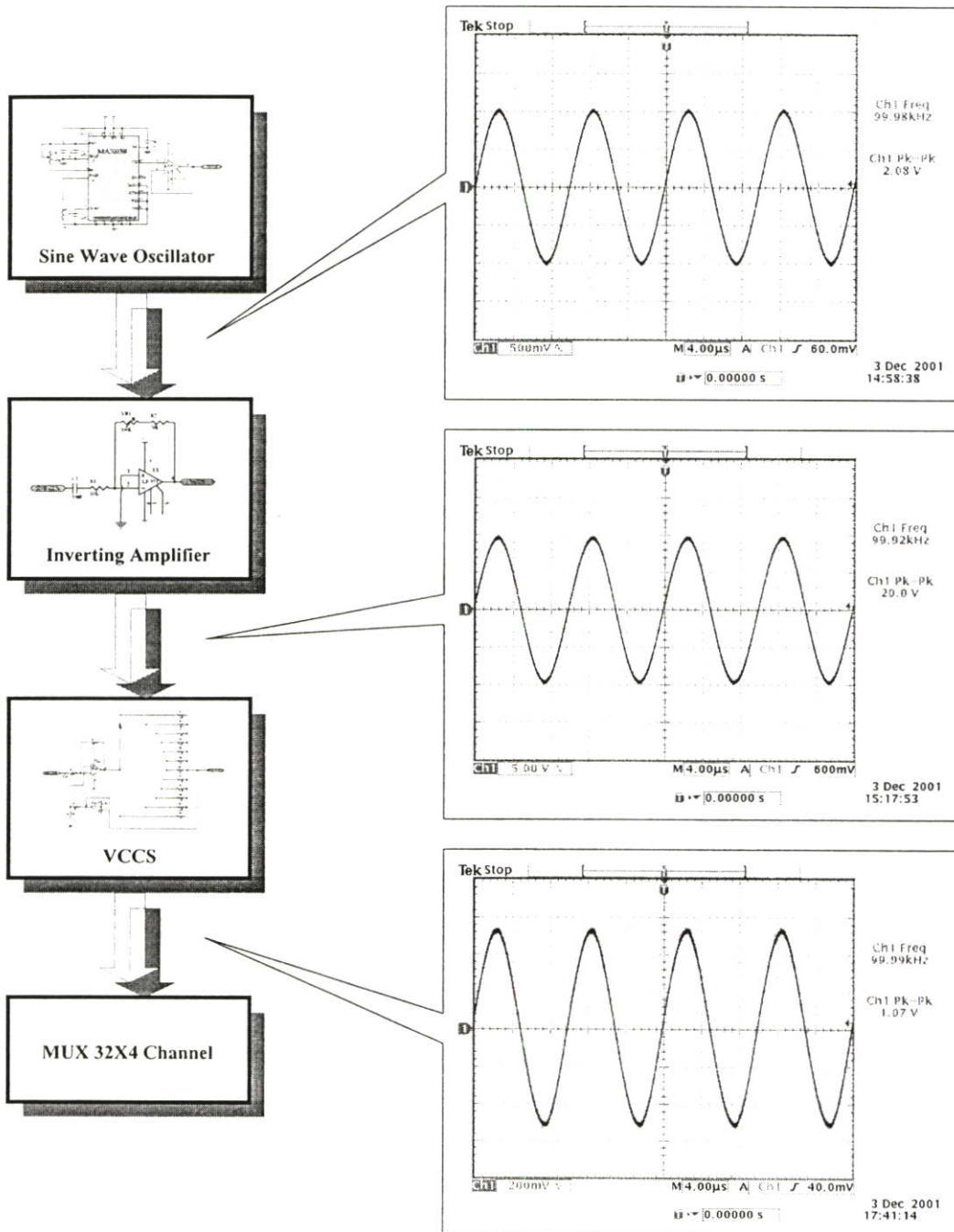
สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสัญญาณในส่วนต่างๆของวงจรจ่ายกระแสแรงดันที่ และวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยออดดังแสดงดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 วงจรจ่ายกระแสแรงดันที่และวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยออด

### 7.1.1 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสแรงดันที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

สำหรับวงจรจ่ายกระแสแรงดันที่จะประกอบด้วยวงจรภายใน 3 ส่วนคือวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสอัตราขยายประมาณ 10 เท่า และวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันซึ่งสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละส่วนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 สัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรจ่ายกระแสแรงดันที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

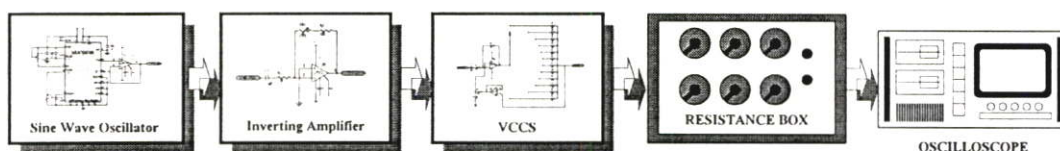
### 7.1.2 การทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

สำหรับในระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 บิตเล็กโทรคที่ออกแบบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกระแสที่จ่ายให้กับโหลดได้ 12 ค่าคือ 0.1 , 0.5 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 mA<sub>p-p</sub> โดยการกำหนดจากตัวต้านทานกำหนดกระแส : Rselector (เมื่อค่าแรงดันอินพุทของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันมีค่าเท่ากับ 20 V<sub>p-p</sub>) ซึ่งค่าความถูกต้องของกระแสที่จ่ายให้กับโหลดจะขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของตัวต้านทานที่ใช้กำหนดกระแส จากการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ใช้กำหนดกระแสปรากฏว่าค่าความต้านทานคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบเล็กน้อยทำให้ค่ากระแสจริงที่จ่ายให้กับโหลดคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบเล็กน้อย โดยค่ากระแสจริงที่จ่ายให้กับโหลดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่ากระแสที่จ่ายจริงให้กับโหลดในย่านกระแสต่าง ๆ

ค่าความต้านทานกำหนดกระแสที่ออกแบบไว้ (โอห์ม)	ค่ากระแสที่ออกแบบไว้ (แอมป์)	ค่าความต้านทานกำหนดกระแสจริงที่ได้จากการวัด (โอห์ม)	ค่ากระแสจริง (แอมป์)
200 K	100 u	199K	100.5u
40 K	500 u	39.6K	505.05u
20 K	1 m	19.71K	1.015m
10 K	2 m	9.86K	2.028m
6.67 K	3 m	6.59K	3.035m
5 K	4 m	4.92K	4.066m
4 K	5 m	3.90K	5.128m
3.33 K	6 m	3.29K	6.079m
2.857 K	7 m	2.82K	7.092m
2.5 K	8 m	2.46K	8.130m
2.22 K	9 m	2.18K	9.174m
2 K	10 m	1.95	10.256m

ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสให้กับโหลดโดยทำการต่อวงจรเพื่อทำการทดสอบการจ่ายกระแสดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่

สำหรับในการทดสอบจะทำการปรับค่าความต้านทานของโหลดตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 10 กิโลโอห์มในย่านกระแสต่างๆ ทั้ง 12 ค่าที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงนำค่าแรงดันตกคร่อมโหลดมาคำนวณเพื่อหาค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดโดยสมการที่ (7.1)

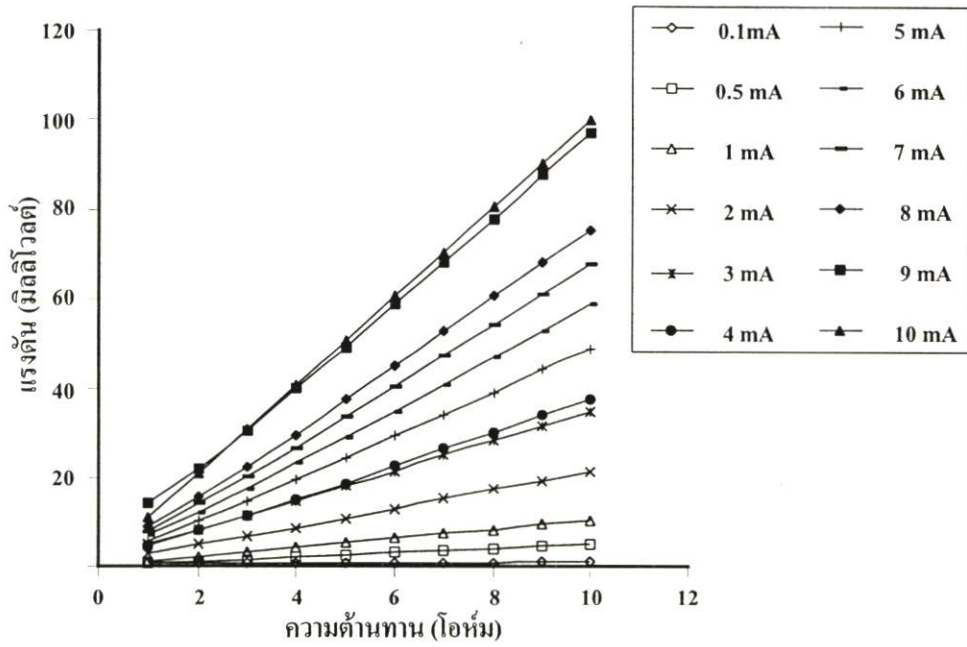
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (7.1)$$

เมื่อ  $I_L$  = ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด (มิลลิแอมป์พีคทูพีค :  $A_{p-p}$ )

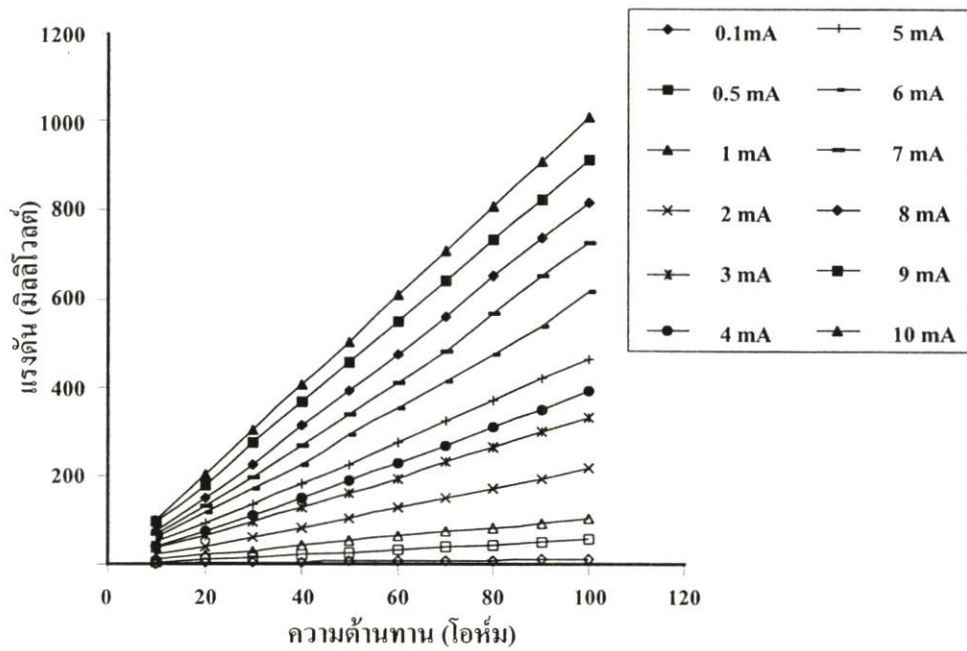
$R_L$  = ค่าความต้านทานของโหลด (โอห์ม)

$V_L$  = ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด (โวลต์ พีคทูพีค:  $V_{p-p}$ )

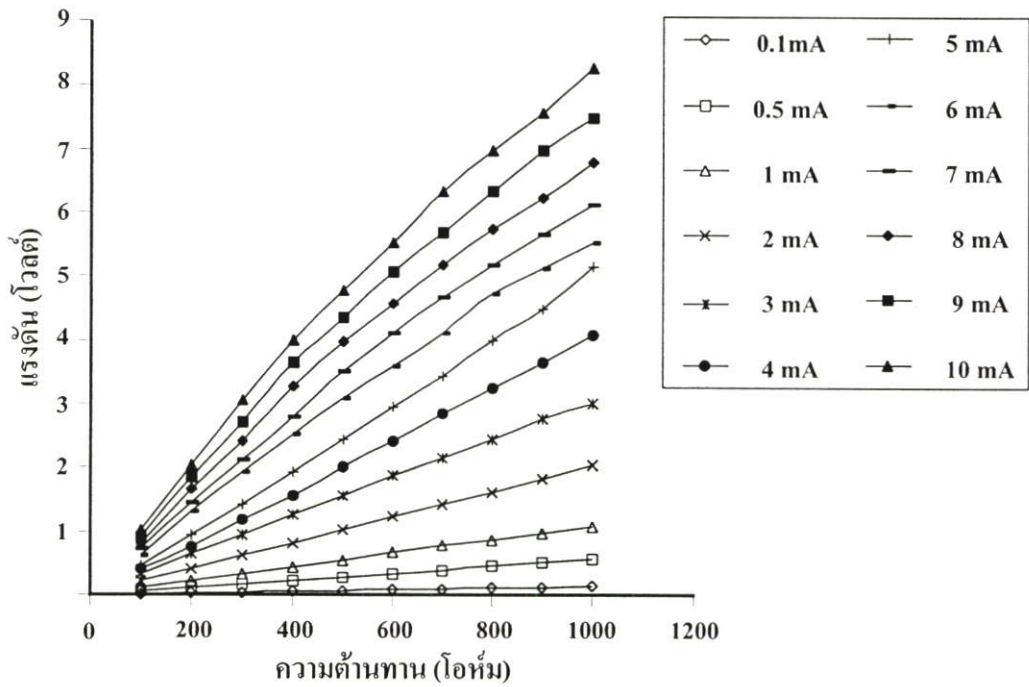
จากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้และค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณได้ในแต่ละย่านกระแสนำมาพล็อตเปรียบเทียบกันเพื่อดูความสามารถในการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่ ที่ได้ออกแบบไว้ ดังในรูปที่ 7.4 ถึง รูปที่ 7.11



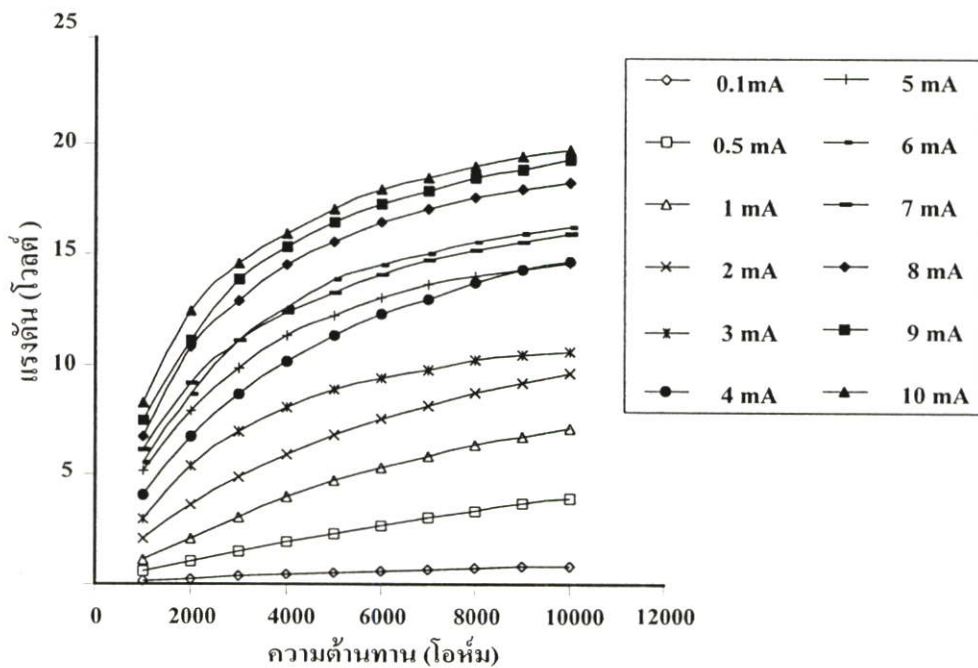
รูปที่ 7.4 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วง โหลด 1-10โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า



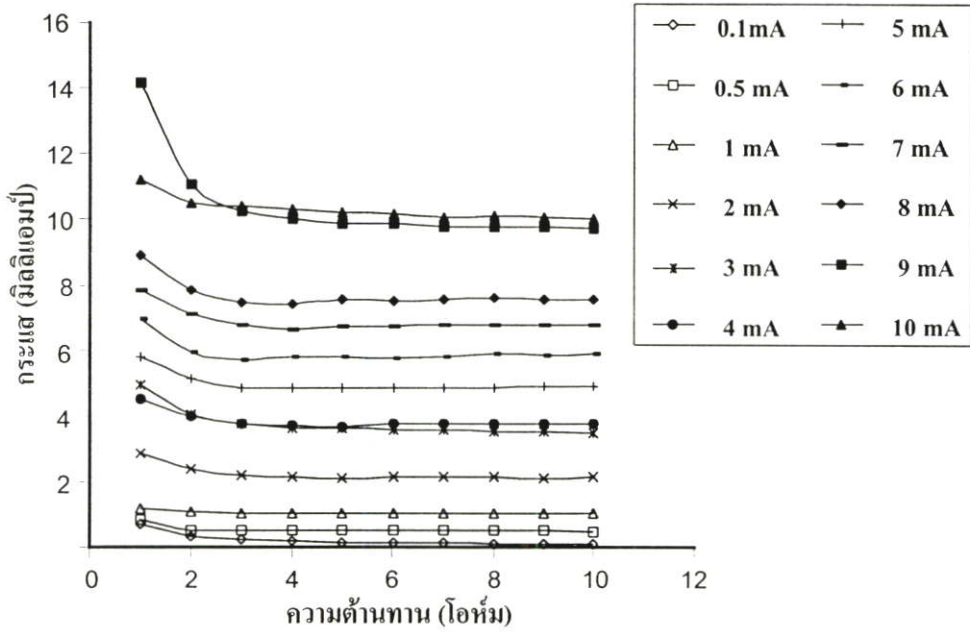
รูปที่ 7.5 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วง โหลด 10-100โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆทั้ง 12 ค่า



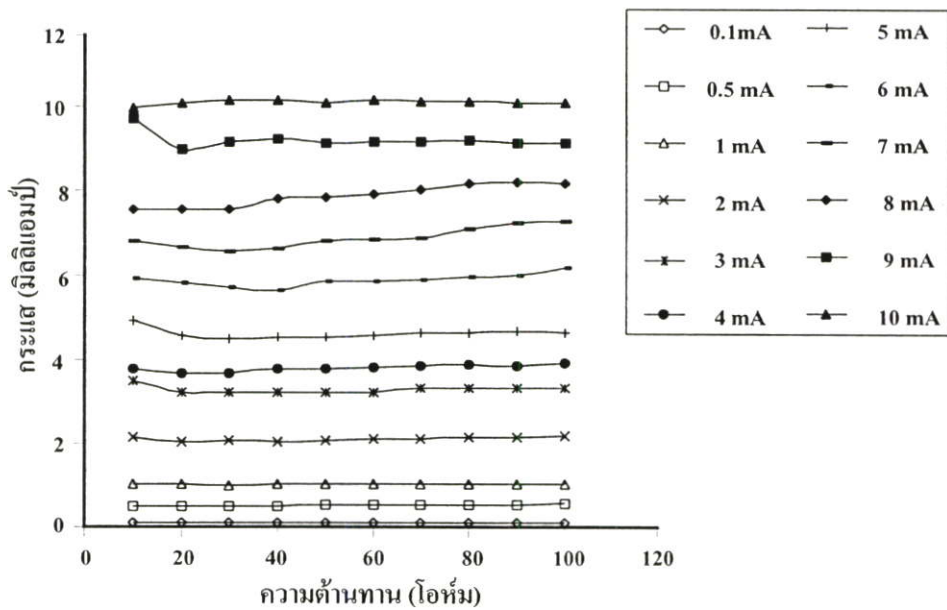
รูปที่ 7.6 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 100-1000 โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า



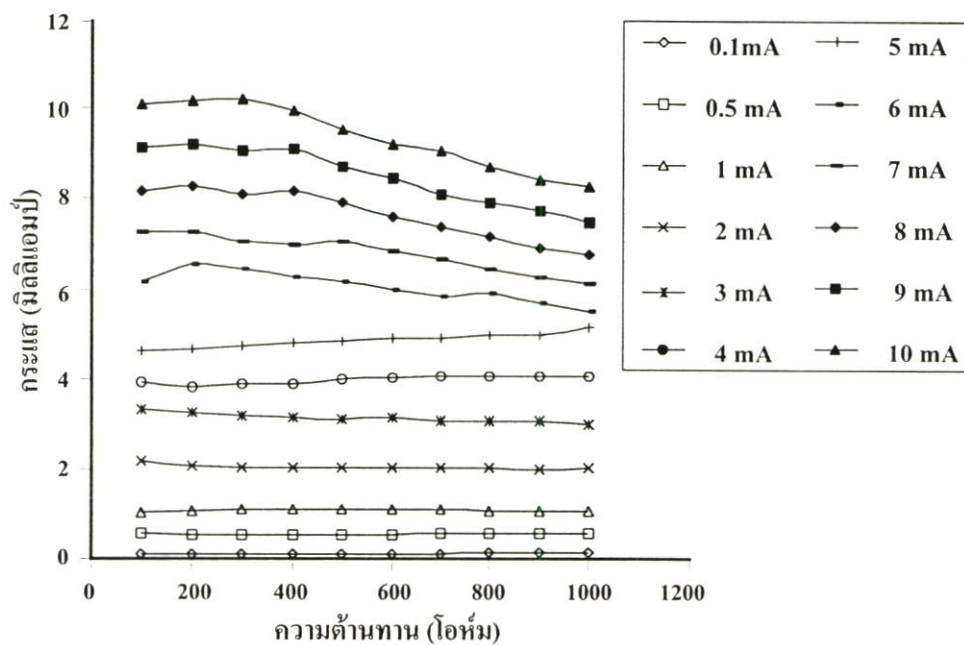
รูปที่ 7.7 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 1000-10000 โอห์มในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า



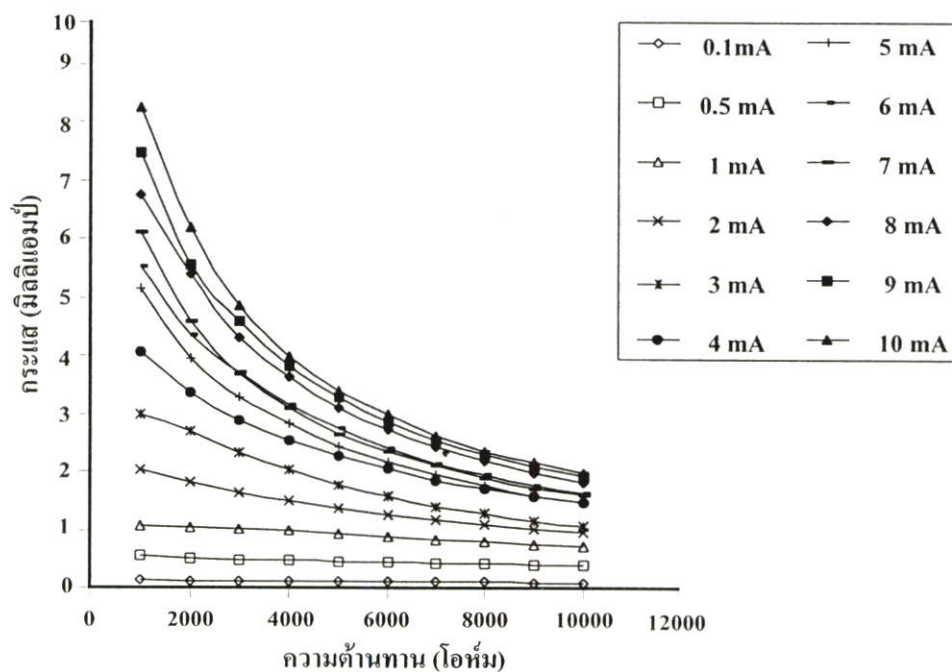
รูปที่ 7.8 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 1-10 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า



รูปที่ 7.9 ค่ากระแสที่ไหลผ่าน โหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 10-100 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า



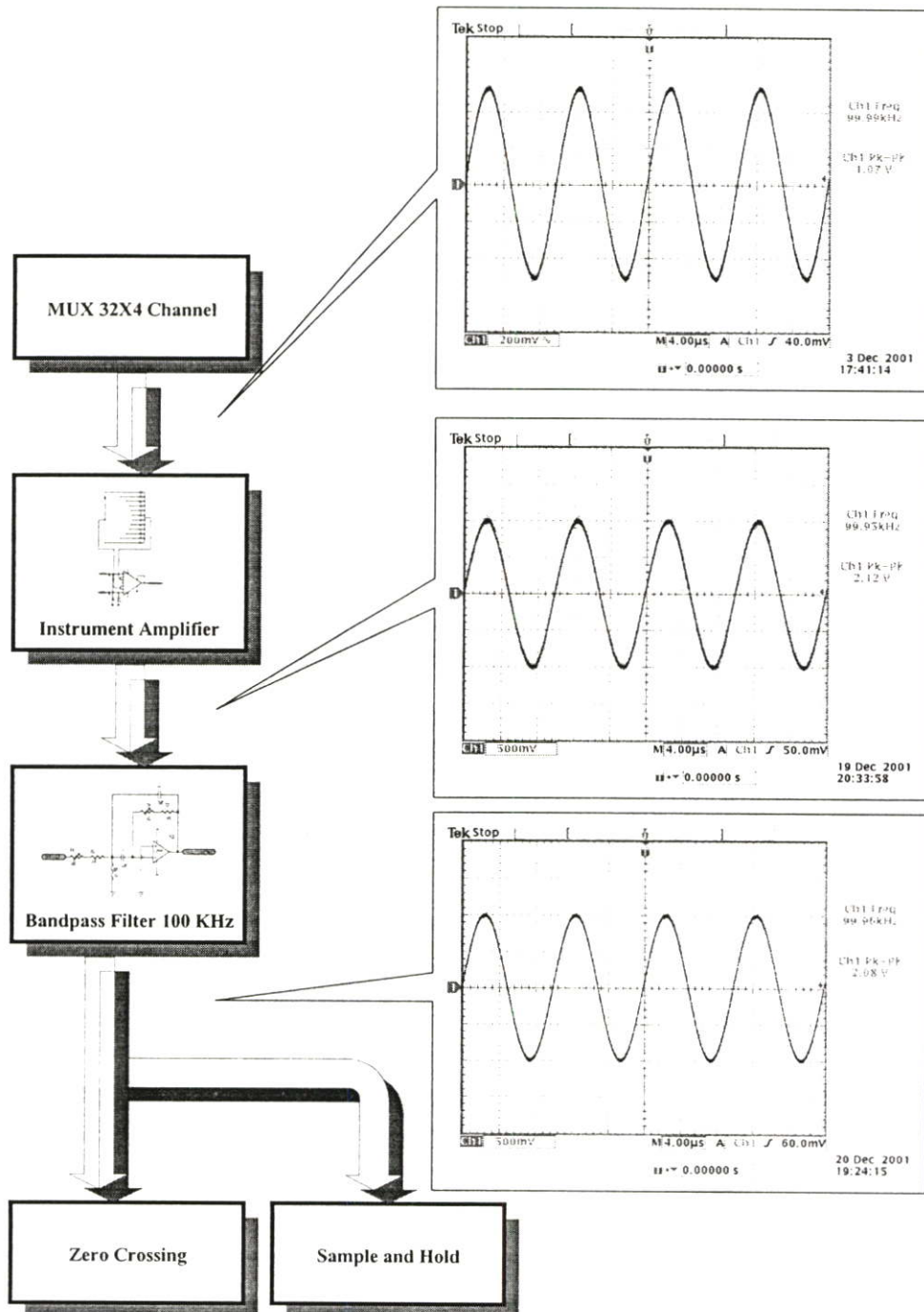
รูปที่ 7.10 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 100-1000 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า



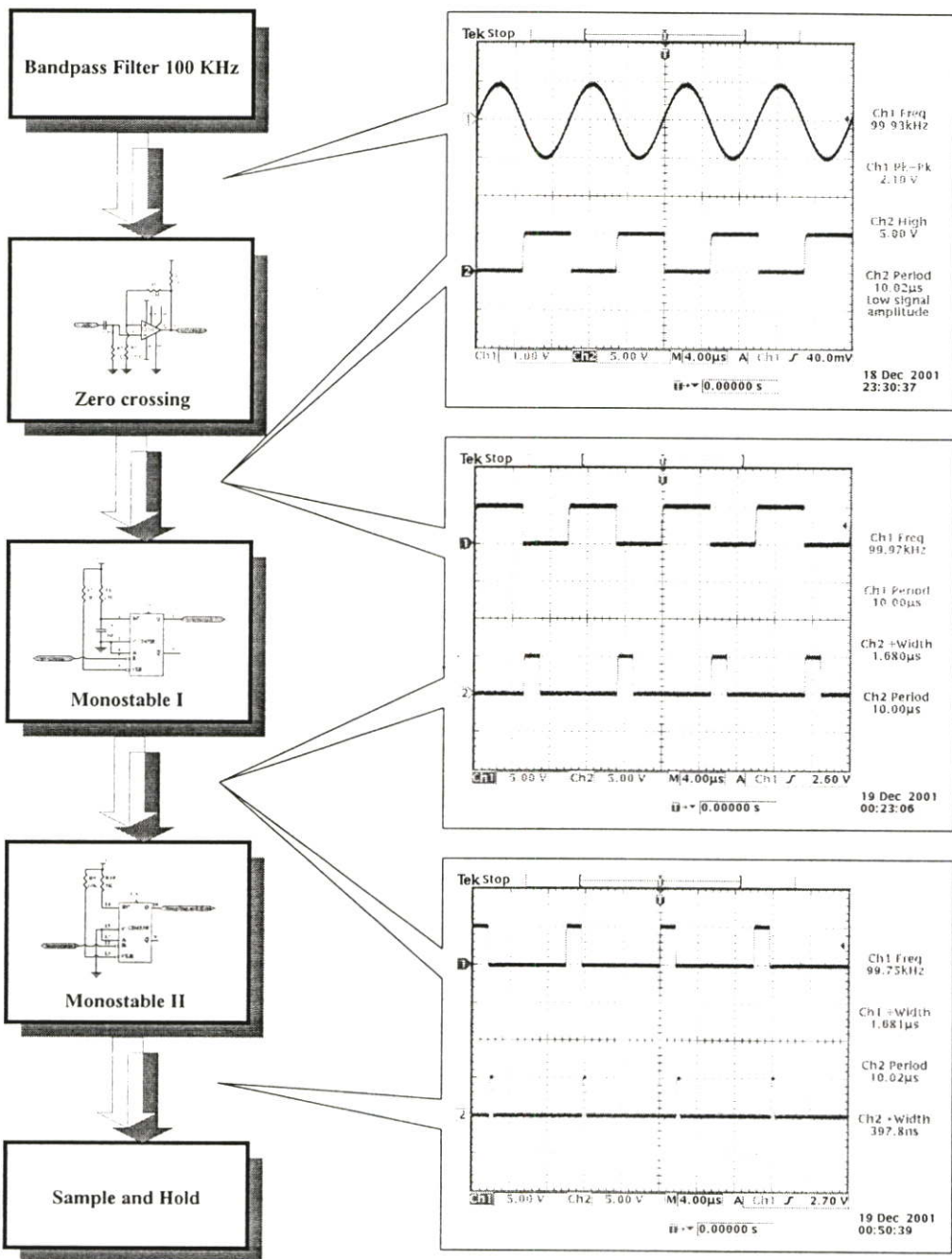
รูปที่ 7.11 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ในช่วงโหลด 1000-10000 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 12 ค่า

### 7.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอค

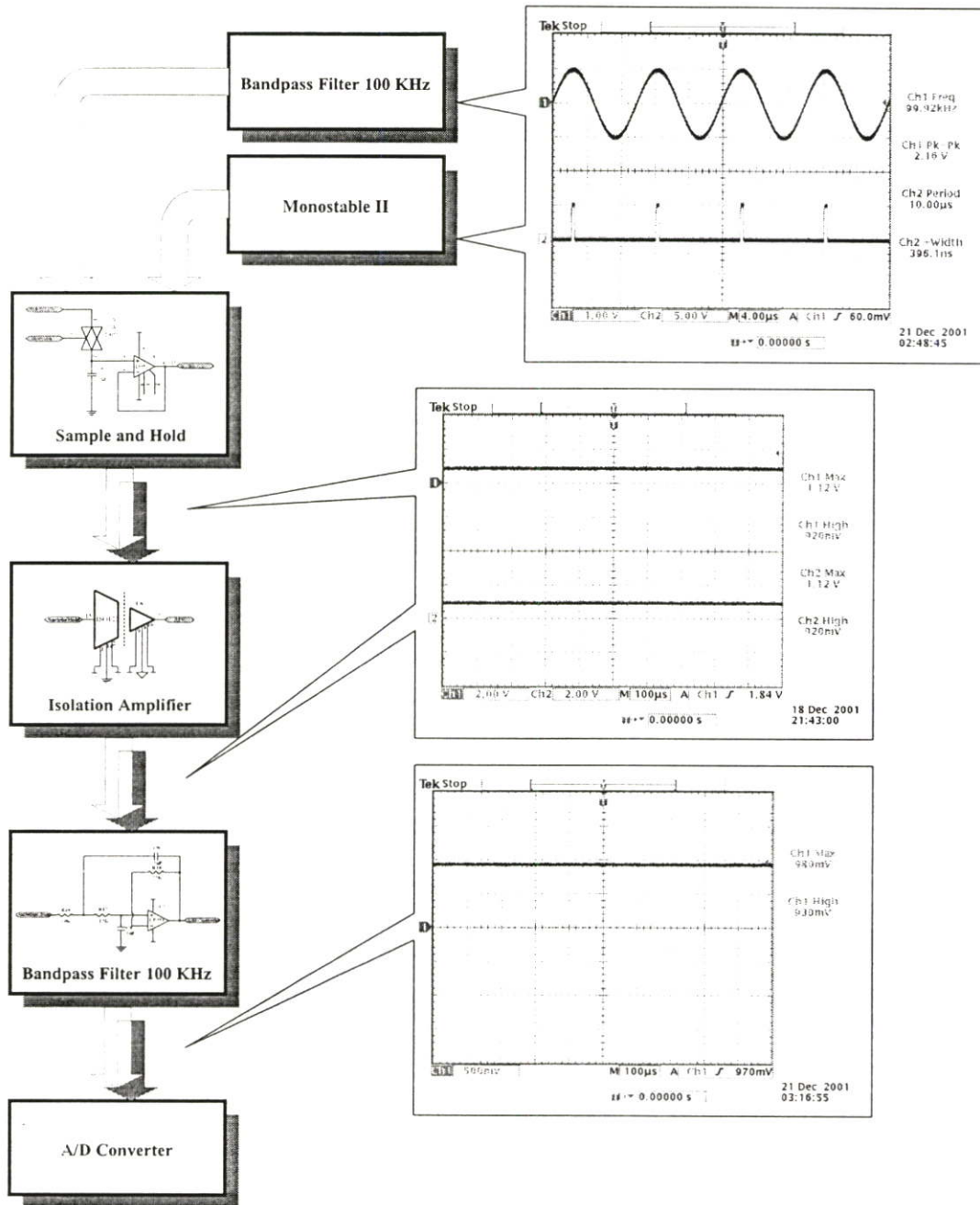
สำหรับสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอค สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.12 , 7.13 และรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.12 สัญญาณในส่วนต่างๆของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอค



รูปที่ 7.13 สัญญาณในส่วนต่าง ๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขด (ต่อ)



รูปที่ 7.14 สัญญาณในส่วนต่างๆ ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขด (ต่อ)

7.1.4 การทดสอบเสถียรภาพและความถี่ของวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันขด

สำหรับการออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันขดในระบบเก็บข้อมูล สามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรได้ 12 ค่าคือ 2, 6, 11, 21, 61, 101, 151, 201, 301, 501 และ 1001 เท่า แต่ค่าอัตราขยายที่ถูกต้องจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ใช้กำหนดอัตราขยายของวงจรอินสตรูเมนต์แอมพลิไฟด์ จากการวัดค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดอัตราขยายปรากฏว่ามี

ความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย ทำให้ค่าอัตราขยายจริงที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้เล็กน้อย โดยค่าอัตราขยายจริงสามารถแสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ค่าอัตราขยายจริงของวงจรอินสตรูเมนต์แอมพลิไฟร์ที่ใช้ทำงานอยู่ในช่วงอัตราขยายต่าง ๆ

ค่าความต้านทานกำหนด อัตราขยายที่ออกแบบไว้ (โอห์ม)	อัตราขยายที่ ออกแบบไว้ (เท่า)	ค่าความต้านทานจริงที่ใช้ กำหนดอัตราขยาย (โอห์ม)	ค่าอัตราการ ขยายจริง (เท่า)
6 K	2	5.89K	2.019
1.2 K	6	1.188K	6.05
600	11	593	11.118
300	21	297	21.202
150	41	148	41.5405
100	61	97.5	62.5385
60	101	61.5	98.561
40	151	41	147.341
30	201	30.6	197.079
20	301	20.2	298.03
12	501	12.5	481
6	1001	6.2	967.742

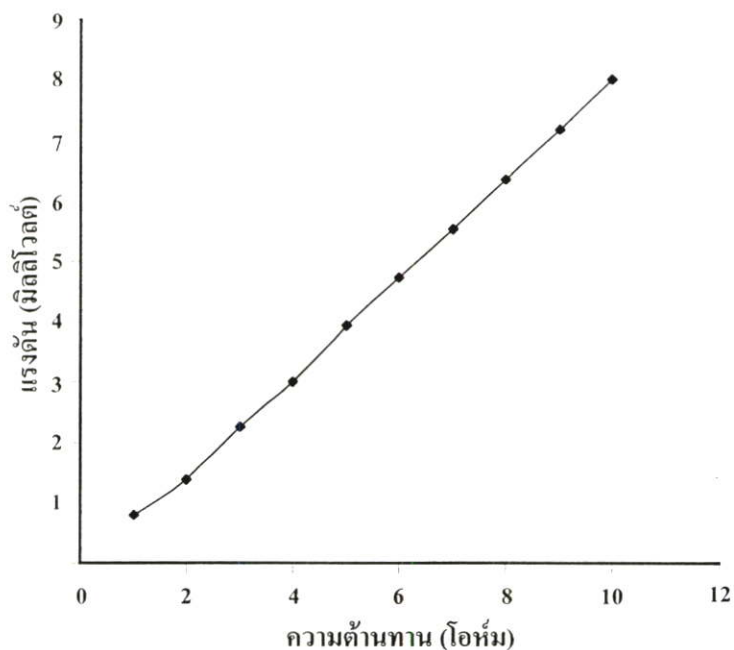
ในส่วนของการวัดค่าความถี่ของวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดจะทำการต่อวงจรสำหรับการวัดดังรูปที่ 7.15



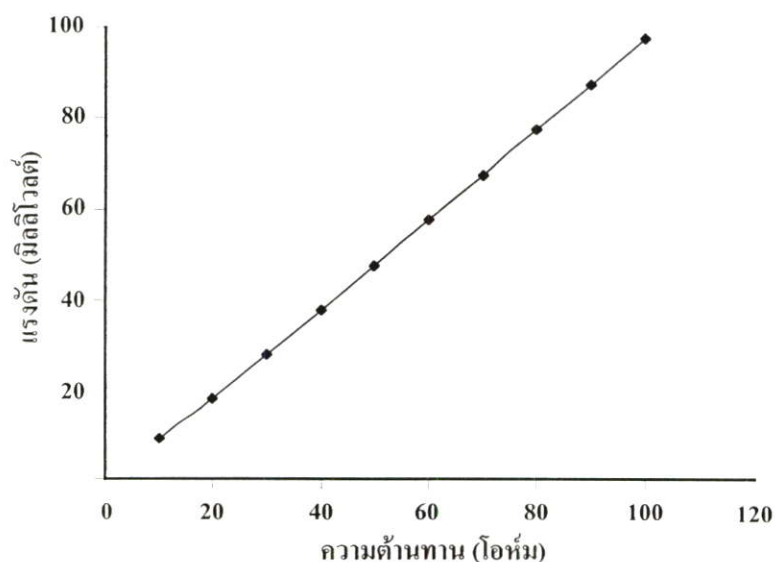
รูปที่ 7.15 การต่อวงจรเพื่อวัดค่าความถี่ของวงจรดีมอดูเลเตอร์แบบตรวจจับสัญญาณแรงดันยอด

จากวงจรในการวัดรูปที่ 7.15 จะทำการจ่ายกระแสไซน์เวฟคงที่  $1 \text{ mA}_{p-p}$  ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตให้กับโหลดโดยกำหนดค่าอัตราขยายของวงจรอินสตรูเมนต์แอมพลิไฟร์ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอดไว้ที่ 2 เท่าทำการปรับค่าความต้านทานของโหลดตั้งแต่ 1 โอห์มถึง 10 กิโล

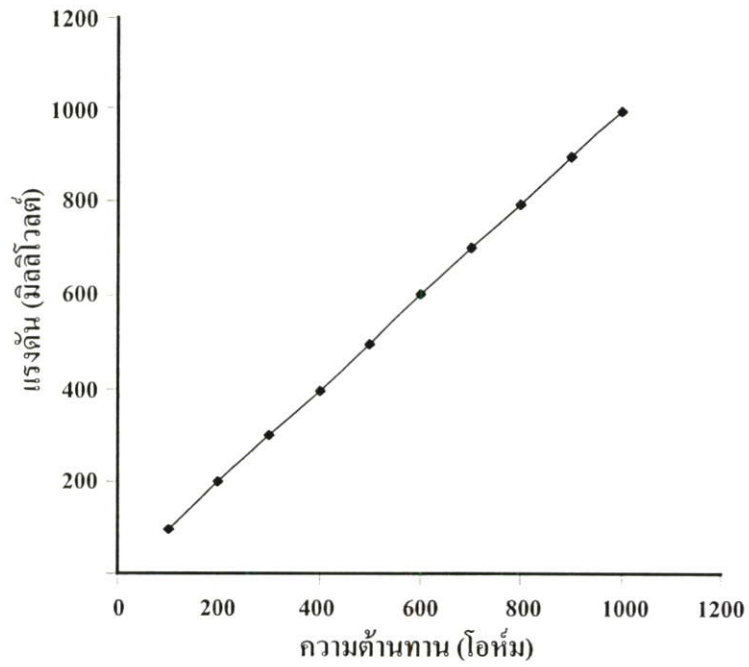
โอห์มแล้วทำการวัดค่าแรงดันที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอคที่ความต้านทานของโหลดค่าต่างๆจากนั้นจึงนำค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ไปพล็อตเพื่อเปรียบเทียบความเป็นลิเนียร์ของวงจรคิมคูเลเตอร์ในช่วงค่าความต้านทานของโหลดค่าต่างๆดังรูปที่ 7.16 ถึง 7.19



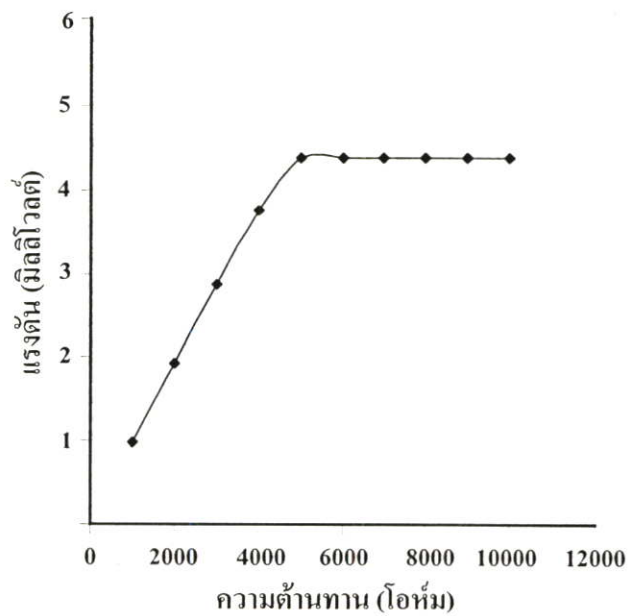
รูปที่ 7.16 ความลิเนียร์ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอคในช่วงค่าความต้านทานโหลด 1-10 โอห์ม



รูปที่ 7.17 ความลิเนียร์ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอคในช่วงค่าความต้านทานโหลด 10 - 100 โอห์ม



รูปที่ 7.18 ความถี่ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอในช่วงค่าความต้านทานโหลด 100 - 1000 โอห์ม



รูปที่ 7.19 ความถี่ของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันยอในช่วงค่าความต้านทานโหลด 1000 - 10000 โอห์ม

### 7.1.5 การทดสอบสัญญาณรบกวนในสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ได้จากระบบเก็บข้อมูล

การทดสอบสัญญาณรบกวนในสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ได้จากระบบเก็บข้อมูลเพื่อหาค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) ของระบบ ค่า SNR คือค่าสัญญาณสูงสุด (Full-Scale Signal) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ทั้งหมดของระบบ โดยเราสามารถหาค่า SNR ของระบบ [17] ได้จากสมการที่ (7.1)

$$\text{SNR} = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N V_n^2}{\sum_n (V_n - \bar{V})^2} \right\} \quad (7.2)$$

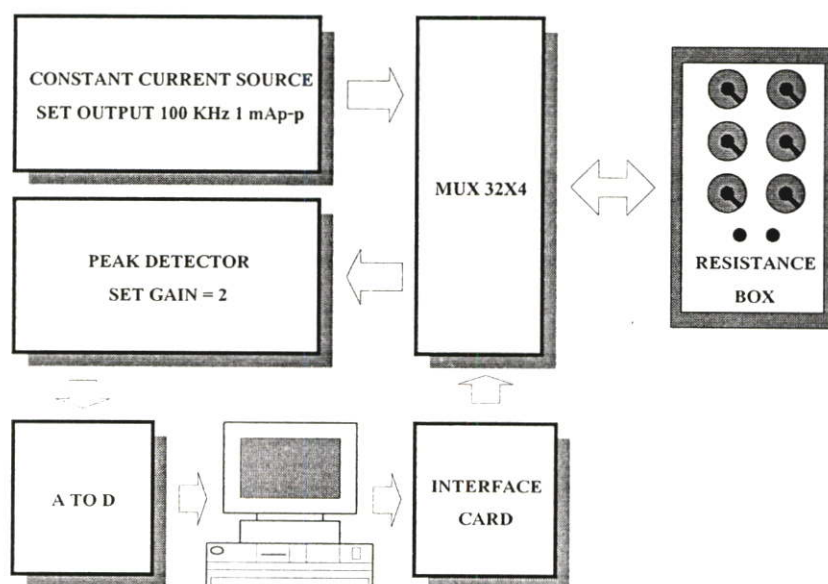
เมื่อ SNR = ค่าซิกแนลต่อสัญญาณรบกวนของระบบ (dB)

$V_n$  = ค่าแรงดันของสัญญาณที่วัดได้จากการเก็บข้อมูลครั้งที่  $n$  (V)

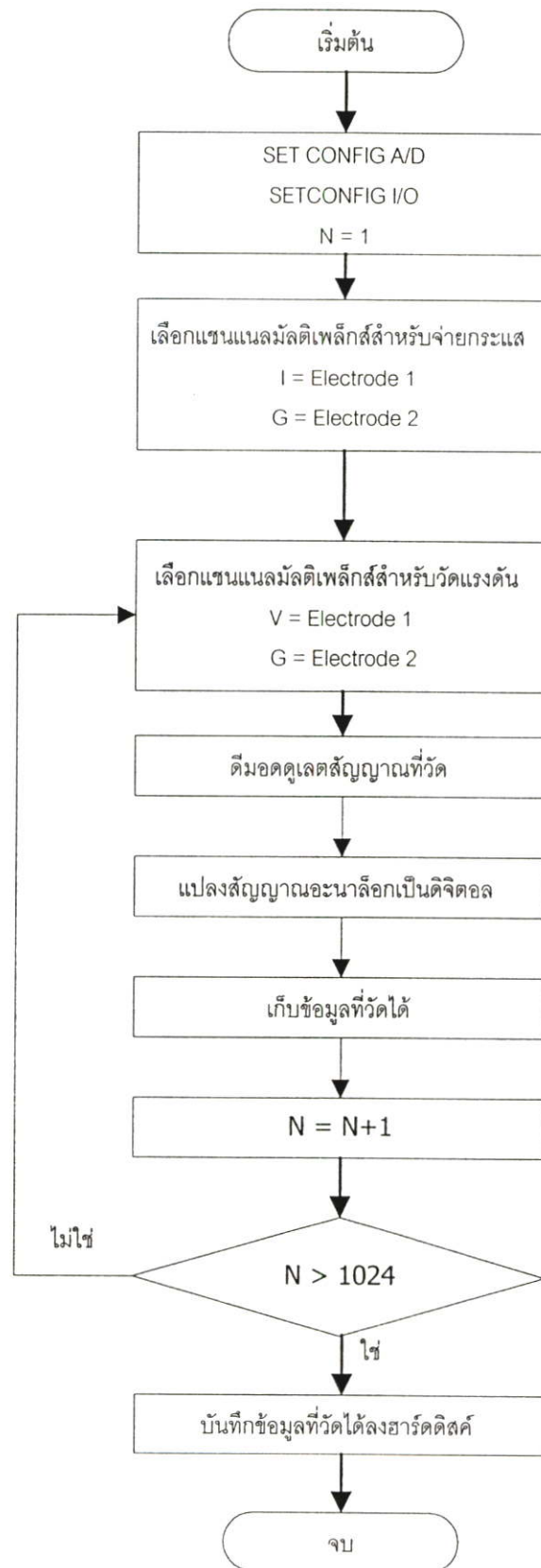
$\bar{V}$  = ค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณที่วัดได้ทั้งหมด (V)

$N$  = จำนวนครั้งของการเก็บข้อมูล (ครั้ง)

ในการวัดสัญญาณรบกวนในสัญญาณเอาต์พุตของระบบเก็บข้อมูลจะทำการต่อระบบเก็บข้อมูลเพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 7.20 โดยมีโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลเพื่อวัดสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูปที่ 7.21

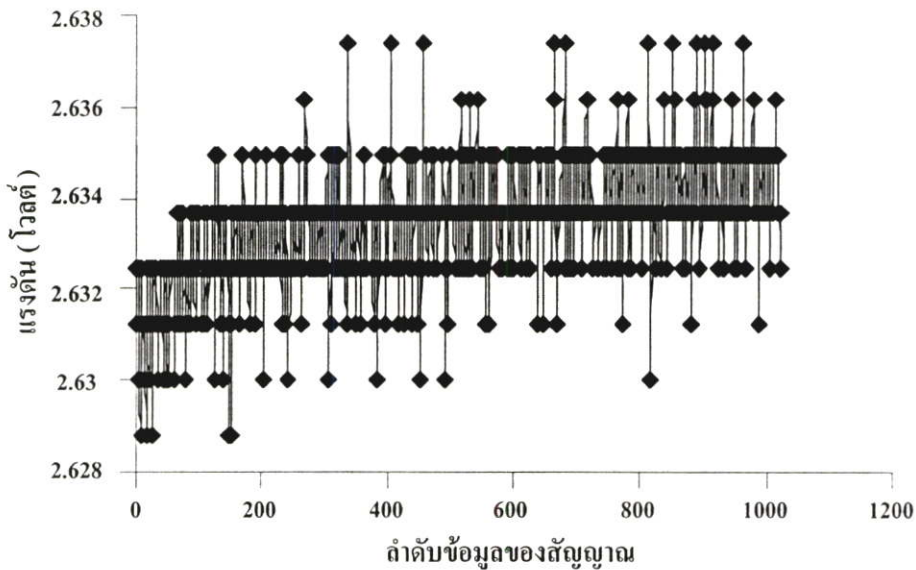


รูปที่ 7.20 การต่อระบบเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสัญญาณรบกวน



รูปที่ 7.21 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 7.21 โปรแกรมจะควบคุมให้ระบบเก็บข้อมูลทำการเก็บข้อมูล โดยจ่ายกระแสที่ อิเล็กโทรด 1 และกรวดน้ำของวงจรจ่ายกระแสต่อที่อิเล็กโทรด 2 แล้วทำการวัดแรงดันโดยขั้วบวก ของวงจรคีมอคูเลเตอร์ต่อที่อิเล็กโทรดที่ 1 และกรวดน้ำของวงจรคีมอคูเลเตอร์ต่อที่อิเล็กโทรด 2 โดย จะทำการเก็บข้อมูลที่จุดเดียวกันนี้ 1024 ครั้ง จากนั้นจึงนำเอาแรงดันที่วัดได้ทั้ง 1024 ครั้งมาพล็อต เพื่อการเปรียบเทียบของสัญญาณเอาท์พุทอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่ค่าความต้านทานโหลด 1 กิโลโอห์ม ดังแสดงดังรูปที่ 7.22



รูปที่ 7.22 กราฟการเบี่ยงเบนของสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากระบบเก็บข้อมูลทั้ง 1024 ครั้ง ที่ค่าความต้านทานโหลด 1 กิโลโอห์ม

จากรูปที่ 7.22 และสมการที่ 7.1 เราสามารถหาค่า SNR เฉลี่ยของระบบเก็บข้อมูลได้ดังนี้

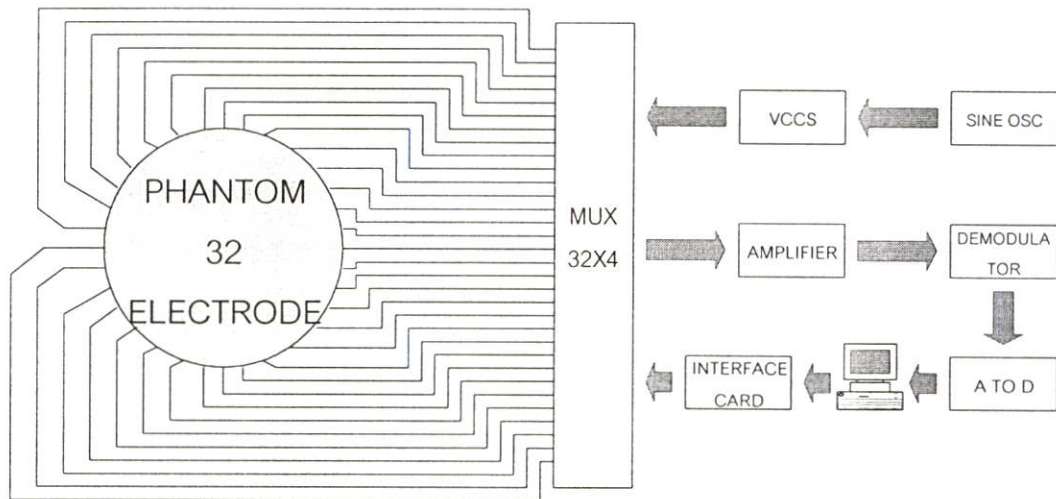
$$\text{SNR} = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{n=1}^{1024} V_n^2}{\sum_n (V_n - \bar{V})^2} \right\} = 10 \log \left\{ \frac{7101.68}{0.001928627} \right\} \quad (7.3)$$

$$= 10 \log 3682246.489 = 65.661 \text{ dB}$$

∴ ค่า SNR เฉลี่ยของระบบในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 65.6611 dB

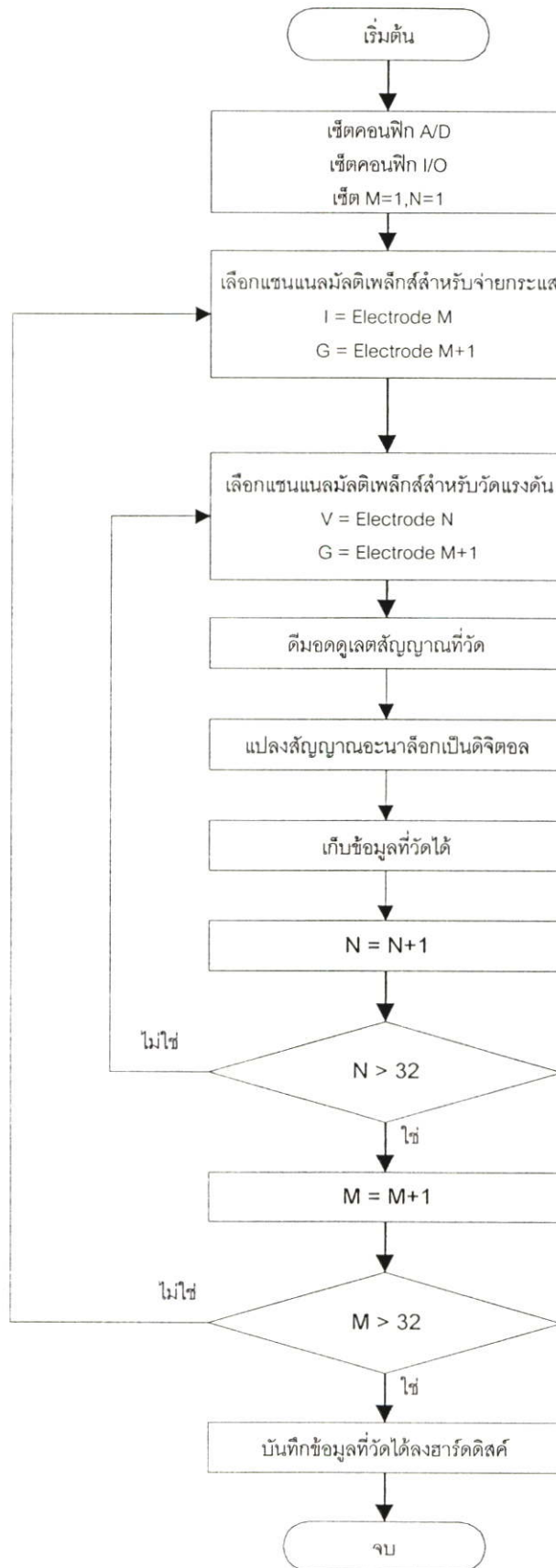
## 7.2 การทดสอบระบบเก็บข้อมูลกับแบบจำลอง (Phantom) ขนาด 32 อิเล็กโทรด

ในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นไปทดสอบกับระบบจำลองขนาด 32 อิเล็กโทรดซึ่งเป็นถังบรรจุน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ติดอิเล็กโทรดจำนวน 32 อิเล็กโทรดโดยรอบ ภายในบรรจุเฉพาะน้ำเกลืออย่างเดียว (ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้ เกลือโซเดียมคลอไรด์ : น้ำ เป็น 9 มิลลิกรัม : 100 มิลลิลิตร) แล้วทำการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีจ่ายกระแสและวัดแรงดันแบบขั้วข้างเคียงและแบบขั้วตรงข้าม โดยลักษณะการต่อระบบเก็บข้อมูลกับแบบจำลองสามารถแสดงดังรูปที่ 7.23

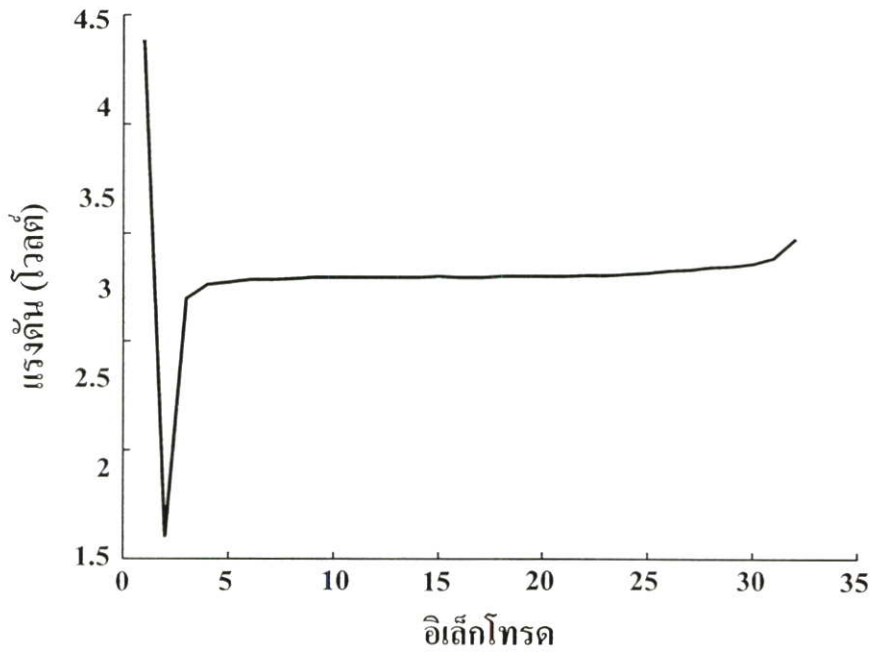


รูปที่ 7.23 การต่อระบบเก็บข้อมูลเข้ากับแบบจำลอง 32 อิเล็กโทรดเพื่อทำการทดลอง

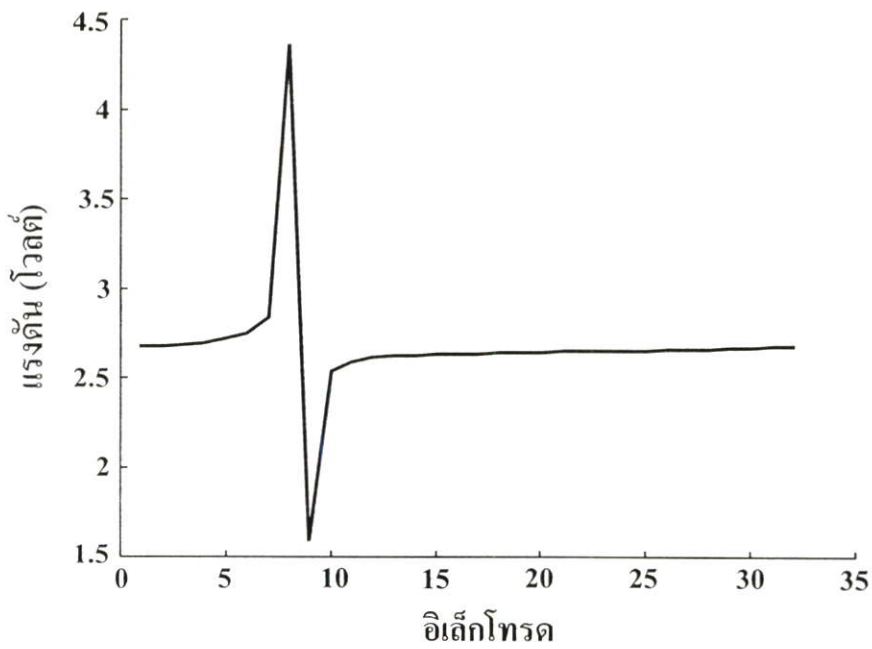
จากการต่อระบบเก็บข้อมูลในรูปที่ 7.23 จะทำการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียงโดยมีไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมเก็บข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 7.24 แล้วนำสัญญาณที่ได้ในโปรเจกชันที่ 1, 8, 16, 24 และ โปรเจกชันที่ 32 แสดงดังในรูปที่ 7.25 ถึงรูปที่ 7.29



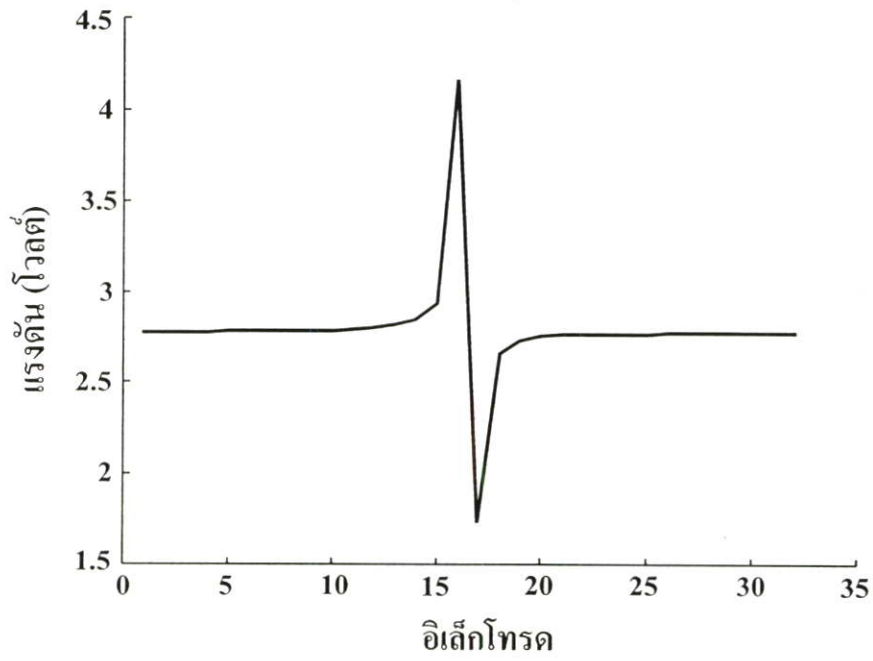
รูปที่ 7.24 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า



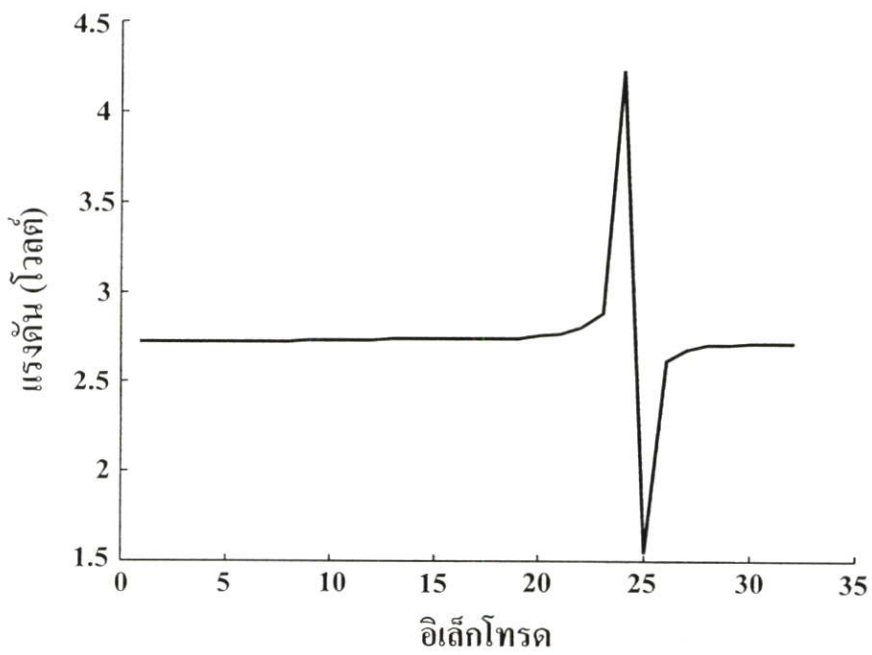
รูปที่ 7.25 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 1)



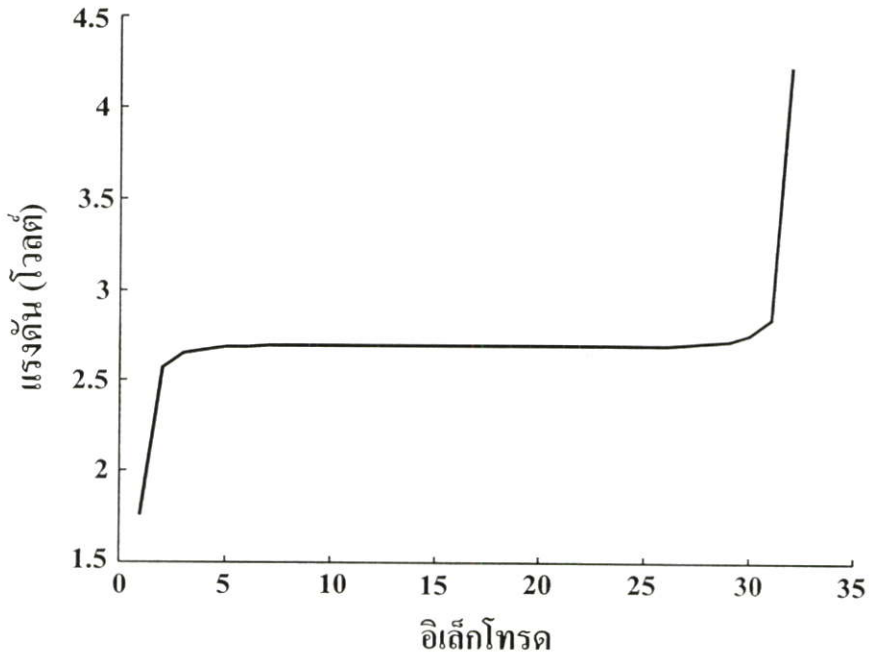
รูปที่ 7.26 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 8)



รูปที่ 7.27 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 16)



รูปที่ 7.28 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง (โปรเจกชันที่ 24)



รูปที่ 7.29 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้ในการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเดียว (โปรเจกชันที่ 32)

ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากระบบเก็บข้อมูลจะถูกเก็บไว้ใน M ไฟล์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเมตริกซ์ขนาด 32X32 เมื่อทำการวัดแบบชั่วข้ามเดียว ซึ่งพร้อมจะนำไปคำนวณโดยอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางต่อไป สำหรับลักษณะของข้อมูลที่เก็บไว้ใน M ไฟล์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.30

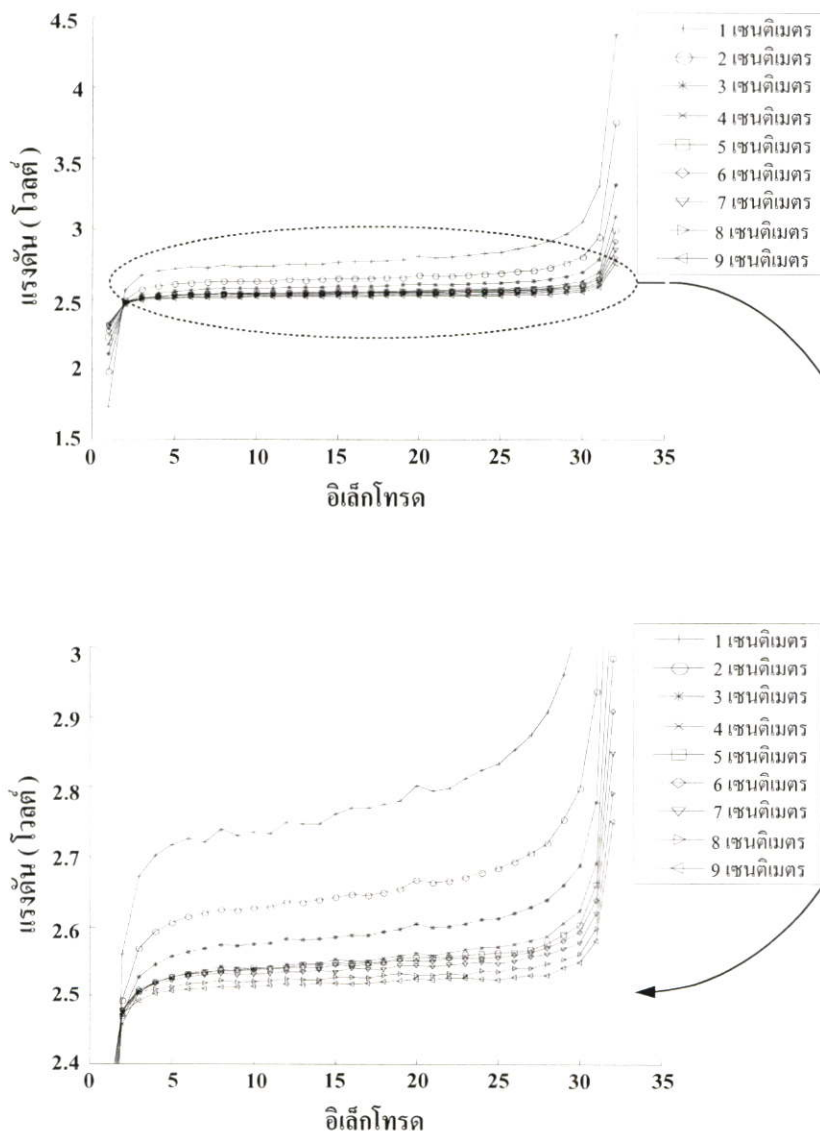
$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{V}_{1,1} & \mathbf{V}_{1,2} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{V}_{1,31} & \mathbf{V}_{1,32} \\
 \mathbf{V}_{2,1} & \mathbf{V}_{2,2} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{V}_{2,31} & \mathbf{V}_{2,32} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \mathbf{V}_{31,1} & \mathbf{V}_{31,2} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{V}_{31,31} & \mathbf{V}_{31,32} \\
 \mathbf{V}_{32,1} & \mathbf{V}_{32,2} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{V}_{32,31} & \mathbf{V}_{32,32}
 \end{bmatrix}_{32 \times 32}$$

รูปที่ 7.30 ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเดียว ที่เก็บไว้ในรูปแบบ M ไฟล์ซึ่งเป็นเมตริกซ์ของแรงแดัน (V) ขนาด 32 x 32

### 7.2.1 การทดสอบผลของความหนาของระบบจำลองต่อสัญญาณที่วัดได้จากระบบเก็บ

#### ข้อมูล

ในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นไปทดสอบกับจำลองซึ่งเป็นถังบรรจุน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 เซนติเมตร ที่ติดอิเล็กโทรด 32 อิเล็กโทรดโดยรอบ โดยจะทำการเก็บข้อมูลทั้งแบบขั้วข้างเคียงและแบบขั้วตรงข้าม ณ ที่ระดับความสูงของน้ำเกลือในระดับต่างๆ 9 ระดับ คือ 1,2,3,4,5,6,7,8 และ 9 เซนติเมตร (เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จะได้  $1/18$  ,  $2/18$  ,  $3/18$  ,  $4/18$  ,  $5/18$  ,  $6/18$  ,  $7/18$  ,  $8/18$  และ  $9/18$  ตามลำดับ) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้อามาพล็อตเปรียบเทียบกันเพื่อศึกษาผลของความหนาของระดับน้ำเกลือในถึงน้ำเกลือต่อข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้ด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียงดังแสดงในรูปที่ 7.31

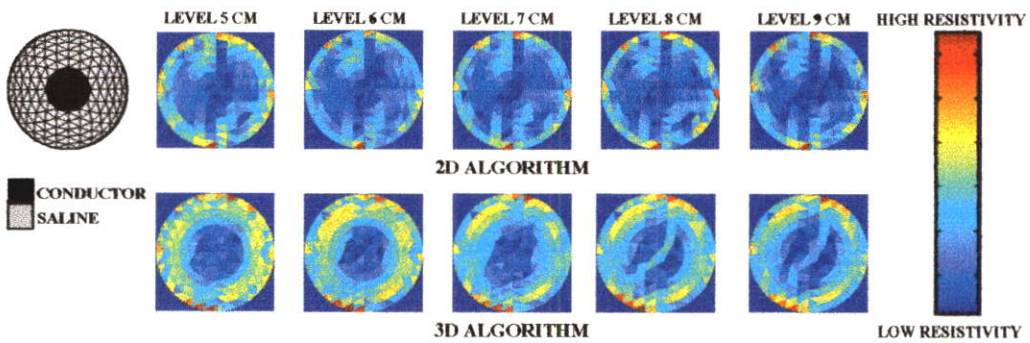


รูปที่ 7.31 ลักษณะของสัญญาณที่ระดับความสูงน้ำเกลือระดับต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง (โปรเจกชันที่ 32)

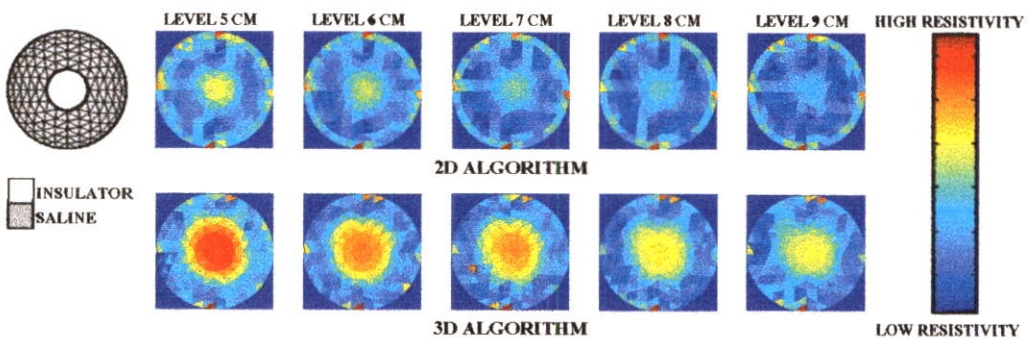
จากกราฟรูปที่ 7.31 จะเห็นว่าเมื่อค่าความหนาของระดับน้ำเกลือเพิ่มขึ้น ค่าความชันของกราฟของสัญญาณที่วัดได้จะลดลง เนื่องจากเมื่อความหนาของระดับน้ำเกลือเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความต้านของวัตถุมีค่าลดลง ดังนั้นหากเราจ่ายค่ากระแสให้กับวัตถุเท่าเดิม ค่าแรงดันที่วัดได้ก็จะมีค่าลดลง

### 7.2.2 การทดสอบผลของระดับน้ำเกลือในถังน้ำเกลือต่อภาพตัดขวางที่สร้างได้

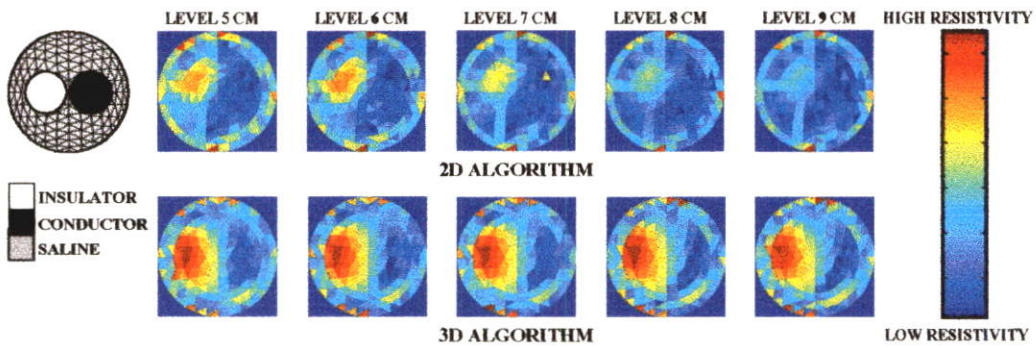
การทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของวัตถุที่มีความสูงต่างกันแต่วัตถุภายในมีขนาดเท่ากัน โดยในการทดสอบจะใช้แท่งตัวนำหรือฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร วางไว้ตรงกลางถังน้ำเกลือแล้วทำการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง โดยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเกลือเป็นระดับต่างๆ คือ 5 , 6 , 7 , 8 , 9 และ 10 เซนติเมตร แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติโดยภาพตัดขวางที่สร้างได้สามารถแสดงดังรูปที่ 7.32 ถึง รูปที่ 7.37



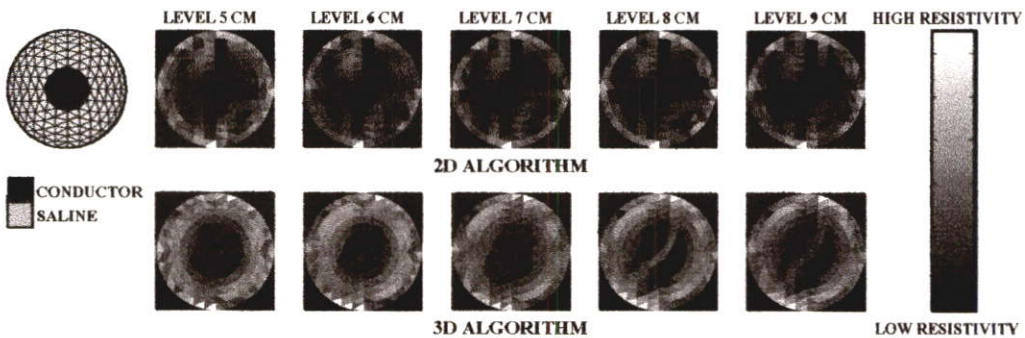
รูปที่ 7.32 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถังน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



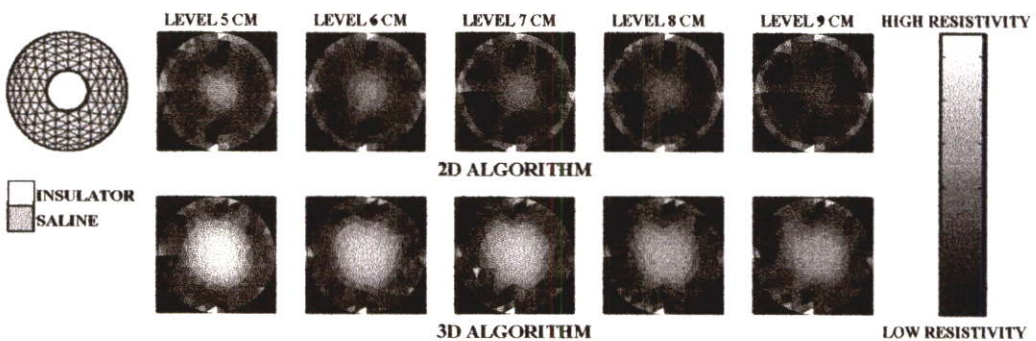
รูปที่ 7.33 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถังน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



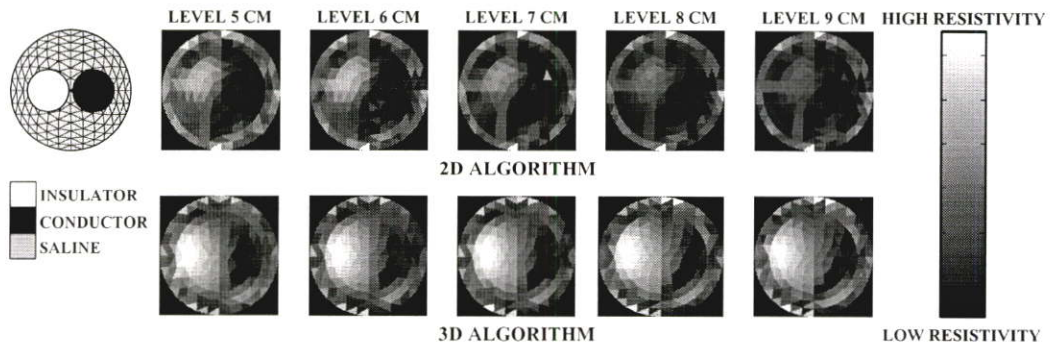
รูปที่ 7.34 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นฉนวนและตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



รูปที่ 7.35 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



รูปที่ 7.36 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

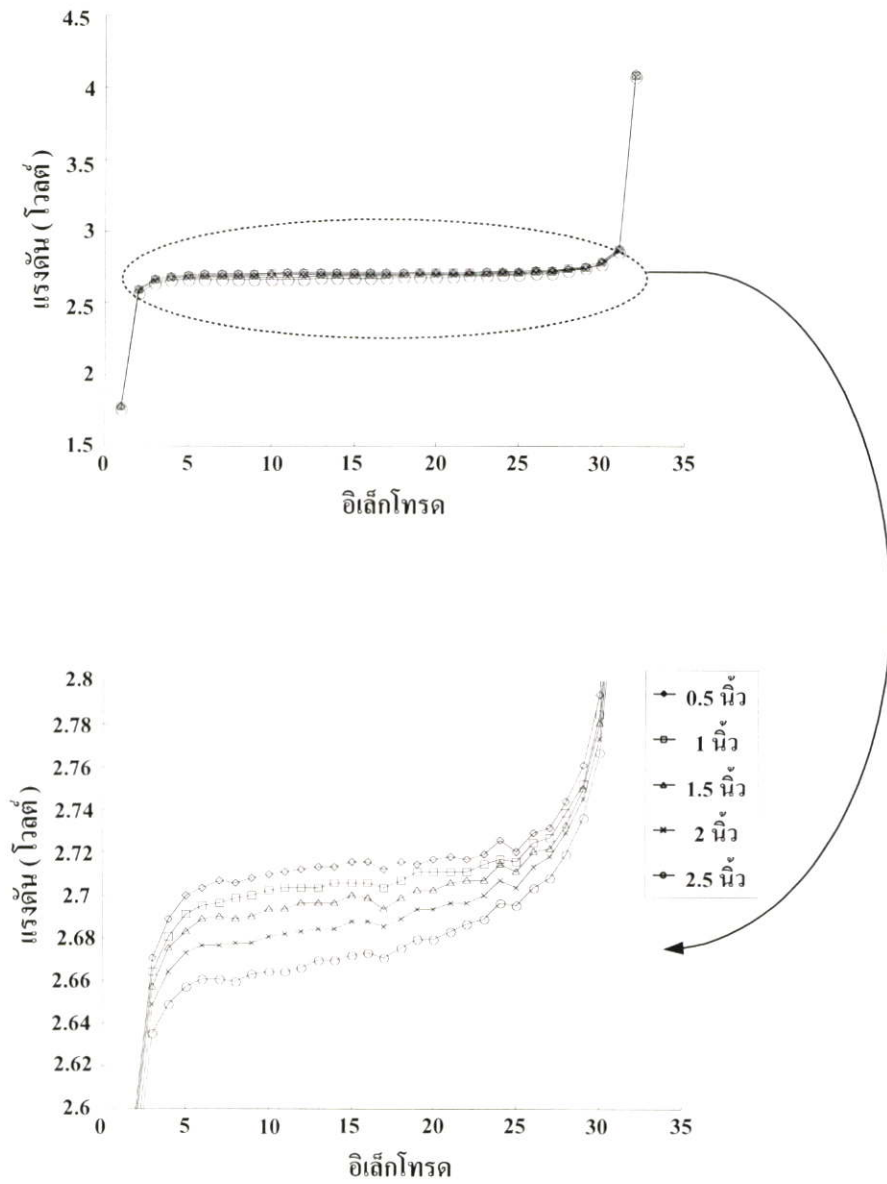


รูปที่ 7.37 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้จากข้อมูลที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นตัวนำและฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือต่างๆ โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

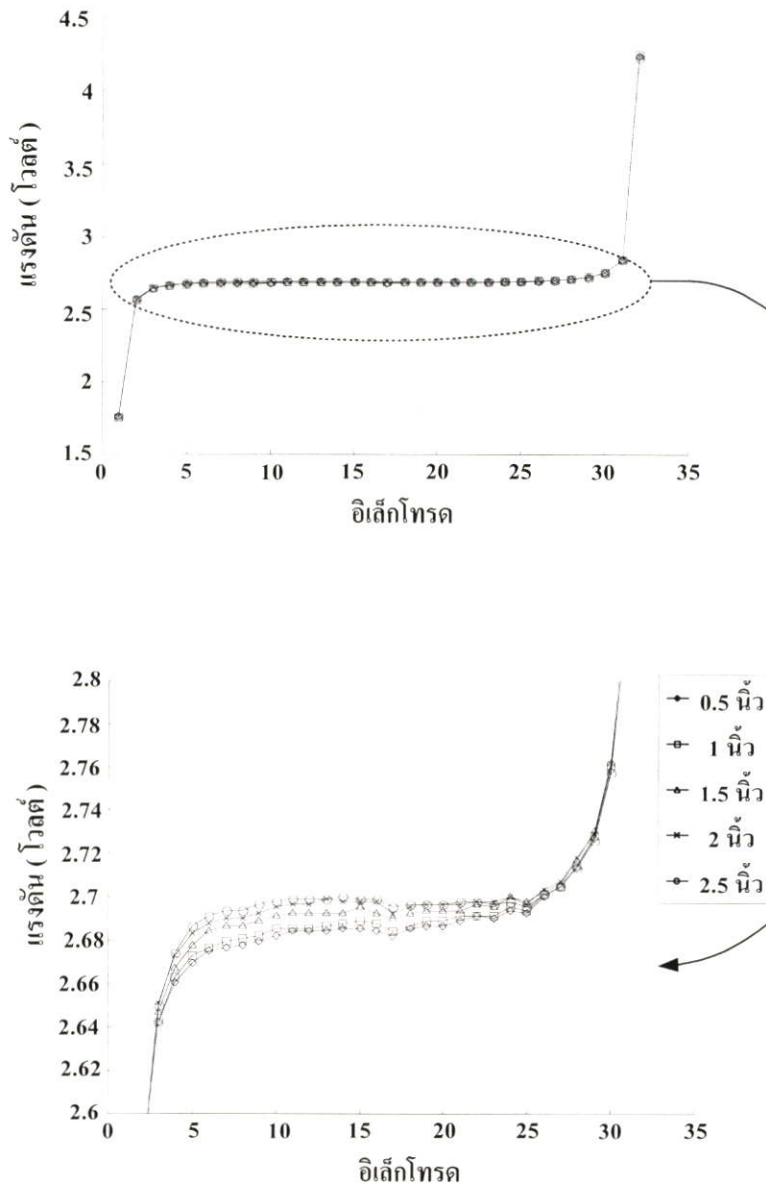
จากรูปที่ 7.32 ถึงรูปที่ 7.37 เมื่อเรานำค่าสัญญาณที่วัดจากถึงน้ำเกลือที่ค่าความหนาของระดับน้ำเกลือต่างๆมาสร้างภาพตัดขวางโดยอัลกอริทึมแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ผลปรากฏว่า ภาพที่ได้จากการนำสัญญาณของการวัดถึงน้ำเกลือที่น้ำเกลือระดับต่ำจะให้ภาพที่มีความถูกต้องชัดเจนกว่าภาพที่ได้จากการนำสัญญาณของการวัดถึงน้ำเกลือระดับสูงมาสร้าง โดยที่อัลกอริทึมแบบ 3 มิติ จะให้ภาพที่มีความถูกต้องมากกว่าภาพที่ได้จากอัลกอริทึมแบบ 2 มิติ

### 7.2.3 การทดสอบผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในแบบจำลองต่อสัญญาณที่วัดได้จากระบบเก็บข้อมูล

โดยในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้น ไปทดสอบกับแบบที่จำลองซึ่งเป็นถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ติดอิเล็กโทรดจำนวน 32 อิเล็กโทรดโดยรอบบรรจุน้ำเกลือที่ความสูง 5 เซนติเมตร แล้วทำการใส่วัตถุตัวนำหรือฉนวนขนาดต่างๆไว้ตรงกลาง แล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้อามาเปรียบเทียบกันเพื่อศึกษาผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในถึงน้ำเกลือต่อข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.38 และรูปที่ 7.39



รูปที่ 7.38 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นจนวนขนาดต่างๆ ไว้ตรงกลาง ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง (โปรเจกชันที่ 32)



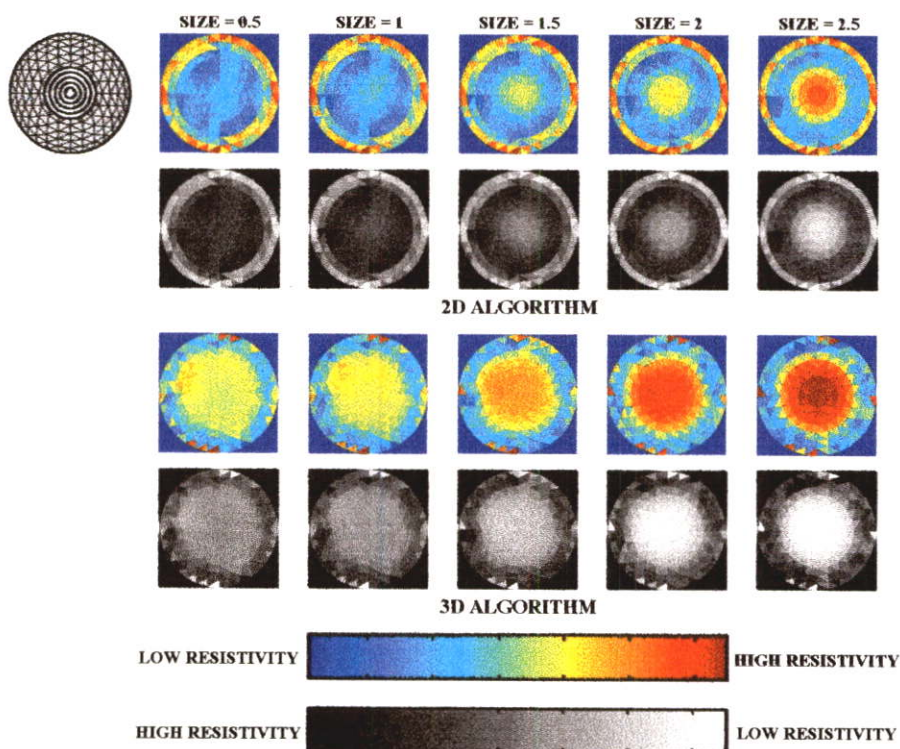
รูปที่ 7.39 ลักษณะของสัญญาณที่วัดได้เมื่อใส่วัตถุที่เป็นตัวนำขนาดต่างๆไว้ตรงกลางที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วขณะ (โปรเจกชันที่ 32)

จากกราฟรูปที่ 7.38 และรูปที่ 7.39 จะเห็นว่าถ้าองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุเป็นตัวนำ ค่าความชันของกราฟของสัญญาณที่เก็บได้นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นเป็นฉนวน ค่าความชันของกราฟสัญญาณที่เก็บได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น

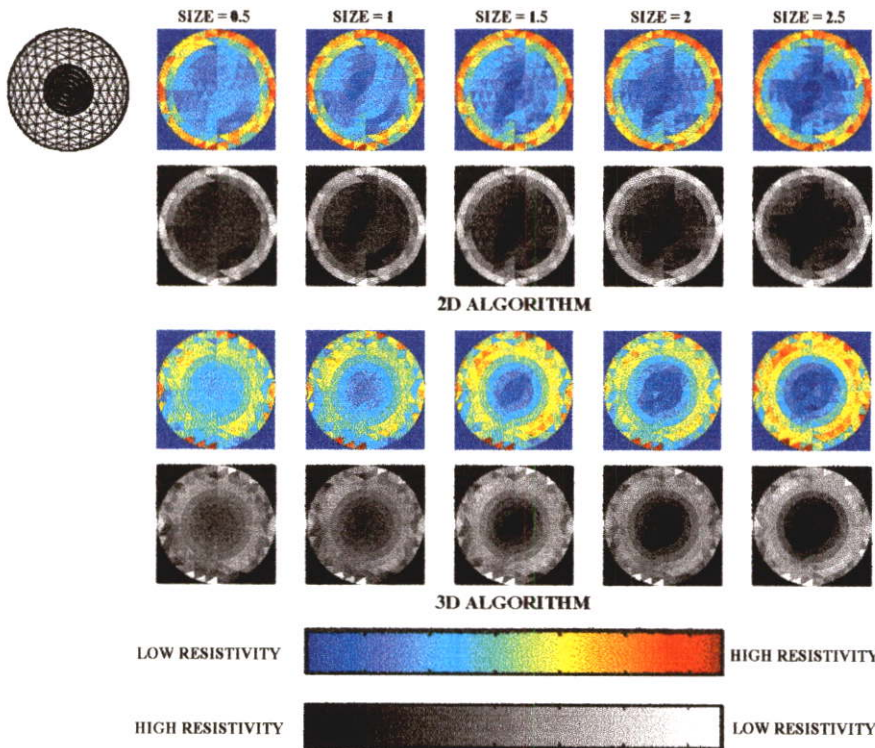
## 7.2.4 การทดสอบผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในถังน้ำเกลือ (แบบจำลอง) ต่อภาพตัดขวางที่สร้างได้

สำหรับผลการทดสอบผลของขนาดวัตถุที่อยู่ในถังน้ำเกลือต่อภาพตัดขวางที่สร้างได้เพื่อศึกษาความสามารถในการแยกแยะวัตถุที่มีขนาดต่างๆกัน เราจะนำข้อมูลจากการทดลองในหัวข้อ

7.2.3 มาทำการสร้างภาพตัดขวางของถังน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุตัวนำหรือฉนวนขนาดต่างๆไว้ตรงกลางนั้น โดยอัลกอริธึมแบบ 2 มิติและอัลกอริธึมแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 7.40 และรูปที่ 7.41



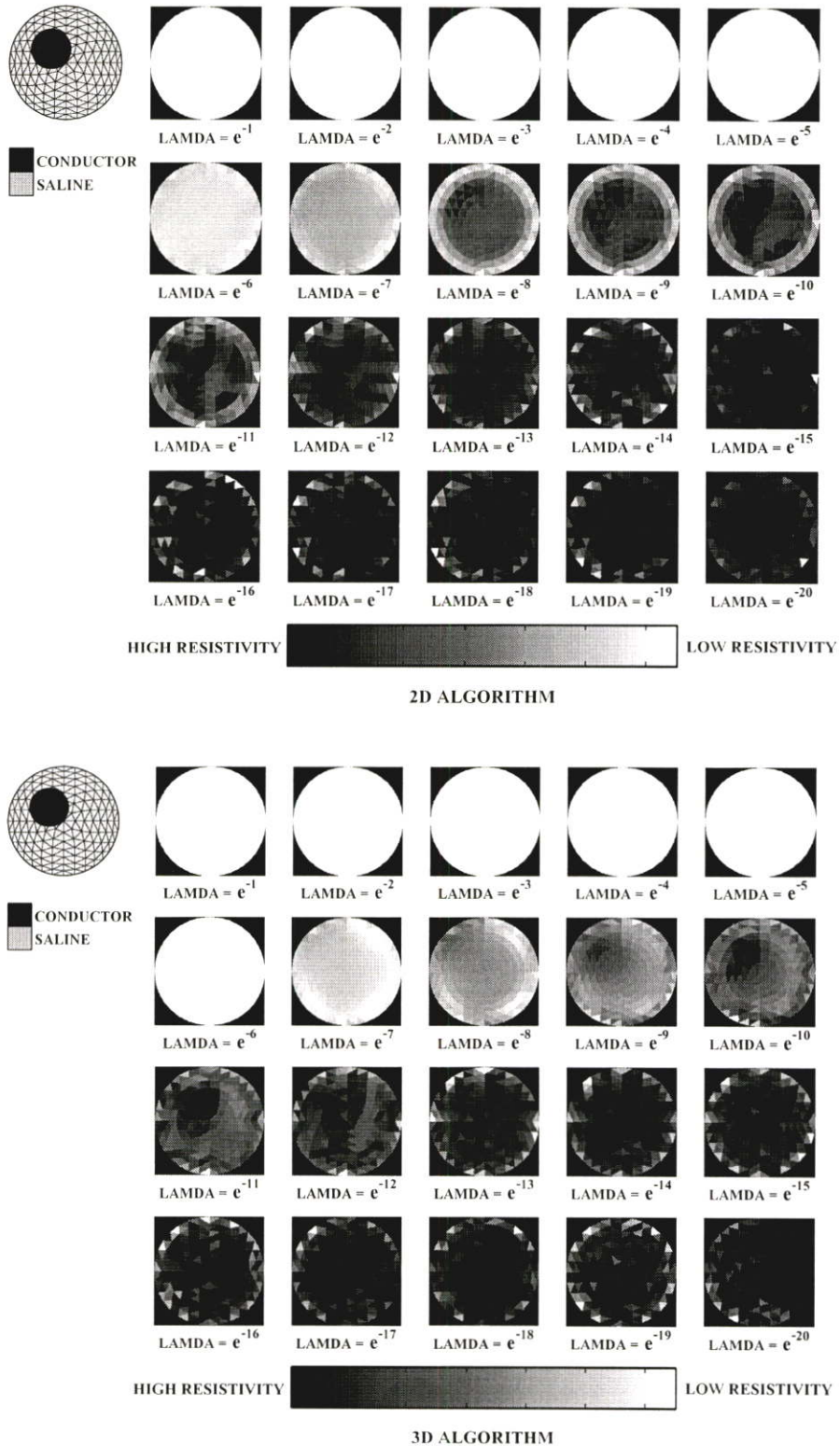
รูปที่ 7.40 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่วัดได้จากถังน้ำเกลือเมื่อทำการใส่วัตถุที่เป็นฉนวนขนาดต่างๆไว้ตรงกลางที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



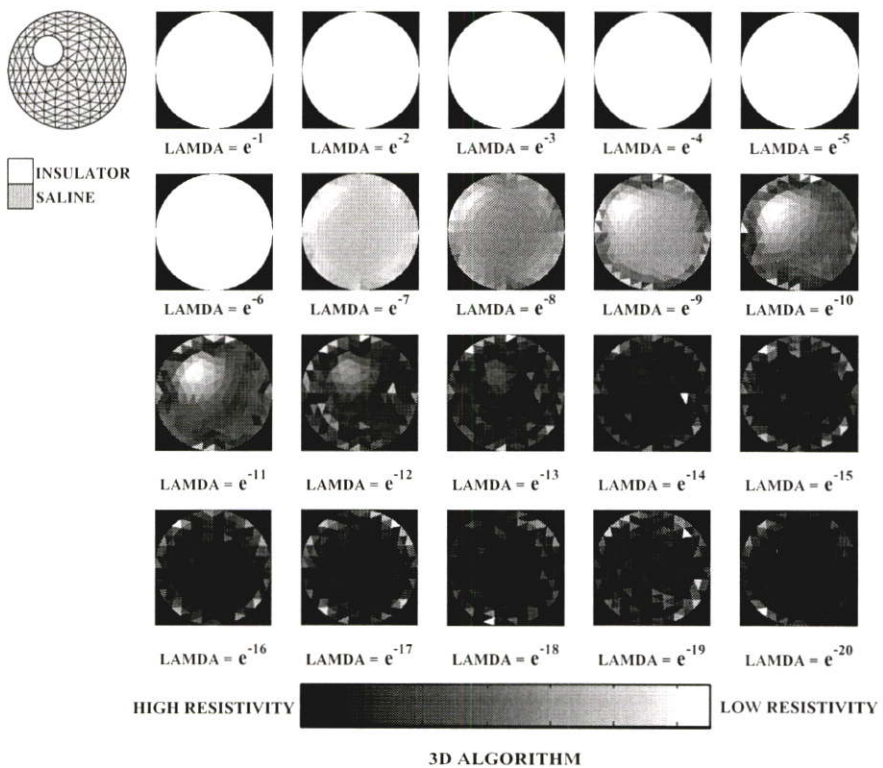
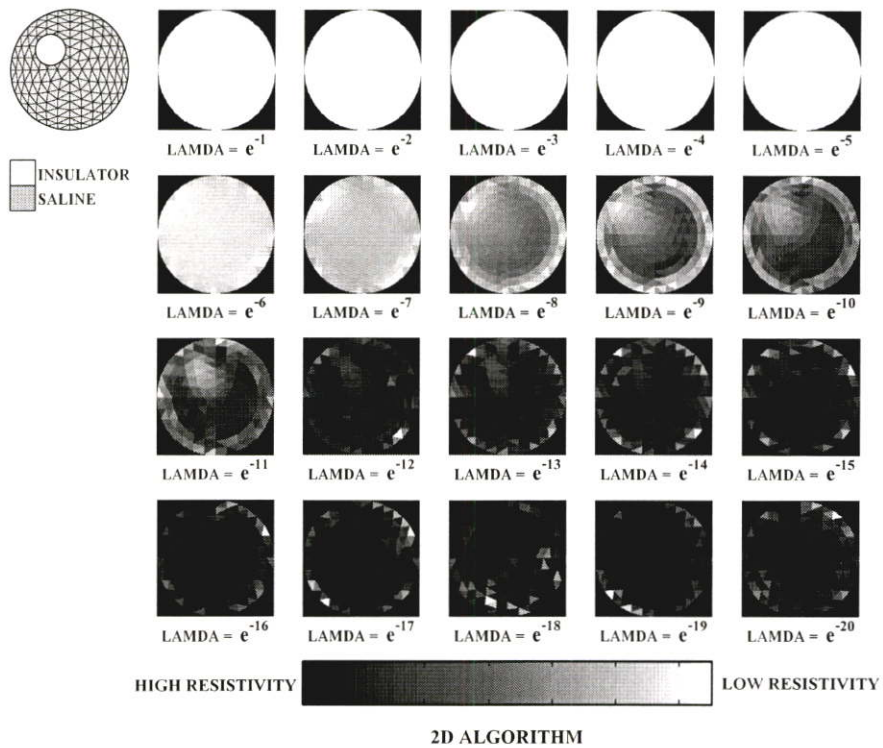
รูปที่ 7.41 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่วัดได้จากถังน้ำเกลือ เมื่อทำใส่วัตถุที่เป็นตัวนำขนาดต่างๆไว้ตรงกลางที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

จากรูปที่ 7.40 และรูปที่ 7.41 จะเห็นว่าเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ภาพตัดขวางที่สร้างได้ก็จะมีคมชัดเพิ่มขึ้น

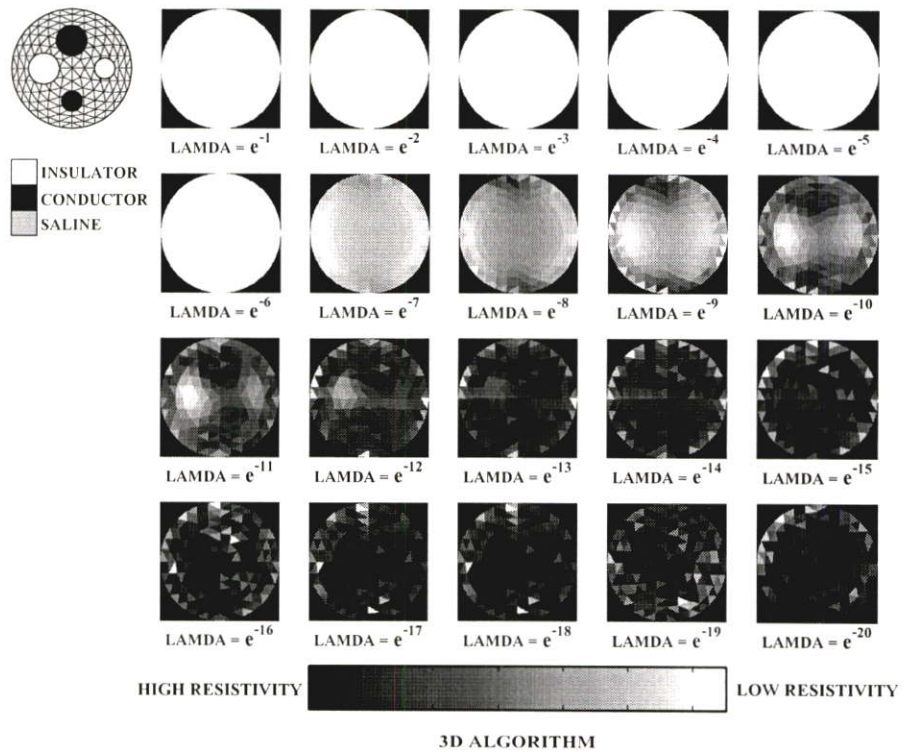
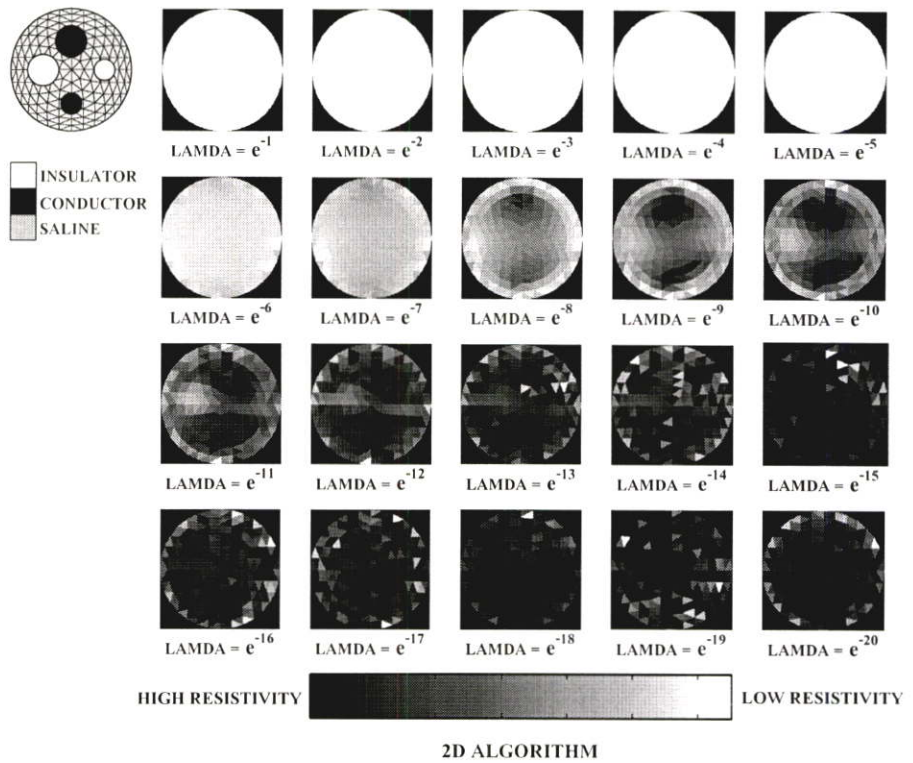
7.2.5 การทดสอบผลของค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ต่อความคมชัดของภาพตัดขวางความต้านไฟฟ้า ในการทดลองนี้จะทำการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำวัตถุจนวนและวัตถุตัวนำวางไว้ในตัวน้ำเกลือในรูปแบบต่างๆแล้วนำข้อมูลที่ไปสร้างภาพตัดขวางโดยอัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และอัลกอริธึมแบบ 3 มิติโดยเราจะทำการปรับค่าแลมด้าของแต่้อัลกอริธึมตั้งแต่  $1e^{-1}$  ถึง  $1e^{-20}$  เพื่อศึกษาผลของค่าแลมด้าต่อความคมชัดของภาพตัดขวางที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7.42 และรูปที่ 7.47



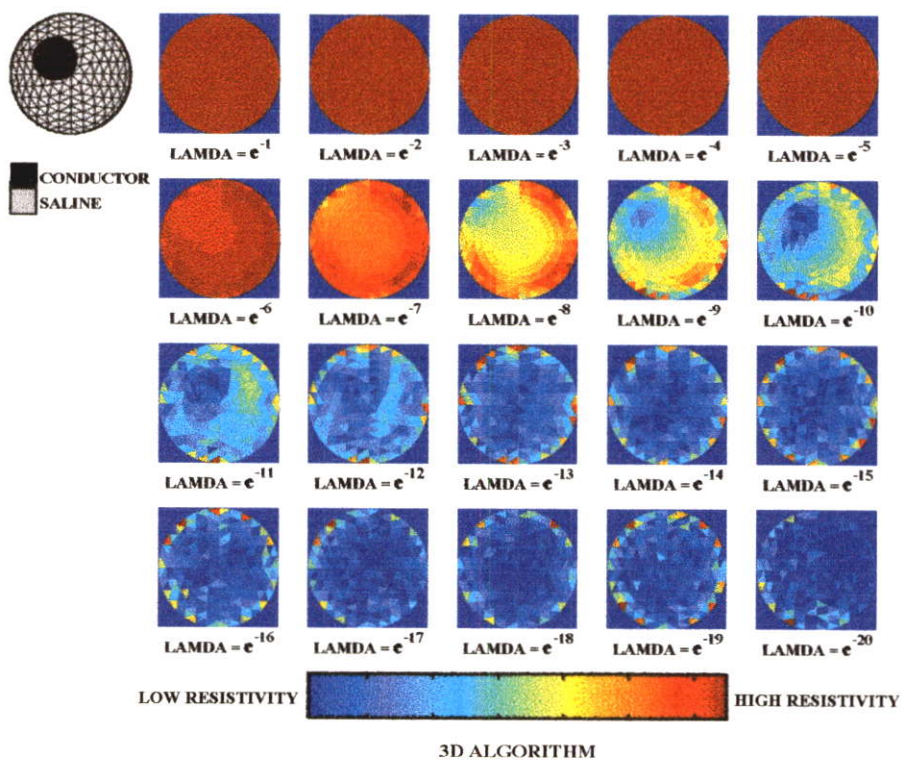
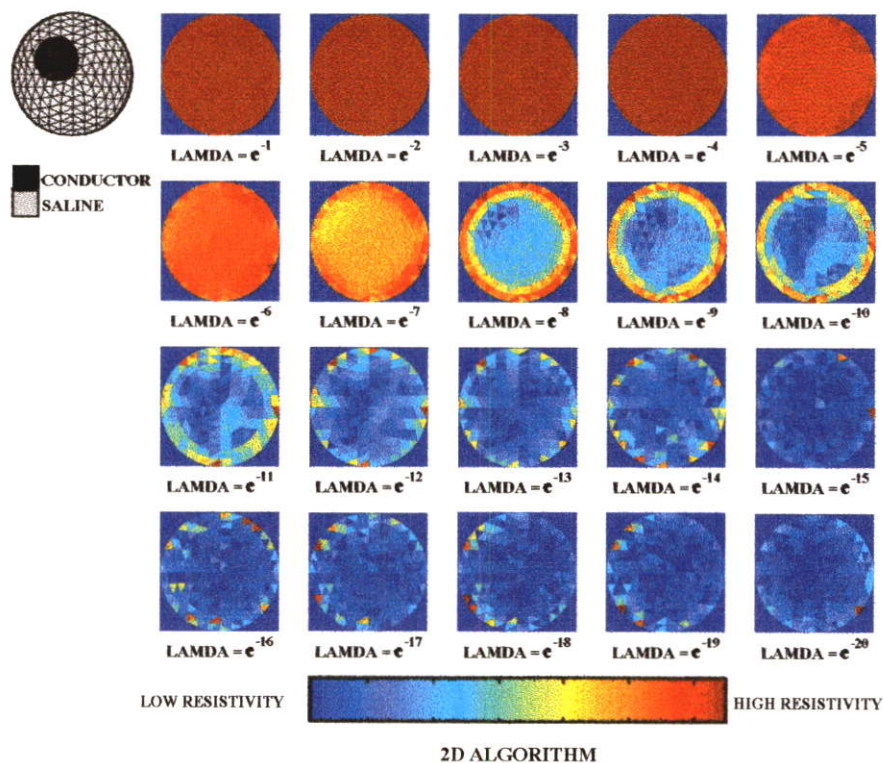
รูปที่ 7.42 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่างๆเมื่อวางวัตถุตัวนำไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



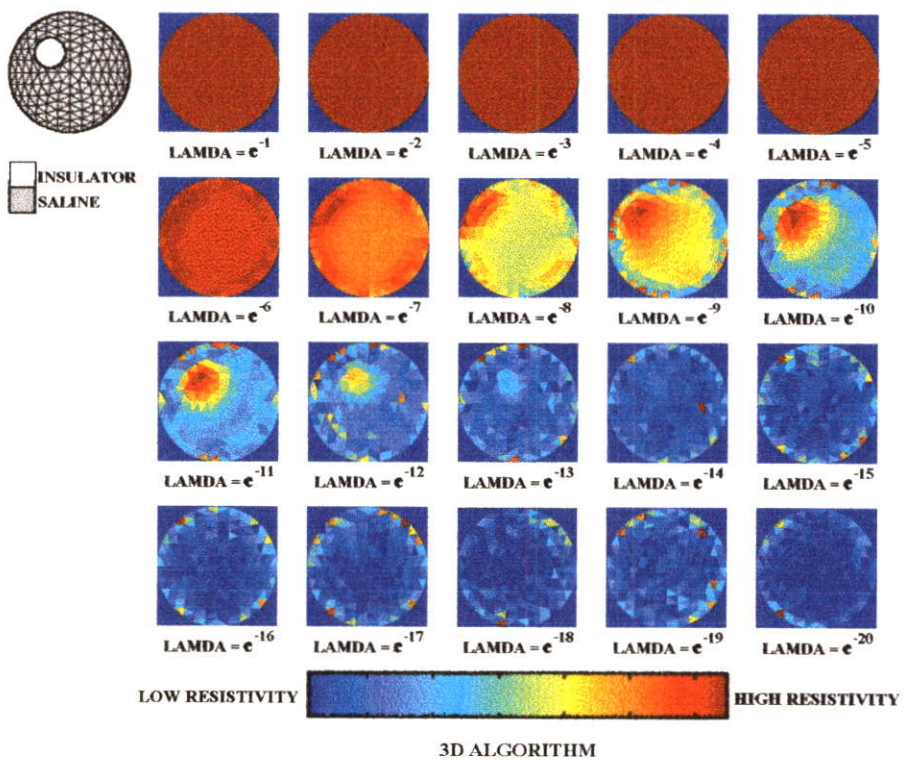
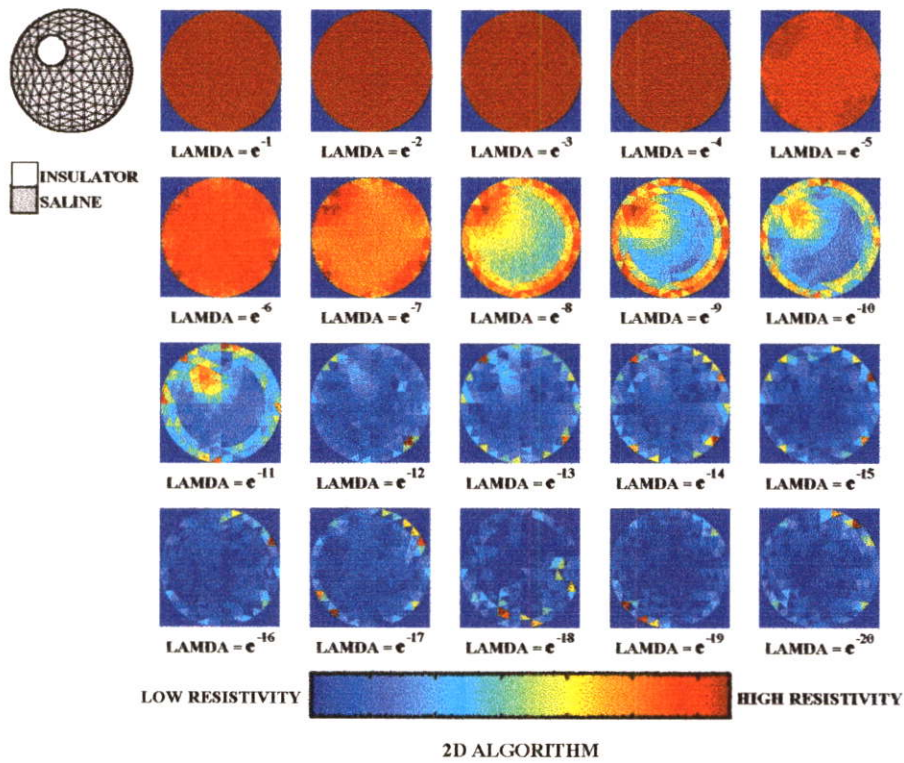
รูปที่ 7.43 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่างๆ เมื่อวางวัตถุทึบไว้นิ่งในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบข้างเคียง



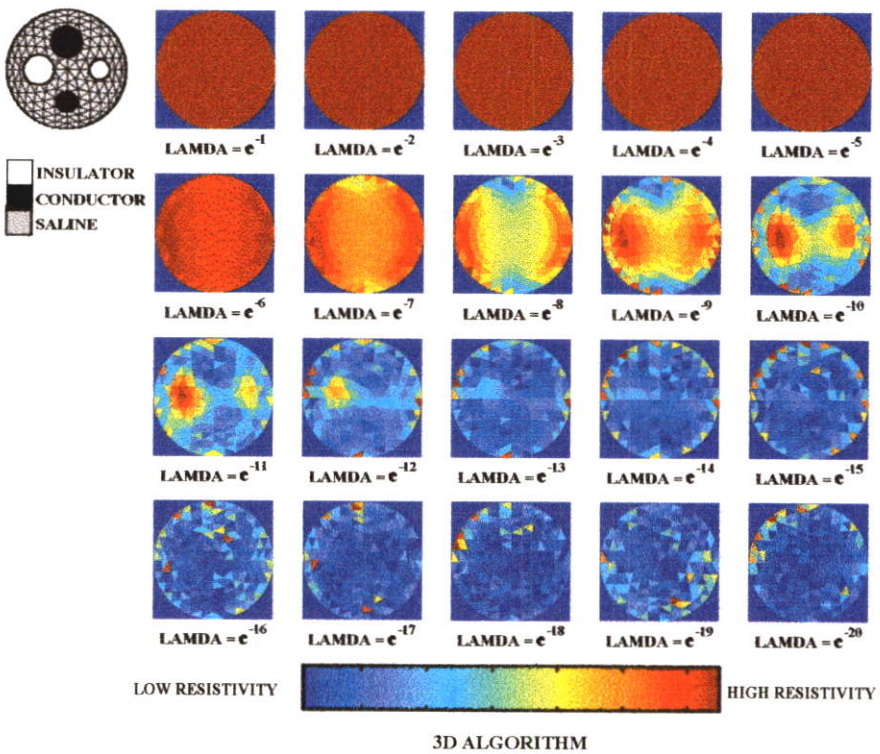
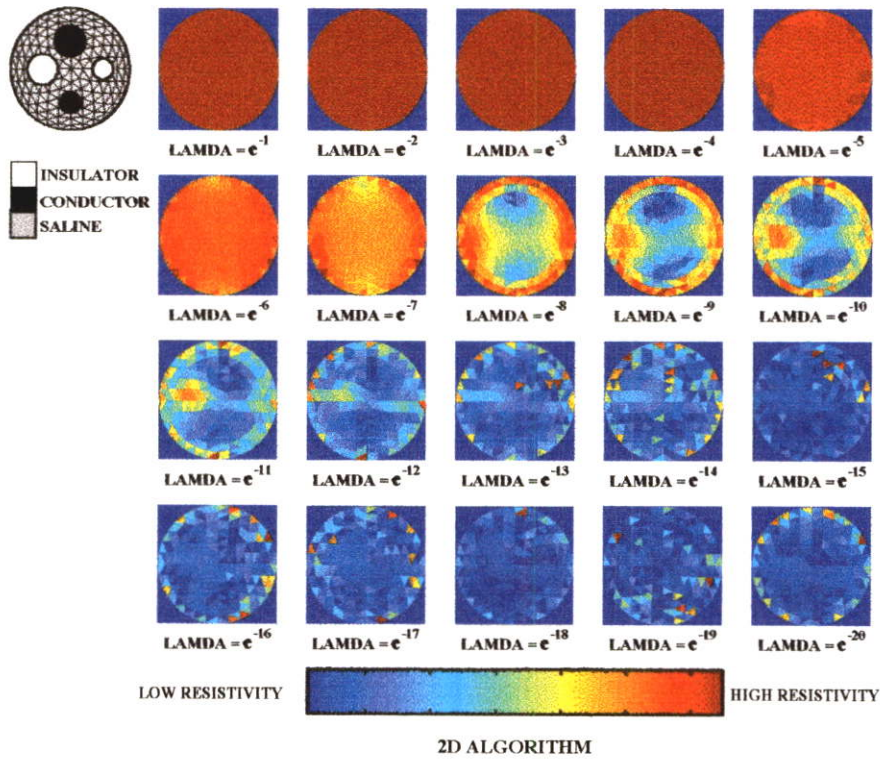
รูปที่ 7.44 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่างๆ เมื่อวางวัตถุตัวนำและฉนวนไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบข้างข้างเคียง



รูปที่ 7.45 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่าง ๆ เมื่อวางวัตถุตัวนำไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง



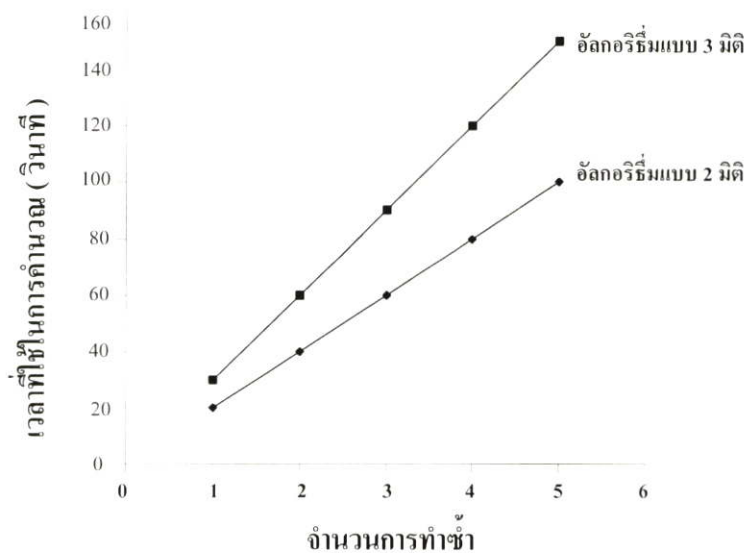
รูปที่ 7.46 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่าง ๆ เมื่อวางวัตถุขนาด 15 เซนติเมตร ไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเดียว



รูปที่ 7.47 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้ที่ค่า  $\lambda$  ต่างๆเมื่อวางวัตถุทึบและตัวนำไว้ในถังน้ำเกลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

### 7.2.6 การทดสอบเวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริธึม

สำหรับในการทดสอบเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละอัลกอริธึม จะนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณ โดยอัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และอัลกอริธึมแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB 5.3 โดยไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ซีพียู Pentium 4 1.4 กิกะเฮิร์ตแรม 128 เมกกะไบต์ โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนการทำซ้ำ (Iteration) ค่าต่างๆแล้วทำการจับเวลาในการคำนวณแต่ละรอบของการทำซ้ำในแต่ละอัลกอริธึม ซึ่งในการทดลองจะใช้ค่าการทำซ้ำเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ จากนั้นจึงนำค่าเวลาที่ได้นำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 7.48

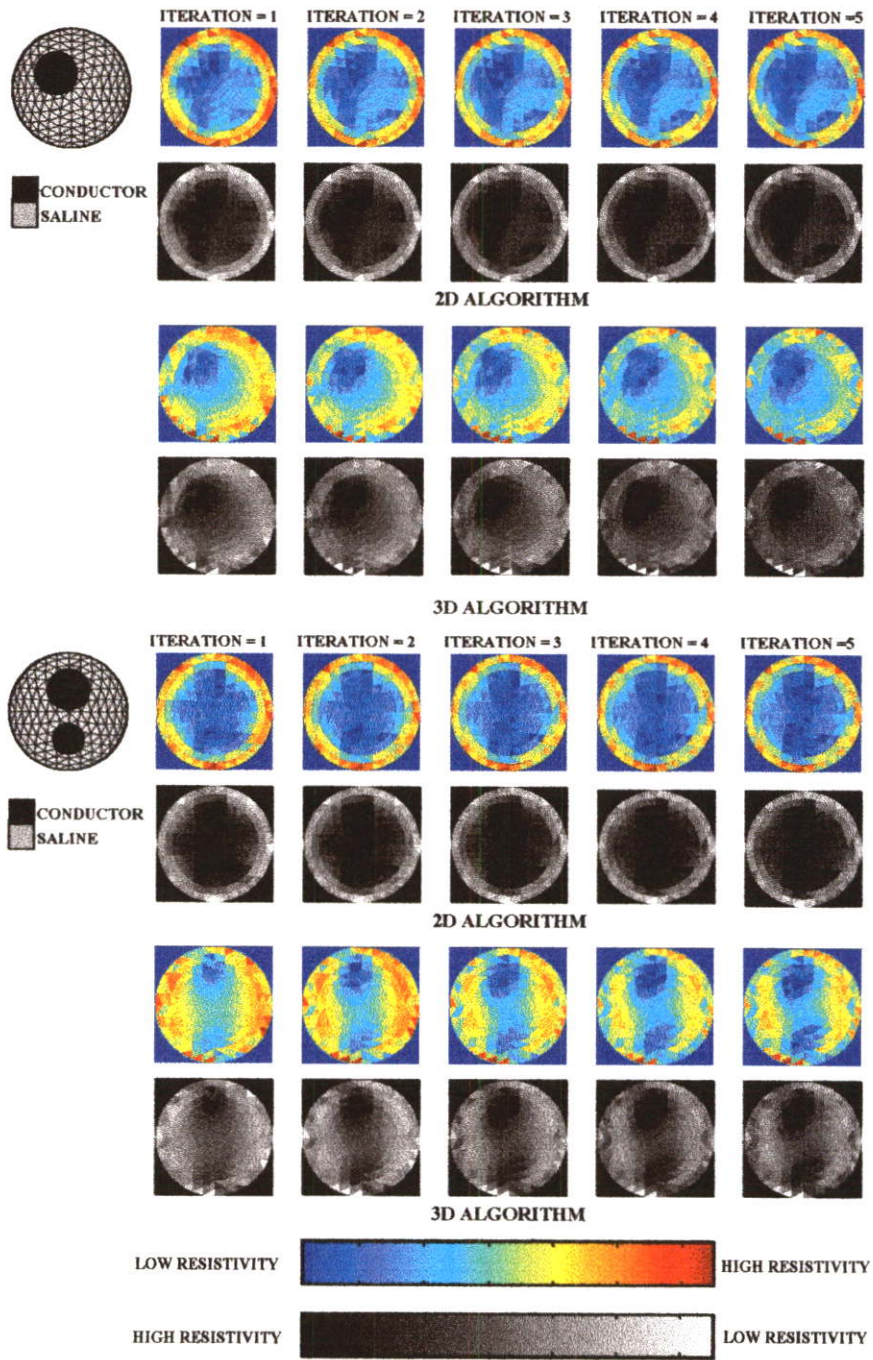


รูปที่ 7.48 เวลาในการคำนวณในแต่ละอัลกอริธึม สำหรับไฟไนต์อีลิเมนต์ ขนาด 32 อีเล็กโทรด 141 โหนด 248 อีลิเมนต์

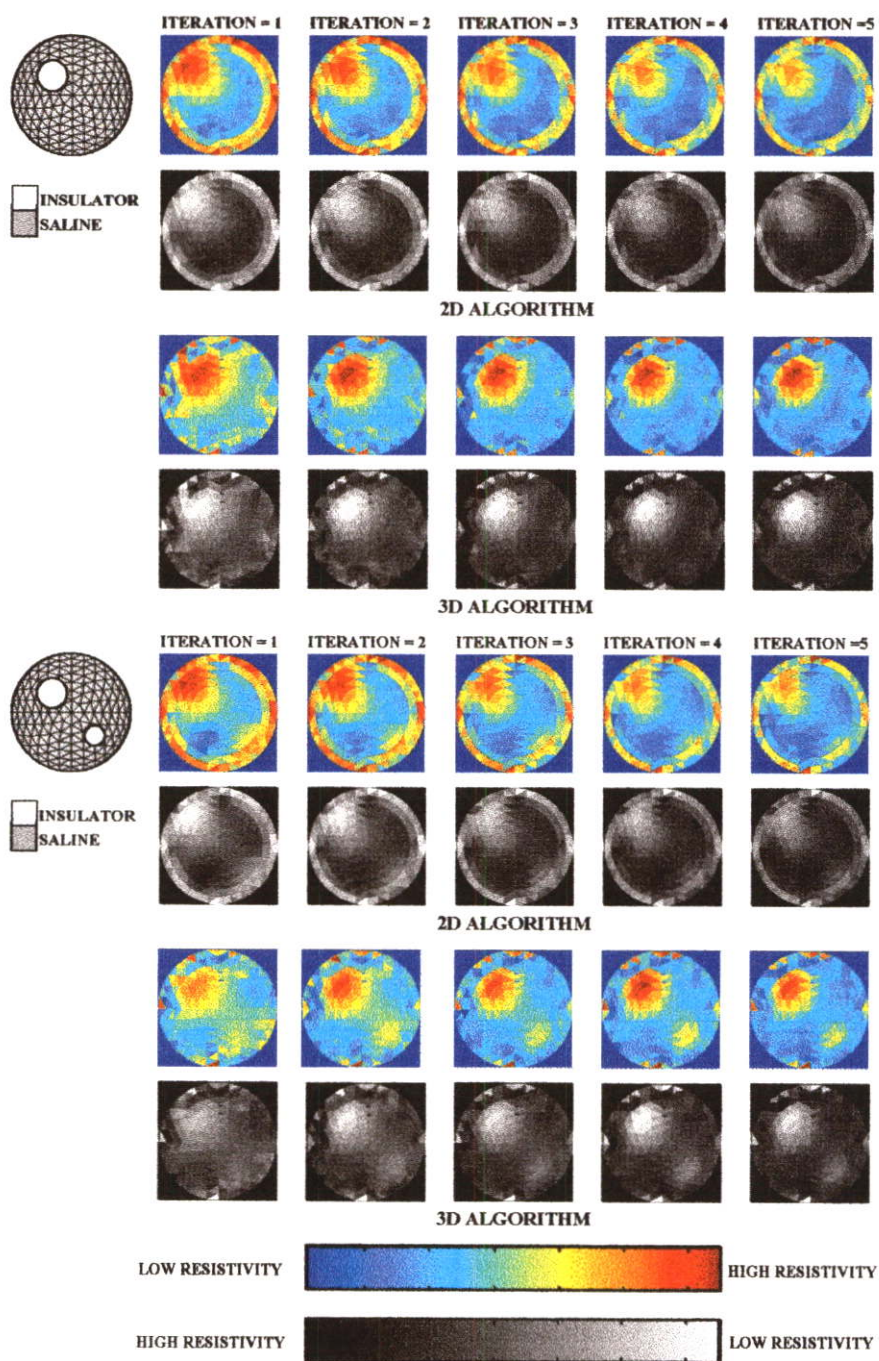
จากรูปที่ 7.48 แบบอัลกอริธึมแบบ 3 มิติจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าอัลกอริธึมแบบ 2 มิติประมาณ 1.5 เท่า สำหรับไฟไนต์อีลิเมนต์ ขนาด 32 อีเล็กโทรด 141 โหนด 248 อีลิเมนต์

### 7.2.7 การทดสอบการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุในรูปแบบต่าง ๆ

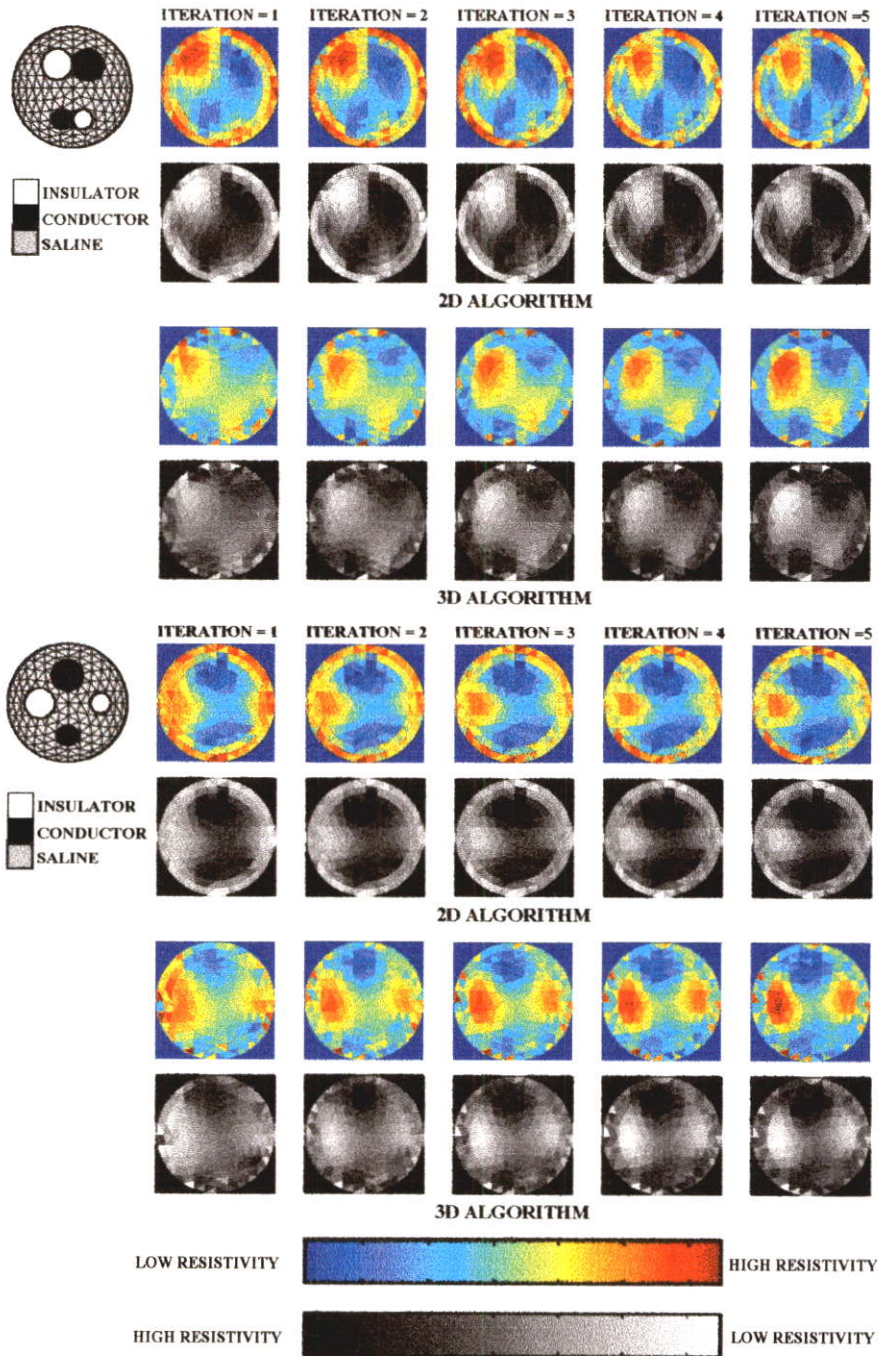
ในการทดสอบหัวข้อนี้เพื่อทดสอบความสามารถในการแยกแยะของภาพตัดขวาง เมื่อทำการใส่วัตถุหลายๆชนิดไว้ในรูปแบบต่าง ๆ ภายในถังน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ซึ่งติดอเล็กโทรดจำนวน 32 อีเล็กโทรดโดยรอบ โดยในการทดลองจะวางวัตถุตัวนำและฉนวนในรูปแบบต่างๆที่ระดับน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร และทำการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเคียงจากนั้นจึงนำข้อมูลของสัญญาณที่วัดได้มาสร้างเป็นภาพตัดขวางโดยอัลกอริธึมแบบ 2 มิติและอัลกอริธึมแบบ 3 มิติซึ่งภาพที่สร้างขึ้นสามารถแสดงดังรูปที่ 7.49 ถึงรูปที่ 7.51



รูปที่ 7.49 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเดียวจากถึงน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุตัวนำในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถึงน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร



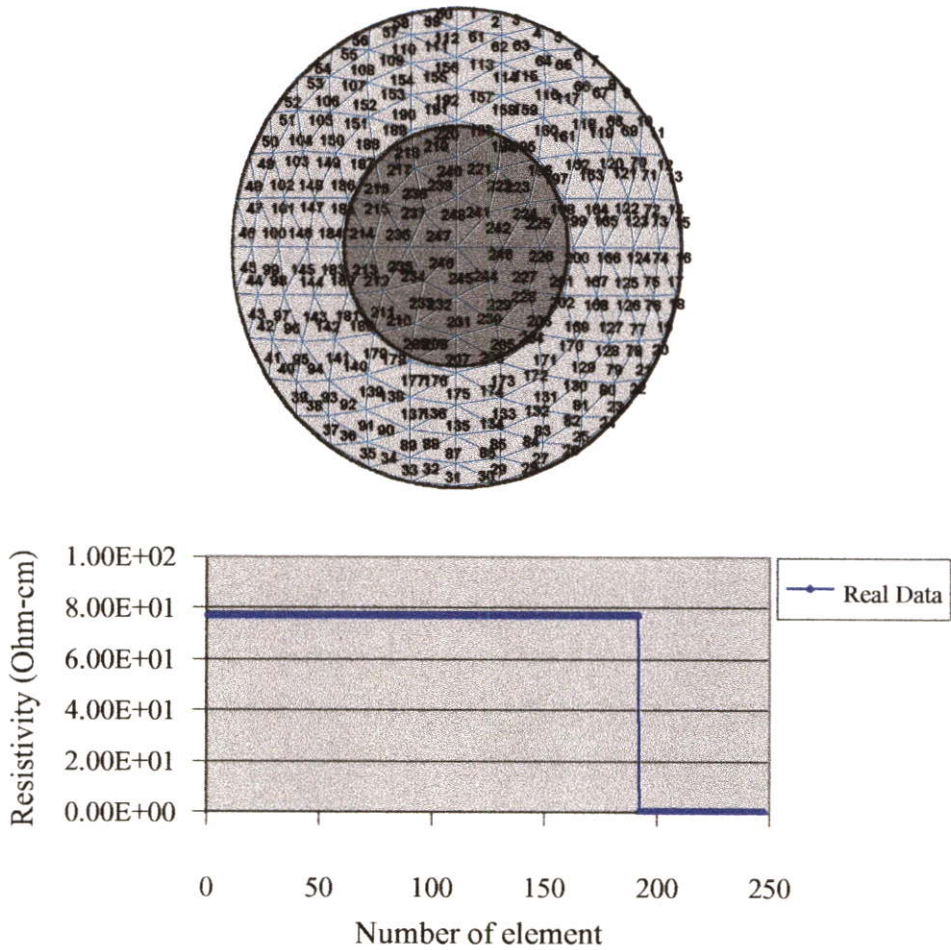
รูปที่ 7.50 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเดียวจากถึงน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุฉนวนในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถึงน้ำเกลือ 5 เซนติเมตร



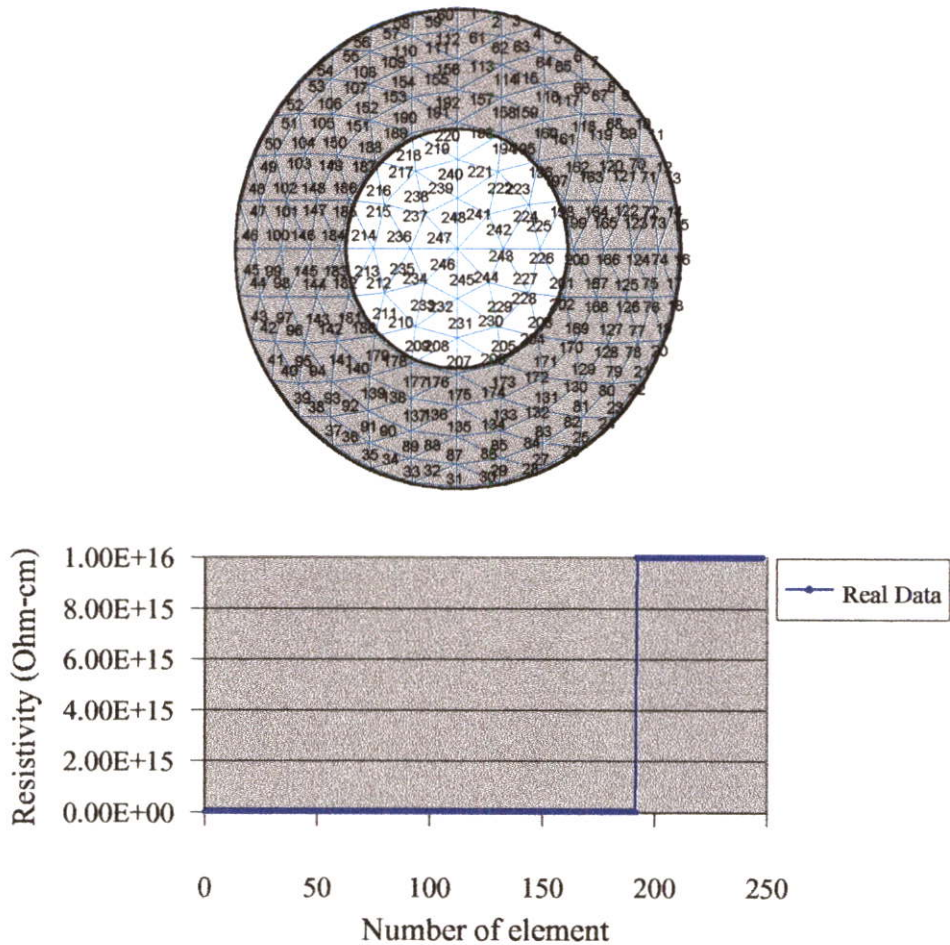
รูปที่ 7.51 ภาพตัดขวางที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเดียวจากถังน้ำเกลือที่บรรจุวัตถุตัวนำและฉนวนในลักษณะต่างๆที่ระดับความสูงของถังน้ำเกลือที่บรรจุ

### 7.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของค่าสภาพความต้านทานที่คำนวณได้ในสถานะต่างๆ

โดยในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้น ไปทดสอบกับแบบจำลองซึ่งเป็น ถังน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ติดอิเล็กโทรดจำนวน 32 อิเล็กโทรดโดยรอบ บรรจุน้ำเกลือที่มีความสูง 5 เซนติเมตร แล้วทำการใส่วัตถุตัวนำหรือฉนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้วไว้ตรงกลางแล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเชิง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ ได้มาทำการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity (Ohm-cm)) ของในแต่ละอิเล็กโทรดโดย อัลกอริทึมแบบ 3 มิติตามเงื่อนไขต่างๆ แล้วนำค่าสภาพความต้านทานที่ได้มาเพื่อเปรียบเทียบกับ ค่าสภาพความต้านทานจริงในแต่ละอิเล็กโทรดที่ทำการวางวัตถุไว้ โดยรูปแบบของการวางวัตถุในถัง น้ำเกลือและค่าสภาพความต้านทานจริงในแต่ละอิเล็กโทรดสามารถแสดงในรูปที่ 7.52 และรูปที่ 7.53



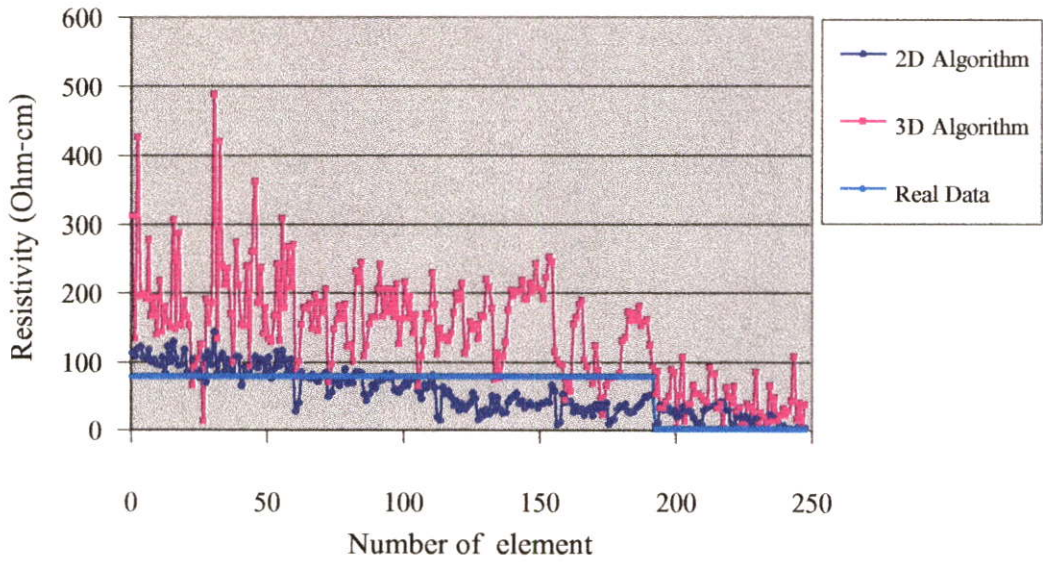
รูปที่ 7.52 ลักษณะการวางวัตถุตัวนำในการทดลองและลักษณะของกราฟแสดงค่าจริง (Real data) ของค่า Resistivity (Ohm-cm) ในแต่ละอิเล็กโทรด



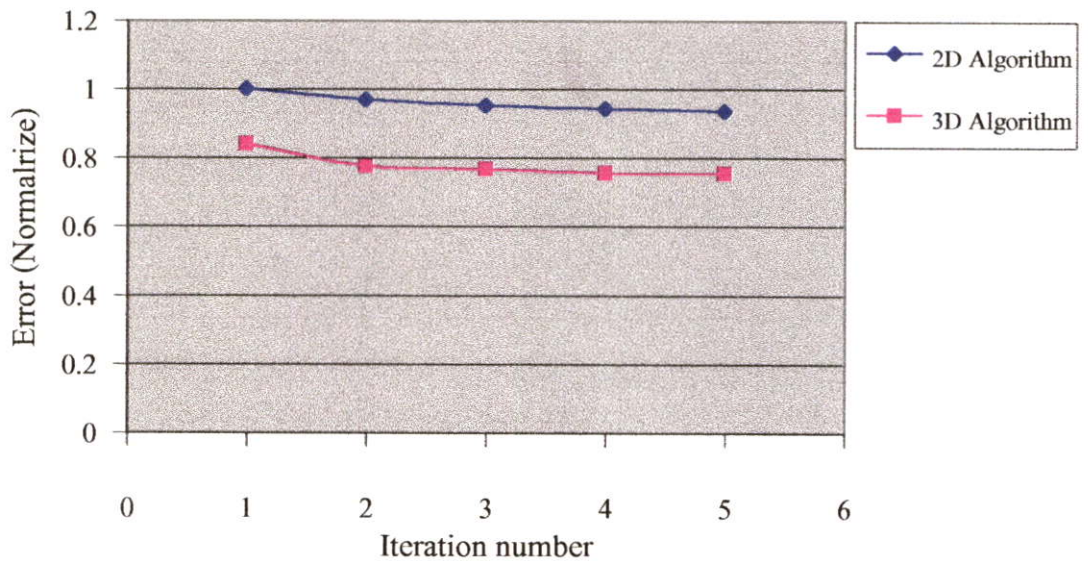
รูปที่ 7.53 ลักษณะการวางวัดอุณหภูมิในการทดลองและลักษณะของกราฟแสดงค่าจริง (Real data) ของ ค่า Resistivity (Ohm-cm) ในแต่ละอิทิมেন্ট

### 7.3.1 การทดสอบผลของอัลกอริธึมที่ใช้ในการคำนวณต่อค่าสภาพความต้านทานที่คำนวณได้

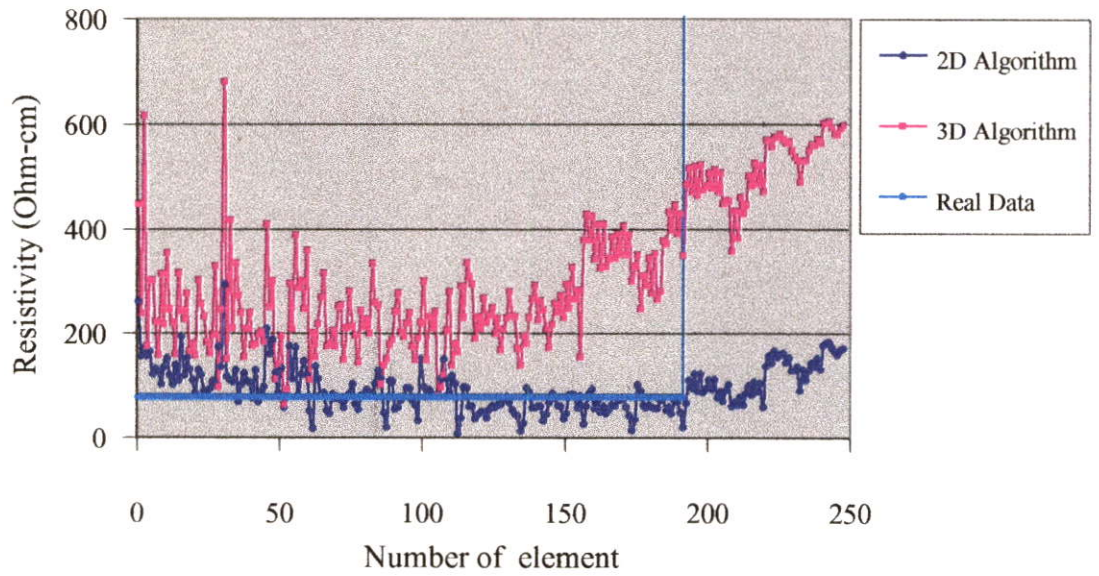
โดยในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้น ไปทดสอบกับแบบจำลองซึ่งเป็น ถังน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ติดอิเล็กโทรดจำนวน 32 อิเล็กโทรดโดยรอบ บรรจุน้ำเกลือที่มีความสูง 5 เซนติเมตร แล้วทำการใส่วัตถุตัวนำหรือฉนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้วไว้ตรงกลาง แล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้ามเคียง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ ได้มาทำการคำนวณค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิทิมেন্ট โดยใช้อัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และอัลกอริธึมแบบ 3 มิติซึ่งค่าสภาพความต้านทานของแต่ละอิทิมেন্টที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ อัลกอริธึมแบบ 2 มิติ และอัลกอริธึมแบบ 3 มิติเมื่อเทียบกับค่าสภาพความต้านทานจริงในแต่ละ อิทิมেন্টตามรูปแบบที่ทำการวางวัดอุณหภูมิ สามารถแสดงดังรูปที่ 7.54 ถึงรูปที่ 7.57



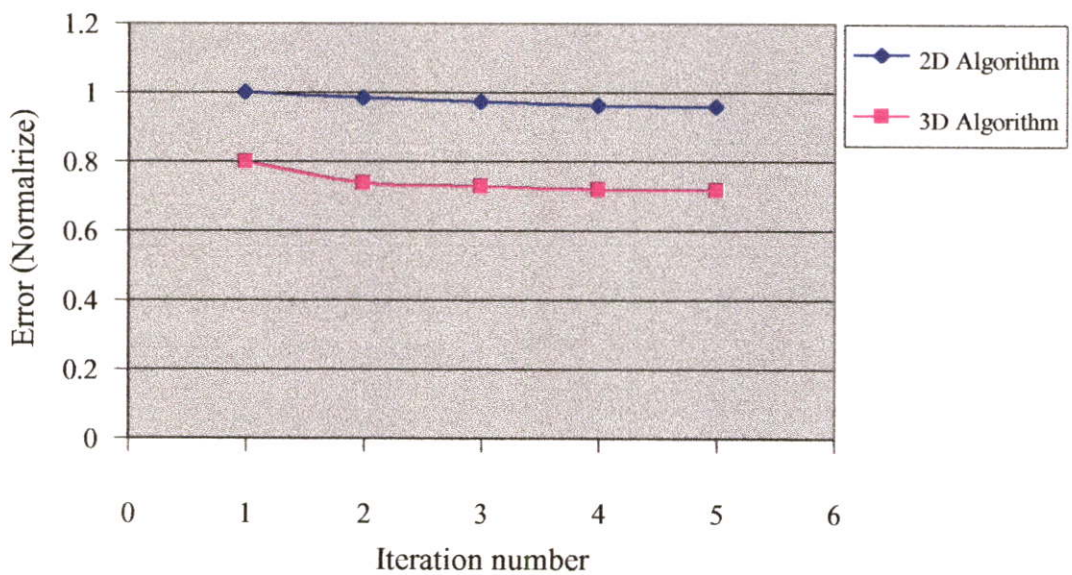
รูปที่ 7.54 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและอัลกอริทึมแบบ 3 มิติ



รูปที่ 7.55 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณโดยองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและอัลกอริทึมแบบ 3 มิติ



รูปที่ 7.56 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและอัลกอริทึมแบบ 3 มิติ

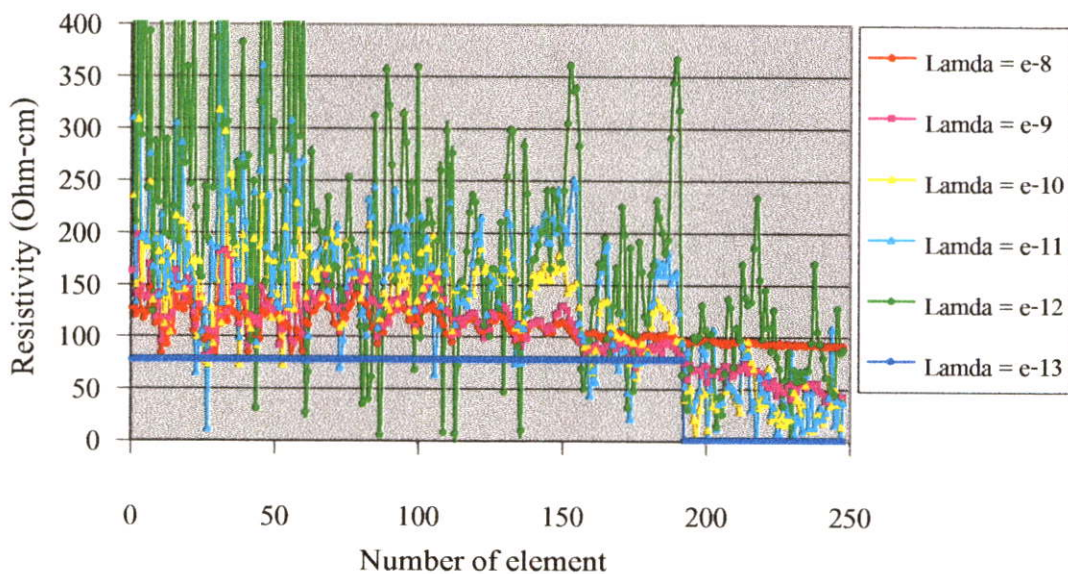


รูปที่ 7.57 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณโดยองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนเมื่อใช้อัลกอริทึมแบบ 2 มิติและอัลกอริทึมแบบ 3 มิติ

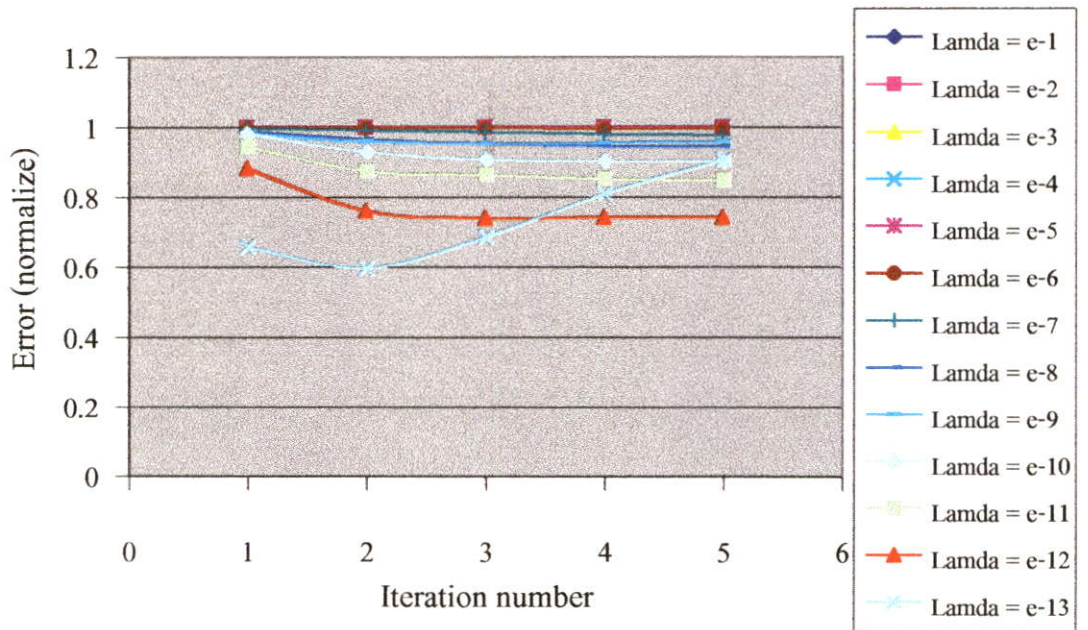
จากรูปที่ 7.54 และรูปที่ 7.56 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิเลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้อัลกอริธึมแบบ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงค่าจริงมากกว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิเลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้อัลกอริธึมแบบ 2 มิติ โดยเมื่อนำค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิเลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดพบว่า อัลกอริธึมแบบ 3 มิติ จะให้ค่าความผิดพลาดต่ำกว่าอัลกอริธึม แบบ 2 มิติ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7.55 และรูปที่ 7.57

### 7.3.2 การทดสอบผลของค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ที่ใช้ในการคำนวณต่อค่าสภาพความต้านทานที่คำนวณได้

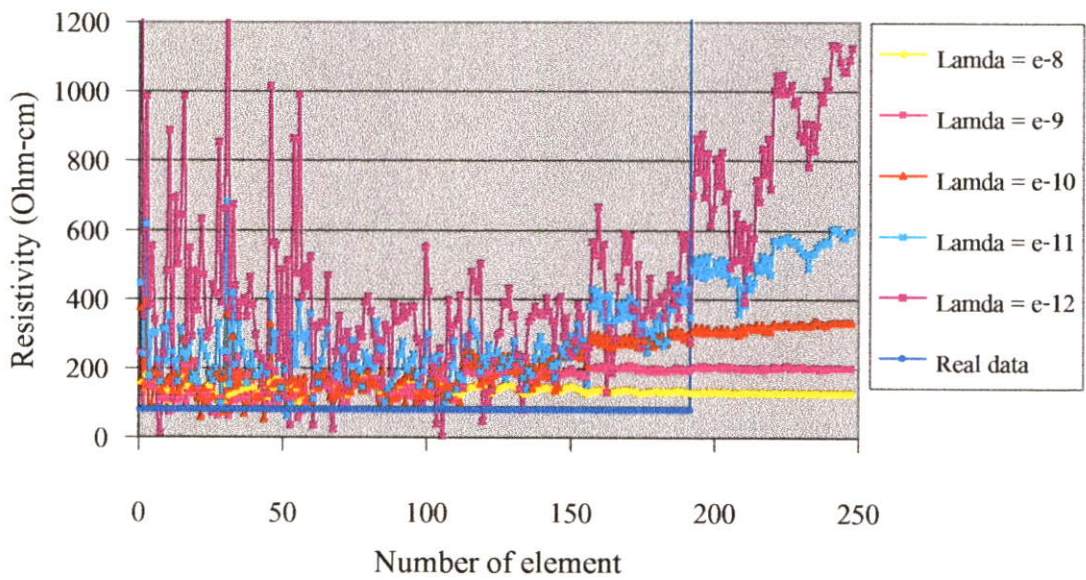
โดยในการทดสอบนี้จะนำระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นไปทดสอบกับแบบจำลองซึ่งเป็นถึงน้ำเกลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ที่ติดอิเล็กโทรดจำนวน 32 อิเล็กโทรดโดยรอบบรรจุน้ำเกลือที่ความสูง 5 เซนติเมตร แล้วทำการใส่วัตถุตัวนำหรือฉนวนขนาด 2.5 นิ้ว ไว้ตรงกลาง แล้วทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเพียง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิเลิเมนต์โดยใช้อัลกอริธึมแบบ 3 มิติ โดยเราจะทำการปรับค่าแลมด้าของอัลกอริธึมตั้งแต่  $1e^{-1}$  ถึง  $1e^{-20}$  ซึ่งค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิเลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ค่าแลมด้าตั้งแต่  $1e^{-1}$  ถึง  $1e^{-20}$  เมื่อเทียบกับค่าสภาพความต้านทานจริงในแต่ละอิเลิเมนต์ตามรูปแบบที่ทำการวางวัตถุไว้ สามารถแสดงดังรูปที่ 7.58 ถึงรูปที่ 7.62



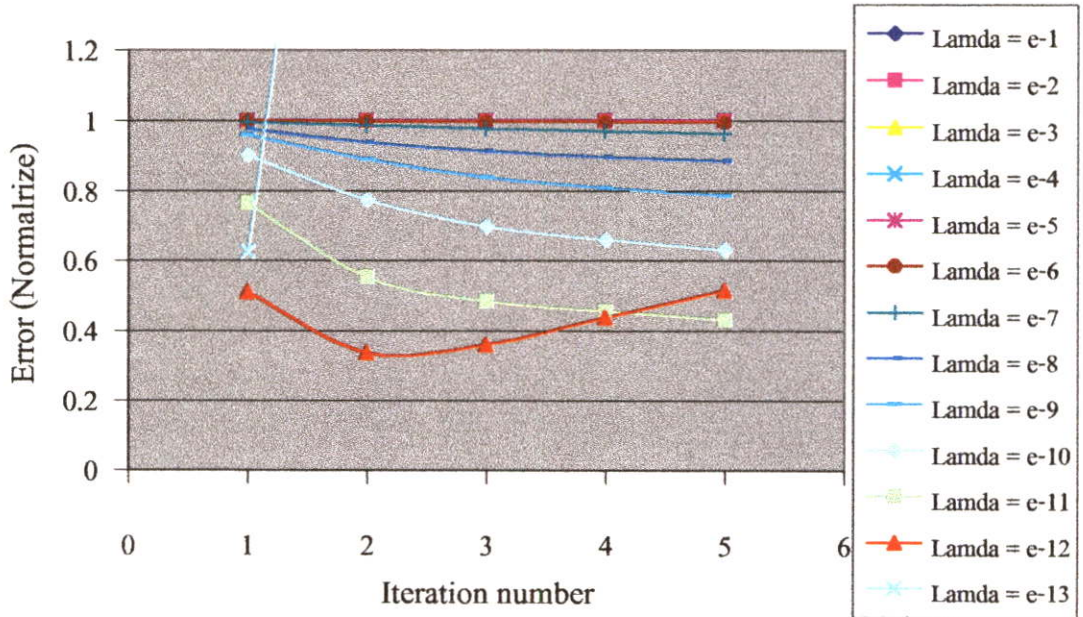
รูปที่ 7.58 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำที่ค่าแลมด้าของอัลกอริธึมเท่ากับ  $e^{-8} - e^{-12}$



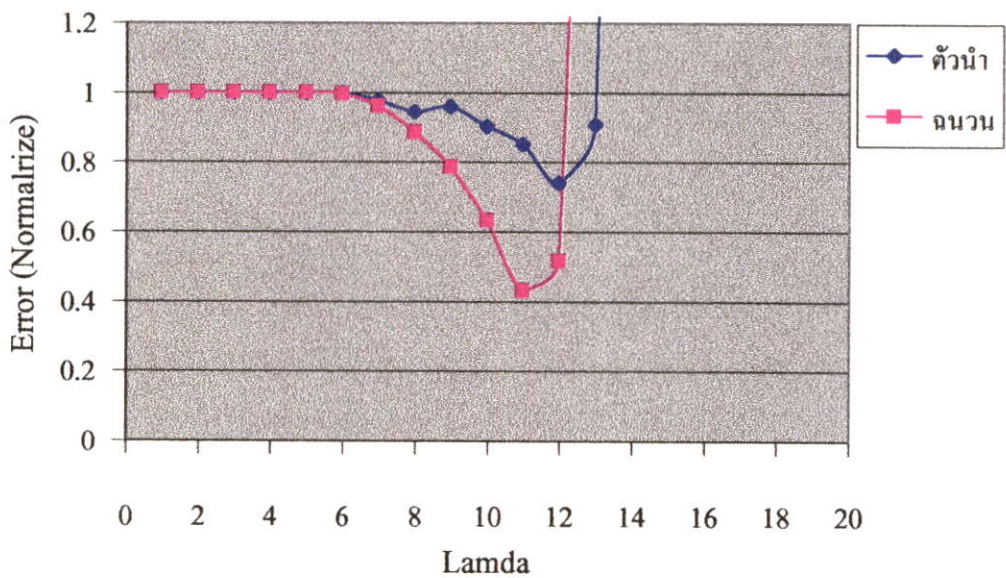
รูปที่ 7.59 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอริธึมเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำ



รูปที่ 7.60 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนที่ค่าแลมด้าของอัลกอริธึมเท่ากับ  $e^{-8}$  -  $e^{-12}$



รูปที่ 7.61 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอริธึมเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวน

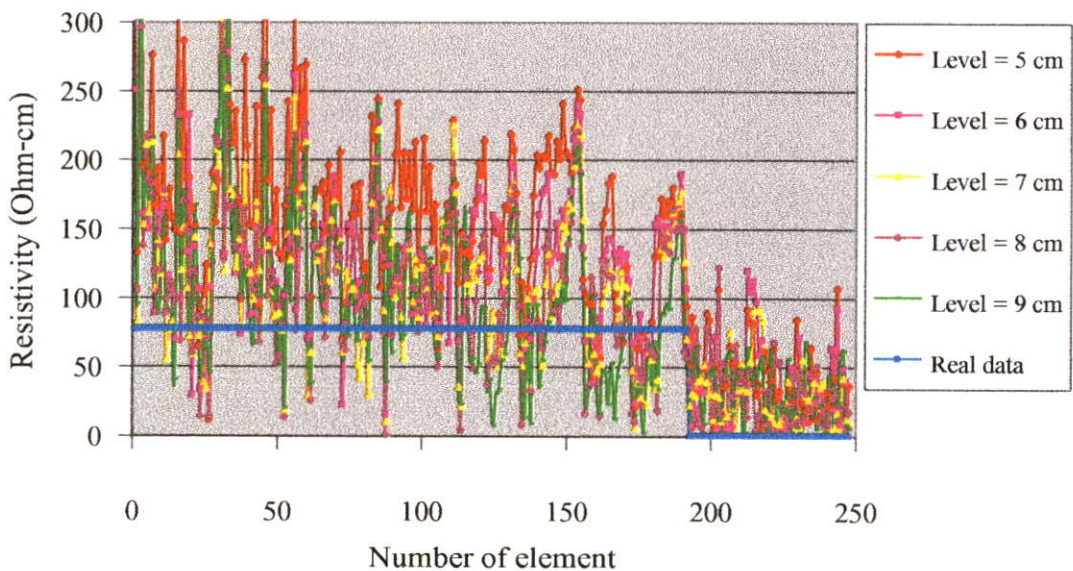


รูปที่ 7.62 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่ค่าแลมด้าต่างๆของอัลกอริธึมเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนหรือคำนว้า (จำนวนการทำซ้ำ = 5)

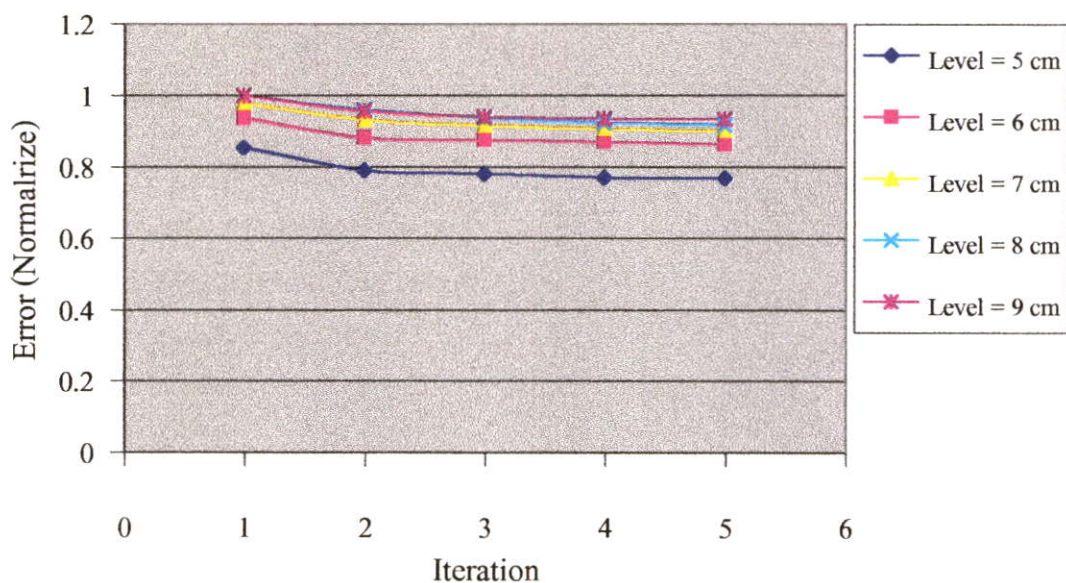
จากรูปที่ 7.58 และรูปที่ 7.60 จะเห็นว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ในช่วง  $1e^{-10} - 1e^{-11}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ค่าอื่น โดยเมื่อนำค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดพบว่าค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) เท่ากับ  $1e^{-10} - 1e^{-11}$  จะให้ค่าความผิดพลาดของค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ต่ำกว่าค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ค่าอื่น ดังแสดงในรูปที่ 7.62

### 7.3.3 การทดสอบผลของระดับน้ำเกลือที่บรรจุอยู่ในถังน้ำเกลือต่อค่าสภาพความต้านทานที่คำนวณได้

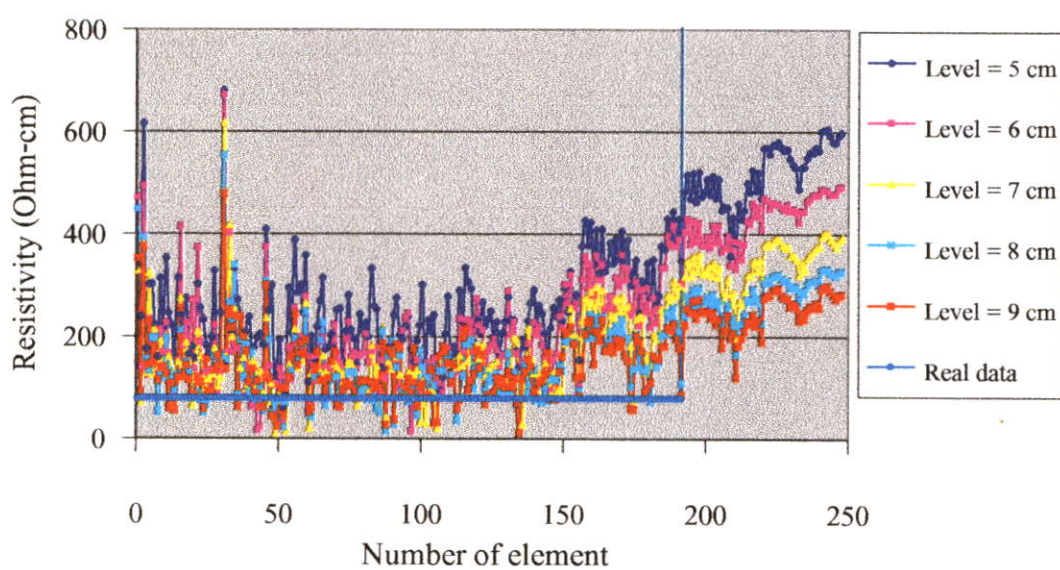
การทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของวัตถุที่มีความสูงต่างกันแต่วัตถุภายในมีขนาดเท่ากัน โดยในการทดสอบจะใช้แท่งตัวนำหรือฉนวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรวางไว้ตรงกลางถึงน้ำเกลือแล้วทำการเก็บข้อมูลแบบซ้ำข้างเคียง โดยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเกลือเป็นระดับต่างๆ คือ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เซนติเมตร แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ โดยใช้อัลกอริทึมแบบ 3 มิติ โดยค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าสภาพความต้านทานจริงในในแต่ละอิลิเมนต์รูปแบบที่ทำการวางวัตถุไว้สามารถแสดงดังรูปที่ 7.63 ถึง รูปที่ 7.66



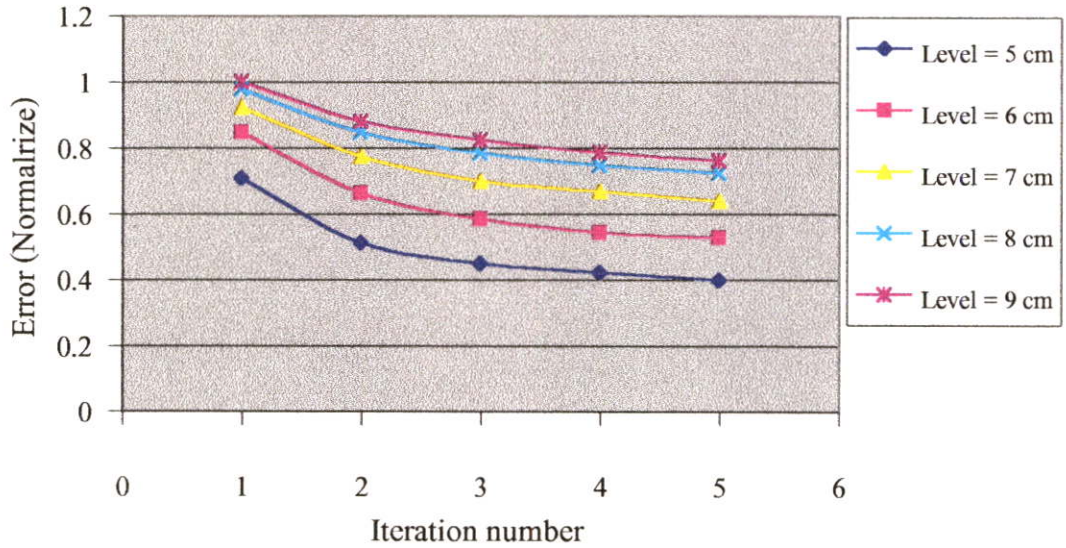
รูปที่ 7.63 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำที่ค่าความสูงของวัตถุต่างๆ



รูปที่ 7.64 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่ค่าความหนาของวัตถุต่างๆเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นตัวนำ



รูปที่ 7.65 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าจริงเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นฉนวนที่ค่าความสูงของวัตถุต่างๆ



รูปที่ 7.66 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการคำนวณที่ค่าความหนาของวัตถุต่างๆเมื่อองค์ประกอบภายในวัตถุเป็นจนวน

จากรูปที่ 7.63 และรูปที่ 7.65 จะเห็นว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอติเม้นต์ที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลที่วัดได้ ณ ระดับน้ำเกลือในถังน้ำเกลือ (วัตถุ) มีระดับต่ำจะมีค่าใกล้เคียงค่าจริงมากกว่าค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอติเม้นต์ที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลที่วัดได้ ณ ระดับน้ำเกลือในถังน้ำเกลือที่มีระดับสูง โดยเมื่อนำค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอติเม้นต์ที่ได้จากการคำนวณมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดพบว่าข้อมูลที่วัดได้ ณ ระดับน้ำเกลือในถังน้ำเกลือมีระดับต่ำจะให้ค่าความผิดพลาดของค่าสภาพความต้านทานของในแต่ละอติเม้นต์ต่ำกว่าข้อมูลที่วัดได้ ณ ระดับน้ำเกลือในถังน้ำเกลือที่มีระดับสูงดังแสดงในรูปที่ 7.64 และรูปที่ 7.66

## บทที่ 8

### บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา

การสร้างภาพตัดขวางเพื่อแสดงองค์ประกอบภายในของร่างกายหรือวัตถุนั้น ในปัจจุบันสามารถสร้างโดยเครื่อง MRI หรือเครื่อง CT เป็นต้น สำหรับเครื่อง CT นั้นจัดเป็นอุปกรณ์ประเภทที่สามารถส่งผลกระทบต่อร่างกายของผู้ป่วยได้หากมีการใช้บ่อย ส่วนเครื่อง MRI แม้จะสามารถสร้างภาพตัดขวางที่มีความชัดเจนในการแยกองค์ประกอบในร่างกายแต่ราคาของเครื่องยังคงสูงมาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีแนวความคิดที่จะทำการสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าขึ้นมา เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางในทางการแพทย์และอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึง อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าทั้งแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ รวมทั้งการปรับปรุงอัลกอริทึมให้การแสดงผลภาพตัดขวางได้ชัดเจนยิ่งขึ้น พร้อมทั้งทำการสร้างระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางแบบ 32 อิเล็กโทรดเพื่อทำการเก็บข้อมูลสำหรับนำไปสร้างภาพตัดขวางโดยอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดของผลการทดสอบระบบเก็บข้อมูลและอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าดังนี้

ในส่วนของระบบเก็บข้อมูลสามารถเก็บข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุด 1024 ครั้ง/วินาที หรือ 32 โปรเจกชัน/ 1 วินาที โดยมีค่าซิกแนลทูนอยส์ เรโซ (S/N) เท่ากับ 65.6611 dB ซึ่งทำให้ข้อมูลที่นำไปคำนวณยังคงมีความผิดพลาดเล็กน้อย ซึ่งในการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลให้ดีขึ้นจะต้องทำการพัฒนาระบบให้มีค่า S/N สูงขึ้นเพื่อให้ข้อมูลที่นำไปสร้างภาพตัดขวางมีค่าความถูกต้องมากขึ้น

ในส่วนของการทดสอบผลกระทบของความหนาของวัตถุต่อข้อมูลของสัญญาณที่เก็บได้นั้น ผลปรากฏว่าเมื่อวัตถุมีความหนาเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างของแรงดันของข้อมูลที่เก็บได้จะลดลง ทำให้เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างภาพตัดขวาง ภาพตัดขวางที่ได้จะมีความสามารถในการแยกแยะวัตถุของภาพลดลงตามความสูงของวัตถุที่เพิ่มขึ้น

ในส่วนของการทดสอบผลกระทบของขนาดขององค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุต่อข้อมูลสัญญาณที่ได้ ผลปรากฏถ้าองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุเป็นตัวนำ ค่าความชันของกราฟของสัญญาณที่เก็บได้นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นเป็นฉนวน ค่าความชันของกราฟสัญญาณที่เก็บได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างภาพตัดขวาง ภาพตัดขวางที่ได้จะมีความชัดเจนเพิ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่อยู่ภายในวัตถุนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น

สำหรับในการทดสอบผลของค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ของอัลกอริทึมต่อความคมชัดของภาพตัดขวางที่สร้างได้ปรากฏว่า ค่าแลมด้าที่เหมาะสมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุได้แก่ค่า  $1e^{-10} - 1e^{-11}$  เนื่องจากให้ภาพที่มีค่าความผิดพลาดต่ำสุด

ในการทดสอบอัลกอริทึมแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ นั้นเราพบว่าเมื่อใช้ข้อมูลเดียวกันในการสร้างภาพตัดขวาง อัลกอริทึมแบบ 3 มิติจะให้ภาพที่มีความสามารถในการแยกแยะวัตถุได้ดีกว่าอัลกอริทึมแบบ 2 มิติ แต่อัลกอริทึมแบบ 3 มิติจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าอัลกอริทึมแบบ 2 มิติ ประมาณ 1.5 เท่า

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าค่าความผิดพลาดของภาพตัดขวางยังมีค่าสูงอยู่ อันเนื่องมาจากเหตุผลดังนี้

1. ความผิดพลาดจากสัญญาณที่วัดได้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจาก
  - ระยะห่างในการติดอิเล็กโทรดทั้ง 32 อิเล็กโทรดไม่เท่ากันทั้งหมด
  - ระนาบของอิเล็กโทรดที่ติดไม่ตั้งฉากกับวัตถุที่ทำการสร้างภาพตัดขวาง
  - ความสะอาดของอิเล็กโทรดที่ติดกับวัตถุในการสร้างภาพตัดขวาง
  - ค่าความผิดพลาดของระบบจ่ายกระแสและระบบวัดแรงดันที่ออกแบบขึ้น
2. ความผิดพลาดจากอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวาง
  - การแบ่งอิลิเมนต์ยังไม่เหมาะสมกับโครงสร้างของวัตถุ
  - ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณของอัลกอริทึม
  - จำนวนการทำซ้ำของอัลกอริทึมยังน้อยไป
  - จำนวนอิลิเมนต์ยังน้อยไปทำให้ความละเอียดของภาพต่ำ

สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 แนวทางคือ

1. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าให้มีค่า S/N สูงขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับนำไปสร้างภาพตัดขวางที่มีค่าความถูกต้องมากขึ้น รวมทั้งการปรับปรุงระบบจ่ายกระแสและระบบวัดแรงดันให้มีค่าความถูกต้องของการจ่ายกระแสและวัดแรงดันสูงขึ้น ตลอดจนการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลให้สามารถปรับค่ากระแสและอัตราขยายของวงจรวัดแรงดันโดยอัตโนมัติตามสภาพความต้านทานของวัตถุที่นำมาสร้างภาพตัดขวาง

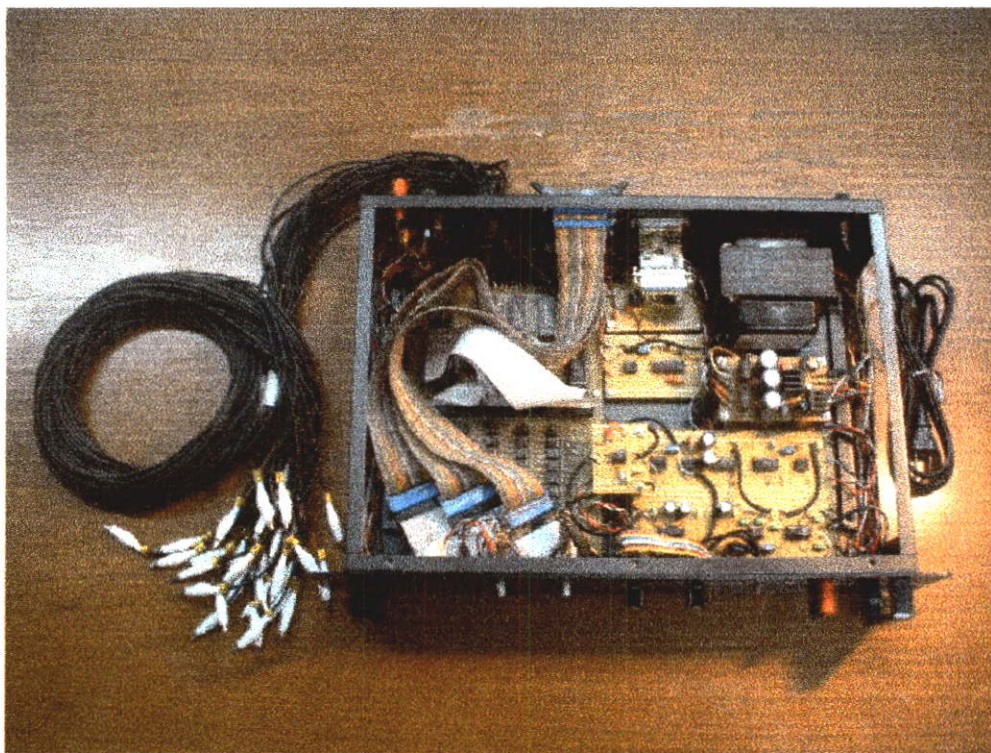
2. การพัฒนาด้านอัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าให้มีการคำนวณที่ถูกต้องและมีความเร็วในการคำนวณสูงขึ้น เพื่อพัฒนาให้ระบบสร้างภาพตัดขวางให้มีความเร็วในการสร้างภาพที่เป็นแบบไดนามิกได้

## เอกสารอ้างอิง

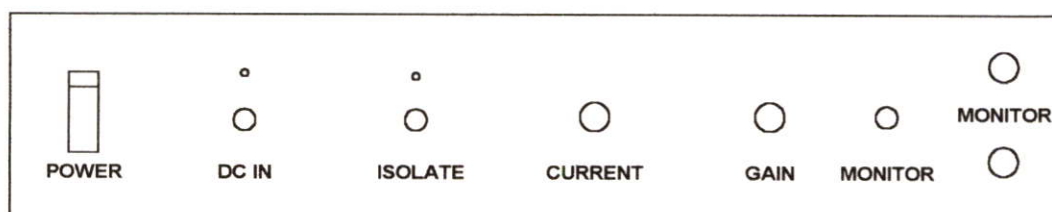
- [1] Barber DC, Brow BH and Freeston IL. "Imaging Spatial Distributions of Resistivity Using Applied Potential Tomography." *Electronics Letters*, Vol. 19, No 22, 27<sup>th</sup> October 1983. pp. 933-935.
- [2] R Avill, Y. F. Mangnall, N. C. Bird, B. H. Brown, D. C. Barber, A. D. Seagar, A. G. John, and N. W. Read. "Applied Potential Tomography : A New Noninvasive Technique for Measuring Gastric Emptying." *Gastroenterology* Vol. 92, No. 4, 1987. pp. 1019-1026.
- [3] Eung Je Woo, Ping Hua, John G. Webster and Willis J. Tompkins. "Measuring Lung Resistivity Using Electrical Impedance Tomography." *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 39, No. 7, July 1992. pp. 756-760.
- [4] Robert W. M. Smith, Ian Leslie Freestone Brian Hilton Brown. "A Real-Time Electrical Impedance Tomography System for Clinical Use Design and Preliminary Results." *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 42, No. 2, July 1995. pp. 133-140.
- [5] เทอดชัย ชเนศวโรดม. "การสร้างภาพตัดขวางของความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุตัวนำ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [6] R.A.Williams and M.S.Beck. **Process Tomography**. Butterworth-Heinemann : Oxford. 1995.
- [7] Lee E. Baker. "Principle of the Impedance Technique." *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine.*, March 1989. pp. 11-15.
- [8] T J C Faes, H A vanderMeij, J C deMunck and R M Heethaar. "The Electric Resistivity of Human Tissues (100 Hz–10 MHz)." *Physiol. Meas.*, Vol. 20, 1999. pp.1-10.
- [9] Javier Rosell, Josep Colominus, Pere Riu, Ramon Pallas-Areny and John G. Webster "Skin Impedance From 1 Hz to 1MHz." *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 35, No. 8, August 1988. pp. 649-651.
- [10] Webster J. G. **Electrical Impedance Tomography**. Ed. Bristol England : Adam Hilger. 1990
- [11] T J Yorkey and J G Webster. "A Comparison of Impedance Tomographic Reconstruction Algorithms." *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, Vol. 8, 1987. pp.55-62.
- [12] J. Jossinet and C. Trillaud. "The Design of Current Source and Voltmeters for Electrical Impedance Measurements." *Innov. Tech. Biol. Med.*, vol. 12, 1991. pp. 74-80.

- [13] Christopher William Lawrence Denyer. "Electronics for Real-Time and Three-Dimensional Electrical Impedance Tomographs." Ph.D. Thesis of Oxford Brookes University. 1996.
- [14] M L Meade. **Lock-In Amplifiers : Principles and applications**. Peter Peregrinus Ltd., 1989
- [15] พิชัย คูศิริวานิชกร. "การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในเครื่อง ไอ.ซี.ยู. มอนิเตอร์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2529.
- [16] ยุทธนา คิดใจเดียว "มอนิเตอร์ สำหรับห้องผู้ป่วยหนัก" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2532.
- [17] Alex Hartov, Robert A. Mazzaese, Fred R. Reiss, Todd E. Kerner, K. Sunshine Osterman, Dinise B. Williams and Keith D. Paulsen. "A Multichannel Continuously Selectable Multifrequency Electrical Impedance spectroscopy Measurement System." IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 47, no. 8, January 2002, pp. 49-58.

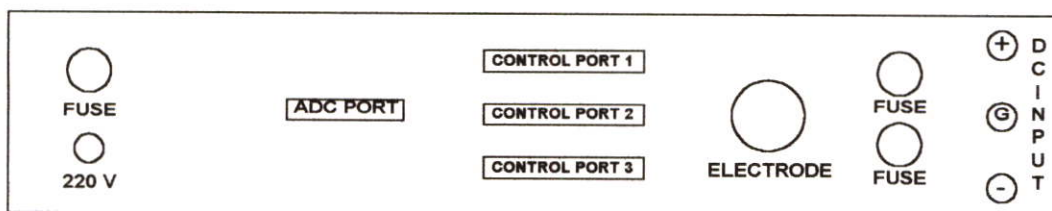
## ภาคผนวก ก



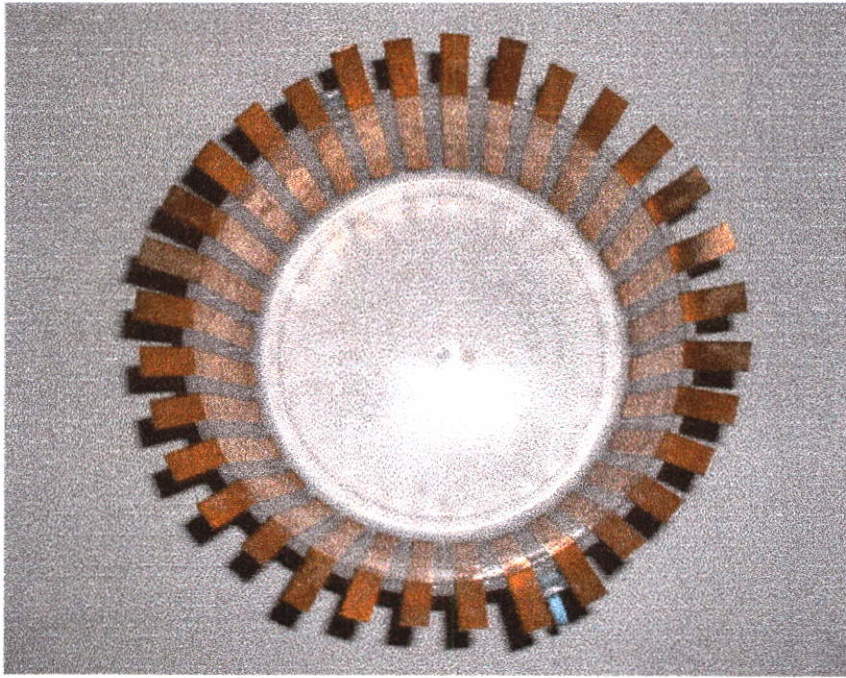
รูปที่ 1 ก ระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 บิตที่ใช้ในการทดลอง



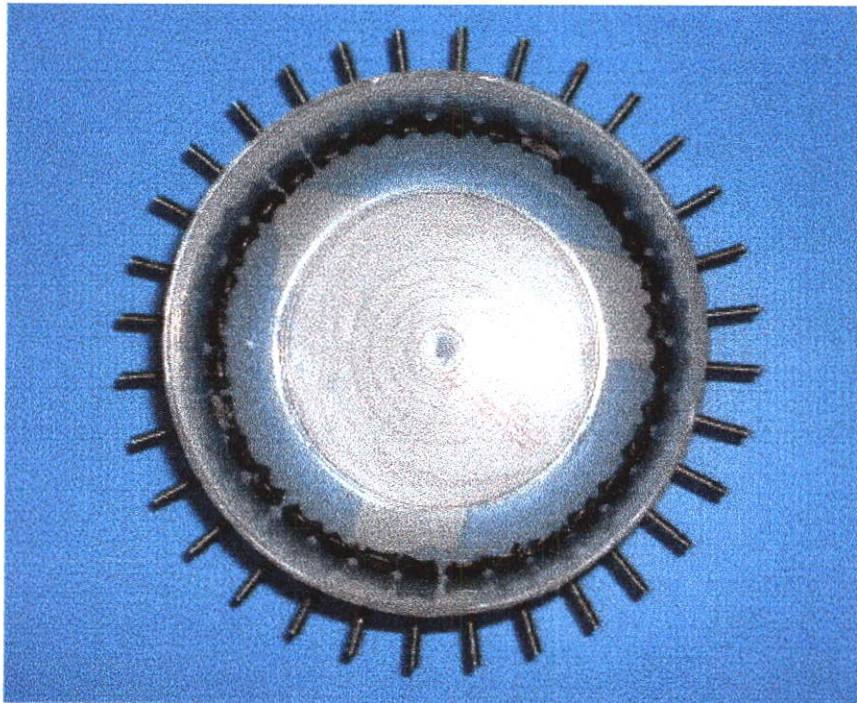
รูปที่ 2 ก ด้านหน้าของระบบเก็บข้อมูล



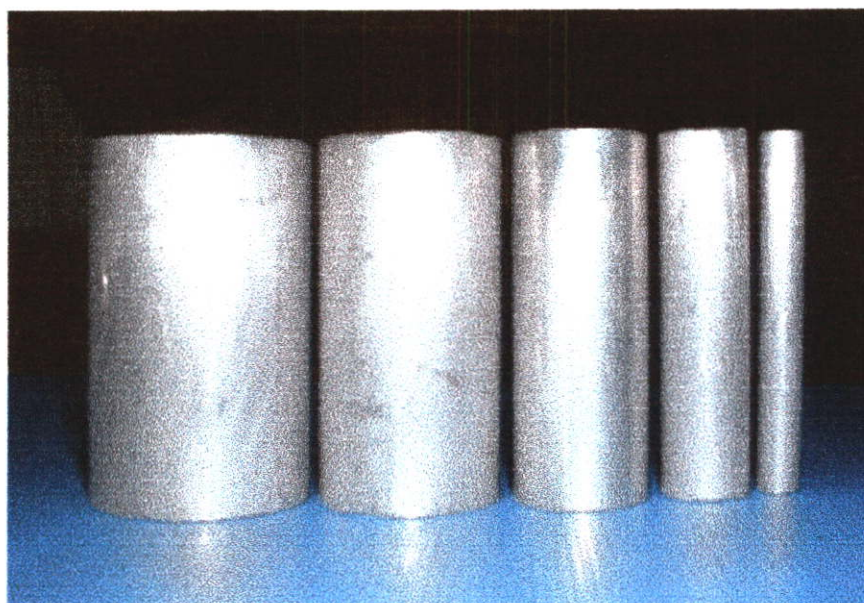
รูปที่ 3 ก ด้านหลังของระบบเก็บข้อมูล



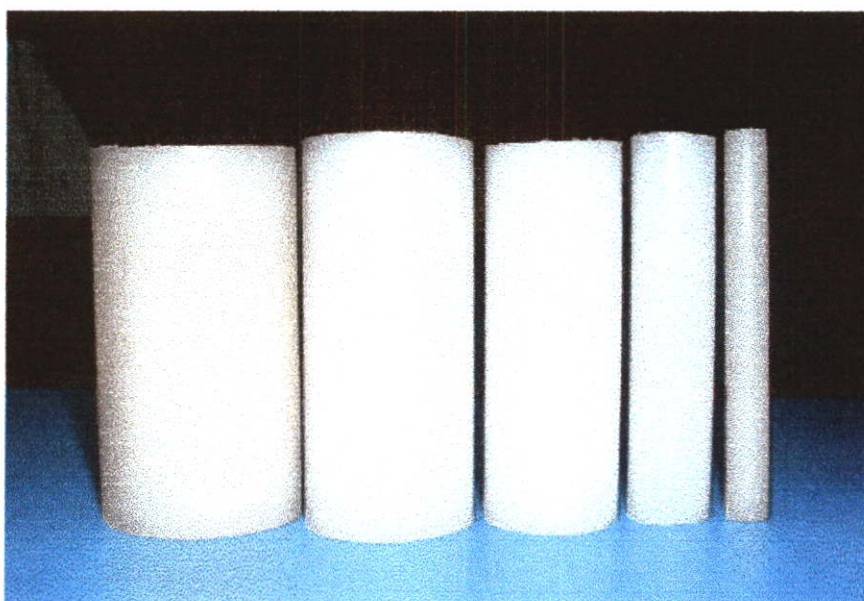
รูปที่ 4 ก ถึงบรรจุน้ำเกลือ (Phantom) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 ก ถึงบรรจุน้ำเกลือ (Phantom) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6 ก วัสดุตัวนำ (แท่งอลูมิเนียม) ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 7 ก วัสดุฉนวน (แท่งพลาสติก) ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

## ภาคผนวก ข

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

- [1] อภินัย อุกษรรัตน์, เทอดชัย ฐเนศวโรดม, กิติพล ชิตสกุล, ประภากร สุวรรณะ และมนัส สัจจวรศิลป์. “อัลกอริธึมสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 1, 2543, หน้า 49-54
- [2] อภินัย อุกษรรัตน์, ดร.กิติพล ชิตสกุล, ชนาธิป นิลแก้ว, รศ.ดร.มนัส สัจจวรศิลป์. “ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ” การประชุมเสนอผลงานวิชาการระดับประเทศ ผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษารั้งที่ 1, 10 – 11 มิถุนายน 2543
- [3] A. Rerkratn, K. Chitsakul, P. Suwanna, M. Sangworasil. “Electrical Impedance Tomography System Using 3-D Finite Element Algorithm” IEEE 2000 TENCON Proceeding, Malaysia, Sep 2000, pp. 499 – 502.
- [4] อภินัย อุกษรรัตน์, กิติพล ชิตสกุล และมนัส สัจจวรศิลป์. “ระบบสร้างภาพตัดขวางอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าภายในวัตถุแบบ 32 อิเล็กโทรด” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23-24 พฤศจิกายน 2543, หน้า 717-720

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	26 สิงหาคม 2517
ภูมิลำเนา	อำเภอบางปลาม้า จังหวัดสุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2541
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	รายละเอียดในภาคผนวก ข.
ประวัติการทำงาน	รับราชการในตำแหน่งนายช่างอิเล็กทรอนิกส์ 4 สังกัดศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง