

การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟและการประยุกต์

DIELECTRIC PROPERTIES DETERMINATION BY MICROWAVE  
TECHNIQUES AND ITS APPLICATIONS

จิรัฏฐ์ เมื่อนชู  
JHIRAT MEARNCHU

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2008-EN-D-019-145

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟและการประยุกต์

DIELECTRIC PROPERTIES DETERMINATION BY MICROWAVE  
TECHNIQUES AND ITS APPLICATIONS

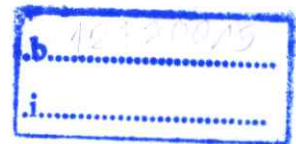


จิรัฏฐ์ เหมือนชู

JHIRAT MEARNCHU

526  
105482

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....105482  
วัน,เดือน,ปี.....24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-D-018-145

**DIELECTRIC PROPERTIES DETERMINATION BY MICROWAVE  
TECHNIQUES AND ITS APPLICATIONS**

**JHIRAT MEARNCHU**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL 2009-EN-D-018-145**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

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

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์    การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคไมโครเวฟและการประยุกต์  
Thesis Title        Dielectric Properties Determination by Microwave Techniques and Its Applications  
นักศึกษา                นายจิรัฏฐ์ เหมือนชู  
รหัสประจำตัว        46060210  
ปริญญา                วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา            วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์        KMITL-2009-EN-D-018-145

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จเร	สุรวัดน์ปัญญา	
ผศ.ดร.ชวงค์	พงศ์เจริญพานิชย์	
ผศ.ดร.ทับทิม	อ่างแก้ว	
ผศ.ดร.คณัย	ต.รุ่งเรือง	
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งกลับวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 22 เดือน ๓-๑ พ.ศ. 2552  
ลงชื่อ..... 

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิค ไมโครเวฟและการประยุกต์	
นักศึกษา	นายจิรัฐ เหมือนชู	
รหัสนักศึกษา	46060210	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
พ.ศ.	2552	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. คณัย ต.รุ่งเรือง	

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ โดยอาศัยเทคนิคการวัดคลื่นไมโครเวฟ 2 รูปแบบ คือระบบที่วัดแมกนิจูดของคลื่นแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่ต้องวัดเฟสและระบบที่วัดสนามไฟฟ้าทั้งแมกนิจูดและเฟสที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแล้วนำมาคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด สำหรับระบบแรก ได้นำเสนอผลการจำลองแบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเงื่อนไขการปรับพารามิเตอร์ทางกายภาพในสถานะต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จัดเตรียมขึ้นจากเทคนิคที่วัดเฉพาะแมกนิจูดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อด้วยสายอากาศโคโพลาร์ โดยมีรูปแบบการวางสายอากาศรับส่งอยู่ทางด้านเดียวกัน ซึ่งค่าของสัญญาณดังกล่าวเมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  แล้ววาดลงในกราฟพื้นผิวในระนาบ  $\epsilon', \epsilon''$  จะสามารถหาค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของวัสดุที่ทดสอบ และประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวนี้กับวัสดุที่เป็นข้าวเปลือก โดยแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของข้าวเปลือกที่เป็นเชิงเส้น เมื่อใช้คุณลักษณะของความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้และเทคนิคที่นำเสนอกับเครื่องมือที่สร้างขึ้น เพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือก ผลการวัดทดสอบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแบบมาตรฐาน จะแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของเครื่องมือที่สร้างขึ้น ซึ่งสามารถใช้ทดแทนเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และมีราคาแพงได้ และสำหรับอีกระบบหนึ่ง จากผลการจำลองแบบ เมื่อเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศรับส่งคลื่นที่เหมาะสม จะสามารถวัดสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ ซึ่งได้แก่ ฝาคันงคอนกรีต แล้วนำมาคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด จากผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับผลการทดสอบโดยโพรบไดอิเล็กตริก พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งจากหลักการของระบบดังกล่าวเหมาะสำหรับการทดสอบแบบต่อเนื่องเช่น การทดสอบวัสดุที่อยู่บนระบบสายพานลำเลียง เป็นต้น

<b>Thesis Title</b>	Dielectric Properties Determination by Microwave Techniques and Its Applications
<b>Student</b>	Mr. Jhirat Mearnchu
<b>Student ID.</b>	46060210
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Prof. Dr. Monai Krairiksh
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Danai Torrungrueng

## ABSTRACT

This thesis proposes 2 types of determination techniques for estimating dielectric properties. The first method, for determining the dielectric properties measures only the magnitude of electromagnetic waves. This technique was carried out by measuring the magnitude of the mutual coupling between antennas located on the same side of the dielectric material. The  $|S_{11}|$  and  $|S_{21}|$  were evaluated to obtain the dielectric properties of the object under test. Simulation results are displayed in order to evaluate the performance of the proposed system. It is experimentally validated by using laboratory equipment coupled with the prototype system. It is found to be useful in non-destructive moisture content readings of paddy inspections. The second method, for determining the dielectric properties measures the reflected wave (both magnitude and phase) and applies the inverse technique with optimization to obtain dielectric properties of the object under test. Simulation results along various locations of the received antennas are illustrated to evaluate the performance of the proposed system. The measurement results of a cement wall of the proposed system were compared with experimental results and show good agreement. It is found to be useful in testing material on conveyer system.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ และ ผศ.ดร. คณัย ต.รุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุดเสมอมา และคอยดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง รวมทั้งฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีแนวคิดและทักษะในการนำเสนอและดำเนินงานซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อตัวข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร และ ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ และความปรารถนาดีที่มีต่อข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประยุทธ์ อัครเอกฉालิน มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านคำแนะนำที่มีคุณค่าและ โปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็ก ไฟฟ้า ในการออกแบบสายอากาศ

ขอขอบพระคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD / 0027 / 2547 รหัส นักศึกษา 1.E.KL / 47 / B.1 สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณน้องๆ ในห้องปฏิบัติการหลายๆรุ่นที่เป็นแรงใจ

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณสวรส เหมือนชู ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ ทั้งในด้านความคิด แรงบันดาลใจและ ค.ญ.เขมณัญญ์ เหมือนชู ที่เป็นแรงกระตุ้นในการดำเนินงานตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ชีวิต โอกาสทางการศึกษา กำลังใจและความห่วงใยมาโดยตลอด และญาติของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนช่วยเหลือและให้แนะนำปรึกษาที่ดี ตลอดจนครูและอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิรัญญ์ เหมือนชู

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 กลไกของไดโอดีล็คทริก.....	1
1.1.2 เทคนิคการวัดโดยไมโครเวฟ.....	3
1.1.2.1 วิธีแบบไมเรโซแนนซ์.....	3
1.1.2.2 วิธีแบบเรโซแนนซ์.....	5
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	9
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	9
บทที่ 2 การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศและเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศเหนือตัวกลางไดโอดีล็คทริกที่มีการสูญเสีย.....	11
2.2.1 สนามไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งกำเนิดแบบจุดในตัวกลางไดโอดีล็คทริกที่มีการสูญเสีย.....	11
2.2.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	19
2.2.3 ทฤษฎีของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ.....	23
2.2.4 หลักการของอุปกรณ์ตรวจรู้สายอากาศไดโพลคู่.....	24
2.3 เทคนิคการคำนวณย้อนกลับโดยทำให้เหมาะสมที่สุด.....	27
2.3.1 การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับและการเกิดสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม.....	27
2.3.2 เทคนิคการคำนวณย้อนกลับที่มีพื้นฐานจากวิธีสติปเปสดีเคสเซนส์.....	28
2.4 สรุป.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบโดยการจำลองแบบการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 การจำลองแบบของอุปกรณ์ตรวจรู้สายอากาศไดโพลคู่.....	32
3.3 การออกแบบระบบการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อเหนือตัวกลาง...39	
3.3.1 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก.....	39
3.3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	41
3.3.3 การออกแบบมอดูลของระบบการวัด.....	43
3.3.3.1 หลักการทำงานของระบบที่ออกแบบ.....	43
3.3.3.2 การปรับเทียบเครื่องมือเพื่อชดเชยความสูญเสียของระบบสายนำสัญญาณ ภายใน.....	44
1. การปรับเทียบโดยการต่อผ่าน.....	45
2. การปรับเทียบโดยการเปิด.....	46
3.3.3.3. การหาค่า $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น.....	46
3.4 สรุป.....	48
บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบระบบการวัดโดยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ.....	49
4.1 บทนำ.....	49
4.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	49
4.2.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโดเมนเชิงความถี่และเชิงพิคัด.....	49
4.2.2 จำนวนตำแหน่งและระยะระหว่างสายอากาศ.....	53
4.3 การออกแบบระบบสำหรับการวัดสนามสะท้อนเพื่อการคำนวณย้อนกลับ.....	55
4.4 สรุป.....	59
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	60
5.1 บทนำ.....	60
5.2 การทดลองโดยเทคนิคการวัดขนาดของสัญญาณสะท้อนและเชื่อมต่อ.....	60
5.2.1 การใช้ไดโพลแบบมีปลอกวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำ.....	60
5.2.2 การหาค่าความชื้นจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก.....	63
5.2.2.1 การทดสอบด้วยเทคนิคเชื่อมต่อร่วมโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย.....	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2.2 การชดเชยความผิดพลาดจากการทดสอบ.....	71
5.2.2.3 การทดสอบด้วยเทคนิคเชื่อมต่อยุบรวม โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้น.....	73
5.3 การทดลองโดยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับจากสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ.....	76
5.4 สรุป.....	81
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	82
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	82
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ.....	92
ภาคผนวก ข วิธีการสอบเทียบปริมาณความชื้นในข้าวเปลือก.....	114
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกโดยเครื่องมือวัดในระบบไมโครเวฟ.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	123

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อช่วงของค่า $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ .....35
3.2	ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ที่สัมพันธ์กับค่าความลึกผิวและความชื้นของข้าวเปลือก .....39
3.3	พารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก.....41
3.4	พารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์.....42
4.1	อิทธิพลของจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณา สนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบตั้งฉาก เมื่อกำหนดระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda_0/2$ .....54
4.2	อิทธิพลของจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณา สนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบขนาน เมื่อกำหนดระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda_0/2$ .....54
4.3	อิทธิพลของระยะระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณา สนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบตั้งฉาก เมื่อสายอากาศรับคลื่นสะท้อนจำนวน 4 ตำแหน่ง.....55
4.4	อิทธิพลของระยะระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณา สนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบขนาน เมื่อสายอากาศรับคลื่นสะท้อนจำนวน 4 ตำแหน่ง.....55
5.1	ผลการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของน้ำและค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับ กับวิธีการมาตรฐาน โดยใช้โพรบไดอิเล็กตริก.....62
5.2	การหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัดสัญญาณ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในกรณีของอวกาศว่าง.....64
5.3	ค่าความผิดพลาดจากการทดสอบโดยเทคนิคที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการวัดใน บทความ [48] .....70
5.4	ค่าคงที่ต่างๆของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\epsilon_r'$ และ $\epsilon_r''$ กับ ค่า $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ .....73
5.5	การหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัดโดยเครื่องมือที่สร้างขึ้น ในกรณีของอวกาศว่าง.....74
5.6	การเปรียบเทียบผลการวัดความชื้นระหว่างเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับระบบเครื่องมือที่ นำเสนอโดยอ้างอิงกับวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐาน.....75
5.7	ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศแพทช์.....77
5.8	ผลการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฝาผนังคอนกรีตจากโพรบ ไดอิเล็กตริก.....78
5.9	ผลการวัดค่าขนาดและเฟสของสัญญาณจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ.....79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.10	ระยะและมุมการสะท้อนของสัญญาณจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ.....79
5.11	ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 2 ตำแหน่ง.กรณีที่ 1.....80
5.12	ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 2 ตำแหน่ง.กรณีที่ 2.....80
5.13	ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 4 ตำแหน่ง.....80
ผ1	มาตรฐานของการหาปริมาณความชื้นในข้าวด้วยวิธี Oven Drying Method ของ แต่ละ องค์กร.....115

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ผลตอบสนองของกลไกของไดอิเล็กตริกต่อความถี่ [4].....2
1.2	เงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบวัสดุ โดยวิธีแบบไมเรโซแนนซ์ [4].....3
1.3	แผ่นจานตัวนำประกบด้านบนและล่างของแท่งไดอิเล็กตริกทรงกระบอก [4].....5
1.4	โพรงทรงกระบอก ( $TM_{010}$ mode) สำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ [4].....6
2.1	โครงสร้างปัญหาของแหล่งกำเนิดแบบจุดในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย.....11
2.2	รูปแบบการแบ่งโครงสร้างปัญหาใน โปรแกรม CST [75].....19
2.3	โครงสร้างปัญหาของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....19
2.4	สายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่จำลองแบบใน โปรแกรม CST .....20
	(ก) โครงสร้างปัญหา.....20
	(ข) เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....20
2.5	กราฟพื้นผิวขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลางค่าต่างๆ.....21
	(ก) $z_1 = \lambda/8$ .....21
	(ข) $z_1 = \lambda/16$ .....21
	(ค) $z_1 = \lambda/32$ .....21
2.6	กราฟพื้นผิวขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะลึกจากผิวของตัวกลางค่าต่างๆ.....22
	(ก) $z = \lambda/8$ .....22
	(ข) $z = \lambda/16$ .....22
	(ค) $z = \lambda/32$ .....22
2.7	การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ[70].....23
	(ก) โหมดการส่ง.....23
	(ข) โหมดการรับ.....23
2.8	โครงสร้างปัญหาของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางไดอิเล็กตริกขนาดกึ่งอนันต์.....24
2.9	ระบบโครงข่าย 2 พอร์ต.....25
2.10	โครงสร้างปัญหาของคลื่นสะท้อน.....27
2.11	ผังงานโปรแกรมของการคำนวณย้อนกลับ.....30
3.1	กราฟพื้นผิวของไดโพลคู่ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ.....34
	(ก) 2.25 กิกะเฮิรตซ์.....33
	(ข) 2.45 กิกะเฮิรตซ์.....33
	(ค) 2.65 กิกะเฮิรตซ์.....34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 กราฟพื้นผิวของไดโพลคู่ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อระยะระหว่างไดโพลเปลี่ยนแปลง..37	
(ก) $d = \lambda/16$ .....	36
(ข) $d = \lambda/8$ .....	36
(ค) $d = 3\lambda/16$ .....	37
3.3 กราฟพื้นผิวของไดโพลคู่ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อความหนาของวัสดุเปลี่ยนแปลง...38	
(ก) $ S_{11} $ .....	38
(ข) $ S_{21} $ .....	38
3.4 สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์.....40	
(ก) มิติของสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก.....	40
(ข) สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกที่ติดด้วยตัวคูคซบคลื่น.....	40
3.5 สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้จากการจำลองแบบ.....41	
3.6 สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ .....42	
(ก) ด้านหน้า.....	42
(ข) ด้านหลัง.....	42
3.7 ฟังก์ชันของระบบที่นำเสนอ.....43	
3.8 สายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์และมอดูลของระบบการวัด.....44	
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและแรงดันที่ตรวจวัดได้จากตัวตรวจจับกำลังงาน.....45	
3.10 ฟังก์ชันของการปรับเทียบโดยการต่อผ่าน.....45	
3.11 ฟังก์ชันของการปรับเทียบโดยการเปิด.....46	
3.12 ฟังก์ชันของระบบเครื่องมือที่ได้ปรับเทียบแล้ว.....46	
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและแรงดันที่ตรวจวัดได้จากสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ ได้รับการชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆ.....48	48
4.1 โครงสร้างปัญหาที่คำนวณสนามไฟฟ้าสะท้อนโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด.....50	
(ก) โดเมนเชิงพิกัด.....	50
(ข) โดเมนเชิงความถี่.....	50
4.2 ผลการทำให้เหมาะสมที่สุดของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ในโดเมนเชิงความถี่และ โดเมนเชิงพิกัด เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นค่า $\epsilon'_r = 10.0$ และค่า $\epsilon''_r = 0.1$ .....51	51
(ก) โพลาริซแบบตั้งฉาก.....	51
(ข) โพลาริซแบบขนาน.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	ค่าความผิดพลาดของผลการทำให้เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันสมรรถนะรวม.....52
	(ก) โพลาริซ์แบบตั้งฉาก.....52
	(ข) โพลาริซ์แบบขนาน.....52
4.4	โครงสร้างของระบบการวัดสนามสะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบเพื่อการคำนวณย้อนกลับ โดยการทำให้เหมาะสมที่สุด.....56
4.5	ผังการทดลองของระบบ.....57
4.6	ผังของสัญญาณที่รับได้เข้าเครื่องแปลงผันขาลงที่ต่อกับออสซิลโลสโคป.....57
5.1	การจัดสายอากาศไดโพลแบบมีปลอกเพื่อวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำ.....61
	(ก) รูปแบบการจัดเตรียมอุปกรณ์.....61
	(ข) สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกคู่.....61
5.2	ข้อมูลจากการวัดของน้ำที่วัดลงบนกราฟพื้นผิวในระนาบ $\epsilon_r', \epsilon_r''$ .....62
5.3	การเตรียมการทดลองสายอากาศไดโพลคู่วางอยู่บนข้าวเปลือก.....63
5.4	แผนภาพของอาร์กานด์(Argand diagram)แสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของ ข้าวเปลือก.....65
5.5	แผนภาพของอาร์กานด์แสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ที่ทำการนอร์แมลไลซ์โดย ค่าความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือก.....66
5.6	ความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือกที่ได้จากการคำนวณโดยค่าที่วัดได้โดยเทคนิค ไมโครเวฟเปรียบเทียบกับค่าที่วัดโดยวิธีชั่งน้ำหนักแบบมาตรฐาน.....67
5.7	การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียแทนเจนต์ต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก.....68
5.8	การเปลี่ยนแปลงค่า $\sqrt{\epsilon}$ ต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก.....69
5.9	ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการคำนวณโดยค่าที่วัดได้โดยเทคนิคไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับค่าที่วัดโดยวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐาน.....69
5.10	การเปรียบเทียบผลการทดสอบ โดยเทคนิคที่นำเสนอกับผลการวัดในบทความ [48]..... 70
5.11	การเปรียบเทียบระหว่างค่า $\epsilon_r'$ และ $\epsilon_r''$ ที่วัดได้กับผลการวัดในบทความ [48].....71
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\epsilon_r'$ และ $\epsilon_r''$ กับ $ S $ .....72
	(ก) $ S_{11} $ .....72
	(ข) $ S_{21} $ .....72
5.13	การวัดทดสอบข้าวเปลือกด้วยระบบเครื่องมือที่นำเสนอ.....74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14	ค่า $ S_{11} $ และ $ S_{21} $ ที่วาดลงในกราฟพื้นผิว ซึ่งวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและระบบเครื่องมือที่นำเสนอ.....75
5.15	สายอากาศแพทช์ที่ทำหน้าที่รับและส่ง.....77
5.16	แบบรูปการแผ่คลื่นของค่าแมกนิจูดและเฟสของสายอากาศแพทช์.....78
ผ1	ตัวอย่างข้าวเปลือกในหม้อที่บรรจุสารดูดความชื้นและเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดระดับ 0.0001 กรัม.....117
ผ2	ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เข้าเตาอบลมร้อนเพื่อลดความชื้น.....117
ผ3	เครื่องมือในการวัดอุณหภูมิภายในเตาอบลมร้อน.....118
ผ4	กราฟพื้นผิวเพื่อใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือก.....122

# บทที่ 1

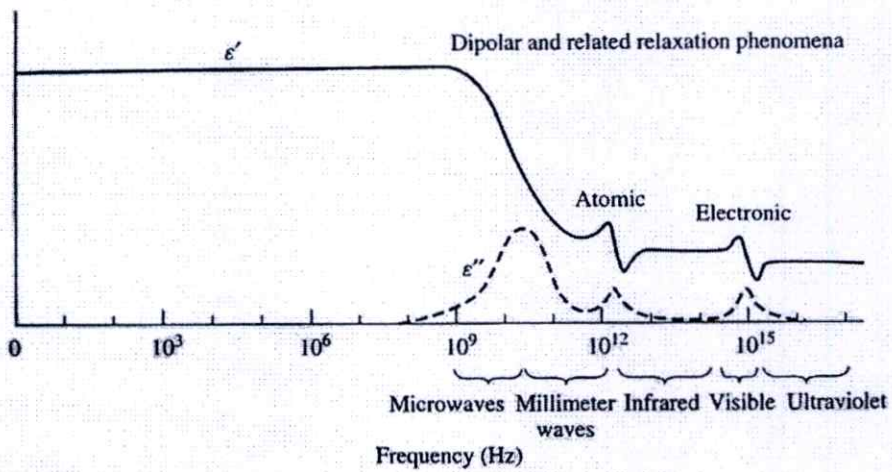
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นแหล่งอาหารของโลก รายได้หลักจากการส่งออกคือผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งในแต่ละปีทำรายได้เป็นจำนวนมาก[1] ปัญหาสำคัญสำหรับการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรคือการควบคุมคุณภาพของผลผลิต นับจากอดีตจนถึงปัจจุบันการควบคุมคุณภาพของผลผลิตอาศัยความชำนาญของเกษตรกรเป็นหลัก ซึ่งทำให้คุณภาพของผลผลิตที่ได้ไม่เป็นมาตรฐานเดียวกันและไม่เหมาะสำหรับการตรวจสอบผลผลิตที่มีจำนวนมากในเวลาจำกัด ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะค้นคว้าหาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายให้สามารถทดสอบผลผลิตได้ในปริมาณมาก อีกทั้งใช้เวลาในการตรวจสอบอันสิ้นราคาไม่แพงและง่ายต่อการใช้งาน จากการสืบค้นพบว่าการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการที่มีมาช้านาน[2] เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยขั้นตอนวิธีการทดสอบที่หลากหลายเทคนิค การใช้คลื่นไมโครเวฟในการทดสอบวัสดุนับเป็นวิธีการทดสอบที่มีประสิทธิภาพ[3],[4] สำหรับเทคนิคการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลผลิตทางการเกษตร โดยคลื่นไมโครเวฟนั้น ได้มีผู้ทำวิจัยอย่างแพร่หลาย[5]-[7] โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับ ความสุก(Maturity) ค่าความชื้น(Moisture content) ความหนาแน่นมวลรวม(Bulk density) เป็นต้น อันเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงประโยชน์ของการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟ ถือว่าเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ตีรูปแบบหนึ่ง และสำหรับวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งถือว่าเป็นสารที่สามารถพบได้มากมายในธรรมชาติและอุตสาหกรรมต่างๆ[8] ลักษณะเฉพาะทางไดอิเล็กตริกของวัสดุ แสดงให้เห็นถึงลักษณะพิเศษทางไฟฟ้าของวัสดุนั้น [9],[10] ดังนั้นลักษณะเฉพาะดังกล่าวจึงมีความสำคัญทั้งในด้านการศึกษาและอุตสาหกรรม การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ความถี่สูง เป็นวิธีที่สามารถพัฒนาเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุโดยทางอ้อมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ นับเวลาหลายสิบปีมาแล้วที่มีการศึกษามุ่งเน้นในเรื่องการหาความชื้นในวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆและวัสดุอื่นๆจากการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ[11]-[13]

#### 1.1.1 กลไกของไดอิเล็กตริก

วัสดุทุกประเภทมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกหรือค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) และความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของวัสดุนั้น ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแตกต่างของวัสดุประเภทต่างๆ โดยกำหนดค่าให้สัมพันธ์กับค่าที่คำนวณได้ในกรณีของสุญญากาศ[2] โดย  $\epsilon_0$  มีค่า  $8.854 \text{ pFm}^{-1}$  และ  $\mu_0$  มีค่า  $1.26 \text{ }\mu\text{Hm}^{-1}$  เมื่อพิจารณากรณีที่วัสดุไม่มี



รูปที่ 1.1 ผลตอบสนองของกลไกของไดอิเล็กตริกต่อความถี่ [4]

องค์ประกอบทางแม่เหล็ก ซึ่งจะตอบสนองเฉพาะสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  ของวัสดุมีค่าเท่ากับ  $\epsilon_{abs} / \epsilon_0$  โดย  $\epsilon_{abs}$  คือค่าสภาพยอมไฟฟ้าสมบูรณ์ของวัสดุ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เป็นค่าเชิงซ้อนคือ  $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$  โดยส่วนจริง  $\epsilon'_r$  หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุที่จะเก็บสะสมพลังงานของสนามไฟฟ้า และส่วนจินตภาพ  $\epsilon''_r$  หรือตัวคูณสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุที่จะแปลงพลังงานของสนามไฟฟ้าออกไปอยู่ในรูปของความร้อน

ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเป็นค่าที่แปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัว ส่วนผสม ความดันและ โครงสร้าง โมเลกุลของวัสดุ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าเวลาการผ่อนคลาย (Relaxation time) ก็จะลดลง และค่ายอด (Peak) ตัวคูณสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้นวัสดุสามารถเกิดกลไกของไดอิเล็กตริกหรืออิทธิพลของการโพลาไรซ์ (Polarization effects) ได้หลายรูปแบบโดยแปรผันตามความถี่ดังรูปที่ 1.1 วัสดุที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงของประจุไฟฟ้าบวกและลบภายในแยกห่างกันไปในทิศทางของสนามไฟฟ้านั้น ปฏิกริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุที่มีความชื้นจะมีอิทธิพลต่อน้ำเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากเป็นสารมีขั้ว[14] น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วที่มีลักษณะเป็นไดโพลทางไฟฟ้าและพยายามปรับตัวตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ไดโพลโมเลกุลของน้ำที่มีการเคঁงกลับนี้ไม่สามารถรักษาสภาพอยู่ได้ เป็นผลให้เกิดความล่าช้า (Lag) ของการโพลาไรซ์เวกเตอร์สนามไฟฟ้าขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์จึงเป็นค่าเชิงซ้อน ปฏิกริยาจากความนำไอออน (Ionic conduction) และปรากฏการณ์การผ่อนคลายจะมีอิทธิพลมากกว่าเมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่ำกว่าไมโครเวฟ กลไกของไดอิเล็กตริกจะมีความถี่ตัด (Cutoff frequency) ที่เป็นลักษณะเฉพาะ โดยเมื่อความถี่สูงขึ้น ค่าของ  $\epsilon'_r$  ก็จะลดลง ค่า

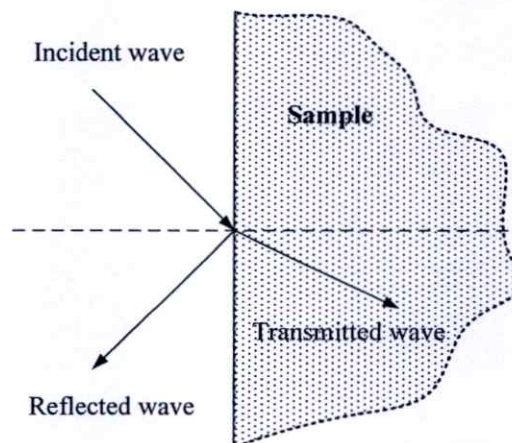
ของ  $\epsilon_r$ ” ก็จะสูงเป็นยอดเด่นขึ้นมา ณ ความถี่วิกฤต (Critical frequency) หนึ่งๆ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าขนาดและมีความถี่ตัดเฉพาะที่ต่างกัน [14]

### 1.1.2 เทคนิคการวัดโดยไม่โครเวฟ

การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเป็นหัวข้อสำคัญสำหรับการทดสอบโดยไม่โครเวฟ ดังนั้นเทคนิคต่างๆสำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ความถี่ไมโครเวฟได้รับการพัฒนาขึ้นอีกมากมาย ซึ่งมี 2 ประเภทหลักๆคือ วิธีแบบไม่เรโซแนนซ์ (Nonresonant methods) และวิธีแบบเรโซแนนซ์ (Resonant methods) โดยวิธีแบบไม่เรโซแนนซ์จะเป็นวิธีที่ใช้วัดค่าของคุณสมบัติของวัสดุในช่วงแถบความถี่ ในขณะที่วิธีแบบเรโซแนนซ์เป็นวิธีวัดค่าของคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแม่นยำที่ความถี่เดียวหรือหลายความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Several discrete frequencies) และการทดสอบรวมกันทั้งสองวิธีจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความแม่นยำสูงขึ้น

#### 1.1.2.1 วิธีแบบไม่เรโซแนนซ์

การทดสอบด้วยวิธีนี้ จะคำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุจากค่าอิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นในวัสดุ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่จากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง(จากอากาศเข้าสู่วัสดุ) ดังรูปที่ 1.2 ทั้งอิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนเกิดการสะท้อนและส่งผ่านที่บริเวณรอยต่อของสองตัวกลางนั้น การวัดค่าการสะท้อนและส่งผ่านบริเวณรอยต่อของตัวกลาง เป็นข้อมูลที่สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมไฟฟ้าและความซึมซาบได้ระหว่างสองตัวกลางนั้นได้ วิธีแบบไม่เรโซแนนซ์ต้องใช้เครื่องมือในการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่วัสดุที่ต้องการทดสอบโดยตรง แล้วเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวัดคลื่นที่สะท้อนและส่งผ่านจากวัสดุ เพื่อนำไปหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อไป วิธีการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ วิธีการสะท้อน (Reflection methods) และวิธีการส่งผ่าน/สะท้อน (Transmission/reflection methods)



รูปที่ 1.2 เงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบวัสดุโดยวิธีแบบไม่เรโซแนนซ์ [4]

สำหรับวิธีการสะท้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกนำเข้าไปสู่วัสดุที่ต้องการทดสอบโดยตรง ค่าคุณสมบัติของวัสดุจะคำนวณจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ระนาบอ้างอิงที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปวิธีการสะท้อนจะสามารถวัดได้เพียงพารามิเตอร์เดียว ไม่ว่าจะเป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าหรือความซึมซาบได้ วิธีการสะท้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ วิธีการสะท้อนแบบเปิดวงจร (Open-reflection method) และวิธีการสะท้อนแบบลัดวงจร (Shorted reflection method) สำหรับวิธีการสะท้อนแบบเปิดวงจรในทางปฏิบัติ ตัวนำด้านนอก ที่ปลายเปิดของสายส่งจะถูกสร้างให้เป็นปึกหน้าสัมผัส (Flange) [15],[16] วิธีการนี้มีสมมติฐานที่ว่าวัสดุที่ทำการทดสอบไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Nonmagnetic) และปฏิกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสโพรบ (Probe) ไม่มีผลต่อการวัดค่าที่ต้องการ ดังนั้นวัสดุที่ทำการทดสอบต้องมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องปลายเปิดของโพรบ และวัสดุที่ต้องการทดสอบควรมีค่าการสูญเสียที่มากพอ เทคนิคนี้มีขั้นตอนในการทดสอบที่ง่ายและรวดเร็ว แต่เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณและวิเคราะห์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อน ดังนั้นผลงานในการวิเคราะห์ที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จึงต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง และสำหรับวิธีการสะท้อนแบบลัดวงจร วัสดุที่ต้องการทดสอบมักจะมีขนาดทางไฟฟ้าที่สั้น (Electrically short) ซึ่งส่วนใหญ่วิธีการวัดแบบนี้จะใช้วัดความซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic permeability) [17],[18] และสมมติว่าค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุที่ทดสอบไม่เปลี่ยนแปลง

สำหรับวิธีการส่งผ่าน/สะท้อน วัสดุที่ต้องการทดสอบจะถูกสอดเข้าไปในสายนำสัญญาณ (Transmission line) โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุคำนวณจากค่าการสะท้อนและส่งผ่านจากวัสดุนั้น สำหรับวิธีการวัดแบบท่อนำคลื่น (Waveguide measurements) ต้องจัดเตรียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดพอดีกับท่อนำคลื่น ซึ่งจะมีทั้งท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide) และท่อนำคลื่นแบบแกนร่วม (Coaxial waveguide) การจัดเตรียมวัสดุตัวอย่างที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมนั้นง่ายกว่าแบบแกนร่วม อย่างไรก็ตามทั้งสองแบบสามารถทดสอบได้กับช่วงความถี่ที่จำกัด ท่อนำคลื่นแบบแกนร่วมสามารถวัดในช่วงความถี่ที่กว้างกว่า แต่การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบจะยากกว่า เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ใช้สำหรับวัดสัญญาณที่สะท้อนและส่งผ่านจากวัสดุ แล้วนำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าและความซึมซาบของวัสดุดังกล่าวนี้ได้ ความผิดพลาดจากการทดสอบด้วยวิธีนี้เกิดจากการเติมตัวอย่างในท่อนำคลื่นที่จะทดสอบไม่เต็ม และยังมีข้อด้อยที่การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบใช้เวลานานและเป็นแบบทำลาย วัสดุบางอย่างจึงไม่เหมาะกับการทดสอบแบบท่อนำคลื่นเช่นวัสดุที่ประกอบด้วยเส้นใยขนาดยาว การวัดที่ความถี่สูงจะมีความยุ่งยากอย่างยิ่ง เนื่องจากขนาดของท่อนำคลื่นจะเล็กลง ซึ่งเทคนิคอวกาศว่างสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้

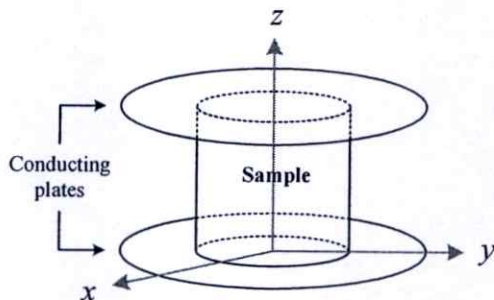
การวัดแบบอวกาศว่าง (Free space measurements) จะมีประโยชน์โดยเฉพาะสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลาย ได้มีการนำเสนอผลงานการวัดค่าของการสะท้อนและส่งผ่านจากวัสดุทดสอบของคลื่นไมโครเวฟแบบอวกาศว่างมาเป็นเวลาหลายปีแล้ว [19]-[23] สายอากาศปากแตรคู่

สามารถใช้ได้กับช่วงความถี่ที่กว้าง ทำให้ลดจำนวนครั้งของการวัดที่ความถี่ต่างๆลงได้ การใช้เลนส์ที่ทำจากวัสดุไดอิเล็กตริกช่วยโฟกัสลำคลื่นให้เป็นจุดเล็กๆหรือลำแคบๆ สามารถแก้ไขความผิดพลาดจากการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบวัสดุที่ทดสอบได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ต้องการอุปกรณ์และเครื่องมือที่พิเศษ การวัดค่าหลายๆตำแหน่งในพื้นที่ขนาดกว้างแล้วไปหาค่าเฉลี่ยจะทำให้ค่าของการวัดมีความแม่นยำดีขึ้น ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่มีขนาดใหญ่ หรือมีช่วงความถี่ในการทดสอบที่กว้าง ซึ่งการวัดแบบท่อนำคลื่นทำไม่ได้

### 1.1.2.2 วิธีแบบเรโซแนนซ์

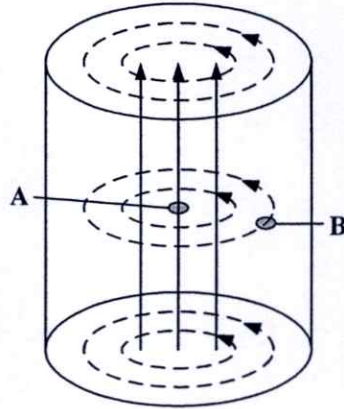
การทดสอบด้วยวิธีแบบเรโซแนนซ์จะมีความแม่นยำสูงกว่าวิธีแบบไม่เรโซแนนซ์และส่วนใหญ่เหมาะกับการทดสอบกับวัสดุที่มีความสูญเสียต่ำ (Low loss) วิธีนี้ประกอบด้วย วิธีเรโซเนเตอร์ (Resonator method) และวิธีการก่อกวนเรโซแนนซ์ (Resonant-perturbation method)

สำหรับวิธีเรโซเนเตอร์ มักถูกเรียกว่าวิธีเรโซเนเตอร์ไดอิเล็กตริก (Dielectric resonator method) วัสดุที่ทดสอบจะประพฤติตัวเป็นเรโซเนเตอร์ในวงจรทดสอบดังตัวอย่างในรูปที่ 1.3 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) จะนำไปคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียของวัสดุที่ทดสอบนั้น [24]-[28]



รูปที่ 1.3 แผ่นจานตัวนำประกบด้านบนและล่างของแท่งไดอิเล็กตริกทรงกระบอก [4]

สำหรับวิธีการทดสอบนี้มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการก่อกวนเรโซแนนซ์ สำหรับเรโซเนเตอร์ที่มีขอบเขตแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic boundaries) ที่กำหนดขึ้น เมื่อใส่วัสดุที่ต้องการทดสอบเข้าไป ทำให้มีบางส่วนของเงื่อนไขขอบเขตแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลให้ความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพเปลี่ยนแปลงไป จากค่าการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้ ในรูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างของโพรงทรงกระบอก (Cylindrical cavity :  $TM_{010}$  mode) สำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ซึ่งตำแหน่ง A ใช้สำหรับวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าและตำแหน่ง B ใช้สำหรับวัดค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ [29],[30]



รูปที่ 1.4 โพรงทรงกระบอก ( $TM_{010}$  mode) สำหรับวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ [4]

ธรรมชาติของวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จะมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบนั้น ณ ความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการพัฒนาวิธีการวัดแบบทางอ้อม โดยไม่ทำลาย ซึ่งดีกว่าวิธีอื่นๆ [31] สามารถวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกได้อย่างแม่นยำ แต่จะต้องหาเอกลักษณ์ของความสัมพันธ์ที่แน่นอนกับคุณสมบัติภายในที่กำหนดขึ้น ซึ่งสามารถทำได้จากการสังเกตหรือทฤษฎี แม้ว่าน้ำจะมีอิทธิพลต่อวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบในการทดสอบโดยไมโครเวฟมีข้อจำกัด 2 ประการ ในการนิยามความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและความชื้นซึ่งมีผลต่อการใช้เทคนิคนี้อย่างกว้างขวาง ประการแรกคือความหนาแน่นมวลรวมเปลี่ยนแปลงตามขนาดของวัสดุทดสอบที่เป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ที่สัมพันธ์กับความชื้น ประการที่สองคือต้องหาสมการปรับเทียบความชื้นของวัสดุแต่ละชนิด ข้อจำกัดทั้งคู่นี้ทำให้การออกแบบ ราคา และการบำรุงรักษาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น [32]

ในปัจจุบันนี้ วิธีดำเนินการวัดค่าของสภาพยอมไฟฟ้าสำหรับการหาความชื้นในวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆซึ่งเป็นอิสระต่อความหนาแน่นมวลรวมได้ถูกนำเสนอและพัฒนาขึ้น หลักการต่างๆไปแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุและการดูดซับพลังงานจากความถี่วิทยุและสนามไฟฟ้า มีการนำเสนอวิธีการและเทคนิคการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลผลิตทางการเกษตรได้และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของธัญพืช เมล็ด ผลไม้และพืชผัก [33]-[40] ซึ่งสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้สำหรับการเลือกให้ความร้อนกำจัดแมลงในธัญพืช ตรวจสอบความสุกและคุณภาพของผลไม้และพืชผักสด มีการอธิบายหลักการของการใช้ไมโครเวฟโดยเทคนิคช่องอากาศว่าง โดยการวัดค่าการลดทอน (Attenuation) และมุมเฟส (Phase) ของสัญญาณที่เปลี่ยนไปในการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับตรวจวัดความชื้นในธัญพืช และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆและเป็นผกกับค่าความหนาแน่นมวลรวม และ

ปัจจัยอื่นๆ อันได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสถานที่ทดลอง ความไม่สม่ำเสมอของความชื้น ความถี่ที่ทดสอบเป็นต้น ที่มีผลต่อความถูกต้องจากการทดลอง วิธีการนี้สามารถหาความชื้นในวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ สำหรับ โครงสร้างและองค์ประกอบที่ต่างกันได้จากสมการการเปรียบเทียบความชื้นสมการเดียว โดยเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งแก้ไขข้อจำกัดทั้งสองที่กล่าวได้ [41]-[53]

ความชื้นของวัสดุพืชเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของน้ำ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่เก็บรักษาข้าว นั้นมีผลต่อการปรับตัวของแมลงมากมาย ซึ่งแมลงเหล่านี้ต้องได้รับการดูแลเพื่อควบคุมคุณภาพของข้าว [38]-[40] เม็ดข้าวควรได้รับการดูแลให้มีความชื้นที่ต่ำระดับ 10% และสูงได้ไม่เกิน 14% เพื่อลดแมลงรบกวน กรณีที่ความชื้นสูง ปัญหาเรื่องเชื้อราเป็นสิ่งสำคัญที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเก็บรักษาข้าวโดยทั่วไปจะเก็บที่ความชื้นประมาณ 14% [54]-[56] งานวิจัยใน [57] แสดงวิธีการหาค่าความชื้นของวัสดุพืชได้อย่างแม่นยำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และมุมเฟสของระบบแผ่นขนาน (Parallel plates) เนื่องจากเป็นระบบปิดทำให้เป็นข้อจำกัดของการเฝ้าตรวจแบบไม่รบกวนการใช้งาน (On-line monitoring) งานวิจัยใน [58] แสดงเทคนิคการวัดค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) โดยโพรบแกนร่วมปลายเปิด (Open-ended coaxial probe) และใช้อัลกอริทึมของการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ในการคำนวณเพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนและความชื้นของผลปาล์มที่ระดับความสูงต่างๆ ผลการทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพของการวัดและคำนวณ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะเกิดความผิดพลาดของผลการทดสอบได้หากนำไปวัดกับวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ อีกทั้งระบบการวัดยังต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและระบบประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูง เทคนิคการวัดแบบอวกาศว่างนับว่าเป็นอีกเทคนิคหนึ่งสำหรับการหา  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  ซึ่งจะวัดคลื่นที่สะท้อนและส่งผ่าน [59] ข้อดีของเทคนิคนี้คือ สามารถวัดค่าของวัตถุที่อยู่ในเส้นทางการแผ่คลื่น วิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เป็นซีเมนต์ที่แปรผันตามจำนวนวัน [60] โดยการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  จากจุดตัดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านที่วัดได้ แม้ว่าจะมีข้อดีคือเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ต้องการการคำนวณที่ซับซ้อนทุกครั้ง ข้อด้อยคือวัสดุที่ทำการวัดต้องมีขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple reflection) และคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบของวัสดุ ซึ่งเงื่อนไขในการวัดด้วยวิธีนี้คือต้องเป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นจึงต้องมีพื้นที่ขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับระบบการวัด และไม่เหมาะกับวัสดุพืชที่บรรจุอยู่ในภาชนะ ซึ่งการวัดแบบสัมผัสจะเหมาะสมกว่า

จากการสืบค้นพบว่า ได้มีการพัฒนาเทคนิคการวัดจากทฤษฎีการเชื่อมต่อการร่วม (Mutual coupling) ของสายอากาศ [61],[62] เพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของวัสดุ โดยการวัดค่าสมบรูณ์ของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดโพลสองตัว ซึ่งถูกวางลอยเหนือวัสดุที่จะวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวกลางเนื้อเดียว [63] และตัวกลางต่างชนิดกัน [64] ในการประยุกต์ใช้ในเรดาร์

ซอนพื้นดิน (Ground penetrating radar) เทคนิคดังกล่าวทำได้โดยวัดค่าแอมพลิจูดของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะต้องมีกราฟของการเปรียบเทียบของอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่อยู่เหนือทรายที่ทดสอบและอยู่เหนือแผ่นโลหะ แม้ว่างานใน [64] จะสามารถหาข้อมูลของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนได้ งานใน [63] ก็สามารถหาเพียงส่วนจริงของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนได้ อย่างไรก็ตามการวัดค่าสมบรูณ์ของอิมพีแดนซ์ยังจำเป็นต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่มีราคาแพง

บทความใน [65] ได้นำเสนอระบบการวัดการสะท้อนแบบช่องอากาศสว่าง ซึ่งทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง  $X$  ( $X$  band) การคำนวณหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุอาศัยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ โดยมีพื้นฐานจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear least square method) ข้อจำกัดของระบบดังกล่าวคือ ต้องใช้เครื่องมือที่แพงในการทดสอบที่ความถี่กว้าง วิธีการวัดในลักษณะดังกล่าวมีความน่าสนใจที่สามารถพัฒนาต่อไปเป็นระบบการวัดวัสดุในระบบสายพานลำเลียง โดยมีส่วนประมวลผลในการคำนวณค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบนั้น โดยการวัดการสะท้อนของคลื่นจากวัสดุในหลายๆ ตำแหน่ง (Spatial domain) เพื่อนำไปคำนวณย้อนกลับหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้น สำหรับเทคนิคการคำนวณย้อนกลับนั้นเป็นขั้นตอนในการใช้อัลกอริทึมของการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งนับว่าเป็นวิธีเชิงเลข (Numerical method) ที่มีประสิทธิภาพ [66] การหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทำได้โดยการปรับค่าของตัวแปรในฟังก์ชันที่ประมาณค่า (Approximated function) เทียบกับผลที่ได้จากการวัดให้มีค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด โดยเทคนิคของการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization technique) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ อัลกอริทึมที่สืบทอดมา (Traditional algorithm) และ อัลกอริทึมที่ไม่ได้สืบทอดมา (Nontraditional algorithm) สำหรับอัลกอริทึมที่สืบทอดมามีกระบวนการในการคำนวณที่มีอัตราการลู่เข้าหาค่าคำตอบที่รวดเร็ว แต่มีข้อด้อยคือเหมาะกับการใช้เฉพาะงาน ซึ่งค่าคำตอบที่ได้อาจเป็นคำตอบของการทำให้เหมาะสมที่สุดท้องถิ่น (Local optimization solution) ตัวอย่างของวิธีการคำนวณนี้คือ Cauchy's method, Newton's method, Marquardt's Method, DFP method เป็นต้น สำหรับอัลกอริทึมที่ไม่ได้สืบทอดมามีกระบวนการคำนวณที่มีประสิทธิภาพในค่าคำตอบที่เป็นคำตอบของการทำให้เหมาะสมที่สุดถ้วนทั่ว (Global optimization solution) แต่มีข้อด้อยคือมีกระบวนการในการคำนวณที่มีอัตราการลู่เข้าหาค่าคำตอบที่ช้ากว่า ตัวอย่างของวิธีการคำนวณนี้คือ Genetics algorithm, Simulate annealing เป็นต้น ดังนั้นการเลือกใช้งานอัลกอริทึมเพื่อการคำนวณ โดยเทคนิคของการทำให้เหมาะสมที่สุด จึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเงื่อนไขต่างๆ เช่น เวลาของการคำนวณ ความซับซ้อนของปัญหา ทรัพยากรทางด้านคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งผู้ใช้ต้องเป็นผู้พิจารณาปัจจัยต่างๆ เพื่อให้การคำนวณบรรลุวัตถุประสงค์ในเงื่อนไขที่ดีที่สุดต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

ในระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง [67] ซึ่งได้แก่การอบข้าวเปลือก การทดสอบหาความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแบบเวลาจริง (Real time) เพื่อทำงานในลักษณะการควบคุมย้อนกลับ (Feedback control) เป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้ระบบมีการทำงานแบบครบวงจร ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอระบบการวัดใน 2 รูปแบบ คือระบบที่ใช้หลักการวัดแมกนิจูดของสัญญาณที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นระบบแบบสัมผัส ที่นำไปใช้หาค่าความชื้นของข้าวเปลือกในระบบ Fluidized-bed [68] โดยการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  จากสายอากาศไดโพลสองตัวที่ติดตั้งโดยการวางแปะไว้บนข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ในภาชนะไดอิเล็กตริก และวาดกราฟพื้นผิวระหว่าง  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  ก็จะสามารถหาค่าของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ได้ แล้วนำไปคำนวณค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากสมการการปรับเทียบความชื้นที่สร้างขึ้นจากข้อมูลทางสถิติของการวัดทดสอบและได้แสดงข้อมูลของผลการทดลองให้เห็นถึงความถูกต้องของการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการมาตรฐาน [69] และอีกระบบหนึ่งที่ใช้หลักการวัดสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแล้วนำมาคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นระบบแบบไม่ต้องสัมผัส โดยได้ทำการทดลองกับผนังปูนซีเมนต์เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของหลักการที่นำเสนอ และพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ทดสอบวัสดุบนสายพานลำเลียงได้ โดยคาดว่าเทคนิคและเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ จะสามารถแก้ไขปัญหาด้านการขาดแคลนอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี

## 1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับขอบเขตของการศึกษาวิจัยได้แบ่งเนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและภูมิหลังของการศึกษาวิจัยเทคนิคการวัดทดสอบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ขอบเขตของการศึกษาวิจัย และท้ายบทได้กล่าวถึงส่วนประกอบของเนื้อหาต่างๆที่รวมเป็นวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของการเชื่อมต่อกันของสายอากาศและเทคนิคการคำนวณย้อนกลับศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลของการเชื่อมต่อกัน เงื่อนไขของการปรับเปลี่ยนตัวแปรของการเชื่อมต่อกันของสายอากาศเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย และเทคนิคการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด

บทที่ 3 กล่าวถึงการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบจากค่าการวัดแมกนิจูดของการเชื่อมต่อกันของสายอากาศ 2 ตัว การออกแบบระบบของการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบ โดยวิธีดังกล่าว เพื่อพัฒนาเป็นระบบที่ใช้ทดสอบที่มีราคาถูกและมีความแม่นยำ

แสดงผลการจำลองแบบและการคำนวณของระบบในเงื่อนไขต่างๆเพื่อหาพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงระบบและการออกแบบของการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบจากการคำนวณย้อนกลับ โดยการทำให้เหมาะสมที่สุดของค่าสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากวัสดุที่ทดสอบ และกล่าวถึงรายละเอียดในการเตรียมการทดสอบของระบบ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยวิธีการที่วัดเมกนิจูดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ 2 ตัวจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเปรียบเทียบกับระบบที่นำเสนอ โดยทำการทดสอบกับข้าวเปลือกที่มีความชื้นระดับต่างๆ เมื่ออาศัยสมการการปรับเทียบความชื้น จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกับความชื้นและสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบได้ อีกกรณีหนึ่ง ได้แสดงผลการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบที่วัดสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากวัสดุที่ทดสอบ ซึ่งก็คือผนังปูนซีเมนต์ แล้วคำนวณย้อนกลับเป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยการนำเสนอผลการเปรียบเทียบของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีดังกล่าวกับผลการวัดโดยโพรบไดอิเล็กตริก และข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเพื่อประเมินความถูกต้องของเทคนิควิธีที่นำเสนอต่อไป

บทที่ 6 วิจัยและสรุป โดยกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยนี้ทั้งในเชิงทฤษฎีและทางปฏิบัติ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อประกอบเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาระบบให้เหมาะสมกับการทดสอบต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

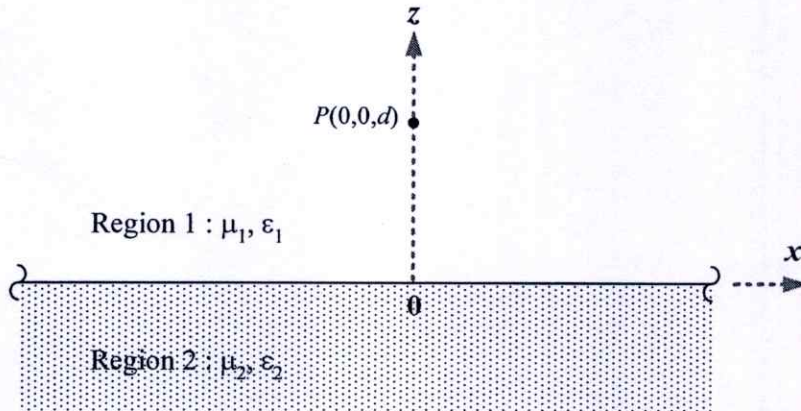
# การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศและเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ

### 2.1 บทนำ

ปฏิกริยาระหว่างวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) [62] ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการตอบสนองของวัสดุต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเงื่อนไขต่างๆ ได้ จากหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ไปสู่เทคนิควิธีการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อจำแนกวัสดุได้ เทคนิคการวัดแบบอวกาศสว่างมีประโยชน์โดยเฉพาะสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียดดังนี้

### 2.2 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศเหนือตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย

#### 2.2.1 สนามไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งกำเนิดแบบจุดในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างปัญหาของแหล่งกำเนิดแบบจุดในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย

พิจารณาแหล่งกำเนิดแบบจุด(Point source) ซึ่งอยู่ในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 1 ( $\mu_1, \epsilon_1$ ) ขนาดอนันต์ ซึ่งอยู่ห่างจากขอบเขตรอยต่อของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 2 ( $\mu_2, \epsilon_2$ ) ขนาดอนันต์เป็นระยะทาง  $d$  ดังรูปที่ 2.1 โดยแหล่งกำเนิดแบบจุดดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ [70] ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E}^i = -j\omega\mu_1 \vec{H}^i \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}^i = j\omega\epsilon_1 \vec{E}^i + \vec{J} \quad (2.2)$$

โดย  $\bar{E}^i$  และ  $\bar{H}^i$  คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่  $i$  ( $i = 1, 2$ ) และ  $\bar{J}$  คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแบบจุดไม่ได้เป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นจึงใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม (Spectral domain) เพื่อแปลงรูปแบบของสมการคลื่นนี้ให้เป็นคลื่นระนาบ โดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบสองมิติ (2 dimensional Fourier transformation) [71] ดังนี้

$$\bar{V}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{V}(\xi, \eta, z) e^{j(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta \quad (2.3)$$

โดย  $\bar{V} = \bar{E} \cdot \bar{B}$  หรือ  $\bar{J}$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตรอยต่อของ 2 ตัวกลาง ( $z = 0$ ) จะได้

$$E_t^1(x, y, 0) = E_t^2(x, y, 0) ; \quad t = x \text{ หรือ } y \quad (2.4)$$

$$H_t^1(x, y, 0) = H_t^2(x, y, 0) ; \quad t = x \text{ หรือ } y \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_1 E_z^1(x, y, 0) = \varepsilon_2 E_z^2(x, y, 0) \quad (2.6)$$

$$\mu_1 H_z^1(x, y, 0) = \mu_2 H_z^2(x, y, 0) \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดแบบจุดจะมีรูปแบบการเรียงตัวของสนามใน 3 มิติดังนี้  
กรณีที่ 1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีทิศทาง  $z$  เท่านั้น นั่นคือ  $\bar{J} = \hat{z} J_z$  โดยที่

$$J_z = \delta(x)\delta(y)\delta(z-d) \quad (2.8)$$

โดย  $\delta(x)$   $\delta(y)$  และ  $\delta(z-d)$  คือฟังก์ชันไดเรกเดลต้า (Dirac delta function) ซึ่งในที่นี้หมายถึงแหล่งกำเนิดแบบจุดที่อยู่เหนือจุดกำเนิด (Origin) เป็นระยะ  $d$  ในแนวแกน  $z$  จากการแปลงระบบพิกัดตั้งฉาก (Rectangular coordinate) ไปเป็นพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate) ดังนี้

$$x = \rho \cos \phi \quad (2.9ก)$$

$$y = \rho \sin \phi \quad (2.9ข)$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad (2.9ก)$$

$$\xi = \lambda \cos \phi' \quad (2.10ก)$$

$$\eta = \lambda \sin \phi' \quad (2.10ข)$$

$$\lambda^2 = \xi^2 + \eta^2 \quad (2.10ค)$$

$$d\xi d\eta = \lambda d\phi' d\lambda \quad (2.11)$$

$$\xi x + \eta y = \lambda \rho \cos(\phi - \phi') \quad (2.12)$$

โดยการพิจารณาสมการที่ (2.1) ถึง (2.8) ร่วมกับการแปลงระบบพิกัดดังกล่าว จะสามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 1 ( $z \geq 0$ ) ได้ดังนี้ [70]

$$E_\rho^1(\rho, z) = C_1 \int_0^\infty \left( \pm e^{-\gamma_1|z-d|} + R_1 e^{-\gamma_1(z-d)} \right) J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (2.13)$$

$$E_z^1(\rho, z) = C_1 \int_0^\infty \left( \frac{e^{-\gamma_1|z-d|}}{\gamma_1} + \frac{R_1 e^{-\gamma_1(z-d)}}{\gamma_1} \right) J_0(\lambda \rho) \lambda^3 d\lambda \quad (2.14)$$

$$H_\phi^1(\rho, z) = \frac{1}{4\pi} C_1 \int_0^\infty \left( \frac{e^{-\gamma_1|z-d|}}{\gamma_1} + \frac{R_1 e^{-\gamma_1(z-d)}}{\gamma_1} \right) J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (2.15)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 2 ( $z < 0$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$E_\rho^2(\rho, z) = C_2 \int_0^\infty \frac{\gamma_2 e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z}}{N_2} J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (2.16)$$

$$E_z^2(\rho, z) = -C_2 \int_0^\infty \frac{e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z}}{N_2} J_0(\lambda \rho) \lambda^3 d\lambda \quad (2.17)$$

$$H_\phi^2(\rho, z) = \frac{k_2^2}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z}}{N_2} J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (2.18)$$

กรณีที่ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีทิศทาง  $x$  เท่านั้น นั่นคือ  $\bar{J} = \hat{x}J_x$  โดยที่

$$J_x = \delta(x)\delta(y)\delta(z-d) \quad (2.19)$$

โดยการพิจารณาสมการที่ (2.1) ถึง (2.7) และ (2.19) ร่วมกับการแปลงระบบพิกัดตั้งสมการที่ (2.9) ถึง (2.12) จะสามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 1 ( $z \geq 0$ ) ได้ดังนี้

$$E_\rho^1(\rho, z) = C_1 \cos \phi (I_1 - I_2) \quad (2.20)$$

$$E_\phi^1(\rho, z) = C_1 \sin \phi (-I_3 + I_4) \quad (2.21)$$

$$E_z^1(\rho, z) = C_1 \cos \phi I_5 \quad (2.22)$$

$$H_\rho^1(\rho, z) = -\frac{\sin \phi}{4\pi} (\pm I_6 + I_7) \quad (2.23)$$

$$H_\phi^1(\rho, z) = -\frac{\cos \phi}{4\pi} (\pm I_6 + I_8) \quad (2.24)$$

$$H_z^1(\rho, z) = \frac{\sin \phi}{4\pi} (I_9 - I_{10}) \quad (2.25)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 2 ( $z < 0$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$E_\rho^2(\rho, z) = -\frac{C_2}{2} \cos \phi \int_0^\infty \left( \frac{1}{M_1} S_{02}(\lambda \rho) - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{N_2} D_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.26)$$

$$E_\phi^2(\rho, z) = \frac{C_2}{2} \sin \phi \int_0^\infty \left( \frac{1}{M_1} D_{02}(\lambda \rho) - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{N_2} S_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.27)$$

$$E_z^2(\rho, z) = C_2 \cos \phi \int_0^\infty \frac{\gamma_1 J_1(\lambda \rho)}{N_2} e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda^2 d\lambda \quad (2.28)$$

$$H_\rho^2(\rho, z) = \frac{\sin \phi}{4\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_2}{M_1} D_{02}(\lambda \rho) - \frac{k_2^2 \gamma_1}{N_2} S_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.29)$$

$$H_\phi^2(\rho, z) = \frac{\cos \phi}{4\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_2}{M_1} S_{02}(\lambda \rho) - \frac{k_2^2 \gamma_1}{N_2} D_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.30)$$

$$H_z^2(\rho, z) = \frac{\sin \phi}{2\pi} \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda \rho)}{M_1} e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda^2 d\lambda \quad (2.31)$$

กรณีที่ 3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีทิศทาง  $y$  เท่านั้น นั่นคือ  $\bar{J} = \hat{y}J_y$  โดยที่

$$J_y = \delta(x)\delta(y)\delta(z-d) \quad (2.32)$$

โดยการพิจารณาสมการที่ (2.1) ถึง (2.7) และ (2.32) ร่วมกับการแปลงระบบพิกัดตั้งสมการที่ (2.9) ถึง (2.12) จะสามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 1 ( $z \geq 0$ ) ได้ดังนี้

$$E_\rho^1(\rho, z) = C_1 \sin \phi (I_1 - I_2) \quad (2.33)$$

$$E_\phi^1(\rho, z) = -C_1 \cos \phi (-I_3 + I_4) \quad (2.34)$$

$$E_z^1(\rho, z) = C_1 \sin \phi I_5 \quad (2.35)$$

$$H_\rho^1(\rho, z) = \frac{\cos \phi}{4\pi} (\pm I_6 + I_7) \quad (2.36)$$

$$H_\phi^1(\rho, z) = -\frac{\sin \phi}{4\pi} (\pm I_6 + I_8) \quad (2.37)$$

$$H_z^1(\rho, z) = -\frac{\cos \phi}{4\pi} (I_9 - I_{10}) \quad (2.38)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ 2 ( $z < 0$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$E_\rho^2(\rho, z) = -\frac{C_2}{2} \sin \phi \int_0^\infty \left( \frac{1}{M_1} S_{02}(\lambda \rho) - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{N_2} D_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.39)$$

$$E_\phi^2(\rho, z) = -\frac{C_2}{2} \cos \phi \int_0^\infty \left( \frac{1}{M_1} D_{02}(\lambda \rho) - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{N_2} S_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.40)$$

$$E_z^2(\rho, z) = C_2 \sin \phi \int_0^\infty \frac{\gamma_1 J_1(\lambda \rho)}{N_2} e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda^2 d\lambda \quad (2.41)$$

$$H_\rho^2(\rho, z) = -\frac{\cos \phi}{4\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_2}{M_1} D_{02}(\lambda \rho) - \frac{k_2^2 \gamma_1}{N_2} S_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.42)$$

$$H_\phi^2(\rho, z) = \frac{\sin \phi}{4\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_2}{M_1} S_{02}(\lambda \rho) - \frac{k_2^2 \gamma_1}{N_2} D_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda d\lambda \quad (2.43)$$

$$H_z^2(\rho, z) = -\frac{\cos \phi}{2\pi} \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda \rho)}{M_1} e^{-\gamma_1 d + \gamma_2 z} \lambda^2 d\lambda \quad (2.44)$$

โดยที่  $I_1$  ถึง  $I_{10}$  ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$I_1 = \int_0^\infty \left( k_1^2 J_0(\lambda \rho) - \frac{\lambda^2}{2} D_{02}(\lambda \rho) \right) \frac{e^{-\gamma_1 |z-d|}}{\gamma_1} \lambda d\lambda \quad (2.45)$$

$$I_2 = \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_1 Q_1}{2} D_{02}(\lambda \rho) + \frac{k_1^2 P_1}{2\gamma_1} S_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1(z+d)} \lambda d\lambda \quad (2.46)$$

$$I_3 = \int_0^\infty \left( k_1^2 J_0(\lambda \rho) - \frac{\lambda^2}{2} S_{02}(\lambda \rho) \right) \frac{e^{-\gamma_1 |z-d|}}{\gamma_1} \lambda d\lambda \quad (2.47)$$

$$I_4 = \int_0^\infty \left( \frac{\gamma_1 Q_1}{2} S_{02}(\lambda \rho) + \frac{k_1^2 P_1}{2\gamma_1} D_{02}(\lambda \rho) \right) e^{-\gamma_1(z+d)} \lambda d\lambda \quad (2.48)$$

$$I_5 = \int_0^\infty \left( \pm e^{-\gamma_1 |z-d|} - R_1 e^{-\gamma_1(z+d)} \right) J_1(\lambda \rho) \lambda^2 d\lambda \quad (2.49)$$

$$I_6 = \int_0^\infty J_0(\lambda\rho) e^{-\gamma_1|z-d|} \lambda d\lambda \quad (2.50)$$

$$I_7 = \int_0^\infty \left( \frac{Q_1}{2} S_{02}(\lambda\rho) - \frac{P_1}{2} D_{02}(\lambda\rho) \right) e^{-\gamma_1(z+d)} \lambda d\lambda \quad (2.51)$$

$$I_8 = \int_0^\infty \left( \frac{Q_1}{2} D_{02}(\lambda\rho) - \frac{P_1}{2} S_{02}(\lambda\rho) \right) e^{-\gamma_1(z+d)} \lambda d\lambda \quad (2.52)$$

$$I_9 = \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda\rho)}{\gamma_1} e^{-\gamma_1|z-d|} \lambda^2 d\lambda \quad (2.53)$$

$$I_{10} = \int_0^\infty \frac{P_1 J_1(\lambda\rho)}{\gamma_1} e^{-\gamma_1(z+d)} \lambda^2 d\lambda \quad (2.54)$$

เครื่องหมาย  $\pm$  ในสมการต่างๆข้างต้นและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$\pm = \begin{cases} +, & z > d \\ -, & 0 \leq z \leq d \end{cases}$$

$$C_1 = -\frac{j\omega\mu_1}{4\pi k_1^2} \quad (2.55)$$

$$C_2 = \frac{j\omega\mu_2}{2\pi} \quad (2.56)$$

$$R_1 = \frac{r_\mu \gamma_1 k_2^2 - \gamma_2 k_1^2}{r_\mu \gamma_1 k_2^2 + \gamma_2 k_1^2} \quad (2.57)$$

$$\gamma_i = (\lambda^2 - k_i^2)^{1/2}; \quad i = 1, 2 \quad (2.58)$$

$$\gamma_\mu = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2.59)$$

$$Q_1 = -R_1 \quad (2.60)$$

$$P_1 = \frac{r_\mu \gamma_2 - \gamma_1}{r_\mu \gamma_2 - \gamma_1} \quad (2.61)$$

$$M_1 = \gamma_2 + \frac{\gamma_1}{r_\mu} \quad (2.62)$$

$$N_2 = \gamma_1 k_2^2 + \frac{\gamma_2 k_1^2}{r_\mu} \quad (2.63)$$

$$S_{02}(\lambda\rho) = J_0(\lambda\rho) + J_2(\lambda\rho) \quad (2.64)$$

$$D_{02}(\lambda\rho) = J_0(\lambda\rho) - J_2(\lambda\rho) \quad (2.65)$$

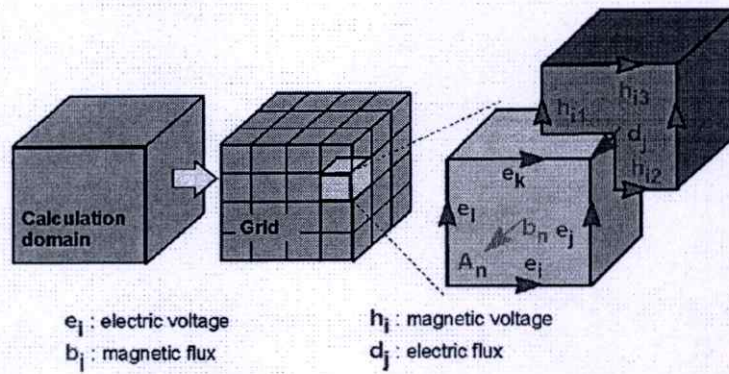
จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.18) (2.20) ถึง (2.31) และ (2.33) ถึง (2.44) แสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นผลตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแบบจุดใดๆ สำหรับกรณีของการคำนวณการกระจายกระแส (Current distribution) ของสายอากาศ สามารถใช้วิธีของโมเมนต์ (Method of Moments) ในการคำนวณร่วมกับสมการที่แสดงข้างต้น ซึ่งได้มีผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวแล้ว [72] – [73] นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมการจำลองแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic simulator) ซึ่งใช้แก้ปัญหาที่กำหนดขึ้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม CST และ โปรแกรม IE3D ซึ่งทั้งสองโปรแกรมมีการจำลองแบบของปัญหาในรูปแบบ 3 มิติ โดยมีการอ้างอิงทฤษฎีที่ใช้แก้ปัญหาแตกต่างกันดังนี้

### โปรแกรม IE3D

โปรแกรมการจำลองแบบแม่เหล็กไฟฟ้านี้ใช้หลักการแก้สมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบอินทิกรัลโดยใช้ฟังก์ชันกรีน (Green's function) โดยการพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการกระจายกระแสไฟฟ้าบน โครงสร้างโลหะและกระแสแม่เหล็ก (Magnetic current) ที่เกิดจากการกระจายสนามไฟฟ้าบนอะเพอร์เจอร์โลหะ (Metallic aperture) [74]

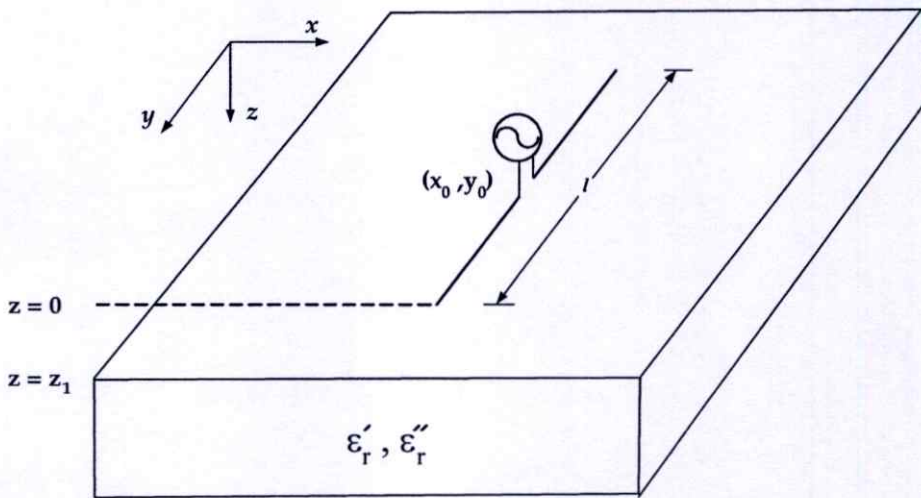
### โปรแกรม CST

โปรแกรมการจำลองแบบแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีพื้นฐานจากเทคนิคการอินทิเกรตแบบจำกัด (The Finite Integration Technique) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่จะแบ่งโครงสร้างปัญหาที่กำหนดขึ้นออกเป็นส่วนย่อยๆ (Universal spatial discretization scheme) ดังรูปที่ 2.2 โดยมีวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่สัมพันธ์กับสมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบอินทิกรัล [75]



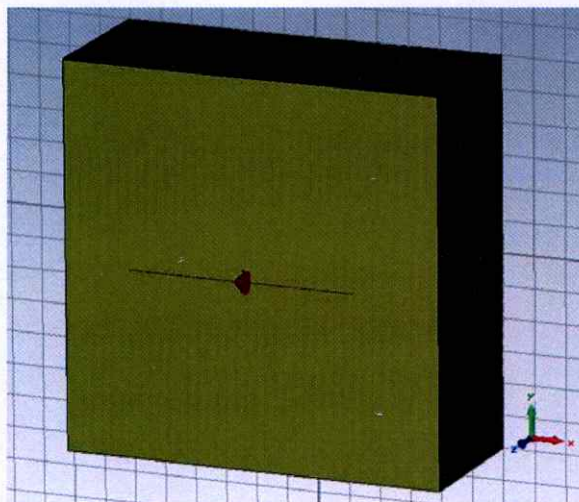
รูปที่ 2.2 รูปแบบการแบ่งโครงสร้างปัญหาในโปรแกรม CST [75]

### 2.2.2 สนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

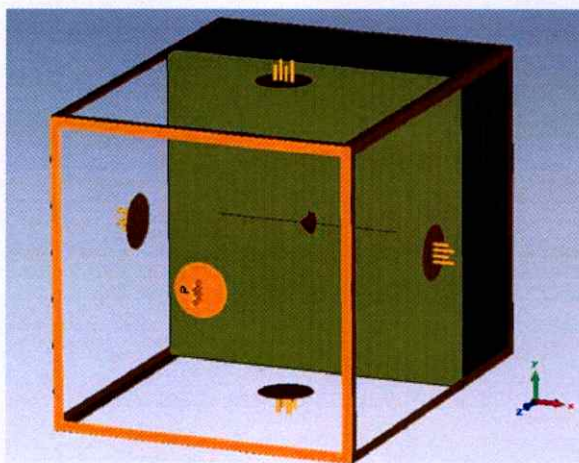


รูปที่ 2.3 โครงสร้างปัญหาของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสีย

พิจารณาสายอากาศไดโพลที่มีความยาว  $l$  เรียงตัวอยู่ในแนวแกน  $y$  เหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดกึ่งอนันต์เป็นระยะทาง  $z_1$  และป้อนสัญญาณจากตัวกำเนิดสัญญาณ ตรงกลางของสายอากาศไดโพลดังรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาว่า สายอากาศไดโพล ณ ตำแหน่ง  $(x_0, y_0)$  มีความบางมาก และพิจารณาตัวกลางที่มีการสูญเสียเป็นข้าวเปลือก ซึ่งจากข้อมูลในบทความ [48] แสดงให้เห็นว่า ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อยู่ในช่วง 10% ถึง 20% จะมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์อยู่ในช่วง  $2.0 \leq \epsilon_r' \leq 4.0$  และ  $0.2 \leq \epsilon_r'' \leq 0.6$  เมื่อสายอากาศไดโพลยาวครึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda = 12.3$  เซนติเมตร) จะสามารถหาการกระจายของสนามไฟฟ้าตามโครงสร้างปัญหาดังรูปที่ 2.3 ณ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้โปรแกรม CST ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปที่ 2.4 (ก) แสดงโครงสร้างปัญหาที่สร้างขึ้นในโปรแกรม แต่เนื่องจากกำหนดว่าเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียขนาดกึ่งอนันต์ จึง



(ก)



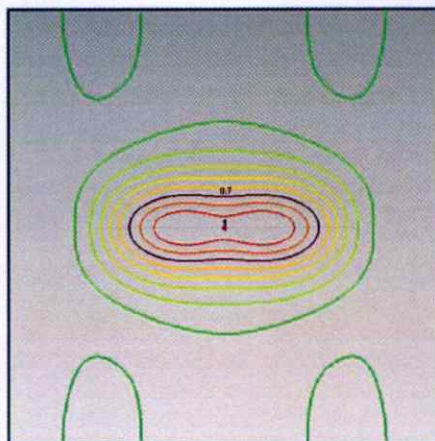
(ข)

**รูปที่ 2.4** สายอากาศไดโพลเหนือตัวกลางที่มีการสูญเสียที่จำลองแบบในโปรแกรม CST

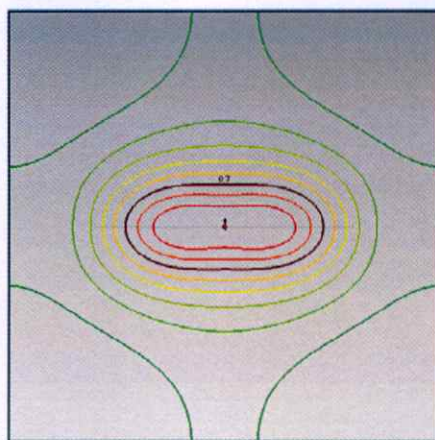
(ก) โครงสร้างปัญหา (ข) เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

ต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในลักษณะที่เป็นคาบ (Period) ตามรูปที่ 2.4 (ข) เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนหรือคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบของตัวกลาง

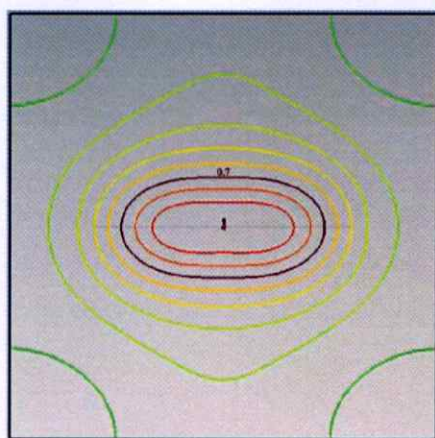
สำหรับการวิเคราะห์นี้จะพิจารณาขนาดของพื้นที่ของการกระจายสนามไฟฟ้า ที่เรียกว่าพื้นที่ประสิทธิผล (Effective field area) ซึ่งแปรผันตรงกับกำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังนั้นจากผลการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าที่แสดงเป็นกราฟพื้นผิวของนอร์มัลไลซ์ขนาดสนามไฟฟ้าจึงสามารถพิจารณาขนาดของพื้นที่ประสิทธิผลอย่างคร่าวๆ ได้ที่เส้นคอนทัวร์ค่า 0.7



(ก)



(ข)



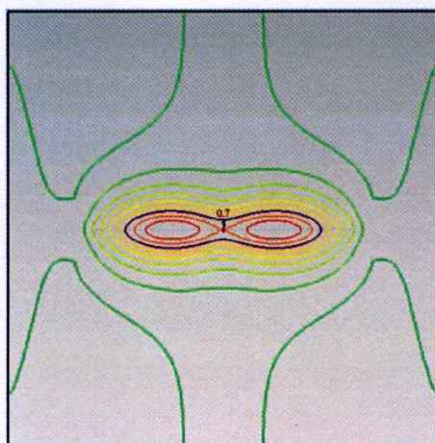
(ค)

รูปที่ 2.5 กราฟพื้นผิวขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลางค่าต่างๆ

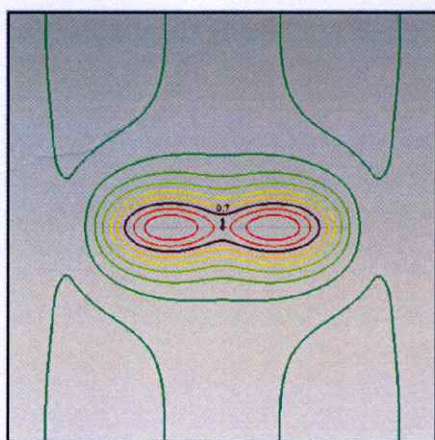
(ก)  $z_1 = \lambda/8$

(ข)  $z_1 = \lambda/16$

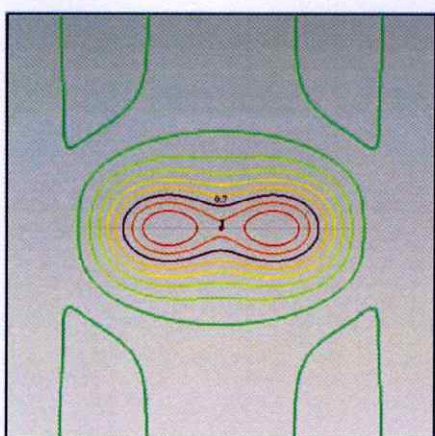
(ค)  $z_1 = \lambda/32$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 กราฟพื้นผิวขนาดสนามไฟฟ้าที่ระยะลึกจากผิวของตัวกลางค่าต่างๆ

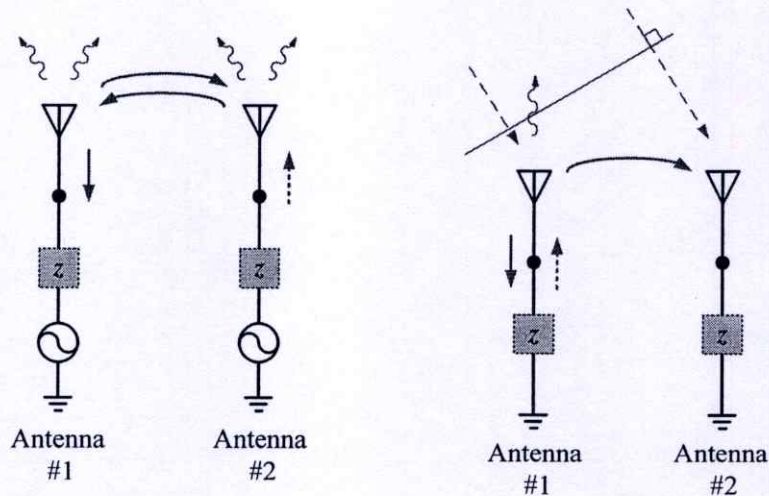
(ก)  $z = \lambda/8$

(ข)  $z = \lambda/16$

(ค)  $z = \lambda/32$

ซึ่งจากการจำลองแบบนี้ทำให้ทราบว่า การทดสอบขั้วเปลือกจากเทคนิควิธีนี้ จะสามารถทดสอบได้ในพื้นที่ขนาดเท่ากับพื้นที่ประสิทธิผลเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณากรณีที่สายอากาศไดโพลลอยอยู่เหนือขั้วเปลือกในระยะต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ระยะเล็กจากผิวของขั้วเปลือก 2 เซนติเมตร จะได้ว่าขนาดของพื้นที่ประสิทธิผลจะมีขนาดกว้างขึ้นเมื่อสายอากาศอยู่ใกล้ตัวกลางคือ เมื่อสายอากาศไดโพลลอยอยู่เหนือขั้วเปลือกในระยะ  $\lambda/32$  จะมีพื้นที่ประสิทธิผลขนาดใหญ่กว่ากรณีสายอากาศไดโพลลอยอยู่เหนือขั้วเปลือกในระยะ  $\lambda/16$  และ  $\lambda/8$  ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าในกรณีที่เปลี่ยนแปลงระยะเล็กจากผิวของขั้วเปลือก ดังรูปที่ 2.6 โดยคงค่าระยะของสายอากาศไดโพลที่ลอยอยู่เหนือขั้วเปลือกที่ 1 มิลลิเมตร จะได้ว่าขนาดของพื้นที่ประสิทธิผลจะมีขนาดกว้างขึ้นเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ผิวของตัวกลางคือ เมื่อระยะเล็กจากผิวของขั้วเปลือกเป็น  $\lambda/32$  ก็จะมีพื้นที่ประสิทธิผลขนาดใหญ่กว่ากรณีระยะเล็กจากผิวของขั้วเปลือกเป็น  $\lambda/16$  และ  $\lambda/8$  ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าวิธีการนี้จะสามารถทดสอบขั้วเปลือกได้ดีที่สุด (พื้นที่ประสิทธิผลมีขนาดกว้างที่สุด) ในกรณีที่สายอากาศไดโพลอยู่ใกล้ขั้วเปลือกมากที่สุด ซึ่งจะมีขนาดของสนามไฟฟ้าที่ผิวแรงที่สุดด้วยเช่นกัน

### 2.2.3 ทฤษฎีของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ



รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ[70]

(ก) โหมดการส่ง

(ข) โหมดการรับ

เมื่อสายอากาศ 2 ตัววางอยู่ใกล้ๆกัน ไม่ว่าจะตัวหนึ่งตัวใดหรือทั้งคู่จะทำหน้าที่รับหรือส่งสัญญาณ พลังงานบางส่วนที่มาจากสายอากาศตัวหนึ่งย่อมมีอิทธิพลต่อสายอากาศอีกตัว โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

ก) คุณลักษณะการแผ่คลื่น (Radiation characteristics) ของสายอากาศแต่ละตัว

ข) ระยะห่างสัมพัทธ์ (Relative separation) ระหว่างสายอากาศแต่ละตัว

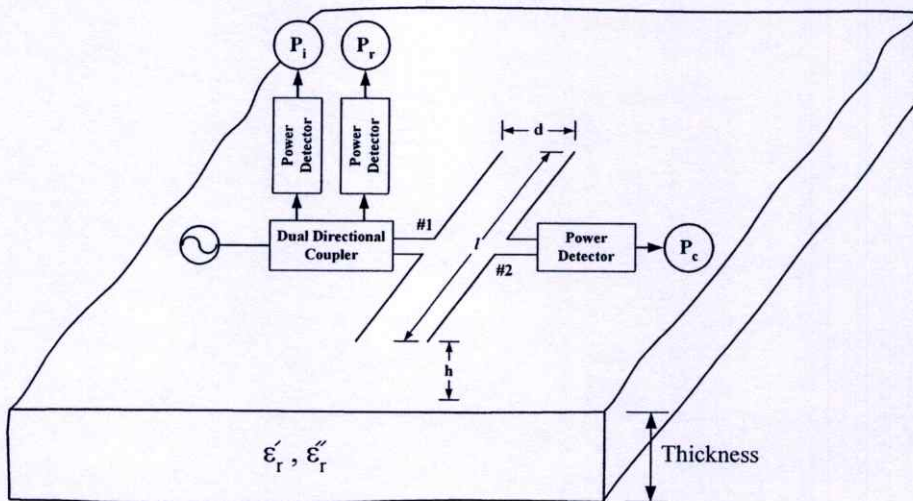
ค) การกำหนดทิศทางหรือตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative orientation) ของสายอากาศแต่ละตัว

การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสายอากาศเกิดจากกลไกที่แตกต่างกันมากมาย อาทิเช่น ถ้าสายอากาศทำหน้าที่ส่งสัญญาณทั้งคู่ พลังงานที่ส่งจากสายอากาศตัวหนึ่งจะถูกจับโดยสายอากาศอีกตัวหนึ่ง อันเนื่องจากสายอากาศในทางปฏิบัติมีคุณสมบัติในเชิงทิศทางที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ (Non-ideal directional characteristics) บางส่วนของพลังงานที่ตกกระทบสายอากาศอาจเกิดการกระเจิงใหม่ (Rescattered) ในทิศทางอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดเป็นตัวส่งสัญญาณทุติยภูมิ (Secondary transmitters) การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสายอากาศคือ การเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ในหลายๆกรณีก็ทำให้การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศมีความซับซ้อนมากขึ้น การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศสามารถแบ่งได้เป็น 2 โหมด ดังรูปที่ 2.7 ดังนี้

โหมดการส่ง (Transmitting mode) ดังรูปที่ 2.7(ก) เมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสายอากาศ #2 ส่งพลังงานจากสายอากาศ #2 แพร่กระจายออกสู่อากาศไปสู่สายอากาศ #1 พลังงานที่ตกกระทบจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณของสายอากาศ #1 บางส่วนของพลังงานแพร่กระจายออกสู่อากาศและตกกระทบกับสายอากาศ #2 อีกครั้ง กระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันเมื่อสายอากาศ #1 เป็นตัวส่งสัญญาณ

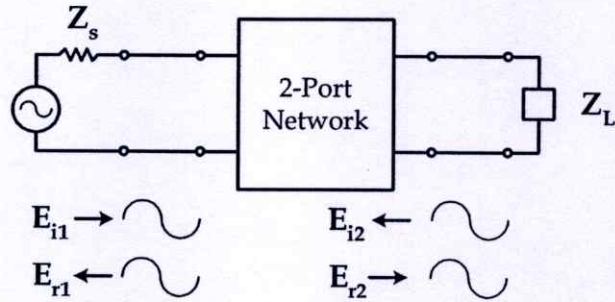
โหมดการรับ (Receiving mode) ดังรูปที่ 2.7(ข) เมื่อมีคลื่นระนาบตกกระทบสายอากาศ #1 ก่อนจะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า คลื่นตกกระทบบางส่วนจะกระเจิงสู่อากาศและบางส่วนจะกระเจิงสู่สายอากาศ #2 ทำให้สายอากาศ #2 ได้รับพลังงานจาก 2 แหล่ง ซึ่งผลรวมที่ได้จะต้องรวมกันแบบเวกเตอร์

#### 2.2.4 หลักการของอุปกรณ์ตรวจรู้สายอากาศไดโพลคู่



รูปที่ 2.8 โครงสร้างปัญหาของสายอากาศไดโพลคู่เหนือตัวกลาง ไดอิเล็กทริกขนาดกึ่งอนันต์

สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น 2 ตัววางขนานกันโดยมีระยะห่าง  $d$  วางเหนือตัวกลางไดอิเล็กตริก ( $\epsilon', \epsilon''$ ) ขนาดกึ่งอนันต์เป็นระยะ  $h$  ดังรูปที่ 2.8 สายอากาศ #1 ถูกกระตุ้นด้วยเครื่องส่งโดยคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางคู่ (Dual directional coupler) สำหรับวัดกำลังงานที่ตกกระทบ ( $P_i$ ) และกำลังงานที่สะท้อนกลับ ( $P_r$ ) สายอากาศ #2 จะรับคลื่นที่เชื่อมต่อ (Coupled power) จากสายอากาศ #1 โดยเป็นคลื่นที่กระเจิงมาจากตัวกลางไดอิเล็กตริกขนาดกึ่งอนันต์ ตัวตรวจจับกำลังงาน (Power detector) ซึ่งถูกติดตั้งที่อินพุทของสายอากาศ #2 เพื่อวัดกำลังงานของคลื่นที่เชื่อมต่อ ( $P_c$ )



รูปที่ 2.9 ระบบโครงข่าย 2 พอร์ต

จากรูปที่ 2.8 สามารถพิจารณาระบบนั้นในลักษณะของโครงข่าย 2 พอร์ต [76] ดังรูปที่ 2.9 โดย  $E_{i1}, E_{r1}, E_{i2}$  และ  $E_{r2}$  คือคลื่นตกกระทบและสะท้อนกลับของพอร์ตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งจะได้ว่า

$$V_1 = E_{i1} + E_{r1} \quad (2.66)$$

$$I_1 = \frac{E_{i1} - E_{r1}}{Z_0} \quad (2.67)$$

$$V_2 = E_{i2} + E_{r2} \quad (2.68)$$

$$I_2 = \frac{E_{i2} - E_{r2}}{Z_0} \quad (2.69)$$

โดย  $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง และจากนิยามของ

$$a_1 = \frac{E_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.70)$$

$$b_1 = \frac{E_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.71)$$

$$a_2 = \frac{E_{i2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.72)$$

$$b_2 = \frac{E_{r2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.73)$$

สมการของพารามิเตอร์ S กำหนดได้โดย

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2.74)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.75)$$

จากระบบโครงข่าย 2 พอร์ต เมื่อโหลดปลายสายของเอาต์พุตให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง จะทำให้คลื่นตกกระทบถูกดูดกลืนหมด ( $a_2 = 0$ ) จะได้ว่า

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.76)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.77)$$

เมื่อกำลังงานของคลื่นแปรผันตามสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$P = \frac{E^2}{\eta} \quad (2.78)$$

โดย  $\eta$  คือ อิมพีแดนซ์อินทรินซิก (Intrinsic impedance) ของตัวกลาง

จากสมการที่ (2.70) ถึง (2.73) และ (2.76) ถึง (2.78) จะสามารถหาค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) และการเชื่อมต่อ ( $|S_{21}|$ ) ได้โดย

$$|S_{11}| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}} \quad (2.79)$$

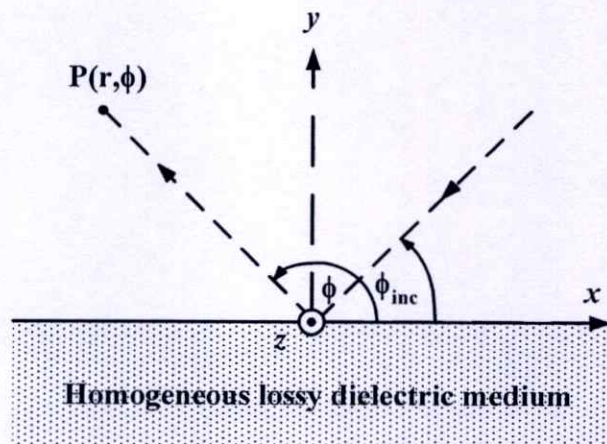
$$|S_{21}| = \sqrt{\frac{P_c}{P_i}} \quad (2.80)$$

การแก้ปัญหานี้สามารถใช้ได้ทั้งทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า [62] หรือ โปรแกรมการจำลองแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic simulator) ในการคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆได้ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IE3D [74] ในการจำลองแบบปัญหาที่กำหนดขึ้นเพื่อลดปัญหาในการหาสูตรสมการของปัญหาที่มีความซับซ้อนและเพื่อทดสอบหลักการที่นำเสนอนี้ จากปัญหาที่กำหนดขึ้นตามรูปที่ 2.8 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  และการเชื่อมต่อ  $|S_{21}|$  ได้จากการคำนวณในโปรแกรมการจำลองแบบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $\epsilon'_r$  และ  $\epsilon''_r$  กราฟพื้นผิว (Surface curve) ของการซ้อนทับกัน (Overlap) ของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ในระนาบของ  $\epsilon'_r, \epsilon''_r$  แสดงให้เห็นถึงขนาดของกำลังงานที่วัดได้ซึ่งสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ทดสอบ โดยเส้นที่ลากจากจุดตัดของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  มาตั้งฉากกับแกนในแนวตั้งและแนวนอนจะแสดงถึงค่าของ  $\epsilon'_r$  และ  $\epsilon''_r$  ของวัสดุที่ทดสอบ

### 2.3 เทคนิคการคำนวณย้อนกลับโดยทำให้เหมาะสมที่สุด

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงหลักการของระบบในการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยการวัดคลื่นสะท้อนจากวัสดุและใช้การคำนวณย้อนกลับที่มีพื้นฐานมาจากวิธีสตีปเปสต์เดสเซนต์ (Steepest descent) [77]-[78]

#### 2.3.1 การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับและการเกิดสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม



รูปที่ 2.10 โครงสร้างปัญหาของคลื่นสะท้อน

สมมติให้คลื่นระนาบที่มีแอมพลิจูด  $E_0$  แพร่กระจายจากอวกาศว่างที่มีค่าคงที่การแพร่กระจาย  $k_0$  ตกกระทบทำมุมเอียงบนตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเนื้อเดียวขนาดกึ่งอนันต์ทำมุม  $\phi_{inc}$  ดังรูปที่ 2.10 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่สะท้อนตัวกลาง ณ จุดสังเกต  $P(r, \phi)$  ในกรณีที่มีการโพลาไรซ์แบบตั้งฉาก ( $\bar{E}_{per}^r$ ) และขนาน ( $\bar{E}_{par}^r$ ) สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\bar{E}_{per}^r = \hat{a}_z R_{per} E_0 e^{jk_0 r \cos(\phi_{inc} + \phi)} \quad (2.81)$$

$$\bar{E}_{par}^r = (-\hat{a}_x \cos \phi + \hat{a}_y \sin \phi) R_{par} E_0 e^{jk_0 r \cos(\phi_{inc} + \phi)} \quad (2.82)$$

โดย  $R_{per}$  และ  $R_{par}$  คือค่าเชิงซ้อนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย ในกรณีที่มีการโพลาไรซ์แบบตั้งฉากและขนานตามลำดับ สัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งสองกรณีสามารถกำหนดได้ดังนี้ [77] - [78]

$$R_{per}(\phi_{inc}) = \frac{\sin \phi_{inc} - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \phi_{inc}}}{\sin \phi_{inc} + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \phi_{inc}}} \quad (2.83)$$

$$R_{par}(\phi_{inc}) = \frac{-\epsilon_r \sin \phi_{inc} + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \phi_{inc}}}{\epsilon_r \sin \phi_{inc} + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \phi_{inc}}} \quad (2.84)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.85)$$

โดย  $\epsilon_r$  คือค่าเชิงซ้อนของสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r'$  และตัวประกอบการสูญเสีย  $\epsilon_r''$  โดยตัวประกอบการสูญเสียมีค่าเท่ากับ  $\sigma/\omega\epsilon_0$  โดย  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม

### 2.3.2 เทคนิคการคำนวณย้อนกลับที่มีพื้นฐานจากวิธีสตีปเปิลด์เดสเซนต์

เทคนิคการคำนวณย้อนกลับคือ ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งเป็นการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลาง โดยใช้เทคนิคของการทำให้เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าของฟังก์ชัน

สมรรถนะ (Performance function) หลังจากนั้นพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสมรรถนะ ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างฟังก์ชันที่ต้องการ (Desired function) และฟังก์ชันที่ประมาณค่า (Approximated function) จะถูกปรับโดยการคำนวณให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ในโดเมนของตัวแปรอิสระพร้อมๆกัน ซึ่ง ณ ที่นี้ฟังก์ชันที่ต้องการคือข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบหรือได้จากการทดลองวัดค่าและฟังก์ชันที่ประมาณค่าคือข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากสูตรสมการที่กำหนดขึ้น เทคนิคของการทำให้เหมาะสมที่สุดที่ได้รับการพัฒนามีอยู่หลายวิธี ซึ่งฟังก์ชันสมรรถนะก็มีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่พิจารณา จาก [77]-[78] พบว่า ฟังก์ชันสมรรถนะยกกำลังสองทำให้ความผิดพลาดของเวกเตอร์พารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาพบว่าฟังก์ชันสมรรถนะที่เหมาะสมกับปัญหาที่นำเสนอในหัวข้อนี้คือผลบวกของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่คำนวณยกกำลังสอง ซึ่งก็คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของคลื่นสะท้อน ผลที่ได้จากการวัด ( $\bar{E}_{Measure}^r$ ) ได้จาก [65] ส่วนผลการคำนวณ ( $\bar{E}_{Calculate}^r$ ) ได้จากสมการที่ (2.81) ถึง (2.85) ดังนั้นฟังก์ชันสมรรถนะ  $Q_1$  และ  $Q_2$  สามารถกำหนดได้ดังนี้

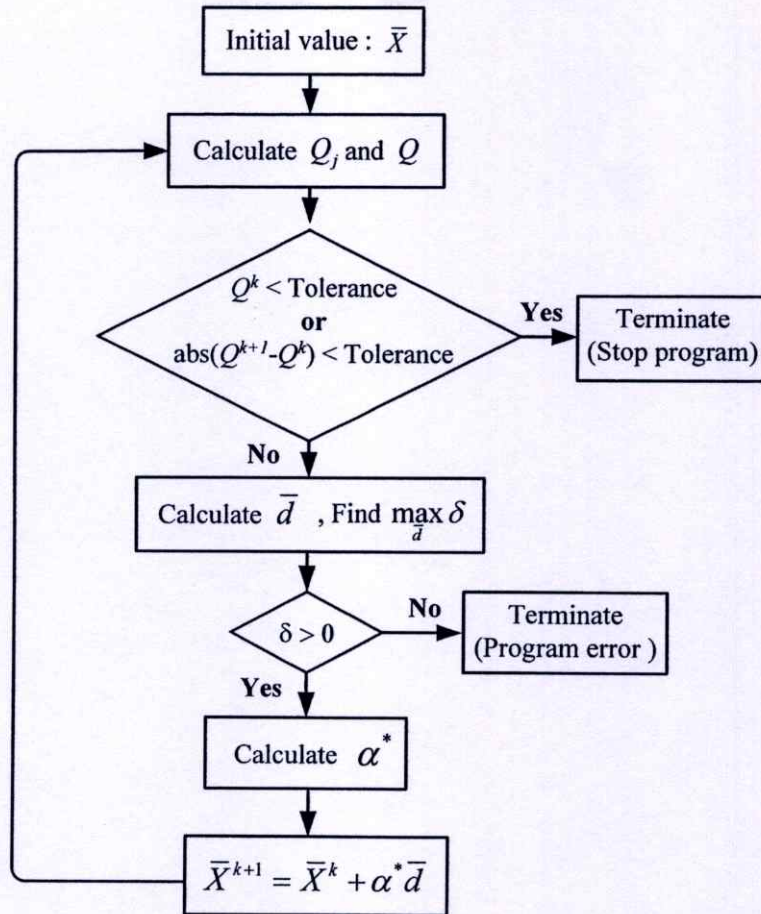
$$Q_1(\bar{X}, \omega_j) = \sum_{j=1}^L \left| \left[ \text{Re} \left[ \bar{E}_{Measure}^r(\omega_j) \right] - \text{Re} \left[ \bar{E}_{Calculate}^r(\bar{X}, \omega_j) \right] \right]^2 \right| \quad (2.86)$$

$$Q_2(\bar{X}, \omega_j) = \sum_{j=1}^L \left| \left[ \text{Im} \left[ \bar{E}_{Measure}^r(\omega_j) \right] - \text{Im} \left[ \bar{E}_{Calculate}^r(\bar{X}, \omega_j) \right] \right]^2 \right| \quad (2.87)$$

โดย  $\bar{X}$  คือเวกเตอร์พารามิเตอร์ได้แก่  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  และ  $\omega_j$  คือตัวแปรอิสระอันดับที่  $j^{\text{th}}$  ของจุดการชักตัวอย่าง (Sampling point)  $L$  ซึ่ง  $\omega_j$  เป็นตัวแปรทั้งในโดเมนเชิงความถี่หรือตำแหน่ง ฟังก์ชันสมรรถนะทั้งหมดคือผลรวมของแต่ละฟังก์ชันสมรรถนะ ซึ่งจะทำให้เหมาะสมพร้อมๆกัน โดยนิยามได้ดังนี้

$$Q(\bar{X}, \omega_j) = Q_1(\bar{X}, \omega_j) + Q_2(\bar{X}, \omega_j) \quad (2.88)$$

ฟังก์ชันสมรรถนะจะถูกทำให้เหมาะสมเพื่อหาค่าของฟังก์ชันที่น้อยที่สุด การหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของฟังก์ชันที่จุดใดๆแสดงให้เห็นถึงทิศทางของการเพิ่มขึ้นมากที่สุดของค่าของฟังก์ชัน ดังนั้นค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีทิศตรงกันข้าม ซึ่งจะเรียกว่า ทิศการค้นหาในทางลดระดับ (Descent search direction) [66] โดยนิยามได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 ผังงาน โปรแกรมของการคำนวณย้อนกลับ

$$\bar{d} = -\nabla Q(\bar{X}, \omega_j) \quad (2.89)$$

การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) ใช้เพื่อแก้ปัญหาให้เป็นไปตามเงื่อนไข  $\max_{\bar{d}} \delta$  และ  $\|\bar{d}\| \geq \delta$  และ  $0 \leq \|\bar{d}\| \leq 1$  โดย  $\|\cdot\|$  คือเมตริกซ์นอร์ม (Norm of matrix) โดยขั้นตอนของการคำนวณได้กำหนดตามผังงานโปรแกรมที่แสดงดังรูปที่ 2.11 ในกรณีที่  $\delta \leq 0$  นั้นคือเกิดความผิดพลาดขึ้นทำให้การคำนวณยุติ ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณเริ่มต้นได้ใหม่ในทิศทางที่ถูกต้องจึงต้องเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้น (Initial value) หรือรูปแบบของฟังก์ชันสมรรถนะขึ้นใหม่ ในกรณีที่  $\delta > 0$  การคำนวณยังดำเนินต่อไปได้และความยาวแบบขั้น (Step length)  $\alpha^*$  ซึ่งเป็นค่าบวกที่ได้จากแต่ละครั้งของการคำนวณฟังก์ชันสมรรถนะโดยใช้วิธีบาวดิ้งเฟส (Bounding phase method) ในการหาขอบเขตของค่าต่ำที่สุดและการคำนวณโกลเดนเซกชันเสิร์ช (Golden section search calculation) เพื่อหาค่าต่ำที่สุดในขอบเขตนั้น [66] เพื่อกำหนดทิศทางการค้นหาในทางลดระดับและความยาวแบบขั้นใช้คำนวณเวกเตอร์พารามิเตอร์ หากค่าฟังก์ชันสมรรถนะของเวกเตอร์

พารามิเตอร์มีค่ามากกว่าการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้นี้ ความยาวแบบขั้นก็จะถูกลดค่าลงให้เหมาะสมแล้วจึงคำนวณเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่ ถ้าค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์ทำให้ฟังก์ชันสมรรถนะคำนวณได้ค่าน้อยกว่าการคำนวณในรอบก่อนหน้านั้น โปรแกรมก็จะดำเนินการคำนวณซ้ำในรอบถัดไปจนกระทั่งความผิดพลาด (ค่าของฟังก์ชันสมรรถนะรวม) มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือความผิดพลาดสัมพัทธ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้จากเทคนิคการคำนวณย้อนกลับที่นำเสนอดังกล่าว

## 2.4 สรุป

สนามไฟฟ้าจากสายอากาศที่อยู่เหนือตัวกลางที่ทดสอบมีพื้นที่ประสิทธิผลที่ทำให้ทราบ ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีผลต่อตัวกลางที่ทดสอบที่ขนาดกว้างเท่าใด ซึ่งขนาดพื้นที่ประสิทธิผลแปรผันตามระยะระหว่างสายอากาศถึงตัวกลางที่ทดสอบ และแปรผกผันกับระยะพิจารณาที่ลึกลงไปจากผิวของตัวกลางที่ทดสอบ จากนั้นจะเห็นได้ว่าหลักการของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศสามารถนำไปพัฒนาเพื่อการตรวจวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ จากลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไดโพลคู่ที่ง่ายต่อการสร้าง และใช้โปรแกรมจำลองแบบในการคำนวณหาค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) และการเชื่อมต่อ ( $|S_{21}|$ ) ในตัวกลางใดๆ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงและลดความยุ่งยากในการหาสูตรสมการที่มีรูปแบบเฉพาะกับปัญหานั้น สำหรับเทคนิคการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุดซึ่งมีพื้นฐานจากวิธีสตีปเปสต์เดสเซนส์ เป็นวิธีที่มีศักยภาพในการคำนวณค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากวัสดุที่ทดสอบ การหาเงื่อนไขทางกายภาพที่เหมาะสมใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพได้แสดงไว้ในบทถัดไป

## บทที่ 3

# การวิเคราะห์และออกแบบโดยการจำลองแบบการเชื่อมต่อร่วม ของสายอากาศ

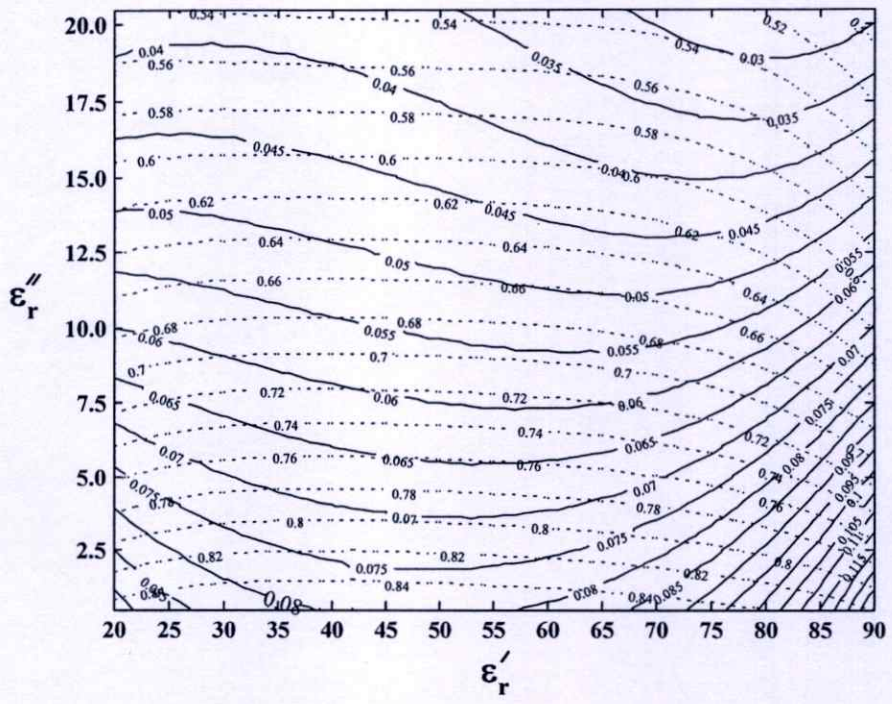
### 3.1 บทนำ

การนำเสนอทฤษฎีของการหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์โดยการวัดเพียงขนาดของคลื่นที่สะท้อนและเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลคู่ที่อยู่เหนือตัวกลางที่ทดสอบ แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการวัดดังกล่าวมาลงบนกราฟที่คำนวณได้จากโปรแกรมจำลองแบบก็สามารถหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่ทดสอบได้ เพื่อพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) ที่มีการใช้งานที่ง่าย ไม่ต้องการระบบที่ต้องคำนวณซับซ้อน ดังนั้นปัจจัยทางกายภาพในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ที่จะทำให้การหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์จากตัวกลางที่ทดสอบ มีประสิทธิภาพในการทดสอบมากที่สุด โดยการใช้การคำนวณจากสูตรสมการและโปรแกรมการจำลองแบบเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆอย่างเหมาะสม

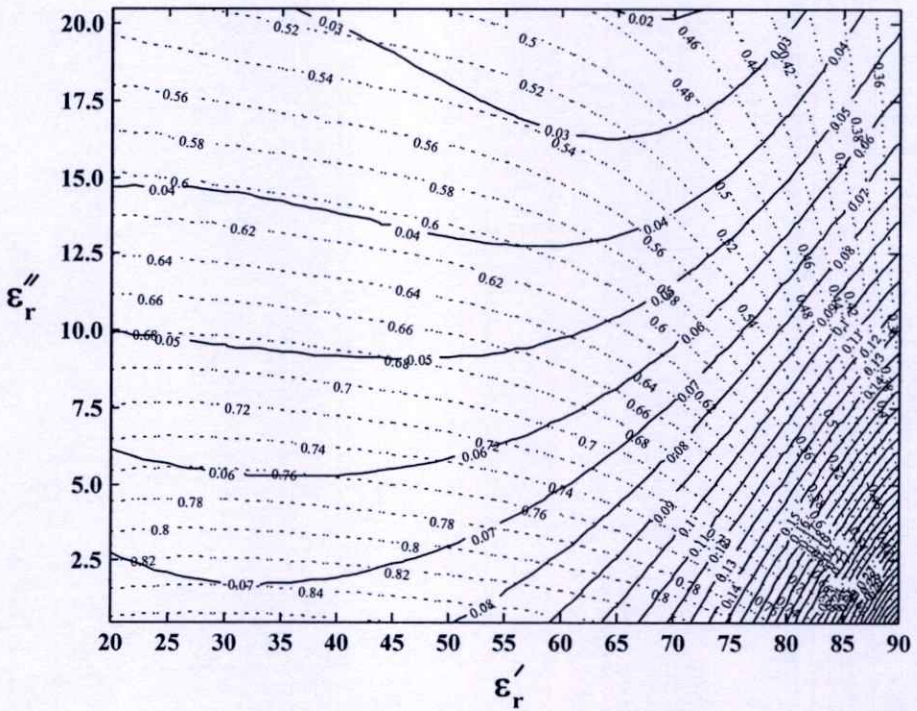
### 3.2 การจำลองแบบของอุปกรณ์ตรวจรู้สายอากาศไดโพลคู่

เมื่อพิจารณาโครงสร้างปัญหาของสายอากาศไดโพลคู่เหนือตัวกลางไดอิเล็กตริกขนาดกึ่งอนันต์ดังรูปที่ 2.8 สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือความถี่ของการทำงานในระบบที่ต้องการสร้าง ปัจจัยหลักของการพัฒนาระบบการวัดทดสอบนี้ นอกเหนือจากความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบแล้ว ราคาของเครื่องมือนี้ต้องมีราคาไม่สูงด้วย ดังนั้นการเลือกความถี่ใช้งานจึงต้องพิจารณาธรรมชาติของคลื่นความถี่นั้น อาทิเช่น ความลึกผิว (Skin depth) ที่จะใช้ทดสอบตัวกลางใดๆ รวมถึงวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาประกอบนั้น หาได้ง่าย ราคาไม่แพง ความถี่ที่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ถือว่าเป็นความถี่เสรีไม่ต้องขออนุญาต ในการใช้งาน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความลึกผิวของข้าวเปลือก ที่ความถี่ดังกล่าวจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 5 เซนติเมตร ซึ่งเพียงพอกับความต้องการของระบบ

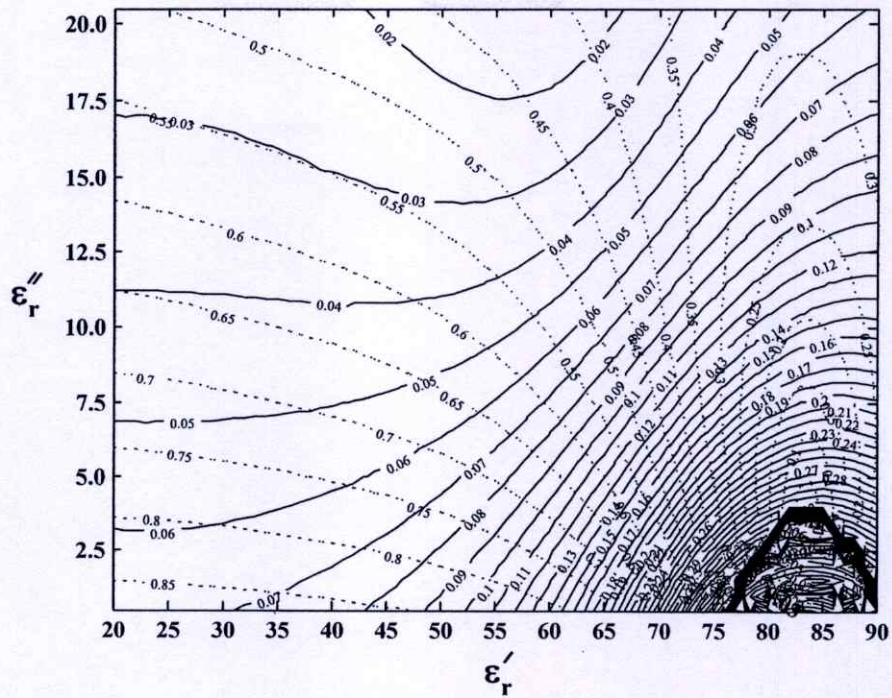
จากบทที่ 2 ได้ศึกษาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของสายอากาศไดโพลเหนือตัวกลาง 2 ชั้น โดยอาศัยโปรแกรม CST เพื่อจำลองแบบโครงสร้างปัญหาดังรูปที่ 2.8 ในขณะที่การพิจารณานาขนาดของสัญญาณในรูปแบบของค่าพารามิเตอร์ S (S parameters) มีความสะดวกในการใช้งานกับเครื่องมือวัดความถี่สูง ซึ่งสามารถพัฒนาระบบต่อไปเป็นเครื่องมือขนาดพกพา และเพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าไปเป็นค่าพารามิเตอร์ S จากสายอากาศไดโพลตามโครงสร้างปัญหาดังรูปที่ 2.8 จึงได้พิจารณาการใช้โปรแกรมการจำลองแบบในการหาค่าพารามิเตอร์ S ในเงื่อนไขต่างๆ



(n)



(q)



(ค)

-----  $|S_{11}|$       ————  $|S_{21}|$

รูปที่ 3.1 กราฟพื้นผิวของไดโพลคู่ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ

(ก) 2.25 กิกะเฮิรตซ์      (ข) 2.45 กิกะเฮิรตซ์      (ค) 2.65 กิกะเฮิรตซ์

เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของหลักการที่นำเสนอนี้ จึงกำหนดเงื่อนไขของการจำลองแบบสำหรับการทดสอบวัดน้ำในเบื้องต้น [79] โดยอาศัยโปรแกรม IE3D ในการจำลองแบบตามโครงสร้างปัญหารูปที่ 2.8 สำหรับการคำนวณในโปรแกรมได้กำหนดช่วงการพิจารณาของค่า  $\epsilon_r'$  เริ่มจาก 20.0 ถึง 90.0 โดยเปลี่ยนแปลงขั้นละ 1.0 และค่า  $\epsilon_r''$  เริ่มจาก 0.5 ถึง 20.5 โดยเปลี่ยนแปลงขั้นละ 0.5 ซึ่งค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ได้ถูกเปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่มีความสูญเสียต่ำไปถึงความสูญเสียสูง เพื่อศึกษาอิทธิพลของความถี่จึงกำหนดให้ความถี่ใช้งานมีการเปลี่ยนแปลง 3 ค่าคือ 2.25, 2.45 และ 2.65 กิกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ในระนาบ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  ผลการจำลองแบบโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งานแสดงให้เห็นถึงบริเวณพื้นที่ของคำตอบค่าเฉพาะ (Unique solution) ซึ่งหมายถึงจุดตัดของเส้นกราฟ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ถ้าใดค่าหนึ่งในระนาบ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  จะมีเพียงจุดเดียว ในแต่ละความถี่จะมีบริเวณพื้นที่ของคำตอบค่าเฉพาะที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทดสอบ สำหรับกรณีทดสอบกับน้ำ ผลการจำลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จะมีพื้นที่ของคำตอบค่าเฉพาะที่ใช้งานได้ที่กว้างกว่าความถี่อื่นๆ

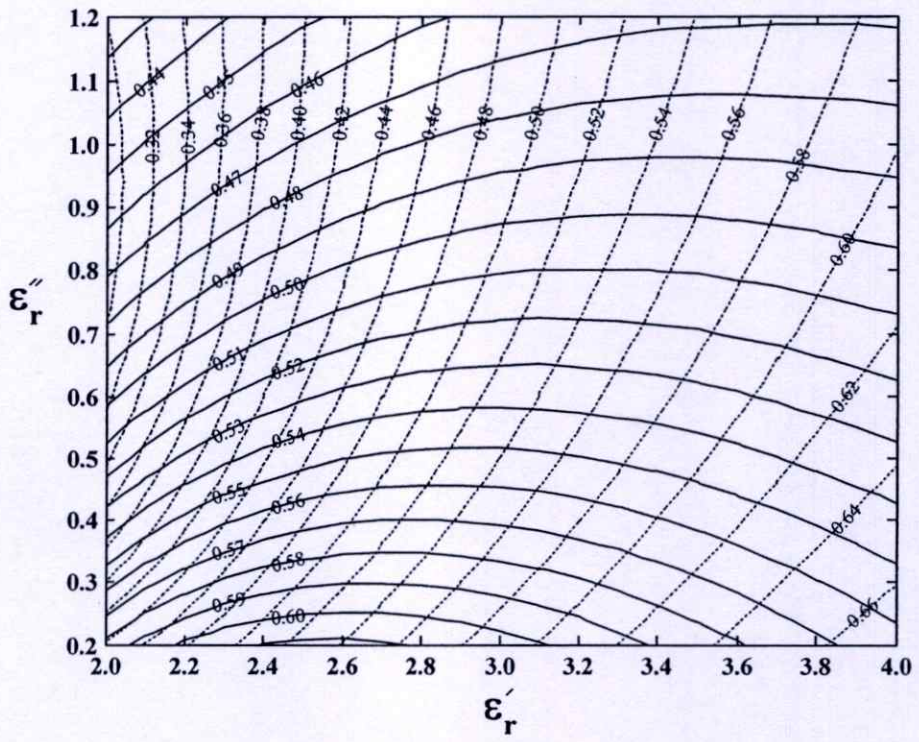
จากหลักการของการวัดเพียงขนาดของคลื่นที่สะท้อนและเชื่อมร่วมของสายอากาศไดโพล คู่ที่อยู่เหนือตัวกลางที่ทดสอบนี้ได้นำไปสู่การพัฒนาระบบที่ใช้วัดค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่สัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยการทดสอบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจากข้อมูลในบทความ [48] แสดงให้เห็นว่า ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อยู่ในช่วง 10% ถึง 20% จะมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์อยู่ในช่วง  $2.0 \leq \epsilon_r' \leq 4.0$  และ  $0.2 \leq \epsilon_r'' \leq 0.6$  โดยใช้โปรแกรม IE3D ในการจำลองแบบตามโครงสร้างปัญหารูปที่ 2.8 สำหรับคำนวณค่าของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของ  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  แล้ววาดลงในกราฟพื้นผิวในระนาบ  $\epsilon_r' \epsilon_r''$

ความยาวสายอากาศไดโพลนั้นมีอิทธิพลต่อการหาค่า  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  โดยการกำหนดให้ความสูงของสายอากาศเหนือตัวกลาง  $h$  และระยะห่างระหว่างสายอากาศ  $d$  มีค่า 0.00 และ 0.76 เซนติเมตรตามลำดับ พิจารณาค่าความยาวของสายอากาศ  $l$  ที่ยาวครึ่งความยาวคลื่น เมื่อสายอากาศอยู่ใน 3 ตัวกลางคือ ในอวกาศว่าง ( $\epsilon_r'=1, \epsilon_r''=0$ ) ในข้าวเปลือก ( $\epsilon_r'=3, \epsilon_r''=0.4$ ) และในตัวกลางผสมระหว่างอวกาศว่างกับข้าวเปลือก ( $\epsilon_r'=2, \epsilon_r''=0.2$ ) จากการคำนวณโดยโปรแกรมจำลองแบบทั้ง 3 กรณี พบว่าได้ค่าของ  $|S_{11}|$  เป็น 0.608 0.602 และ 0.392 ตามลำดับ และได้ค่าของ  $|S_{21}|$  เป็น 0.351 0.452 และ 0.553 ตามลำดับ เมื่อความยาวสายอากาศไดโพล  $l$  มีค่าครึ่งความยาวคลื่นในตัวกลางผสมระหว่างอวกาศว่างกับข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.33 เซนติเมตร โดยจะได้ค่าต่ำสุดของ  $|S_{11}|$  และค่าสูงสุดของ  $|S_{21}|$  (สายอากาศไดโพลสามารถส่งผ่านกำลังงานจากเครื่องส่งไปที่วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ)

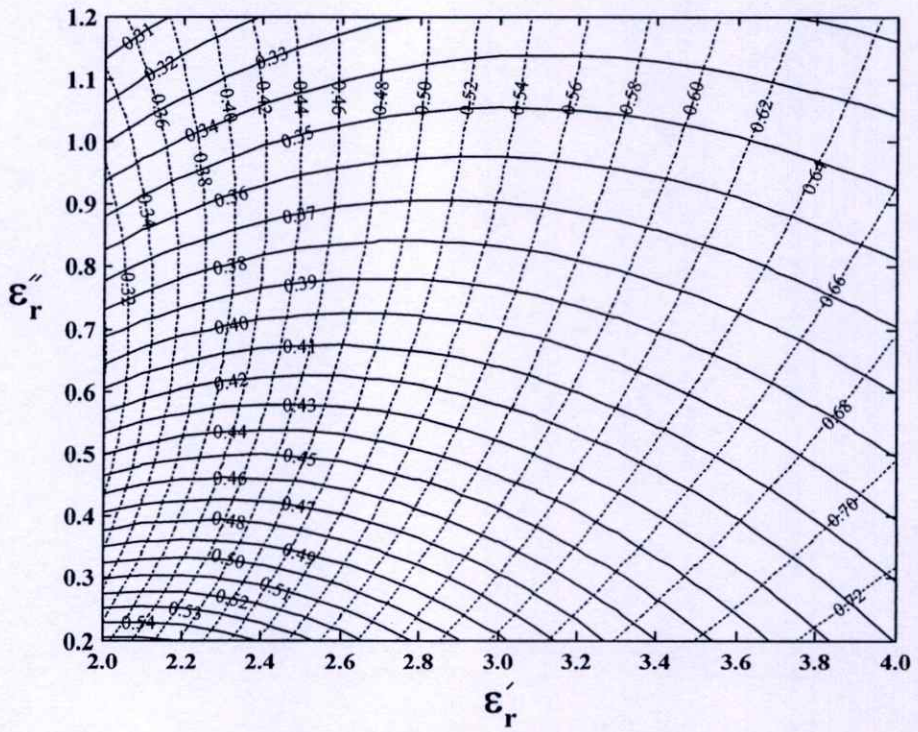
เมื่อกำหนดให้ความสูงของสายอากาศเหนือตัวกลาง  $h$  และความยาวสายอากาศ  $l$  มีค่า 0.00 และ 4.33 เซนติเมตรตามลำดับ ได้มีการคำนวณโดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศ  $d$  ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งได้แสดงการเปลี่ยนแปลงช่วงของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ดังตารางที่ 3.1 จากการคำนวณพบว่าค่าของ  $|S_{21}|$  ไม่ควรมีค่าต่ำเกินไป อันจะทำให้ค่าความไวของการรับสัญญาณลดลง ดังนั้นกรณีที่  $d$  มีค่าเท่ากับ  $\lambda/8$  ในรูปที่ 3.2(ข) จึงเหมาะสมที่สุดในการชดเชยข้อดีข้อเสีย (Tradeoff) ระหว่างค่าของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ซึ่ง  $d$  มีค่าเท่ากับ 0.76 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อช่วงของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$

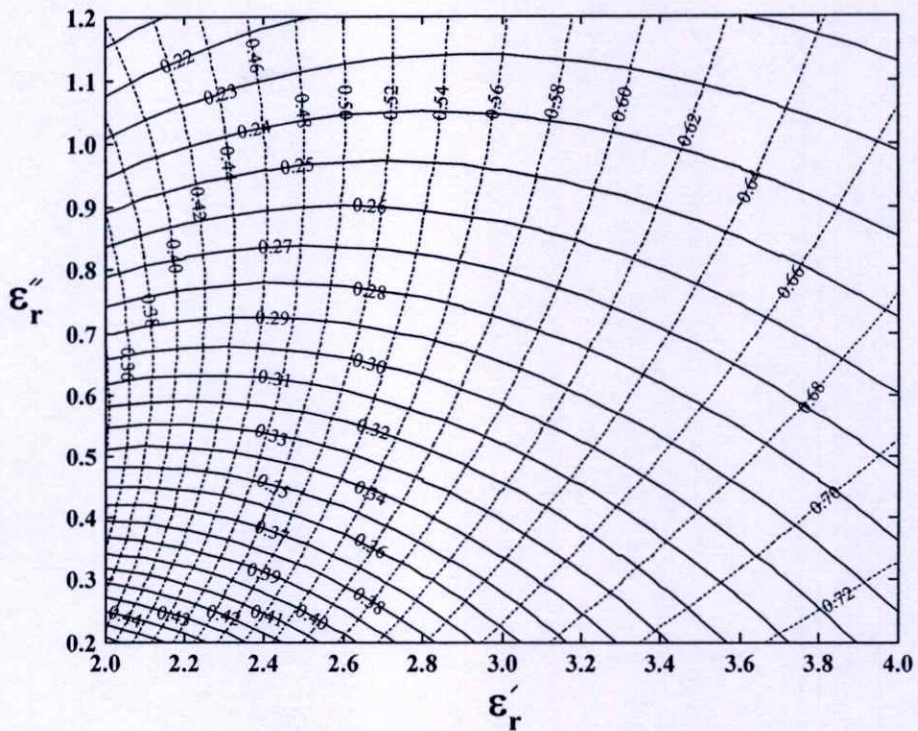
$d$	ช่วงของค่า $ S_{11} $	ช่วงของค่า $ S_{21} $
$\lambda/16$	$0.30 \leq  S_{11}  \leq 0.66$	$0.43 \leq  S_{21}  \leq 0.61$
$\lambda/8$	$0.32 \leq  S_{11}  \leq 0.72$	$0.31 \leq  S_{21}  \leq 0.55$
$3\lambda/16$	$0.34 \leq  S_{11}  \leq 0.72$	$0.21 \leq  S_{21}  \leq 0.46$



(n)



(ni)



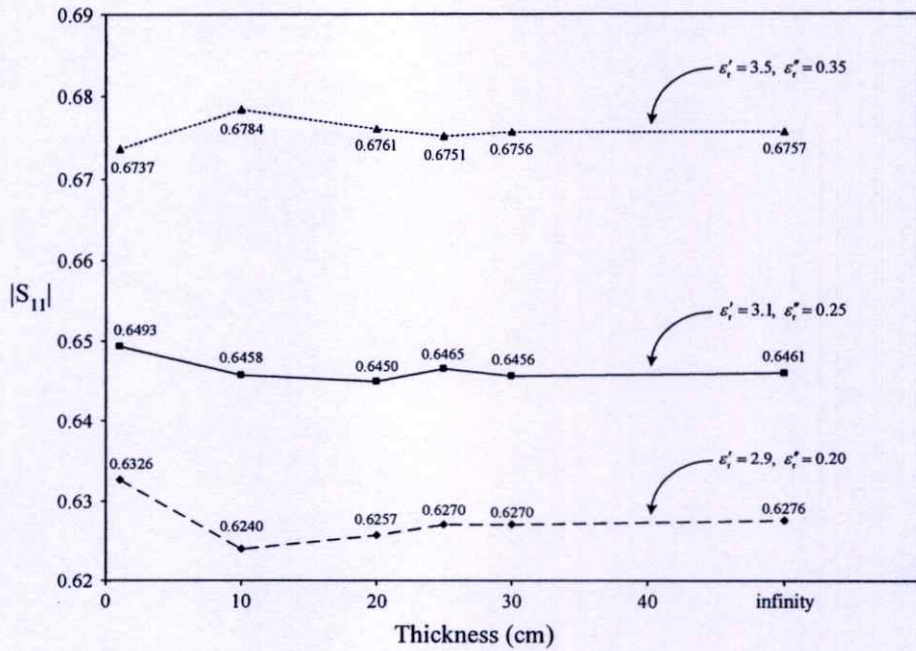
(ค)

 $|S_{11}|$  .....  $|S_{21}|$  ———

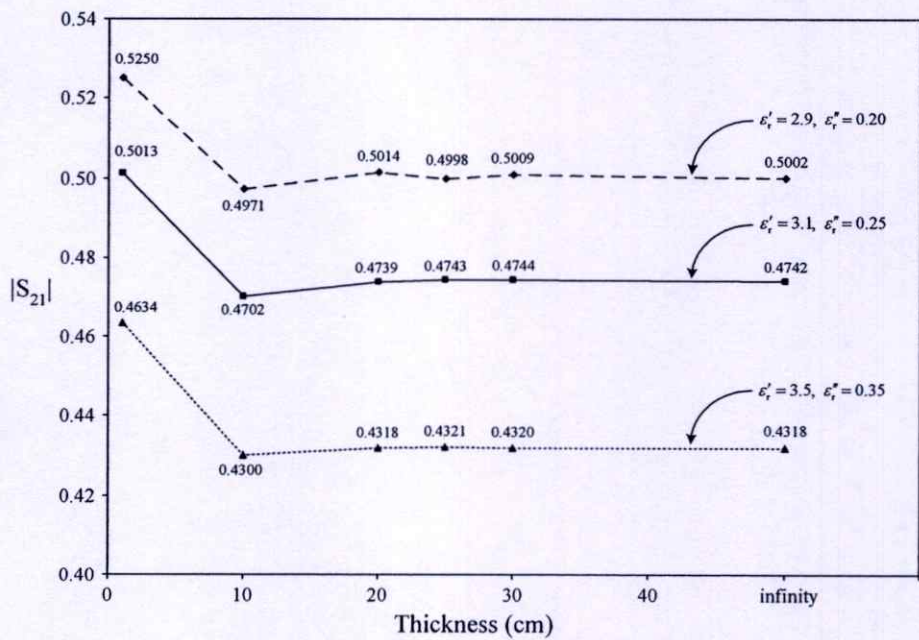
รูปที่ 3.2 กราฟพื้นผิวของไดโพลคู่ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อระยะระหว่างไดโพลเปลี่ยนแปลง

(ก)  $d = \lambda/16$ (ข)  $d = \lambda/8$ (ค)  $d = 3\lambda/16$ 

อิทธิพลของความหนาของชั้นตัวกลางที่มีผลต่อการวัดค่าของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งผลการคำนวณจากโปรแกรมจำลองแบบ เมื่อชั้นตัวกลางมีความหนามากกว่า 30 เซนติเมตร จนถึงความหนาอนันต์ ค่าของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระดับทศนิยมตำแหน่งที่ 4 โดยค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 3.3 ทั้ง 3 เส้นแสดงถึงค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่สัมพันธ์กัน[80] ดังตารางที่ 3.2 จากผลการคำนวณนี้ พบว่าค่าของ  $|S_{11}|$  แปรผันตามความชื้นของข้าวเปลือก แต่ค่าของ  $|S_{21}|$  แปรผกผันกับความชื้นของข้าวเปลือก จะนำไปกำหนดความหนาของข้าวเปลือกในการทดสอบในทางปฏิบัติได้ ตามแนวคิดหลักการที่ขนาดของตัวกลางที่ทำการทดสอบขนาดจำกัดมีผลให้ค่า  $|S_{21}|$  เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่พิจารณาตัวกลางที่ทำการทดสอบขนาดอนันต์ จึงได้ทำการจำลองแบบเงื่อนไขการคำนวณในโปรแกรม IE3D โดยกำหนดให้ข้าวเปลือกมีความหนา 30 เซนติเมตร และพิจารณาในเงื่อนไขที่ข้าวเปลือกมีความชื้นสูงและต่ำ ซึ่งมีค่า  $(\epsilon_r', \epsilon_r'') = (2.9, 0.2)$  และ  $(3.5, 0.35)$  ตามลำดับ จากผลการจำลองแบบพบว่า ในกรณีที่ข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำและสูง ค่า  $|S_{21}|$  ของการจำลองแบบสำหรับขนาดจำกัดจะมากกว่ากรณีของการจำลองแบบสำหรับขนาดอนันต์เล็กน้อย ซึ่งสิ่งนี้ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 กราฟของโคโพลาร์ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อความหนาของวัสดุเปลี่ยนแปลง

(ก) |S<sub>11</sub>|(ข) |S<sub>21</sub>|

ของความผิดพลาดในกรณีที่มีความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์ตรวจรู้นี้จึงต้องพิจารณาขนาดของขั้วเปลือกที่เหมาะสมเพื่อความถูกต้องในการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ที่สัมพันธ์กับค่าความถี่และความชื้นของ  
ข้าวเปลือก

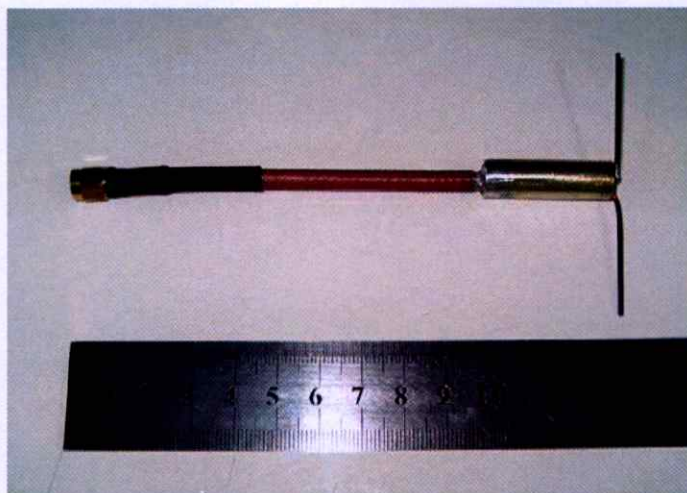
$\epsilon_r'$	$\epsilon_r''$	$\tan \delta$	ความถี่(ชม.)	ความชื้น(%)
2.9	0.20	0.069	33.2	14.61
3.1	0.25	0.081	27.4	16.27
3.5	0.35	0.100	20.8	18.55

### 3.3 การออกแบบระบบการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อเหนือตัวกลาง

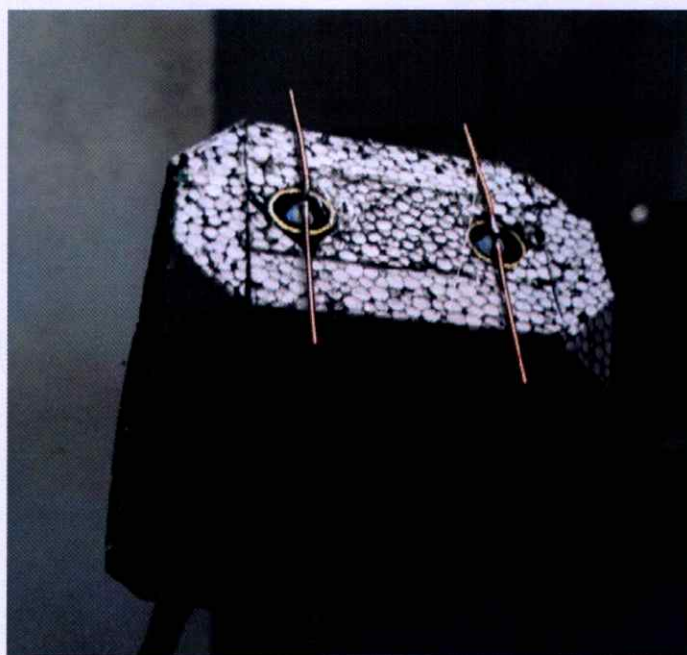
#### 3.3.1 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก

เพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอในการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ทดสอบโดยการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ ในขั้นแรกได้ออกแบบการทดลองโดยใช้สายอากาศไดโพลวัดตัวกลางที่เป็นน้ำ อันเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย อีกทั้งข้อมูลทางด้านค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานหาได้โดยทั่วไป [2] และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8530A ในการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  แล้ววาดลงในกราฟพื้นผิวในระนาบของ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  ที่ได้จากการจำลองแบบโดยโปรแกรม IE3D เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน โดยใช้โพรบไดอิเล็กตริก [80]

สายนำสัญญาณแบบตัวนำแฝด(Twin-lead transmission line) เป็นสายนำสัญญาณที่มีความสมมาตรและมีความสมดุล ส่วนสายเคเบิลแกนร่วมเป็นสายนำสัญญาณแบบที่ไม่ได้ดุล เนื่องจากตัวนำด้านในและด้านนอกมีการเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีความยาวทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน จึงเกิดความไม่สมดุลขึ้นเป็นผลให้กระแสสุทธิไหลลงกราวด์จากทางด้านนอกของตัวนำด้านนอก อุปกรณ์ที่ใช้ปรับระบบให้สมดุลได้โดยการกำจัดกระแสด้านนอกนี้เรียกว่า บาลัน (Baluns) และบาลันประเภทหนึ่งที่เรียกว่า บาลันบาซูกา (Bazooka balun) โดยจะมีปลอกโลหะที่มีความยาว  $\lambda/4$  ลัดวงจรที่ปลายข้างหนึ่งเข้ากับตัวนำด้านนอก ซึ่งเงื่อนไขทางไฟฟ้าจะพิจารณาได้ว่า อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตปลายเปิดของสายนำสัญญาณความยาว  $\lambda/4$  ที่ลัดวงจรมีค่าสูงมาก(มีค่านันต์ในทางอุดมคติ) ดังนั้นกระแสสุทธิจะถูกโง้ก ทำให้ระบบของสายอากาศนี้เข้าใกล้สมดุลได้ [71] ซึ่งจากคุณสมบัตินี้จึงได้ออกแบบสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นที่เหมือนกัน 2 ตัวให้ใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 12.24 เซนติเมตร สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 โดยการป้อนสัญญาณที่กึ่งกลางสายอากาศ รูปที่ 3.4(ก) แสดงสายอากาศไดโพล แบบมีปลอกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่สร้างขึ้นจริงและรูปที่ 3.4(ข) แสดงการเตรียมสายอากาศไดโพลแบบมีปลอกคู่เพื่อใช้ในการทดลองโดยมี



(ก)



(ข)

### รูปที่ 3.4 สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

(ก) มิติของสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก

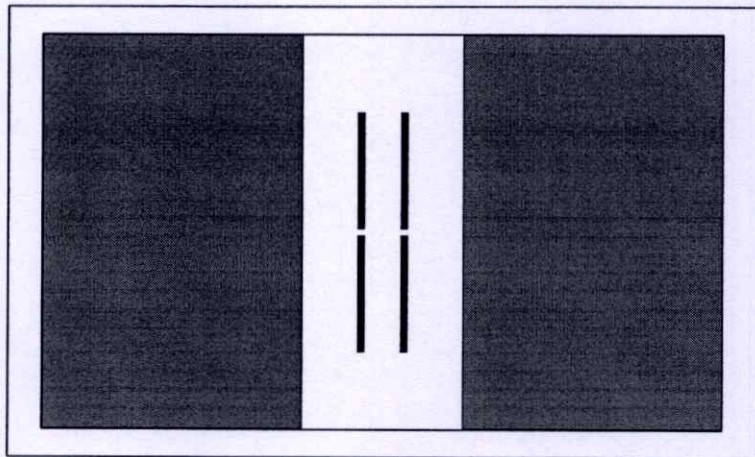
(ข) สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกคู่ที่ติดด้วยตัวดูดซับคลื่น

การติดด้วยตัวดูดซับคลื่นเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากคลื่นสะท้อนและสัญญาณที่กระเจิงจากปลอกโลหะและสายนำสัญญาณ อีกทั้งยังเป็นตัวคำนวณในการกำหนดตำแหน่งของระยะห่างระหว่างสายอากาศด้วย

### ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก

ความยาวของไดโพล ( $l$ )	5.7 เซนติเมตร
ความยาวของปลอกโลหะ	2.9 เซนติเมตร
ความยาวของสายนำสัญญาณ	11.7 เซนติเมตร

#### 3.3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

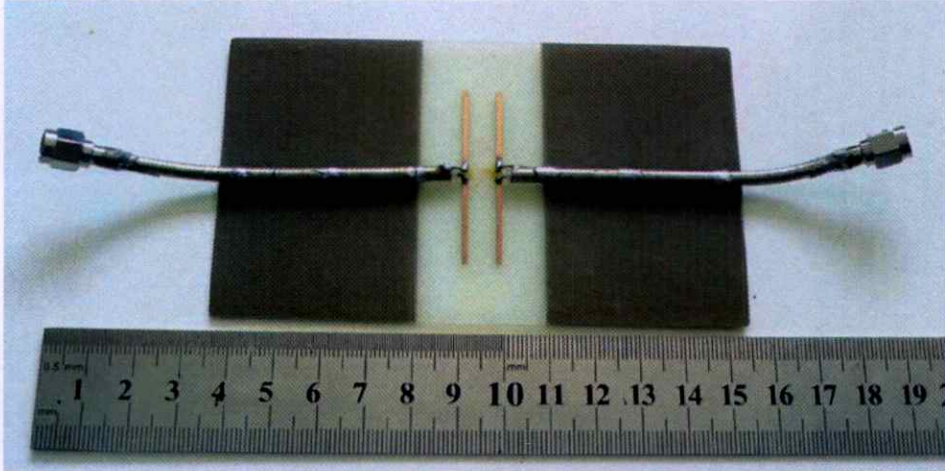


รูปที่ 3.5 สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้จากการจำลองแบบ

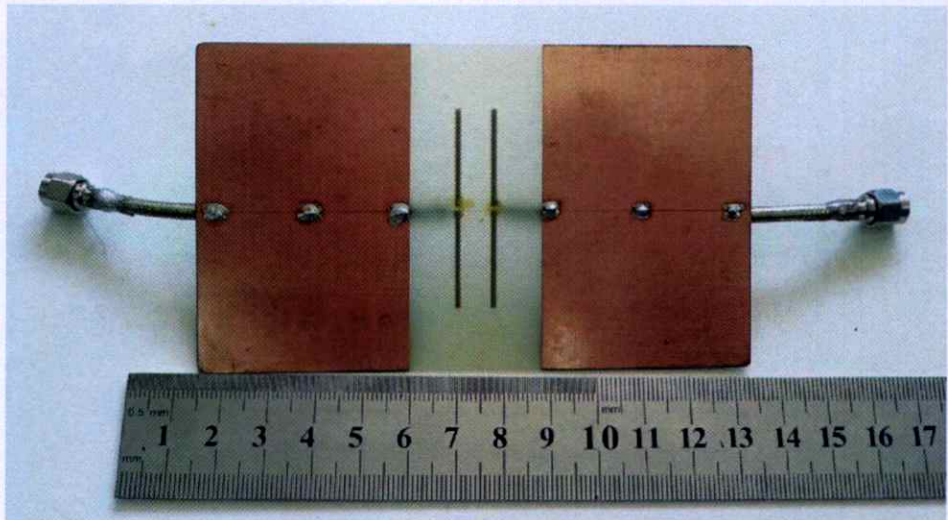
เนื่องจากสายอากาศไดโพลแบบมีปลอกมีขั้นตอนในการสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยาก อีกทั้งแนวคิดของการพัฒนาระบบการวัดทดสอบวัสดุ ต้องการให้สร้างและใช้งานง่าย จึงออกแบบโครงสร้างของสายอากาศไดโพลใหม่ ในรูปแบบของสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีข้อได้เปรียบในแง่ของการสร้างให้ได้เงื่อนไขของระยะห่างของระหว่างสายอากาศได้แม่นยำตั้งแต่ในขั้นตอนของการสร้าง การออกแบบสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์อาศัยการจำลองแบบจากโปรแกรม IE3D โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate) มีค่าเท่ากับ 4.36 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ รูปที่ 3.5 แสดงสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งป้อนสัญญาณที่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งสอง โดยสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม และแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ทั้ง 2 แผ่นคือ ระบายกราวด์ของสายอากาศ จากการวิเคราะห์การปรับพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ผ่านมา ทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่สร้างใช้งานจริง แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยในการวัดทดสอบจะวางให้ด้านล่างของสายอากาศ ดังรูปที่ 3.6(ข) สัมผัสกับวัสดุที่ทดสอบ

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

ความยาวของไดโพล ( $l$ )	4.33 เซนติเมตร
ระยะระหว่างสายอากาศ ( $d$ )	0.76 เซนติเมตร
ขนาดของระนาบกราวด์	$69.83 \times 45.25$ ตารางเซนติเมตร



(ก)



(ข)

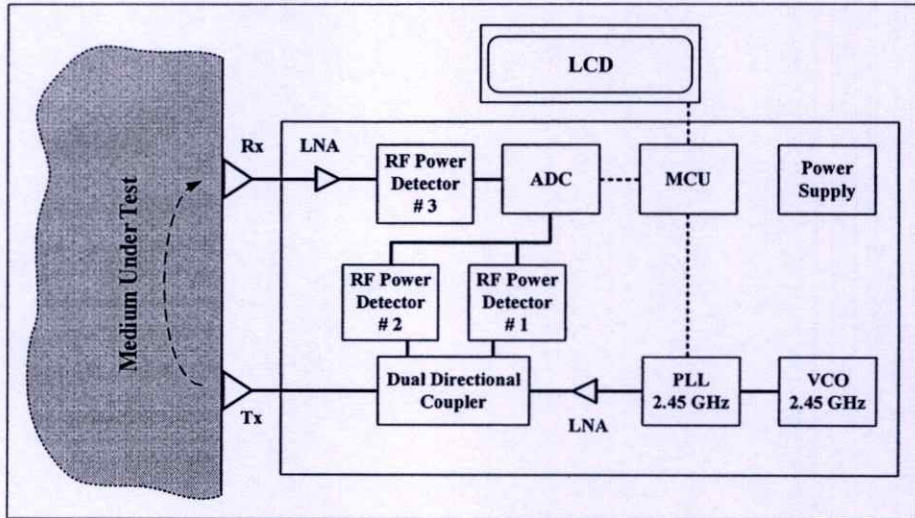
รูปที่ 3.6 สายอากาศไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

### 3.3.3 การออกแบบมอดูลของระบบการวัด

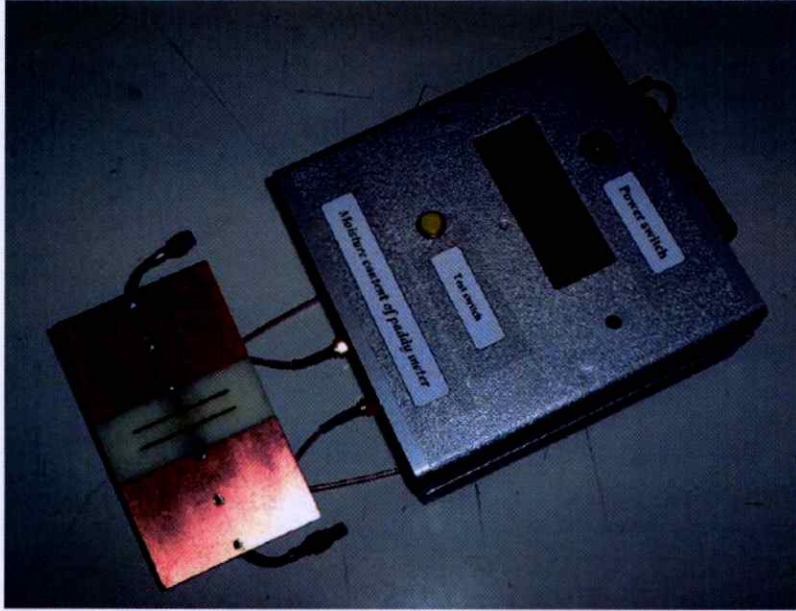
#### 3.3.3.1 หลักการทำงานของระบบที่ออกแบบ



รูปที่ 3.7 ผังงานของระบบที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบการวัดพร้อมทั้งผลการทดสอบที่ทำให้เห็นถึงประโยชน์ของระบบนี้ เพื่อให้ผู้อุปกรณ์ตรวจรู้นี้ใช้งาน ได้จริงได้ในทางปฏิบัติ ระบบการทดสอบจะต้องใช้ง่าย ราคาไม่สูงและผลการวัดมีความแม่นยำที่เหมาะสม[81] รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นถึงระบบการวัดที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยภาคส่งและภาครับ โดยมอดูลด้านภาคส่งประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยแรงดัน (MAX2753 monolithic VCO) และเฟสล็อกคูล (LMX2347 PLL) สำหรับกำเนิดสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่มีกำลังงานเอาต์พุต -8.3 dBm ซึ่งจะถูกลบโดย วงจรขยายที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (MAX2641 LNA) ที่มีอัตราขยาย 13.5 dB กำลังงานของสัญญาณที่ตกกระทบและสะท้อนถูกวัดผ่านคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทางคู่ซึ่งมีตัวประกอบการเชื่อมต่อเท่ากับ 21 dB โดยตัวตรวจจับกำลังงาน (MAX4003 RF power detectors) ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สัญญาณที่ส่งออกมาจะแพร่กระจายคลื่นผ่านสายอากาศไดโพลและเชื่อมต่อ (Coupled) ผ่านตัวกลางที่ทดสอบไปยังสายอากาศไดโพลด้านรับ ในมอดูลด้านภาครับ สัญญาณที่รับได้จะผ่านวงจรขยายซึ่งมีสัญญาณรบกวนต่ำที่มีอัตราขยาย 13.5 dB ซึ่งกำลังงานของสัญญาณที่เชื่อมต่อนี้จะถูกวัดโดยตัวตรวจจับกำลังงานตัวที่ 3 กำลังงานของสัญญาณต่างๆจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยตัวตรวจจับกำลังงาน แรงดันเอาต์พุตจากตัวตรวจจับกำลังงานนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณเชิงเลขโดยวงจรแปลงสัญญาณเชิงอุปมานเป็นสัญญาณเชิงเลขขนาด 12 บิต (MAX1272 ADC) เมื่อกำหนดแรงดันอ้างอิงให้เท่ากับ 5 โวลต์ จะสามารถแยกแยะระดับสัญญาณได้ที่ความละเอียดเท่ากับ

$\frac{5}{2^{12}} = 1.22$  มิลลิโวลต์ ซึ่งสัญญาณเชิงเลขนี้จะถูกประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต (PIC16F84A 8 bits microcontroller) และแสดงค่าแรงดันของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อบนหน้าจอแสดงผล (LCD) ในที่สุด ซึ่งแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในระบบทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ สำหรับสายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์และระบบการวัดที่สร้างใช้งานจริงแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์และมอดูลของระบบการวัด

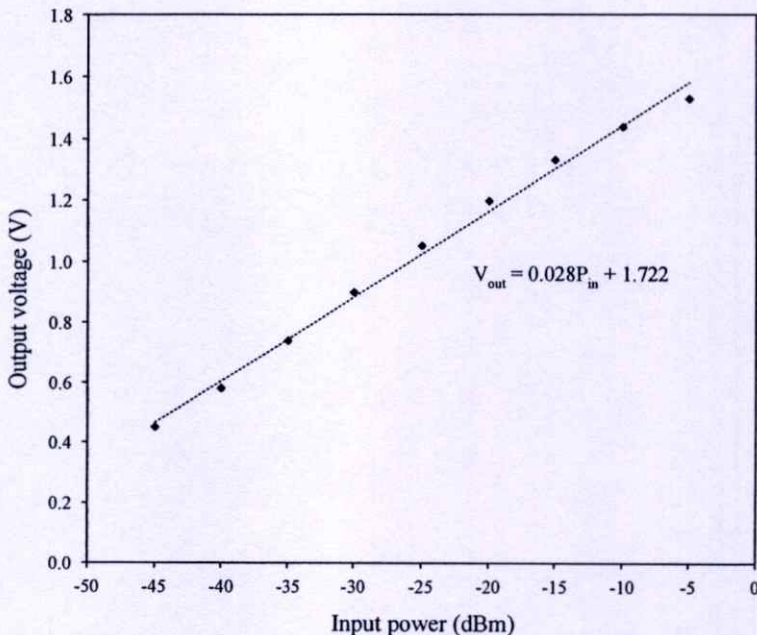
### 3.3.3.2 การเปรียบเทียบเครื่องมือเพื่อชดเชยความสูญเสียของระบบสายนำสัญญาณภายใน

ขั้นตอนในการเปรียบเทียบเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดจากการสูญเสียในระบบสายนำสัญญาณภายในเครื่องมือ และจากตัวตรวจจับกำลังงาน โดยคุณลักษณะของตัวตรวจจับกำลังงาน ในเงื่อนไขที่โหลดและแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม และ 5 โวลต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ค่ากำลังงานอินพุตที่มีหน่วยเป็น dBm และแรงดันเอาต์พุตที่มีหน่วยเป็น โวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_{out} \text{ (V)} = 0.028P_{in} \text{ (dBm)} + 1.722 \quad (3.1)$$

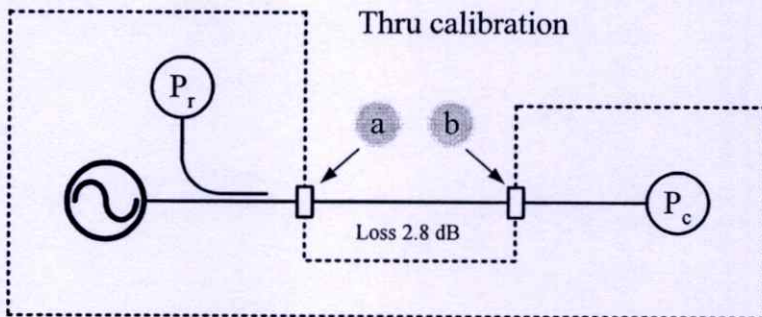
เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (3.1) ใหม่จะได้เป็น

$$P_{in} \text{ (dBm)} = \frac{V_{out} \text{ (V)} - 1.722}{0.028} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและแรงดันที่ตรวจวัดได้โดยตัวตรวจจับกำลังงาน

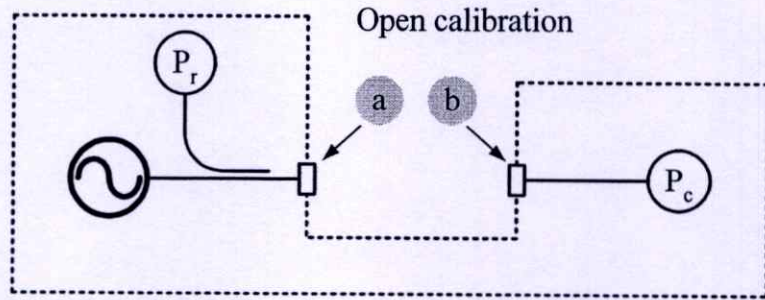
1. การปรับเทียบโดยการต่อผ่าน (Thru calibration)



รูปที่ 3.10 ผังงานของการปรับเทียบโดยการต่อผ่าน

ขั้นตอนของการปรับเทียบโดยการต่อผ่านทำได้โดยต่อสายเคเบิลแกนร่วมเข้ากับทางเข้าออกของเครื่องมือที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.10 ที่ตำแหน่ง a และ b ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ส่งผ่านสัญญาณได้แรงที่สุด สายเคเบิลแกนร่วมที่ใช้มีการสูญเสีย 2.8 dB เมื่อใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) วัดขนาดของสัญญาณที่ตำแหน่ง b ได้เป็น -11.1 dBm ดังนั้นวัดขนาดของสัญญาณที่ตำแหน่ง a ได้เป็น -8.3 dBm ในขั้นตอนนี้อ่านค่าแรงดันเฉลี่ยที่  $P_c$  ได้เท่ากับ 1.190 โวลต์ ซึ่งจากสมการที่ (3.2) จะได้  $P_c$  เฉลี่ยเท่ากับ -19.0 dBm ดังนั้นค่าการสูญเสียเฉลี่ยของสายนำสัญญาณจากตำแหน่ง b ถึง  $P_c$  เท่ากับ  $-11.1 - (-19.0) = 7.9$  dB

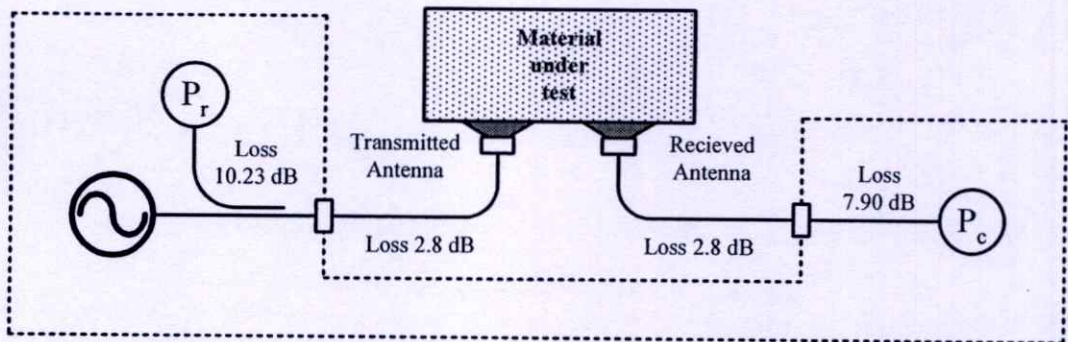
## 2. การปรับเทียบโดยการเปิด (Open calibration)



รูปที่ 3.11 ผังงานของการปรับเทียบโดยการเปิด

ขั้นตอนของการปรับเทียบโดยการเปิดทำได้โดยต่อชุดปรับเทียบมาตรฐานแบบเปิด (Open calibration kit) เข้ากับทางเข้าออกของเครื่องมือที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.11 ที่ตำแหน่ง a ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สัญญาณสะท้อนกลับเข้าที่  $P_r$  ได้แรงที่สุด ในขั้นตอนนี้อ่านค่าแรงดันเฉลี่ยที่  $P_r$  ได้เท่ากับ 1.203 โวลต์ ซึ่งจากสมการที่ (3.2) จะได้  $P_r$  เฉลี่ยเท่ากับ -18.53 dBm ดังนั้นค่าการสูญเสียเฉลี่ยของสายนำสัญญาณจากตำแหน่ง a ถึง  $P_r$  เท่ากับ  $-8.3 - (-18.53) = 10.23$  dB

### 3.3.3.3. การหาค่า $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.12 ผังงานของระบบเครื่องมือที่ได้ปรับเทียบแล้ว

ขั้นตอนในการปรับเทียบระบบทำให้สามารถหาค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆ ในระบบที่มีการต่อใช้งานดังรูปที่ 3.12 เพื่อชดเชยผลการวัดทดสอบ ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ค่ากำลังงานของ  $P_r$ ,  $P_r$  และ  $P_c$  ในการคำนวณค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  จะมีหน่วยเป็นวัตต์ ความสัมพันธ์ของกำลังงานที่มีหน่วยเป็นวัตต์และหน่วย dBm เป็นดังนี้

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \left( \frac{P(W)}{0.001(W)} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (3.3) ใหม่จะได้เป็น

$$P(W) = 0.001 \times 10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}} \quad (3.4)$$

ค่าของ  $P_r$  ก็ใช้สมการที่ (3.4) เพื่อการแปลงหน่วยดังกล่าว เนื่องจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นแสดงผลของกำลังงานออกมาเป็นค่าแรงดันของสัญญาณที่สะท้อน ( $V_r$ ) และเชื่อมต่อ ( $V_c$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) และการชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆตามรูปที่ 3.12 จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

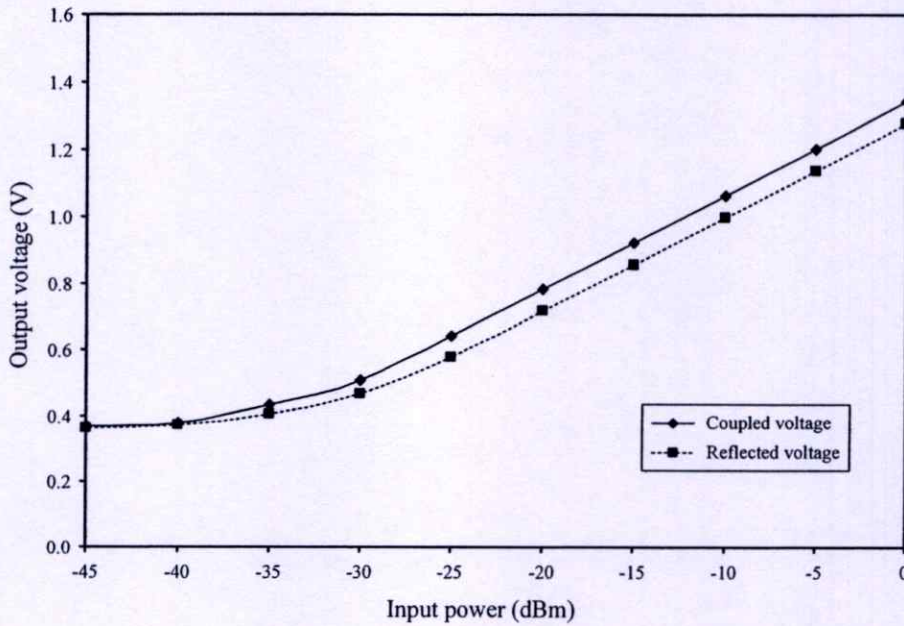
การหา  $P_r$

1. แปลงค่า  $V_r$  ที่อ่านได้จากเครื่องมือเป็น  $P_r$  โดยใช้สมการที่ (3.2)
2. ชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆตามรูปที่ 3.12 สำหรับกรณีของค่าสัญญาณที่สะท้อนกลับคือ ลบด้วย (2.8+2.8+10.23) dB
3. ใช้สมการที่ (3.4) เพื่อแปลงเป็นค่า  $P_r$  ที่มีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในสมการที่ (2.79) เพื่อคำนวณค่า  $|S_{11}|$

การหา  $P_c$

1. แปลงค่า  $V_c$  ที่อ่านได้จากเครื่องมือเป็น  $P_c$  โดยใช้สมการที่ (3.2)
2. ชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆตามรูปที่ 3.12 สำหรับกรณีของค่าสัญญาณที่เชื่อมต่อคือ ลบด้วย (2.8+2.8+7.9) dB
3. ใช้สมการที่ (3.4) เพื่อแปลงเป็นค่า  $P_c$  ที่มีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในสมการที่ (2.80) เพื่อคำนวณค่า  $|S_{21}|$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อที่ได้รับการชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆในระบบแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.13 เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ในรูปที่ 3.12 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.37 โวลต์ (-43 dB) คูณกับกำลังงานของภาคส่ง กำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณเฟสล็อกที่ผ่านวงจรขยายแล้วเท่ากับ -8 dBm ผ่านคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางคู่ซึ่งมีตัวประกอบการเชื่อมต่อเท่ากับ 21 dB สัญญาณจะมีขนาดเท่ากับ -24.9 dBm ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ยังอยู่ในช่วงการใช้งานที่เป็นเชิงเส้นของตัวตรวจจับกำลังงานนี้



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและแรงดันที่ตรวจวัดได้จากสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อได้รับการชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณต่างๆ

### 3.4 สรุป

จากข้อมูลของผลการจำลองแบบได้นำมาสู่การออกแบบการทดลองและสร้างระบบการวัดทดสอบเพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของตัวกลางที่ทดสอบ โดยสำหรับเทคนิคของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลได้ออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งในขั้นแรกได้จัดการทดลองเพื่อวัดตัวกลางที่เป็นมาตรฐานคือ น้ำ เพื่อยืนยันหลักการ โดยได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ ในขั้นถัดไปได้ออกแบบมอดูลสำหรับการวัดเพื่อทดแทนการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในบทถัดไปจะแสดงผลการทดลองต่างๆเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์และออกแบบระบบการวัดโดยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับ

### 4.1 บทนำ

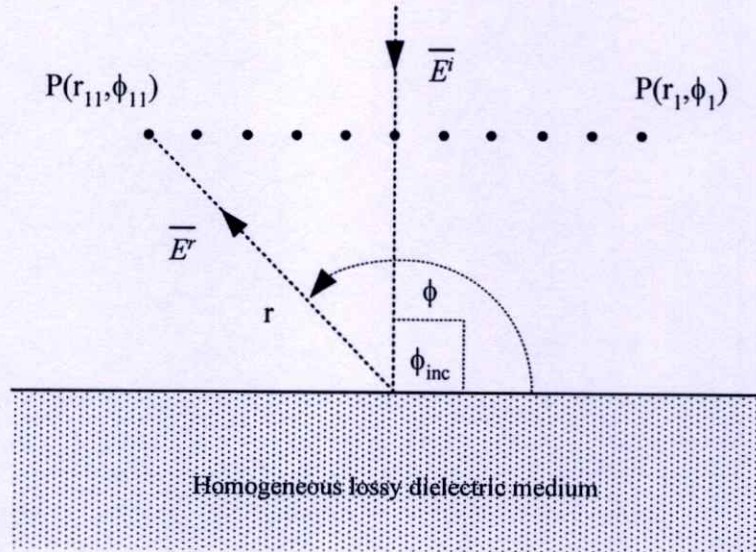
การนำเสนอทฤษฎีของการหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์เพื่อพัฒนาไปสู่ระบบที่ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมที่มีระบบสายพานการผลิตที่ต่อเนื่อง ซึ่งระบบต้องมีส่วนประมวลผลที่มีความซับซ้อนขึ้นสำหรับใช้กับเทคนิคการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด ในการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกจากคลื่นที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ โดยมีสายอากาศรับคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆที่กำหนด ซึ่งก็คือลักษณะของการคำนวณย้อนกลับในโดเมนเชิงพิกัดนั่นเอง ดังนั้นปัจจัยทางกายภาพในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ที่จะทำให้การหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์จากตัวกลางที่ทดสอบมีประสิทธิภาพในการทดสอบมากที่สุด โดยการใช้การคำนวณจากสูตรสมการเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆอย่างเหมาะสม

ในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการของระบบในการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยวัดคลื่นสะท้อนจากวัสดุและใช้การคำนวณย้อนกลับที่มีพื้นฐานมาจากวิธีสเตียเปสแตสเซนต์ (Steepest descent) และการวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ในกรณีต่างๆ

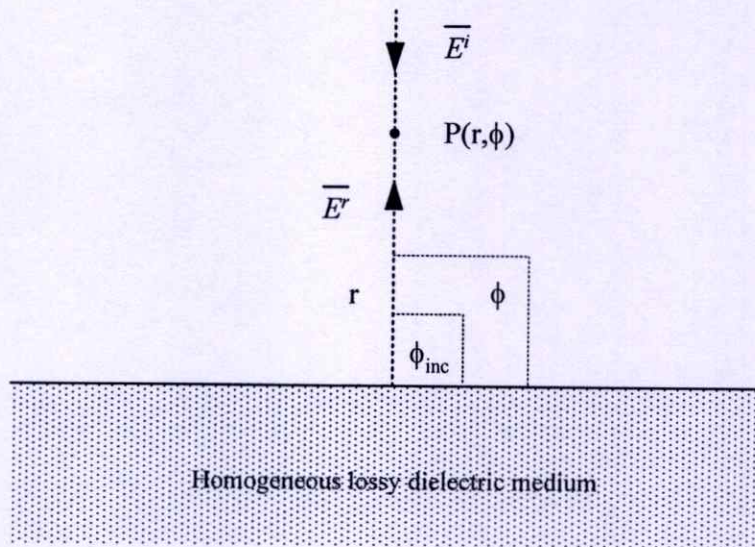
### 4.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณ

#### 4.2.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการคำนวณจากโดเมนเชิงความถี่และเชิงพิกัด

การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียของตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเนื้อเดียวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ ในกรณีของการจำลองแบบในโดเมนเชิงพิกัด ตำแหน่งของสายอากาศรับคลื่นจะถูกกำหนดโดย  $(r, \phi)$  ซึ่ง  $r$  คือระยะทางของจุดสังเกตมีหน่วยเป็นเมตร และ  $\phi$  คือมุมของการสะท้อนมีหน่วยเป็นองศา การคำนวณในโดเมนเชิงพิกัดได้กำหนดจุดสังเกตไว้ 11 จุดในแนวเส้นตรง ซึ่งมีพิกัดดังนี้คือ (1.56,40), (1.31,50), (1.15,60), (1.06,70), (1.01,80), (1.00,90), (1.01,100), (1.06,110), (1.15,120), (1.31,130) และ (1.56,140) ดังรูปที่ 4.1(ก) โดยกำหนดให้ความถี่คงที่ที่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ [65] กรณีของการคำนวณการจำลองแบบในโดเมนเชิงความถี่ ดังรูปที่ 4.1(ข) กำหนดให้ตำแหน่งคงที่ที่ระยะของจุดสังเกตเท่ากับ 1 เมตรและมุมสะท้อนเป็น 90 องศา ซึ่งเปลี่ยนแปลงความถี่ 11 ค่าดังนี้คือ 2.20, 2.25, 2.30, 2.35, 2.40, 2.45, 2.50, 2.55, 2.60, 2.65 และ 2.70 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อทดสอบสมรรถนะการ



(ก)



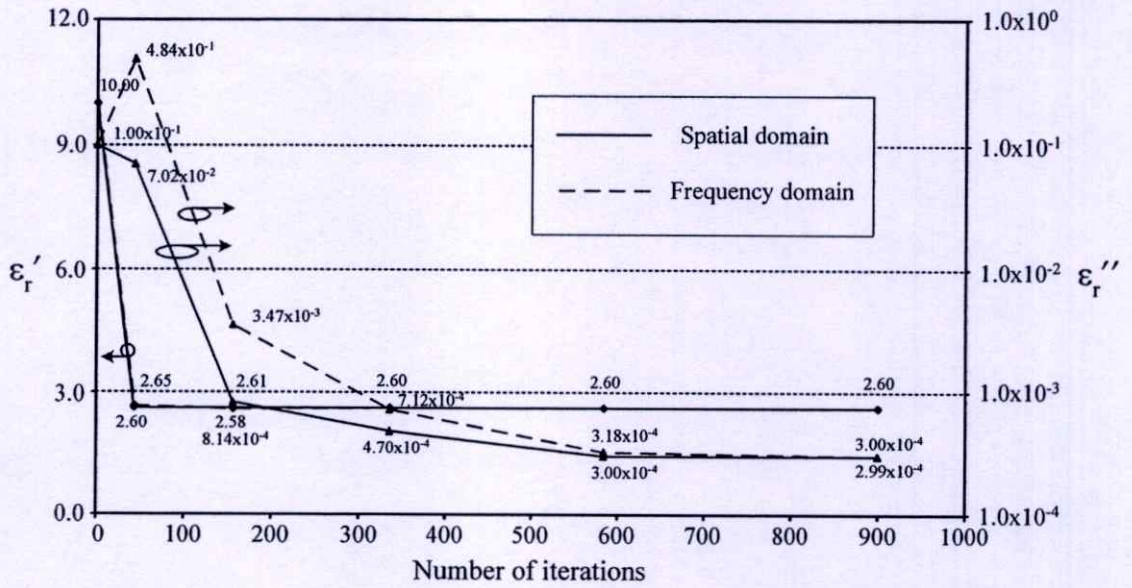
(ข)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างปัญหาที่คำนวณสนามไฟฟ้าสะท้อนโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด

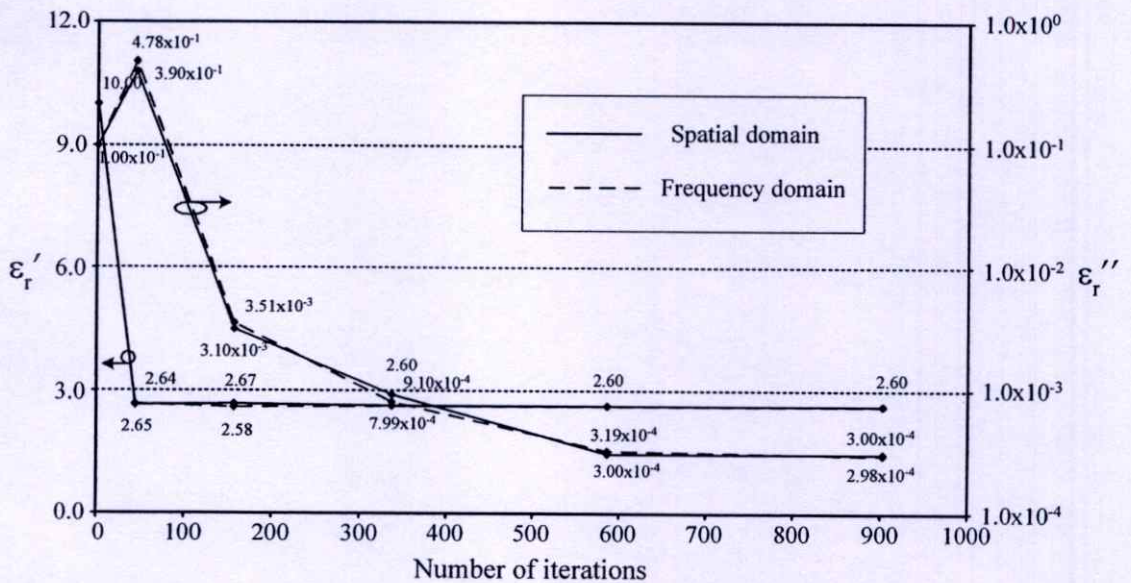
(ก) โดเมนเชิงพิกัด

(ข) โดเมนเชิงความถี่

คำนวณของอัลกอริทึม สำหรับค่าจำลองแบบที่ใช้ในการคำนวณได้กำหนดตาม [65] ซึ่งเป็นบทความที่นำเสนอการหาค่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบความสูญเสียของแผ่นไม้อัด (Moist density fiber board) โดยการคำนวณย้อนกลับจากสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับในโดเมนเชิงความถี่ ซึ่งแผ่นไม้อัดที่ทดสอบมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.6 และค่าตัวประกอบความสูญเสียเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-4}$  และกำหนดค่าการผ่อนผัน (Tolerance) ของการคำนวณไว้ที่  $10^{-6}$  เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับ



(ก)



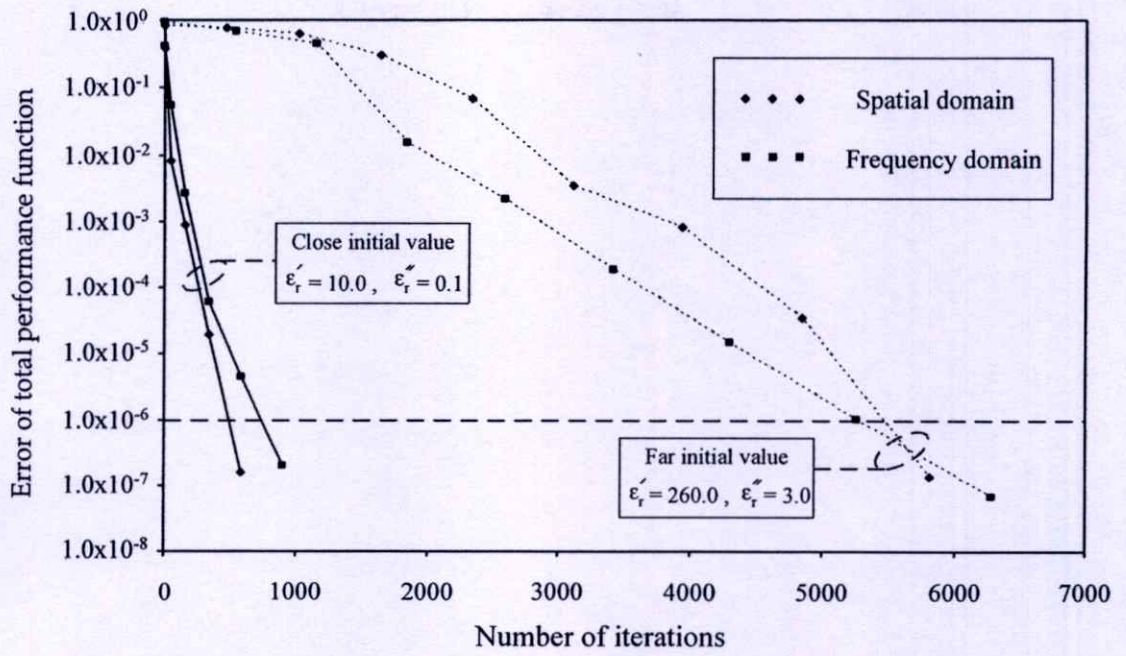
(ข)

รูปที่ 4.2 ผลการทำให้เหมาะสมที่สุดของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ในโดเมนเชิงความถี่และ

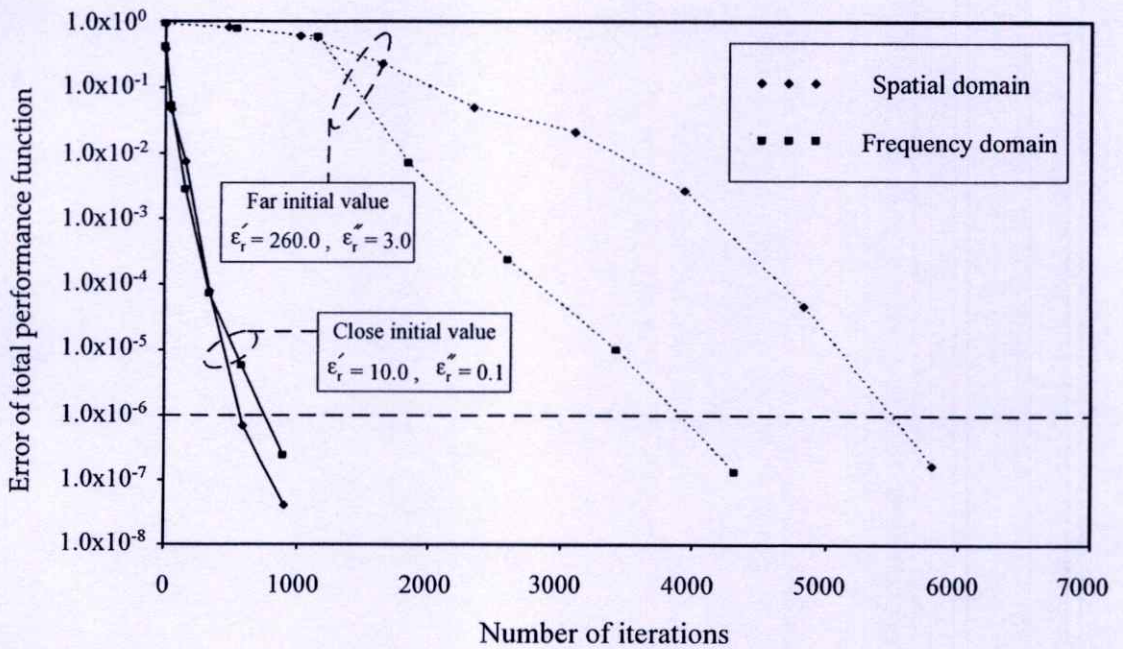
โดเมนเชิงพิกัด เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นค่า  $\epsilon_r' = 10.0$  และค่า  $\epsilon_r'' = 0.1$

(ก) โพลาริซ์แบบตั้งฉาก

(ข) โพลาริซ์แบบขนาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดของผลการทำให้เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันสมรรถนะรวม

(ก) โพลาริซ์แบบตั้งฉาก

(ข) โพลาริซ์แบบขนาน

รูปที่ 4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงผลการทำให้เหมาะสมที่สุดของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพันธ์ต่อจำนวนการคำนวณแบบวนซ้ำในโดเมนเชิงความถี่และเชิงพิกัด เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นค่า  $\epsilon'_r = 10.0$  และค่า  $\epsilon''_r = 0.1$  จากผลการจำลองแบบพบว่า การคำนวณทั้งในโดเมนเชิงความถี่และเชิงพิกัดสามารถคำนวณเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้เหมือนกัน เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากและแบบขนาน จำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำของโดเมนเชิงความถี่และเชิงพิกัดเท่ากันคือ 900 รอบ

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณที่ใกล้และไกลจากค่าเป้าหมายที่กำหนด กรณีกำหนดค่าเริ่มต้นใกล้กับค่าเป้าหมายที่กำหนดจะใช้จำนวนการคำนวณแบบวนซ้ำเท่ากับ 900 รอบ ยกเว้นกรณีการคำนวณในโดเมนเชิงพิกัดใช้ 584 รอบ และกรณีกำหนดค่าเริ่มต้นไกลกับค่าเป้าหมายที่กำหนดจะใช้จำนวนการคำนวณแบบวนซ้ำใกล้เคียงกันคือจาก 5,800 ถึง 6,284 รอบ ยกเว้นกรณีการคำนวณในโดเมนเชิงความถี่ใช้ 4,318 รอบ ซึ่งผลการคำนวณของทั้งสองโพลาริซ์ในแต่ละโดเมนนั้น ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทำให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณทั้งสองโดเมนนั้นน้อยกว่า 1 วินาที โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางเป็น Centrino Duo ความเร็ว 1.66 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีหน่วยความจำแรม 1.5 กิกะไบต์

#### 4.2.2 จำนวนตำแหน่งและระยะระหว่างสายอากาศ

ในทางปฏิบัติ ต้องการพัฒนาเป็นระบบไมโครคอนโทรลเลอร์แทนการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เนื่องจากอัลกอริทึมที่มีการลู่ออกของการคำนวณที่รวดเร็วซึ่งเป็นประโยชน์ ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนของการคำนวณวนซ้ำ เมื่อจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่รับสัญญาณที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ วางเรียงตัวในแนวเส้นตรงเหนือตัวกลางที่มีขนาดกึ่งอนันต์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อกำหนดระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ  $\lambda_0/2$  โดย  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในอวกาศว่างที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ในกรณีพิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากและแบบขนาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่าเมื่อขั้นตอนของการทำให้เหมาะสมที่สุดจบลง ค่าความผิดพลาดของการคำนวณค่า  $\epsilon'_r$  จะเท่ากับ 0 % ในขณะที่ผลการคำนวณค่า  $\epsilon''_r$  จะมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 % ยกเว้นกรณีจำนวนของสายอากาศเท่ากับ 4 5 และ 7 อย่างไรก็ตามพบว่า จำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำทั้งในกรณีสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากและแบบขนานค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีจำนวนของสายอากาศเท่ากับ 2 และ 7 สำหรับกรณีจำนวนตำแหน่งของสายอากาศเท่ากับ 4 จะมีจำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำ 1,778 รอบ ซึ่งในการคำนวณมีความผิดพลาดของ  $\epsilon'_r$  เท่ากับ 0 % และความผิดพลาดของ  $\epsilon''_r$  ในกรณีสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากและแบบขนานมีค่า 0.74 % และ 1.65 % ตาม ลำดับ ซึ่งเมื่อจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่รับคลื่นมีจำนวนน้อยลงจะทำให้จำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลของจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณาสนาม ไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉาก เมื่อกำหนดระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ  $\lambda_0/2$

จำนวนสายอากาศ (ตำแหน่ง)	จำนวนรอบของการ คำนวณแบบวนซ้ำ	ความผิดพลาด ของ $\varepsilon_r'$ (%)	ความผิดพลาด ของ $\varepsilon_r''$ (%)
2	4,185	0.00	0.45
3	5,134	0.00	0.25
4	1,778	0.00	0.74
5	1,312	0.00	2.33
6	1,748	0.00	0.19
7	908	0.00	0.26

ตารางที่ 4.2 อิทธิพลของจำนวนตำแหน่งของสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณาสนาม ไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบขนาน เมื่อกำหนดระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ  $\lambda_0/2$

จำนวนสายอากาศ (ตำแหน่ง)	จำนวนรอบของการ คำนวณแบบวนซ้ำ	ความผิดพลาด ของ $\varepsilon_r'$ (%)	ความผิดพลาด ของ $\varepsilon_r''$ (%)
2	5,018	0.00	0.13
3	5,166	0.00	0.32
4	1,778	0.00	1.65
5	1,770	0.00	0.35
6	1,748	0.00	0.03
7	1,748	0.00	1.06

จากผลการคำนวณเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของระยะระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากและแบบขนานในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าระยะระหว่างสายอากาศไม่ได้ทำให้ค่าความผิดพลาดและจำนวนของการคำนวณแบบวนซ้ำเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเปลี่ยนแปลงจาก  $0.5\lambda_0$  ถึง  $\lambda_0$  จะมีจำนวนของการคำนวณแบบวนซ้ำจาก 584 ถึง 2,890 รอบ เมื่อพิจารณาระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ  $0.9\lambda_0$  จะมีจำนวนของการคำนวณแบบวนซ้ำและค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงถือว่าการระยะระหว่างสายอากาศและจำนวนสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์นี้มีความเหมาะสมในการเตรียมการเพื่อทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.3 อิทธิพลของระยะระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบตั้งฉาก เมื่อสายอากาศรับคลื่นสะท้อนจำนวน 4 ตำแหน่ง

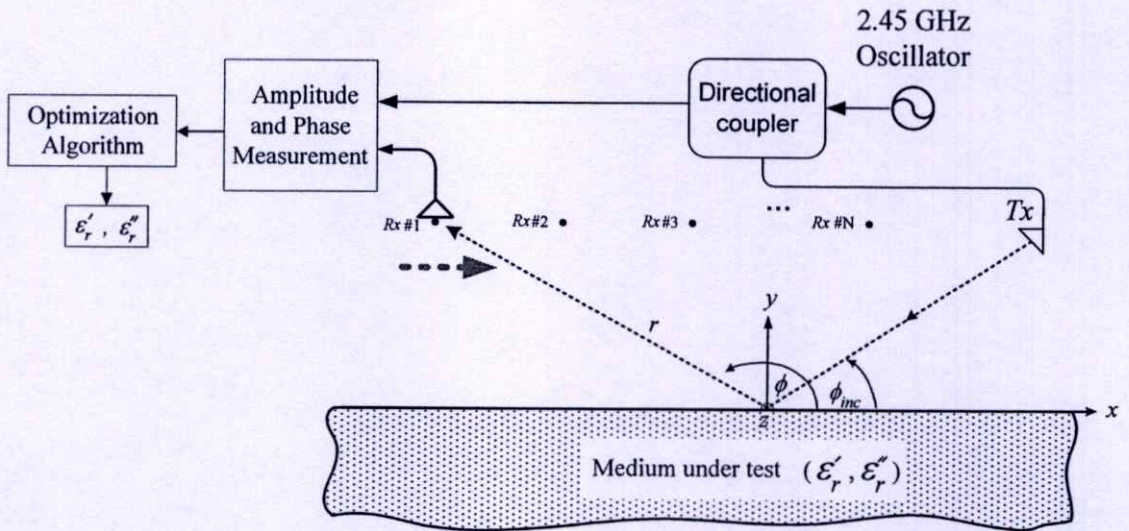
ระยะระหว่างสายอากาศ ( $n\lambda_0$ )	จำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำ	ความผิดพลาดของ $\varepsilon_r'$ (%)	ความผิดพลาดของ $\varepsilon_r''$ (%)
0.5	1,778	0.00	0.74
0.6	2,890	0.00	1.35
0.7	1,748	0.00	0.50
0.8	900	0.00	0.29
0.9	584	0.00	0.07
1.0	1,758	0.00	1.22

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของระยะระหว่างสายอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในกรณีพิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริซแบบขนาน เมื่อสายอากาศรับคลื่นสะท้อนจำนวน 4 ตำแหน่ง

ระยะระหว่างสายอากาศ ( $n\lambda_0$ )	จำนวนรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำ	ความผิดพลาดของ $\varepsilon_r'$ (%)	ความผิดพลาดของ $\varepsilon_r''$ (%)
0.5	1,778	0.00	1.65
0.6	2,890	0.00	1.08
0.7	1,748	0.00	1.36
0.8	900	0.00	0.51
0.9	584	0.00	0.03
1.0	1,758	0.00	0.21

#### 4.3 การออกแบบระบบสำหรับการวัดสนามสะท้อนเพื่อการคำนวณย้อนกลับ

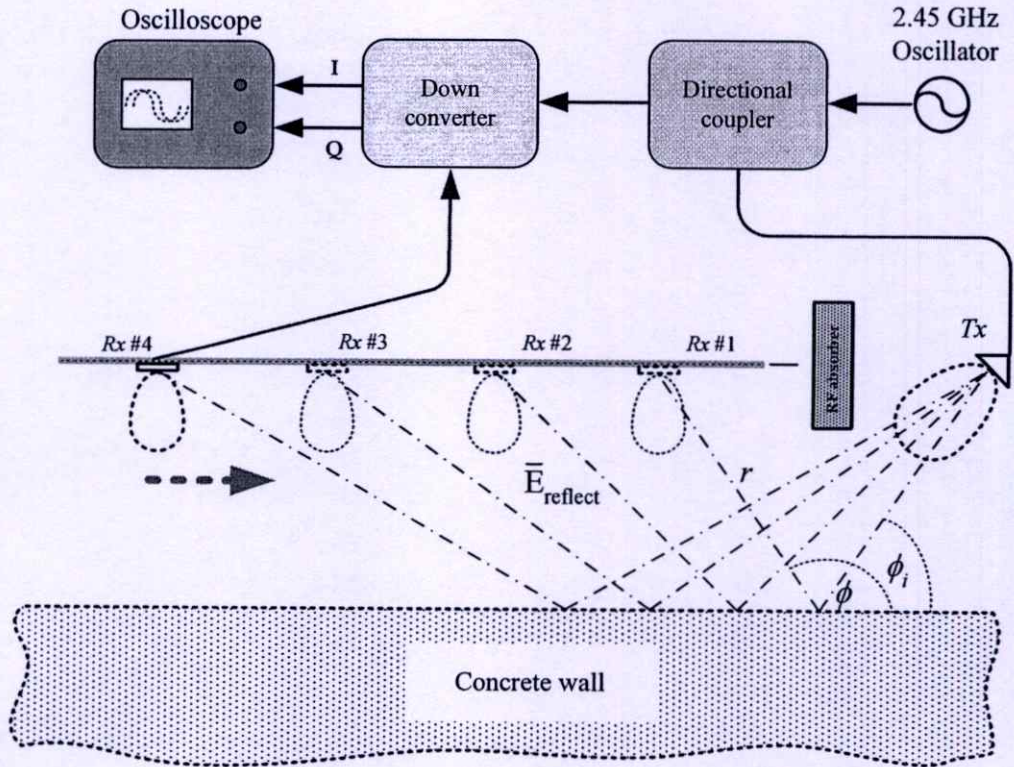
เมื่อกำหนดว่า ตัวกลางที่ทดสอบเป็นตัวกลางเอกพันธ์ (Homogeneous medium) จะกำหนดแบบจำลองของระบบการวัดสนามสะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบเพื่อการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยตัวกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ต่อกับคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทาง (Directional coupler) เพื่อแบ่งสัญญาณส่วนหนึ่งต่อกับสายอากาศส่ง ( $T_x$ ) ซึ่งจะส่งคลื่นไปยังตัวกลางที่ทดสอบ สัญญาณจะสะท้อนเข้าสายอากาศรับ 1 ตัวที่เลื่อนไป  $N$  ตำแหน่ง สัญญาณอีกส่วนหนึ่งที่ออกจากคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทางจะต่อเข้ากับมอดูลที่



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบการวัดสนามสะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบเพื่อการคำนวณย้อนกลับ โดยการทำให้เหมาะสมที่สุด

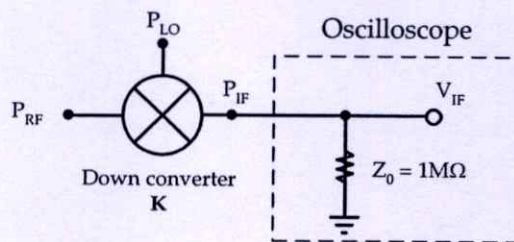
วัดสัญญาณที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ โดยสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศจะเป็นค่าเชิงซ้อนที่มีทั้งขนาดและเฟส ซึ่งจะนำสัญญาณนี้เข้าสู่อัลกอริทึมของการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุดที่มีพื้นฐานจากวิธีสตีปเปิลส์เดสเซนต์ ซึ่งเป็นการคำนวณแบบวนซ้ำให้ได้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของสัญญาณที่วัดได้กับสัญญาณที่คำนวณจากสมการมีค่าต่ำที่สุดเพื่อหาค่าของ  $\epsilon'_r$  และ  $\epsilon''_r$  ของตัวกลางที่ทดสอบ

ในการทดลองเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของหลักการดังกล่าว วัสดุที่จะนำมาทดสอบจะต้องมีขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนบริเวณมุมและรอยต่อของวัสดุ จึงได้พิจารณาฝาผนังคอนกรีตเป็นวัสดุในการทดสอบ สำหรับการทดลองได้จัดเตรียมเครื่องมือและระบบการวัดคลื่นที่สะท้อนดังรูปที่ 4.5 ซึ่งประกอบด้วย ตัวกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ต่อกับคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทางเพื่อแบ่งสัญญาณ ส่วนหนึ่งต่อกับสายอากาศส่ง (Tx) ซึ่งสายอากาศตัวส่งวางทำมุม  $50^\circ$  กับเส้นตั้งฉากกับระนาบของตัวกลางที่ทดสอบเพื่อทำให้กำลังงานของลำคลื่นหลัก (Main beam) ตกกระทบบนผนังคอนกรีต แล้วคลื่นสะท้อนเข้าบริเวณกึ่งกลางของกลุ่มสายอากาศรับ โดยสายอากาศตัวส่งและรับอยู่ห่างจากฝาผนังคอนกรีต 30 เซนติเมตร สัญญาณจะสะท้อนเข้าสายอากาศรับ 1 ตัวที่เลื่อนตำแหน่งไปจุดต่างๆ ในแนวเส้นตรง สายอากาศตัวส่งจะอยู่ห่างจากสายอากาศรับตำแหน่งที่ 1 เป็นระยะห่าง 64 เซนติเมตร โดยจะมีวัสดุดูดซับคลื่น (RF absorber) วางกั้นระหว่างสายอากาศตัวส่งและรับเพื่อป้องกันคลื่นที่ส่งตรงจากสายอากาศตัวส่งไปยังตัวรับ (Direct wave) สัญญาณอีกส่วนหนึ่งที่ออกจากคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทางจะต่อเข้ากับเครื่องแปลงผันขาลง (Down converter) สัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศรับจากคลื่นที่สะท้อนฝาผนังคอนกรีตจะต่อเข้ากับเครื่องแปลงผันขาลงเพื่อแปลงเป็นสัญญาณความถี่กลาง (IF) และต่อกับ



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันทดลองของระบบ

ออสซิลโลสโคปเพื่อวัดขนาดและเฟสของสัญญาณ ซึ่งจะนำค่าข้อมูลนี้ที่สายอากาศรับตำแหน่งต่างๆป้อนเข้าโปรแกรมของการคำนวณย้อนกลับ โดยการทำให้เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อไป



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันของสัญญาณที่รับได้เข้าเครื่องแปลงผันขาลงที่ต่อกับออสซิลโลสโคป

จากระบบการทดลองที่นำเสนอได้ใช้เครื่องแปลงผันขาลงเพื่อแปลงสัญญาณของคลื่นที่สะท้อนจากฝาผนังคอนกรีต เพื่อวัดขนาดและเฟสของสัญญาณ โดยออสซิลโลสโคป ดังนั้นจึงต้องเข้าใจถึงหลักการการทำงานของเครื่องมือดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์สัญญาณที่ป้อนเข้าไป

และรูปแบบของสัญญาณที่ได้ออกมาดังนี้คือ เมื่อพิจารณาว่าสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) ที่รับจากสายอากาศตัวรับป้อนให้เครื่องแปลงผันขาลงและเมื่อกำหนดสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) มีค่าคงที่ กำลังงานของสัญญาณความถี่กลางออกมาจากเครื่องแปลงผันขาซึ่งต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดค่าความต่างศักย์และค่าความต่างเฟสกับสัญญาณจากโมดูลชุดอื่น จะแปรผันตามสนามไฟฟ้าของสัญญาณความถี่วิทยุ ดังแสดงตามรูปที่ 4.6 ค่าศักย์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปแปรผันตามค่าของกำลังงานของสัญญาณความถี่กลางที่ได้จากเครื่องแปลงผันขาลง ดังนี้

$$P_{IF} = \frac{V_{IF}^2}{Z_0} \quad (4.1)$$

ซึ่งกำลังงานของสัญญาณความถี่กลางแปรผันตามสนามไฟฟ้าของสัญญาณความถี่กลาง ดังนี้

$$P_{IF} = \frac{E_{IF}^2}{\eta} \quad (4.2)$$

โดย  $\eta$  คือ อิมพีแดนซ์อินทรินซิก (Intrinsic impedance) ของตัวกลาง เมื่อพิจารณาที่ระบบของเครื่องแปลงผันขาลง ตัวประกอบการแปลงผัน (Conversion factor) หาได้โดย

$$K = \frac{P_{IF}}{P_{RF}} \quad (4.3)$$

และเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณความถี่วิทยุก็แปรผันตามสนามไฟฟ้าของสัญญาณความถี่วิทยุ ในลักษณะเดียวกับสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) ดังนี้

$$P_{RF} = \frac{E_{RF}^2}{\eta} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.1) ถึง (4.4) จะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าของสัญญาณความถี่วิทยุกับความถี่ของสัญญาณความถี่กลางจากโมดูลของสายอากาศตัวรับ ดังนี้

$$E_{RF} = \sqrt{\frac{\eta}{K \cdot Z_0}} \cdot V_{IF} \quad (4.5)$$

เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้คำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฝาผนังคอนกรีตต้องการข้อมูลเพื่อป้อนให้โปรแกรมเป็นค่าส่วนจริง (Real value) และส่วนจินตภาพ (Imaginary value) จึงต้องแปลงข้อมูลจากค่าแมกนิจูดและเฟส ซึ่งเมื่อกำหนดให้ค่าที่ป้อนให้โปรแกรมเป็นจำนวนเชิงซ้อน  $S$  จะได้ว่า

$$Mag[S] = \sqrt{\text{Re}[S]^2 + \text{Im}[S]^2} \quad (4.6)$$

ถ้า  $\text{Im}[S] = 0$  หรือ  $\text{Re}[S] < 0$  แล้วจะกำหนดให้  $\text{Phase}[S] = -180^\circ$  มิฉะนั้น

$$\text{Phase}[S] = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}[S]}{\text{Re}[S]}\right) \quad (4.7)$$

โดย  $Mag[S]$  และ  $\text{Phase}[S]$  คือค่าแมกนิจูดและเฟสของสัญญาณที่วัดได้และ  $\text{Re}[S]$  และ  $\text{Im}[S]$  คือค่าส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำดับ เมื่อแปลงย้อนกลับจะได้ว่า

$$\text{Re}[S] = Mag[S] \cdot \cos(\text{Phase}[S]) \quad (4.8)$$

$$\text{Im}[S] = Mag[S] \cdot \sin(\text{Phase}[S]) \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.5) (4.8) และ (4.9) จะนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะแสดงผลการทดลองและคำนวณในบทถัดไป

#### 4.4 สรุป

จากข้อมูลของผลการจำลองแบบได้นำมาสู่การออกแบบการทดลองและสร้างระบบการวัดทดสอบเพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของฝาผนังคอนกรีต ผลการวิเคราะห์การคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุดจากสูตรสมการของสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากสายอากาศรับ 4 ตำแหน่ง และระยะระหว่างสายอากาศเท่ากับ  $0.9\lambda_0$  เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สามารถนำไปสร้างเป็นระบบในการทดลองจริง

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดสอบ

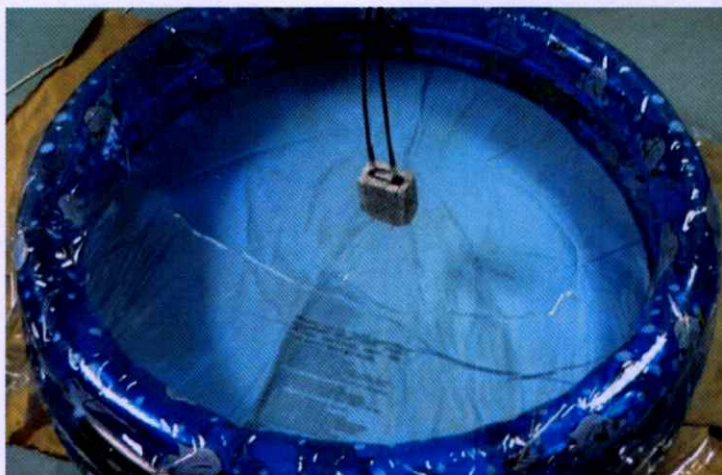
#### 5.1 บทนำ

จากการออกแบบการทดลองและสร้างเครื่องมือโดยการจำลองแบบและได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ในบทนี้จึงได้นำเสนอผลการทดสอบทางด้านปฏิบัติเพื่อใช้วัดทดสอบและประเมินความถูกต้องเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีราคาและความแม่นยำสูง สำหรับเทคนิคการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อจากสายอากาศที่วางเหนือตัวกลางที่ทดสอบได้รับการปรับปรุงเพื่อประยุกต์ใช้ โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวกลางที่ทดสอบคือข้าวเปลือก ผลการทดสอบได้เปรียบเทียบกับวิธีการแบบมาตรฐาน คือการใช้คู่อบลมร้อน ผลการทดสอบเพื่อหาความชื้นของข้าวเปลือกของทั้ง 2 เทคนิคมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก อันแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการทดสอบโดยไมโครเวฟที่นำเสนอ สำหรับระบบการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ด้วยการคำนวณย้อนกลับโดยการทำให้เหมาะสมที่สุดจากสนามสะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ ในที่นี้คือฝาผนังคอนกรีต จากระบบการวัดสนามไฟฟ้าสะท้อนกลับและอัลกอริทึมในการคำนวณย้อนกลับ ผลการคำนวณที่ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการวัดและอัลกอริทึมในการคำนวณย้อนกลับที่ดีได้เช่นกัน

#### 5.2 การทดลองโดยเทคนิคการวัดขนาดของสัญญาณสะท้อนและเชื่อมต่อ

##### 5.2.1 การใช้โคโพลแบบมีปลอกวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำ

เพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอในการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ทดสอบโดยการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ ในขั้นแรกได้ทำการทดลองโดยใช้สายอากาศโคโพลวัดตัวกลางที่เป็นน้ำ [74] อันเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย อีกทั้งข้อมูลทางด้านค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานหาได้โดยทั่วไป [2] จากข้อมูลการออกแบบในบทที่ 3 ได้นำมาสู่การสร้างสายอากาศโคโพลแบบมีปลอกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีการป้อนสัญญาณที่กึ่งกลางสายอากาศโดยบาลันบาซูกา การทดลองนี้กระทำเพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอ โดยการต่อสายอากาศโคโพลแบบมีปลอกทั้ง 2 ตัวเข้ากับทางเข้าออกของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8530A ที่ได้รับการปรับเทียบแล้วเพื่อวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำที่ผ่านระบบออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse osmosis water) ซึ่งที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ มีความยาวคลื่น ( $\lambda_{\text{water}}$ ) ประมาณ 1.4 เซนติเมตร โดยบรรจุอยู่ในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 83 เซนติเมตร ( $60\lambda_{\text{water}}$ ) และมีความสูงเท่ากับ 23 เซนติเมตร ( $17\lambda_{\text{water}}$ ) ดังรูปที่ 5.1(ก)



(ก)

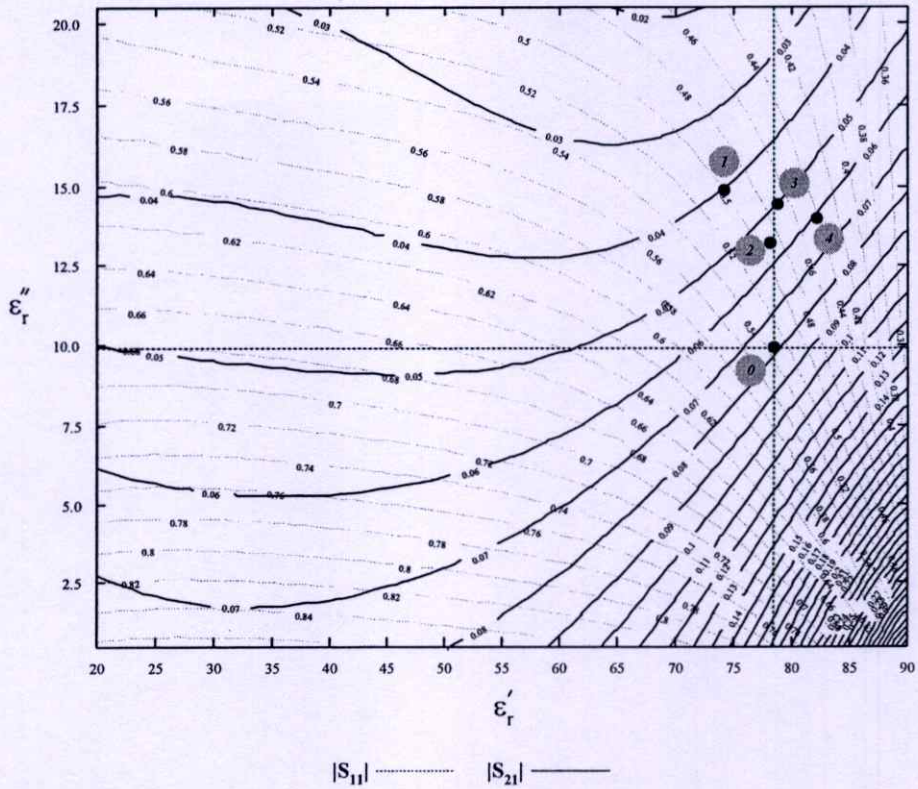


(ข)

**รูปที่ 5.1** การจัดสายอากาศไดโพลแบบมีปลอกเพื่อวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำ

(ก) รูปแบบการจัดเตรียมอุปกรณ์ (ข) สายอากาศไดโพลแบบมีปลอกคู่

ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple reflection) และการเลี้ยวเบนของคลื่น บริเวณขอบผนังของภาชนะได้ บริเวณผิวน้ำในภาชนะก่อนการทดลองได้ปิดไว้ด้วยพลาสติกห่ออาหารแบบบาง (Plastic wrap) เพื่อป้องกันความเสียหายบริเวณจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศจากการสัมผัสโดยตรงกับน้ำ และสายอากาศไดโพลแบบมีปลอกทั้ง 2 ตัวได้ถูกหุ้มบริเวณสายนำสัญญาณด้วยวัสดุอุดชั้บคลื่นเพื่อป้องกันคลื่นสะท้อนและคลื่นกระเจิง ดังรูปที่ 5.1(ข) อุณหภูมิของ



รูปที่ 5.2 ข้อมูลจากการวัดของน้ำที่วาดลงบนกราฟพื้นผิวในระนาบ  $\epsilon'_r, \epsilon''_r$

ห้องที่ทำการทดลองอยู่ที่ประมาณ 27 องศาเซลเซียส จากการทดลองได้นำค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวาดลงในกราฟพื้นผิวของระนาบ  $\epsilon'_r, \epsilon''_r$  ตามรูปที่ 3.1(ข) จุดกลมที่มีหมายเลขกำกับแสดงถึงผลการวัดดังรูปที่ 5.2 โดยที่ตำแหน่งหมายเลข 0 คือข้อมูลที่ได้จากการวัดน้ำโดยใช้โพรบ ไดอิเล็กตริก [80] ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการวัดแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของน้ำและค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการมาตรฐาน โดยใช้โพรบ ไดอิเล็กตริก

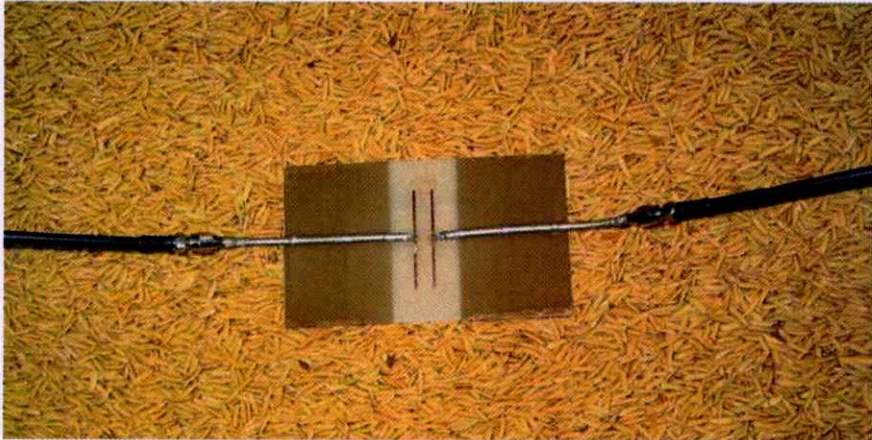
การวัดครั้งที่	$\epsilon'_r$	ความผิดพลาด (%)	$\epsilon''_r$	ความผิดพลาด (%)
1	73.0	5.7	14.8	-51.0
2	77.0	0.5	12.9	-31.6
3	78.0	-0.8	14.3	-45.9
4	82.0	-5.9	13.7	-39.7
ค่าเฉลี่ย	77.5	-0.1	14.4	-41.8

หมายเหตุ : 
$$\text{ความผิดพลาด (\%)} = \left( \frac{\epsilon_{r\_probe} - \epsilon_{r\_dipole}}{\epsilon_{r\_probe}} \right) \times 100$$

โดย  $\epsilon_{r\_dipole}$  และ  $\epsilon_{r\_probe}$  คือค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของน้ำที่วัดได้จากเทคนิคการวัดแมกนิจูดของการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไดโพลและวิธีการมาตรฐาน โดยใช้โพรบไดอิเล็กตริกตามลำดับ ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของน้ำโดยใช้สายอากาศไดโพลซึ่งใช้เทคนิคที่นำเสนอและผลการวัดโดยใช้โพรบไดอิเล็กตริก และค่าความผิดพลาดที่สัมพันธ์กัน สำหรับค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์  $\epsilon'_r - j\epsilon''_r$  ของน้ำที่ผ่านระบบบอสโมซิสแบบย้อนกลับที่วัดโดยเทคนิคที่นำเสนอ เมื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วมีค่าเท่ากับ 77.5-j14.4 และค่าที่วัดได้โดยใช้โพรบไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 77.4-j9.8 ค่าของ  $\epsilon'_r$  ที่วัดได้โดยเทคนิคที่นำเสนอและวิธีการมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งมีค่าผิดพลาดเท่ากับ 0.1 % แต่สำหรับค่าของ  $\epsilon''_r$  มีค่าผิดพลาดเท่ากับ 41.8 % ค่าที่แตกต่างนี้เกิดจากสภาวะที่ต่างกันในการจำลองแบบและการทดลอง ซึ่งจากการจำลองแบบได้พิจารณาว่าตัวกลางที่ทดสอบมีขนาดกึ่งอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติตัวกลางมีขนาดจำกัด (Finite size)

## 5.2.2 การหาค่าความชื้นจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของข้าวเปลือก

### 5.2.2.1 การทดสอบด้วยเทคนิคเชื่อมต่อร่วมโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



รูปที่ 5.3 การเตรียมการทดลองสายอากาศไดโพลคู่วางอยู่บนข้าวเปลือก

ผลการวิเคราะห์การปรับพารามิเตอร์ทางกายภาพที่เหมาะสมเพื่อการวัดข้าวเปลือก ได้นำมาสู่การสร้างสายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สร้างได้ง่ายกว่าสายอากาศไดโพลแบบมีปลอก สำหรับขั้นตอนของการทดสอบได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

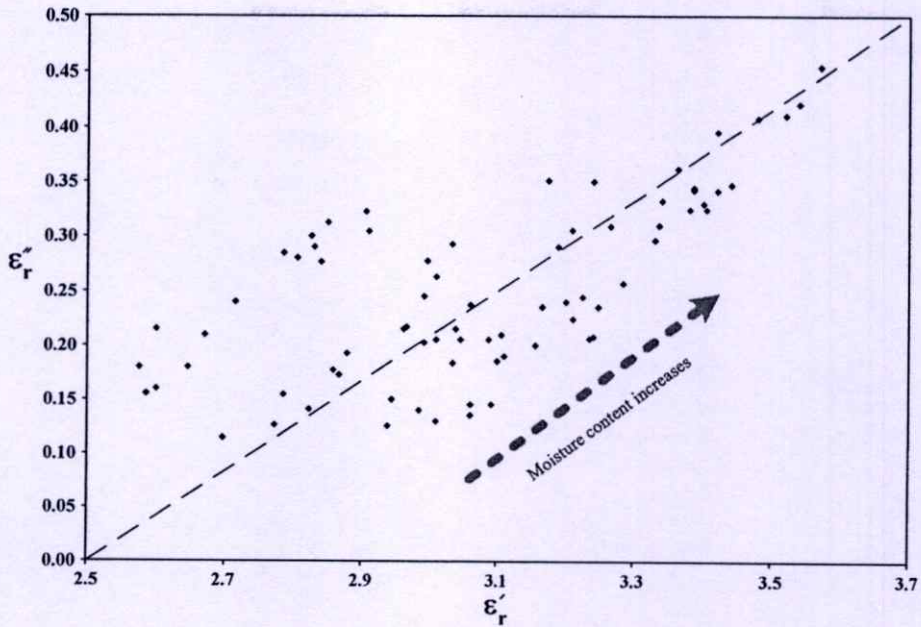
HP8530A เพื่อวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  วัดลงในกราฟพื้นผิวของระนาบ  $\epsilon', \epsilon''$  ตามรูปที่ 3.2(ข) เพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกที่ความชื้นระดับต่างๆเปรียบเทียบกับค่าในบทความ [48] โดยเมื่อสายอากาศไดโพลอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ถูกวางบนข้าวเปลือกที่อยู่ในถังพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด  $40 \times 65 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.3 ค่าความลึกผิวของข้าวเปลือกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 6.25 เซนติเมตร ข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบมีความชื้นอยู่ 5 ระดับโดยอยู่ในช่วง 10 % ถึง 20 % สำหรับขั้นตอนในการเตรียมความชื้นของข้าวเปลือกในระดับต่างๆทำได้โดยการนำข้าวแบ่งใส่ภาชนะที่มีฝาปิดขนาดเท่ากัน 5 ใบ กรณีที่ต้องการลดความชื้นของข้าวเปลือกทำได้โดยการตากแดด สำหรับกรณีที่ต้องการเพิ่มความชื้นทำได้โดยการพรมน้ำคลุกเคล้าให้ทั่ว ปิดฝาเก็บไว้ 24 ชั่วโมง แล้วใช้เครื่องวัดความชื้นแบบพกพาตรวจสอบความชื้นของข้าวเปลือก หากยังไม่ได้ความชื้นตามที่ต้องการก็ทำการปรับโดยขั้นตอนตามที่กล่าวมาข้างต้นในการทดสอบแต่ละครั้งของระดับความชื้นได้วัดจำนวน 10 ตำแหน่ง(โดยโกยด้านล่างขึ้นมาวัดด้วย) ซึ่งอุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ 27 องศาเซลเซียส ในแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ระบบได้ถูกปรับเทียบโดยวางสายอากาศไดโพลไว้ในอากาศ (ล้อมรอบด้วยตัวดูดกลืนคลื่นวิทยุ) เพื่อวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ในกรณีของอวกาศว่าง หลังจากนั้นนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบโดยโปรแกรม IE3D ซึ่งตัวประกอบของการปรับเทียบ ( $ClbFt$ ) เท่ากับอัตราส่วนของค่าที่ได้จากการจำลองแบบ ( $CalcV$ ) ต่อค่าที่ได้จากการวัด ( $MeasV$ ) ดังนี้

$$ClbFt = \frac{CalcV}{MeasV} \quad (5.1)$$

ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัดสัญญาณ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในกรณีของอวกาศว่าง จึงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัดสัญญาณ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในกรณีของอวกาศว่าง

	ค่าจากการจำลองแบบ	ค่าจากการวัด	ตัวประกอบของการปรับเทียบ
$ S_{11} $	0.601	0.611	0.984
$ S_{21} $	0.359	0.369	0.972



รูปที่ 5.4 แผนภาพของอาร์กานด์ (Argand diagram) แสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของข้าวเปลือก

ค่าตัวประกอบดังกล่าวนี้จะนำมาคูณกับค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้ก่อนที่จะวาดลงบนกราฟพื้นผิวของระนาบ  $\epsilon'_r, \epsilon''_r$  ซึ่งแสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของข้าวเปลือกของความชื้นระดับต่างๆ ดังรูปที่ 5.4 ตัวอย่างของข้าวเปลือกที่ได้วัดทางไมโครเวฟได้ถูกแบ่งจัดเก็บไว้เพื่อวัดทดสอบค่าความหนาแน่นมวลรวมและค่าความชื้น โดยวิธี ASAE มาตรฐาน (Standard ASAE method) ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก

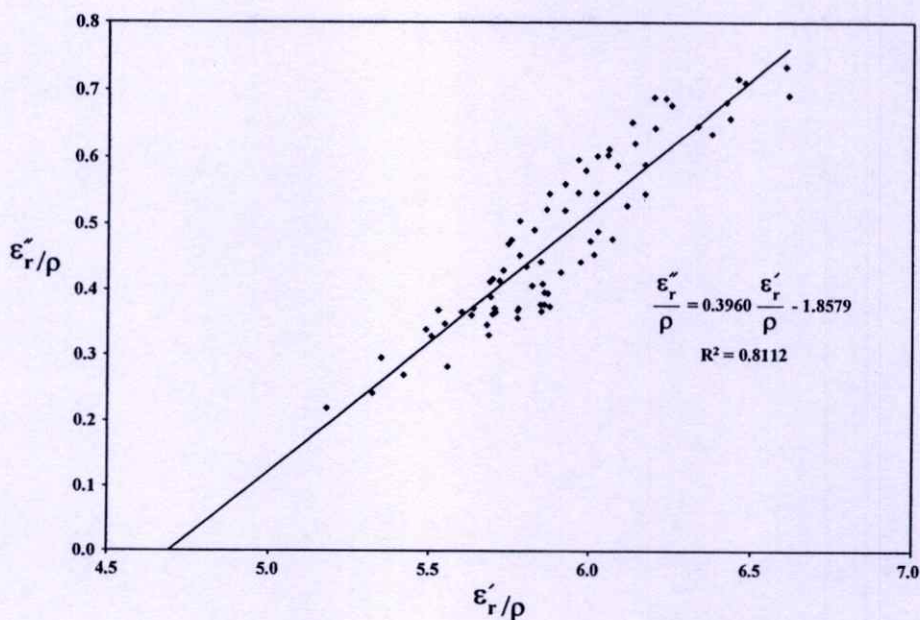
ค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นและความหนาแน่นมวลรวมเป็นฟังก์ชันของมวลและปริมาตรของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้[48]

$$\rho = \frac{m_w + m_d}{V} \quad (5.2)$$

และ

$$M(\%) = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 \quad (5.3)$$

โดย  $m_w$ ,  $m_d$  และ  $V$  คือมวลของน้ำ, มวลของตัวอย่างที่แห้งแล้ว และปริมาตรทั้งหมด ตามลำดับ จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อค่าความชื้นของตัวอย่างข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.5 แผนภาพของอาร์กานด์แสดงค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ที่ทำการนอร์แมลไลซ์ โดยค่าความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือก

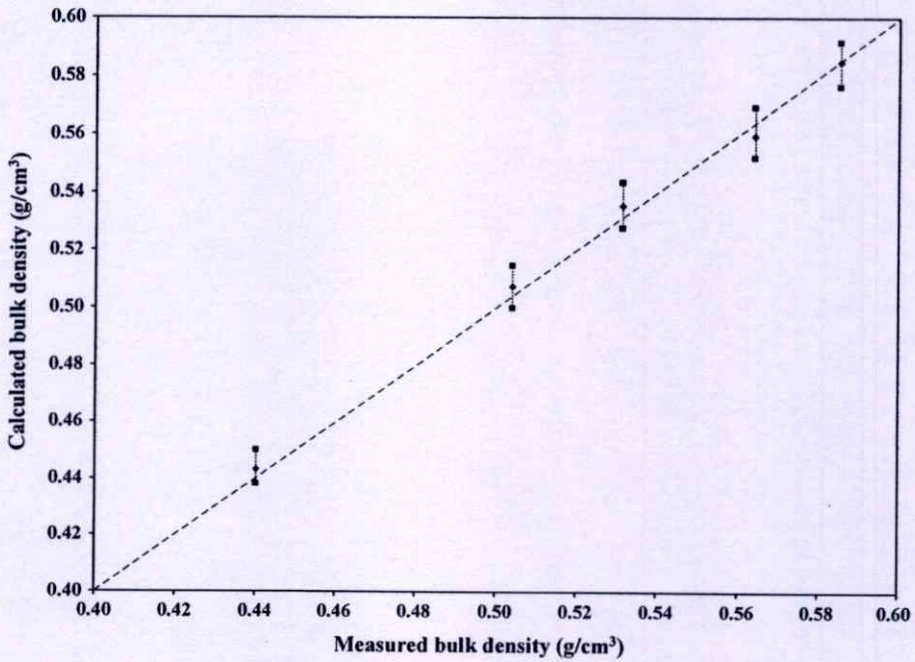
เมื่อทำการนอร์แมลไลซ์ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์โดยค่าความหนาแน่นมวลรวม ทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\varepsilon'_r$  และ  $\varepsilon''_r$  อย่างชัดเจนตามรูปที่ 5.5 ดังนี้

$$\frac{\varepsilon''_r}{\rho} = a_f \left( \frac{\varepsilon'_r}{\rho} - k \right) \quad (5.4)$$

ค่าความลาดชัน (Slope)  $a_f$  และค่าคงที่  $k$  หาได้จากกราฟในรูปที่ 5.5 และสมการที่ (5.4) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3960 และ 4.6917 ตามลำดับ ดังนั้น ความหนาแน่นมวลรวมจึงสามารถคำนวณได้จาก

$$\rho = \frac{a_f \varepsilon'_r - \varepsilon''_r}{ka_f} \quad (5.5)$$

ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นมวลรวมที่หาได้จากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์จากการวัดโดยเทคนิคไมโครเวฟและจากการชั่งน้ำหนักโดยกระบวนการมาตรฐานทั่วไปแสดงดังรูปที่ 5.6 เส้นประในแนวทแยงมุมแสดงความสัมพันธ์ในทางอุดมคติ ซึ่งในแต่ละระดับได้แสดงค่าสูงสุดค่าเฉลี่ยและค่าต่ำสุดของข้อมูลตามลำดับ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการทำนายผลโดยการคำนวณตามสมการที่ (5.5) ของความหนาแน่นมวลรวม จึงกำหนดค่าการเปรียบเทียบของความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error of calibration : SEC) [48] ดังนี้



รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือกที่ได้จากการคำนวณ โดยค่าที่วัดได้โดยเทคนิค ไมโครเวฟเปรียบเทียบกับค่าที่วัดโดยวิธีชั่งน้ำหนักแบบมาตรฐาน

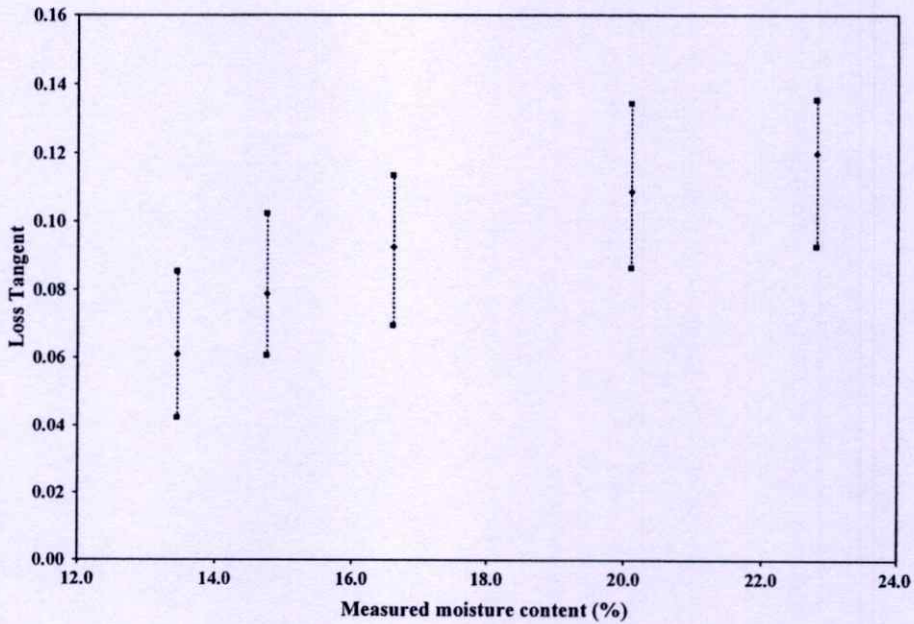
$$SEC = \sqrt{\frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^n (\Delta c_i)^2} \quad (5.6)$$

โดย  $n$  คือจำนวนของตัวอย่าง  $p$  คือจำนวนตัวแปรในสมการถดถอยที่ใช้ในการปรับเทียบ  $\Delta c_i$  คือผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายผลโดยการคำนวณตามสมการที่ (5.5) และค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานสำหรับตัวอย่างที่  $i$  ค่า  $SEC$  ของความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือกที่คำนวณได้จากเทคนิคทางไมโครเวฟที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 0.0192 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสูญเสียแทนเจนต์ต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งผลการเปรียบเทียบที่ได้เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก สาเหตุเนื่องจากความหนาแน่นมวลรวมของข้าวเปลือกไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามเมื่อค่าสูญเสียแทนเจนต์ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานโดยค่าความหนาแน่นมวลรวมในสมการที่ (5.5) จะได้ฟังก์ชันของความหนาแน่นมวลรวมที่เป็นอิสระต่อค่าความชื้น ดังนี้

$$\psi = ka_f \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r' (a_r \varepsilon_r' - \varepsilon_r'')} \quad (5.7)$$

ผลคูณของตัวประกอบ  $ka_f$  ในสมการที่ (5.7) นั้นเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (5.7) จึงสามารถลดรูปได้เป็น



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียแทนเจนต์ต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก

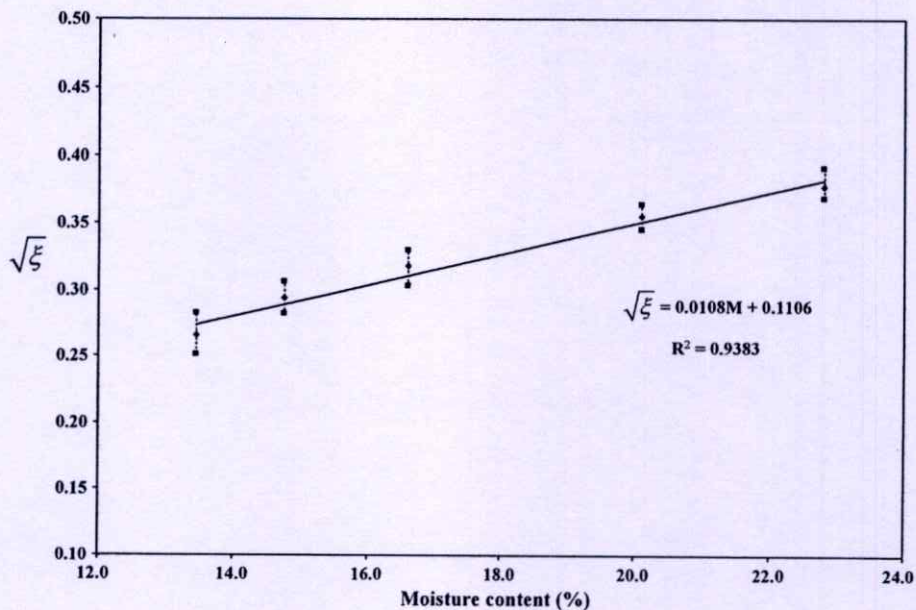
$$\xi = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'(a_f \varepsilon_r' - \varepsilon_r'')} \quad (5.8)$$

โดย  $\xi$  คือค่าความชื้นที่ทำนายโดยการคำนวณ จากรูปที่ 5.8 แสดงค่ารากที่สองของ  $\xi$  ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงต่อค่าความชื้น ค่าการกระจายตัวของข้อมูลของค่าสูญเสียแทนเจนต์ที่แสดงในรูปที่ 5.7 นั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับความชื้นในแต่ละระดับ ค่าของข้อมูลที่ต่างกันหลังจากทำให้เป็นบรรทัดฐานเกือบจะอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เมื่อพิจารณาข้อมูลโดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้น จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

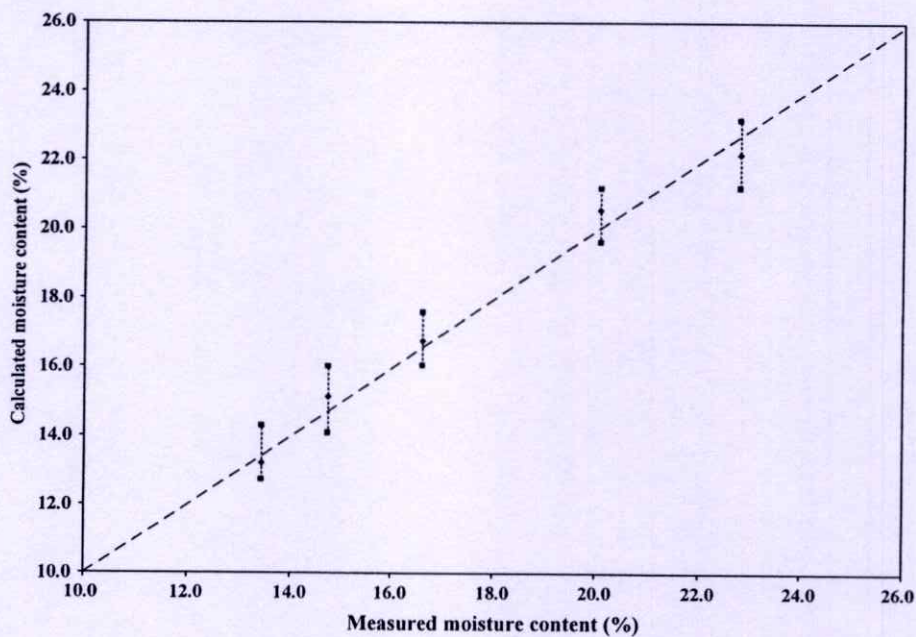
$$\sqrt{\xi} = aM + b \quad (5.9)$$

ค่าความลาดชัน  $a$  ค่าการตัดแกน  $b$  และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงอยู่ในรูปที่ 5.8 มีค่าเท่ากับ 0.0108 0.1106 และ 0.9383 ตามลำดับ โดยการปรับรูปสมการที่ (5.9) ดังนั้นสมการการปรับเทียบความชื้นในหน่วยเปอร์เซ็นต์ จึงหาได้ดังนี้

$$M(\%) = \frac{\sqrt{\xi} - b}{a} \quad (5.10)$$



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงค่า  $\sqrt{E}$  ต่อค่าความชื้นของข้าวเปลือก



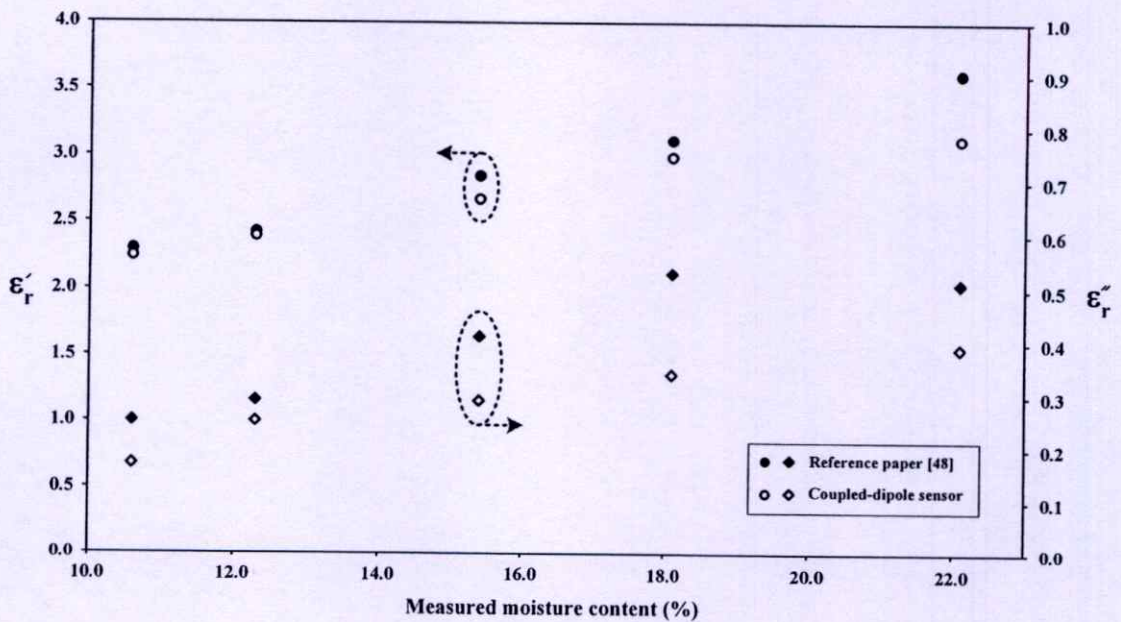
รูปที่ 5.9 ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการคำนวณ โดยค่าที่วัดได้โดยเทคนิคไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับค่าที่วัด โดยวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐาน

รูปที่ 5.9 แสดงค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (5.10) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีอบแห้งแบบมาตรฐาน เส้นประในแนวทแยงมุมแสดงความสัมพันธ์ในทางอุดมคติ สำหรับค่า SEC ของความชื้นของข้าวเปลือกที่คำนวณจากการวัด โดยเทคนิคไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ

1.2813 % ซึ่งค่าที่ได้ยังสูงอยู่เนื่องจากความหนาแน่นมวลรวมและความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 5.10 แสดงความแม่นยำของการทดสอบหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ด้วยเทคนิคการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  จากสายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเปรียบเทียบกับผลการวัดในบทความ [48] โดยที่ค่าความชื้นต่ำกว่า 22 % ผลของค่า  $\epsilon_r'$  ที่หาได้จากเทคนิคที่นำเสนอกับผลการวัดในบทความ [48] ใกล้เคียงกันมาก แต่สำหรับค่าความชื้นของข้าวเปลือกทุกระดับ ค่า  $\epsilon_r''$  ที่ได้จากบทความ [48] จะสูงกว่าค่าที่หาได้จากเทคนิคที่นำเสนอสาเหตุหลักเนื่องจากในบทความ [48] เป็นการวัดทดสอบแบบการส่งผ่าน (Transmission) ซึ่งคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ทดสอบทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอจะตรวจวัดเฉพาะบริเวณรอบๆ ที่สายอากาศสัมผัสอยู่เท่านั้น ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดที่แตกต่างจากบทความ [48] ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.3

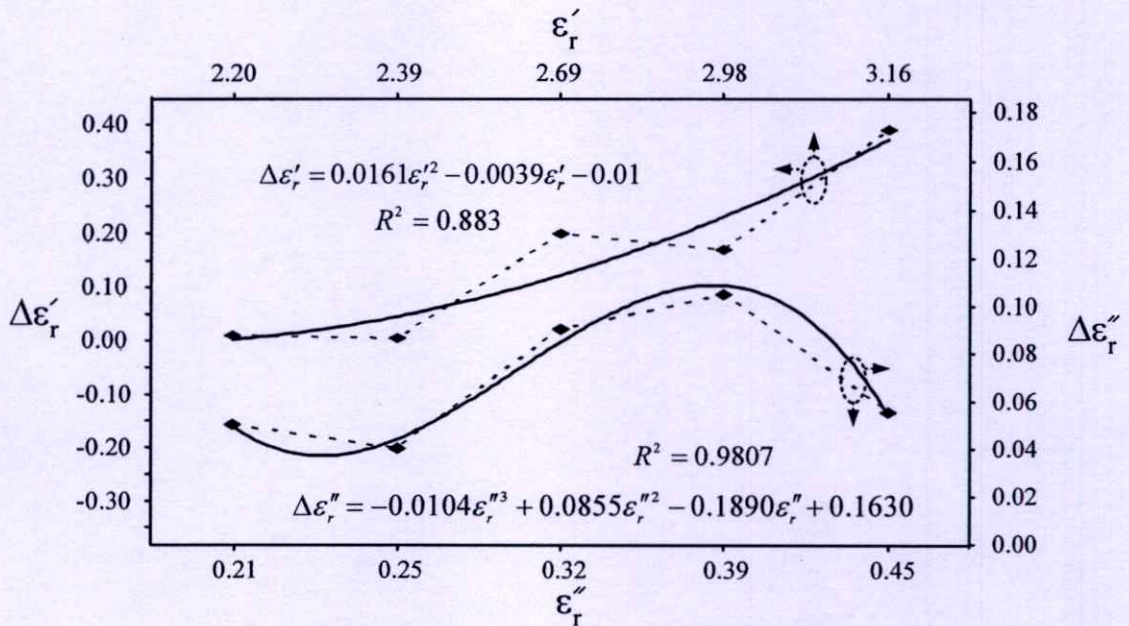
ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดจากการทดสอบโดยเทคนิคที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการวัดในบทความ [48]

ความผิดพลาดของ $\epsilon_r'$ (%)	ความผิดพลาดของ $\epsilon_r''$ (%)
1.2 – 13.5	13.7 – 35.8



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยเทคนิคที่นำเสนอกับผลการวัดในบทความ [48]

## 5.2.2.2 การชดเชยความผิดพลาดจากการทดสอบ

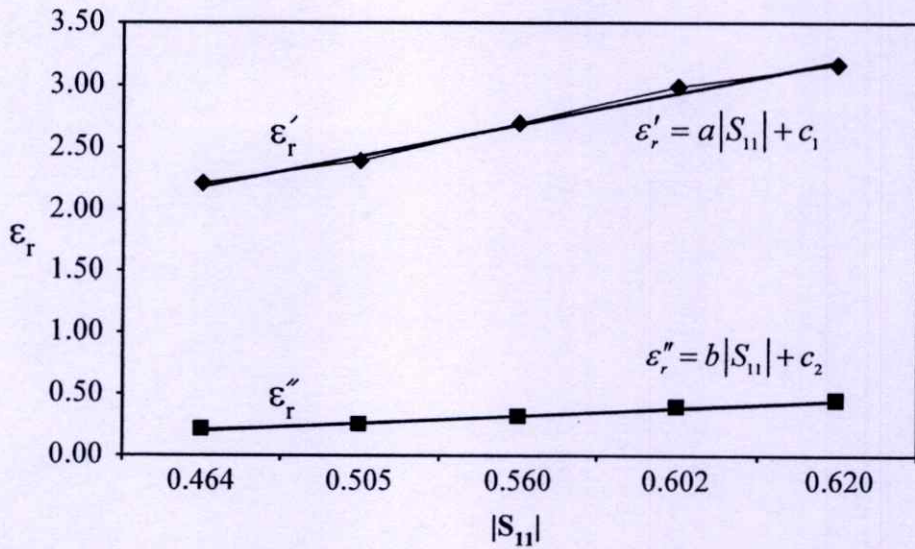


รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่วัดได้กับผลการวัดในบทความ [48]

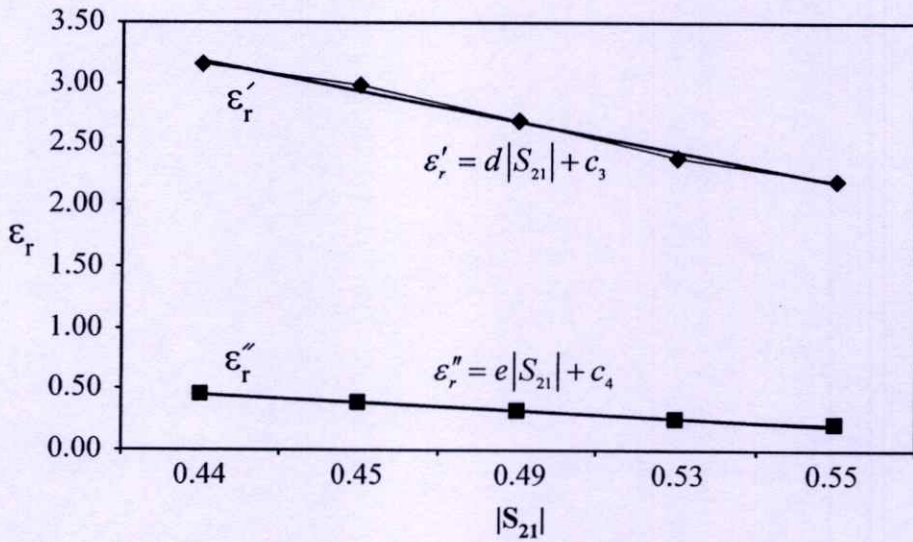
สำหรับหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอวิธีการหาความชื้นจากข้าวเปลือกโดยการวัดค่ากำลังงานที่สะท้อนและเชื่อมต่อกับข้าวเปลือก [82] ความหนาแน่นมวลรวมและความชื้นของข้าวเปลือกมีผลต่อค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกัน ความแม่นยำจากการคำนวณค่าความชื้นขึ้นอยู่กับความแม่นยำจากการคำนวณค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ซึ่งแปรผันตามค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้ สาเหตุของผลที่ต่างกันของการจำลองแบบและการทดลอง มาจากเงื่อนไขที่ต่างกัน ซึ่งสำหรับการจำลองแบบได้พิจารณาในกรณีของตัวกลางที่ทดสอบมีขนาดกึ่งอนันต์ แต่สำหรับการทดลองตัวกลางที่ทดสอบมีขนาดที่จำกัด ความยาวของสายอากาศไดโพลที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยก็มีผลต่อค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้เช่นกัน และผลการวัดจากการทดลองนี้กับผลการวัดในบทความ [48] มีสาเหตุหลักมาจากเทคนิคและการทดลองที่ต่างกันเช่น ในการทดสอบนี้ทำโดยการวัดการเชื่อมต่อของสัญญาณ แต่ในบทความ [48] ทำการทดสอบโดยการวัดการส่งผ่านของสัญญาณ และตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่แตกต่างกันก็เป็นอีกเหตุหนึ่งของความผิดพลาด

ในการชดเชยความผิดพลาดของผลการทดลองนี้ ได้ใช้ผลการวัดในบทความ [48] เป็นข้อมูลอ้างอิง ความผิดพลาดระหว่างค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่วัดได้กับข้อมูลอ้างอิง ( $\Delta\varepsilon_r'$  และ  $\Delta\varepsilon_r''$ ) ได้แสดงดังรูปที่ 5.11 การฟิตส่วนโค้ง (Curve fitting) ของ  $\Delta\varepsilon_r'$  สามารถแสดงได้โดย

$$\Delta\varepsilon_r' = 0.0161\varepsilon_r'^2 - 0.0039\varepsilon_r' - 0.01 \quad (5.11)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  กับ  $|S|$

(ก)  $|S_{11}|$

(ข)  $|S_{21}|$

ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8830 และ  $\Delta\epsilon_r''$  สามารถแสดงได้โดย

$$\Delta\epsilon_r'' = -0.0104\epsilon_r''^3 + 0.0855\epsilon_r''^2 - 0.1890\epsilon_r'' + 0.1630 \quad (5.12)$$

ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9807 โดยเมื่อทำการทดลองวัดค่า  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  ก็จะบวกค่า  $\Delta\epsilon_r'$  และ  $\Delta\epsilon_r''$  เข้าไปเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้จากความถี่ต่างๆ ตามรูปที่ 5.12 ทำให้คำนวณได้ค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่ต่างกัน รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  กับ ค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ซึ่งพบว่า มีลักษณะของความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\varepsilon_r' = a|S_{11}| + d|S_{21}| + k_1 \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_r'' = b|S_{11}| + e|S_{21}| + k_2 \quad (5.14)$$

โดย  $k_1 = c_1 + c_3$  และ  $k_2 = c_2 + c_4$  เป็นค่าคงที่ และเมื่อกำหนดให้

$$\min\{\varepsilon_r' - (a|S_{11}| + d|S_{21}| + k_1)\} \quad (5.15)$$

$$\min\{\varepsilon_r'' - (b|S_{11}| + e|S_{21}| + k_2)\} \quad (5.16)$$

จะสามารถหาค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ 5.4 ดังนั้นจากค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้ จะสามารถหาค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ได้จากสมการที่ (5.13) และ (5.14) โดยเมื่อบวกกับค่า  $\Delta\varepsilon_r'$  และ  $\Delta\varepsilon_r''$  จากสมการที่ (5.11) และ (5.12) ก็จะได้ค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่ถูกต้องตามลำดับ ซึ่งจากสมการที่ (5.8) - (5.10) จะสามารถคำนวณหาความถี่ได้ตามลำดับ จะพบว่าค่าความถี่สามารถหาได้จากสมการการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบเครื่องมือขนาดพกพาต่อไป

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ต่างๆของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  กับ ค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$

$a$	$d$	$k_1$	$b$	$e$	$k_2$
2.63	-4.72	3.54	-2.82	-5.93	4.78

### 5.2.2.3 การทดสอบด้วยเทคนิคเชื่อมต่อร่วมโดยเครื่องมือที่สร้างขึ้น

ผลการทดสอบเทคนิคที่นำเสนอเกี่ยวกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับผลการวัดจากบทความ [48] ทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคดังกล่าวนี้ จากการออกแบบเครื่องมือที่เป็นระบบการวัดที่ใช้ทดแทนเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ขั้นตอนของการจัดเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกได้ทำเช่นเดียวกับการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ขั้นแรกต้องปรับเทียบเครื่องมือ

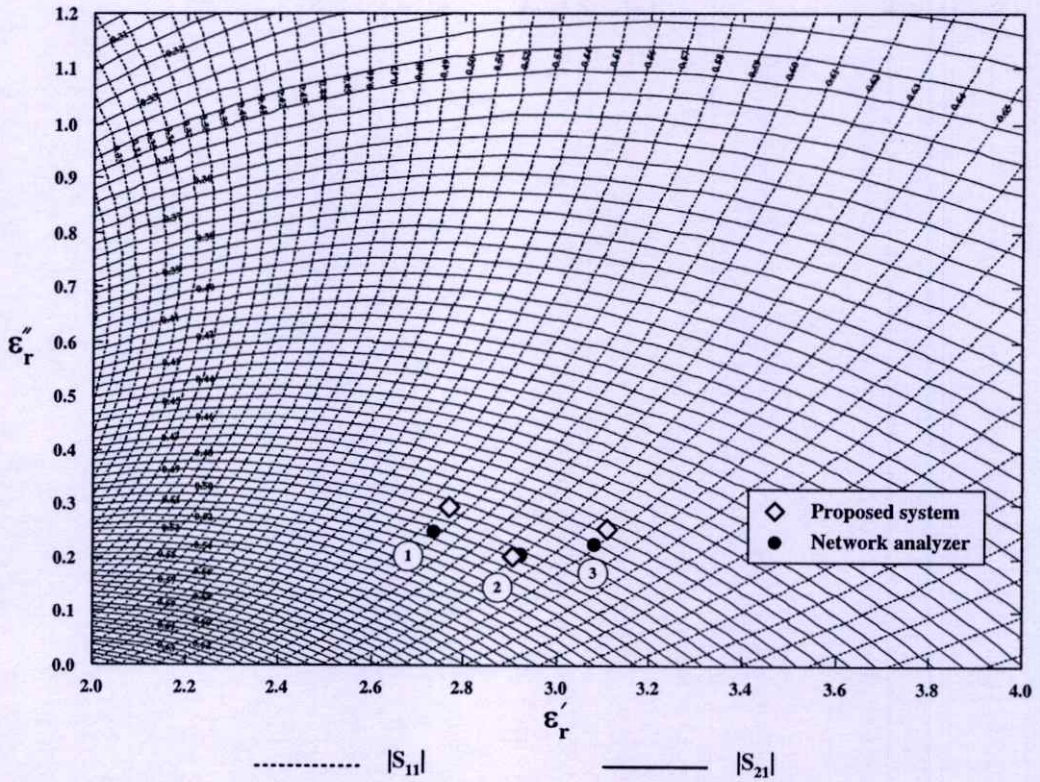


รูปที่ 5.13 การวัดทดสอบข้าวเปลือกด้วยระบบเครื่องมือที่นำเสนอ

ตารางที่ 5.5 การหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัด โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้น ในกรณีของ อวกาศว่าง

	ค่าจากการจำลองแบบ	ค่าจากการวัด	ตัวประกอบของการปรับเทียบ
$ S_{11} $	0.601	0.991	0.606
$ S_{21} $	0.359	0.088	4.079

ที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่าการสูญเสียภายในสายส่งในระบบ โดยการต่อชุดการปรับเทียบมาตรฐาน (Standard calibration kit) สำหรับก่อนการทดสอบวัดข้าวเปลือกต้องทำการ โดยวัดสัญญาณในกรณี ที่สายอากาศอยู่กลางอากาศ(มีวัสดุดูดซับคลื่นล้อมรอบ) เพื่อหาตัวประกอบของการปรับเทียบค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ของเครื่องมือ โดยค่าที่คำนวณได้จากการจำลองแบบในกรณีที่เป็นอวกาศว่างของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหาตัวประกอบของการปรับเทียบของการวัด สัญญาณ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในกรณีของอวกาศว่าง จึงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.5 ค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะต้องคูณด้วยตัวประกอบดังกล่าว ก่อนที่จะนำไป วาดลงในกราฟพื้นผิวของของระนาบ  $\epsilon', \epsilon''$  ตามรูปที่ 3.2(ข) สำหรับการวัดข้าวเปลือกทำได้โดย ต่อสายอากาศไดโพลคู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เข้ากับเครื่องมือที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 5.13 ผลการวัดค่า



รูปที่ 5.14 ค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วาดลงในกราฟพื้นผิว ซึ่งวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและระบบเครื่องมือที่นำเสนอ

$|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่วัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นซึ่งได้ปรับเทียบข้อมูลแล้วและผลการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายดังรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นความแตกต่างของข้อมูลเพียงเล็กน้อยของทั้ง 2 ระบบ และค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกที่วัดได้ นำมาคำนวณหาความชื้นได้จากสมการที่ (5.8)-(5.10) ซึ่งได้สรุปผลการวัดในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการวัดความชื้นระหว่างเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับระบบเครื่องมือที่นำเสนอโดยอ้างอิงกับวิธีการอบแห้งแบบมาตรฐาน

ตัวอย่างลำดับที่	ความชื้นของข้าวเปลือก(%)				
	การอบแบบมาตรฐาน	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	ความผิดพลาด  (%)	เครื่องมือที่นำเสนอ	ความผิดพลาด  (%)
1	13.22	13.44	1.66	12.96	1.97
2	15.14	14.75	2.57	14.73	2.71
3	16.75	16.62	0.78	16.35	2.39

หมายเหตุ :

$$| \text{ความผิดพลาด} | (\%) = \frac{|\%MC_{NA} - \%MC_{\text{Proposed system}}|}{\%MC_{NA}} \times 100$$

โดย  $\%MC_{NA}$  และ  $\%MC_{\text{Proposed system}}$  คือค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือกที่วัดได้จากการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และจากระบบที่นำเสนอตามลำดับ

สำหรับขั้นตอนการหาความชื้นของข้าวเปลือกจากเทคนิคการวัดขนาดสัญญาณสะท้อนและเชื่อมต่อ จากสายอากาศโคโพลาร์บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เตรียมอุปกรณ์และข้าวเปลือกตามรูปที่ 5.13
- 2) วัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ โดยจะแสดงค่าออกมาที่หน้าเครื่องมือที่สร้างขึ้น นำค่า  $V_r$  และ  $V_c$  ที่อ่านได้คำนวณเป็น  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ตามลำดับ ได้โดยขั้นตอนในหัวข้อ 4.2.3
- 3) นำค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ที่คำนวณได้จากการวัดทดสอบคูณกับค่าตัวประกอบของการปรับเทียบตามตารางที่ 5.5 ก่อนการวาดลงในกราฟพื้นผิวของของระนาบ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  ตามรูปที่ 3.2(ข) เพื่อหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของข้าวเปลือกที่ทดสอบนั้น หรือสามารถคำนวณตามสมการที่ (5.13)-(5.14)
- 4) นำค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของข้าวเปลือกที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ (5.8)-(5.10) ซึ่งจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบนั้น

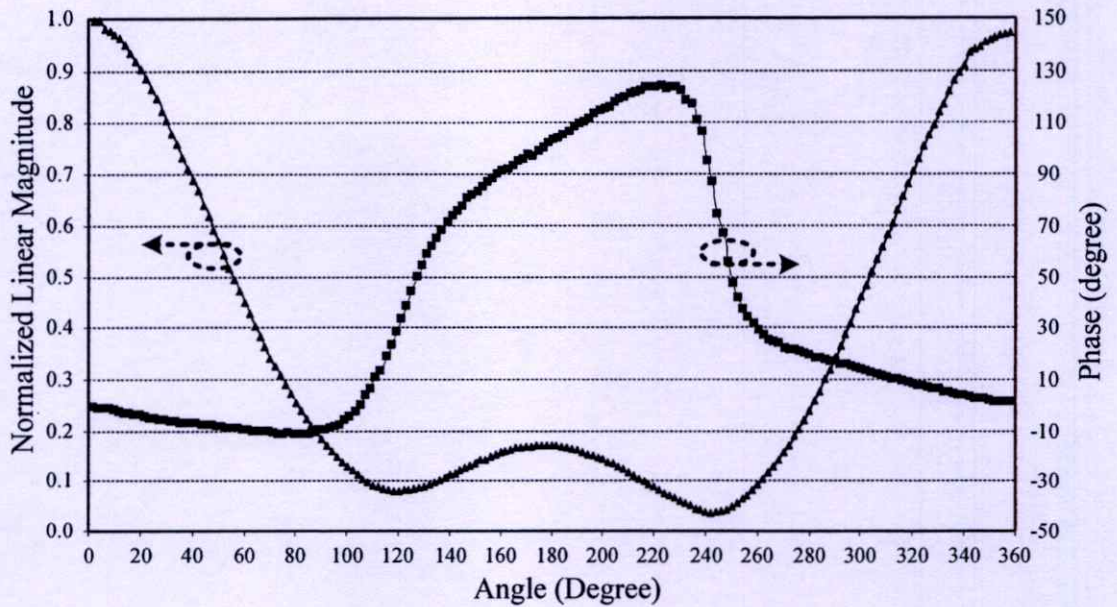
หมายเหตุ :

จากข้อ 3) เพื่อลดขั้นตอนของการคำนวณตามสมการที่ (5.8)-(5.10) สามารถใช้กราฟพื้นผิวในภาคผนวกในการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกได้โดยตรง

### 5.3 การทดลองโดยเทคนิคการคำนวณย้อนกลับจากสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากตัวกลางที่ทดสอบ

การทดสอบเพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอในการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ทดสอบโดยการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนแล้วนำไปคำนวณย้อนกลับซึ่งมีการจัดผังการทดลองตามรูปที่ 4.5 โดยวัสดุที่ทำการทดสอบคือฝาผนังคอนกรีต (มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถลดผลกระทบของสนามเลี้ยวเบนที่ขอบได้) และเพื่อลดความยุ่งยากในการจัดเตรียมระบบและการวิเคราะห์จึงเลือกสายอากาศแพทช์ทำหน้าที่ทั้งสายอากาศรับและส่งสัญญาณ ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งสร้าง





รูปที่ 5.16 แบบรูปการแผ่คลื่นของค่าแมกนิจูดและเฟสของสายอากาศแพทช์

บนแผ่นวงจรรพิมพ์ที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate) มีค่าเท่ากับ 4.36 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ขนาดของค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของสายอากาศแพทช์ ได้แสดงในตารางที่ 5.7 เนื่องจากสายอากาศแพทช์มีการแผ่คลื่นในแต่ละมุมไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญต่อมุมที่ส่งและรับสัญญาณในระบบของการทดลอง ซึ่งสายอากาศแพทช์มีแบบรูปการแผ่คลื่นทั้งค่าแมกนิจูดเชิงเส้นที่นอร์มัลไลซ์และเฟสที่มุมต่างๆ ดังรูปที่ 5.16 สำหรับการทดลองจะนำค่าแมกนิจูดเชิงเส้นและเฟสที่มุมในการส่งและรับสัญญาณไปเป็นตัวประกอบการคูณอีกตัวหนึ่ง เพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่แท้จริง

ก่อนการทดสอบได้วัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่สะท้อนแล้วนำไปคำนวณย้อนกลับ ได้ทดสอบค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฝาผนังคอนกรีตเบื้องต้น โดยใช้โพรบไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฝาผนังคอนกรีตจากโพรบไดอิเล็กตริก

ครั้งที่	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$
1	3.139	0.429
2	2.447	0.579
3	2.804	0.708
เฉลี่ย	2.797	0.572

การทดลองเริ่มต้นโดยส่งสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ Agilent 8648C ที่มีกำลังงาน 0 dBm ผ่านสายเคเบิลเข้าคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทาง Anaren Model JP520S ซึ่งมีค่าเชื่อมต่อ (Coupling) 20 dB ด้านหนึ่งต่อไปยังสายอากาศแพทช์ส่ง และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องแปลงผันขาลง ซึ่งปรับความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ไว้ที่ 2.40 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่วนสายอากาศแพทช์ที่รับคลื่นที่สะท้อนต่ออยู่กับอีกด้านหนึ่งของเครื่องแปลงผันขาลง ทำให้มีสัญญาณความถี่กลาง (IF) ที่ความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ออกที่ช่อง I และ Q ต่อกับออสซิลโลสโคป Tektronix TDS3032 เพื่อวัดขนาดและเฟสของสัญญาณจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ ผลการวัดค่าได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการวัดค่าขนาดและเฟสของสัญญาณจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ

ค่าที่วัดจาก ออสซิลโลสโคป	ตำแหน่งของสายอากาศรับ			
	1	2	3	4
Ch. 1 (V)	2.2	2.1	1.3	1.1
Ch. 2 (mV)	78.0	51.0	57.0	11.5
ผลต่างเฟส ( $^{\circ}$ )	19.30	131.76	58.06	58.06

ตารางที่ 5.10 ระยะและมุมการสะท้อนของสัญญาณจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆ

	ตำแหน่งของสายอากาศรับ			
	1	2	3	4
ระยะสะท้อน $r$ (m)	0.467	0.516	0.567	0.619
มุมสะท้อน $\phi$ ( $^{\circ}$ )	140.00	144.45	148.06	151.01

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณย้อนกลับประกอบด้วยค่าขนาดและเฟสของสัญญาณ ระยะและมุมการสะท้อนจากสายอากาศรับที่ตำแหน่งต่างๆตามตารางที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการคำนวณในกรณีต่างๆดังนี้ ผลการคำนวณได้พิจารณากรณีที่มีสายอากาศรับ 2 ตำแหน่งดังตารางที่ 5.11 และ 5.12 และกรณีที่มีสายอากาศรับ 4 ตำแหน่งดังตารางที่ 5.13 โดยเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นในการคำนวณค่าต่างๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาสายอากาศรับ 2 ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงระยะระหว่าง 2 ตำแหน่งดังตารางที่ 5.11 พบว่าค่า  $\epsilon'$  ที่คำนวณได้ในทุกกรณีมีค่าไม่ต่างกัน แต่ค่า  $\epsilon''$  ที่คำนวณในกรณีที่อยู่ใกล้กัน (1 และ 2) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากโพรบไดอิเล็กตริกมากที่สุด โดยเมื่อ

ตารางที่ 5.11 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 2 ตำแหน่ง.กรณีที่ 1

ค่าเริ่มต้น		ค่าที่คำนวณได้จากตำแหน่งสายอากาศรับที่					
		1 และ 2		1 และ 3		1 และ 4	
$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$
1.0	0.1	2.010	0.6927	1.518	0.7331	1.481	0.6226
3.0	0.5	2.037	0.6831	2.034	0.4175	1.965	0.2494
5.0	0.5	1.958	0.6721	2.034	0.4175	1.964	0.2482
10.0	1.0	2.037	0.6831	2.039	0.4294	1.965	0.2499

ตารางที่ 5.12 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 2 ตำแหน่ง.กรณีที่ 2

ค่าเริ่มต้น		ค่าที่คำนวณได้จากตำแหน่งสายอากาศรับที่					
		1 และ 2		2 และ 3		3 และ 4	
$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$
1.0	0.1	2.01	0.6927	1.914	0.4625	2.012	0.0164
3.0	0.5	2.037	0.6831	2.158	0.3474	2.269	0.8016
5.0	0.5	1.958	0.6721	2.158	0.3474	3.560	0.0801
10.0	1.0	2.037	0.6831	3.152	2.1018	3.696	0.5185

ตารางที่ 5.13 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายอากาศรับ 4 ตำแหน่ง

ค่าเริ่มต้น		ค่าที่คำนวณได้	
$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$
1.0	0.1	1.463	0.6319
3.0	0.5	1.976	0.3786
5.0	0.5	1.971	0.3768
10.0	1.0	1.955	0.3691

ระยะห่างระหว่าง 2 ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กันจะคำนวณได้ค่าที่ใกล้เคียงน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาสายอากาศรับ 2 ตำแหน่งที่อยู่ติดกัน แต่เปลี่ยนแปลงระยะห่างของสายอากาศส่งกับคู่ของ

สายอากาศรับ ดังตารางที่ 5.12 ค่า  $\epsilon_r'$  ที่คำนวณในกรณีที่อยู่ตรงกลาง (2 และ 3) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากโพรบไดอิเล็กตริกมากที่สุด ในกรณีที่พิจารณาสายอากาศรับ 4 ตำแหน่งดังตารางที่ 5.13 เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นสูงขึ้นจะทำให้ค่า  $\epsilon_r'$  ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงมากขึ้น แต่ค่า  $\epsilon_r''$  ที่คำนวณจะมีค่าน้อยลง ซึ่งจากผลการคำนวณทั้งหมดพบว่า การกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของการคำนวณ

จากการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากผลการวัดแล้วนำไปคำนวณย้อนกลับมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้โดยโพรบไดอิเล็กตริก สำหรับโพรบไดอิเล็กตริกที่ใช้ที่เหมาะสมกับการวัดวัสดุที่เป็นของเหลวหรือของแข็งที่มีผิวเรียบ การนำมาทดสอบกับฝาผนังคอนกรีตอาจเกิดความผิดพลาดของข้อมูลเนื่องจากโพรบไม่ได้สัมผัสพอดีกับผิวของผนัง และมีช่องอากาศระหว่างกลาง อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยโพรบไดอิเล็กตริกเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของค่าเป็นไปได้ และค่าที่คำนวณได้ก็มีแนวโน้มที่จะลู่ออกใกล้เคียงค่าที่วัดได้โดยโพรบไดอิเล็กตริกนั่นเอง

## 5.4 สรุป

ผลการวัดทดสอบจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของน้ำและข้าวเปลือกด้วยการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการมาตรฐาน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอดังกล่าว และการประยุกต์ใช้ขั้นถัดไปคือหาความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์ของข้าวเปลือกกับความชื้นระดับต่างๆ ซึ่งจากข้อมูลการวัดทดสอบสามารถสร้างเป็นข้อมูลทางสถิติและกำหนดความสัมพันธ์ดังกล่าวออกมาในรูปแบบของสมการเชิงเส้นได้ ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น สำหรับผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าสะท้อนเพื่อนำไปคำนวณย้อนกลับจากการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฝาผนังคอนกรีตนั้น ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงไปในทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการวัดโดยโพรบไดอิเล็กตริก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการคำนวณโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งระบบในการคำนวณโดยรวมมีความรวดเร็ว และสามารถนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## บทที่ 6

# บทสรุปและวิจารณ์

### 6.1 บทสรุปและวิจารณ์

เทคนิคการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำเสนอนี้เป็นการวัดทดสอบเฉพาะบริเวณ โดยการวัดขนาดสัญญาณสะท้อนและเชื่อมต่อกับสายอากาศโคโพลาร์ จากการเตรียมการทดลองและทำการทดสอบโดยหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอนี้ ความแม่นยำของการวัดขนาดสัญญาณสะท้อนและเชื่อมต่อกับสายอากาศโคโพลาร์มีผลต่อการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยการวัดจากวิธีที่ใช้ไมโครเวฟเป็นอย่างสูง ผลการทดลองทั้งหมดยืนยันให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีราคาถูกลงได้

วิธีการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกในวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการวัดขนาดของกำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อกับสายอากาศโคโพลาร์ที่วางอยู่บนข้าวเปลือก ค่าความหนาแน่นมวลรวมและค่าความชื้นนั้นมีอิทธิพลต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกในแบบที่เหมือนกัน ดังนั้นความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการคำนวณค่า  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนจากทฤษฎีมีสาเหตุหลักมาจากความแตกต่างกันระหว่างการจำลองแบบและการทดลอง โดยสำหรับการจำลองแบบได้พิจารณาว่าตัวกลางมีขนาดกึ่งอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติตัวกลางที่ทดสอบมีขนาดจำกัด ความยาวของสายอากาศโคโพลาร์ที่มีความยาวเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากการจำลองแบบก็มีผลต่อความแม่นยำในการวัดค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  และผลการทดสอบวัดข้าวเปลือกจากในงานนี้เมื่อเปรียบเทียบกับบทความ [48] มีค่าที่แตกต่างกัน มีสาเหตุมาจากใช้เทคนิคการวัดทดสอบที่ต่างกัน ซึ่งก็คือ การวัดจากสัญญาณที่เชื่อมต่อ (Coupling measurement) และการวัดจากการส่งผ่าน (Transmission measurement) และตัวอย่างข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบก็ต่างกันทั้งพันธุ์และช่วงเวลาของการทดสอบ อันเป็นต้นเหตุของความผิดพลาดทั้งสิ้น

เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับวัดค่าความชื้นของข้าวเปลือกในระบบการอบลดความชื้นแบบต่อเนื่อง จึงได้นำเสนออุปกรณ์ตรวจวัดที่เป็นสายอากาศโคโพลาร์ ซึ่งมีข้อดีคือมีโครงสร้างที่กะทัดรัดเพื่อการวัดขนาดของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อ แล้วนำค่ามาคำนวณก่อนนำค่ามาลงในกราฟพื้นผิวของ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ในระนาบของ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  เครื่องมือที่นำเสนอได้รับการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แล้วค่าที่ได้คำนวณต่อเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นและเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลอ้างอิงในบทความ [48] ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอมีความแม่นยำในการหาค่า  $\epsilon_r'$  เมื่อความชื้นมีค่าไม่เกิน 19% แต่

สำหรับค่าความผิดพลาดของการหาค่า  $\varepsilon_r''$  มีค่าสูงกว่า  $\varepsilon_r'$  เนื่องจากเทคนิคการวัดที่ต่างกัน (การวัดจากสัญญาณที่เชื่อมต่อและการวัดจากการส่งผ่าน) อย่างไรก็ตามกราฟพื้นผิวที่วาดขึ้นได้จากการคำนวณในกรณีที่ตัวกลางมีขนาดกึ่งอนันต์ แต่ในการทดลองตัวกลางที่ทดสอบมีขนาดจำกัด ค่าความผิดพลาดนี้สามารถแก้ไขได้โดย ทำการคำนวณด้วยการจำลองแบบใหม่ในกรณีที่ตัวกลางมีขนาดจำกัด แต่การจำลองแบบสำหรับกรณีนี้ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่ยาวนานกว่ามาก เครื่องมือของระบบนี้ได้รับการออกแบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์ตรวจรู้ที่นำเสนอ ในการหาความชื้นจากระบบที่ใช้งานง่าย ราคาถูกและมีความแม่นยำในการวัด เพื่อตอบสนองความต้องการของการควบคุมคุณภาพในระบบอบลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับผลการทดลองเป็นสิ่งยืนยันแล้วว่า เทคนิคการหาค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพันธ์จากการคำนวณย้อนกลับของสนามไฟฟ้าสะท้อนจากตัวกลาง ซึ่งก็คือฝาผนังคอนกรีต จากการวิเคราะห์และการทดลองนั้นพิจารณาตัวกลางที่เป็นสารเนื้อเดียวกันเพียงชั้นเดียวโดยการทำให้เหมาะสมที่สุดมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้จริง จากผลการวิเคราะห์โดยการคำนวณทำให้ได้เงื่อนไขในการปรับพารามิเตอร์ทางกายภาพที่เหมาะสมในการทดลองและการเตรียมการทดสอบที่ดีที่สุด ผลการทดลองที่ได้จากการวัดสนามไฟฟ้าสะท้อนแล้วนำมาคำนวณย้อนกลับ มีแนวโน้มที่จะคำนวณได้ค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโพรบไดอิเล็กตริก หากได้รับการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแก้ไขพัฒนาเป็นระบบที่ทดสอบแบบต่อเนื่องได้ต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

เทคนิคการวัดขนาดของกำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนและเชื่อมต่อจากสายอากาศไดโพลคู่ สำหรับการประยุกต์ใช้ที่นำเสนอการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือก ผลการวัดควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมในส่วนของขั้นตอนการหาค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่ขึ้นอยู่กับการวัดคำนวณค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ซึ่งยังต้องใช้กราฟพื้นผิวในระนาบของ  $\varepsilon_r', \varepsilon_r''$  ที่ได้จากการจำลองแบบ หากหาความสัมพันธ์ของข้อมูลในกราฟพื้นผิวดังกล่าว ออกมาในรูปของสมการได้จะทำให้สามารถลดขั้นตอนในการคำนวณได้ ซึ่งจะให้เครื่องมือคำนวณทุกอย่างและแสดงออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือกได้ในขั้นตอนเดียว

สำหรับเทคนิคการคำนวณย้อนกลับของสนามไฟฟ้าสะท้อนจากตัวกลางโดยการทำให้เหมาะสมที่สุด นั้นมีศักยภาพในการพัฒนาต่อไปเพื่อการประยุกต์ใช้ที่หลากหลาย และปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจคือการตรวจหาวัตถุระเบิดใต้พื้นดิน ซึ่งเงื่อนไขของการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีจะมีความซับซ้อนขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง โดยต้องพิจารณาลักษณะปัญหาที่มีตัวกลางหลายชั้น และจากบทความ[65] ได้นำเสนอหลักการในการแก้ปัญหาที่เป็นตัวกลางหลายชั้นอย่างน่าสนใจ และจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาหลักการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, “ข้อมูลนำเข้า-ส่งออกสินค้าที่สำคัญ.” [Online] Available : [http://www.oae.go.th/oae\\_report/export\\_import/export\\_result.php](http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php). 2009
- [2] A.V. Hippel, **Dielectric Materials and Applications**. New York : The Technology Press of MIT and John Wiley and Sons, 1954.
- [3] E. Nyfors and P. Vainikainen, **Industrial Microwave Sensor**. Boston : Artech House, 1989.
- [4] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan and V.K. Varadan, **Microwave Electronics Measurement and Material Characterization**. John Wiley and Sons, 2004.
- [5] S.O. Nelson, “**Electrical properties of agricultural products – A critical review.**” Trans. ASAE. vol. 16, pp. 384-400, 1973.
- [6] S.O. Nelson, “**Dielectric properties of agricultural products-measurements and applications.**” IEEE Trans. Electrical Insulation. vol. 26(5), pp. 845-869, 1991.
- [7] A.W. Kraszewski and S.O. Nelson, “**Microwave permittivity determination in agricultural products,**” 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Microwave and Radar 1998, MIKON '98. vol. 4, pp. 230-242, 1998.
- [8] H. M. Jaeger and S. R. Nagel, “**Granular solids, liquids and gases,**” Rev. Mod. Phys., vol. 68, no. 4, pp. 1259-1273, 1996.
- [9] M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, “**An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials,**” Biosystems Engineering, Postharvest Technology, Elsevier, pp. 1-18, Apr. 2004.
- [10] S. Seker and H. Abatary, “**New frequency-dependent parametric modeling of dielectric materials,**” Int. J. Electron. Commun. (AEU), Elsevier, pp. 320-327, Apr. 2005.
- [11] W. Meyer and W. M. Schilz, “**Feasibility study of density-independent moisture measurement with microwaves,**” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-29, no. 7, pp. 732-739, June 1981.
- [12] F. Menke and R. Knochel, “**New density-independent moisture measurement methods using frequency-swept microwave transmission,**” Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig, vol. 3, pp. 1415-1418, 1996.

- [13] S. Trabelsi, A. W. Kraszewski, and S. O. Nelson, "**Determining physical properties of grain by microwave permittivity measurement,**" Trans. ASAE, vol. 42, no. 2, pp. 531-536, 1999.
- [14] J. B. Hasted. **Aqueous Dielectrics**. London, U.K. : Chapman & Hall. 1973.
- [15] M.A. Stuchly and S.S. Stuchly, "**Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-a review,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 29, no. 3, pp. 176-183, Sept. 1980.
- [16] C.C. Li and K.M. Chen, "**Determination of electromagnetic properties of materials using flanged open-ended coaxial probe – full-wave analysis,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, no. 1, pp. 19-27, Feb. 1995.
- [17] P. Guillin, "**Microwave techniques for measuring complex permittivity and permeability of material,**" Materials and Processes for Wireless Communication, The American Ceramic Society, Westerville, pp. 65-71, 1995.
- [18] P.C. Fannis, T. Relihan and S.W. Charles, "**Investigation of ferromagnetic resonance in magnetic fluids by means of the short-circuited coaxial line technique,**" Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 28, pp. 2002-2006, 1995.
- [19] J. Musil and F. Zacek. **Microwave Measurements of Complex Permittivity by Free Space Methods and Their Application**. Amsterdam : Elsevier. 1986.
- [20] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "**A free-space method for measurements of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, no. 3, pp. 789-793, June 1989.
- [21] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "**Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic material at microwave frequencies,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 39, no. 2, pp. 387-394, Apr. 1990.
- [22] V. V. Varadan, R.D. Hollinger, D. K. Ghodgaonkar and V. K. Varadan, "**Free-space, broadband measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 40, no. 5, pp. 842-846, Oct. 1991.
- [23] J. Munoz, M. Rojo, A. Parreno and J. Margineda, "**Automatic measurement of permittivity and permeability at microwave frequencies using normal and oblique**

- free-wave incidence with focused beam,** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, no. 4, pp. 886-892, Aug. 1998.
- [24] Y. Kobayashi and S. Tanaka, **“Resonant modes of a dielectric rod resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates,”** IEEE Microwave Theory Tech., vol. 28, no. 10, pp. 1077-1085, Oct. 1980.
- [25] Y. Kobayashi, T. Aoki and Y. Kabe, **“Influence of conducting shield on the Q-factors of a  $TE_0$  dielectric resonator,”** IEEE Microwave Theory Tech., vol. 33, no. 12, pp. 1361-1366, Dec. 1985.
- [26] G. Kent, **“Dielectric resonances for measuring dielectric properties,”** Microwave Journal, vol. 31, no. 10, pp. 99-114, 1988.
- [27] Y. Kobayashi, T. Imai and H. Kayano, **“Microwave measurement of surface impedance of high- $T_c$  superconductor,”** IEEE MTT-S Digest, vol. 1, pp. 281-284, 1990.
- [28] Y. Kobayashi and H. Yashikawa, **“Microwave measurements of surface impedance of high- $T_c$  superconductors using two modes in a dielectric rod resonator,”** IEEE Microwave Theory Tech., vol. 46, no. 12, part 2, pp. 2524-2530, Dec. 1988.
- [29] Y. Shu and T.Y. Wong, **“Perturbation of dielectric resonator for material measurement,”** Elect. Letters, vol.31, no. 9, pp. 704-705, Apr. 1995.
- [30] L.F. Chen, C.K. Ong and B.T.G. Tan, **“Amendment of cavity perturbation method for permittivity measurement of extremely low-loss dielectrics,”** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 6, pp. 1031-1037, Dec. 1999.
- [31] A. W. Kraszewski. **Microwave Aquametry.** New York : IEEE Press. 1996.
- [32] S. O. Nelson, **“Agricultural applications of dielectric measurements,”** IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 13, no. 4, pp. 688-702, Aug. 2006.
- [33] S. O. Nelson and W.K. Whitney, **“Radio-frequency electric fields for stored-grain insect control,”** Trans. ASAE, vol. 3, pp. 133-137, 1960.
- [34] S. O. Nelson and L.F. Charity, **“Frequency dependence of energy absorption by insects and grain in electric fields,”** Trans. ASAE, vol. 15, pp. 1099-1102, 1972.
- [35] S. O. Nelson, **“Microwave dielectric properties of grain and seed,”** Trans. ASAE, vol. 16, pp. 902-50, 1973.
- [36] S. O. Nelson, **“Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables,”** Trans. ASAE, vol. 23, pp. 1314-1317, 1980.

- [37] S. O. Nelson, **"Factors affecting the dielectric properties of grain,"** Trans. ASAE, vol. 25, pp. 1045-1049, 1056, 1982.
- [38] S. O. Nelson, **"Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control,"** Trans. ASAE, vol. 39, pp. 1475-1484, 1996.
- [39] S. O. Nelson, P.G. Bartley, Jr. and K.C. Lawrence, **"Measuring RF and microwave permittivities of adult weevils,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.46, pp. 941-946, 1997.
- [40] S. O. Nelson, P.G. Bartley, Jr. and K.C. Lawrence, **"RF and microwave dielectric properties of stored-grain insects and their implications for potential insect control,"** Trans. ASAE, vol. 41, pp. 685-692, 1998.
- [41] A. W. Kraszewski and S. Kulinski, **"An improved microwave method of moisture content measurement and control,"** IEEE Trans. Industrial Electronics Control Instrum., vol. 23, pp. 364-370, 1976.
- [42] R.J. Aguerre, M. Tolaba and C. Suarez, **"Modelling volume changes in food drying and hydration,"** Latin America Applied Research, vol.38, pp. 345-349, 2008.
- [43] R.J. King, K.V. King and K. Woo, **"Microwave moisture measurement of grains,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.41, no.1, pp. 111-115, Feb. 1992.
- [44] S. Trabelsi, A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, **"A microwave method for on-line determination of bulk density and moisture content of particulate materials,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.47, no.1, pp. 127-132, Feb. 1998.
- [45] S. Trabelsi, A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, **"New density independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, no. 3, pp. 613-622, June 1998.
- [46] M.B. Slima, R.Z. Morawski, A. W. Kraszewski, A. Barwicz and S. O. Nelson, **"Calibraion of a microwave system for measuring grain moisture content,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 3, pp. 778-783, June 1999.
- [47] S. O. Nelson, A. W. Kraszewski, S. Trabelsi and K.C. Lawrence, **"Using cereal grain permittivity for sensing moisture content,"** IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 49, no. 3, pp. 470-475, June 2000.
- [48] S. O. Nelson, S. Trabelsi and A. W. Krazewski, **"RF sensing of grain and seed moisture content,"** IEEE Sensors Journal, vol.1, no.2, pp. 119-126, Aug. 2001.

- [49] S. Trabelsi, A. W. Kraszewski, and S. O. Nelson, "**New calibration technique for microwave moisture sensors,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, no. 4, pp. 877-881, Aug. 2001.
- [50] S. O. Nelson, "**Density-permittivity relationships for powdered and granular materials,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no. 5, pp. 2033-2040, Oct. 2005.
- [51] S. Trabelsi, S. O. Nelson, and O. Ramahi, "**A low-cost microwave moisture sensor,**" Proc. the 36<sup>th</sup> EuMA, pp. 447-450, 2006.
- [52] S. Trabelsi and S. O. Nelson, "**Nondestructive sensing of physical properties of granular materials by microwave permittivity measurement,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 55, no. 3, pp. 953-963, June 2006.
- [53] S. Trabelsi and S. O. Nelson, "**Influence of nonequilibrated water on microwave dielectric properties of wheat and related errors in moisture sensing,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, no. 1, pp. 194-198, Feb. 2007.
- [54] A. P. Mossman, "**A review of basic concepts in rice-drying research,**" Critical Rev. in Food Sci and Nutr., Vol.25(1), pp. 49-70, 1986.
- [55] J.F. Thomson. "**Principle of rice drying**" [Online]. Available : [http:// agronomy.ucdavis.edu/uccerice/ QUALITY/rice\\_dry.htm](http://agronomy.ucdavis.edu/uccerice/QUALITY/rice_dry.htm). 1998.
- [56] กรมวิชาการเกษตร **คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวป่นในข้าวหอมมะลิไทย** กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จีรวัฒน์เอ็กเพรส 2545
- [57] C. V. K. Kandala, C. L. Butts, and S. O. Nelson, "**Capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content in nuts and grain,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, no. 5, pp. 1809-1813, Oct. 2007.
- [58] Z. Abbas, Y. K. Yeow, A. H. Shaari, K. Khalid, J. Hassan and E. Saion, "**Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor,**" IEEE Sens. Jour., vol. 5, no. 6, pp. 1281-1287, Dec. 2005.
- [59] Z. Ma and S. Okamura, "**Permittivity determination using amplitudes of transmission and reflection coefficients at microwave frequency,**" IEEE Microwave Theory Tech., vol. 47, no. 5, pp. 546-550, May 1999.

- [60] S. N. Kharkovsky, M. F. Akay, U. C. Hasar and C. D. Atis, "**Measurement and monitoring of microwave reflection and transmission properties of cement-based specimens,**" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 51, no. 6, pp. 1210-1218, Dec. 2002.
- [61] E. H. Newman, J. H. Richmond and B. W. Kwan, "**Mutual impedance computation between microstrip antennas,**" IEEE Microwave Theory Tech., vol. MTT-31, no. 11, pp. 941-945, Nov. 1983.
- [62] J. A. Kong. **Electromagnetic Wave Theory.** Wiley Interscience. 1990.
- [63] N. A. Antonyk, I. S. Kruglov, V. V. Zagoskin, L. P. Ligthart, A. S. Shostak, V.N.Iljushenko and B.I.Avdochenko, "**Measurement of the complex dielectric permittivity of homogeneous media with dipole antenna sensors,**" Proc. of European Radar Conference, Amsterdam, pp. 169-172, 2004.
- [64] A. Shostak, V. Zagoskin, L. Ligthart and V. Iljushenko, "**Analysis of a linear dipole antenna system for measurement the complex dielectric permittivity,**" 14<sup>th</sup> International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, vol.1, pp. 294-298, May 2002.
- [65] K. P. Thakur and W. S. Holmes, "**Noncontact measurement of moisture in layered dielectrics from microwave reflection spectroscopy using an inverse technique,**" IEEE Microwave Theory Tech., vol. 52, no. 1, pp. 76-82, Jan. 2004.
- [66] D. Kalyanmoy. **Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples.** New Delhi : Prentice Hall of India Private Limited. 1995.
- [67] A. C. Metaxas and R. J. Meredith. **Industrial Microwave Heating.** London, United Kingdom : Peter Peregrinus. 1988.
- [68] C. Sangdao, A. Roeksabutr and M. Krairiksh, "**An applicator for uniform heating using perpendicular slots on a concentric cylindrical cavity excited by perpendicular waveguides,**" International Journal of Electronics, vol.93, no.5, pp. 313-334, May 2006.
- [69] ASAE STANDARDS 1998. **Moisture measurement-unground grain and seeds.** 45<sup>th</sup> Edition, American Society of Agricultural Engineering, pp. 551, 1998.
- [70] R. W. P. King, M. Owen, T. T. Wu, **Lateral Electromagnetic Waves.** Springer-Verlag, 1992.
- [71] C. A. Balanis. **Antenna Theory: Analysis and Design.** New York: Wiley Interscience. 1982.

- [72] R. F. Harrington. **Field Computation by Moment Methods.** Krieger, 1995.
- [73] S. Vitebskiy and L. Carin, “**Moment-method modeling of short-pulse scattering from and the resonances of a wire buried inside a lossy, dispersive half-space,**” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-43, pp. 1303-1312, Nov. 1995.
- [74] IE3D, Zeland Software, Inc.
- [75] CST microwave studio 2008.
- [76] Agilent technologies, “**S-parameter design paper,**” AN 154 Application note.
- [77] J. Mearnchu, D. Torrungrueng, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “**An inverse technique for dielectric-property determination from reflection measurement in spatial domain,**” *Proc. of APMC2005, China*, vol. 5, pp. 3051-3054, Dec. 2005.
- [78] J. Mearnchu, D. Torrungrueng, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “**Determination of dielectric-property from reflection measurement in spatial domain including noise effect,**” *Proc. of ICEAST2007, Thailand*, pp. 655-658, Nov. 2007.
- [79] J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “**Dielectric-property determination from measurement of magnitude of reflection and coupling coefficients of coupled antennas,**” *ECTI-CON 2008, Thailand*, pp. 221-224, May 2008.
- [80] Agilent 85070E Dielectric Probe Kit, 200 MHz to 50 GHz, 2006.
- [81] J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “**A portable dielectric-property determination system using coupled antennas,**” *MIKON2008, Poland*, pp. 884-887, May 2008.
- [82] J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “**A handheld moisture content sensor using coupled-dipole antennas,**” accepted for publication in *Latin American Applied Research: an international journal (LAAR)*.

## ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ

```

C *****
C * This program is used to calculate e-fields distribution *
C *           in dielectrics           This Program recall 3 routine *
C *****
c           This version find common unitD from unitDQ1 and unitDQ2
c           and then find step length by Bounding Phase & Golden search algorithm
c           from selected common unitD
c           use R function Real(Re[]), Imaginay(Im[]) for noise data
c           R function is only Ereflect at Muti-position, single frequency
c           X1 = EpsilonRprime ,X2 = EpsilonRprimeprime

c   Generalized program for :
c           (Q) Sampling points can define memory more than actually use in program
c           (M) Parameter vectors can define memory more than actually use in program
c           (N) Performance function Must to define memory equal actually use in program
c           Number of power of performance function is 1 ,that is absolute
c           prove RES() for more accurate result 10/01/2006

```

```
PROGRAM MAIN_OPTIMIZE
```

```
IMPLICIT real*8 (a-h,o-z)
```

```

c   Set maximum number of Sampling      Points   number,   Parameter   Vectec   number,
PerformanceFunction number

```

```
integer SamplingPt, ParameterVct, PerformanceFn
```

```
C   manual fill in number
```

```
Parameter(SamplingPt=4,ParameterVct=2,PerformanceFn=2)
```

```
integer   lp,i,j,k,tmi,idx,spp,prvct,pfmfn,pol,sfile,calibrateDT
```

```

integer      allloop,bphaseLP,goldenLP,accumLP,RFpower,RFpowerf
complex*8    Erftsm,measReflect
real*8       Desire,Sdt,PHR,Freq,Q,errX,Dnoise,noise
real*8       Tolerance,x,uDcmn,xdummy,xmp,conc,concf
real*8       Mgstarch,Phstarch,Mgabs,Phabs,Mgpcb,Phpcb
real*8       calibratMg(SamplingPt),calibratPh(SamplingPt)

dimension    Desire(PerformanceFn,SamplingPt)
dimension    Sdt(SamplingPt),PHR(SamplingPt),errX(ParameterVct)
dimension    Dnoise(PerformanceFn,SamplingPt)
dimension    Mgabs(SamplingPt),Phabs(SamplingPt)
dimension    Mgpcb(SamplingPt),Phpcb(SamplingPt)
dimension    Mgstarch(SamplingPt),Phstarch(SamplingPt)
dimension    x(ParameterVct),xdummy(ParameterVct),xmp(ParameterVct)
dimension    simX(ParameterVct),xtemp(ParameterVct)
dimension    Q(PerformanceFn),QX0F(PerformanceFn)
dimension    GradQ(PerformanceFn,ParameterVct),GQtot(ParameterVct)
dimension    uDQ(PerformanceFn,ParameterVct),uDcmn(ParameterVct)
dimension    tstuDQ(PerformanceFn),sqrGQ(PerformanceFn)

```

```
C      * DATA SET *
```

```
DATA DP/.1D-4/DPP/.2D-4/! DP/.1D-3/DPP/.2D-3/
```

```
C      /* openfile */
```

```
CHARACTER FILENAME2*30,selfile*40
```

```
C      * DATA READ IN *
```

```
PRINT*,'This program optimized 2 function with Position variation'
```

```
print*,"
```

```
PRINT*,''
```

```

PRINT*,'>> File name to SAVE :<*.txt>:'
READ(*,' (A)')FILENAME2
OPEN(2,FILE=FILENAME2, ERR=901, STATUS='NEW')
GOTO 902
901 PRINT*,'!!@ Can not Open output file @!! '
STOP
902 PRINT*,'      Yea! open output file done #'
PRINT*,'
PRINT*,' Input polarization of Reflected field ?'
PRINT*,' [0] : Parallel polarization'
PRINT*,' [1] : Perpendicular polarization'
READ(*,' (I)')pol
PRINT*,'

pol = 1      ! fix to perpendicular polarization

c  manual fill in number
spp = 4 ! Define Sampling Point number
prvct = 2 ! Define Parameter Vector number
pfmfn = 2 ! Define Performance Function number

c  semi-manual fill in number
Freq = 2.45E+9
do idx = 1,spp
call Reflect(Erftsm,Freq,Sdt(idx),PHR(idx),simX,prvct,pol)
Desire(1,idx) = real(Erftsm)
Desire(2,idx) = aimag(Erftsm)
enddo
write(2,*) 'Reflection at 2.45 GHz by Steepest Descent method'

```

```

write(2,100) spp
100 format('/Multi Position with',i3,' Points, Single Frequency')
if (pol.eq.0) goto 171
write(2,*) ' Perpendicular polarization of Reflected field '
goto 172
171 write(2,*) ' Parallel polarization of Reflected field '
172      write(2,103) (Sdt(idx),idx=1,spp)
103 format('Distance      :',4(f7.4,',',2x))
write(2,104) (PHR(idx),idx=1,spp)
104 format('Incident angle :',4(f8.2,',',2x)/)

      write(2,305) (Dnoise(1,idx),idx=1,spp)
305 format('Re(Measure) :',4(f12.5,',',2x))
      write(2,306) (Dnoise(2,idx),idx=1,spp)
306 format('Im(Measure) :',4(f12.5,',',2x))
      write(2,307) conc,RFpower
307 format('Solution concentration : ',f3.1,10x,' RF power : ',I2,/)

      write(2,*) 'Ideal data of Reflection coefficient'
      write(2,105) (Desire(1,idx),idx=1,spp)
105 format('Re(Calculate)  :',4(f12.5,',',2x))
      write(2,106) (Desire(2,idx),idx=1,spp)
106 format('Im(Calculate)  :',4(f12.5,',',2x)/)

c #####
C * GRADIENT CALCULATION USING DIFFERENCE APPROXIMATION *
c manual fill in number
lp = 0
k = 0

```

```

LOOPMAX = 1000

Tolerance = 1.E-7 ! Tolerance of acceptable value
dTolerance = 1.E-7 ! Tolerance of different of performance fn to accept parameter value
eps = 1.E-6 ! Tolerance of Golden search
Qts1 = 0. ! set for different performance function of couple loop less than tolerance
Qts2 = 0. !

lpp = 1.
allloop = 0
bphaseLP = 0
goldenLP = 0
accumLP = 0

c manual fill in number
x(1) = 50. ! initial parameter value
x(2) = 5.

176 write(2,107) x(1),x(2),simX(1),simX(2),Tolerance
107 format('@@@@@@@@@ Initial X1 :',f6.1,5x,'Initial X2 :',f6.1,10x
&,'Simulate X1 :',f6.2,5x,'Simulate X2 :',1pe10.2,5x,'Tolerance :',1pe10.2,/)

c##### Begin iterate loop #####

789 do 75 idx = 1 ,prvct
xtemp(idx) = x(idx)
75 continue

CALL RES(Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,xtemp,spp,prvct,pfmfn,pol)
QtotX0 = 0.

do 76 idx = 1 ,pfmfn
QX0F(idx) = Q(idx)
QtotX0 = QtotX0+Q(idx)
76 continue

```



```

sqrGQ(i) = 1.
endif
11 continue

do 13 i = 1 ,pfmfn
do 14 j = 1 ,prvct
uDQ(i,j) = -GradQ(i,j)/sqrGQ(i)    !-GradQ(i,j)/sqrGQ(i)
14 continue
13 continue

c          @ Test each unit vector of steepest direction of Q with Qtot
do 15 i = 1 ,pfmfn
GraddotuDQ = 0.
do 16 j = 1 ,prvct
GraddotuDQ = GraddotuDQ + GQtot(j)*uDQ(i,j)
16 continue
tstuDQ(i) = -GraddotuDQ            !-GraddotuDQ
15 continue

c          @ Find Maximum Magnitude of unit vector of each Q to common unit vector
testU = tstuDQ(1)
tmi = 1
do 159 i = 1 ,pfmfn
if (tstuDQ(i).le.testU) goto 159
tmi = i
testU = tstuDQ(i)
159 continue
do 17 j = 1 ,prvct
uDcmn(j) = uDQ(tmi,j)

```

17 continue

```

c          @ Find Step size or alphastar
allloop = 0
bphaseLP = 0
goldenLP = 0
call bphase(x,uDcmn,a,b,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)
bphaseLP = nfun
allloop = allloop + nfun
call golden(x,uDcmn,a,b,eps,xstar,nfun,ierr,xdummy,Q,Dnoise
&,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)
goldenLP = nfun
allloop = allloop + nfun
accumLP = accumLP + allloop

```

c suitable alpha & vector D will update parameter value for calculate all Q in next loop

```

xmp(1) = xstar*.6
xmp(2) = xstar*.6
do 18 j = 1 ,prvct
x(j) = dabs(x(j) + xmp(j)*uDcmn(j))
18 continue

```

```

lp = lp + 1
Qts1 = Qst2
Qst2 = 0.
do 19 i = 1 ,pfmfn
Qst2 = Qst2 + Q(i)
19 continue
if (lp.le.LOOPMAX)goto 789

```

```
c##### end iterative loop #####
```

```
c      An acceptable of parameter value will show in last line
```

```
696 write(2,*) ' Qtot in next loop NOT change to meet tolerance !!!'
```

```
666 write(*,601) x(1),x(2),lp
```

```
write(2,601) x(1),x(2),lp
```

```
601 format('/Optimized er :',1pe20.8,5x,'Optimized err :',1pe20.8,5x,'at Loop # : ',i4/)
```

```
do j = 1 ,prvct
```

```
  errX(j) = (x(j)-simX(j))*100./simX(j)
```

```
enddo
```

```
write(2,602) errX(1),errX(2)
```

```
602 format('% Error of X1 : ',f8.2,10x,'% Error of X2 : ',f8.2/)
```

```
CLOSE(2)
```

```
END      ! End Main Program
```

```
C@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
```

```
C      *      Subroutine for Calculation in Main Thesis *
```

```
C@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
```

```
SUBROUTINE          GRAD_CAL(x,DP,DPP,GradQ,GQtot,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR
&      ,spp,prvct,pfimfn,pol)
```

```
IMPLICIT real*8 (a-h,o-z)
```

```
Integer      spp,prvct,pfimfn,i,j,k,tmp,pol
```

```
real*8      Q(pfmfn),x(prvct),xtemp(prvct),Freq,Sdt(spp),PHR(spp)
```

```
real*8      Dnoise(pfmfn,spp),GradQ(pfmfn,prvct),GQtot(prvct)
```

```
dimension   Qminut(pfmfn,prvct),Qplus(pfmfn,prvct)
```

```
C          @ Find Delta each Q
```

```
DO 567 i = 1 ,prvct
```

```
  tmp = 0
```

```
  do 22 j = 1 ,prvct
```

```
    xtemp(j) = x(j)
```

```
    if (i.eq.j) tmp = j
```

```
  22 continue
```

```
  xtemp(tmp) = x(tmp) - DP
```

```
  CALL RES(Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,xtemp,spp,prvct,pfmfn,pol)
```

```
  do 23 k = 1 ,pfmfn
```

```
    Qminut(k,i) = Q(k)
```

```
  23 continue
```

```
  xtemp(tmp) = x(tmp) + DP
```

```
  CALL RES(Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,xtemp,spp,prvct,pfmfn,pol)
```

```
  do 24 k = 1 ,pfmfn
```

```
    Qplus(k,i) = Q(k)
```

```
  24 continue
```

```
567 CONTINUE
```

```
C          @ Find Gradient of each Q
```

```
do 765 i = 1 ,pfmfn
```

```
do 765 j = 1 ,prvct
```

```
  GradQ(i,j) = (Qplus(i,j)-Qminut(i,j))/DPP
```

765 continue

c Find Gradient of Qtot

do 113 j = 1 ,prvct

sumQP = 0.

sumQM = 0.

do 112 i = 1 ,pfmfn

sumQP = sumQP + Qplus(i,j)

sumQM = sumQM + Qminut(i,j)

112 continue

GQtot(j) = (sumQP-sumQM)/DPP

113 continue

RETURN

END

C\*\*\*\*\*

Subroutine golden(x,su,a,b,eps,xstar,nfun,ierr,xdummy,Q,Dnoise

& ,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

c Golden section search algorithm

c finds XSTAR such that  $f(x+xstar*s)$  is minimum

c x : solution vector

c su : direction vector

c a,b : lower and upper limits

c nfun : function evaluations

c ierr : error code , 1 for error

c xdummy : dummy variable of size n

IMPLICIT real\*8 (a-h,o-z)

```

Integer      ic,k,spp,prvct,pfmlfn,pol
real*8       lw,x(prvct),su(prvct),xdummy(prvct)
real*8       Q(pfmlfn),Freq,Sdt(spp),PHR(spp)
real*8       Dnoise(pfmlfn,spp)      !,uDcmn(prvct)

```

```

C  STEP 1 of the algorithm @@@@

```

```

xstar = a

```

```

ierr = 0

```

```

maxfun = 10000

```

```

aw = 0.0

```

```

bw = 1.0

```

```

lw = 1.0

```

```

k = 1

```

```

c  golden number

```

```

gold = (sqrt(5.)-1.)/2.

```

```

w1prev = gold

```

```

w2prev = 1.-gold

```

```

c  initial function evaluations

```

```

call mapfun(x,su,a,b,w1prev,fw1,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmlfn,pol)

```

```

call mapfun(x,su,a,b,w2prev,fw2,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmlfn,pol)

```

```

ic = 0

```

```

C  STEP 2 of the algorithm

```

```

10  w1 = w1prev

```

```

     w2 = w2prev

```



```

ic = 3
aw = w2
bw = w1
lw = bw - aw
w1prev = aw + gold*lw
w2prev = bw - gold*lw
endif
k = k + 1

```

C STEP 3 of the algorithm

```

if (dabs(lw).lt.eps) then
xstar = a + (b-a)*(aw+bw)/2
return
else if (nfun.gt.maxfun) then
        write(2,603) maxfun,a+aw*(b-a),a+bw*(b-a)
603 format(' Golden section did not converge in ',i6
&,' functions evaluations','Interval(',1pe12.5,',',1pe12.5,')')
        ierr = 1
        return
endif
goto 10

end

```

C\*\*\*\*\*

```

Subroutine      bphase(x,su,a,b,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR
&              ,spp,prvct,pfmfn,pol)

```

c Bounding Phase Method

c arguments are explained in subroutine golden

IMPLICIT real\*8 (a-h,o-z)

Integer spp,prvct,pfmfn,pol

Dimension x(prvct),su(prvct),xdummy(prvct)

real\*8 Q(pfmfn),Dnoise(pfmfn,spp),Freq,Sdt(spp),PHR(spp)

C STEP 1 of the algorithm #####

C initial guess, change if you like

w0 = 0.0

delta = 1.0

201 call mapfun(x,su,0d0,1d0,w0-delta,fn,nfun,xdummy,Q,Dnoise,

& Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

call mapfun(x,su,0d0,1d0,w0,f0,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

call mapfun(x,su,0d0,1d0,w0+delta,fp,nfun,xdummy,Q,Dnoise,

& Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

C STEP 2 of the algorithm #####

if (fn.ge.f0) then

if (f0.ge.fp) then

delta = 1 \* delta

else

a = w0 - delta

b = w0 + delta

endif

elseif ((fn.le.f0).and.(f0.le.fp)) then

delta = -1 \* delta

else

delta = delta / 2.

```

goto 201
endif
k = 0
wn = w0 - delta

C STEP 3 of the algorithm #####
203 w1 = w0 + (2**k)*delta
call mapfun(x,su,0d0,1d0,w1,f1,nfun,xdummy,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

C STEP 4 of the algorithm #####
if (f1.lt.f0) then
c bracketing is not over, reset WN to W0 and W0 to W1
k = k + 1
wn = w0
fn = f0
w0 = w1
f0 = f1
goto 203
else
c bracketing is complete, so quit
a = wn
b = w1
endif
if (b.lt.a) then
temp = a
a = b
b = temp
endif
return

```

end

C\*\*\*\*\*

Subroutine mapfun(x,su,a,b,w,f,nfun,xd,Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,spp,prvct,pfmfn,pol)

c Calculates a point and function value in mapped W units away from a point X in S direction

IMPLICIT real\*8 (a-h,o-z)

Integer i,j,spp,prvct,pfmfn,pol

Dimension x(prvct),su(prvct),xd(prvct)

real\*8 Q(pfmfn),Dnoise(pfmfn,spp),Freq,Sdt(spp),PHR(spp)

nfun = nfun + 1

xw = a + w\*(b-a)

do 50 j = 1 ,prvct

xd(j) = x(j) + xw\*su(j)

50 continue

call RES(Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,xd,spp,prvct,pfmfn,pol)

f = 0.

do 51 i = 1 ,pfmfn

f = f + Q(i)

51 continue

return

end

C\*\*\*\*\*

c Both Q1 & Q2 can be calculate in one call subroutine

SUBROUTINE RES(Q,Dnoise,Freq,Sdt,PHR,xtemp,spp,prvct,pfmfn,pol)

IMPLICIT real\*8 (a-h,o-z)

c IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

complex\*8 Erft

integer idx,spp,prvct,pfmfn,pol

real\*8 Q(pfmfn),Dnoise(pfmfn,spp),Freq,Sdt(spp),PHR(spp)

real\*8 xtemp(prvct),R(pfmfn)

do 101 i = 1 ,pfmfn

Q(i) = 0.0

101 continue

do idx = 1,spp

call Reflect(Erft,Freq,Sdt(idx),PHR(idx),xtemp,prvct,pol)

R(1) = real(Erft)

R(2) = aimag(Erft)

c error function should power 2. If more than 2, it can faster converge but negative sign !

do 102 i = 1 ,pfmfn

Q(i) = Q(i) + (dabs(Dnoise(i,idx))-dabs(R(i)))\*\*2 ! test number of power from 2 to 10 , 2 is

best ,other number make X2 negative number

102 continue

enddo

do 103 i = 1 ,pfmfn

$Q(i) = \text{dsqrt}(Q(i)/\text{spp})$

103 continue

RETURN

END

C@@

Subroutine Reflect(Erft,Freq,Sdtt,PHRR,vecX,prvct,pol)

IMPLICIT real\*8 (a-h,o-z)

Integer prvct,pol

complex\*8 Jay,cnt,Erft,tmp1,tmp2,Escpx,ymp

real\*8 K0,Sdtt,PHRR,Lamda,Freq,Qinc

real\*8 vecX(prvct),Sigma,Phi

c PHR ! Observation angle correspond to Observation distance

c PHPR ! Incident angle Phi Prime (in Degrees)

Qinc = PHRR ! Incident angle

Jay = CMPLX(0.,1.)

PI = 4.0\*atan(1.0) ! (-\_')!^

TPI = 2.0\*PI

Clight= 299792458.

Ep0 = 8.85418781761E-12

Lamda = Clight/Freq

K0 = TPI/Lamda

E0 = 1. ! Amplitude of Incident field

```

Escpx = vecX(1)-Jay*vecX(2)      ! @@@ relative complex permittivity @@@
goto 733

Omega = TPI*Freq
Sigma = Omega*Ep0*vecX(2)

cnt = cdexp(Jay*K0*Sdttdcosd(Qinc+180.-Qinc))
      tmp1 = Jay*Omega*Ep0

c   Layer problem : antenna -> free space -> unknown

if (pol.eq.0) goto 70             ! pol=0 => for parallel polarization
tmp2 = cdsqrt((Sigma+tmp1*vecX(1))/tmp1)      ! for perpendicular
polarization
      ymp = dsqrt(1.-((dsind(Qinc))**2)/vecX(1))

Erft = ((dcosd(Qinc)-ymp*tmp2)/(dcosd(Qinc)+ymp*tmp2)) !*cnt      ! for perpendicular
polarization

RETURN

700 tmp2 = cdsqrt(tmp1/(Sigma+tmp1*vecX(1)))    ! for paralell polarization
      ymp = dsqrt(1.-((dsind(Qinc))**2)/vecX(1))

Erft = ((ymp*tmp2-dcosd(Qinc))/(dcosd(Qinc)+ymp*tmp2)) !*cnt ! for paralell polarization

733 ymp = csqrt(Escpx)
      tmp2 = cdsqrt(1.-((dsind(Qinc))**2)/Escpx)
      Erft = ((dcosd(Qinc)-ymp*tmp2)/(dcosd(Qinc)+ymp*tmp2))

```

RETURN

END

C-----

## ภาคผนวก ข

วิธีการสอบเทียบปริมาณความชื้นในข้าวเปลือก

## 1. หลักการวัดหาปริมาณความชื้นข้าว

### นิยาม

ปริมาณความชื้นข้าว (Moisture Content, MC) หมายถึง ร้อยละของน้ำหนักน้ำในข้าวต่อน้ำหนักของข้าว

### วิธีการวัดหาปริมาณความชื้นในข้าว

การหาปริมาณความชื้นในข้าว แบ่งออกเป็นสองวิธีหลักคือ

- 1) การหาปริมาณความชื้นโดยตรง (Direct measurement)
- 2) การหาปริมาณความชื้นโดยทางอ้อม (Indirect measurement)

การหาปริมาณความชื้นโดยตรง (Direct measurement) เป็นวิธีการที่สำคัญและมีความเที่ยงตรงสูงที่ยึดถือเป็นมาตรฐานของสถาบันด้านชั่งตวงวัดแห่งชาติของประเทศต่างๆคือ วิธีการอบให้น้ำระเหย (Oven Drying Method) การหาปริมาณความชื้นโดยวิธีนี้คือ ชั่งหาน้ำหนักของข้าวที่จะหาปริมาณความชื้น แล้วนำไปอบให้น้ำในข้าวระเหยออกจนหมด หลังจากนั้นนำไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของข้าว (ปริมาณน้ำในข้าวที่หายไป) วิธีกรรมนี้ได้กำหนดให้เป็นวิธีพื้นฐาน (Basic method) ในการใช้สอบเทียบเครื่องวัดความชื้นแบบการหาปริมาณความชื้นโดยทางอ้อม

ตารางที่ ๘1 มาตรฐานของการหาปริมาณความชื้นในข้าวด้วยวิธี Oven Drying Method ของแต่ละองค์กร

สถาบัน	PTB	Japan	USDA	ISO	AOAC	ASAE
อุณหภูมิที่อบ (°C)	130	106.5	130	130	135	103
ระยะเวลาที่อบ (ชั่วโมง)	2	5	1	2	2	79

สำหรับวิธีการหาปริมาณความชื้นในข้าวด้วยวิธี Oven Drying Method ที่ห้องปฏิบัติการของสำนักชั่งตวงวัดไทยใช้เป็นมาตรฐานคือ วิธีการตามมาตรฐาน ISO 712, "Cereals and cereal products – Determination of moisture content (Routine Reference Method)," 1998 ซึ่งอบด้วยอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

การหาปริมาณความชื้นด้วยวิธี Oven Drying Method จะต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส ภายใน 1

ชั่วโมง และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 30 ถึง 70 % เนื่องจากเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลานาน จึงไม่เหมาะสมกับการทดสอบที่ต้องการทราบผลในระยะเวลาสั้นๆ เช่น การวัดในเชิงพาณิชย์

การหาค่าปริมาณความชื้นโดยทางอ้อม (Indirect measurement) เป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของข้าว เช่น ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) หรือ ความจุไฟฟ้า (Capacitance) ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าง่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

ของข้าวแต่ละชนิดที่เพาะปลูกในแต่ละพื้นที่และปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดข้าว ดังนั้นเครื่องวัดความชื้นข้าวที่อาศัยหลักการนี้จึงต้องปรับเทียบกับวิธีการหาค่าปริมาณความชื้นโดยตรงด้วยตัวอย่างข้าวแต่ละชนิดที่เพาะปลูกในพื้นที่ที่จะใช้เครื่องมือวัดความชื้นข้าว นั้น เพื่อให้แสดงค่าให้สอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าหรือค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้

## 2. ขั้นตอนการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกโดยการอบลมร้อนด้วยเตาอบ

การหาค่าความชื้นของธัญพืชโดยการอบลมร้อนด้วยเตาอบตามวิธีของ ASAE นั้นเป็นวิธีมาตรฐาน แต่เนื่องจากขั้นตอนของวิธีการหาค่าความชื้นนี้ใช้สำหรับทดสอบข้าวสาลี ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงขั้นตอนที่เหมาะสมเพื่อการทดสอบข้าวเปลือกดังนี้

1) นำข้าวเปลือกชั่งน้ำหนักประมาณ 10 กรัม โดยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดระดับ 0.0001 กรัม แล้วใส่ในจานแก้วทนความร้อนจำนวน 30 ชุด ดังรูปที่ ๘1

2) นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เตรียมไว้นี้เข้าเตาอบลมร้อนดังรูปที่ ๘2 ที่ได้เตรียมไว้จนมีอุณหภูมิคงที่ที่ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งตรวจสอบอุณหภูมิโดยเครื่องวัดดังรูปที่ ๘3 เป็นเวลานาน 19 ชั่วโมง

3) เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำตัวอย่างข้าวเปลือกออกจากเตาอบ เก็บเข้าหม้อที่บรรจุสารดูดความชื้นเพื่อให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำตัวอย่างข้าวเปลือกชั่งเพื่อหาน้ำหนักที่ลดลง

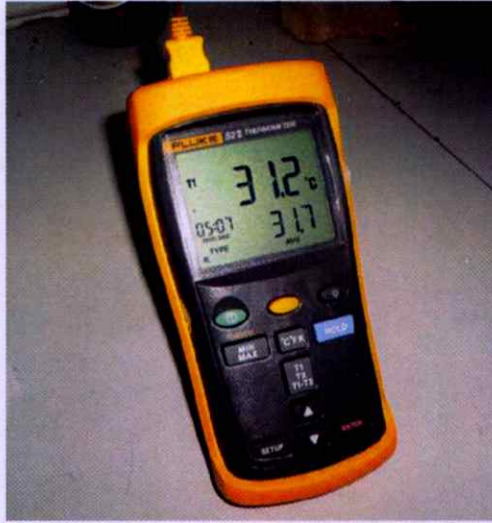
4) นำตัวอย่างข้าวเปลือกอบในเตาอบต่ออีก 6 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลาและทำให้เย็นลงแล้วชั่งหาน้ำหนักที่ลดลงอีกครั้ง หากน้ำหนักของตัวอย่างข้าวเปลือกหลังจากอบไปแล้ว 6 ชั่วโมงเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.005 กรัม จะถือว่าน้ำหนักคงที่แล้วจึงยุติการอบ แต่ถ้าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงเกิน 0.005 กรัม ก็ทำตามขั้นตอนที่ 3 และ 4 ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างข้าวเปลือกมีค่าคงที่



รูปที่ ผ1 ตัวอย่างข้าวเปลือกในหม้อที่บรรจุสารดูดความชื้นและเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดระดับ  
0.0001 กรัม



รูปที่ ผ2 ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เข้าเตาอบลมร้อนเพื่อลดความชื้น



รูปที่ ผ3 เครื่องมือในการวัดอุณหภูมิภายในเตาอบลมร้อน

### ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกโดยเครื่องมือวัดในระบบไมโครเวฟ

### ขั้นตอนในการใช้งานเครื่องมือวัดในระบบไมโครเวฟ

- 1). นำค่า  $V_r$  และ  $V_c$  ที่วัดได้จากเครื่องมือคำนวณค่า  $P_r$  และ  $P_c$  โดยสมการดังนี้

$$P_r \text{ (dBm)} = \frac{V_r \text{ (V)} - 1.722}{0.028}$$

$$P_{r\_calibrate} \text{ (dBm)} = P_r \text{ (dBm)} - (2.8 + 2.8 + 10.23)$$

$$P_{r\_calibrate} \text{ (W)} = 0.001 \times 10^{\frac{P_{r\_calibrate} \text{ (dBm)}}{10}}$$

และ

$$P_c \text{ (dBm)} = \frac{V_c \text{ (V)} - 1.722}{0.028}$$

$$P_{c\_calibrate} \text{ (dBm)} = P_c \text{ (dBm)} - (2.8 + 2.8 + 7.9)$$

$$P_{c\_calibrate} \text{ (W)} = 0.001 \times 10^{\frac{P_{c\_calibrate} \text{ (dBm)}}{10}}$$

- 2). คำนวณค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  จากค่า  $P_i \text{ (W)}$ ,  $P_{r\_calibrate} \text{ (W)}$  และ  $P_{c\_calibrate} \text{ (W)}$  โดยสมการดังนี้

$$|S_{11}| = \sqrt{\frac{P_{r\_calibrate}}{P_i}}$$

และ

$$|S_{21}| = \sqrt{\frac{P_{c\_calibrate}}{P_i}}$$

โดย  $P_i = 0.148 \text{ mW}$

- 3). นำค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  พล็อตลงในกราฟพื้นผิวของ  $\epsilon_r', \epsilon_r''$  ตามรูปที่ ๗4 โดยค่า  $|S_{11}|$  แสดงด้วยเส้นประและค่า  $|S_{21}|$  แสดงด้วยเส้นทึบ เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอย่างคร่าวๆ ซึ่งจากรูปจะ

แสดงสเกลเส้นตรงสีต่างๆของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากระดับ 8 – 32 ช่วงละ 2 % หรือสามารถ  
คำนวณค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  จากค่า  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  โดยสมการดังนี้

$$\varepsilon_r' = 2.63|S_{11}| - 4.72|S_{21}| + 3.54$$

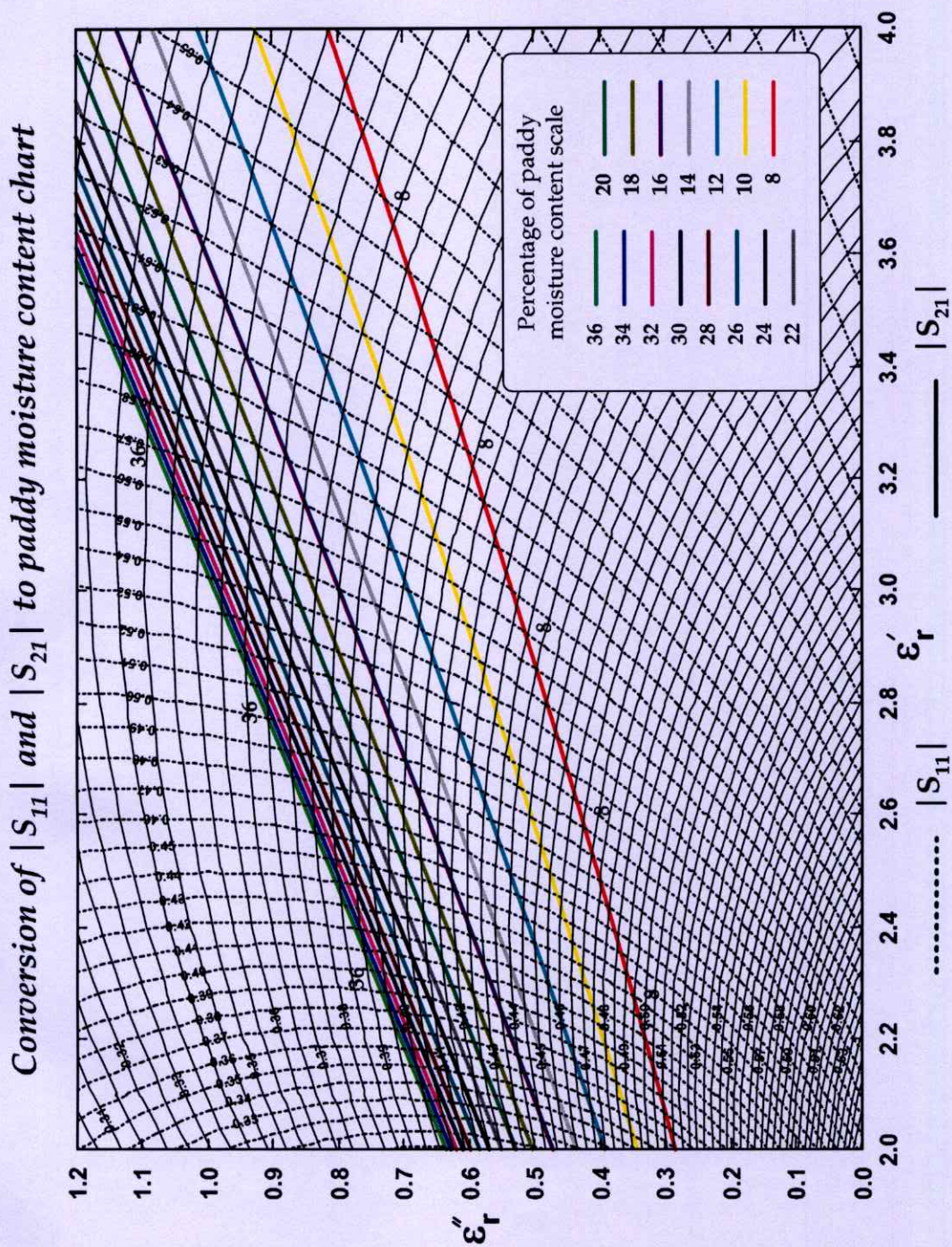
$$\varepsilon_r'' = -2.82|S_{11}| - 5.93|S_{21}| + 4.78$$

- 4). หากต้องการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือก สามารถทำได้โดยอ่านค่า  $\varepsilon_r'$  และ  $\varepsilon_r''$  ที่ได้จากกราฟ หรือค่าที่คำนวณได้จากสมการในข้อ 3) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการ  
ดังนี้

$$\%MC = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'(0.3572 \cdot \varepsilon_r' - \varepsilon_r'')} - 0.1630}}{0.0517}$$

#### หมายเหตุ

ค่าคงที่ในสมการ และข้อมูลในการวาดกราฟพื้นผิว ได้จากการวิเคราะห์รูปแบบปัญหา และ  
เครื่องมือที่ออกแบบรวมถึงสายอากาศ และสายนำสัญญาณต่างๆ เพื่อนำมาใช้งานเฉพาะ หากมีการ  
เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์หรือเงื่อนไขการทดสอบ อาจเป็นสาเหตุของความผิดพลาดของผลการทดลองได้



รูปที่ ๘4 กราฟพื้นผิวเพื่อใช้ในการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือก

## ประวัติผู้เขียน

นายจิรัฏฐ์ เหมือนชู เกิดเมื่อวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดกาญจนบุรี

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร  
เมื่อปี พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2544

### ทุนการศึกษา

โครงการปริญญาเอกกาญจนานิกเชก รุ่นที่ 7 สัญญาเลขที่ PHD / 0027 /2547

### รางวัล

“เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกและเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกเพื่อชาวนาไทย” ประกาศ  
เกียรติคุณ ผลงานวิจัยเด่น สกว. ประจำปี พ.ศ. 2551 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- J. Mearnchu, D. Torrungrueng, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “An inverse technique for dielectric-property determination from reflection measurement in spatial domain,” Proc. of APMC2005, China, vol. 5, pp. 3051-3054, Dec. 2005.
- J. Mearnchu, D. Torrungrueng, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “Determination of dielectric-property from reflection measurement in spatial domain including noise effect,” Proc. of ICEAST2007, Thailand, pp. 655-658, Nov. 2007.
- J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “Dielectric-property determination from measurement of magnitude of reflection and coupling coefficients of coupled antennas,” Proc. of ECTI-CON 2008, Thailand, pp. I-221 – I-224.
- J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “A portable dielectric-property determination system using coupled antennas,” Proc. of MIKON2008, Poland, pp. 884-887.
- J. Mearnchu, T. Limpiti, D. Torrungrueng, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, “A handheld moisture content sensor using coupled-dipole antennas,” accepted for

publication in Latin American Applied Research: an international journal  
(LAAR).