

การวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ  
ด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบน

INVERSE SCATTERING MEASUREMENT OF DIELECTRIC PROPERTIES  
BY USING METHOD OF MOMENT AND GEOMETRICAL THEORY OF  
DIFFRACTION

ศรชัย แสงนิยม  
SARACHAI SANGNIYOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2545  
ISBN 974-648-688-8

การวัดค่าความเป็นฉนวนของวัสดุโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ  
ด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบน

INVERSE SCATTERING MEASUREMENT OF DIELECTRIC PROPERTIES  
BY USING METHOD OF MOMENT AND GEOMETRICAL THEORY OF  
DIFFRACTION

สรราชัย แสงนิยม

SARACHAI SANGNIYOM

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 43286  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974 - 648 - 688 - 8

**INVERSE SCATTERING MEASUREMENT OF DIELECTRIC PROPERTIES  
BY USING METHOD OF MOMENT AND GEOMETRICAL THEORY OF  
DIFFRACTION**

**SARACHAI SANGNIYOM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT 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 - 688 - 8**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดค่าความเป็นฉนวนของวัสดุโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบน
นักศึกษา	นายศราชัย แสงนิยม
รหัสประจำตัว	38061227
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวัดค่าความเป็นฉนวนด้วยการวัดการกระจายแบบย้อนกลับทำได้โดยใช้สายอากาศรับเก็บตัวอย่างข้อมูลที่เป็นลักษณะอะเพอร์เจอร์ โดยที่เก็บข้อมูลทั้งขนาดและเฟส โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปทำการคำนวณจากสนามแตกกระจายที่วัดได้เพื่อหาความเป็นฉนวน การคำนวณมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่การใช้ทฤษฎีของการเลี้ยวเบนซึ่งพบว่ามีข้อจำกัดทางด้านรูปทรงของวัตถุ ซึ่งใช้ได้กับวัตถุบางรูปทรง ในขณะที่วิธีโมเมนต์นั้นมีข้อจำกัดที่การใช้งานในย่านความถี่สูงซึ่งจะให้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณยังมีขนาดใหญ่ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำทั้งสองวิธีดังกล่าวมาใช้ร่วมกันในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัสดุ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับวัตถุได้หลายรูปทรง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับวัตถุใด ๆ และไม่ต้องใช้เครื่องคำนวณขนาดใหญ่

<b>Thesis Title</b>	Inverse Scattering Measurement of Dielectric Properties by Using Method of Moment and Geometrical Theory Diffraction
<b>Student</b>	Mr. Sarachai Sangniyom
<b>Student ID.</b>	38061227
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Monai Krairiksh

## **ABSTRACT**

This thesis presents the measurement of dielectric properties by using inverse scattering technique. The aperture antenna is used in conjunction with a network analyzer to collect amplitude and phase of scattered field from the object. There are many calculation methods such as Geometrical Theory of Diffraction, which is found to be applicable to the spherical shape of object, while Method of Moment is not suitable to high frequency due to error and large matrix. Therefore, this thesis describes the technique to combine these two methods to determine dielectric properties for applying to any shape of object without using high performance computer.

# กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่บังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี อันเนื่องมาจากได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษา และคำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ที่ได้มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวคือ

- ดร. คมศักดิ์ เมฆสมุทร ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ คุณอาทิตย์ เหมือนชู ในการช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ในห้องวิจัย
- คุณสุทธิพล สุทธิศิลป์ ในการให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์
- คุณวรรณดา พลอยสุวรรณ ในการช่วยพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์

ศราชัย แสงนิม



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีโมเมนต์ .....	18
3.1 กล่าวนำ .....	18
3.2 หลักการของวิธีโมเมนต์ .....	18
3.3 สมการเชิงอินทิกรัล .....	18
3.3.1 ประเภทของสมการเชิงอินทิกรัล .....	18
3.3.2 ฟังก์ชันของกรีน .....	20
3.3.3 ฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนัก .....	22
3.3.4 การนำวิธีโมเมนต์มาใช้ในการหาค่าความเป็นฉนวน .....	25
3.3.4.1 การหาค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ .....	25
3.3.4.1.1 สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม .....	26
3.3.4.1.2 แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ .....	29
3.3.4.1.3 การหาค่าสมาชิกในเมตริกซ์ .....	31
3.3.4.1.4 หาผลลัพธ์จากสมการเมตริกซ์ .....	34
3.3.4.2 การหาค่าความเป็นฉนวนจากสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ .....	34
3.3.4.2.1 สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม .....	34
3.3.4.2.2 แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ .....	35
3.3.4.2.3 การหาค่าสมาชิกในเมตริกซ์ .....	36
3.3.4.2.4 หาผลลัพธ์จากสมการเมตริกซ์ .....	37
3.3.4.3 ขั้นตอนการหาค่าความเป็นฉนวน .....	37
3.4 สรุป .....	38
บทที่ 4 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต .....	39
4.1 กล่าวนำ .....	39
4.2 แสงในเชิงเรขาคณิต .....	40
4.3 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต .....	41
4.3.1 ความสัมพันธ์ของขนาด เฟส และ โพลาริเซชัน .....	41
4.3.2 การเลี้ยวเบนจากขอบตรง : ตกกระทบแบบตั้งฉาก .....	45
4.4 สรุป .....	52

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การใช้วิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเพื่อหาค่าความเป็นฉนวน .....	54
5.1 กล่าวนำ .....	54
5.2 การนำวิธีโมเมนต์มาใช้งานร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต .....	54
5.2.1 การวัดการกระจายแบบย้อนกลับ .....	54
5.2.2 การหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน .....	59
5.3 สรุป .....	60
บทที่ 6 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการหาค่าความเป็นฉนวน .....	61
6.1 กล่าวนำ .....	61
6.2 ระบบการวัด .....	61
6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด .....	62
6.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย .....	62
6.3.2 เครื่องกวาดโพรบ .....	63
6.3.2.1 การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ .....	64
6.3.2.2 การขับสตีปมอเตอร์ .....	65
6.3.2.3 วงจรขับสตีปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด .....	67
6.3.2.4 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดโพรบ .....	68
6.3.2.5 การนำไปใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวน .....	69
6.3.2.6 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวาดโพรบ .....	69
6.3.3 อุปกรณ์อื่น ๆ .....	70
6.4 สรุป .....	71
บทที่ 7 การทดสอบ .....	72
7.1 กล่าวนำ .....	72
7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	71
7.3 ขั้นตอนในการทดสอบ .....	73
7.3.1 การทดสอบกับน้ำเกลือขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร .....	74
7.3.1.1 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.5 เซนติเมตร .....	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.3.1.2 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.25 เซนติเมตร .....	75
7.3.2 การทดสอบกับน้ำเกลือขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตร .....	75
7.3.2.1 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.5 เซนติเมตร .....	75
7.3.2.2 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.25 เซนติเมตร .....	75
7.4 สรุป .....	76
บทที่ 8 ผลการทดสอบกับวัตถุ .....	77
8.1 กล่าวนำ .....	77
8.2 การทดสอบกับวัตถุชนิดอื่น .....	77
8.3 ผลการทดสอบกับเอทิลแอลกอฮอล์และกลีเซอริน .....	78
8.4 ผลการทดสอบมะม่วง .....	78
8.4.1 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบ .....	80
8.4.1.1 มะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือก .....	80
8.4.1.2 มะม่วงแก้วดิบแบบไม่ปอกเปลือก .....	80
8.4.2 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุก .....	80
8.4.2.1 มะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือก .....	80
8.4.2.2 มะม่วงแก้วสุกแบบไม่ปอกเปลือก .....	81
8.4.3 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบ .....	81
8.4.3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือก .....	81
8.4.3.2 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือก .....	82
8.4.4 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุก .....	82
8.4.4.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือก .....	82
8.4.4.2 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบไม่ปอกเปลือก .....	83
8.5 สรุป .....	84
บทที่ 9 .....	85
9.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	86
9.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา .....	86

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	87
บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	89
ประวัติผู้เขียน .....	90

# สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กลไกการเกิดโพลาริเซชันเชิงไฟฟ้าในฉนวน .....	6
6.1 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ ๓เฟสแบบเต็มสเต็ป .....	66
6.2 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ ๓เฟสแบบครึ่งสเต็ป .....	67
7.1 ค่าสภาพยอมในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น .....	74
7.2 ค่าสภาพยอมและค่าความนำของน้ำเกลือ .....	76
8.1 ค่าสภาพยอมและค่าความนำของน้ำเกลือ เอทิลแอลกอฮอล์ และกลีเซอริน .....	78
8.2 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือก .....	80
8.3 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบไม่แบบปอกเปลือก .....	80
8.4 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือก .....	81
8.5 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุกไม่แบบปอกเปลือก .....	81
8.6 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือก .....	82
8.7 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือก .....	82
8.8 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือก .....	83
8.9 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบไม่ปอกเปลือก .....	83

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1ก ลักษณะของอะตอมเมื่อไม่มีสนามจากภายนอก	4
2.1ข ลักษณะของอะตอมเมื่อมีสนามจากภายนอก	4
2.2 การจัดเรียงตัวของไดโพลระหว่างประจุตรงข้ามกันซึ่งมีขนาดเท่ากับ $Q$	5
2.3ก แบบจำลองสารนอนโพลาร์	9
2.3ข แบบจำลองสารที่เป็นโพลาร์	9
2.4ก ฉนวนที่ได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก $E_a$ ประจุรวมทั้งหมด	10
2.4ข ฉนวนที่ได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก $E_a$ ประจุสุทธิ	10
2.5 วงจรขยายกระแสตรงสำหรับวัดค่าความเป็นฉนวน	12
2.6 วงจรเซอร์ริงบริดจ์	13
2.7ก วิธีปรับค่าความต้านทาน	14
2.7ข วิธีปรับค่าตัวเก็บประจุ	14
2.8 วิธีตรวจจับการเกิดคลื่นนิ่ง	15
2.9 วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีขนาดยาวไม่จำกัด	16
2.10 การวัดการส่งสัญญาณของวัตถุที่มีความยาว	16
2.11 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีความยาวจำกัด	17
3.1 สนามที่จุด $(x, y, z)$ และแหล่งกำเนิดที่จุด $(x', y', z')$	20
3.2ก ฟังก์ชันให้น้ำหนักแบบซบโดเมนฟังก์ชันพีชไวส์แบบยูนิฟอร์ม	23
3.2ข ฟังก์ชันให้น้ำหนักแบบฟังก์ชันพีชไวส์แบบเชิงเส้น	23
3.2ค ฟังก์ชันให้น้ำหนักแบบฟังก์ชันพีชไวส์แบบชานส์	23
3.3 วัตถุที่ได้รับสนามที่เป็นคลื่นระนาบ	26
4.1ก การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตโดยขอบโค้ง จุดที่เกิดการเลี้ยวเบน	42
4.1ข การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตโดยขอบโค้ง อะสติกเมติกทิวของรังสี	42
4.2 การเลี้ยวเบนจากลิมิต์ของตรง	44
4.3ก แหล่งกำเนิดลักษณะเส้นอยู่ใกล้ลิมิต์ตัวนำในรูป 2 มิติ การแบ่งบริเวณ	47
4.3ข แหล่งกำเนิดลักษณะเส้นอยู่ใกล้ลิมิต์ตัวนำในรูป 2 มิติ ระบบพิกัด	47
4.4 การเลี้ยวที่เกิดจากการตกกระทบตั้งฉากกับขอบของลิมิต์	48
5.1 หลักการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ	55
5.2 สนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 การวัดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน .....	58
6.1 ระบบการวัด .....	62
6.2 เครื่องวิเคราะห์ห้โครงข่าย (HP 8510C) .....	63
6.3 แสดงเครื่องกวาดโพรบ .....	64
6.4 แสดงวงจรขับสตีปมอเตอร์เบื้องต้น .....	65
6.5 แสดงผังภูมิการขับสตีปมอเตอร์ในแผงวงจรควบคุม .....	68
6.6 การติดตั้งสายอากาศส่ง .....	70
6.7 การติดตั้งสายอากาศรับ .....	70
7.1 น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1 % .....	73
8.1ก เอทิลแอลกอฮอล์ .....	78
8.1ข ก्लीเซอริน .....	78
8.2ก มะม่วงแก้ว .....	79
8.2ข มะม่วงน้ำดอกไม้ .....	79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการส่งออกสินค้าเกษตรทำรายได้แก่ประเทศเป็นอันดับต้นๆ และมีความจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐาน การตรวจสอบคุณสมบัติของสินค้าเกษตรที่ทำได้หลายวิธีเช่น การใช้สายตาจากรูปลักษณ์ภายนอกเช่นดูจากสีของสินค้านั้นๆ การสู่มตัวอย่างเพื่อทดสอบเช่นสินค้าที่มีเปลือกทำได้โดยแกะเปลือกนั้นออกเพื่อดูเนื้อภายใน เนื่องจากสินค้าเกษตรส่วนใหญ่จะมีเปลือกหุ้ม ซึ่งวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องนำสินค้านั้นมาเอาเปลือกออกเพื่อตรวจสอบสภาพภายในของสินค้าดังกล่าว ดังนั้นในการตรวจสอบสินค้าเกษตรโดยไม่ต้องทำลายจะมีประโยชน์มากต่อการควบคุมคุณภาพในการส่งออก

ในการตรวจสอบสินค้าเกษตรแบบไม่ต้องทำลายหรือไม่ต้องเอาเปลือกออกนั้นทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้การส่งคลื่นไมโครเวฟให้แก่วัตถุแล้วทำให้เกิดการกระจาย จากนั้นวัดสนามที่กระจายแล้วนำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ค่าสภาพยอม (Permittivity  $\epsilon$ ) และค่าความนำ (Conductivity  $\sigma$ ) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่า การวัดการกระจายแบบย้อนกลับซึ่งให้ความแม่นยำและได้รับการพัฒนาต่อเนื่องมา [1] และ [2] ในการใช้วิธีดังกล่าวมีข้อดี คือใช้งานได้กับวัตถุได้หลายรูปทรง ให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ แต่มีข้อเสียคือ เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงจะมีข้อผิดพลาดมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องแก้ไข Burnside และคณะ[3] ได้นำเสนอการใช้วิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในการคำนวณปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้ผลอย่างน่าเชื่อถือ จากการค้นคว้าการใช้วิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในการวัดการกระจายแบบย้อนกลับพบว่าสามารถนำมาใช้หาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุซึ่งจะนำไปสู่การตรวจสอบคุณภาพของสินค้าเกษตรโดยไม่ต้องทำลายต่อไป วิธีการดังกล่าวนี้จะใช้คณิตศาสตร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในบทต่อๆ ไป

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ในการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ โดยใช้วิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ เป็นการนำข้อดีและข้อเสียของทั้งการใช้วิธีโมเมนต์และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตมาใช้งาน กล่าวคือการใช้วิธีโมเมนต์นั้นสามารถใช้งานได้กับวัตถุหลายรูปร่างและให้ผลที่แม่นยำ ข้อเสียคือเมื่อนำวิธีโมเมนต์มาใช้งานที่ความถี่สูงจะมีข้อผิดพลาดมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตนั้นสามารถให้ผลที่แม่นยำที่ความถี่

โมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ การใช้งานที่ย่านความถี่สูงจะทำให้ระยะที่ใช้ในการทดสอบไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการทดสอบมาก โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ ประกอบการวัด เช่น เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย คอมพิวเตอร์ ตัวดูดซับคลื่น และเครื่องกวาดโพรบเพื่อเก็บข้อมูลของสนามไฟฟ้า สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการทดสอบทั้งส่งและรับนั้นได้ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นเปิดปลายเป็นโพรบ เริ่มจากการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัตถุที่ไม่ทราบค่าโดยวัตถุนั้นจะถูกล้อมรอบด้วยตัวดูดซับคลื่น ตัวดูดซับคลื่นจะทำให้สนามไฟฟ้าที่วัดได้นั้นไม่มีค่าสนามไฟฟ้าที่เดินทางมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เมื่อได้ค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสแล้ว จะทำการวัดค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสอีกครั้ง โดยที่การวัดครั้งที่สองนี้จะเป็นการวัดเพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน โดยใช้ตัวดูดซับคลื่นวางด้านหน้าของวัตถุ โดยให้เหลือพื้นที่ด้านข้างของวัตถุทั้งสองด้านด้านละเท่ากับเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น หลังจากนั้นนำสนามไฟฟ้าที่วัดได้จากครั้งแรกและครั้งที่สองมาคำนวณย้อนกลับร่วมกับขบวนการทำซ้ำ เพื่อหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ

### 1.3 โครงประกอบวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 9 บท โดยบทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาตลอดจนวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักในการหาค่าความเป็นฉนวน โดยเริ่มจากฉนวนมีคุณสมบัติอย่างไร ฉนวนจะมีคุณสมบัติอย่างไรเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการหาค่าความเป็นฉนวนด้วยวิธีต่าง ๆ

บทที่ 3 หลักการของวิธีโมเมนต์ ข้อดีและข้อเสียต่าง ๆ ที่มาของสมการต่างๆ การนำวิธีโมเมนต์มาใช้ในการหาค่าความเป็นฉนวน ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการใช้วิธีโมเมนต์เพื่อหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ

บทที่ 4 หลักการของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ขอบเขตของการเกิดการเลี้ยวเบน ข้อดีและข้อเสียต่าง ๆ การนำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตมาใช้ในการหาการกระจายของสนาม

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำเอาวิธีโมเมนต์มาใช้งานร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ที่มาของสมการต่าง ๆ การนำวิธีดังกล่าวมาใช้เพื่อหาค่าความเป็นฉนวน

บทที่ 6 กล่าวถึงปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการหาค่าความเป็นฉนวน ระบบการวัด ลักษณะการเก็บข้อมูล ขนาดของการวัด รูปแบบการวัด ระยะห่างระหว่างวัตถุกับสายอากาศ ระยะห่างในการกวาดเพื่อเก็บข้อมูล ขั้นตอนการหาค่าความเป็นฉนวน อุปกรณ์ที่ใช้วัด อุปกรณ์ดูดซับคลื่น

บทที่ 7 กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบโดยใช้น้ำเกลือที่ความเข้มข้นที่ทราบค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้ามาเป็นวัตถุทดสอบ ซึ่งการทดสอบใช้ทั้งวิธีโอมเมตต์และวิธีโอมเมตต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 8 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการใช้วิธีโอมเมตต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

บทที่ 9 สรุปผลการทดลองที่ได้ และวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้น และแนวทางในกาพัฒนาวิธีดังกล่าวเพื่อใช้เป็นประโยชน์ต่อไป

## บทที่ 2

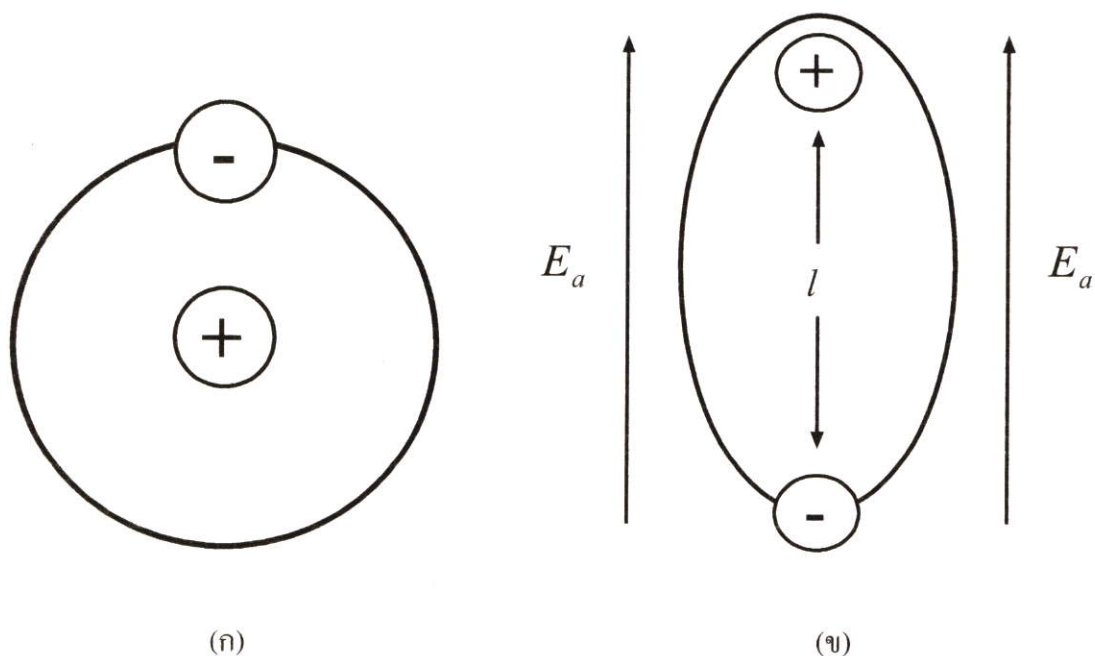
# หลักการหาค่าความเป็นฉนวน

### 2.1 กล่าวนำ

ในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุเบื้องต้นจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของฉนวนก่อน ดังนั้นสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณาคือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งจะกล่าวถึงการตอบสนองต่อสนามที่ได้รับจากภายนอก เพื่อทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อฉนวนได้รับพลังงานจากสนามภายนอก จากนั้นจะพิจารณาถึงวิธีการหาค่าความเป็นฉนวนในย่านความถี่ต่างๆ ซึ่งในแต่ละย่านความถี่วิธีที่ใช้จะแตกต่างกันไป เนื่องจากการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของฉนวนที่ความถี่ต่างๆ จะแตกต่างกันไป ซึ่งในตอนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดค่าความเป็นฉนวนในย่านความถี่ต่างๆ

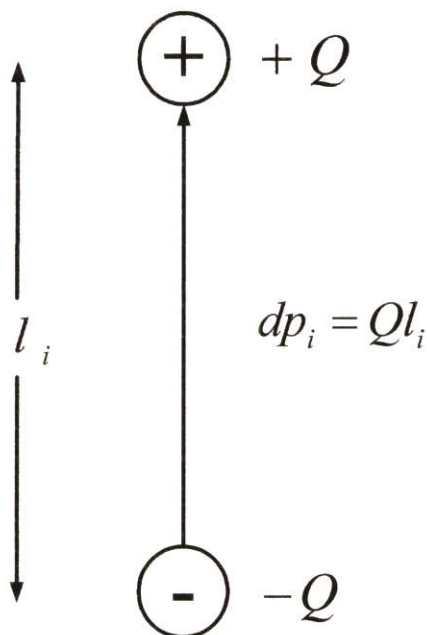
### 2.2 คุณสมบัติของฉนวน

ฉนวนคือวัสดุที่มีลักษณะของประจุที่อยู่ในอะตอมและโมเลกุลนั้นติดกันอยู่ ประจุบวกและประจุลบจะยึดกันอยู่ด้วยแรงของโมเลกุลและแรงของอะตอมซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ ดังนั้นฉนวนในอุดมคติจึงไม่มีประจุอิสระ อะตอมและโมเลกุลของฉนวนสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.1 (ก)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของอะตอม (ก) เมื่อไม่มีสนามจากภายนอก (ข) เมื่อมีสนามจากภายนอก

อย่างไรก็ตามเมื่อฉนวนได้รับการกระตุ้นจากสนามจากภายนอก ขอบเขตของประจุบวกและประจุลบจะไม่เคลื่อนที่ไปที่ผิวของฉนวนเหมือนกับในกรณีของตัวนำ แต่จะมีการเคลื่อนที่ของประจุทำให้ระยะห่างระหว่างประจุบวกและประจุลบมากขึ้นดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของไดโพลระหว่างประจุตรงข้ามกันซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $Q$

การวางตัวของคู่ประจุไฟฟ้าในวัตถุที่เป็นฉนวนจะเรียกว่า โพลารีเซชันเชิงทิศทาง ผลของคู่ประจุไฟฟ้าเป็นตัวแทนของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ได้ด้วยสมการ

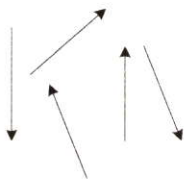
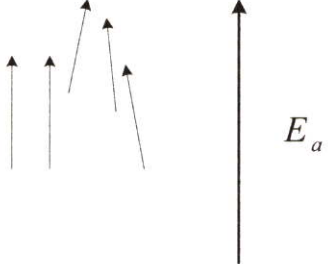
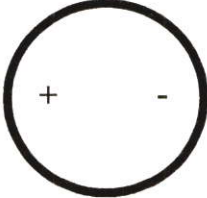
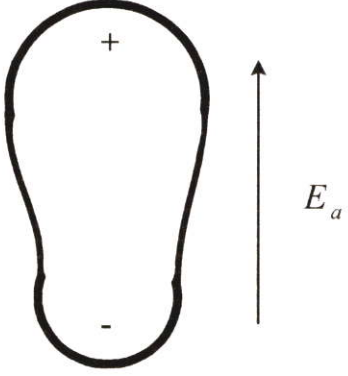
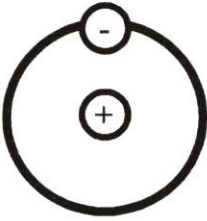
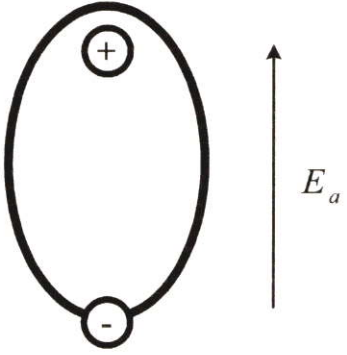
$$dp_i = Ql_i \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า  $Q$  คือค่าขนาดของแต่ละประจุหน่วยเป็นคูลอมบ์  $l_i$  เป็นระยะห่างระหว่างประจุบวกกับประจุลบ เมื่อวัตถุได้รับสนามไฟฟ้า โพลารีเซชันของประจุจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบ ในกรณีของฉนวนไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ ปฏิบัติการตอบสนองนี้จะทำให้วัตถุมีความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ ซึ่งได้มาจากการเคลื่อนตัวของประจุที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก ลักษณะนี้คล้ายกับสปริงที่แขวนน้ำหนักไว้และเรียกว่า พลังงานศักย์ทางไฟฟ้า

การมีอยู่ของคู่ประจุเหล่านี้สามารถนับได้จากการพัฒนารูปแบบจำลองที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ถึงแม้ว่าขบวนการจะทำได้ถูกต้องก็ยังไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติเพราะว่าเมื่อนำไปใช้กับแผ่นของฉนวนจะต้องทราบถึงตำแหน่งของช่องว่างของแต่ละอะตอมและโมเลกุลของวัสดุนั้น ในทางปฏิบัติพฤติกรรมของคู่ประจุและแรงดึงของประจุจะถูกนับในเชิงคุณสมบัติด้วยวิธี

อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันเวกเตอร์  $p$  โดยใช้แบบจำลองที่มองด้วยตาเปล่าเห็น ซึ่งเกี่ยวข้องกับอะตอมและโมเลกุลจำนวนนับพัน

ตารางที่ 2.1 กลไกการเกิดโพลาริเซชันเชิงไฟฟ้าในฉนวน

กลไก	ไม่มีสนามจากภายนอก	ได้รับสนามจากภายนอก
ไดโพลหรือโพลาริเซชันเชิงทิศทาง		
ไอออนิกหรือโพลาริเซชันเชิงโมเลกุล		
อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน		

ค่าไดโพลโมเมนต์ทั้งหมด  $p_i$  ของวัสดุประกอบด้วยผลบวกของไดโพลโมเมนต์ของโพลาริเซชันไดโพลเชิงทิศทาง ซึ่งแต่ละค่าแสดงดังสมการ (2.1) สำหรับปริมาตร  $\Delta v$  ซึ่งมีจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ไดโพลเท่ากับ  $N_c$  ต่อหน่วยปริมาตร หรือค่าทั้งหมดของ  $N_c \Delta v$  เขียนได้ดังสมการ

$$p_t = \sum_{i=1}^{N_e \Delta v} dp_i \quad (2.2)$$

อิเล็กทริกโพลาริเซชันเวกเตอร์  $P$  คือค่าไดโพลโมเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรหรือ

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta v} p_t \right] = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{N_e \Delta v} p_i \right] \quad (2.3)$$

หน่วยของ  $P$  คือ คูลอมบ์-เมตร / ลูกบาศก์เมตร หรือ คูลอมบ์ / ต่อตารางเมตร ซึ่งแทนค่าของความหนาแน่นของประจุที่ผิวของวัตถุ ซึ่งค่าของแรงของความหนาแน่นของประจุบนพื้นที่ของวัตถุ ( $q_{sp}$ ) และไม่สามารถแยกได้ระหว่างประจุบวกและประจุลบ ดังนั้นในปริมาตรรวมทั้งหมดจำนวนคู่ประจุบวกและประจุลบรวมแล้วจะต้องทำให้ค่าประจุมรวมเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นในการหาเงื่อนไขขอบเขตขององค์ประกอบที่ตั้งฉากของความหนาแน่นของอิเล็กทริกฟลักซ์ จึงสามารถสมมุติได้ว่าค่าเฉลี่ยของไดโพลโมเมนต์เป็นดังสมการ

$$dp_i = dp_{av} = Ql_{av} \quad (2.4)$$

อิเล็กทริกโพลาริเซชันเวกเตอร์ของสมการ (2.3) สามารถหาได้เมื่อไดโพลโมเมนต์อยู่ในทิศทางเดียวกัน

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{N_e \Delta v} p_i \right] = N_e dp_{av} = N_e Ql_{av} \quad (2.5)$$

ค่าอิเล็กทริกโพลาริเซชันของฉนวนสามารถเกิดขึ้นได้สามวิธี

1. ไดโพล หรือ โพลาริเซชันเชิงทิศทาง: โพลาริเซชันแบบนี้เกิดขึ้นในวัตถุซึ่งในสภาพปกติไดโพลโมเมนต์จัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าไดโพลจะจัดเรียงในแนวเดียวกับสนาม เรียกว่าวัตถุชนิดนี้ว่า วัสดุแบบโพลาร์
2. ไอออนิก หรือ โพลาริเซชันเชิงโมเลกุล: เช่น โซเดียมคลอไรด์ ประจุบวกและประจุลบมีความสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างประจุ
3. โพลาริเซชันเชิงอิเล็กตรอนิก: โพลาริเซชันแบบนี้เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นฉนวนส่วนใหญ่

ประจุในวัสดุในขณะที่ยังไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เฉลี่ยแล้วประจุจะหักล้างกันหมดตลอดทั้งเนื้อวัสดุ ดังนั้นจะไม่เกิดคู่ประจุและค่าไดโพลโมเมนต์ทั้งหมดและโพลาริเซชันเวกเตอร์เชิงสนาม

ไฟฟ้า  $P$  จะเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าจะทำให้โพลาริเซชันรวมไม่เป็นศูนย์ วัสดุดังกล่าวเรียกว่า นอนโพลาร์ ดังรูปที่ 2.3(ก) วัสดุที่เป็นโพลาร์เมื่อไม่ได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดคู่ของประจุมีค่าไดโพลโมเมนต์ไม่เท่ากับศูนย์ แต่ค่าไดโพลโมเมนต์ทั้งหมด ( $p_i$ ) เท่ากับศูนย์ และค่าโพลาริเซชันเวกเตอร์เชิงสนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าให้กับฉนวนทั้งที่เป็นแบบโพลาร์และนอนโพลาร์ดังรูปที่ 2.3(ก), 2.3(ข) ประจุในแต่ละวัสดุจะจัดเรียงกันในลักษณะคู่ประจุด้วยค่าไดโพลโมเมนต์ไม่เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบด้วยมาตราส่วนที่ตามองเห็นจะเกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

1. ที่พื้นผิวตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าจะมีค่าประจุบวก  $q_s^+$
2. ที่พื้นผิวด้านเดียวกับสนามไฟฟ้าจะมีค่าประจุลบ  $q_s^-$

ค่าความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร  $q_v$  ภายในวัตถุจะมีค่าเป็นศูนย์

อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบด้วยวิธีที่มองด้วยตาเปล่าเห็นดังรูปที่ 2.4(ก) เมื่อต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดกระแสตรง โดยใช้แผ่นตัวนำวางห่างกันระยะ  $S$  ครึ่งหนึ่งของแผ่นตัวนำเป็นพื้นที่ว่างเพื่อแสดงให้เห็นชัดเจนขึ้น สมมติให้มีประจุอิสระ 5 ประจุในแต่ละแผ่นตัวนำที่แบ่งครึ่งกัน ด้วยเหตุผลที่ว่ามีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดขึ้นของประจุที่อยู่ที่ขอบของฉนวน และการเกิดของคู่ประจุไฟฟ้าและการหักล้างกันของประจุตรงข้ามที่อยู่ติดกันดังรูปที่ 2.4(ข) โพลาริเซชันเวกเตอร์เชิงสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นภายในวัตถุ ดังนั้นโพลาริเซชันเวกเตอร์  $P$  คือผลของความหนาแน่นของประจุที่ผิวของขอบของวัตถุด้านบนมีค่า  $-q_{sp}$  และด้านตรงข้ามมีค่า  $+q_{sp}$

ในแต่ละรูปแบบที่ผ่านมาจำนวนสุทธิของประจุคือค่าระหว่างผิวด้านเดียวกับสนามไฟฟ้า และด้านตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปโดยที่ขนาดเป็น

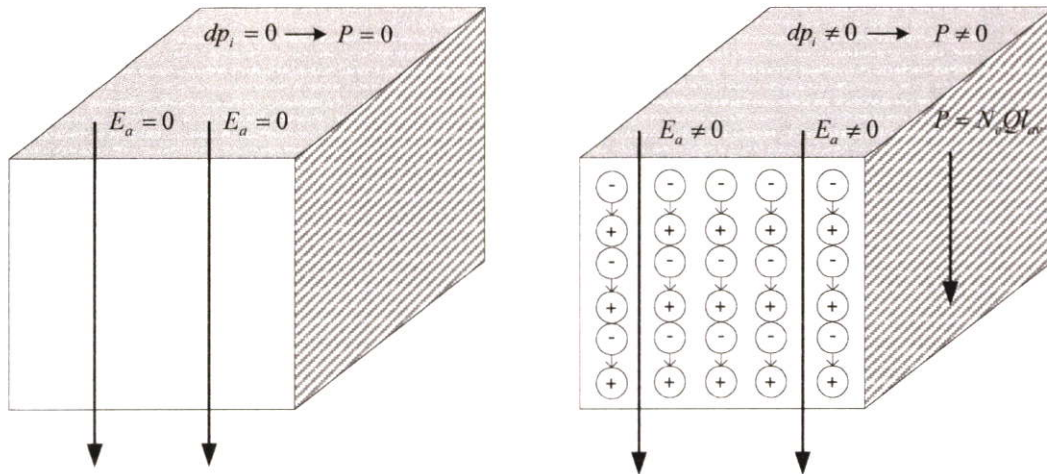
$$P = q_{sp} \quad (2.6)$$

ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปมีค่า  $E_a$  คงที่ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามไฟฟ้าภายในวัสดุที่เป็นฉนวนต่างจากอวกาศว่าง ในอวกาศว่างค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามไฟฟ้า  $D_0$

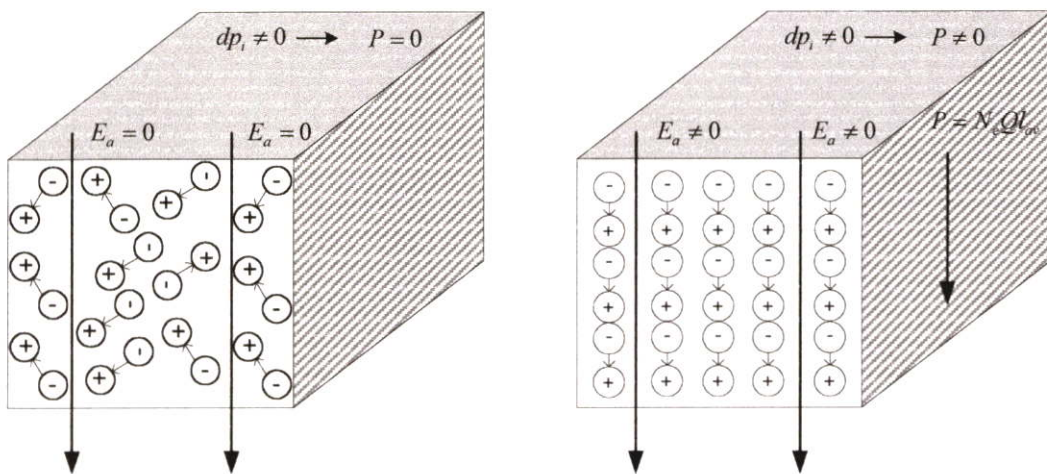
$$D_0 = \epsilon_0 E_a \quad (2.7)$$

ในส่วนวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีค่าเป็น

$$D_0 = \epsilon_0 E_a + P \quad (2.8)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 แบบจำลองสาร (ก) นอนโพลาร์ (ข) สารที่เป็นโพลาร์

ค่า  $D_0$  สอดคล้องกับสนามไฟฟ้า  $E_a$  ด้วยพารามิเตอร์ซึ่งแปรผันตาม  $\epsilon_s$

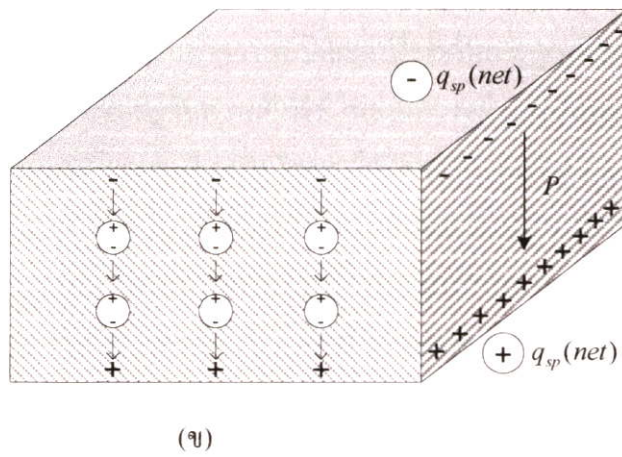
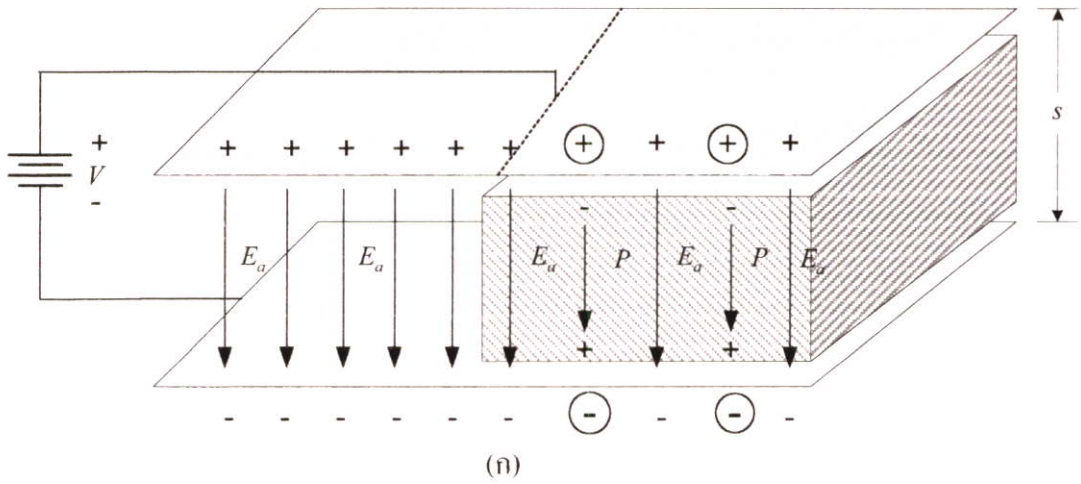
$$D_0 = \epsilon_s E_a \tag{2.9}$$

เมื่อเทียบสมการ (2.8) กับ (2.9) แสดงว่า  $P$  แปรผันตาม  $E_a$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P = \epsilon_0 \chi_e E_a \tag{2.10}$$

หรือ

$$\chi_e = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{P}{E_a} \tag{2.10ก}$$



รูปที่ 2.4 ฉนวนที่ได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E_a$  (ก) ประจุรวมทั้งหมด (ข) ประจุสุทธิ

$\chi_e$  คือค่าขั้วเซปติบิลิตีเชิงสนามไฟฟ้า

เมื่อแทนค่าสมการ (2.10) ลงใน สมการ (2.8) จะได้

$$D_0 = \epsilon_0 E_a + \epsilon_0 \chi_e E_a = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E_a = \epsilon_s E_a \quad (2.11)$$

หรือ

$$\epsilon_s = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \quad (2.11ก)$$

ในสมการ (2.11ก)  $\varepsilon_s$  คือค่าสภาพยอมที่คงที่ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า ค่าคงของไดอิเล็กทริกหรือค่าความเป็นฉนวน

ดังนั้นค่าคงของไดอิเล็กทริกของวัสดุที่เป็นฉนวนคือค่าพารามิเตอร์ซึ่งบอกถึงความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุนั้นเมื่อเทียบกับอากาศว่าง ค่ายิ่งมากแสดงว่าสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มาก

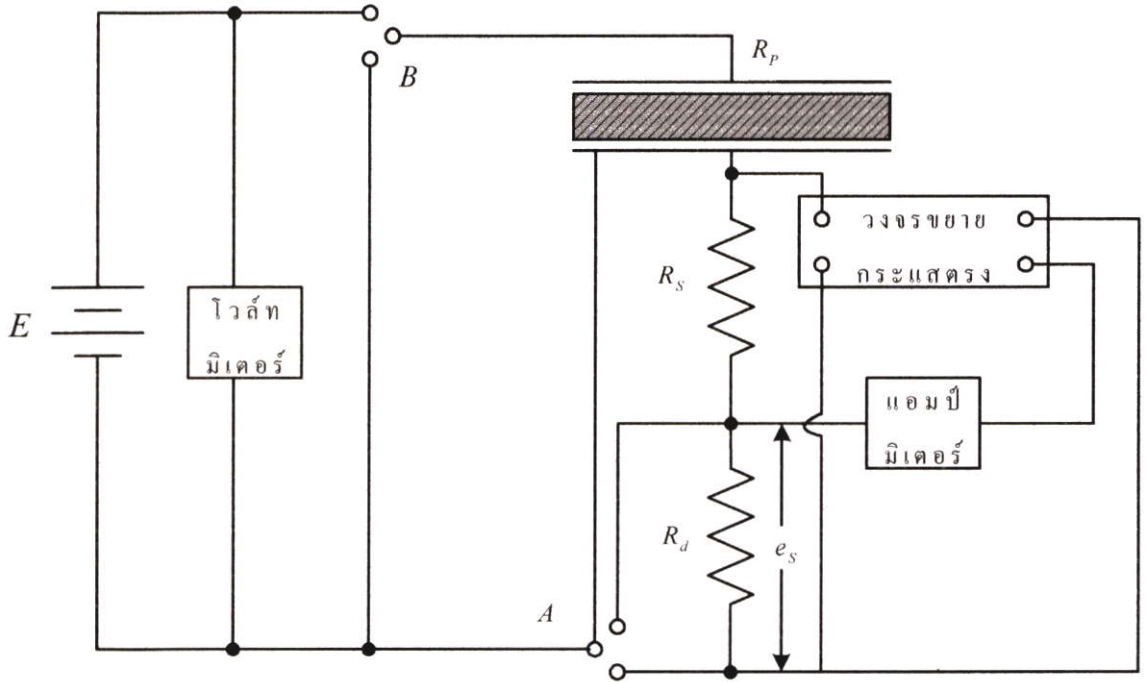
## 2.3 การวัดค่าความเป็นฉนวน

### 2.3.1 การใช้วงจรแบบรวมกลุ่ม

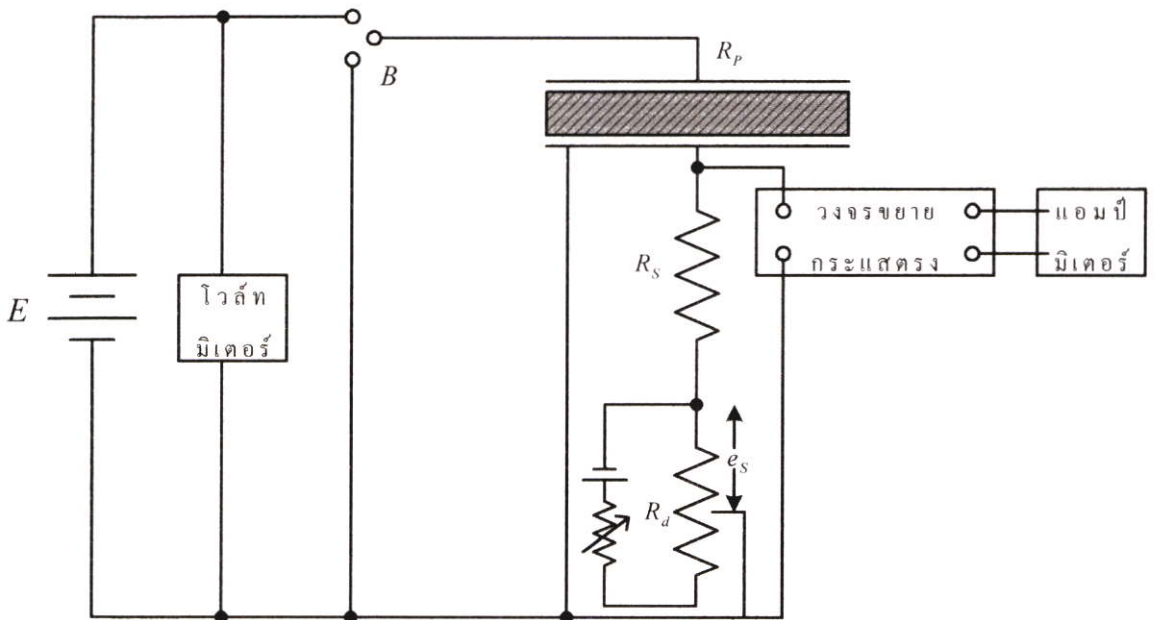
วิธีที่ใช้วงจรแบบรวมกลุ่มถูกใช้ในการหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของฉนวนในช่วงความถี่ 0-20 MHz ผลที่ได้ทั้งค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ค่าความนำและค่าปัจจัยในการสูญเสียสามารถหาค่าได้โดยตรงซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ ในย่านความถี่ 0-10 MHz ค่าตัวเก็บประจุและค่าตัวประกอบการสูญเสียความร้อนของตัวอย่างวัสดุหาได้โดยวิธีนัลเมธอด (Null Method) ซึ่งเกี่ยวข้องกับชนิดของตัวเก็บประจุแบบบริดจ์ซึ่งค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียคำนวณมาจากตัวเก็บประจุเหล่านี้ ในขณะที่ความถี่สูงขึ้นค่าความผิดพลาดจากตัวเก็บประจุแบบบริดจ์มีค่ามากเกินไปจึงนำวงจรเรโซแนนซ์มาใช้ ค่าตัวเก็บประจุของตัวอย่างยังคงถูกวัดด้วยการแทนค่า แต่ค่าความสูญเสียหาได้จากความกว้างของเส้นโค้งของกราฟการเกิดเรโซแนนซ์

#### 2.3.1.1 ในย่านความถี่ 0-10 Hz

วิธีนี้จะใช้โวลต์มิเตอร์-แอมป์มิเตอร์ ดังรูปที่ 2.5 กระแสที่ใช้อยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-12}$  แอมป์ ถึง 1 แอมป์ และใช้วงจรขยายแบบกระแสตรงที่มีความไวสูง ดังรูปที่ 2.5(ก), 2.5(ข) บางครั้งในการวัดจะต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนานถึง 2 สัปดาห์ที่ความถี่  $10^{-7}$  Hz ตัวต้านทานมาตรฐาน  $R_s$  จะต่ออนุกรมกับตัวอย่างที่ใช้วัด และต่อเข้ากับวงจรป้อนกลับแบบลบด้วยความต้านทานโดยใช้วงจรขยายแบบกระแสตรงที่คงที่ การต่อวงจรป้อนกลับแบบลบที่เป็นไปได้มี 2 ทาง ดังรูปที่ 2.5(ก) การต่อแบบที่ 1 ค่าความต้านทานทั้งหมดของ  $R_s$  ในวงจรและค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ไดอิเล็กทริกจะถูกขยายขึ้นเท่ากับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนตัวต้านทาน  $R_s$  การต่อแบบที่ 2 ค่าความต้านทานในวงจรที่ใช้วัดจะน้อยกว่า  $R_s$  ในอัตราส่วนของอัตราขยายแบบดีเจนเนอร์เรตต่ออัตราการขยายแบบอินทรีนซิก เนื่องจากโดยปกติแล้วอัตราส่วนของค่าดังกล่าวจะเข้าใกล้ 0.0001 ถึงแม้ว่าค่าความต้านทานมาตรฐานจะเป็น 100 กิโลโอห์ม ข้อเสียคือค่าความต่างศักย์แบบสลัปจะตกคร่อมตัวอย่างที่ใช้วัด ด้วยกำลังขยายต่ออัตราการขยายแบบอินทรีนซิกของวงจรขยายมีค่าประมาณ 10000 เท่า ดังนั้นการต่อแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้ถึงแม้ว่าตัวอย่างจะป้องกันแล้วและมีการต่อแหล่งกำเนิดที่เป็นกระแสตรงแล้วก็ตาม



(ก)



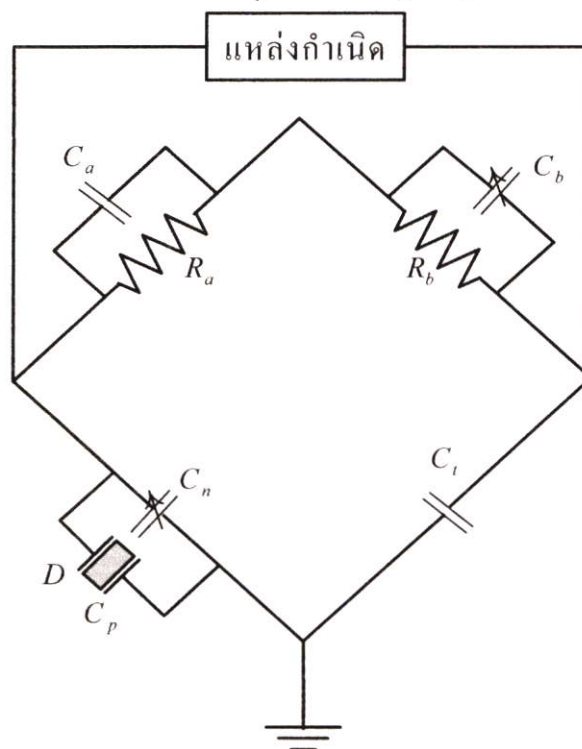
(ข)

รูปที่ 2.5 วงจรขยายกระแสตรงสำหรับวัดค่าความเป็นฉนวน

### 2.3.1.2 ในย่านความถี่ 1-10 MHz

ในการวัดในย่านความถี่ดังกล่าวจะใช้ตัวเก็บประจุมาทำแบบบริดจ์โดยมีอัตราส่วนของ  $R_a$  และ  $R_b$  เท่ากับอัตราส่วนของค่าตัวเก็บประจุมาตรฐาน  $C_n$  และตัวเก็บประจุแบบสมมูล  $C_p$  วิธีการแทนค่าของการวัดถูกนำมาใช้เพื่อความถูกต้องมากขึ้น ตัวอย่างจะถูกต่อแบบขนานกับตัวเก็บประจุมาตรฐานและต่อกันแบบบริดจ์สมมูล ดังรูปที่ 2.6 จากนั้นทำการติดตั้งวงจร โดยที่ครั้งแรก จะทำการวัดโดยที่มีตัวอย่างต่อดังรูปที่ 2.6 โดยสมมติให้ตัวอย่างนั้นมีค่าเก็บประจุเท่ากับ  $C_p$  จากนั้นอ่านค่าตัวเก็บประจุ  $C_n$  หลังจากนั้นทำการวัดอีกครั้งโดยไม่มีตัวอย่างต่อในวงจร อ่านค่าตัวเก็บประจุ  $C_n$  อีกครั้งโดยครั้งที่สองนี้จะกำหนดให้ค่าของตัวเก็บประจุที่อ่านได้ในครั้งที่สองมีค่าเป็น  $C_n'$  ค่าที่อ่านได้จะมีความแตกต่างกันทำให้สามารถหาค่าของตัวเก็บประจุ  $C_p$  ได้สมการ

$$C_p = \Delta C = C_n' - C_n \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.6 วงจรเซอร์ริงบริดจ์

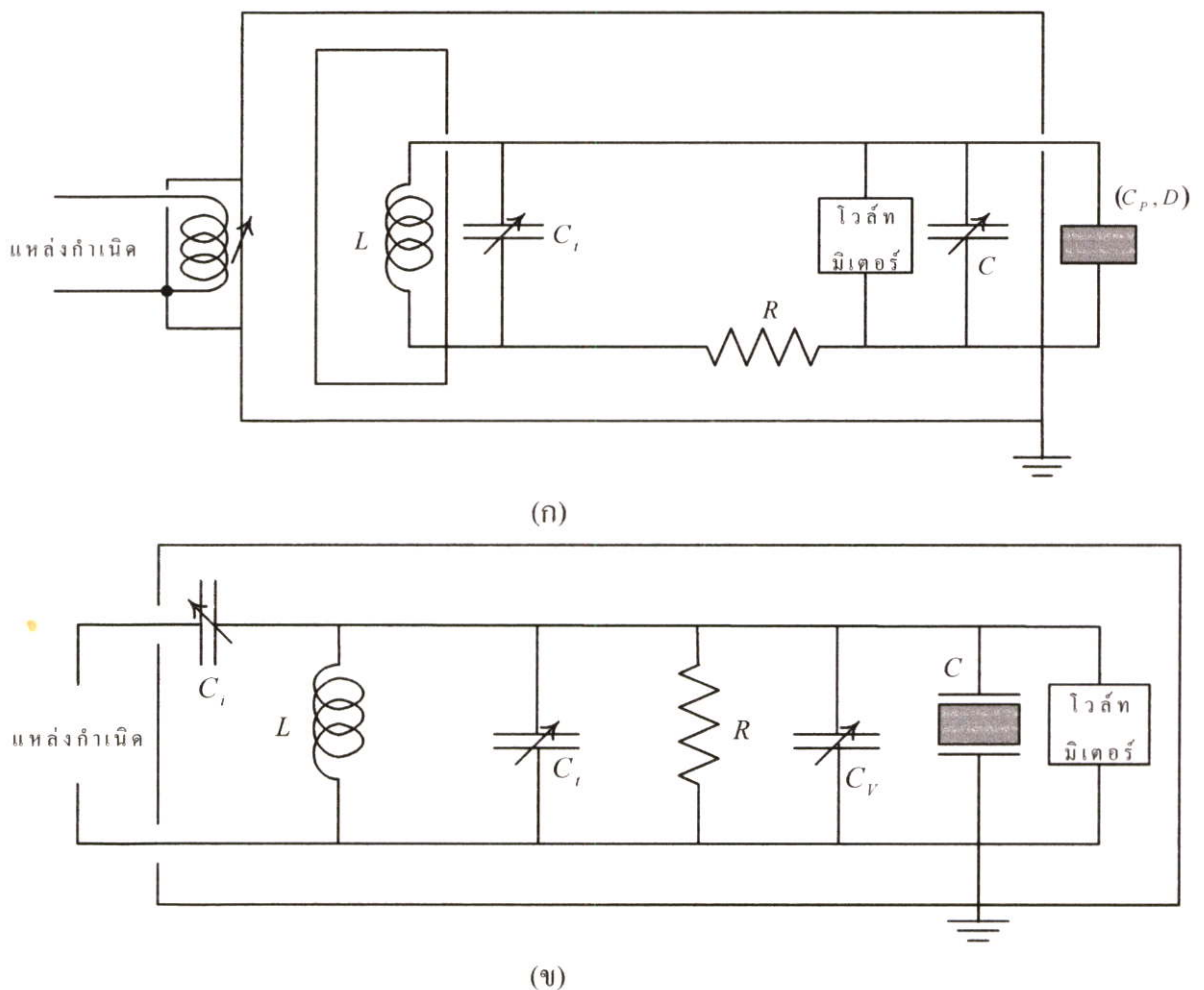
### 2.3.1.3 ในย่านความถี่สูง

ในการใช้งานในย่านความถี่สูงได้นำวงจรเรโซแนนซ์มาใช้งานในการวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาตรฐาน ต่อกันอยู่ในวงจรแบบปิด เนื่องจากวงจรเรโซแนนซ์ใช้ได้เฉพาะในย่านความถี่สูงดังนั้นวงจรเซอร์ริงบริดจ์จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นวงจรมัดที่นำมาใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวนในย่านความถี่สูงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุประกอบขึ้นเป็นวงจรแบบบริดจ์ดังรูปที่

ในการใช้งานจะปรับให้เกิดเรโซแนนซ์ครั้งแรกด้วยการใช้ตัวอย่างที่ต้องการมาเป็นแคลมป์ (Clamped) ในไมโครมิเตอร์อิเล็กโตรด (Micrometer Electrode) จากนั้นนำตัวอย่างออกและวัดค่าตัวเก็บประจุอีกครั้ง นำค่าตัวเก็บประจุที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้งมาหักลบกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุของตัวอย่างดังกล่าวดังสมการ

$$C_p = C' - C_s - C_a \quad (2.13)$$

วงจรเรโซแนนซ์มีอยู่ด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับวิธีในการวัด ดังรูปที่ 2.7 โดยที่  $C'$  คือค่าตัวเก็บประจุเมื่อมีวัตถุอยู่ในวงจร  $C_s$  คือค่าตัวเก็บประจุเมื่อไม่มีวัตถุในวงจร  $C_a$  คือค่าตัวเก็บประจุเมื่อไม่มีค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดที่ขอบของวัตถุซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากความหนาของวัตถุ



รูปที่ 2.7 (ก) วิธีปรับค่าความต้านทาน (ข) วิธีปรับค่าตัวเก็บประจุ

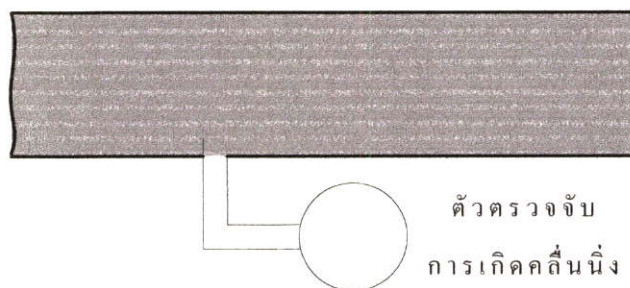
## 2.3.2 การใช้วงจรแบบกระจาย

### 2.3.2.1 วิธีใช้สายส่ง

ในย่านความถี่สูงไม่สามารถนำวงจรแบบรวมกลุ่มมาใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวนได้ หลักการของการใช้สายส่งจึงถูกนำมาใช้ ด้วยการวัดค่าโดยตรงในสายส่งหรือในสมการคลื่น ในเทอมของการใช้สายส่ง ในการวัดจะรวมถึงการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางแบบขนานตกกระทบขอบเขตของฉนวนที่ต้องการวัด โดยทั่วไปการแพร่กระจายของอิมพีแดนซ์ของทั้งแบบคงที่และแบบอินทรีนสิกจะต้องวัดเพื่อหาค่า  $\epsilon$  และ  $\mu$

#### 2.3.2.1.1 วิธีการวัดการเกิดคลื่นนิ่ง

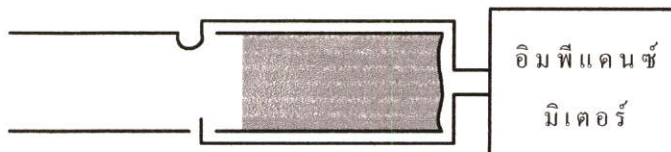
วิธีนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับของเหลวดังรูปที่ 2.8 การนำวิธีนี้ไปใช้กับก๊าซจะประสบปัญหาเรื่องการปิดผนึกเพื่อไม่ให้ก๊าซเหล่านั้นรั่วไหล ขณะที่การใช้ของแข็งแล้วทำการเจาะเพื่อวัดจะเกิดสัญญาณลดทอนเนื่องจากการสะท้อนที่ขอบเขตระหว่างอากาศกับฉนวน การวัดค่าความเป็นฉนวนที่เป็นของเหลวปัญหาหลักคือการรั่วไหลและการระเหย โดยหลักการแล้วการวัดจะได้รับความถูกต้องสูงสุดเมื่อใช้กับของเหลวที่มีการลดทอนต่ำ



รูปที่ 2.8 วิธีตรวจจับการเกิดคลื่นนิ่ง

#### 2.3.2.1.2 วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีขนาดยาวไม่จำกัด

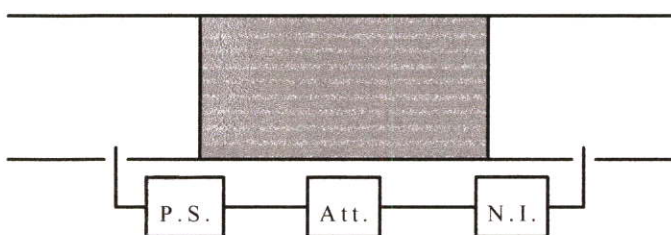
ดังรูปที่ 2.9 ค่าที่ได้จะถูกต้องทั้งค่าความเป็นฉนวนและค่าความสูญเสียแต่ละจะใช้ได้กับวัตถุบางชนิดเท่านั้นที่มีค่าความเป็นฉนวนต่ำและค่าความสูญเสียสูง สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ต่ำหรือปานกลางจะทำให้ได้ค่าความเป็นฉนวนแต่ค่ามุมเชิงโพลาร์จะมีค่าต่ำ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีขนาดยาวไม่จำกัดจะใช้กับวัตถุที่มีความหนามากกว่า 10 มิลลิเมตร และใช้สายส่งที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับความหนาของวัตถุ



รูปที่ 2.9 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีความยาวไม่จำกัด

### 2.3.2.1.3 วิธีใช้การส่งสัญญาณกับวัตถุที่มีความยาว

ดังรูปที่ 2.10 เป็นวิธีที่ใช้งานได้ดีในการวัดวัตถุที่มีค่าความสูญเสียสูงหรือปานกลางเมื่อวัตถุมีขนาดใหญ่ ข้อจำกัดคือวิธีใช้ได้เฉพาะวัตถุที่มีค่าการลดทอนมากกว่าหรือเท่ากับ 80 เดซิเบล เท่านั้น วัตถุที่ใช้ได้จะเป็นน้ำหรือดิน

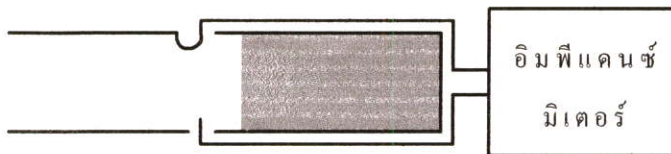


P.S.	ตัวเลื่อนเฟส
Att.	ตัวลดทอน
N.I.	นัลอินดิเคเตอร์

รูปที่ 2.10 การวัดการส่งสัญญาณกับวัตถุที่มีความยาว

### 2.3.2.1.4 วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีความยาวจำกัด

เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องกับวัตถุที่มีค่าการลดทอนในระดับปานกลางหรือต่ำ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีความยาวจำกัดนั้นจะใช้กับวัตถุที่มีความหนาน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร โดยใช้สายส่งที่มีความยาวจำกัดซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายส่งที่มีความยาวจำกัด

## 2.4 สรุป

จากคุณสมบัติของฉนวนทำให้ทราบว่าเมื่อฉนวนได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอก อะตอมภายในโมเลกุลจะมีการจัดเรียงตัวของประจุจะถูกผลักให้อยู่ห่างจากประจุลบมากขึ้น ทำให้เกิดพลังงานภายในอะตอมมากขึ้นจึงเกิดพลังงานขึ้นภายใน โมเลกุลของฉนวน

สำหรับวิธีการวัดค่าความเป็นฉนวนที่ได้กล่าวในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีที่ใช้โดยการนำวัตถุที่ต้องการวัดต่อเข้ากับวงจรหรืออุปกรณ์ที่ใช้วัด ซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภทด้วยกันคือใช้วงจรแบบรวมกลุ่มและวงจรแบบกระจาย

วิธีแรกนั้นใช้วิธีต่อเข้ากับวงจรโดยนำวัตถุที่ต้องการวัดแทนด้วยค่าตัวเก็บประจุแล้วทำการวัดโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้เมื่อไม่มีตัวเก็บประจุหรือวัตถุชิ้นนั้นอยู่

วิธีที่สองใช้วิธีแบบวงจรกระจายโดยนำวัตถุเป็นส่วนหนึ่งของการส่งสัญญาณแล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าหรือวัดการส่งสัญญาณ

ซึ่งทั้งสองวิธีที่กล่าวมานั้นมีข้อจำกัดคือจะต้องนำวัตถุที่ต้องการวัดนั้นไปสัมผัสกับวัตถุอื่นหรือวัตถุชิ้นนั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดค่าความเป็นฉนวนด้วยวิธีที่ไม่ต้องทำให้วัตถุชิ้นเสียหาย โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนและรายละเอียดต่างๆ ในบทต่อไป

# บทที่ 3

## วิธีโมเมนต์

### 3.1 กล่าวนำ

ในการแก้ปัญหาเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอินทิกรัลแบบเชิงเส้นที่ได้มาจากสมการของแมกซ์เวลล์และเงื่อนไขขอบเขต วิธีโมเมนต์เป็นขบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหามสมการเชิงเส้น ขบวนการที่ใช้ในวิธีโมเมนต์จะใช้การคูณกันของค่าที่เหมาะสมของค่าฟังก์ชันให้น้ำหนักและการอินทิเกรตการใช้วิธีโมเมนต์ในเชิงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวิธีที่สัมพันธ์กับเมตริกซ์เป็นที่นิยมใช้เพราะผลที่ได้และความสามารถที่เอนกประสงค์

### 3.2 หลักการของวิธีโมเมนต์

เมื่อพิจารณาถึงสมการที่ไม่เป็นเอกพันธ์

$$L\Phi = g \quad (3.1)$$

$L$  คือตัวคิดคำนวณ  $g$  เป็นฟังก์ชันที่ทราบค่า  $\Phi$  เป็นฟังก์ชันที่ต้องการหา ขบวนการที่จะนำวิธีโมเมนต์มาใช้เพื่อแก้ปัญหามสมการ (3.1) จะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม
2. แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนัก
3. หาค่าของแต่ละหน่วยของเมตริกซ์
4. แก้ปัญหามสมการเชิงเส้นด้วยวิธีเมตริกซ์

### 3.3 สมการเชิงอินทิกรัล

สมการเชิงอินทิกรัลเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า  $\Phi$  ที่อยู่ในรูปของการอินทิเกรต ตัวอย่างของสมการเชิงอินทิกรัลได้แก่ สมการฟูรีเยร์ สมการลาปลาซ และสมการแองเคิล

#### 3.3.1 ประเภทของสมการเชิงอินทิกรัล

สมการเชิงอินทิกรัลเชิงเส้นส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทซึ่งตั้งชื่อตาม

Fredholm และ Volterra ประเภทแรกมีชื่อว่า สมการของ Fredholm โดยมีสมการลำดับที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

$$f(x) = \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.2)$$

$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.3)$$

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.4)$$

โดยที่  $\lambda$  เป็นค่าที่มีเฉพาะขนาดหรือเป็นค่าเชิงซ้อน ฟังก์ชัน  $K(x,t)$  และ ฟังก์ชัน  $f(x)$  และ ขอบเขตของการอินทิเกรต  $a$  และ  $b$  เป็นค่าที่ทราบอยู่แล้ว ขณะที่  $\Phi(x)$  นั้นไม่ทราบค่า ฟังก์ชัน  $K(x,t)$  เรียกว่า เคอเนล ของสมการเชิงอินทิกรัล ส่วนค่าของ  $\lambda$  จะมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย

สมการเชิงอินทิกรัลประเภทที่สองเรียกว่า Volterra โดยมีสมการลำดับที่หนึ่ง สองและสาม ตามลำดับ

$$f(x) = \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.5)$$

$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.6)$$

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (3.7)$$

สมการเชิงอินทิกรัลแบบที่สองนั้น ค่าขอบเขตบนของการอินทิเกรตนั้นจะเป็นตัวแปร ถ้าค่าของ  $f(x) = 0$  สมการที่ (3.2) ถึง (3.7) จะกลายเป็นสมการแบบเอกพันธ์ ในสมการที่ (3.2) ถึง (3.7) ทั้งหมดเป็นสมการเชิงเส้น แต่ในกรณีที่ฟังก์ชัน  $\Phi(x)$  ที่อยู่ในการอินทิเกรตมีค่ายกกำลังมากกว่า หนึ่ง สมการนั้นจะไม่ใช่สมการเชิงเส้น เช่น

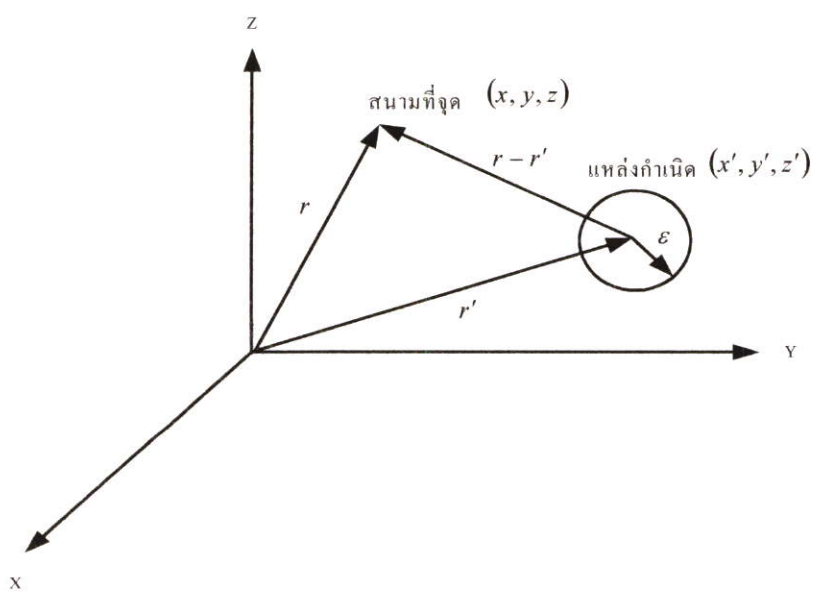
$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi^2(t)dt \quad (3.8)$$

ฟังก์ชันในสมการที่ (3.8) ไม่ใช่ฟังก์ชันเชิงเส้น ถ้าค่า  $a$  หรือ  $b$  หรือค่า  $K(x,t)$  มีค่าไม่จำกัด สามารถกล่าวได้ว่าสมการเชิงอินทิกรัลนี้เป็นแบบซิงกูลาร์ (Singular) ซึ่งทำให้ค่าของ  $K(x,t)$  มีค่าสมมาตร  $K(x,t)=K(t,x)$

### 3.3.2 ฟังก์ชันของกรีน

ฟังก์ชันของกรีนสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ ฟังก์ชันของแหล่งกำเนิด (Source Function) ซึ่งก็คือเคอเนลฟังก์ชันที่ได้จากปัญหาของค่าขอบเขตเชิงเส้นและทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างการดิฟเฟอเรนเชียลและอินทิกรัล นอกจากนี้ฟังก์ชันของกรีนยังเตรียมวิธีการแก้ปัญหาในรูปของแหล่งกำเนิด ( $g$  ใน  $L\Phi = g$ ) ในสมการดิฟเฟอเรนเชียลบางส่วน (Partial Differential Equation) หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าฟังก์ชันของกรีนคือวิธีการแก้ปัญหาอนุกรมขยาย (Series Expansion) สำหรับแก้ปัญหาค่าขอบเขตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) โดยลดรูปของปัญหาขอบเขตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันให้อยู่ในรูปของปัญหาเนื้อเดียวกัน (Homogenous)

เพื่อให้ได้ค่าสนามที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดที่มาจากฟังก์ชันของกรีน ถ้า  $G(r,r')$  เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต  $r$  ที่เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดที่จุด  $r'$  ดังนั้นสนามที่จุด  $r$  เนื่องจากแหล่งกำเนิด  $g(r')$  คือค่าอินทิกรัลของ  $g(r')G(r,r')$  ที่ระยะ  $r'$  ดังนั้นในเชิงกายภาพแล้วฟังก์ชันของกรีนแสดงถึงค่าความต่างศักย์ที่จุด  $r$  เนื่องจากประจุหนึ่งหน่วยที่วางอยู่ที่จุด  $r'$  ดังรูปที่ 3.1 หรือหมายความถึงการตอบสนองในระบบเชิงเส้นต่อการใส่ค่าอิมพัลส์มีค่าหนึ่งหน่วยที่ระยะ  $r = r'$



รูปที่ 3.1 สนามที่จุด  $(x, y, z)$  และแหล่งกำเนิดที่จุด  $(x', y', z')$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.1) เราสามารถนิยามฟังก์ชันของกรีนให้สอดคล้องกับตัวดำเนินการเชิงดิฟเฟอเรนเชียล  $L$  เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของสมการที่ไม่เป็นเอกพันธ์แหล่งกำเนิดสมการ

$$LG(r, r') = \delta(r, r') \quad (3.9)$$

โดยที่  $r$  และ  $r'$  เป็นเวกเตอร์ของตำแหน่งของสนามที่จุด  $(x, y, z)$  และแหล่งกำเนิดที่จุด  $(x', y', z')$  ตามลำดับ และค่า  $\delta(r, r')$  เป็นค่าใดแรกเคลดต้าฟังก์ชันซึ่งจะมีค่าเฉพาะเมื่อ  $r = r'$  ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$\int \delta(r, r') g(r, r') dv' = g(r) \quad (3.10)$$

ดังนั้น ความหมายของ  $G(r, r')$  ในเชิงกายภาพแสดงถึงการตอบสนองของระบบเชิงเส้นต่อการได้รับอิมพัลส์ขนาดหนึ่งหน่วยที่ระยะ  $r = r'$  ฟังก์ชันของกรีนมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1.  $G$  สอดคล้องกับสมการ  $LG(r, r') = 0$  ยกเว้นที่จุดแหล่งกำเนิด  $r'$

$$LG(r, r') = \delta(r, r') \quad (3.11)$$

2.  $G$  มีค่าสมมาตร

$$G(r, r') = G(r', r) \quad (3.12)$$

3.  $G$  สอดคล้องกับค่าขอบเขต  $f$  ที่อยู่บน  $B$

$$G = f \text{ ที่อยู่บน } B \quad (3.13)$$

4.  $G$  มีค่าต่อเนื่องใน  $r, r'$  แต่ทิศทางของอนุพันธ์  $\frac{\partial G}{\partial n}$  มีค่าไม่ต่อเนื่องที่  $r'$  ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_S \frac{\partial G}{\partial n} dS = 1 \quad (3.14)$$

โดยที่  $n$  เป็นจุดตั้งฉากกับทรงกลมรัศมี  $\varepsilon$  และ  $\varepsilon^2 = |r - r'|$

### 3.3.3 ฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนัก

หลังจากที่ได้สมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้สมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปของชุดของสามการเชิงเส้นที่ไม่ทราบค่าจะถูกระบุโดยชุดของ  $u_n(z)$  ของฟังก์ชันพื้นฐานด้วยค่าขนาดที่ไม่ทราบค่า ดังสมการ

$$I(z) = \sum_{n=1}^N I_n u_n(z) \quad (3.15)$$

โดยที่  $N$  เป็นจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ครอบคลุมบริเวณทั้งหมดของฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่าและค่าสัมประสิทธิ์ของการขยาย  $I_n$  คือสิ่งที่ต้องการทราบค่า ฟังก์ชัน  $u_n(z)$  ที่นำมาใช้จะต้องเป็นฟังก์ชันอิสระแบบเชิงเส้น ฟังก์ชันพื้นฐานที่นำมาใช้โดยปกติแล้วจะนำมาเพื่อใช้แก้ปัญหาสายอากาศและการกระจายมีสองแบบด้วยกัน แบบแรกเรียกว่า ฟังก์ชันแบบทั้งโดเมน แบบที่สองเรียกว่าฟังก์ชันซับโดเมน แบบทั้งโดเมนจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $-1/2 < z < 1/2$  ตัวอย่างเช่น

1. ฟูรีเยร์

$$u_n(z) = \frac{V}{2} \cos(n-1) \quad (3.16)$$

2. เชฟบีเชฟ

$$u_n(z) = T_{2n-2}(v) \quad (3.17)$$

3. แมคคลอริน

$$u_n(z) = v^{2n-2} \quad (3.18)$$

4. เลเจนดรี

$$u_n(z) = P_{2n-2}(v) \quad (3.19)$$

5. เฮอร์มิต

$$u_n(z) = H_{2n-2}(v) \quad (3.20)$$

โดยที่  $v = 2z/l$  และ  $n = 1, 2, \dots, N$  ฟังก์ชันซับโดเมนจะใช้ในช่วงหนึ่งของ  $N$  ส่วนที่ไม่ซ้อนทับกัน ตัวอย่างเช่น

1. ฟังก์ชันพีชไมล์แบบคงที่

$$u_n(z) = \begin{cases} 1, & z_{n-1/2} < z < z_{n+1/2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.21)$$

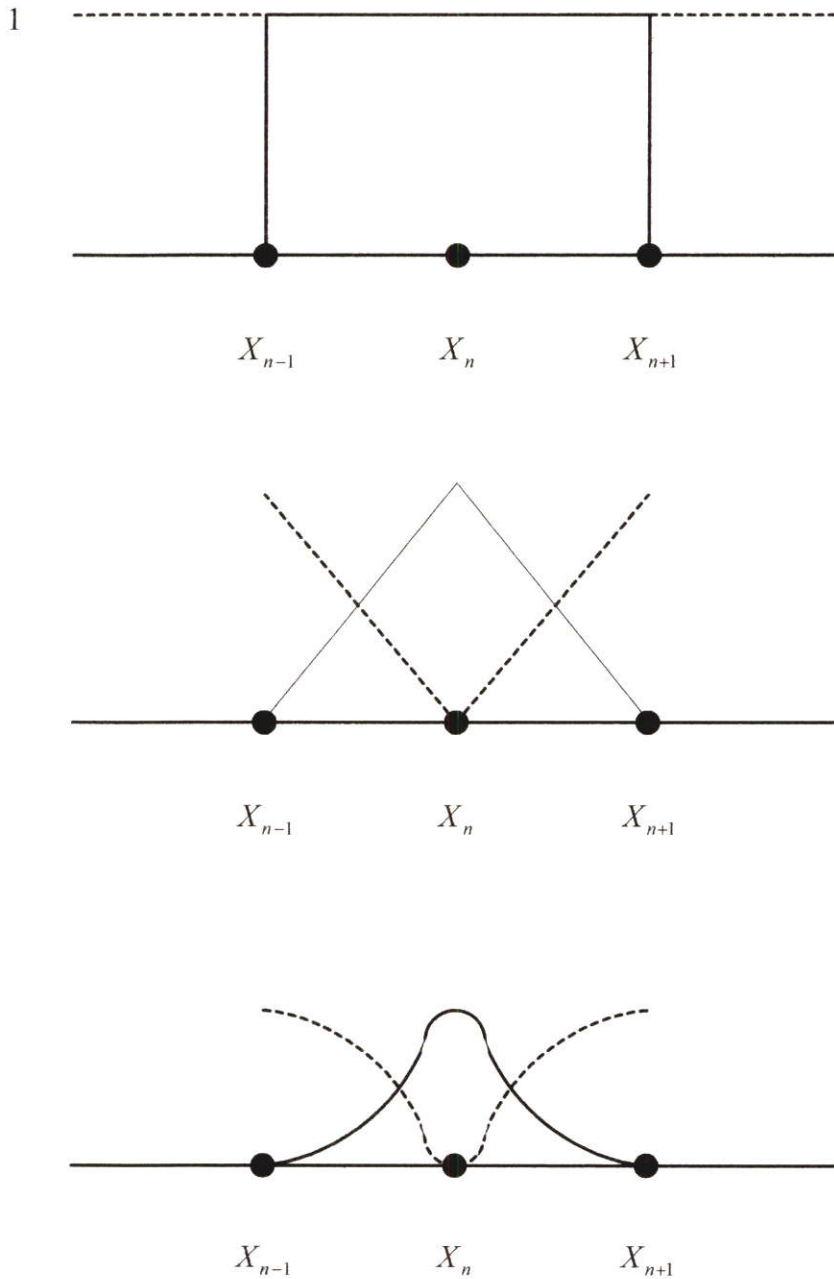
2. ฟังก์ชันพีชไมล์แบบเชิงเส้น

$$u_n(z) = \begin{cases} \frac{\Delta - |z - z_n|}{\Delta}, & z_{n-1} < z < z_{n+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.22)$$

## 3. ฟังก์ชันพีชโวลส์แบบซาย

$$u_n(z) = \begin{cases} \frac{\sin(k(\Delta - |z - z_n|))}{\sin k\Delta}, & z_{n-l} < z < z_{n+l} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.23)$$

โดยที่  $\Delta = l/N$  โดยสมมุติให้เท่ากับแต่ละช่วงที่แบ่งย่อย รูปที่ 3.2 แสดงการแบ่งแบบซายโดเมน



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันให้น้ำหนักแบบซายโดเมน (ก) ฟังก์ชันพีชโวลส์แบบยูนิฟอร์ม (ข) ฟังก์ชันพีชโวลส์แบบเชิงเส้น (ค) ฟังก์ชันพีชโวลส์แบบซายน์

ฟังก์ชันซัพโดเมนจะถูกใช้เป็นส่วนใหญ่เนื่องไม่จำเป็นต้องใช้ความรู้ด้านอื่นเข้ามาเสริม อีกทั้งยังสะดวกกับเขียนโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ

เมื่อแทนค่าฟังก์ชันพื้นฐานลงในสมการอินทิกรัลของพอดลิ่งตันแล้วจะได้ดังสมการ

$$\int_{-l/2}^{l/2} \sum_{n=1}^N I_n u_n(z') K(z_m, z') dz' \approx E_z(z_m) \quad (3.24)$$

โดยที่

$$K(z_m, z') = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) G(z_m, z') \quad (3.25)$$

$m$  เป็นจำนวนส่วยย่อยที่แบ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\sum_{n=1}^N \int_{\Delta z_n} K(z_m, z') u_n(z') dz' \approx E_z(z_m)$$

หรือ

$$\sum_{n=1}^N I_n g_m = E_z(z_m) \quad (3.26)$$

โดยที่

$$g_m = \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') u_n(z') dz' \quad (3.27)$$

เพื่อที่จะหาค่าขนาดของกระแสที่ไม่ทราบค่า  $N$  ค่าจำเป็นจะต้องมี  $N$  สมการเพื่อจะหาค่าให้ได้ ดังนั้นจึงใช้การสมการ (3.27) ด้วยค่าฟังก์ชันให้น้ำหนัก  $w_n (n=1,2,\dots,n)$  และทำการอินทิเกรตตลอดทั้งบริเวณที่ต้องการหาค่า จึงเกิดรูปแบบของผลคูณภายในระหว่างแต่ละค่าของฟังก์ชันให้น้ำหนักกับ  $g_m$  ได้ดังสมการ

$$\sum_{n=1}^N I_n \langle w_n, g_m \rangle = \langle w_n, E_z \rangle \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.28)$$

ดังนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} \langle w_1, g_1 \rangle & \cdots & \langle w_1, g_N \rangle \\ \langle w_2, g_1 \rangle & \cdots & \langle w_2, g_N \rangle \\ \vdots & & \vdots \\ \langle w_N, g_1 \rangle & \cdots & \langle w_N, g_N \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle w_1, E_{z1} \rangle \\ \langle w_1, E_{z2} \rangle \\ \vdots \\ \langle w_1, E_{zN} \rangle \end{bmatrix}$$

หรือ

$$[Z][I] = [V] \quad (3.29)$$

โดยที่  $z_{mn} = \langle w_m, g_n \rangle$  และ  $V_m = \langle w_m, E_z \rangle$  สมการดังกล่าวสามารถหาค่าได้ด้วยการทำเมตริกซ์ผกผัน

$$[I] = [Z]^{-1}[V] \quad (3.30)$$

ในการเลือกใช้ฟังก์ชันให้น้ำหนักต้องเป็นแบบอิสระเชิงเส้นและต้องไม่ใช้เวลาในการคำนวณมาก บางครั้งมีการใช้ฟังก์ชันน้ำหนักเป็น  $w_n = u_n$  ซึ่งก็คือวิธีพอยน์แมตชิง (point matching) วิธีดังกล่าวง่ายและสามารถแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลลัพธ์ซ้ำกว่า

### 3.3.4 การนำวิธีโมเมนต์มาใช้ในการหาค่าความเป็นจนวน

ในการนำวิธีโมเมนต์มาใช้ในการหาค่าความเป็นจนวน จะประกอบด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะหาค่าสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก หลังจากจะวัดค่าสนามที่แตกกระจายที่เกิดจากสนามที่อยู่ในวัตถุเป็นแหล่งกำเนิดเพื่อหาค่าความเป็นจนวน

#### 3.3.4.1 การหาค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ

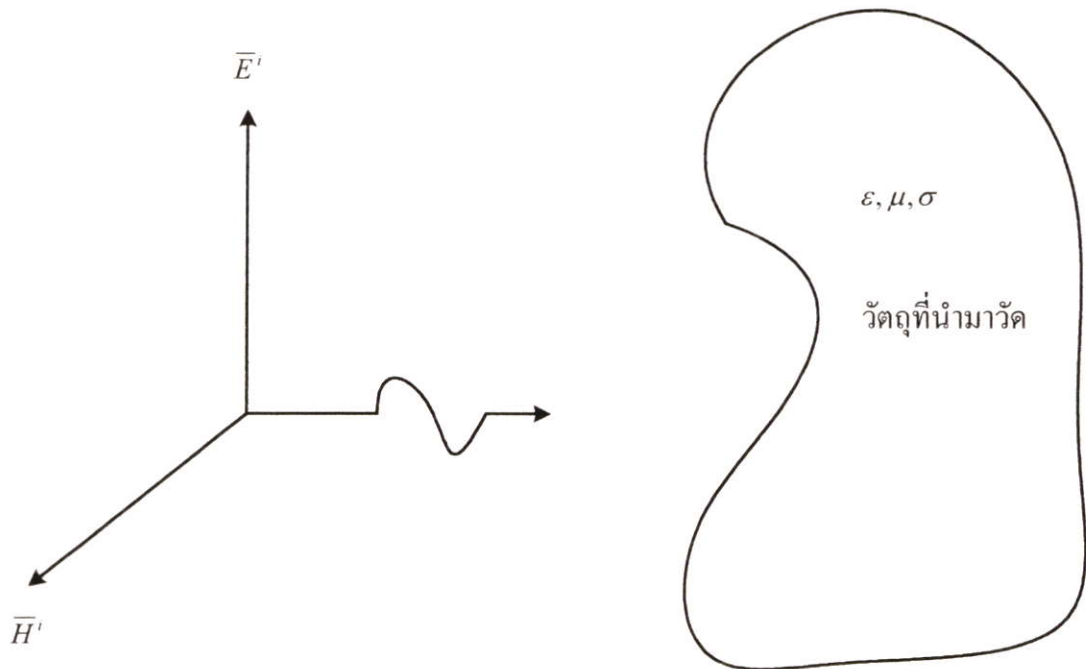
จากหัวข้อ 3.2 การนำวิธีโมเมนต์มาใช้งานประกอบด้วย 4 ขั้นตอน

1. สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม
2. แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนัก
3. หาค่าของแต่ละหน่วยของเมตริกซ์

#### 4. แก้ปัญหาสมการเชิงเส้นด้วยวิธีเมตริกซ์

##### 3.3.4.1.1 สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม

โดยทั่วไปแล้วการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุนั้นพบว่ายากที่จะสามารถคำนวณเพื่อให้ง่ายขึ้นจึงสมมุติว่าสนามที่ตกกระทบวัตถุเป็นคลื่นระนาบ



รูปที่ 3.3 วัตถุที่ได้รับสนามที่เป็นคลื่นระนาบ

พิจารณาวัตถุที่ค่าพารามิเตอร์  $\epsilon, \mu, \sigma$  คือค่าสภาพยอม, ค่าความซาชซึมได้ และค่าความนำของวัตถุตามลำดับ ได้รับสนามจากแหล่งกำเนิดที่เป็นคลื่นระนาบ สนามที่เหนี่ยวนำภายในวัตถุจะทำให้เกิดสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s$  ซึ่งจะแทนที่ด้วยความหนาแน่นเสมือนของกระแสที่อวกาศว่าง  $\bar{J}_{eq}$  ซึ่งจะทำได้สมการ

$$\bar{J}_{eq}(\bar{r}) = (\sigma(\bar{r}) + j\omega[\epsilon(\bar{r}) - \epsilon_o])\bar{E}(\bar{r}) = \tau(\bar{r})\bar{E}(\bar{r}) \quad (3.31)$$

โดยที่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลา  $e^{j\omega t}$  นั้นจะไม่นำมาคิด เทอมแรกของสมการ (3.31) เป็นค่าความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากความนำ เทอมที่สองเป็นค่าความหนาแน่นกระแสโพลารไรซ์ ด้วยค่า  $\bar{J}_{eq}$  ดังกล่าวสามารถหาค่าสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s$  และ  $\bar{H}^s$  โดยการแก้ปัญหสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E}^s = -J_{eq} - j\omega \bar{H}^s \quad (3.32ก)$$

$$\nabla \times \bar{H}^s = j\omega \bar{E}^s \quad (3.32ข)$$

โดยที่ค่าของ  $\bar{E}^s$ ,  $\bar{H}^s$  และ  $\bar{J}_{eq}$  ทั้งหมดเป็นค่าเชิงซ้อน และด้วยวิธีการกำจัด ค่า  $\bar{E}^s$  หรือ  $\bar{H}^s$  ทำให้ได้สมการ

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E}^s - k_0^2 \bar{E}^s = -j\omega \mu_0 \bar{J}_{eq} \quad (3.33ก)$$

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H}^s - k_0^2 \bar{H}^s = \nabla \times \bar{J}_{eq} \quad (3.33ข)$$

โดยที่  $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$  ผลของสมการ (3.33) จะได้สมการ

$$\bar{E}^s = -j\omega \left[ 1 + \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla \cdot \right] A \quad (3.34ก)$$

$$\bar{H}^s = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \quad (3.34ข)$$

โดยที่

$$\bar{A} = \mu_0 \int_v \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') J_{eq}(\bar{r}') dv' \quad (3.35)$$

และ

$$\bar{G}_0(r, r') = \frac{e^{-jk_0(r-r')}}{4\pi|r-r'|} \quad (3.36)$$

คือค่าฟังก์ชันของกรีนในอวกาศว่าง โดยที่ตัวดำเนินการ  $\nabla \nabla \cdot$  หมายถึง  $\nabla \nabla \cdot A = \nabla(\nabla \cdot A)$  จากสมการ (3.34) ค่าของ  $\bar{E}^s$  และ  $\bar{H}^s$  ขึ้นอยู่กับค่า  $\bar{J}_{eq}$  สมมุติให้ค่า  $\bar{J}_{eq}$  มีค่าน้อยมากและแหล่งกำเนิดมีค่าเฉพาะในแกน  $x$  เท่านั้นดังนั้น

$$\bar{J}_{eq} = \delta(\bar{r} - \bar{r}') \bar{a}_x \quad (3.37)$$

จากสมการ (3.35) จะได้

$$\bar{A} = \mu_0 \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_x \quad (3.38)$$

ถ้า  $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$  คือค่าสนามไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดหลัก ดังนั้น  $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$  ต้องสอดคล้องสมการ

$$\nabla \times \nabla \times \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') - k_0^2 \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \delta(\bar{r}, \bar{r}') \quad (3.39)$$

ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังสมการ

$$\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \left( 1 + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \right) \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \quad (3.40)$$

$\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$  เป็นค่าเวกเตอร์ของฟังก์ชันของกรีนในอวกาศว่างที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดแบบจุดในแกน  $x$  ซึ่งทำให้สามารถหาค่า  $\bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}')$  และ  $\bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}')$  ที่สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดแบบจุดในแกน  $y$  และแกน  $z$  ได้ ค่าของ  $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$ ,  $\bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}')$  และ  $\bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}')$  จะจัดอยู่ในรูปของฟังก์ชันไดโอดิกซึ่งสามารถดังสมการ

$$\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_x + \bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_y + \bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_z \quad (3.41)$$

สมการ (3.41) เรียกว่าไดโอดิกฟังก์ชันของกรีนที่อวกาศว่าง ซึ่งก็คือผลลัพธ์ของสมการไดโอดิกดิฟเฟอเรนเชียล

$$\nabla \times \nabla \times \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') - k_0^2 \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') = \tilde{I} \delta(\bar{r}, \bar{r}') \quad (3.42)$$

โดยที่  $\tilde{I}$  คือค่าไดโอดหนึ่งหน่วย

$$\tilde{I} = \bar{a}_x \bar{a}_x + \bar{a}_y \bar{a}_y + \bar{a}_z \bar{a}_z \quad (3.43)$$

ความหมายในเชิงกายภาพของ  $\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}')$  หมายถึงค่าสนามที่จุด  $r$  อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดที่เล็กมากที่อยู่ห่างออกไประยะ  $r'$

จากสมการ (3.33) และสมการ (3.42) ผลของสนามไฟฟ้าจะได้ดังสมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -j\omega\mu_0 \int \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dV' \quad (3.44)$$

จากค่าของ  $\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}')$  จะเห็นได้ว่าจะมีค่าเมื่อ  $r = r'$  การอินทิเกรตในสมการ(3.44) จะไดเวอรัจเมื่อ  $r$  อยู่ภายในวัตถุ ได้มีขบวนการเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยกำหนดค่าหลักขึ้นมาเมื่อแก้ไขข้อผิดพลาดดังกล่าวดังสมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -j\omega\mu_0 \int \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dV' + [\bar{E}^s(\bar{r})]_{correction} \quad (3.45)$$

เทอมที่ใช้แก้ไขข้อผิดพลาดได้กำหนดโดย ให้เป็น  $\frac{\bar{J}_{eq}(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0}$  ดังนั้นจะได้สมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -j\omega\mu_0 \int \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dV' + \frac{\bar{J}_{eq}(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \quad (3.46)$$

ดังนั้นค่าสนามรวมที่เกิดขึ้นภายในวัตถุจะเป็นผลรวมของสนามที่ตกกระทบ  $\bar{E}^i$  และสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s$  ดังสมการ

$$\bar{E}(\bar{r}) = \bar{E}^i(\bar{r}) + \bar{E}^s(\bar{r}) \quad (3.47)$$

เมื่อนำสมการ(3.31), (3.46) และ (3.47) มาพิจารณาจะได้เทนเซอร์ของสมการเชิงอินทิกรัลสำหรับ  $\bar{E}$  ดังสมการ

$$\left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \bar{E}(\bar{r}) - PV \int_V \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' = \bar{E}^i(\bar{r}) \quad (3.48)$$

ในสมการ (3.48)  $\tau(\bar{r}) = \sigma(\bar{r}) + j\omega[\epsilon(\bar{r}) - \epsilon_0]$  และค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ  $\bar{E}^i$  เป็นส่วนที่ทราบค่าทำให้สามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ  $\bar{E}$  ได้

### 3.3.4.1.2 แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

จากการใช้ผลคูณภายใน  $\bar{E}(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}')$  ในสมการ (3.48) สามารถแสดงค่าได้ดังสมการ

$$\bar{E}(\bar{r}') \bullet \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') = \begin{bmatrix} \bar{G}_{XX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{XY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{XZ}(\bar{r}, \bar{r}') \\ \bar{G}_{YX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{YY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{YZ}(\bar{r}, \bar{r}') \\ \bar{G}_{ZX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{ZY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}_{ZZ}(\bar{r}, \bar{r}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_X(\bar{r}') \\ \bar{E}_Y(\bar{r}') \\ \bar{E}_Z(\bar{r}') \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}')$  มีค่าสมมาตรกัน ถ้าให้  $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$  ดังนั้น  $\bar{G}_{X_p X_q}(\bar{r}, \bar{r}')$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \left[ \delta_{pq} + \frac{\partial^2}{k_0^2 \partial X_p \partial X_q} \right] \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}'), \quad p, q = 1, 2, 3 \quad (3.50)$$

แปลงสมการ(3.48) เป็นเมตริกซ์ โดยการแบ่งวัตถุออกเป็นปริมาตรย่อย  $N$  วัตถุหรือบล็อก แต่ละบล็อกมีปริมาตร  $v_m$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ) และสมมุติว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ  $\bar{E}$  และ  $\tau(\bar{r})$  มีค่าคงที่ในแต่ละบล็อก ถ้า  $\bar{r}_m$  อยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละบล็อกจะได้ดังสมการ

$$\left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] E_{X_p}(\bar{r}_m) - \sum_{q=1}^3 \left[ \sum_{p=1}^3 \tau(\bar{r}_n) PV \int_{v_m} G_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv' \right] E_{X_q}(\bar{r}_n) = E_{X_p}^i(\bar{r}) \quad (3.51)$$

ถ้ากำหนดให้  $\left[ \bar{G}_{X_p X_q}^{mn} \right]$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $N \times N$  ทำให้ได้ดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) PV \int_{v_n} \bar{G}_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv' - \delta_{pq} \delta_{mn} \left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3.52)$$

โดยที่  $m, n = 1, 2, \dots, N$   $p, q = 1, 2, 3$  และให้  $\left[ \bar{E}_{X_p} \right]$  และ  $\left[ \bar{E}_{X_p}^i \right]$  จะทำให้ได้เมตริกซ์ที่มีสมาชิกเฉพาะคอลัมน์เท่านั้นดังสมการ

$$\bar{E}_{X_p} = \begin{bmatrix} \bar{E}_{X_p}(\bar{r}_1) \\ \vdots \\ \bar{E}_{X_p}(\bar{r}_N) \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_{X_p}^i = \begin{bmatrix} \bar{E}_{X_p}^i(\bar{r}_1) \\ \vdots \\ \bar{E}_{X_p}^i(\bar{r}_N) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

จากสมการ(3.48) และ (3.51) จะได้จำนวนสมการเท่ากับ  $3N$  สมการ สำหรับ  $\bar{E}_x, \bar{E}_y$  และ  $\bar{E}_z$  ที่จุดกลางของแต่ละบล็อกด้วยวิธีพอยน์เมทซึ่ง สมการดังสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} [\bar{G}_{xx}] & [\bar{G}_{xy}] & [\bar{G}_{xz}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [\bar{G}_{yx}] & [\bar{G}_{yy}] & [\bar{G}_{yz}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [\bar{G}_{zx}] & [\bar{G}_{zy}] & [\bar{G}_{zz}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{E}_x] \\ \dots \\ [\bar{E}_y] \\ \dots \\ [\bar{E}_z] \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [\bar{E}'_x] \\ \dots \\ [\bar{E}'_y] \\ \dots \\ [\bar{E}'_z] \end{bmatrix} \quad (3.54ก)$$

หรือเขียนในรูปที่ง่ายขึ้นคือ

$$[G][E] = -[E'] \quad (3.54ข)$$

โดยที่  $[G]$  คือเมตริกซ์ที่มีขนาด  $3N \times 3N$  และ  $[E]$  และ  $[E']$  มีขนาด  $3N$

### 3.3.4.1.3 การหาค่าของสมาชิกในเมตริกซ์

จากสมการ(3.54) เมตริกซ์ที่ต้องหาว่าสมาชิกของเมตริกซ์นั้นคืออะไร คือเมตริกซ์  $[G]$  ซึ่งหาจากสมการ(3.52) สำหรับสมาชิกที่ไม่อยู่ในแนวทแยงมุมของ  $[\bar{G}_{X_p X_q}^{mn}]$   $\bar{r}_m$  ไม่ใช่บล็อกที่  $n$  ดังนั้น  $\bar{G}_{X_p X_q}^{mn}(\bar{r}_m, \bar{r}')$  มีค่าต่อเนื่องตลอดในปริมาตร  $v_n$  ดังนั้นจึงตัดค่าหลัก (PV) ออกจะได้ดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) \int_{v_n} G_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv' , \quad m \neq n \quad (3.55)$$

หรือจะได้ดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) G_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') \Delta v_n , \quad m \neq n \quad (3.56)$$

โดยที่  $\Delta v_n$  เป็นปริมาตรย่อยของแต่ละบล็อก เมื่อใช้สมการ(3.40), (3.50) และ (3.56) จะได้ผลดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^{mn} = \frac{-j\omega\mu_0 k_0 \Delta v_n \tau(\bar{r}_n) e^{-j\alpha_{mn}}}{4\pi\alpha_{mn}^3} \left[ (\alpha_{mn}^2 - 1 - j\alpha_{mn}) \delta_{pq} + \cos\theta_{X_p}^{mn} \cdot \cos\theta_{X_q}^{mn} (3 - \alpha_{mn}^2 + 3j\alpha_{mn}) \right], \quad m \neq n \quad (3.57)$$

โดยที่

$$\alpha_{mn} = k_0 |\bar{r}_m - \bar{r}_n|, \quad \cos \theta_{X_p}^{mn} = \frac{(X_p^m - X_p^n)}{|\bar{r}_m - \bar{r}_n|}, \quad \bar{r}_m = (x_1^m, x_2^m, x_3^m), \quad \bar{r}_n = (x_1^n, x_2^n, x_3^n)$$

สำหรับสมาชิกที่อยู่ในแนวทแยงมุม  $m = n$  จากสมการ(3.52) จะได้ดังสมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) PV \int_{v_n} \bar{G}_{X_p X_q}(\bar{r}_n, \bar{r}') dv' - \delta_{pq} \left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r}_n)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \quad (3.58)$$

เพื่อที่จะหาค่าของการอินทิเกรตนี้ จะประมาณค่าปริมาตรของ  $v_n$  ด้วยลักษณะทรงกลมซึ่งมีรัศมีเท่ากับ  $a_n$  จะมีปริมาตรเท่ากับ

$$\Delta v_n = \frac{4}{3} \pi a_n^3$$

หรือ

$$a_n = \sqrt[3]{\left( \frac{3\Delta V_n}{4\pi} \right)} \quad (3.59)$$

และจากสมการ(3.58) กำหนดให้

$$\bar{I}_{X_p X_q}^n = PV \int_{v_n} \bar{G}_{X_p X_q}(\bar{r}_n, \bar{r}') dv' \quad (3.60)$$

จากสมการ(3.50) การหาอนุพันธ์จะทำเทียบกับตัวแปรที่มีขีดข้างบน ดังนั้นสามารถจะกำหนดให้  $\bar{r}' = 0$  ดังนั้นค่าของ  $G_0(\bar{r}, \bar{r}')$  จะได้สมการ

$$G_0(r, r') = \frac{e^{-jk_0(r')}}{4\pi r'} \quad (3.61)$$

พิจารณา

$$\frac{\partial^2 G(\bar{r}')}{\partial x'_q \partial x'_p} = \frac{d^2 G(\bar{r}')}{dr'^2} \frac{x'_p}{r'} \frac{x'_q}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{dG(\bar{r}')}{dr'} \left[ \delta_{pq} - \frac{x'_p}{r'} \frac{x'_q}{r'} \right] \quad (3.62)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} x'_1/r' &= \sin \theta' \cos \phi' & x'_2/r' &= \sin \theta' \cos \phi' \\ x'_3/r' &= \cos \theta' & dv' &= r'^2 \sin \theta' d\theta' d\phi' dr' \end{aligned}$$

โดยที่  $\theta'$  และ  $\phi'$  เป็นค่ามุมโพลาไรซ์และกำหนดให้

$$f_{X_p X_q}(\theta, \phi) = \frac{x'_p}{r'} \frac{x'_q}{r'} \quad (3.63)$$

สมการ (3.60) จะได้เป็น

$$\bar{I}_{X_p X_q}^n = -j\omega\mu_0 \lim_{\eta \rightarrow 0} \int_{\eta}^{a_n} dr \int_0^{2\pi} d\phi \cdot \int_0^{\pi} \left\{ G_0 \delta_{pq} + \frac{1}{k_0^2} \left[ \frac{d^2 G_0}{dr^2} f_{X_p X_q}(\theta, \phi) + \frac{1}{r} \frac{dG_0}{dr} (\delta_{pq} - f_{X_p X_q}(\theta, \phi)) \right] \right\} r^2 \sin \theta d\theta \quad (3.64)$$

จากการอินทิเกรตจะได้

$$\begin{aligned} I_{X_p X_q}^n &= -j\omega\mu_0 \lim_{\eta \rightarrow 0} \left\{ \int_{\eta}^{a_n} dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \delta_{pq} G_0 r^2 \sin \theta d\theta \right. \\ &\quad + \frac{1}{k_0^2} \left( r^2 \frac{dG_0}{dr} \Big|_{\eta}^{a_n} \right) \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} f_{X_p X_q}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta \\ &\quad \left. + \frac{1}{k_0^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} [\delta_{pq} - 3f_{X_p X_q}(\theta, \phi)] \sin \theta d\theta \cdot \int_{\eta}^{a_n} \frac{dG_0}{dr} r dr \right\} \quad (3.65) \end{aligned}$$

ในเทอมที่ 3 ของสมการ(3.65),  $\int_{\eta}^{a_n} \frac{dG_0}{dr} r dr$  จะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ  $\eta \rightarrow 0$  อย่างไรก็ตามสามารถหาค่าได้ว่า

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} [\delta_{pq} - 3f_{X_p X_q}(\theta, \phi)] \sin \theta d\theta = 0, \quad p, q = 1, 2, 3 \quad (3.66)$$

และ

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} f_{X_p X_q}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta = \frac{4\pi}{3} \delta_{pq} \quad (3.67)$$

ดังนั้นสมการ(3.65)จะได้เป็น

$$\bar{I}_{X_p X_q}^n = -j\omega\mu_0\delta_{pq} \lim_{\eta \rightarrow 0} \left\{ \int_{\eta}^{a_n} dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi G_0 r^2 \sin\theta d\theta + \frac{4\pi}{3k_0^2} r^2 \frac{dG_0}{dr} \Big|_{\eta}^{a_n} \right\} \quad (3.68)$$

หลังจากแทนค่าการอินทิเกรตทั้งหมดแล้วจะได้เป็น

$$\bar{I}_{X_p X_q}^n = \frac{-2j\omega\mu_0\delta_{pq}}{3k_0^2} [e^{-jk_0 a_n} (1 + jk_0 a_n) - 1] \quad (3.69)$$

เมื่อแทนค่า  $\bar{I}_{X_p X_q}^n$  กลับไปที่สมการ (3.58) จะได้สมการ

$$\bar{G}_{X_p X_q}^m = \delta_{pq} \left\{ \frac{-2j\omega\mu_0\tau(\bar{r}_n)}{3k_0^2} [e^{-jk_0 a_n} (1 + jk_0 a_n) - 1] - \left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r}_n)}{3j\omega\epsilon_0} \right] \right\} \quad (3.70)$$

#### 3.3.4.1.4 หาผลลัพธ์จากสมการเมตริกซ์

จากสมการ(3.54) จากการที่ทราบค่าสนามที่ตกกระทบทำให้สามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุได้ด้วยวิธีการทางเมตริกซ์

$$[E] = -[G]^{-1}[E'] \quad (3.71)$$

จากสมการ (3.71) ใช้วิธีการคำนวณจะสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุได้

#### 3.3.4.2 การหาค่าความเป็นฉนวนจากสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ

ในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุเริ่มการสร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม จากแปลงสมการเชิงอินทิกรัลที่ได้ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ นำเมตริกซ์ที่ได้มาหาค่าสมาชิกในเมตริกซ์ ซึ่งเมื่อได้เมตริกซ์ที่ต้องการแล้ว ทำให้สามารถหาค่าผลลัพธ์จากสมการเมตริกซ์

##### 3.3.4.2.1 สร้างสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม

เมื่อวัตถุได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามจะถูกเหนี่ยวนำภายในวัตถุและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแตกกระจายออกสู่ภายนอกโดยวัตถุนั้น ค่าสนามไฟฟ้ารวม  $\bar{E}(\bar{r})$  คือผลรวมของสนามที่ตกกระทบ  $\bar{E}^i(\bar{r})$  และสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s(\bar{r})$  จากวัตถุที่ได้จากการวัดดังสมการ(3.47) สนามที่แตกกระจายออกสู่ภายนอกนั้นจะสัมพันธ์กับสนามรวม  $\bar{E}(\bar{r})$  ที่เกิดขึ้นภายในวัตถุดังสมการ

ในกรณีนี้จะไม่การคิดค่าหลัก (ค่าที่ใช้ในการชดเชยความผิดพลาด) เหมือนกับการคิดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุเนื่องจากการหาค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายออกสู่ภายนอกวัตถุ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = \int_V \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \bar{G}'_0(\bar{r}, \bar{r}') dv' \quad (3.72)$$

### 3.3.4.2.2 แปลงสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

ในการหาค่า  $\bar{E}(\bar{r}) \bullet \bar{G}'(\bar{r})$  สามารถนำสมการ(3.49) มาใช้ในการคำนวณได้

$$\bar{E}(\bar{r}) \bullet \bar{G}'(\bar{r}, \bar{r}') = \begin{bmatrix} \bar{G}'_{XX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{XY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{XZ}(\bar{r}, \bar{r}') \\ \bar{G}'_{YX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{YY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{YZ}(\bar{r}, \bar{r}') \\ \bar{G}'_{ZX}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{ZY}(\bar{r}, \bar{r}') & \bar{G}'_{ZZ}(\bar{r}, \bar{r}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_X(\bar{r}') \\ \bar{E}_Y(\bar{r}') \\ \bar{E}_Z(\bar{r}') \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\bar{G}'_0(\bar{r}, \bar{r}')$  มีค่าสมมาตรกัน ถ้าให้  $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$  ดังนั้น  $\bar{G}'_{X_p X_q}(\bar{r}, \bar{r}')$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\bar{G}'_{X_p X_q}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \left[ \delta_{pq} + \frac{\partial^2}{k_0^2 \partial X_p \partial X_q} \right] \bar{G}'_0(\bar{r}, \bar{r}'), \quad p, q = 1, 2, 3 \quad (3.74)$$

แปลงสมการ (3.70) เป็นเมตริกซ์ โดยการค่าสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายจากวัตถุจะทำการเป็นจำนวน  $M$  จุด และมีการแบ่งวัตถุออกเป็นบล็อก โดยแต่ละบล็อกมีปริมาตร  $v_m$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ) และสมมุติว่าค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ  $\bar{E}$  และ  $\tau(\bar{r})$  มีค่าคงที่ในแต่ละบล็อก ถ้า  $\bar{r}_m$  อยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละบล็อกจะได้ดังสมการ

$$\sum_{q=1}^3 \left[ \sum_{p=1}^3 \tau(\bar{r}_n) \int_{v_m} \bar{G}'_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv' \right] E_{Xq}(\bar{r}_n) = E_{Xp}^s(\bar{r}) \quad (3.75)$$

ถ้ากำหนดให้  $\left[ \bar{G}'_{X_p X_q}^{mn} \right]$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $N \times N$  ทำให้ได้ดังสมการ

$$\bar{G}'_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) \int_{v_m} \bar{G}'_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv' \quad (3.76)$$

โดยที่  $m, n = 1, 2, \dots, N$   $p, q = 1, 2, 3$  และให้  $\left[ \bar{E}_{X_p}^s \right]$  จะทำให้ได้เมตริกซ์ที่มีสมาชิกเฉพาะคอลัมน์เท่านั้นดังสมการ

$$\bar{E}_{X_p}^s = \begin{bmatrix} \bar{E}_{X_p}^s(\bar{r}_1) \\ \vdots \\ \bar{E}_{X_p}^s(\bar{r}_N) \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

สำหรับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุนั้นจำเป็นต้องมีการจัดเรียงเมตริกซ์ใหม่เพื่อสามารถทำการคำนวณได้ดังสมการ

$$[\bar{E}] = \begin{bmatrix} E_{X_p}(\bar{r}_1) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & E_{X_p}(\bar{r}_N) \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

จากสมการ(3.72) และ (3.76) จะได้จำนวนสมการเท่ากับ  $3N$  และด้วยวิธีพอยน์เมทซึ่ง จะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} [\bar{G}_{xx}] & [\bar{G}_{xy}] & [\bar{G}_{xz}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [\bar{G}_{yx}] & [\bar{G}_{yy}] & [\bar{G}_{yz}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [\bar{G}_{zx}] & [\bar{G}_{zy}] & [\bar{G}_{zz}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{E}_x(\bar{r})] & [0] & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & \bar{E}_y(\bar{r}_1) & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & [0] & \bar{E}_z(\bar{r}) \end{bmatrix} [\tau(r)] = - \begin{bmatrix} [\bar{E}^s_x] \\ \dots \\ [\bar{E}^s_y] \\ \dots \\ [\bar{E}^s_z] \end{bmatrix} \quad (3.79ก)$$

หรือเขียนในรูปที่ง่ายขึ้นคือ

$$[G'] [E] [\tau] = [E^s] \quad (3.79ข)$$

โดยที่  $[G']$  และ  $[E]$  คือเมตริกซ์ที่มีขนาด  $3N \times 3M$  และ  $[E^s]$  มีขนาด  $3M$

### 3.3.4.2.3 การหาค่าของสมาชิกในเมตริกซ์

จากสมการ(3.76) เมตริกซ์ที่ต้องหาค่าสมาชิกของเมตริกซ์นั้นคืออะไร คือเมตริกซ์  $[G']$  ซึ่งหาจากสมการ(3.74) เนื่องจากเป็นหาค่าสนามที่กระจายออกสู่ภายนอกวัตถุจึงไม่จำเป็นต้องแยกหา

สมาชิกในแนวทแยงมุมเพราะว่าสนามไฟฟ้ามีค่าต่อเนื่องตลอดในปริมาตร  $v_n$  ดังนั้นจึงตัดค่าหลัก (PV) ออกจะได้ดังสมการ

$$\overline{G}_{X_p X_q}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) \int_{v_n} G''_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') dv', \quad m \neq n \quad (3.80)$$

หรือจะได้ดังสมการ

$$\overline{G}'_{X_p X_q}{}^{mn} = \tau(\bar{r}_n) G'_{X_p X_q}(\bar{r}_m, \bar{r}') \Delta v_n, \quad m \neq n \quad (3.81)$$

โดยที่  $\Delta v_n$  เป็นปริมาตรย่อยของแต่ละบล็อก เมื่อใช้สมการ(3.40) และ (3.76) จะได้ผลดังสมการ

$$\overline{G}'_{X_p X_q}{}^{mn} = \frac{-j\omega\mu_0 k_0 \Delta v_n \tau(\bar{r}_n) e^{-j\alpha_{mn}}}{4\pi\alpha_{mn}^3} [(\alpha_{mn}^2 - 1 - j\alpha_{mn}) \delta_{pq} + \cos\theta_{X_p}^{mn} \cdot \cos\theta_{X_q}^{mn} (3 - \alpha_{mn}^2 + 3j\alpha_{mn})], \quad (3.82)$$

โดยที่

$$\alpha_{mn} = k_0 |\bar{r}_m - \bar{r}_n|, \quad \cos\theta_{X_p}^{mn} = \frac{(X_p^m - X_p^n)}{|\bar{r}_m - \bar{r}_n|}, \quad \bar{r}_m = (x_1^m, x_2^m, x_3^m), \quad \bar{r}_n = (x_1^n, x_2^n, x_3^n)$$

#### 3.3.4.2.4 หาผลลัพธ์จากสมการเมตริกซ์

จากสมการ (3.79) การที่ทราบค่าสนามที่ตกกระทบทำให้สามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุได้ด้วยวิธีการทางเมตริกซ์

$$[\tau] = [G]^{-1} [E] [E^s] \quad (3.83)$$

#### 3.3.4.3 ขั้นตอนการหาค่าความเป็นฉนวน

ในการหาค่าความเป็นฉนวนสามารถหาได้จากการใช้สมการ (3.79) โดยถ้าทราบค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุสามารถหาได้จากสมการ(3.54) ซึ่งจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของวัตถุหรือทราบค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ ดังนั้นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการหาค่าความเป็นฉนวนคือนำทั้งสมการ (3.54) และ (3.79) นำมาคำนวณร่วมกันด้วยวิธีการทำซ้ำ รูปแบบของการทำซ้ำเริ่มต้นด้วยการสมมุติว่าวัตถุมีค่าสภาพยอมแบบเดียวกับตัวกลางที่ล้อมรอบอยู่ ขั้นแรกค่า  $[E]$  ภายในเป้าหมายหาได้โดยสมการ(3.54)  $[E]$  ที่ได้นำไปแทนในสมการ (3.79) เพื่อหาค่าสภาพยอม  $[\tau]$  เนื่องจากสนามที่วัดได้จะรวมถึงค่าความผิดพลาด ดังนั้นเราจะใช้

เทคนิคหาค่าที่น้อยที่สุดแทนที่จะแก้จากสมการ(3.79) โดยตรงเพื่อหาค่า  $[r]$  สมการที่ใช้ในการหาค่าที่น้อยที่สุดคือ

$$\|[\bar{E}^s] - [\bar{G}'] [E] [r]\|^2 \rightarrow \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (3.84)$$

ด้วยเงื่อนไขที่ว่า  $\|[r]\|^2$  มีค่าน้อยที่สุด

โดยที่  $\|\cdot\|$  แทนค่านอร์มของเวกเตอร์และ  $[\bar{E}^s]$  คือค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ ค่าที่น้อยที่สุดนี้หาจากวิธีอินเวอร์สแบบเสมือน โดยอาศัยวิธีหาค่าดิโคมโพสิชันแบบค่าเดียวของเมตริกซ์  $[\bar{G}'] [E]$  ผลที่ได้จากสมการ(3.84) เป็นผลของการประมาณขั้นแรกของ  $[r]$  จากนั้นนำค่า  $[r]$  ที่ได้มาคำนวณ การประมาณค่าขั้นที่ 2 ของ  $[E]$  ด้วยสมการ(3.54) ต่อมาแทนค่าอีกครั้งลงในสมการเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด ผลของ  $[r]$  เป็นผลขั้นที่สอง ทำขบวนการดังกล่าวซ้ำจนกว่าผลที่ได้จะเป็นค่าที่น้อยที่สุดจึงจะเป็นค่าที่เชื่อถือได้

### 3.4 สรุป

ในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุด้วยวิธีโมเมนต์จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ หนึ่งการหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุเนื่องจากแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าภายนอก โดยพิจารณาว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถสะสมสนามไฟฟ้าไว้ภายใน จึงเสมือนว่ามีแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าอยู่ภายในวัตถุนั้น หลังจากนั้นนำสนามไฟฟ้าที่วัดได้จากการแตกกระจายจากวัตถุมาเพื่อคำนวณหาค่าความเป็นฉนวนและโดยอาศัยขบวนการทำซ้ำจะสามารถหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุได้

## บทที่ 4

# ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

### 4.1 กล่าวนำ

การแก้ปัญหาในเรื่องของแผ่รังสีและการกระจายจากระบบการแผ่รังสีและการกระจาย โดยใช้วิธีหาคำตอบแบบโมดอล (Modal Solution) มีข้อจำกัดกับวัตถุซึ่งผิวของวัตถุนั้นสามารถอธิบายได้โดยฟังก์ชันของออร์โธโกนอลของเส้นโค้ง (Orthogonal Curvilinear Coordinates) ยิ่งไปกว่านั้นคำตอบส่วนมากจะอยู่ในรูปของอนุกรมที่ไม่จำกัดซึ่งอนุกรมที่ได้จะไม่เบนเข้าหากัน (Poorly Convergent) เมื่อขอบของวัตถุมีขนาดมากกว่าความยาวคลื่น ดังนั้นข้อจำกัดเหล่านี้จะถูกแยกออกจากการวิเคราะห์ของระบบการแผ่รังสีและการกระจายที่ศึกษา

วิธีซึ่งอธิบายถึงคำตอบในรูปแบบสมการอินทิกรัลได้ถูกนำมาพิจารณา ขณะที่รูปร่างต่างๆ สามารถจัดการได้โดยวิธีนี้ ส่วนใหญ่ยังต้องการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณซึ่งจะสะดวกมากสำหรับวัตถุซึ่งไม่มีหลายความยาวคลื่นเนื่องมาจากข้อจำกัดในความจุของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันวิธีนี้โดยทั่วไปจะอ้างถึงเป็นวิธีสมการเชิงอินทิกรัล และคำตอบจะถูกคำนวณได้โดยใช้วิธีโมเมนต์

เมื่อแนวของการแผ่รังสีหรือการกระจายของวัตถุมีหลายความยาวคลื่น สามารถใช้เส้นกำกับที่ความถี่สูง (High-frequency Asymptotic Techniques) ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ 2 วิธีดังกล่าวซึ่งได้รับการพิจารณาที่ผ่านมาคือ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต และ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตได้รับการคิดค้นด้วย Keller [16,17] และได้รับการศึกษาต่อโดย Kouyoumjian และ Pathak [18] ซึ่งเป็นส่วนขยายจากแสงเชิงเรขาคณิต (เดินทางตรง สะท้อน และหักเห) และสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดบางอย่างของแสงเชิงเรขาคณิต โดยการนำกลไกการเลี้ยวเบนช่วย [19] สำหรับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพเป็นส่วนเพิ่มของแสงเชิงกายภาพ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหอันเกิดจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของผิววัตถุที่ใช้ และกล่าวถึงความคงอยู่ของกระแสที่เกิดที่ขอบแบบไม่มีรูปแบบ นอกเหนือจาก กระแสที่ผิวที่เกิดในเชิงแสงเชิงกายภาพที่มีรูปแบบ

ที่ความถี่สูงของการเลี้ยวเบนเช่นเดียวกับการสะท้อนและการเลี้ยวเบนถือเป็นปรากฏการณ์โดยทั่วไปและขึ้นกับสองสิ่งดังต่อไปนี้

1. รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุที่จุดเลี้ยวเบน (ขอบ จุดยอด ผิวหน้าที่โค้ง)
2. ขนาด เฟส และ โพลาริเซชัน ของสนามที่ตกกระทบที่จุดเลี้ยวเบน

สนามจะเกี่ยวข้องกับรังสีเลี้ยวเบนของแต่ละอันและสนามทั้งหมดที่จุด ๆ หนึ่ง คือ ผลรวมของรังสีทั้งหมดที่จุดนั้น รังสีเลี้ยวเบนบางส่วนจะเข้าไปที่ส่วนของเงาและมีผลต่อความเข้มของ

สนามที่จุดนั้น สนามการเลี้ยวเบนซึ่งถูกพิจารณาโดยใช้ Fermat's Principle [16] เริ่มต้นที่จุดบนผิวหน้าของวัตถุซึ่งสร้างความไม่ต่อเนื่องในสนามในเชิงกายภาพของแสง

เฟสของสนามรังสีถูกสมมติให้เท่ากับผลคูณของความยาวในเชิงแสงของรังสีบางจุดอ้างอิงและเวฟนัมเบอร์ของตัวกลาง ค่าการกระจัดของเฟสที่เหมาะสมต้องเพิ่มเช่นเดียวกับที่รังสีผ่านจุดต่างออก ขนาดจะหลากหลายสอดคล้องกับหลักของการสงวนพลังงานในหลอดที่แคบของรังสี

ค่าเริ่มต้นของสนามของรังสีเลี้ยวเบนถูกพิจารณาจากสนามตกกระทบ ซึ่งช่วยให้สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนเหมาะสมซึ่งเป็นไดแอดิกสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีจะเดินไปตามเส้นทางซึ่งทำให้ระยะทางในเชิงแสงจากแหล่งที่สังเกตอยู่สุดยอด(โดยทั่วไปจะเป็นจุดต่ำสุด) ซึ่งนำไปสู่การแพร่กระจายแบบเส้นตรงภายในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันและผิวที่จุดยอดบนพื้นผิวเป็นผิวที่เรียบ ความเข้มของสนามจะค่อย ๆ ทำให้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล

การเลี้ยวเบนและการลดทอนของสัมประสิทธิ์โดยทั่วไปจะสามารถพิจารณาจากคำตอบของเส้นกำกับของปัญหาขอบเขตซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันที่จุดเลี้ยวเบนเช่นเดียวกับวัตถุที่จุดสนใจ รูปทรงเรขาคณิตของรูปแบบนี้ถูกอ้างถึงเป็นปัญหาที่ใช้เป็นมาตรฐาน หนึ่งในรูปทรงเรขาคณิตที่ง่ายที่สุดซึ่งจะอภิปรายในบทนี้คือลิ้มของตัวนำ วัตถุประสงค์เริ่มต้นในการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตคือการแก้ปัญหาให้เป็นส่วนประกอบที่เล็กลง ซึ่งแต่ละอันจะแสดงถึงการใช้เรขาคณิตของคำตอบที่ทราบอยู่แล้วเป็นมาตรฐาน คำตอบสุดท้ายคือการทับซ้อนของถ่ายโอนจากปัญหาที่ใช้เป็นมาตรฐาน

ข้อได้เปรียบของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต มีดังนี้คือ

1. เป็นวิธีที่ง่ายในการนำไปใช้
2. สามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนซึ่งไม่มีคำตอบที่แน่ชัด
3. ให้การมองเห็นในเชิงกายภาพในกลไกการแผ่รังสีและการกระจายรังสีจากโครงสร้างส่วนต่าง ๆ
4. ให้ผลที่แน่นอนซึ่งเปรียบเทียบกับได้ดีกับการทดลองและวิธีอื่น ๆ
5. สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น วิธีโมเมนต์ [3,9]

## 4.2 แสงในเชิงเรขาคณิต

แสงในเชิงเรขาคณิตเป็นวิธีการประมาณความถี่สูงสำหรับการตรวจสอบการแพร่กระจายของคลื่นที่ตกกระทบ การสะท้อน และการเลี้ยวเบน เนื่องจากการใช้แนวคิดรังสีโดยทั่วไปไปถึงรังสีของแสง ต้นกำเนิดของแสงในเชิงเรขาคณิตคือ ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของแสงที่ความถี่สูงที่เพียงพอโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงธรรมชาติของคลื่นแสง แทนการส่งต่อพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) โดยการใช้หลักการสงวนของฟลักซ์ของพลังงานในหลอดของรังสี (Tube of Rays)

### 4.3 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ของขนาด เฟส และโพลาริเซชัน

เพื่อให้เข้าใจถึงการเลี้ยวเบน สมมติใช้พื้นผิว  $S$  ในรูปที่ 4.1(ก) เป็นพื้นผิวที่เรียบ และมีขอบเป็นส่วนโค้งดังรูปที่ 4.1(ก) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนขอบที่เป็นส่วนโค้ง รังสีของการเลี้ยวเบนกระจายจากขอบนั้นซึ่งนำไปสู่คำตอบที่อยู่ในรูปของความถี่สูง สำหรับสนามไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของ

$$\bar{E}^d(\bar{r}) \approx \frac{e^{-j\beta\psi_d(\bar{r})}}{\sqrt{\beta}} \bar{A}(\bar{r}) \quad (4.1)$$

โดยที่  $\psi_d$  = พื้นผิวไอโกนอล (Eikonal Surface) สำหรับรังสีเลี้ยวเบน

$\bar{A}(\bar{r})$  = ปัจจัยของสนามของรังสีเลี้ยวเบน

โดยที่ พื้นผิวไอโกนอล (Eikonal Surface) คือหน้าคลื่น (Wave Front) ที่ลำดับต่าง ๆ เมื่อแทนค่าลงในสมการคลื่นและสมการแมกซ์เวลล์ สามารถแสดงค่าของสนามที่เลี้ยวเบนดังสมการ (4.2)

$$\bar{E}^d(s) = \left[ \frac{e^{-j\beta\psi_d(0')}}{\sqrt{\beta}} \bar{A}(0') \right] \sqrt{\frac{\rho'_c \rho_c}{(\rho'_c + s)(\rho_c + s)}} e^{-j\beta s} \quad (4.2)$$

โดยที่

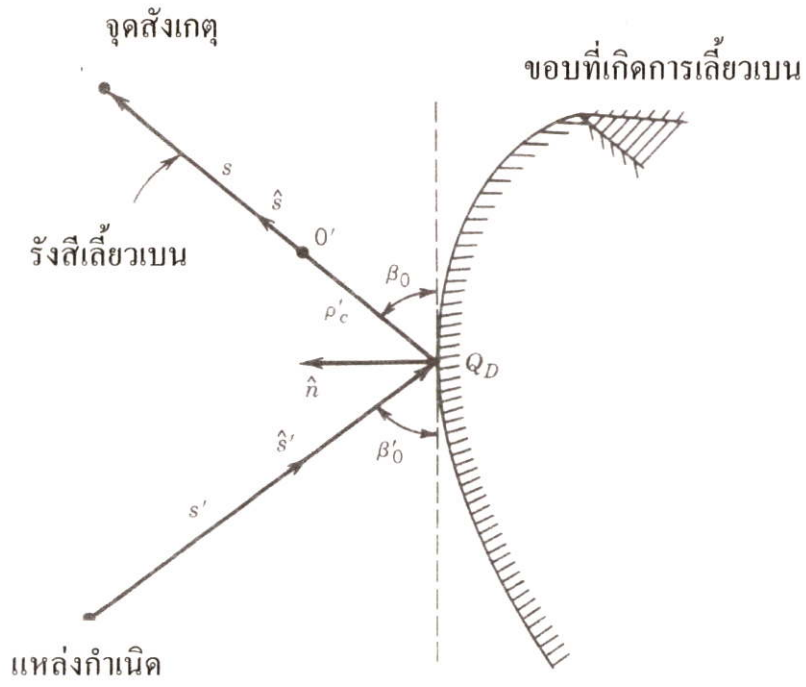
$\bar{E}^d(0')$  = สนามเลี้ยวเบนที่จุดอ้างอิง  $0'$

$s$  = ระยะตามรังสีเลี้ยวเบนจากจุดอ้างอิง  $0'$

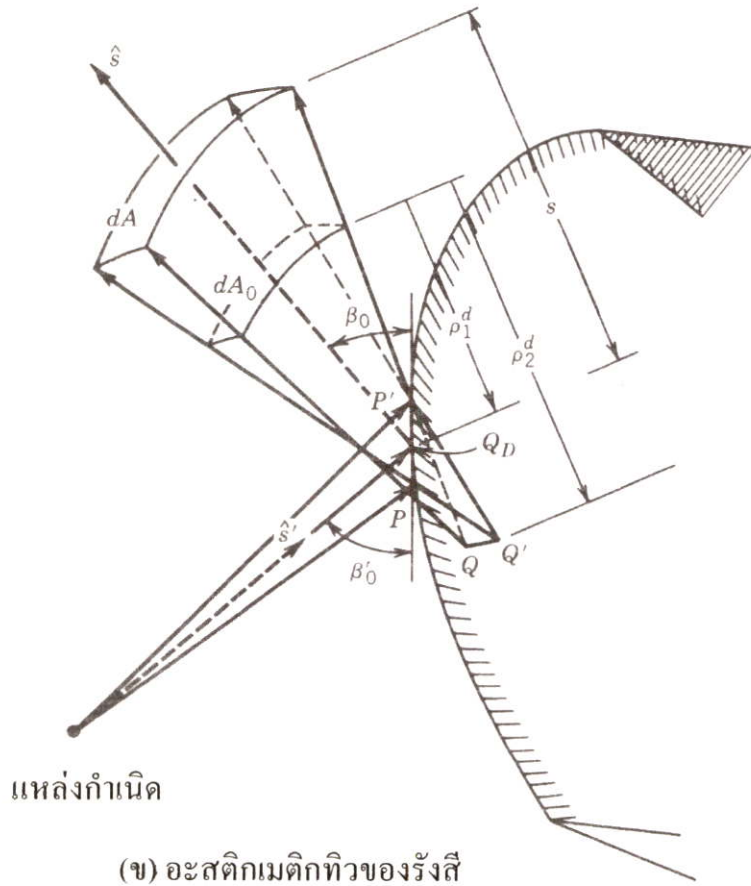
$\rho'_c$  = ระยะจากจุดเลี้ยวเบน  $Q_D$  (จุดที่เกิดฉากออกครั้งแรก) ถึงจุดอ้างอิง  $0'$

$\rho_c$  = จุดที่เกิดฉากออกครั้งที่สองของสนามเลี้ยวเบนถึงจุดอ้างอิง  $0'$

พิจารณารูปที่ 4.1(ก) เมื่อเลื่อนจุดอ้างอิง  $O$  ไปอยู่ที่จุดเดียวกับ  $Q$  ซึ่งอยู่ที่จุดที่เกิดการเลี้ยวเบน เช่นเดียวกับรังสีของแสงเชิงเรขาคณิต อย่างไรก็ตามรังสีเลี้ยวเบนอยู่ในรูปของอะสติกเมติกทิว ดังรูปที่ 4.1(ข) โดยที่เส้นฉาก  $PP'$  เป็นจุดเดียวกับขอบที่เกิดการเลี้ยวเบน ด้วยเหตุผลที่ว่าสนามเลี้ยวเบนควรจะเป็นอิสระ



(ก) จุดที่เกิดการเลียวเบน



(ข) อะสติกเมติกทิวของรังสี

รูปที่ 4.1 การเลียวเบนเชิงเรขาคณิตโดยขอบโค้ง

ต่อตำแหน่งของจุดอ้างอิง  $0'$  รวมถึงตั้งนั้นสนามเลี้ยวเบนจาก (4.2) ควรจะเป็น

$$\lim_{\rho'_c \rightarrow 0} \bar{E}^d(0')\sqrt{\rho'_c} = \text{ค่าที่สามารถหาได้} \quad (4.3)$$

และเท่ากับ

$$\lim_{\rho'_c \rightarrow 0} \bar{E}^d(0')\sqrt{\rho'_c} = \bar{E}'(Q_D) \bullet \bar{D} \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \bar{E}'(Q_D) &= \text{สนามที่ตกกระทบ ณ จุดพิศัดการเลี้ยวเบน} \\ \bar{D} &= \text{ไดแอดิกสัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบน} \end{aligned}$$

เมื่อใช้สมการ (4.4) สนามเลี้ยวเบนที่ได้จากสมการ (4.2) จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \bar{E}^d(s) &= \lim_{\rho'_c \rightarrow 0} \left\{ \left[ \bar{E}^d(0')\sqrt{\rho'_c} \right] \sqrt{\frac{\rho_c}{(\rho'_c + s)(\rho_c + s)}} e^{-j\beta s} \right\} \\ \bar{E}^d(s) &= \bar{E}'(Q_D) \bullet \bar{D} \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}} e^{-j\beta s} \end{aligned} \quad (4.5)$$

สนามเลี้ยวเบนสามารถจัดอยู่ในรูป

$$\bar{E}^d(s) = \bar{E}'(Q_D) \bullet \bar{D} A(\rho_c, s) e^{-j\beta s} \quad (4.6ก)$$

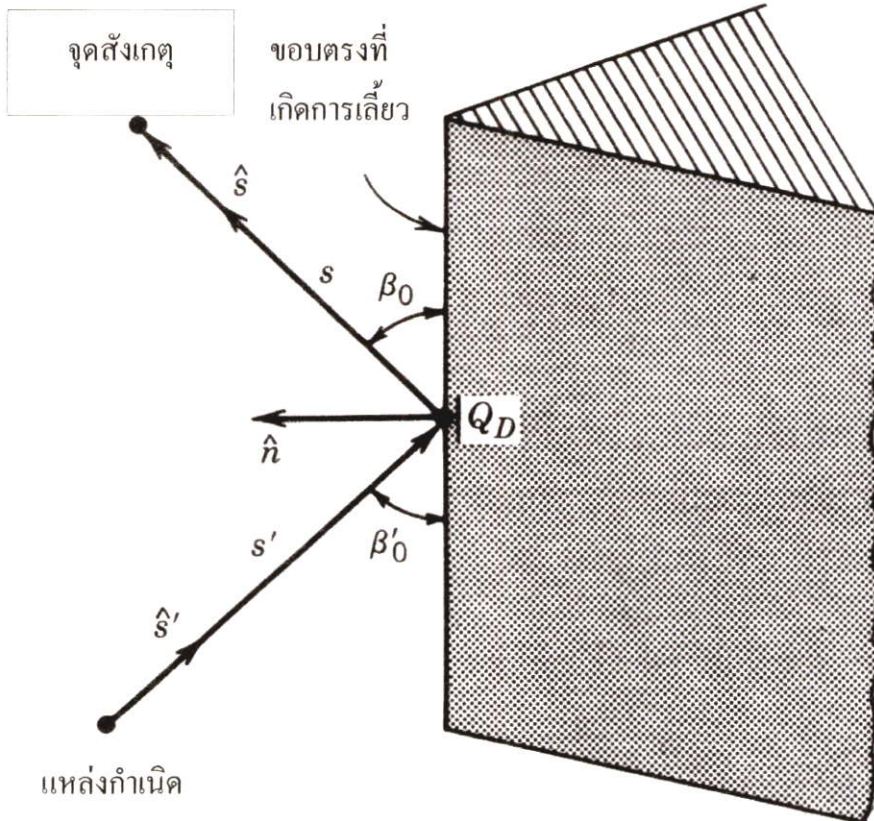
โดยที่  $A(\rho_c, s)$  เป็นค่าการลดทอนจากการเลี้ยวเบน

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}} \quad (4.6ข)$$

$\rho_c$  = ระยะระหว่างจุดอ้างอิง  $Q(s=0)$  ที่ขอบของวัตถุและการถากออกที่ช่องรังสีการเลี้ยวเบน

โดยทั่วไปแล้ว  $\rho_c$  จะคงอยู่ในรูปของฟังก์ชันดังต่อไปนี้

1. ความโค้งของหน้าคลื่นของสนามที่ตกกระทบ
2. มุมของการตกกระทบและการเลี้ยวเบน ความสัมพันธ์เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่ตั้งฉากกับขอบวัตถุ ณ จุด  $Q$  ของการเลี้ยวเบน
3. รัศมีของความโค้งของส่วนที่เกิดการเลี้ยวเบนที่จุด  $Q$  ของการเลี้ยวเบน



รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนจากลิ้มด้วยขอบตรง

สนามที่เกิดการเลี้ยวเบนซึ่งหาได้จากหลักของ Fermat ซึ่งเริ่มต้นจากจุดของพื้นผิวของวัตถุซึ่งไม่ต่อเนื่อง แบ่งออกเป็นขอบเขตของเงาของการตกกระทบและขอบเขตของเงาของการสะท้อน ดังสมการ (4.6ก), (4.6ข) ค่าของสนามเลี้ยวเบนหาได้จากสนามตกกระทบและการใช้ค่าที่เหมาะสมของ  $\bar{D}$  ซึ่งอยู่ในรูปของไดแอดิกของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสมมติให้แปรผันตามหลักของการอนุรักษ์พลังงานตามท่อของรังสี เฟสของคลื่นจะบวก 90 เมื่อรังสีเดินทางผ่านจุด  $s = 0$  และ  $s = -\rho_c$  เฟสของสนามที่อยู่บนรังสีของการเลี้ยวเบนสมมติให้เท่ากับผลคูณของความยาวในเชิงแสงของรังสีจากจุด  $Q$  และค่าคงที่ของเฟส  $\beta$  ของตัวกลาง

เมื่อขอบของวัตถุเป็นขอบที่ตรง แหล่งกำเนิดอยู่ที่ระยะ  $s$  จากจุดที่เกิดการเลี้ยวเบน และจุดที่สังเกตอยู่ที่ระยะ  $s'$  ดังรูปที่ 4.2 สนามเลี้ยวเบนแสดงได้ดังสมการ

$$\bar{E}^d(s) = \bar{E}'(Q_D) \bullet \bar{D}A(s', s) e^{-j\beta s} \quad (4.7)$$

โดยที่

$$A(s', s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \quad \text{เมื่อคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบระนาบ} \quad (4.7ก)$$

$$A(s', s) = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad \text{เมื่อคลื่นที่ตกกระทบเป็นทรงกระบอก} \quad (4.7ข)$$

$$\sqrt{\frac{s'}{s(s+s')}} \approx \frac{\sqrt{s'}}{s} \quad \text{เมื่อคลื่นที่ตกกระทบเป็นทรงกลม} \quad (4.7ค)$$

ค่าของ  $A(s', s)$  ในสมการ (4.7ก) ถึง (4.7ค) ได้มาจากการกำหนดให้ค่า  $\rho_c$  (4.6ก) เท่ากับ  $\rho_c = \infty$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ทำให้สามารถแยกวัตถุออกเป็นสองชนิดคือวัตถุที่มีขอบตรงและวัตถุที่มีขอบโค้ง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงคลื่นที่เดินทางมาตกกระทบที่ขอบของวัตถุว่าตกกระทบแบบตั้งฉากหรือตกกระทบแบบทำมุมกับขอบของวัตถุ จึงทำให้การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบนนั้นแบ่งได้ออกเป็น 4 แบบด้วยกันคือ

1. วัตถุที่มีขอบตรงและคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบตั้งฉาก
2. วัตถุที่มีขอบตรงและคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบทำมุม
3. วัตถุที่มีขอบโค้งและคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบตั้งฉาก
4. วัตถุที่มีขอบโค้งและคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบทำมุม

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะในแบบที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากระบบจะทำการทดลองด้วยระยะ Far-field และวัตถุที่ใช้เป็นวัตถุที่มีขอบตรง

#### 4.3.2 การเลี้ยวเบนจากขอบตรง: ตกกระทบตั้งฉาก

สมมุติให้มีแหล่งกำเนิดอยู่ใกล้บริเวณตัวนำที่มีลักษณะเป็นลิ่มที่ทำมุม  $(2-n)\pi$  เรเดียน ถ้าจุดสังเกตอยู่บริเวณดังกล่าวเป็นลักษณะวงกลมรัศมี จากขอบของลิ่มดังกล่าวจะเห็นได้ชัดว่าจะมีรังสีที่เดินทางตรง (OP) บวกกับรังสีที่สะท้อนจากลิ่มดังกล่าวที่จุด P รังสีเหล่านี้จะเป็นไปตามกฎของ Fermat นั่นคือจะหาทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุด O และ จุด P โดยผ่านลิ่มและอนุমানจากกฎของ Snell

พิจารณารังสีซึ่งเป็นไปตามขบวนการเชิงเรขาคณิตของแสง (การเดินทางตรงและการสะท้อน) เราสามารถแยกบริเวณรอบ ๆ ลิ้มได้ 3 บริเวณดังรูปที่ 4.3

บริเวณ I ได้แก่บริเวณ ที่ประกอบด้วยสนามที่สะท้อน โดยตรงและสนามเดินทางโดยตรง

$$0 < \phi < \pi - \phi'$$

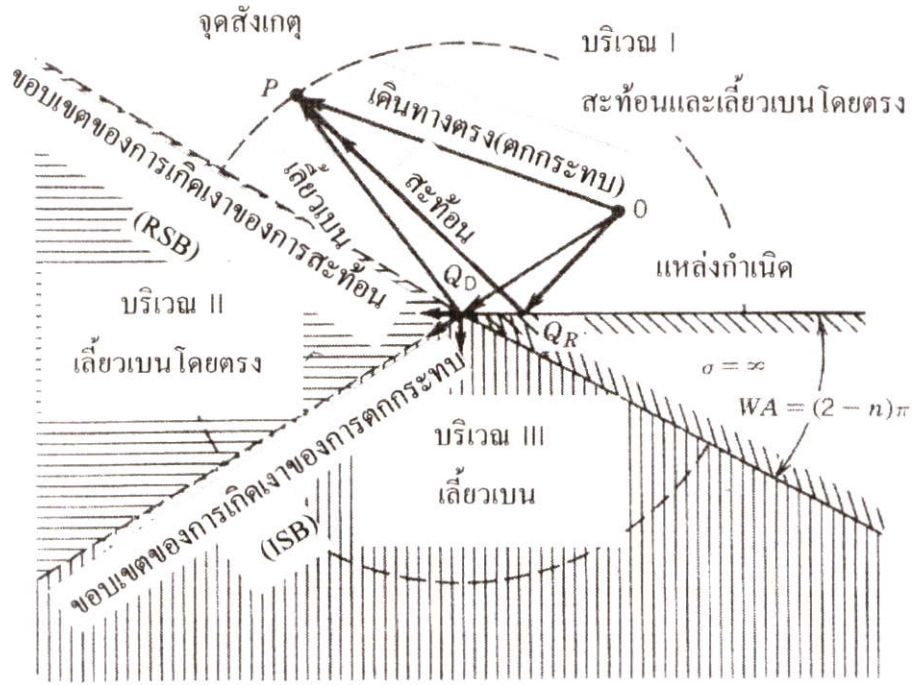
บริเวณ II ได้แก่บริเวณ ที่ประกอบด้วยสนามที่เลี้ยวเบนโดยตรง  $\pi - \phi' < \phi < \pi + \phi'$

บริเวณ III ได้แก่บริเวณ ที่ประกอบด้วยสนามที่เลี้ยวเบน  $\pi + \phi' < \phi < n\pi$

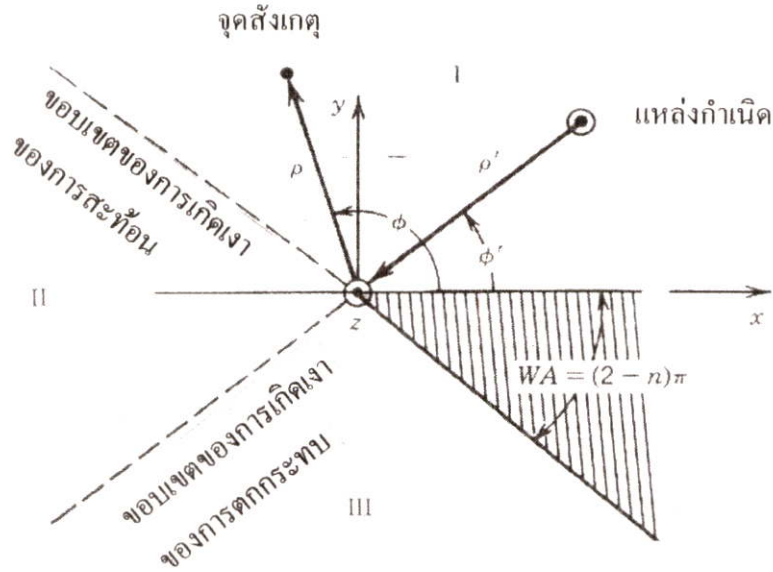
ด้วยสนามที่เกิดขึ้นที่บริเวณต่างๆ จึงเกิดเหตุการณ์เหล่านี้ขึ้น

1. ความไม่ต่อเนื่องของค่าสนามที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่าง บริเวณ I และ II เรียกว่า ขอบเขตของเงาของการสะท้อน (RSB) และรอยต่อระหว่างบริเวณ II และ III เรียกว่า ขอบเขตของเงาของการตกกระทบ (ISB)
2. ไม่มีค่าสนามในบริเวณ III

เพื่อขจัดความไม่ต่อเนื่องของสนามตามขอบเขตดังกล่าวและเพื่อปรับเปลี่ยนสนามทั้งสาม บริเวณสนามเลี้ยวจึงถูกนำมาคิด และเพื่อให้สามารถแสดงถึงการกระจายของสนามเลี้ยวเบนจึง สมมุติให้แหล่งกำเนิดเป็นแหล่งกำเนิดแบบเส้นยาวไม่จำกัด



(ก)

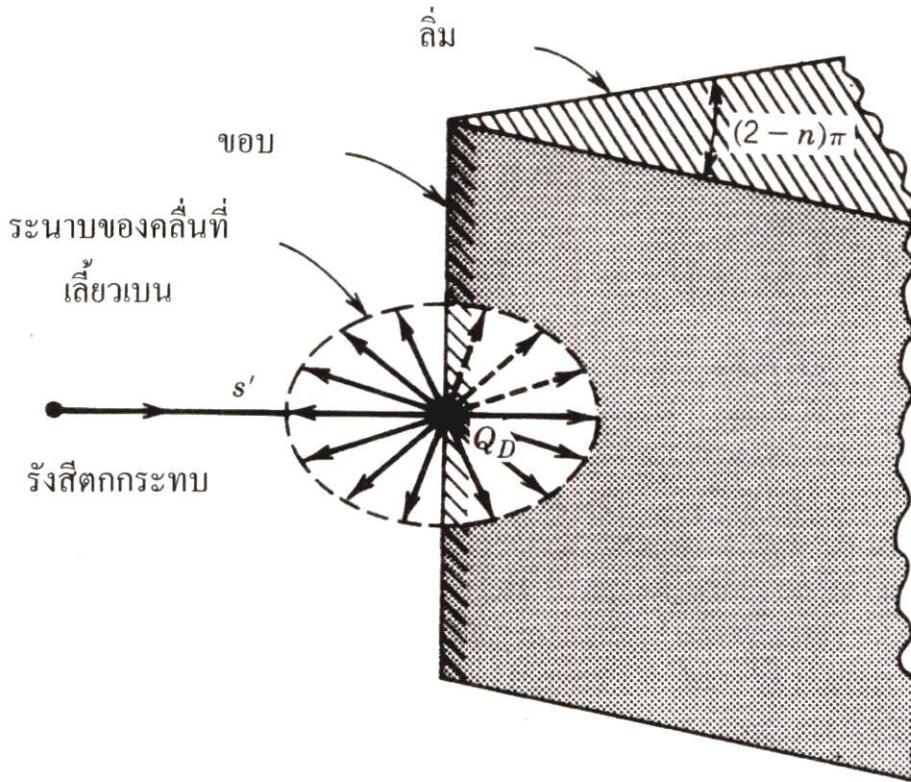


(ข)

รูปที่ 4.3 แหล่งกำเนิดลักษณะเส้นอยู่ใกล้ลิมิตวนำในรูป 2 มิติ (ก) การแบ่งบริเวณ (ข) ระบบพิกัด

สนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดจะสอดคล้องกับเงื่อนไขของขอบเขตของใดแรก  $\bar{E}_z = 0$  ทั้งสองด้านของลิมิตและสนามแม่เหล็กสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของนิวแมน  $\frac{\partial \bar{E}_z}{\partial \phi} = 0$  หรือ  $\bar{H}_z = 0$  ที่ทั้งสองด้านของลิมิต ด้านแต่ละด้านของลิมิตจัดเรียงอยู่ในรูปของระนาบที่ยาวกึ่งไม่จำกัด

แหล่งกำเนิดที่ยาวไม่จำกัดวางขนานกับขอบของลิ้ม และตำแหน่งสามารถอธิบายได้ในรูปของพิกัด  $(\rho', \phi')$  และสมมติให้แหล่งกำเนิดมีค่ากระแสคงที่



รูปที่ 4.4 การเลี้ยวที่เกิดจากการตกกระทบตั้งฉากกับขอบของลิ้ม

พิจารณาการเลี้ยวเบนที่เกิดจากการตกกระทบแบบตั้งฉากโดยขอบเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.3 จะมีเฉพาะสนามที่ตกกระทบแบบตั้งฉากเท่านั้น ระนาบของคลื่นที่เลี้ยวเบนจะตั้งฉากกับขอบของวัตถุ สัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบนจะหาได้โดย

1. หาคำตอบของฟังก์ชันกรีนในรูปของอนุกรมไม่จำกัด โดยใช้วิธีโมดอลเทคนิค และการใช้การประมาณที่ระยะของสนามระยะไกล
2. แปลงอนุกรมของฟังก์ชันกรีนให้อยู่ในรูปของการอินทิเกรต
3. อินทิเกรตฟังก์ชันกรีนโดยใช้การขยายค่าไม่สิ้นสุดของความถี่สูงโดยใช้เส้นกำกับ (High-frequency Asymptotic Expansion) ด้วยวิธีมาตรฐานทั่วไป เช่น Method of Steepest Descent

โดยการใช้วิธีโมดอลเทคนิค (Modal Technique) สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดแบบเส้นที่มีกระแส  $I_c$  สามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$\bar{E}_z^c = -\frac{\omega\mu I_c}{4}G \Rightarrow \bar{H}^c = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \bar{E} \quad (4.8)$$

และสนามแม่เหล็กทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบเส้นหาได้โดยใช้สมการ

$$\bar{H}_z^m = \frac{\omega\epsilon I_m}{4}G \Rightarrow \bar{E}^m = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H} \quad (4.9)$$

โดยที่  $\bar{G}$  เป็นฟังก์ชันกรีนซึ่งได้มาจาก

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m J_{m/n}(\beta\rho) H_{m/n}^{(2)}(\beta\rho') \left[ \cos \frac{m}{n}(\phi - \phi') \pm \cos \frac{m}{n}(\phi + \phi') \right] \text{ สำหรับ } \rho \leq \rho' \quad (4.10ก)$$

$$\epsilon_m = 1, \text{ เมื่อ } m = 0$$

$$\epsilon_m = 2, \text{ เมื่อ } m \neq 0$$

$$(4.10ข)$$

ในกรณีที่  $\rho \geq \rho'$ ,  $\rho$  และ  $\rho'$  จะสลับที่กัน เครื่องหมายบวกระหว่างโคซายน์สองพจน์จะใช้ในเงื่อนไขขอบเขตของวัตถุเนื้อเดียวกันด้วยวิธีนิวมาน โดยที่  $\frac{\partial G}{\partial \phi} = 0$  สำหรับวัตถุเนื้อเดียวกันเงื่อนไขขอบเขตจะเกิด  $\bar{G} = 0$  ที่ทั้งสองด้านของลิมและจะใช้เครื่องหมายลบ ในอะคูสติกเทอร์มินอลโลยี เงื่อนไขขอบเขตแรกจะเรียกว่า ฮาร์ดโพลาริเซชัน และเงื่อนไขขอบเขตที่สองเรียกว่า ซอฟท์โพลาริเซชัน

จากสมการ (4.10) Hankel ฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$H_{m/n}^{(2)}(\beta\rho') \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\beta\rho'}} e^{-j[\beta\rho' - \pi/4 - (m/n)(\pi/2)]} \quad (4.11)$$

เมื่อนำสมการ (4.11) ไปแทนในสมการ (4.10) จะสามารถลดรูปลงเหลือ

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{2}{\pi\beta\rho'}} e^{-j(\beta\rho' - \pi/4)} F(\beta\rho) \quad (4.12)$$

โดยที่

$$F(\beta\rho) = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m J_{m/n}(\beta\rho) e^{j(m/n)(\pi/2)} \left[ \cos \frac{m}{n}(\phi - \phi') \pm \cos \frac{m}{n}(\phi + \phi') \right] \quad (4.12ข)$$

$F(\beta\rho)$  จะแทนค่าสนามไฟฟ้าทั้งเมื่อแหล่งกำเนิดคือแหล่งกำเนิดทางไฟฟ้า (ซอฟท์โพลาไรเซชัน) และจะแทนค่าสนามแม่เหล็กทั้งหมดเมื่อแหล่งกำเนิดคือแหล่งกำเนิดทางแม่เหล็ก (ฮาร์ดโพลาไรเซชัน)

ซึ่งหลังจากหาค่าอนุกรมในสมการ (4.12ข) แล้วจะได้ค่าดังสมการ

$$F(\beta\rho) = \frac{1}{4\pi j n} \int_{(c'-c)} \cot\left(\frac{\phi - \phi' + z}{2n}\right) e^{j\beta\rho \cos z} dz \pm \frac{1}{4\pi j n} \int_{(c'-c)} \cot\left(\frac{\phi + \phi' + z}{2n}\right) e^{j\beta\rho \cos z} dz \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.13) สามารถแยกได้เป็นสองเทอมได้ดังสมการ

$$F(\beta\rho) = F_1(\beta\rho) \pm F_2(\beta\rho) \quad (4.14)$$

โดยวิธี Method of Steepest Descend จะสามารถค่าของแต่ละเทอม [5] ในสมการ (4.14) ได้ดังสมการ

$$F_1(\beta\rho) \approx \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{\frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi - \phi'}{n}\right)} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (4.15ก)$$

และ

$$F_2(\beta\rho) \approx \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{\frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi+\phi'}{n}\right)} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (4.15\text{ข})$$

เมื่อได้ค่า  $F(\beta\rho)$  จะทำให้สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณต่างได้

บริเวณที่เกิดสนามตามรูปแบบของแสงเชิงเรขาคณิตจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$F_G(\beta\rho) = \begin{cases} e^{j\beta\rho \cos(\phi-\phi')} \pm e^{j\beta\rho \cos(\phi+\phi')} & 0 < \phi < \pi - \phi' \\ e^{j\beta\rho \cos(\phi-\phi')} & \text{เมื่อ } \pi - \phi' < \phi < \pi + \phi' \\ 0 & \pi + \phi' < \phi < n\pi \end{cases} \quad (4.16)$$

บริเวณที่เกิดสนามตามรูปแบบของการเลี้ยวเบนจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$F_D(\beta\rho) = V_B(\rho, \phi, \phi', n) = V_B^i(\rho, \phi - \phi', n) \pm V_B^r(\rho, \phi + \phi', n) \quad (4.17)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} V_B^{h,s}(\rho, \phi, \phi', n) &= V_B^i(\rho, \phi - \phi', n) \pm V_B^r(\rho, \phi + \phi', n) \\ &= \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi-\phi'}{n}\right)} \pm \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi+\phi'}{n}\right)} \right] \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

ซึ่งเมื่อแบ่งออกเป็นซอฟท์และฮาร์ดโพลาไรเซชันแล้วจะได้

$$\begin{aligned}
V_{BS}^{h,s}(\rho, \phi, \phi', n) &= V_{BS}^i(\rho, \phi - \phi', n) - V_{BS}^r(\rho, \phi + \phi', n) \\
&= \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} [D_S^i(\rho, \phi - \phi', n) - D_S^r(\rho, \phi - \phi', n)] \\
&= \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi - \phi'}{n}\right)} - \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi + \phi'}{n}\right)} \right]
\end{aligned} \tag{4.19ก}$$

และ

$$\begin{aligned}
V_{Bh}^{h,s}(\rho, \phi, \phi', n) &= V_{Bh}^i(\rho, \phi - \phi', n) + V_{Bh}^r(\rho, \phi + \phi', n) \\
&= \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} [D_h^i(\rho, \phi - \phi', n) + D_h^r(\rho, \phi - \phi', n)] \\
&= \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi - \phi'}{n}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi + \phi'}{n}\right)} \right]
\end{aligned} \tag{4.19ข}$$

จากสมการ (4.7) และ สมการ (4.19) สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
\bar{E}^d &= \left[ \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} [D_S^i(\rho, \phi - \phi', n) - D_S^r(\rho, \phi - \phi', n)] \right] \bar{E}^i \\
&= \left[ \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi\beta}} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi - \phi'}{n}\right)} - \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\phi + \phi'}{n}\right)} \right] \right] \bar{E}^i
\end{aligned} \tag{4.20}$$

จากสมการดังกล่าวทั้งหมดทำให้สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตได้

#### 4.4 สรุป

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอบวัตถุนั้นประกอบด้วยบริเวณที่มีสนามเดินทางจากแหล่งกำเนิดโดยตรงและสนามที่เกิดจากการสะท้อนจากวัตถุ บริเวณที่เกิดสนามจากการหักเหและการ

กระจาย และบริเวณที่ไม่ได้รับสนาม เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง จะทำให้สนามไฟฟ้ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแสงซึ่งทำให้สามารถนำปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับแสงมาใช้ในการหาค่าสนามไฟฟ้าในบริเวณต่างๆ ได้ ทำให้ในบริเวณต่างๆ ที่พิจารณาถึงค่าสนามไฟฟ้าจะปรากฏสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนเกิดขึ้น ดังนั้นในบริเวณที่ไม่ได้รับสนามนั้นเมื่อใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตแล้วสามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยวเบนจากขอบของวัตถุได้

## บทที่ 5

# การใช้วิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเพื่อหา ค่าความเป็นฉนวน

### 5.1 กล่าวนำ

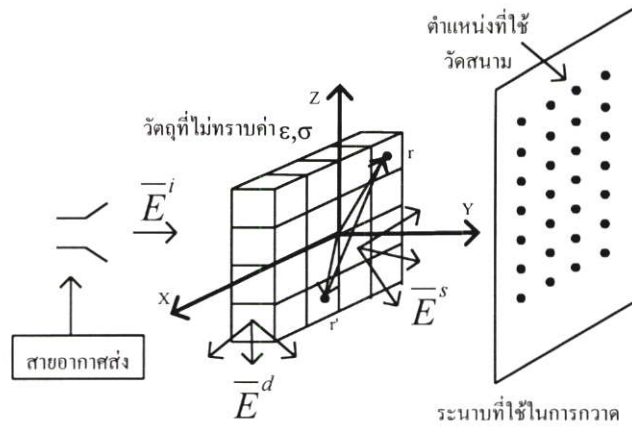
ในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุนั้นจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของวัตถุต่าง ๆ วิธีที่จะใช้วัดค่าความเป็นฉนวนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป วิธีที่ไม่ต้องทำลายและเจาะเข้าไปในเนื้อวัตถุที่ต้องการทราบค่านั้นจะมีประโยชน์อย่างมาก วิธีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ วิธีโมเมนต์ ซึ่งวิธีโมเมนต์นี้มีข้อดีคือให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำใช้งานได้กับวัตถุหลายรูปทรง และสามารถประยุกต์ใช้งานกับปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้หลากหลาย ขณะที่วิธีโมเมนต์มีข้อจำกัดเมื่อใช้งานในย่านความถี่สูงหรือใช้งานกับวัตถุหรือสายอากาศที่มีขนาดไม่มากกว่าความยาวคลื่นมาก เมื่อพิจารณาถึงทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเป็นวิธีหาผลลัพธ์แบบเส้นกำกับในย่านความถี่สูง วิธีดังกล่าวอาศัยพื้นฐานของเรขาคณิต ข้อดีของการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตคือสามารถใช้งานได้กับวัตถุที่ขนาดใหญ่หลายเท่าของความยาวคลื่น ส่วนข้อจำกัดคือเพื่อจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำจะต้องทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุด้วยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

### 5.2 การนำวิธีโมเมนต์มาใช้งานร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

#### 5.2.1 การวัดการกระจายแบบย้อนกลับ

การวัดการกระจายแบบย้อนกลับเป็นวิธีที่จะวัดสนามไฟฟ้าที่กระจายจากวัตถุเมื่อมีคลื่นมาตกกระทบ แล้วคำนวณย้อนหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุนั้น ถ้าพิจารณาวัตถุที่มีค่าสภาพยอม (Permittivity) เป็น  $\epsilon(r)$  และค่าความนำ (Conductivity) เป็น  $\sigma(r)$  ที่ถูกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านดังรูปที่ 5.1 กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำภายในวัตถุจะทำให้เกิดสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s$  และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน  $\bar{E}^d$  ของสนามที่ตกกระทบ  $\bar{E}^i$  ดังนั้นสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ  $\bar{E}$  จะเกิดจากผลรวมของสนามที่ตกกระทบ สนามที่แตกกระจาย และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

$$\bar{E}(\vec{r}) = \bar{E}^i(\vec{r}) + \bar{E}^s(\vec{r}) + \bar{E}^d(\vec{r}) \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 หลักการวัดการกระจายแบบย้อนกลับ

สนามที่แตกกระจายภายในวัตถุสามารถแสดงในรูปของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $\bar{J}_{eq}$  โดยใช้ฟังก์ชันไดโอดิกของกรีนในอวกาศว่าง  $\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}')$  [4] จะแสดงสนามที่แตกกระจาย  $\bar{E}^s$  ที่จุดที่อยู่ภายในวัตถุได้ดังสมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = \int_V \bar{J}_{eq}(\bar{r}') \cdot \left[ PV \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') - \frac{|\delta(\bar{r} - \bar{r}')|}{3j\omega\epsilon_0} \right] dV' \quad (5.2)$$

$$\bar{J}_{eq}(\bar{r}') = \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') = [\sigma(\bar{r}') + j\omega(\epsilon(\bar{r}') - \epsilon_0)] \bar{E}(\bar{r}') \quad (5.3)$$

$\tau(r)$  คือค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ดังนั้น

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = PV \int_V \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' - \frac{\tau(\bar{r}) \bar{E}(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \quad (5.4)$$

โดยที่  $\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}')$  คือฟังก์ชันไดโอดิกของกรีนมีค่า

$$\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \left[ I + \frac{\nabla\nabla}{k_0^2} \right] \psi(\bar{r}, \bar{r}') \quad (5.5)$$

และ  $\psi(\bar{r}, \bar{r}') = \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{4\pi|\bar{r}-\bar{r}'|}$ ,  $k_0 = \sqrt{\omega^2\mu_0\epsilon_0}$

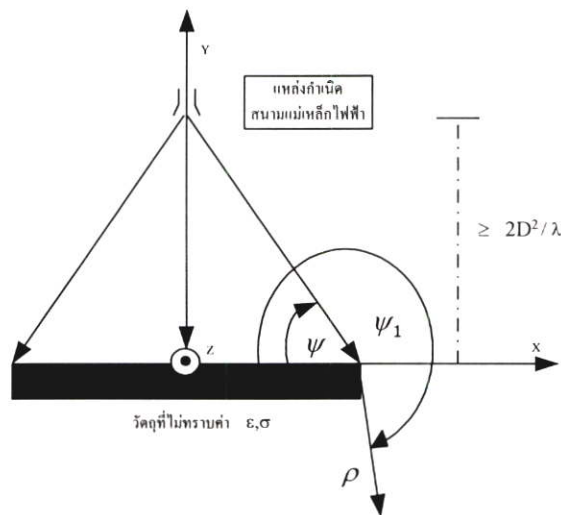
$\mu_0$  คือค่าความซึมที่อวกาศว่าง  $\epsilon_0$  ค่าสภาพยอมที่อวกาศว่าง และ PV แสดงถึงค่าที่สำคัญของการอินทิเกรตกำหนดโดย [4]  $\delta(\vec{r}, \vec{r}')$  คือค่าฟังก์ชันเดลต้า  $I$  คือเมตริกซ์ที่มีค่าในแนวทแยงเป็น 1 พิจารณาถึงสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่เกิดจากคลื่นตกกระทบตั้งฉาก โดยวัตถุนั้นเป็นวัตถุผิวเรียบและตรง สนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนหาได้จาก [5]

$$\vec{E}^d(\vec{r}) = \frac{\vec{E}^i(\vec{r}) \bullet \vec{D}}{\sqrt{\rho}} e^{-j\omega\rho} \quad (5.6)$$

โดยที่  $\vec{D}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเลี้ยวเบนไดแอดิก

$$\vec{D} = \hat{a}_x \hat{a}_x \frac{e^{-j\omega\rho} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{n\sqrt{2\pi k_0}} \left[ \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\psi_1 - \psi}{n}\right)} \right] - \left[ \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{\psi + \psi_1}{n}\right)} \right] \right] \quad (5.7)$$

$n$  ได้มาจากการหาค่าของมุมที่ขอบของวัตถุมีค่าเท่ากับ  $(2-n)\pi$



รูปที่ 5.2 สนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

พิจารณารูปที่ 5.2 [14] ในกรณีที่ใช้การตกกระทบตั้งฉากและวัตถุนั้นเป็นวัตถุที่ขอบของมันทำมุมศูนย์องศา ( $n = 2$ )  $D$  เป็นขนาดของด้านที่ยาวมากที่สุดของสายอากาศที่นำมาใช้เป็นแหล่ง

กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และเมื่อคิดถึงกรเลี้ยวเบนภายในวัตถุซึ่ง  $n=2$ ,  $\Psi = \pi/2$ ,  $\Psi_1 = 0$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ (5.6) และสมการ (5.7) จะได้  $\bar{E}^d = 0$

แทนค่าสมการ (5.4) ลงในสมการ (5.1) และเนื่องจากคิดถึงสนามภายในวัตถุค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน  $\bar{E}^d = 0$  ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังสมการ (5.8) คือ

$$\left[ 1 + \frac{\tau(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \bar{E}(\bar{r}) - PV \int_V \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \bullet \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' = \bar{E}'(\bar{r}) \quad (5.8)$$

ในสมการ (5.8)  $\bar{E}'(\bar{r})$  เป็นค่าสนามที่ตกกระทบและเป็นค่าที่ได้จากการวัด  $\bar{E}(\bar{r})$  เป็นค่าที่สามารถหาได้จากสมการ (5.8) ด้วยการแปลงสมการ (5.8) ให้เป็นเมตริกซ์โดยวิธีโมเมนต์ [6] ที่ใช้พัลส์เอ็กแพนชันและพอยน์แมตชิ่ง (Pulse Expansion and Point Matching) โดยแบ่งวัตถุออกเป็นบล็อก สามารถแปลงสมการ (5.8) เป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการ (5.9) [4]

$$\left[ \bar{G} \right] \left[ \bar{E} \right] = - \left[ \bar{E}' \right] \quad (5.9)$$

โดยที่  $\left[ \bar{G} \right]$  เป็นเมตริกซ์ของฟังก์ชันไดโอดิกของกรีน ที่คิดในวัตถุขนาด  $3N \times 3N$  ( $N$  เป็นจำนวนบล็อกของวัตถุที่ถูกแบ่งออก)  $\left[ \bar{E} \right]$  และ  $\left[ \bar{E}' \right]$  เป็นเมตริกซ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุขนาด  $3N \times 1$  ค่าสนามไฟฟ้าในเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีค่าในทั้งสามแกน ( $x, y, z$ ) แต่เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวัดจึงได้ทำการวัดค่าเฉพาะในแกน  $x$  เท่านั้น ซึ่งทำให้  $E_y$  และ  $E_z$  เท่ากับศูนย์

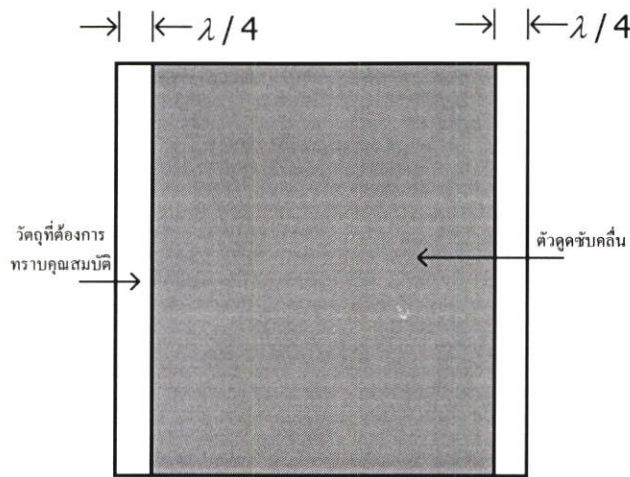
$$\left[ \bar{E} \right] = \begin{bmatrix} E_x(\bar{r}_1) \\ \dots \\ E_x(\bar{r}_N) \\ E_y(\bar{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_y(\bar{r}_N) = 0 \\ E_z(\bar{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_z(\bar{r}_N) = 0 \end{bmatrix}, \left[ \bar{E}' \right] = \begin{bmatrix} E'_x(\bar{r}_1) \\ \dots \\ E'_x(\bar{r}_N) \\ E'_y(\bar{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E'_y(\bar{r}_N) = 0 \\ E'_z(\bar{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E'_z(\bar{r}_N) = 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อคิดสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายออกสู่ภายนอกวัตถุ PV ในสมการ (5.4) มีค่าเท่ากับหนึ่ง  $\bar{E}^T$  ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุดังนี้

$$\bar{E}^T(\vec{r}) = \bar{E}^s(\vec{r}) + \bar{E}^d(\vec{r}) \quad (5.10)$$

ซึ่งการวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนทำได้ดังรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าบริเวณที่แรงเงาเป็นบริเวณที่มีตัวดูดซับคลื่นวางอยู่ด้านหน้าวัตถุ เพื่อให้ได้เฉพาะค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของวัตถุ โดยที่ระยะที่เหลือของขอบของวัตถุจะมีขนาด  $\lambda/4$  โดยที่  $\bar{E}^T$  เป็นค่าสนามรวมที่ได้จากการวัดโดยไม่มีตัวดูดซับคลื่นมาวางหน้าวัตถุ  $\bar{E}^s$  เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกกระจาย  $\bar{E}^d$  เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่ได้จากการวัด

ในการคิดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจะคิดเฉพาะการตกกระทบตั้งฉาก เพราะฉะนั้นในระนาบของการวัดจะเกิดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนเฉพาะในแนวเดียวกับวัตถุเท่านั้น



รูปที่ 5.3 การวัดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

$$\bar{E}^s(\vec{r}) = \int_V \alpha(\vec{r}') \bar{E}(\vec{r}') \cdot \bar{G}'(\vec{r}, \vec{r}') dV' \quad (5.11)$$

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (5.10) จะได้ดังสมการ

$$\int_V \alpha(\vec{r}') \bar{E}(\vec{r}') \cdot \bar{G}'(\vec{r}, \vec{r}') dV' = \bar{E}^T(\vec{r}) - \bar{E}^d(\vec{r}) \quad (5.12)$$

จากสมการที่ (5.12) สามารถแปลงเป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการ

$$\overline{G}[\overline{E}][T] = \overline{E}^T - \overline{E}^d \quad (5.13)$$

โดยที่  $\overline{G}$  เป็นเมตริกซ์ของฟังก์ชันกรีนที่คิดในวัตถุกับจุดที่ใช้ในการวัดมีขนาด  $3M \times 3N$  ( $M$  เป็นจำนวนจุดที่ใช้ในการวัด)  $\overline{E}$  เป็นเมตริกซ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุขนาด  $3N \times 3N$  โดยที่มีการแปลงเมตริกซ์จากขนาด  $3N \times 1$  ให้มีขนาด  $3N \times 3N$   $\overline{E}^T$  เป็นสนามไฟฟ้ารวมที่ได้จากการวัดขนาด  $3M \times 1$   $\overline{E}^d$  เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่วัดได้ขนาด  $3M \times 1$   $[T]$  เป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของวัตถุมีขนาด  $3N \times 1$  เช่นเดียวกับ  $\overline{E}^T$   $\overline{E}^d$   $\overline{E}^T$  และ  $\overline{E}^d$  จะมีค่าเฉพาะในแกน  $x$  เช่นเดียวกับ  $\overline{E}$  และ  $\overline{E}^T$

$$\overline{E}^T = \begin{bmatrix} E_x^T(\vec{r}_1) \\ \dots \\ E_x^T(\vec{r}_M) \\ E_y^T(\vec{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_y^T(\vec{r}_M) = 0 \\ E_z^T(\vec{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_z^T(\vec{r}_M) = 0 \end{bmatrix}, \quad \overline{E}^d = \begin{bmatrix} E_x^d(\vec{r}_1) \\ \dots \\ E_x^d(\vec{r}_M) \\ E_y^d(\vec{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_y^d(\vec{r}_M) = 0 \\ E_z^d(\vec{r}_1) = 0 \\ \dots \\ E_z^d(\vec{r}_M) = 0 \end{bmatrix}$$

### 5.2.2 การหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน

เมื่อพิจารณาการหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนที่ได้จากสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ สามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุจากสนามที่แตกกระจายและสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่วัดได้ จากสมการ (5.9) ถ้าทราบค่าสนามที่ตกกระทบและค่าสภาพยอมเชิงซ้อน จากสมการ (5.13) เราสามารถหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน เช่นเดียวกันถ้าทราบค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ สนามที่แตกกระจายและสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

ดังนั้นทางเลือกที่เป็นไปได้คือการใช้ขบวนการทำซ้ำ [8] เพื่อหาค่าจากสองสมการซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุและค่าสภาพยอมเชิงซ้อน โดยเริ่มจากการสมมติให้วัตถุมีค่าสภาพยอมเชิงซ้อนเท่ากับตัวกลาง(อากาศ) นำไปแทนค่าลงในสมการ (5.9) ซึ่งจะทำให้สามารถหาสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุได้ นำค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุที่หาได้จากสมการ (5.9) ไปแทนค่าในสมการ (5.13) ค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ซึ่งเป็นการประมาณในขั้นแรก โดยมีเงื่อนไขว่า [8]

$$\begin{aligned} \left\| \begin{bmatrix} \bar{E}^T & -\bar{E}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{G} \\ \bar{E} \end{bmatrix} T \right\|^2 &\Rightarrow \text{น้อยที่สุด} \\ \left\| T \right\|^2 &\Rightarrow \text{น้อยที่สุด} \end{aligned}$$

หลังจากนั้นนำค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ไปแทนลงในสมการ (5.9) เพื่อทำขบวนการข้างต้นอีกครั้ง ผลที่ได้จะเป็นการประมาณขั้นที่สอง ทำซ้ำจนกว่าจะได้ผลตามเงื่อนไขข้างต้นจึงจะเป็นผลที่เชื่อถือได้

### 5.3 สรุป

จากที่กล่าวในบทที่แล้วว่าเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงขึ้น สนามไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแสง จึงทำให้สามารถนำปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับแสงมาพิจารณาได้ ดังนั้นในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุนั้นนอกจากจะใช้วิธีโมเมนต์เพียงอย่างเดียวแล้ว ยังสามารถนำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตมาใช้งานร่วมกัน เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการการเลี้ยวเบนที่ขอบของวัตถุ ซึ่งทำให้การวัดค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายจากวัตถุนั้นสามารถแยกได้ออกเป็นสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายจากวัตถุและสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนจากขอบของวัตถุ จึงทำให้สามารถแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ ด้วยวิธีโมเมนต์เพียงอย่างเดียวและสามารถพัฒนาเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณได้

## บทที่ 6

# ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการหาค่าความเป็นฉนวน

### 6.1 กล่าวนำ

ขั้นตอนในการคำนวณหาค่าความเป็นฉนวนเริ่มจากเก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ, สนามไฟฟ้าที่แตกกระจาย, และสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่วัดได้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (HP8510C) และส่งมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะทำการสร้างพิกัดของจุดในวัตถุและพิกัดของจุดที่ใช้ในการวัด หลังจากนั้นจะคำนวณค่าฟังก์ชันของกรีนของแต่ละจุดในวัตถุเทียบกับจุดที่ใช้ในการวัด โปรแกรมจะเริ่มคำนวณแบบวงรอบ ณ จุดนี้ ด้วยการคำนวณค่าฟังก์ชัน ของกรีนของแต่ละจุดในวัตถุเทียบกับตัววัตถุเอง(โดยใช้ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของอากาศ) หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ในวัตถุได้ นำสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนที่วัดได้มาลบกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกกระจาย จะสามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ได้ซึ่งเป็นค่าประมาณในขั้นแรก เมื่อได้ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนแล้วนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าของสภาพยอมเชิงซ้อนของอากาศที่ใช้ในขั้นตอนการคำนวณแบบวงรอบ หลังจากนั้นจะคำนวณแบบวงรอบไปจนกว่าได้เงื่อนไข

### 6.2 ระบบการวัด

ระบบที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 [14] โดยสายอากาศส่งจะถูกติดตั้งอยู่บนขาตั้ง สายอากาศรับจะถูกติดตั้งที่ตัวกวาดสายอากาศ จะทำหน้าที่ในการรับค่าสนามที่จุดต่าง ๆ โดยจำนวนจุดและระยะห่างระหว่างจุดในการกวาด ( $\lambda/4$ ) จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะส่งค่าขนาดและเฟสที่วัดได้ที่จุดต่าง ๆ กลับมาที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลและคำนวณค่าสภาพยอมเชิงซ้อนได้

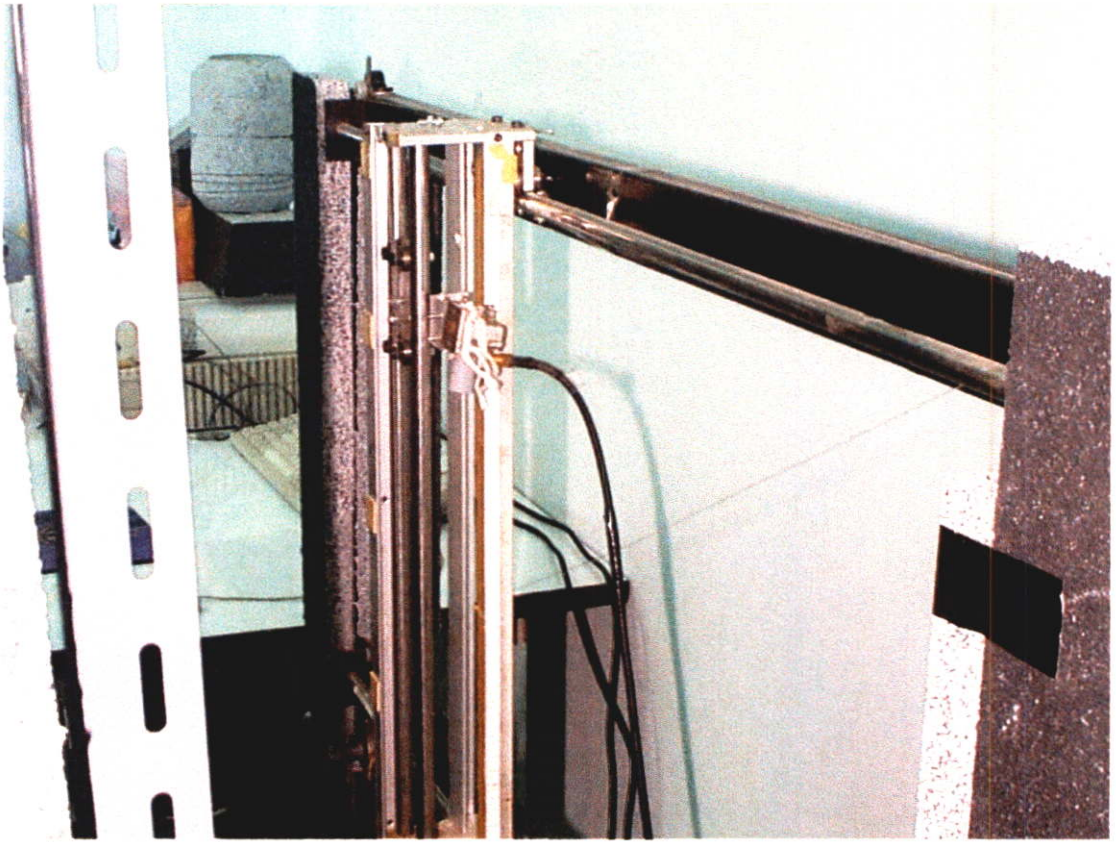




รูป 6.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (HP 8510C)

### 6.3.2 เครื่องกวาดโพรบ

อุปกรณ์ที่ใช้จับเคลื่อนโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ ในงานวิจัยนี้เรียกว่าเครื่องกวาดโพรบ [12] มีลักษณะการทำงานพื้นฐานคล้ายกับพล็อตเตอร์ ที่มีการเคลื่อนที่เป็นระนาบ ซึ่งในการใช้งานจริงจะนำโพรบที่ใช้ในการวัดมายึดติดกับแท่นกวาดของตัวเครื่องกวาดโพรบซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการเขียนโปรแกรมสั่งให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ได้ตามต้องการ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงเครื่องกวาดโพรบ

### 6.3.2.1 การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

เครื่องกวาดโพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีพื้นฐานการออกแบบมาจากพล็อตเตอร์ โดยดัดแปลงให้สามารถนำมาใช้ในการทดสอบกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกวาดโพรบ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ชุดกลไก และอุปกรณ์แผงควบคุม โดยอุปกรณ์ชุดกลไกจะเป็นจำพวกชิ้นส่วนอลูมิเนียม เหล็ก เส้นลวดสลิง เส้นเอ็น คลับลูกปืนขนาดต่างๆ และส่วนที่สำคัญที่สุดของชุดกลไกคือ สเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะไดกล่าวถึงในรายละเอียดอีกครั้งในส่วนต่อไป สำหรับอุปกรณ์แผงควบุนั้นเป็นส่วนของวงจรควบคุมให้สเต็ปมอเตอร์ทำงานตามโปรแกรมที่สร้างไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์

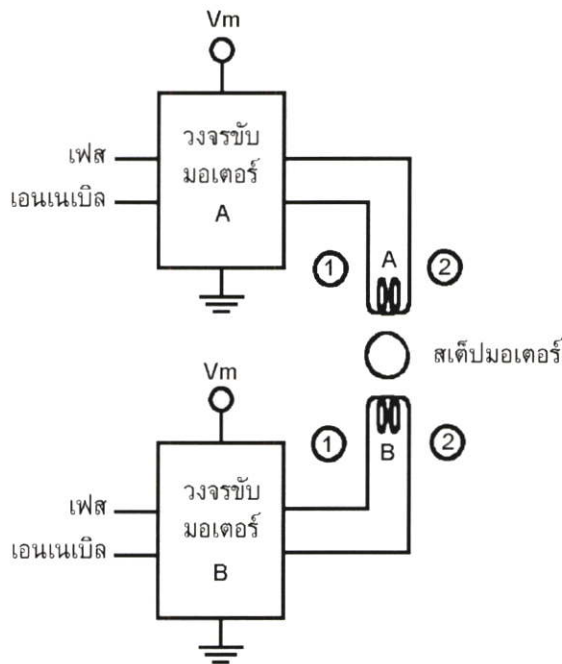
การทำงานเบื้องต้นของเครื่องกวาดโพรบ จะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ คอยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่จะเคลื่อนที่ไป แล้วส่งสัญญาณให้กับวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ เพื่อหมุนสเต็ปมอเตอร์ไปตามจุดต่างๆ ที่คำนวณไว้

สำหรับสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกวาดโพรบนี้ จะใช้ 2 ตัว เพื่อสามารถขับได้ทั้ง 2 แนว  $(x, y)$  โดยจะใช้สเต็ปมอเตอร์แบบเคลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป หมายถึงในหนึ่งรอบของสเต็ปมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ 200 สเต็ป (360 องศาหารด้วย 1.8) และถ้าเคลื่อนที่แบบครึ่งสเต็ปจะเคลื่อนที่ได้ 400 สเต็ปต่อรอบ ซึ่งในทางปฏิบัติภาคกลไกทำได้ยาก ถ้าใช้สเต็ปมอเตอร์ที่มีความละเอียดสูง

กว่านี้ ก็จะหาสตีปมอเตอร์ได้ยาก และราคาแพง แต่เราสามารถที่จะทำให้สตีปมอเตอร์นั้น มีการเคลื่อนที่ ที่ละเอียดมากขึ้น โดยการใช่วงจรสตีปมอเตอร์แบบแบ่งสตีปละเอียด (Micro Step Driver)

### 6.3.2.2 การขับสตีปมอเตอร์

การขับสตีปมอเตอร์ในเครื่องกวาดโพรบนี้ ใช่วงจรขับสตีปมอเตอร์แบบแบ่งสตีปละเอียด แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ใช่วงจรขับสตีปมอเตอร์ 2 วงจร ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เพื่อขับสตีปมอเตอร์โดยให้ขาเฟส(Phase) เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดและส่วนขาเอนเนเบิล (Enable) ใช้ควบคุมให้เกิดกระแสไหลในขดลวด ซึ่งความสัมพันธ์ของขาทั้งสองกับ



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรถับสตีปมอเตอร์เบื้องต้น

กระแสในขดลวดแสดงดังตารางที่ 6.1 ในการขับสตีปมอเตอร์แบบเต็มสตีป (Full Step Driver) นั้นมีหลักการง่ายๆ คือ ให้มีกระแสไหลในขดลวด 2 ขดสลับกัน ซึ่งสามารถสลับได้ 4 แบบ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ ๖ โพลแบบเต็มสเต็ป

สเต็ป	เอนเน เบิ้ล A	เอนเน เบิ้ล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	1	1	0	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
4	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①

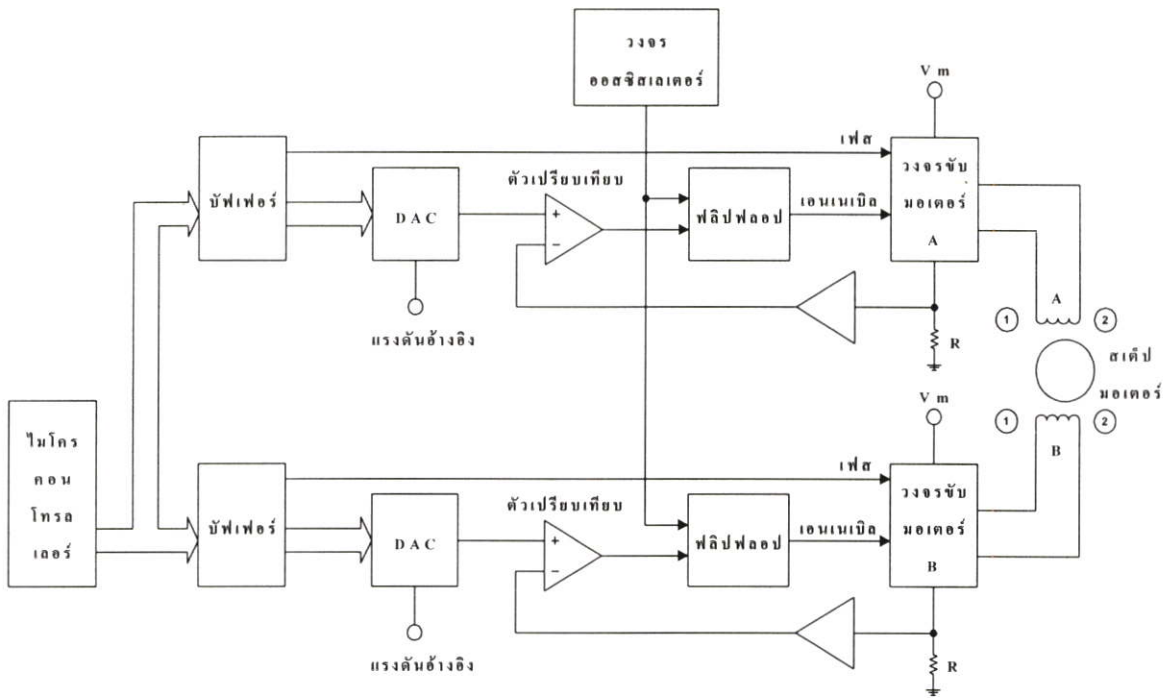
ถ้าต้องการขับให้สเต็ปมอเตอร์หมุนแบบครึ่งสเต็ป (Half Step Driver) ก็กำหนดให้มีการหยุดไหลของกระแสในขดลวด A และ B คั่นสลับอยู่ในลักษณะการหมุนแบบเต็มสเต็ป ก็จะได้การหมุนของสเต็ปมอเตอร์ครึ่งสเต็ป ดังแสดงในตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์ เคลื่อนที่ได้ละเอียดขึ้นอีกเท่าตัวจากแนวคิดอันนี้ จึงนำมาพัฒนาเป็นวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ซึ่งสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์ธรรมดากลายเป็นสเต็ปมอเตอร์ ที่มีสเต็ปการหมุนที่มีความละเอียดสูง โดยสามารถทำให้มีความละเอียดเท่าไรก็ได้ตามต้องการ ซึ่งในการสร้างเครื่องกวาดโพรบเครื่องนี้ได้กำหนดไว้ 1600 สเต็ปต่อรอบ

ตารางที่ 6.2 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ 6 โพล แบบครึ่งสเต็ป

สเต็ป	เอนเน เบิล A	เอนเน เบิล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	0	1	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	ไม่มีกระแสไหล
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
4	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ① ไป ②
5	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
6	1	0	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	ไม่มีกระแสไหล
7	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①
8	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ② ไป ①

### 6.3.2.3 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด

จากรูปที่ 6.5 แสดงผังภูมิของวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ที่ภาคขับสเต็ปมอเตอร์ จะมีตัวต้านทานต่อลงกราวด์อยู่ภาคละหนึ่งตัว คือ  $R_s$  กระแสที่จะไหลผ่านขดลวดจะต้องไหลผ่าน  $R_s$  ก่อนลงกราวด์ ฟลิปฟลอปจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของภาคขับ สเต็ปมอเตอร์ (ซึ่งหมายถึงทำหน้าที่ส่งสัญญาณเอนเนเบิลไปให้แก่ภาคขับสเต็ปมอเตอร์นั่นเอง) ฟลิปฟลอปจะทำงานตามสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามา มีวงจรเปรียบเทียบแรงดันอยู่หน้าฟลิปฟลอป ซึ่งได้รับอินพุต 2 ทาง ทางหนึ่งจากภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (DAC) อีกทางมาจากวงจรขยายแรงดันที่ได้มาจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_s$  ภาค DAC ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผ่านทางบัฟเฟอร์ ส่วนขาเฟสต่อเข้ากับบัฟเฟอร์โดยตรง



รูปที่ 6.5 แสดงผังภูมิการขับสเต็ปมอเตอร์ในแผงวงจรควบคุม

จากจุดมุ่งหมายเดิมคือ ต้องควบคุมกระแสในขดลวดให้ได้ ในการควบคุมแบบหยุดกระแสในขดลวด A และ B สลับกันในจังหวะที่เหมาะสมแทรกอยู่ในการหมุนแบบเต็มสเต็ป แต่ในวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียดต้องทำให้การไหลของกระแสในขดลวด A และ B ให้ความลดหล่นกัน คือไม่ถึงกับหยุดไปเลย แต่จะลดหล่นกันเป็นลำดับแทรกอยู่ในช่วงการหมุนแบบเต็มสเต็ปเหมือนเดิม

วิธีการนี้ได้จากการที่กระแสของขดลวดไหลผ่าน  $R_s$  จะเกิดแรงดันตกคร่อม  $R_s$  แล้วถูกขยายก่อนที่จะส่งไปยังขดลวดของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน แรงดันที่ขดลวดของวงจรเปรียบเทียบแรงดันต้องเท่ากับแรงดันที่ขบวจะมากกว่าไม่ได้ ถ้ามากกว่าวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จะทำให้ฟลิปฟล็อปหยุดทำงานกระแสในขดลวดหยุดไหล ดังนั้นกระแสในขดลวดจึงถูกควบคุมด้วยแรงดันที่ขบวของวงจรเปรียบเทียบที่ต่ออยู่กับภาค DAC ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในขั้นสุดท้าย

สรุปก็คือ การทำงานทุกอย่าง จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมนี้อาจทำการควบคุมให้ขาเฟส A และ B ทำงานสลับกัน 4 ครั้ง ในลักษณะของเต็มสเต็ป และส่งข้อมูล 7 บิต ให้ภาค DAC ทำการแปลงสัญญาณเป็นขั้นบันไดสามเหลี่ยมมีเฟสต่างกัน 180 องศา

#### 6.3.2.4 ภาษาที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดโพรบ

ในการควบคุมเครื่องกวาดโพรบ จะเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมให้สามารถทำงานตามคำสั่งได้เนื่องจากพื้นฐานการสร้างเครื่องกวาดโพรบมาจากพล็อตเตอร์ ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมควบ

คุมเครื่องกวาดโพรบ จึงต้องเขียนให้อยู่ในรูปของภาษาพล็อตเตอร์ด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะได้สื่อสารกันได้อย่างถูกต้องรับ-ส่งข้อมูลโดยนำไปสั่งให้เครื่องกวาดโพรบเคลื่อนที่ไม่ผิดตำแหน่ง ซึ่งภาษาที่ใช้คือ HPGL7475 A (Hewlett Packard Graphics Language)

HPGL เป็นระบบคำสั่งต่อเนื่องมีอักษรนำหน้าและปิดท้ายด้วย “ ; “ ต่อหนึ่งคำสั่ง คำสั่งที่ใช้ในเครื่องกวาดโพรบนี้ใช้เพียงไม่กี่คำสั่ง เนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบที่มีการกวาดโพรบเป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นคำสั่งที่นำมาใช้งานจึงมีเพียงแค่ 2 คำสั่ง คือ

PA (Plot Absolute) มี 2 รูปแบบคือ PA ; หรือ PA  $x, y$ ; เป็นคำสั่งบอกให้เครื่องกวาดโพรบอยู่ในรูปแบบของการกำหนดจุด  $x, y$  ถ้ามี  $x, y$  ต่อท้ายก็ให้เคลื่อนที่ไปยังจุดนั้น

PR (Plot Relative) มี 2 รูปแบบคือ PR ; หรือ PR  $dx, dy$ ; เป็นคำสั่งบอกให้เครื่องกวาดโพรบอยู่ในรูปแบบของค่าต่อเนื่อง (Relative) ถ้ามี  $dx, dy$  ต่อท้ายก็หมายถึง ให้เครื่องที่ไปยังจุดที่เป็นค่าต่อเนื่องนั้น

#### 6.3.2.5 การนำไปใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวน

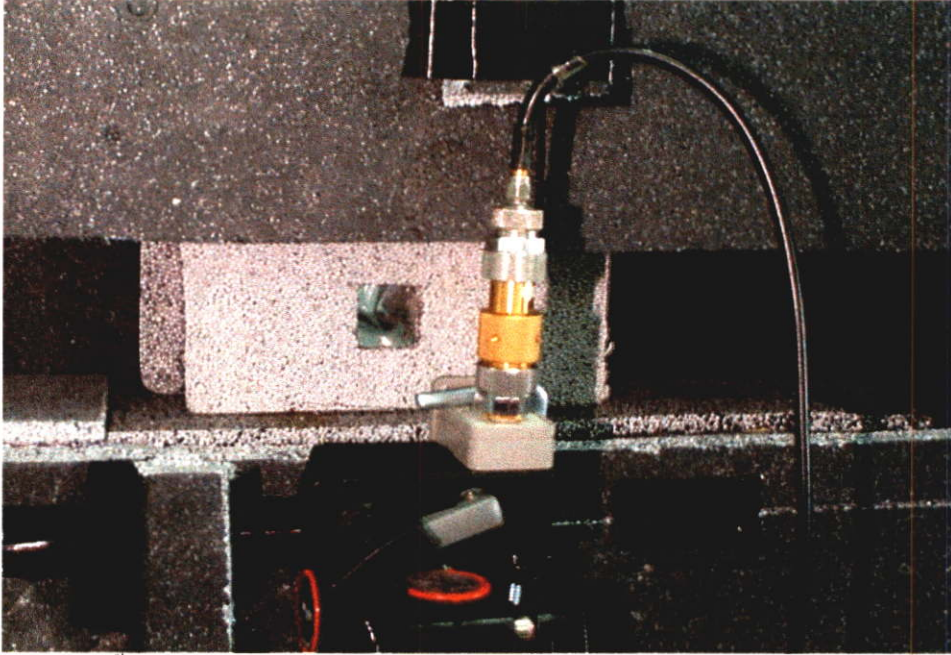
เนื่องจากวงจรควบคุมของเครื่องกวาดโพรบเป็นแบบเล็กกระทัดรัด จึงไม่มีหน่วยความจำบัฟเฟอร์การส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์มาที่เครื่องกวาดโพรบ จึงใช้พอร์ตขนานเพียงอย่างเดียว เพราะสามารถทำการตรวจสอบ แชนด์เชคกิ้ง (Handshaking) ได้ดีกว่าพอร์ตอนุกรม RS-232 และมีความเร็วในการส่งสูงมากกว่า โดยเครื่องกวาดโพรบจะรับคำสั่งเข้ามาทีละคำสั่งแล้วปฏิบัติตามทันที สำหรับการนำมาใช้กับระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ เครื่องกวาดโพรบจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากขึ้นหนึ่ง เนื่องจากในการกวาดไปตามตำแหน่งต่างๆบนอะเพอร์เจอร์ของวัตถุที่ทำการทดสอบนั้น ระยะห่างของการกวาดจะต้องเที่ยงตรงแม่นยำ เพื่อที่โพรบจะได้วัดค่าได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในการสร้างเครื่องกวาดโพรบขึ้นมาใช้งาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงระบบกลไกทางกลศาสตร์เป็นสำคัญ เพราะถึงแม้ว่าวงจรขับสเต็ปมอเตอร์จะดีเพียงใดก็ตาม แต่ถ้าระบบกลไกไม่ดีแล้ว ค่าความละเอียดถูกต้องของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบก็จะคลาดเคลื่อนไปด้วยเช่นกัน

#### 6.3.2.6 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

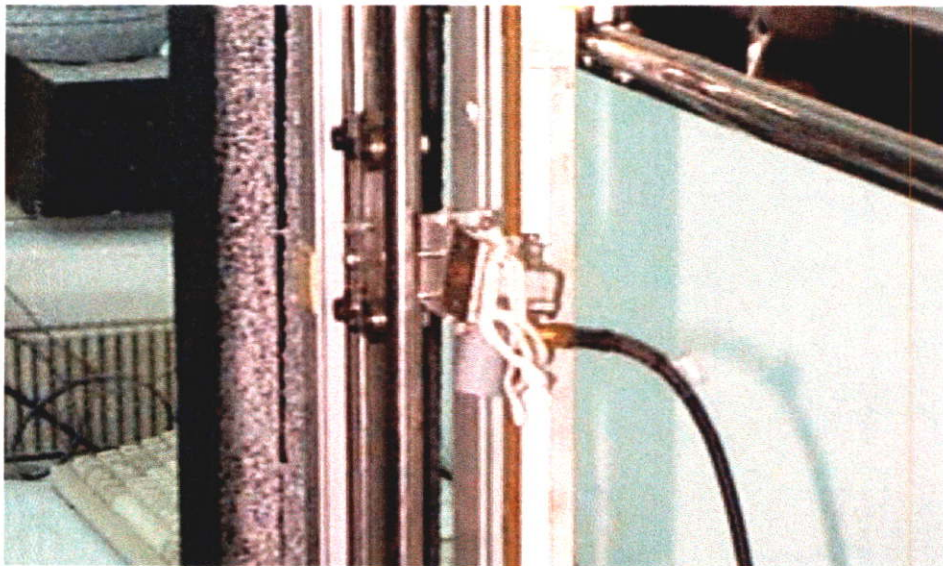
ในการออกแบบสร้างเครื่องกวาดโพรบ เพื่อใช้งานวิจัยนี้ เป็นการนำเอาหลักการทำงานของเครื่องพล็อตเตอร์มาช่วยในการประดิษฐ์ โดยมีความสามารถสูงสุดของการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ต้องการวัดเท่ากับขนาดพื้นที่  $54 \times 38$  ตารางเซนติเมตรในระนาบ  $x, y$  ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดสายอากาศที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่ของอะเพอร์เจอร์ไม่เกิน  $54 \times 38$  ตารางเซนติเมตรดังกล่าว

สำหรับความเที่ยงตรงของการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรมนี้ สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ และใช้สเต็ปมอเตอร์ในการหมุน ที่มีความละเอียดสูง

### 6.3.3 อุปกรณ์อื่น ๆ



รูปที่ 6.6 การติดตั้งสายอากาศส่ง



รูปที่ 6.7 การติดตั้งสายอากาศรับ

นอกจากเครื่องกวาดโพรบที่ได้กล่าวถึงแล้วนั้น ยังมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในระบบการวัดนี้อีก ได้แก่ สายอากาศส่ง สายอากาศรับ ตัวดูดซับคลื่น และเครื่องคอมพิวเตอร์ รูปที่ 6.7 และ 6.8 แสดงการติดตั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยที่สายอากาศส่งจะติดตั้งอยู่บนตัวยึดที่อยู่กับสายอากาศรับจะติดตั้งอยู่ที่เครื่องกวาดโพรบเพื่อเก็บข้อมูลของสนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณ

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็น ซึ่งทำหน้าที่หลายอย่างในระบบการวัดค่าความเป็นฉนวนดังต่อไปนี้

1. ทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบ ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการวัดบนระนาบอะเพอร์เจอร์
2. ทำหน้าที่ในการอินเตอร์เฟสกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้มาเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อนนำไปประมวลผลต่อไป
3. ทำหน้าที่ในการประมวลผล และคำนวณหาค่าความเป็นฉนวน

## 6.4 สรุป

ระบบการหาค่าความเป็นฉนวนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยสายอากาศส่ง ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟส่งไปยังวัตถุที่ทำการทดสอบ สายอากาศรับซึ่งติดตั้งอยู่บนเครื่องกวาดโพรบทำหน้าที่เก็บค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสในลักษณะอะเพอร์เจอร์ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะทำหน้าที่เก็บค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสที่ได้จากการวัดแล้วส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณ เครื่องกวาดโพรบทำหน้าที่ในการกวาดในแนวระนาบเพื่อเก็บข้อมูลของสนามไฟฟ้า เครื่องคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยผ่านทางแผงวงจรของฮิวเลตแพคการ์ดและควบคุมการทำงานของเครื่องกวาดโพรบผ่านทางช่องต่อเครื่องพิมพ์แบบขนาน ตัวดูดซับคลื่นทำหน้าที่ในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้การวัดค่าสนามไฟฟ้านั้นได้ค่าที่ถูกต้อง

## บทที่ 7

### การทดสอบ

#### 7.1 กล่าวนำ

จากการที่ได้กล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการหาค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนในบทที่ผ่านมา สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบ ทดสอบการหาค่าความเป็นฉนวนโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนตามข้อกำหนดต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยจะทำการทดสอบน้ำเกลือ ซึ่งในการวัดน้ำเกลือนั้นจะทำการวัดแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้โมเมนต์เพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้และความถูกต้องแม่นยำ

#### 7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากบทที่แล้วได้กล่าวถึงการออกแบบและอุปกรณ์ระบบการวัดค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบน ซึ่งในการทดสอบกับน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1% ที่ขนาดต่างๆ กันเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wang [1] อุปกรณ์การทดสอบประกอบด้วย

1. น้ำเกลือความเข้มข้น 1% ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร และ 4x4 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 7.1

2. สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด โดยที่สายอากาศส่งมีขนาด 3.22 เซนติเมตร ส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 12.4 GHz อยู่ห่างจากวัตถุที่ต้องการทดสอบอย่างน้อยเท่ากับระยะของสนามระยะไกลของสายอากาศส่ง(ขนาดของสนามระยะไกลเท่ากับ 8.466 เซนติเมตร) ซึ่งในการทดสอบนี้วางห่างจากวัตถุที่ใช้ทดสอบ 12 เซนติเมตร สายอากาศรับซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวกวาดโพรบ อยู่ห่างจากวัตถุที่ต้องการทดสอบอย่างน้อยเท่ากับระยะของสนามระยะไกลของวัตถุที่ทำการทดสอบ (ขนาดของสนามระยะไกลของวัตถุขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตรเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ขนาดของสนามระยะไกลของวัตถุขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรเท่ากับ 13.33 เซนติเมตร) ซึ่งในการทดสอบนี้วางสายอากาศรับห่างจากวัตถุ 25 เซนติเมตร

3. เครื่องวิเคราะห์โคจรข่าย รุ่น HP8510C

4. เครื่องกวาดโพรบ มีขนาดกวาดสูงสุดเท่ากับ 54x38 ตารางเซนติเมตร

5. เครื่องคอมพิวเตอร์ รุ่น Pentium ขึ้นไป



รูปที่ 7.1 น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1 %

### 7.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

1. วัดค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัตถุ ในขั้นตอนนี้จะวัดค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบที่ตัววัตถุโดยนำสายอากาศรับมาวางแทนที่วัตถุเพื่อวัดค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัตถุที่จุดต่างตามที่การแบ่งวัตถุ เช่น แบ่งออกเป็นตามขนาดบล็อกที่ต้องการวัด โดยที่จะทำการวัดค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดกึ่งกลางของแต่ละบล็อก เพื่อนำค่าสนามไฟฟ้ามาใช้ในการคำนวณ

2. วัดค่าสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายจากวัตถุ หลังจากวัดค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัตถุแล้ว นำวัตถุนั้นวางที่อุปกรณ์ติดตั้งตัวคูชชัคคลื่น เมื่อวางวัตถุแล้วตั้งโปรแกรมเริ่มทำงาน โดยเริ่มจากการตั้งความถี่ที่ 12.4-12.8 GHz แล้วทำการปรับเทียบค่ามาตรฐานแบบเต็มที 2 ทางเข้าออก เมื่อทำการเทียบค่ามาตรฐานเสร็จแล้ว โปรแกรมจะให้ใส่จำนวนจุดที่ใช้ในการกวาดในแต่ละแกน เช่น แกน X เท่ากับจำนวนจุด-1 แกน Y เท่ากับจำนวนจุด-1 (นับจุดเริ่มต้นด้วย) คอมพิวเตอร์จะรับค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเมื่อได้ค่าครบทุกตำแหน่งของการกวาดแล้วจะทำการบันทึกลงแฟ้มข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

3. วัดค่าสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนจากวัตถุ หลังจากวัดค่าสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายจากวัตถุแล้ว นำวัตถุนั้นวางที่อุปกรณ์ติดตั้งตัวคูชชัคคลื่น แล้วนำตัวคูชชัคคลื่นมาวางด้านหน้าของวัตถุให้เหลือพื้นที่แต่ละข้างของวัตถุด้านละเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น หลังจากนั้นสั่งให้โปรแกรมทำการวัดค่าสนามไฟฟ้าอีกครั้งที่จำนวนจุดเท่ากัน คอมพิวเตอร์จะรับค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเมื่อได้ค่าครบทุกตำแหน่งของการกวาดแล้วจะทำการบันทึกลงแฟ้มข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

4. ส่งโปรแกรมเพื่อทำการนำค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ไปคำนวณหาความเป็นฉนวน ด้วยเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยที่ขั้นตอนการคำนวณสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 อ่านค่าของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ สนามไฟฟ้าที่แตกกระจาย และสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องบนที่วัดได้ทั้งขนาดและเฟสจากเพิ่มข้อมูลที่บันทึกไว้

4.2 คำนวณค่าฟังก์ชันของกรีน โดยเทียบแต่ละจุดภายในวัดกับจุดที่ใช้วัด

4.3 คำนวณค่าฟังก์ชันของกรีน โดยเทียบแต่ละจุดภายในวัดกับจุดในวัด

4.4 คำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัด

4.5 นำค่าสนามไฟฟ้าที่แตกกระจายมาลบกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องบน

4.6 คำนวณหาค่าความเป็นฉนวนของวัด

4.7 ผลที่ได้เป็นการประมาณขั้นแรก ซึ่งจะต้องนำผลที่ได้ไปตรวจสอบเงื่อนไข

$$\left\| \begin{bmatrix} \bar{E}^T & -\bar{E}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{G} \\ \bar{E} \end{bmatrix} T \right\|^2 \Rightarrow \text{น้อยที่สุด}$$

$$\|T\|^2 \Rightarrow \text{น้อยที่สุด}$$

4.8 เมื่อผลที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวจะนำผลที่ได้ไปทำขั้นตอน 4.3 อีกครั้งโดยทั่วไปทำซ้ำไปเป็นจำนวนครั้งเท่ากับจำนวนจุดที่ใช้ในการกวาดหารด้วยสี่ [1]

### 7.3.1 การทดสอบกับน้ำเกลือขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร

#### 7.3.1.1 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.5 เซนติเมตร

ในการทดสอบครั้งแรกได้นำน้ำเกลือความเข้มข้น 1 % ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตรมาทำการทดสอบ โดยแบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น (บล็อกละ 0.5 เซนติเมตร มีจำนวนบล็อกเท่ากับ 6x6 บล็อก) โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นได้แก่ งานวิจัยที่ใช้วิธีโมเมนต์เพียงเดียวของ Wang [1] และงานวิจัยของ Strogryn [12] โดยที่งานวิจัยของ Strogryn [12] และ Wang [1] ทดลองที่ความถี่ 1 GHz ดังนั้นจึงได้แปลงค่าสภาพยอมและค่าความนำจากที่ความถี่ 1 GHz เป็นที่ความถี่ 12.4 GHz โดยสมการของ Debye [5] เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 [14]

ตารางที่ 7.1 ค่าสภาพยอมในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น

วิธีที่ใช้วัด	ค่าสภาพยอม ( $\epsilon_r$ )	ค่าความนำ ( $\sigma$ )
ในงานวิจัยนี้	78.3273	1.85326
Strogryn [12]	76.5967	1.61256
Wang [1]	73.2718	1.54256

จากตารางที่ 7.1 ค่าสภาพยอมวัดได้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Strogryn [12] และงานวิจัยของ Wang [1] จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่าง 2.259 % และ 6.9 % ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีความแม่นยำในการวัดค่าสภาพยอม ในขณะที่ค่าความนำมีความผิดพลาด 14.926 % และ 31.07 % ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมในการทดสอบซึ่งควรจะทดสอบในสภาพที่ไม่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดอื่นมารบกวนหรือควรจะต้องดูชับคลื่นตั้งล้อมรอบบริเวณที่ใช้ในการทดสอบ เวลาที่ใช้ในการคำนวณและการวัดประมาณ 20 นาที ซึ่งในการคำนวณกำหนดให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในขบวนการทำซ้ำมีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  และมีการทำซ้ำ 9 รอบ

### 7.3.1.2 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.25 เซนติเมตร

ในการทดสอบครั้งที่สองได้นำน้ำเกลือความเข้มข้น 1 % ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตรมาทำการทดสอบโดยแบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละเศษหนึ่งส่วนแปดของความยาวคลื่น (บล็อกละ 0.25 เซนติเมตร มีจำนวนบล็อกเท่ากับ 12x12 บล็อก) ผลที่ได้คือค่าสภาพยอมมีค่าเท่ากับ 78.147 และมีความนำเท่ากับ 1.805 โดยมีค่าสภาพยอมแตกต่างจากงานวิจัยของ Strogryn [12] เท่ากับ 1.227 % และมีความนำแตกต่างเท่ากับ 9.577 % โดยใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 1 ชั่วโมง

### 7.3.2 การทดสอบกับน้ำเกลือขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตร

#### 7.3.2.1 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.5 เซนติเมตร

ในการทดสอบครั้งที่สามได้นำน้ำเกลือความเข้มข้น 1 % ขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรมาทำการทดสอบโดยแบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น (บล็อกละ 0.5 เซนติเมตร มีจำนวนบล็อกเท่ากับ 8x8 บล็อก) ผลที่ได้คือค่าสภาพยอมมีค่าเท่ากับ 80.320 และมีความนำเท่ากับ 1.970 โดยมีค่าสภาพยอมแตกต่างจากงานวิจัยของ Strogryn [12] เท่ากับ 4.861 % และมีความนำแตกต่างเท่ากับ 22.166 % ใช้เวลาในการคำนวณ 40 นาที

#### 7.3.2.2 แบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละ 0.25 เซนติเมตร

ในการทดสอบครั้งที่สี่ได้นำน้ำเกลือความเข้มข้น 1 % ขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรมาทำการทดสอบโดยแบ่งน้ำเกลือออกเป็นบล็อกละเศษหนึ่งส่วนแปดของความยาวคลื่น (บล็อกละ 0.25 เซนติเมตร มีจำนวนบล็อกเท่ากับ 16x16 บล็อก) ผลที่ได้คือค่าสภาพยอมมีค่าเท่ากับ 77.532 และมีความนำเท่ากับ 1.767 โดยมีค่าสภาพยอมแตกต่างจากงานวิจัยของ Strogryn [12] เท่ากับ 2.024 % และมีความนำแตกต่างเท่ากับ 11.934 % แต่จะใช้เวลาในการคำนวณ 2 ชั่วโมง

ผลการทดสอบกับน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1% ทั้งสี่ครั้งสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 7.2 [14]

ตารางที่ 7.2 ค่าสภาพยอมและค่าความนำของน้ำเกลือ

จำนวนบล็อกและขนาดของน้ำเกลือ	ค่าสภาพยอม	ค่าความนำ
6x6 (3 ซม. X 3 ซม.)	78.327	1.853
12x12 (3 ซม. X 3 ซม.)	77.532	1.767
8x8 (4 ซม. X 4 ซม.)	80.320	1.970
16x16 (4 ซม. X 4 ซม.)	78.147	1.805

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีโม่เมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตจะให้ผลที่แม่นยำกว่าการใช้วิธีโม่เมนต์เพียงอย่างเดียว และการแบ่งจำนวนบล็อกมากขึ้นจะทำให้ผลที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยลงเมื่อวัตถุนั้นมีขนาดเท่ากันแต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้นด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้จำนวนบล็อก 6x6 บล็อก (ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร) ใช้ในการทดสอบกับวัตถุอื่นต่อไปเนื่องจากใช้เวลาไม่มากและได้ผลที่แม่นยำพอสมควร

#### 7.4 สรุป

ในการทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1 % มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบกับวิธีที่ใช้โม่เมนต์เพียงอย่างเดียว ในการทดสอบครั้งแรกนำน้ำเกลือขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตรมาทำการทดสอบโดยแบ่งออกเป็นบล็อกๆ ละเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น ผลการทดสอบพบว่าเมื่อวิธีโม่เมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตแล้วผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Strogryn [12] มากกว่าการใช้วิธีโม่เมนต์เพียงอย่างเดียว

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยใช้น้ำเกลือขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรแบ่งออกเป็นบล็อกๆ ละเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นและเศษหนึ่งส่วนแปดของความยาวคลื่นผลที่ได้พบว่าเมื่อจำนวนบล็อกมากขึ้นและขนาดของแต่ละบล็อกที่แบ่งมีขนาดเล็กลงผลที่ได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นแต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้นด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จะใช้ฉบับนี้จะใช้จำนวนบล็อก 6x6 บล็อก (ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร) ใช้ในการทดสอบกับวัตถุอื่นต่อไปเนื่องจากใช้เวลาไม่มากและได้ผลที่แม่นยำพอสมควร

## บทที่ 8

### ผลการทดสอบ

#### 8.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบที่ได้ทำการทดสอบเพิ่มจากบทที่แล้ว โดยวัตถุที่นำมาทำการทดสอบได้แก่ กลิเซอริน เอทิลแอลกอฮอล์ มะม่วงแก้ว และมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยที่มะม่วงทั้งสองพันธุ์จะทั้งแบบดิบและสุกมาทำการทดสอบ โดยการทดสอบกับ กลิเซอรินและเอทิลแอลกอฮอล์ จะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระบบในการวัดว่าสามารถแยกแยะวัตถุที่มีลักษณะภายนอกเหมือนกันได้

#### 8.2 การทดสอบกับวัตถุนิตอื่น

จากบทที่แล้วได้กล่าวถึงการทดสอบกับน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 1% ซึ่งผลที่ได้ให้ความถูกต้องแม่นยำ ในบทนี้จะทำการทดสอบกับวัตถุนิตอื่นได้แก่ กลิเซอริน เอทิลแอลกอฮอล์ มะม่วงแก้ว และมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยที่มะม่วงทั้งสองพันธุ์จะทั้งแบบที่ดิบและสุกมาทำการทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

1. วัตถุที่จะทำการทดสอบ ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8.1
2. สายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด โดยที่สายอากาศส่งมีขนาด 3.22 เซนติเมตร ส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 12.4 GHz อยู่ห่างจากวัตถุที่ต้องการทดสอบอย่างน้อยเท่ากับระยะของสนามระยะไกลของสายอากาศส่ง(ขนาดของสนามระยะไกลเท่ากับ 8.466 เซนติเมตร) ซึ่งในการทดสอบนี้วางห่างจากวัตถุที่ใช้ทดสอบ 12 เซนติเมตร สายอากาศรับซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวกวาดโพรบ อยู่ห่างจากวัตถุที่ต้องการทดสอบอย่างน้อยเท่ากับระยะของสนามระยะไกลของวัตถุที่ทำการทดสอบ (ขนาดของสนามระยะไกลของวัตถุขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตรเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร, ขนาดของสนามระยะไกลของวัตถุขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรเท่ากับ 13.33 เซนติเมตร) ซึ่งในการทดสอบนี้วางสายอากาศรับห่างจากวัตถุ 25 เซนติเมตร
3. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น HP8510C
4. เครื่องกวาดโพรบ มีขนาดกวาดสูงสุดเท่ากับ 54x38 ตารางเซนติเมตร
5. เครื่องคอมพิวเตอร์ รุ่น Pentium ขึ้นไป

### 8.3 ผลการทดสอบกับเอทิลแอลกอฮอล์และกลีเซอริน

ในการทดสอบได้นำแอลกอฮอล์และกลีเซอรินมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นฉนวน เพื่อนำผลที่ไปเปรียบเทียบกับน้ำเกลือที่ลักษณะภายนอกเหมือนกัน

(ก)

(ข)

รูปที่ 8.1 (ก)เอทิลแอลกอฮอล์ (ข)กลีเซอริน

ตารางที่ 8.1 ค่าสภาพยอมและค่าความนำของน้ำเกลือ เอทิลแอลกอฮอล์ และกลีเซอริน

วัตถุ	3 ซม. X 3 ซม. X 0.5 ซม. (6x6 จุด)	
	ค่าสภาพยอม ( $\epsilon_r$ )	ค่าความนำ ( $\sigma$ )
น้ำเกลือ	78.3273	1.85326
เอทิลแอลกอฮอล์	37.3468	2.9256
กลีเซอริน	27.3834	2.2075

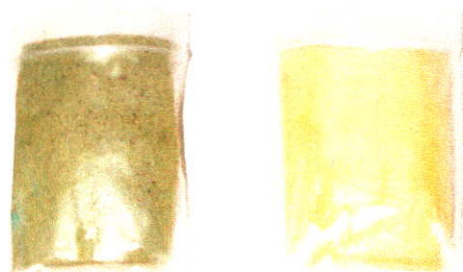
ในการทดสอบหาค่าความเป็นฉนวนของกลีเซอรินและแอลกอฮอล์นั้น ทำเพื่อตรวจสอบผลของการทดสอบว่าสามารถแยกแยะวัตถุที่มีลักษณะภายนอกเหมือนกัน ซึ่งที่สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.1

### 8.4 ผลการทดสอบมะม่วง

ในการทดสอบกับมะม่วงจะใช้มะม่วงสองพันธุ์ทั้งแบบดิบและสุก และทั้งแบบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกเพื่อทำการทดสอบการหาค่าความเป็นฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 8.2 ซึ่งมีทั้งหมด 8 กรณีคือ

1. มะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือก
2. มะม่วงแก้วดิบแบบไม่ปอกเปลือก

3. มะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือก
4. มะม่วงแก้วสุกแบบไม่ปอกเปลือก
5. มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือก
6. มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือก
7. มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือก
8. มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบไม่ปอกเปลือก



(ก)



(ข)

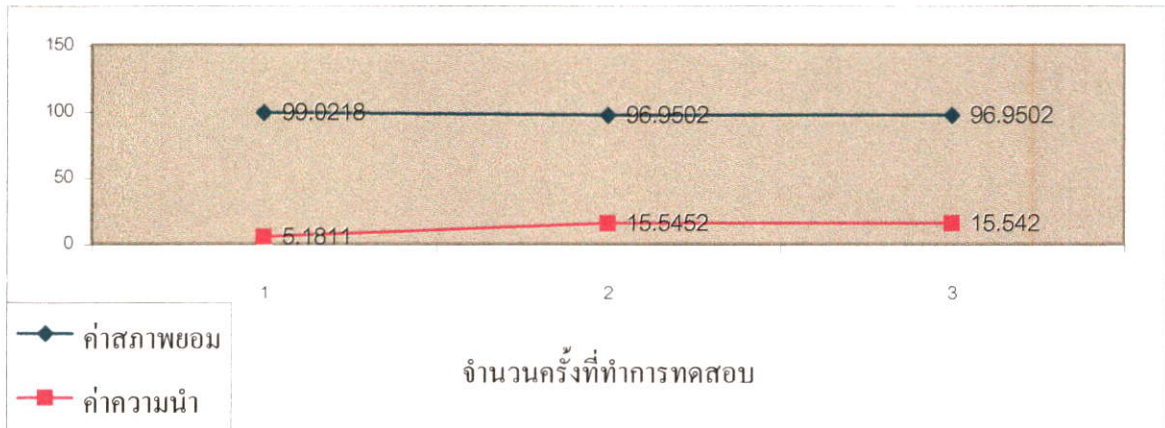
รูปที่ 8.2 มะม่วงที่ใช้ในการทดสอบ (ก) มะม่วงแก้ว (ข) มะม่วงน้ำดอกไม้

#### 8.4.1 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบ

##### 8.4.1.1 มะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.2

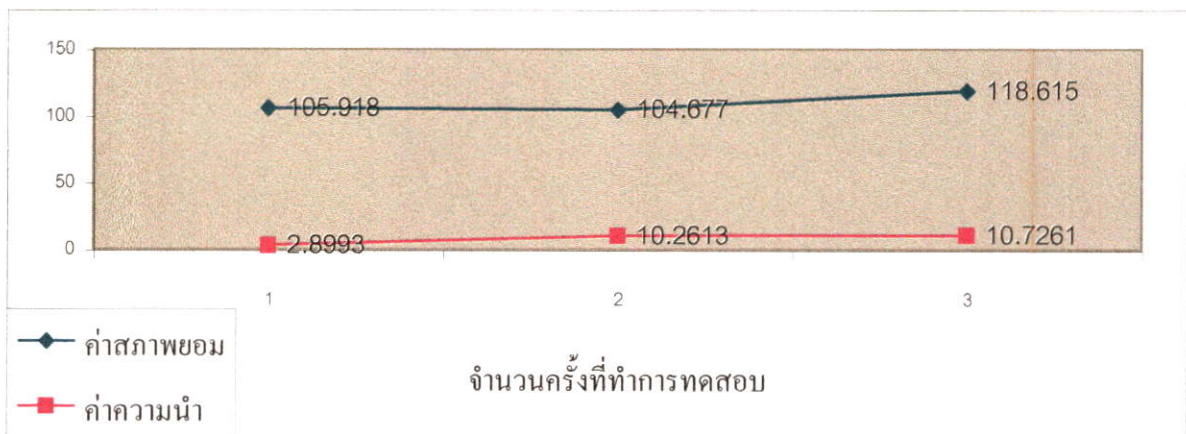
ตารางที่ 8.2 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบแบบปอกเปลือก



##### 8.4.1.2 มะม่วงแก้วดิบแบบไม่ปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงแก้วดิบไม่แบบปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วดิบไม่แบบปอกเปลือก

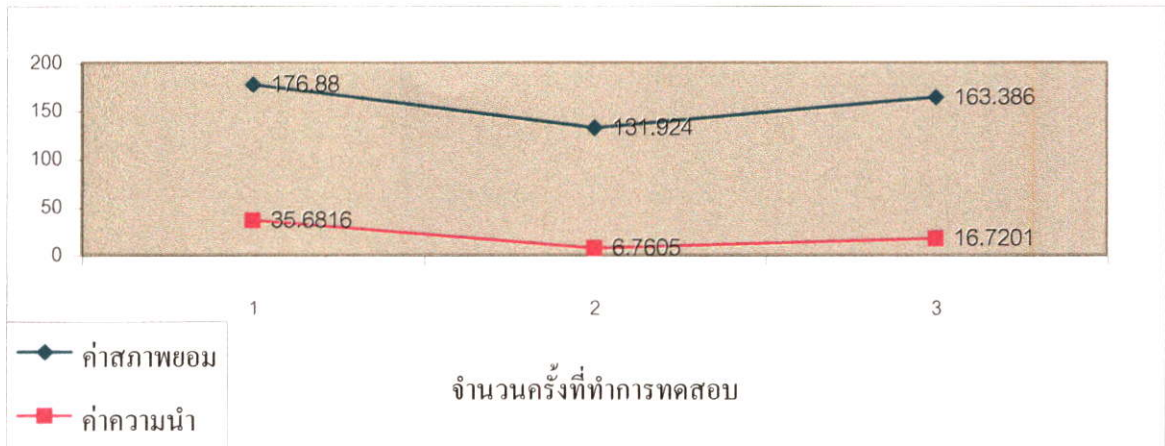


#### 8.4.2 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุก

##### 8.4.2.1 มะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.4

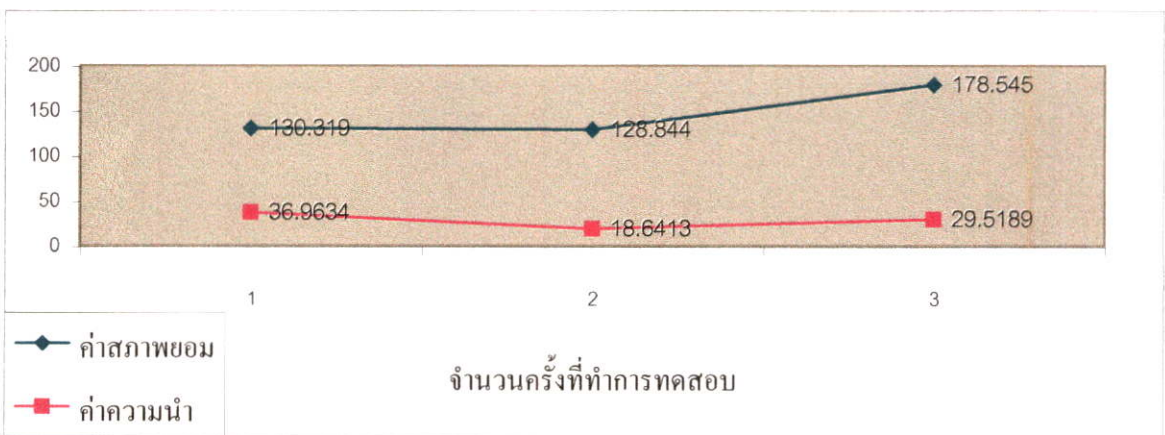
ตารางที่ 8.4 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุกแบบปอกเปลือก



#### 8.4.2.2 มะม่วงแก้วสุกแบบไม่ปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงแก้วสุกแบบไม่ปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.5

ตารางที่ 8.5 ผลการทดสอบมะม่วงแก้วสุกไม่แบบปอกเปลือก

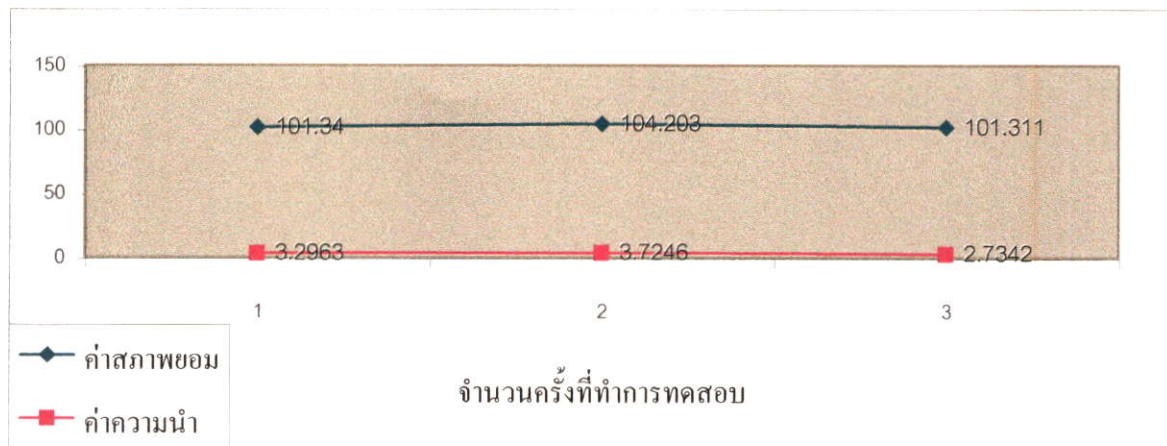


#### 8.4.3 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบ

##### 8.4.3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.6

ตารางที่ 8.6 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบปอกเปลือก

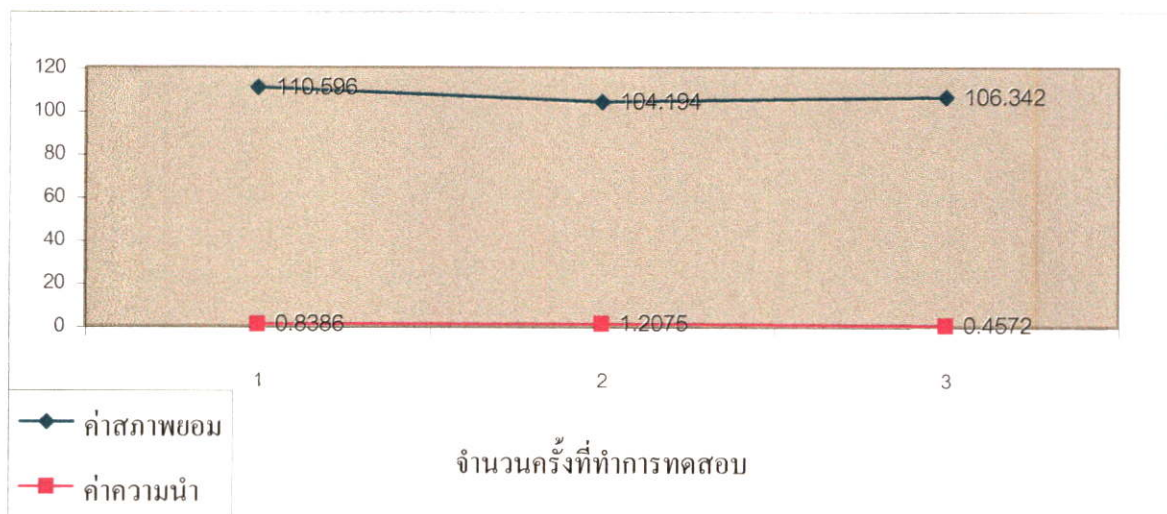


#### 8.4.3.2 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่

8.7

ตารางที่ 8.7 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือก

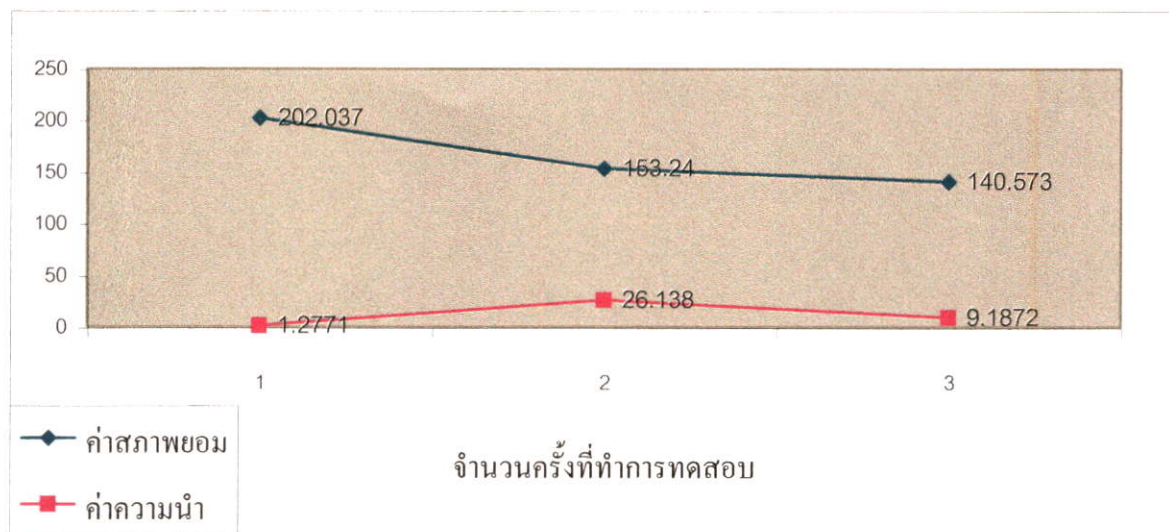


#### 8.4.4 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุก

##### 8.4.4.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8.8

ตารางที่ 8.8 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบปอกเปลือก

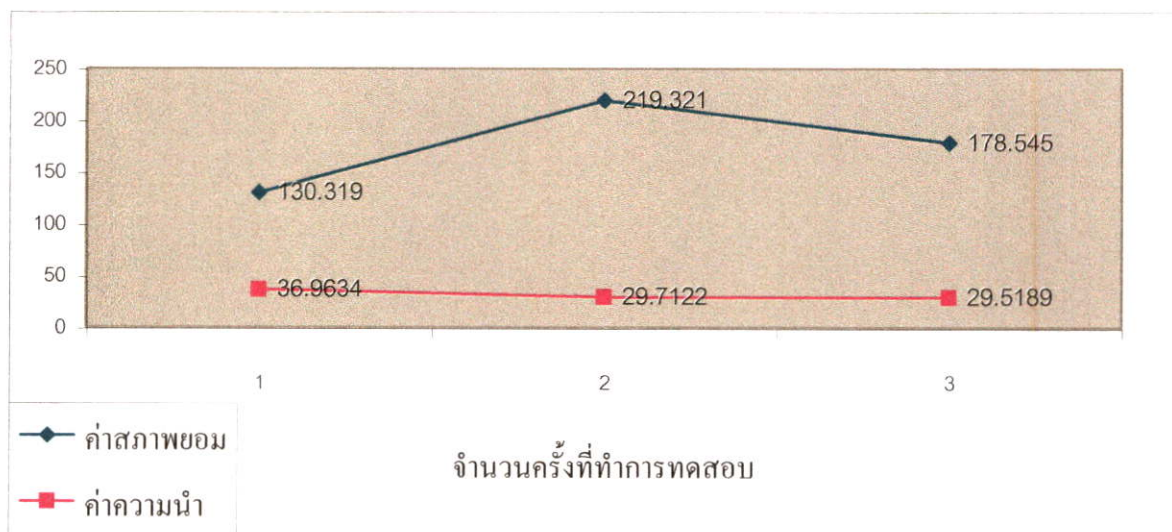


#### 8.4.4.2 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบไม่ปอกเปลือก

ในการทดสอบกับมะม่วงน้ำดอกไม้ดิบแบบไม่ปอกเปลือกสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่

8.9

ตารางที่ 8.9 ผลการทดสอบมะม่วงน้ำดอกไม้สุกแบบไม่ปอกเปลือก



จากผลการทดสอบกับมะม่วงทั้งสองพันธุ์ทั้งสุกและดิบซึ่งมีทั้งปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกนั้นผลที่ได้ปรากฏว่า มะม่วงแก้วดิบปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 69.9502 – 99.0218 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 5.1811 – 15.5452 มะม่วงแก้วดิบไม่ปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้ อยู่ระหว่าง 104.677 – 118.615 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 2.8993 – 10.7261 มะม่วงแก้วสุกปอกเปลือก ค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 131.924 – 176.88 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 6.7605-35.6816 มะม่วงแก้ว

สุกไม่ปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 130.319-178.545 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 18.6413 – 36.9634 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 101.311 –104.203 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 2.7342 – 3.7246 มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบไม่ปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 104.194 – 110.596 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 0.4572 – 1.2075 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 140.573 – 202.037 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 1.2771 – 26.138 มะม่วงน้ำดอกไม้สุกไม่ปอกเปลือกค่าสภาพยอมที่ได้อยู่ระหว่าง 130.319 – 216.321 ค่าความนำอยู่ระหว่าง 29.5189 – 36.9634

## 8.5 สรุป

ในส่วนของการทดสอบในบทนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ หนึ่งจะทำการทดสอบผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบน้ำเกลือในบทที่แล้ว เพื่อทดสอบว่าในระบบของการวัดค่าความเป็นฉนวนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแยกแยะวัตถุที่มีลักษณะภายนอกเหมือนกันได้ สองจะทำการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นฉนวนของผลไม้ทั้งแบบที่มีเปลือกและไม่มีเปลือกเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวัดมะม่วงแก้วและมะม่วงน้ำดอกไม้

ในส่วนของการทดสอบส่วนที่หนึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแยกแยะวัตถุที่ลักษณะภายนอกเหมือนกันได้ โดยที่ค่าสภาพยอมที่ได้แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในการทดสอบส่วนที่สองได้ทำการทดสอบมะม่วงผลที่ได้ปรากฏว่ามะม่วงแก้วดิบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกนั้นค่าสภาพยอมและค่าความนำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน มะม่วงแก้วสุกปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นค่าสภาพยอมและค่าความนำมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกได้ผลที่ใกล้เคียงกันทั้งค่าสภาพยอมและค่าความนำ ส่วนมะม่วงน้ำดอกไม้สุกปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือกในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นค่าสภาพยอมและค่าความนำมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถแยกแยะม่วงสุกและดิบในแต่ละพันธุ์ได้และผลจากการทดสอบกับมะม่วงสุกทั้งสองพันธุ์มีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน

## บทที่ 9

# สรุปและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวัดค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต แทนการใช้วิธีโมเมนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากวิธีโมเมนต์เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นจะมีข้อผิดพลาดมากขึ้นแต่มีข้อดีที่สามารถใช้กับวัตถุได้หลายรูปทรง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตมาใช้งานร่วมกับวิธีโมเมนต์เนื่องจากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสามารถใช้ได้ดีที่ความถี่สูง และเมื่อใช้ที่ความถี่สูงจะทำให้สามารถวัดค่าได้ในบริเวณที่จำกัด

ในการวัดค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เบื้องต้นต้องทราบถึงปัจจัยหรือข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวน ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในส่วนที่ต้องพิจารณาต่อไปคือการหาค่าความเป็นฉนวนด้วยวิธีที่มีข้ออยู่ ซึ่งได้แก่วิธีโมเมนต์ เช่น จำนวนจุดที่ใช้ในการเก็บค่าสนามไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้ในการเก็บค่าสนามไฟฟ้า ขนาดของวัตถุ ความถี่ที่ใช้งาน จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณในขบวนการทำซ้ำ ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3 หลังจากนั้นพิจารณาถึงการเกิดการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงเมื่อเดินทางผ่านวัตถุ ซึ่งจะพิจารณาถึงรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น และลักษณะของการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้า ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 4 จากนั้นพิจารณาถึงการนำวิธีโมเมนต์มาใช้งานร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาได้แก่ วิธีการวัดค่าสนามไฟฟ้า และการคำนวณ ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับ จะใช้สายอากาศแบบท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งและเครื่องรับสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟส เครื่องกวาดโพรบจะติดตั้งสายอากาศรับและทำหน้าที่กวาดรับค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟส โดยถูกควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะควบคุมให้กวาดในระยะเวลาที่กำหนด คอมพิวเตอร์ยังทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยผ่านทางแผงวงจรของฮิวเลตแพคการ์ด เพื่อให้ส่งข้อมูลของสนามไฟฟ้าที่รับได้มายังคอมพิวเตอร์ให้สัมพันธ์กับการกวาดของเครื่องกวาดโพรบ

## 9.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองที่ได้ทำการทดลอง การทดลองแรกได้ทำการทดลองกับน้ำเกลือที่ทราบค่าความเป็นฉนวนอยู่แล้ว ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถหาค่าความเป็นฉนวนได้ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง จากนั้นได้ทำการทดลองกับสารที่ลักษณะภายนอกใกล้เคียงกันในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองกับ แอลกอฮอล์ และกลีเซอริน โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำเกลือจากการทดลองแรก ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถหาค่าความเป็นฉนวนของสารทั้งสามชนิดแตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถแยกแยะวัตถุที่ลักษณะภายนอกเหมือนกันได้ สุดท้ายได้นำมะม่วงทั้งดิบและสุกมาทำการทดลอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถหาค่าความเป็นฉนวนของมะม่วงดิบและสุกได้โดยที่ค่าที่ได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกแยะมะม่วงดิบและสุกได้

## 9.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

แนวทางการพัฒนาการวัดค่าความเป็นฉนวน โดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต สามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสินค้าเกษตรเพื่อควบคุมคุณภาพของสินค้าเกษตรที่ส่งออกไปขายต่างประเทศ โดยสามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่สามารถพกพาไปใช้นอกสถานที่ได้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบที่ใช้ในการหาค่าความเป็นฉนวนของวัตถุได้ โดยนำหลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- 1 J. Wang and T. Takagi, "A Noninvasive Method for Dielectric Property Measurement of Biological Tissues," IEICE Trans. Commun., Vol. E77-B, No.6, pp.738-742, June, 1994.
- 2 S. Caorsi, G.L. Gragnani, and M. Pastorino, "Numerical Electromagnetic Inverse-Scattering Solutions for Two-Dimensional Infinite Dielectric Cylinders Buried in Lossy Half-Space," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.41, No.2, pp. 352-360, Feb, 1993.
- 3 W.D. Burnside, C.L. Yu and R.J. Marhefka, "A Technique to Combine the Geometrical Theory of Diffraction and the Moment Method," IEEE Trans. Antenna Propagat., pp.551-558, July,1975.
- 4 J. V. Bladel, "Some Remarks on Green's Dyadic for Infinite Space," IRE Trans. Antenna Propagat., Vol. AP-9, pp. 563-566, Nov. 1961.
- 5 C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & sons, 1989.
- 6 R. F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods," New York, Macmillan, 1968.
- 7 D. E. Livesay and K. Chen, "Electromagnetic Field Induced Inside Arbitrarily Shaped Biological Bodies," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-22, No.12, pp.1273-1280, Dec., 1974.
- 8 J. Wang and T. Takagi, "Iterative Determination of Complex Permittivity and SAR Distribution of Two-Dimensional Biological Body," Electronics Letters, Vol. 27, No. 2, pp.112-113, Jan. 1991
- 9 J. N. Sahalos and G. A. Thiele, "On the Application of the GTD-MM Technique and its Limitations," IEEE Trans. Antenna Propagat., Vol.AP-29, No.5., pp. 780-786, Sep., 1981.
- 10 M. J. Hangmann and R. L. Levin, "Procedures for Noninvasive Electromagnetic Property and Domestic Measurements," IEEE Trans. Antenna Propagat., Vol. 38, No.1., pp. 99-106, Jan. 1990.
- 11 A. R. von Hippel, "Dielectric Materials and Applications," The Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, and Artech House., Boston, 1995.
- 12 A. Strogryn, "Equation for calculating the dielectric constant of saline water," IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, Vol.MTT-19, pp.733-736, Aug. 1971.

- 13 Matthew and N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics," Florida, CRC, 1992
- 14 ศราชัย แสงนิยม และโมไนย ไกรฤกษ์, "การวัดค่าความเป็นฉนวนโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 822-827, พฤศจิกายน 2544
- 15 วัฒนา พลพละ, "กราฟฟิกล็อตเตอร์", เซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 127, หน้า 2536, พฤษภาคม 2536.
- 16 J. B. Keller, "Diffraction by an aperture," J. Appl. Phys., vol. 28, no 4, pp. 426-444, April 1957.
- 17 J. B. Keller, " Geometrical theory of diffraction," J. Opt. Soc. Amer., vol. 52 no. 2, pp.116-130, February 1962.
- 18 R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, " A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," Proc. IEEE, vol.62, no. 11, pp.1448-1461, November 1974.
- 19 G. L. James, Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves, Third Edition Revised, Peregrinus, London, 1986.

## บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

1. สราชัย แสงนิยม และโมไนย ไกรฤกษ์, “การวัดค่าความเป็นฉนวนโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 822-827, พฤศจิกายน 2544

## ประวัติผู้เขียน

นายสรราชย์ แสงนิมม เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2538

เริ่มต้นทำงานในปี พ.ศ. 2538 ที่ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ตำแหน่งนัก วิเคราะห์ สังกัดศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ

ปี พ.ศ. 2544 – ปัจจุบัน เข้าทำงานที่ บริษัท ไอทีวัน จำกัด ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง นัก วิเคราะห์โครงข่าย

ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ในประเทศ จำนวน 1 บทความ