



การวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยใช้หลักการสายส่งสัญญาณ

โดย

นายคณากร ลอนจันทิก รหัสนักศึกษา B5602483

นายจักรกฤษ ปุ่นมีกิจ รหัสนักศึกษา B5613878

นายทิวานนท์ อยู่สุข รหัสนักศึกษา B5619382

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 527499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2557

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2559

การวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยใช้หลักการสายส่งสัญญาณ

คณะกรรมการสอบโครงการงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร.วิภาวี หัตถกรรม)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้แนบรายงานโครงการงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 527499 โครงการงานวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2559

โครงการ	การวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยใช้หลักการสายส่งสัญญาณ
โดย	1.นาย จักรกฤษ ปูนมีกิจ 2.นาย ทิวานนท์ อยู่สุข 3.นาย คณากร ลอนจันทิก
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโลกของเราเป็นยุคของการติดต่อสื่อสาร โดยใช้คลื่นความถี่ในการรับ-ส่ง ข้อมูลต่างๆ การออกแบบอุปกรณ์สื่อสาร จำเป็นต้องทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ดังนั้นการศึกษาด้านคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกจึงมีความสำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การจัดเก็บและการแพร่กระจายของพลังงานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในวัสดุ นอกจากนี้ไดอิเล็กตริกยังสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆทางสาขาอิเล็กทรอนิกส์ แสง และฟิสิกส์อีกด้วย ดังนั้นโครงการนี้จึงจัดทำเพื่อศึกษาการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ในย่านความถี่ 8-12 GHz

Project Title	Measuring dielectric material using principles Transmission Line
Students	Mr. Jakkrit Phinmekit Mr. Kanakorn Lonjanthuek Mr. Tiwanon Yoosuk
Project Advisor	Mrs. Piyaporn Meesawad
Department	Bachelor of Telecommunications Engineering

Abstract

Our world today is the age of communication using radio frequency to Transfer data. Design Communication Need to know the electrical permittivity. Also known as the dielectric constant. Therefore, the study of the properties of the dielectric was important. Which involves the storage and distribution of electricity and magnetism in materials. In addition, the dielectric also explains the phenomenon in the field of electronics, optics and physics as well. So this project is to prepare a study measuring dielectric of various materials. In the frequency range 8-12 GHz frequency

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณท่านอาจารย์ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ที่เป็นผู้ให้คำปรึกษาโครงการ พร้อมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้โครงการลุล่วงไปด้วยดี พร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบพระคุณต่อเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการติดต่อโครงการ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการจัดทำโครงการ

จักรกฤษ	ปุ่นมีกิจ
ทิวานนท์	อยู่สุข
คณากร	ลอนจันทิก

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 เทคนิคการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าแบบต่างๆ	4
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	6
2.4 อัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง	10
2.4.1 การวัดหาค่าอัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง	11
2.5 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณท่อนำคลื่น	12
2.5.1 เงื่อนไขขอบเขตของท่อนำคลื่น	13
2.5.2 การจัดเรียงตัวในท่อนำคลื่น	16
2.6 ทฤษฎีการแบ่งช่วงความถี่ไมโครเวฟ	18
2.7 สรุป	20

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	21
3.1 กล่าวนำ	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	21
3.2.1 ตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็น โทเอกเซียล	21
3.2.2 สล็อตไลน์ (Slotted Line)	21
3.2.3 โทลคปลายท่อ (Waveguide Termination)	22
3.2.4 Movable short	23
3.2.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	23
3.2.6 Calibration Waveguide	24
3.3 วิธีดำเนินการ	25
3.4 วัสดุสำหรับการทดลอง	27
3.5 สรุป	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง	29
4.1 กล่าวนำ	29
4.2 การทดสอบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	29
4.2.1 ต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง	29
4.2.2 หาความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	30
4.2.3 ผลการทดสอบวัดค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (λ_G)	31
4.2.4 วัสดุที่นำมาใช้วัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	34
4.2.5 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (Fr-4)	34
4.2.6 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (อะคริลิก)	37
4.2.7 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (กระจก)	40
4.2.8 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (ยาง)	43
4.2.9 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (ไม้)	46

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
4.3 สรุปผล	50
บทที่ 5 บทสรุปโครงการ	51
5.1 กล่าวนำ	51
5.2 ปัญหาที่พบ และสาเหตุของปัญหา รวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา	51
5.3 ข้อเสนอแนะ	52
5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป	52
5.5 สรุปผลการทดลอง	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	54
ประวัติผู้เขียน	63

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการสายส่งสัญญาณ	1
รูปที่ 2.1 สรุปรูปเทคนิค(ตอนที่1)	5
รูปที่ 2.2 สรุปรูปเทคนิค(ตอนที่2)	5
รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีไดอิเล็กทริกอยู่ในพื้นที่ (II)	8
รูปที่ 2.4 สัญญาณคลื่นนิ่ง	11
รูปที่ 2.5 ความคุมสนามใน 2 ทิศทาง	12
รูปที่ 2.6 ความคุมสนามทุกทิศทาง	12
รูปที่ 2.7 รูปแบบท่อนำคลื่น	13
รูปที่ 2.8 ขอบเขตสนามไฟฟ้าตรงกัน	13
รูปที่ 2.9 ขอบเขตสนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามขอบเขต	14
รูปที่ 2.10 ขอบเขตสนามแม่เหล็ก	14
รูปที่ 2.11 ท่อนำคลื่นไอริส	15
รูปที่ 2.12 กำหนดจุด และเจาะ	15
รูปที่ 2.13 กำหนดจุดและเจาะลงจนสุด	15
รูปที่ 2.14 สนามไฟฟ้าแผ่ครึ่งคลื่นไซน์	16
รูปที่ 2.15 สนามไฟฟ้าแผ่เต็มคลื่นไซน์	16
รูปที่ 2.16 คลื่นไซน์หนึ่ง ไซน์หนึ่งคลื่นครึ่ง	17
รูปที่ 2.17 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามไฟฟ้าครึ่งไซน์	17
รูปที่ 2.18(ก) ครอบคลุมหน้าคลื่นและผลลัพธ์สนามไฟฟ้า	18
รูปที่ 2.18(ข) ครอบคลุมหน้าคลื่นและผลลัพธ์สนามไฟฟ้า	18
รูปที่ 2.19 ช่วงของคลื่นไมโครเวฟ	19
รูปที่ 3.1 ตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียล	21
รูปที่ 3.2 สล็อตไลน์	22
รูปที่ 3.3 โหลดปลายท่อ	22

สารบัญ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.4 Moveable Short	23
รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	24
รูปที่ 3.6 Calibration Waveguide	24
รูปที่ 3.7 โครงสร้างแบบจำลองการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าโดยใช้หลักการสายส่ง	25
รูปที่ 3.8 ต่อตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็น โคนแอกเซียลเข้าที่ด้านปลายเปิดด้านหนึ่งของสล็อตไลน์	25
รูปที่ 3.9 การต่อสายเชื่อมเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับสล็อตไลน์	26
รูปที่ 3.10 การใส่วัสดุทดลองในสล็อตไลน์	26
รูปที่ 3.11 การประกอบตัวโหนดปลายต่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์	27
รูปที่ 3.12 ไม้	27
รูปที่ 3.13 แผ่น Fr-4	27
รูปที่ 3.14 อะคริลิก	28
รูปที่ 3.15 กระจกใส	28
รูปที่ 3.16 ยาง	28
รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	29
รูปที่ 4.2 ความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	30
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งความยาวของ X_0	31
รูปที่ 4.4 ความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่ง X_0	31
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งความยาวของ X_1	32
รูปที่ 4.6 ความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่ง X_1	33
รูปที่ 4.7 วัสดุที่นำมาใช้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	34
รูปที่ 4.8 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Fr-4	35
รูปที่ 4.9 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Fr-4	35
รูปที่ 4.10 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอะคริลิก	38
รูปที่ 4.11 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอะคริลิก	38

สารบัญ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.12 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกระจก	41
รูปที่ 4.13 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกระจก	41
รูปที่ 4.14 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของยาง	44
รูปที่ 4.15 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของยาง	44
รูปที่ 4.16 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของไม้	47
รูปที่ 4.17 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของไม้	47

สารบัญตาราง

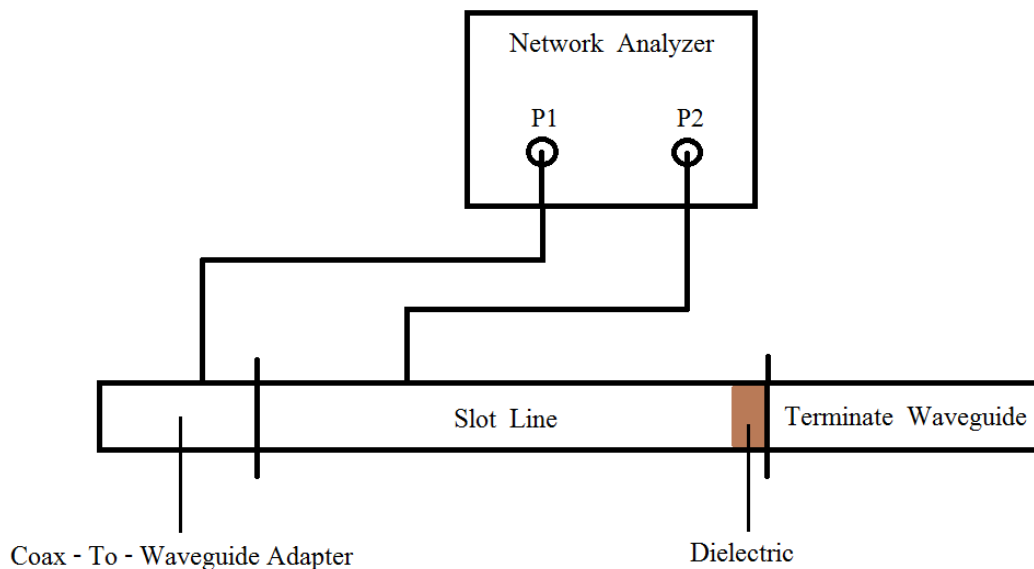
ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงความถี่ไมโครเวฟ	19
ตารางที่ 4.1 การวัดหาค่าความยาวคลื่นในท่อคลื่น (λ_G)	34
ตารางที่ 4.2 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (Fr-4)	36
ตารางที่ 4.3 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (อะคริลิก)	39
ตารางที่ 4.4 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (กระจก)	42
ตารางที่ 4.5 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (ยาง)	45
ตารางที่ 4.6 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (ไม้)	48
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า	49
ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่พบ และสาเหตุของปัญหา รวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สื่อสาร จะต้องมีวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ด้วยเสมอ เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก นั้นจะหาได้จากการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity: ϵ) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นๆ หากซื้อวัสดุตามโรงงานเราจะทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุอยู่แล้ว แต่วัสดุที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดนั้นเราไม่อาจทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่แท้จริงที่จะนำมาใช้คำนวณและสร้างอุปกรณ์ต่างๆได้ หากนำไปคำนวณแล้วจะได้ผลที่มีความผิดพลาดไปจากวัสดุที่สร้างจริง ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ตระหนักถึงปัญหานี้ จึงทำให้เกิดเป็นโครงการนี้ขึ้นมา โดยการใช้หลักการสายส่งสัญญาณ (transmission line) ดังในรูปที่ 1 ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient : Γ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าไดอิเล็กตริกแตกต่างกันออกไป โดยการวัดค่าจะทำการนำวัสดุต่างๆ เช่น ไม้ กระดาษ ยาง อะคริลิก มาทำการวัดค่าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ต่างๆ ผ่านวัสดุ แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้มาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณหาค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นๆต่อไปโดยมีหลักการ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หลักการสายส่งสัญญาณ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ
2. เพื่อศึกษาหลักการสายส่งสัญญาณ

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยวิธี สายส่งสัญญาณ
2. บันทึกผลการทดลองและคำนวณหาค่าไดอิเล็กตริก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ปรีกษาอาจารย์ที่ปรีกษาโครงการเกี่ยวกับขอบเขตของโครงการที่จะทำ
2. ศึกษาข้อมูลและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการ
3. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริก
4. ศึกษาข้อมูลของวัสดุและเตรียมวัสดุที่จะใช้วัดค่าไดอิเล็กตริก
5. ทำการวัดค่า S_{11} ของแต่ละวัสดุ แก้ไขข้อผิดพลาดของการวัดค่าที่เกิดจากอุปกรณ์หรือขนาดของวัสดุ
6. รวบรวมค่า S_{11} ของแต่ละวัสดุที่วัดได้ และคำนวณ หาค่าไดอิเล็กตริกของแต่ละวัสดุ
7. รวบรวมค่าไดอิเล็กตริก ของวัสดุที่นำมาวัดค่า เขียนรายงานโครงการ
8. นำเสนอโครงการ

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

กิจกรรม						
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1.ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล						
2.ทำการจัดหาวัสดุที่จะนำมาทดสอบ						
3.หาซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้						
4.ทำการติดต่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเพื่อขอทำการทดลองโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย						
5.เขียนโครงการและเสนอโครงการ						
6.ทำการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกกับวัสดุต่างๆ						
7.ทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์						
8.สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน						
9.นำเสนอโครงการ						

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริก
2. เพื่อสามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

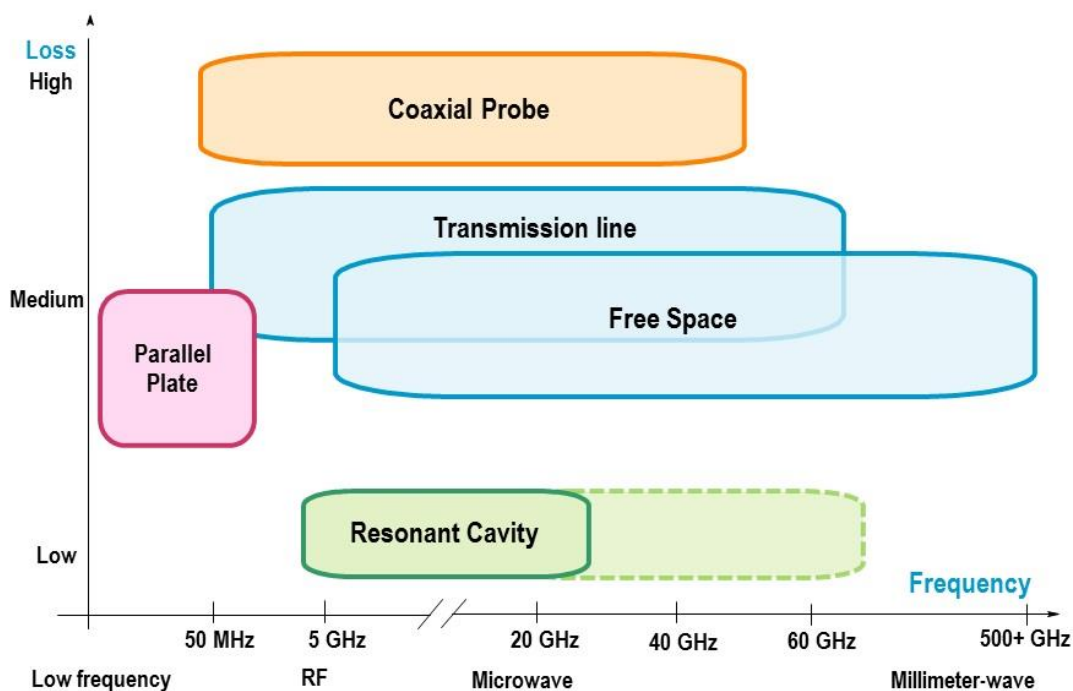
2.1 กล่าวนำ

ในการจัดทำโครงการ การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า อัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง ชุดอุปกรณ์การวัดค่า สภาพยอมทางไฟฟ้า และท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังต้องเข้าใจในความหมายของสมการตัวแปร ต่างๆ และรวมถึงหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวที่ใช้ในการทดลอง เพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้น ให้ทุกขั้นตอนของการลงมือปฏิบัตินั้นจะได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาทฤษฎีที่ เกี่ยวข้องดังนี้

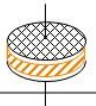

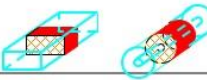
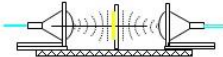

2.2 เทคนิคการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าแบบต่างๆ

การจะเลือกเทคนิคที่ใช้มักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ความถี่ที่เราสนใจ ค่าความแม่นยำในการวัดค่าของ ϵ_r คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ รูปร่างของวัสดุ (ของแข็ง ของเหลว ผง แผ่น) ข้อจำกัดของขนาด ทำลายได้หรือทำลายไม่ได้ และอุณหภูมิ ในรูปภาพที่ 2.1 และ 2.2 นี้ จะกล่าวถึงเทคนิคการวัดค่าในแบบต่างๆ [1]

โดยวิธีการวัดแบบสายส่ง (Transmission Line) จะเหมาะสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ต่ำและวัสดุที่มีความหนาในระดับหนึ่ง วิธีการวัดแบบโคแอกเซียล โพรบ (Coaxial Probe) ตัวอย่างที่ใช้ควรจะต้องอย่างแม่นยำ ถ้าหากเราสนใจที่ความถี่ต่ำกว่า 5 จิกะเฮิร์ตซ์ เทคนิคที่เหมาะสมในการวัดค่าก็จะเป็นวิธี แผ่นขนาน (Parallel Plate) และวิธีการส่งผ่านอากาศว่าง (Free Space)



รูปที่ 2.1 สรุปเทคนิค (ตอนที่ 1)

Parallel Plate		Low Frequency Best for thin flat sheets
Coaxial Probe		Broadband Best for liquids, semi-solids
Transmission Line		Broadband Best for machine-able solids
Transmission Free Space		Broadband, mm-wave Non-contacting
Resonant Cavity		Single frequency High accuracy, Best for low loss, or very thin samples

รูปที่ 2.2 สรุปเทคนิค (ตอนที่ 2)

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ปริมาณที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สะสม และสูญเสียภายในสารที่อยู่ในสนามไฟฟ้า [2]

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r \quad (2.1)$$

ปริมาณ ϵ'_r ซึ่งเป็นส่วนจริงจะบอกถึงค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในสารเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและปริมาณ ϵ''_r เป็นจำนวนจินตภาพที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสีย โดยสัมพันธ์กับสภาพความนำไฟฟ้าของสารเรียกว่า ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก

ค่าสภาพยอมจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสาร ได้แก่ ความหนาแน่น อุณหภูมิ ความหนืด ความบริสุทธิ์และความสม่ำเสมอของสาร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในหลายๆ ด้าน

2.2.1 การกระทำระหว่างกัน (Interaction) ของวัสดุที่โปร่งใสจะถูกกำหนดคุณลักษณะ โดยค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex Permeability) คือ

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r = \epsilon'_r (1 - i \tan \delta_\epsilon) \quad (2.2)$$

โดยที่ ϵ'_r เป็นองค์ประกอบจำนวนจริงของ ϵ_r และ $\tan \delta_\epsilon$ คือ ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss Factor) ส่วนค่าความซาบซึมได้เชิงซ้อน (Complex Permeability) คือ

$$\mu_r = \mu'_r - i\mu''_r = \mu'_r (1 - i \tan \delta_\mu) \quad (2.3)$$

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่กำหนดด้วย ปัญหาทางด้านเทคนิคต่างๆ และการหาคำตอบของปัญหาเหล่านี้ เราจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของวัสดุที่ถูกนำมาใช้

1) ถ้าวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างอุปกรณ์คลื่นไมโครเวฟ ค่าที่แท้จริงของ ϵ_r และ μ_r จะต้องนำไปใช้เป็นข้อมูลอินพุทของรหัสคอมพิวเตอร์ที่ใช้ใน CAD (Computer Aid Design) ตัวอย่างเช่น การใช้สารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำ มาทำเป็นชั้นสเตรตสำหรับวงจรระนาบ (Planer Circuit) เช่นวงจร DRO (Dielectric Resonator for Oscillator) ที่ใช้ในเทคโนโลยีไมโครสตริปหรือการใช้วัสดุที่สามารถดูดซับคลื่นได้ดีในอุปกรณ์ลดทอนกำลังงาน เป็นต้น

2) วัสดุที่ใช้สำหรับสร้างฝากรอบสายอากาศ (Radome) และวัสดุที่ใช้สำหรับดูดซับคลื่นเพื่อใช้ลดภาคตัดขวางเป่าเรดาร์ (Radar Cross Section : RCS)

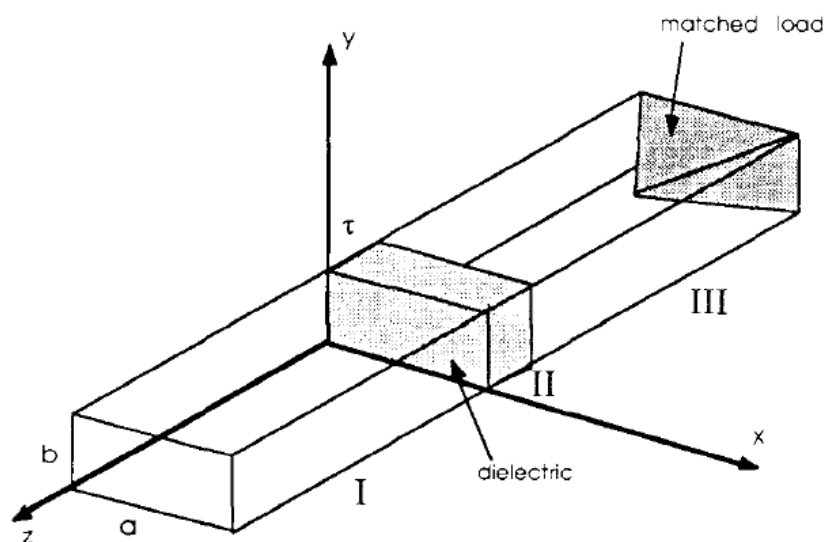
3) ค่าคงที่เชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก บ่อยครั้งได้ถูกนำมาใช้สำหรับการหาค่าทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย เช่น ค่าความชื้นของวัสดุได้มีการเปลี่ยนแปลงส่วนจำนวนจริง ให้เป็นเช่นเดียวกับส่วนจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ประสิทธิผลของไดอิเล็กตริก (Effective Dielectric Constant) ผลที่ตามมาก็คือสามารถเป็นไปได้ที่จะเผ่าตรวจค่าความชื้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

4) การที่วัสดุใดจะถูกทำให้ร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (การปรุงอาหาร การทำให้แห้ง เป็นต้น) เราจะต้องทราบค่าคงที่เชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก และการเปลี่ยนแปลงของมัน เพื่อที่จะได้สร้างระบบคลื่นไมโครเวฟให้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุดชนิดหนึ่งที่มีรูปร่างที่กำหนด ได้ถูกวางไว้ในท่อนำคลื่น ข้อมูลที่เราต้องการทราบ นั่นคือ ϵ_r และ μ_r เราสามารถที่จะวัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient) สำหรับการพิจารณาต่อไปนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

ก) วัสดุตัวอย่างที่มีโครงสร้างทางเรขาคณิตแบบง่ายๆ จะให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่นำไปประยุกต์ใช้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้ (ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21}) กับค่า ϵ_r และ μ_r

ข) ขนาดของวัสดุตัวอย่างและการเลือกปริมาณการวัดจะต้องแน่ใจว่ามีความไวเพียงพอต่อการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวัสดุนั้นได้

ค) ถ้าทั้ง ϵ_r และ μ_r เป็นปริมาณการวัดเพื่อหาค่าทั้งสองค่านี้ แต่บ่อยครั้งที่เราทราบมาล่วงหน้าก่อนว่าค่า μ_r ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 1 เราก็มักจะหาเพียงปริมาณการวัด เพียงค่าเดียวเพื่อหาค่า ϵ_r



รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีไดอิเล็กตริกอยู่ในพื้นที่ II [3]

ดังนั้นในต่อไปนี้ เราจะสมมุติก่อนว่า $\mu_r = 1$ เพื่อที่จะหาค่า ϵ_r ท่อนำคลื่นที่จะแสดงในรูปที่ 2.3 จะทำให้สัญญาณหายไปทีโหลดและวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีขอบเขตตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = -\tau$ ค่าศักย์ไฟฟ้า คือ

$$\psi_I = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)[c_1 e^{ik_z z} + c_2 e^{-ik_z z}], \quad z \geq 0 \quad (2.4)$$

$$\psi_{II} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)[c_3 e^{ik_z z} + c_4 e^{-ik_z z}], \quad 0 \geq z \geq -\tau \quad (2.5)$$

$$\psi_{III} = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cdot c_5 e^{ik_z z}, \quad -\tau \geq z \quad (2.6)$$

โดยที่ค่าคงที่เฟส k_z ในพื้นที่ I และ III หาได้จาก

$$k_z = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4a^2 - \lambda^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของท่อนำคลื่นในอากาศว่าง ค่าคงที่เฟสและ k_{z2} ในพื้นที่ II หาได้จาก

$$k_{z2} = \frac{\pi}{\lambda a} \sqrt{4\epsilon a^2 - \lambda^2} \quad (2.8)$$

ความสัมพันธ์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r คือ

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r \quad (2.9)$$

ส่วนประกอบของ \bar{E} และ \bar{H} ประยุกต์ได้จากความสัมพันธ์

$$\bar{E} = -\nabla \times (\psi \hat{z}) \quad (2.10)$$

$$\bar{H} = -i\omega\epsilon(\psi \hat{z}) + \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \nabla \cdot (\psi \hat{z}) \quad (2.11)$$

การที่ประยุกต์หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง โดยมีขอบเขตที่ $z = 0$ และ $z = -\tau$ เราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

$$\Gamma = \frac{c_1}{c_2} = \frac{-i[(k_{z2}/k_z)^2 - 1] \sin(k_{z2}\tau)}{2\left(\frac{k_{z2}}{k_z}\right) \cos(k_{z2}\tau) + i[(k_{z2}/k_z)^2 + 1] \sin(k_{z2}\tau)} \quad (2.12)$$

ถ้า $k_{z2}\tau$ มีขนาดเล็ก จะประมาณได้ว่า

$$\sin k_{z2}\tau \cong k_{z2}\tau \quad (2.13)$$

$$\cos k_{z2}\tau \cong 1 - \frac{1}{2}(k_{z2}\tau)^2 \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.12) ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้จาก

$$\Gamma \cong \frac{-(\varepsilon-1)}{\left(1-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 - i\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 - 2ik_z/\tau k^2\right) + (1+i\tau k_z)\varepsilon} \quad (2.15)$$

จากความสัมพันธ์ทำให้คำนวณหาค่าไดโอิเล็กทริกได้จาก

$$\varepsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 - i\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 - 2ik_z/\tau k^2\right] \Gamma}{1 + (1+i\tau k_z)\Gamma} \quad (2.16)$$

เมื่อ $k = 2\pi/\lambda_0$ และ τ คือ ความหนาของชั้นงาน

2.4 อัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง

เมื่อทำการป้อนสัญญาณไซน์ (sinewave) ให้กับท่อนำคลื่น (waveguide) คลื่นแรงดัน และ กระแสจะแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นไซน์ โดยที่ค่าของแรงดันและกระแสขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะ (characteristic impedance) ของท่อนำคลื่นและโหลดที่นำมาต่อ ถ้าโหลดที่นำมาต่อ นั้นแมตช์ (match) กับท่อนำคลื่นคืออิมพีแดนซ์ของโหลดเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของท่อนำคลื่น ทำให้โหลดสามารถดูดกลืนเอาพลังงานที่ส่งมาจากแหล่งจ่ายไว้ได้ทั้งหมดโดยไม่เกิดการ สะท้อน กลับ(reflected) ดังนั้นคลื่นในท่อนำคลื่นสามารถเดินทางจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดทั้งหมด สำหรับ กรณีที่ โหลดไม่แมตช์ (mismatch) กับท่อนำคลื่น โหลดจะไม่สามารถดูดกลืนเอาพลังงานที่ ส่งมาไว้ได้ ทั้งหมดและมีพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยที่การเดินทางของคลื่น ทั้งสองมีทิศทาง ตรงกันข้ามและเมื่อคลื่นทั้งสองรวมกันจะถูกเรียกว่าคลื่นนิ่ง (standing wave) ใน รูปที่ 1 แสดง ผลรวมของคลื่นจากแหล่งจ่ายกับคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลดซึ่งประกอบด้วยแอมพลิจูดต่ำสุด (minimum amplitude) กับแอมพลิจูดสูงสุด (maximum amplitude) สัญญาณคลื่นนิ่งที่ ใช้สามารถเป็นได้ทั้งสองสัญญาณคือสัญญาณแรงดันหรือสัญญาณกระแส รูปแบบของคลื่นนิ่งที่ เป็นแรงดันถูกแสดงด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms: root mean squared) ของ แรงดันหรือกระแสที่ กระจายไป ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในท่อนำคลื่น ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงดัน ของคลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งจ่ายไปรวมกับคลื่นที่สะท้อนกลับจากโหลคนั้นมีเฟสตรงกัน (in phase) ส่วนแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงดันของคลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งจ่ายรวมกับคลื่นที่

สะท้อนกลับจากโหลดนั้นมีเฟสต่างกัน 180 องศา (out of phase) ซึ่งคลื่นนี้จะมีลักษณะของสัญญาณคาบโดยมีระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดต่ำสุดเท่ากับระยะห่างระหว่างแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของสัญญาณที่ออกมาจากแหล่งจ่าย ขนาดของแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับและขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับขึ้นอยู่กับโหลด อัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดต่อแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนี้ถูกเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR: standing wave ratio) เราสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่งได้จาก

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i - V_r}{V_i + V_r} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.17)$$

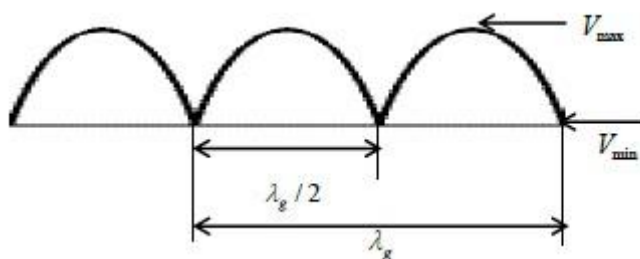
โดยที่ VSWR คือ อัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง

Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น จะมีขนาดอยู่ระหว่างกลาง 0 ถึง 1 และมีเฟสอยู่ระหว่าง 0° ถึง 360° การรวมกันและการหักล้างกันของคลื่นที่เดินทางไปและคลื่นที่สะท้อนกลับมาเรียกว่า คลื่นนิ่ง (Standing Wave) การวัดคลื่นนิ่ง เรียกว่า Standing Wave Ratio (SWR) [4]

2.4.1 การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันของคลื่นนิ่ง จากนิยามของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ซึ่งทำให้สามารถหาค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง จากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคลื่นนิ่งในท่อนำคลื่นได้

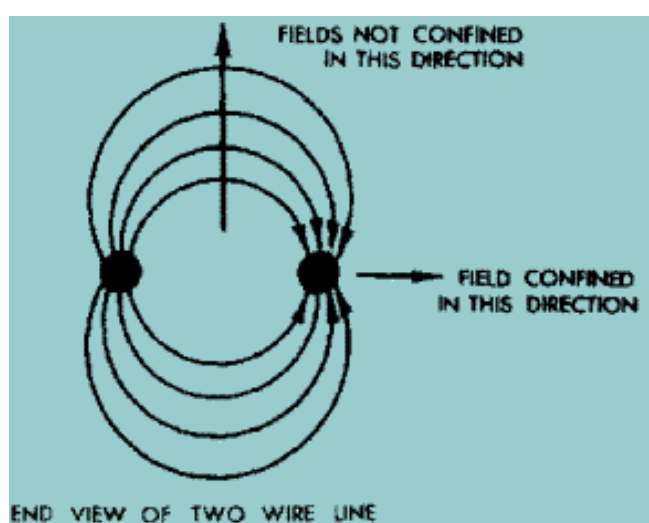
ดังรูปที่ 2.4



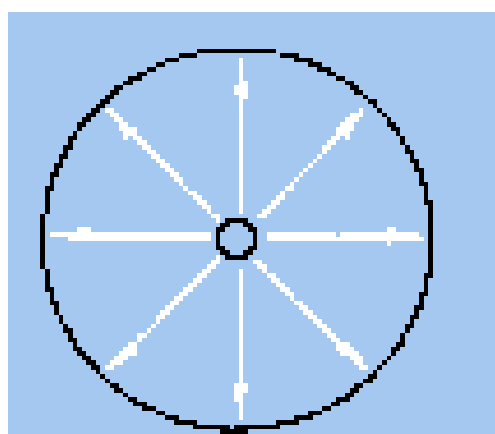
รูปที่ 2.4 สัญญาณคลื่นนิ่ง [2]

2.5 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณท่อนำคลื่น

สายคู่นำสัญญาณที่ใช้กันในวงจรโดยทั่วไป มักไม่มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟ ที่ความถี่นี้พลังงานจะถูกปล่อยออกมาโดยการแผ่รังสีเพราะสนามไม่ได้จำกัดในทุกๆด้านดังแสดงในรูปที่ 2.5 สายโคแอกเซียลมีประสิทธิภาพมากกว่าสายคู่นำสัญญาณในการส่งถ่ายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะมีการจำกัดขอบเขตด้วยตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [5]

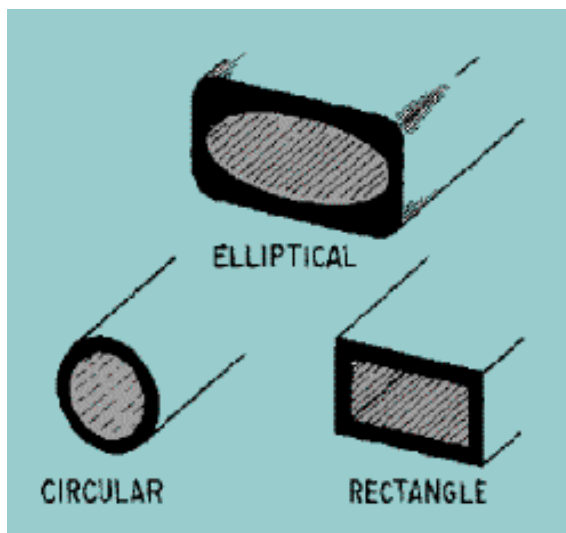


รูปที่ 2.5 ความคุมสนามใน 2 ทิศทาง



รูปที่ 2.6 ความคุมสนามทุกทิศทาง

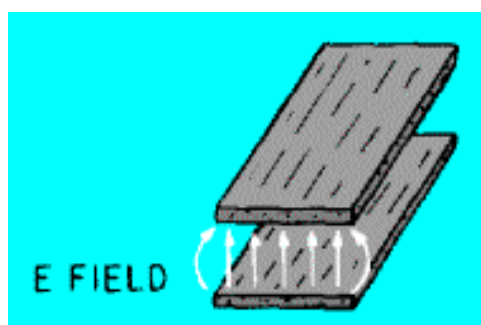
ท่อนำคลื่นเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการส่งถ่ายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นสายโคแอกเซียลที่ไม่มีตัวนำตรงกลาง สร้างขึ้นจากสารตัวนำและอาจมีรูปร่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม วงกลม หรือวงรี ดังแสดงในรูปที่ 2.7



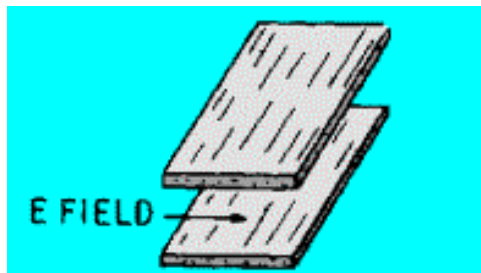
รูปที่ 2.7 รูปแบบท่อนำคลื่น

2.5.1 เงื่อนไขขอบเขตของท่อนำคลื่น

การเดินทางของพลังงานในท่อนำคลื่นจะมีลักษณะคล้ายการเดินทางของพลังงานในอากาศว่าง แต่แตกต่างตรงที่พลังงานในท่อนำคลื่นจะถูกจำกัดโดยที่สนามไฟฟ้าจะอยู่ที่บริเวณผิวของตัวนำ และตั้งฉากกับตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสนามไฟฟ้าไม่สามารถเกิดขึ้นขนานกับตัวนำ ยิ่งยวดดังแสดงในรูปที่ 2.9

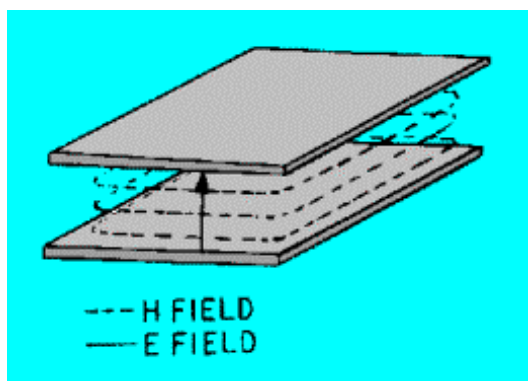


รูปที่ 2.8 ขอบเขตสนามไฟฟ้าตรงกัน



รูปที่ 2.9 ขอบเขตสนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามขอบเขต

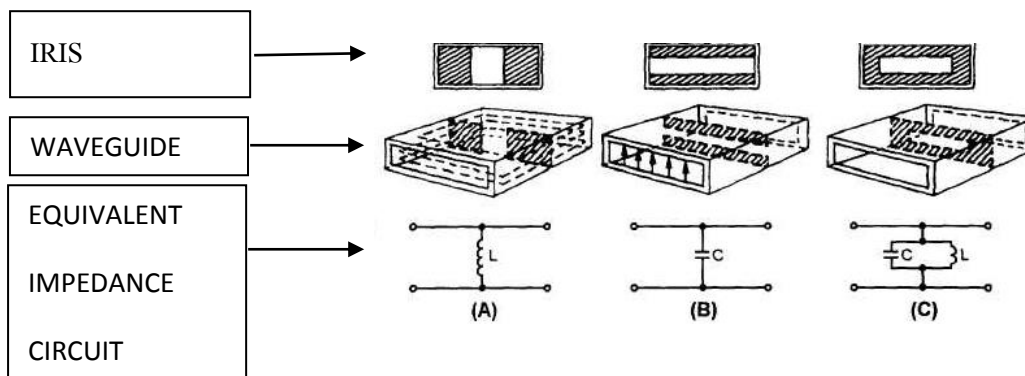
สำหรับสนามแม่เหล็กจะเกิดเมื่อเป็นวงปิดที่ขนานกับตัวนำและตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าดัง
แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขอบเขตสนามแม่เหล็ก.

ซึ่งในเวลาเดียวกันภายในท่อนำคลื่นจะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นพร้อมกัน แต่ในกรณี
ที่ต้องการให้มีเพียงสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวก็จะมีเงื่อนไขเพิ่มเติมอีกคือการ
แมตซ์อิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่น

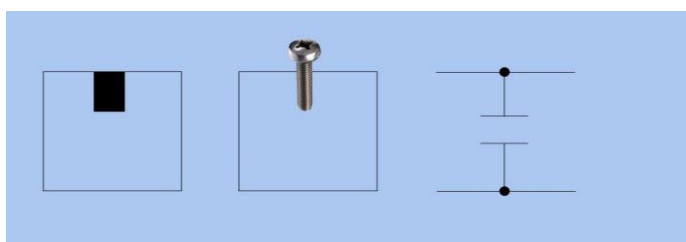
ท่อนำคลื่นนั้นไม่ได้มีการจับคู่แบบแมตซ์ของอิมพีแดนซ์เสมอไป คลื่นนิ่งเป็นผลมาจาก
การที่ไม่แมตซ์ เป็นสาเหตุให้เกิดกำลังสูญเสีย และการเพิ่มความไวต่อความถี่ จากรูปที่ 2.11 แสดง
อุปกรณ์ 3 อย่างที่เรียกว่าไอริส (iris) ซึ่งเป็นตัวที่จะเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำหรือความจุไฟฟ้าให้กับ
ท่อนำคลื่น จะมีลักษณะเป็นเพลตที่มีการเจาะรูตรงกลางเพื่อให้คลื่นผ่านได้และจะวางขวางดังแสดง
ในรูปที่ 2.11



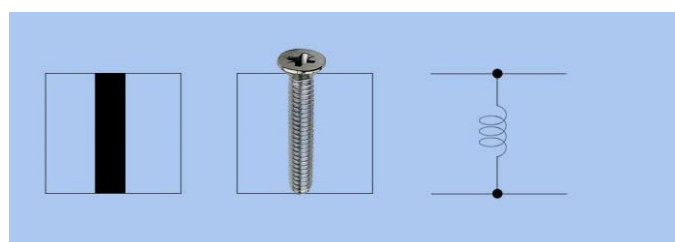
รูปที่ 2.11 ท่อนำคลื่นไอริส

การเหนี่ยวนำไอริส (Inductive iris) และวงจรมุมจะแสดงในรูป 2.11 จะวางตัวแบบต่ออนุกรมโดยขอบของไอริสจะตั้งฉากกับระนาบของแม่เหล็กและสามารถวางตัวแบบขนานโดยจะตั้งฉากกับระนาบของสนามไฟฟ้าซึ่งจะเสมือนการต่อตัวเก็บประจุในที่มีความถี่ช่องเรโซแนนซ์ จะเสมือนตัวต้านทานต่อขนาน ส่วนที่ไม่ใช่จะทำตัวเสมือนเป็นตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ

นอกจากนี้ยังมีเจาะรู และ สกรูซึ่งทำจากสารตัวนำสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนของค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นได้ โดย เมื่อเจาะรู และสกรูที่มีความยาวน้อย ๆ จะเสมือนมีการต่อตัวเก็บประจุ แต่ถ้ามีความยาวมาก ๆ ไปจนถึงขอบอีกด้านจะเสมือนมีการต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าที่ท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



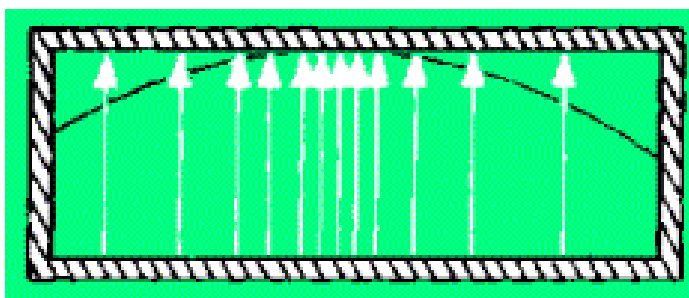
รูปที่ 2.12 กำหนดจุด และเจาะ



รูปที่ 2.13 กำหนดจุดและเจาะลงจนสุด

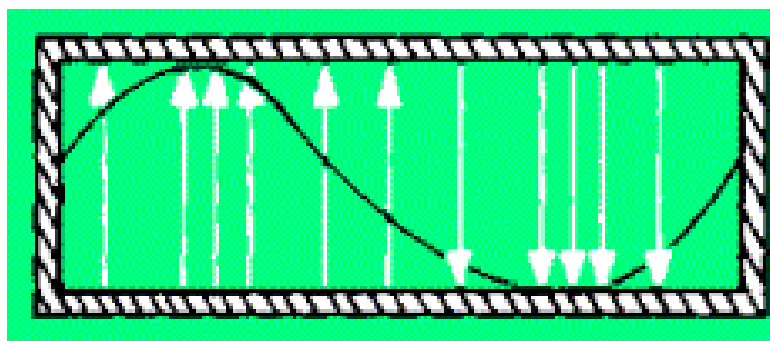
2.5.2 การจัดเรียงตัวในท่อนำคลื่น

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่ผ่านมาเป็นผลมาสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างการกระจายแบบครึ่งคลื่นไซน์ (half-sine electric distribution) รูปร่างนี้เรียกว่าการดำเนินการควอนไทซ์ (mode of operation) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยจำนวนของลูกศรแทนความเข้มของสนาม จากเงื่อนไขขอบเขตสนามจะมีค่ามากอยู่ในรูปร่างของคลื่นไซน์ และเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวผนัง b



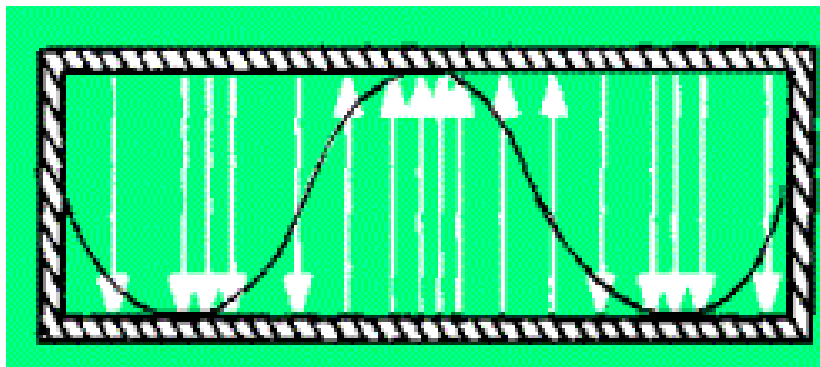
รูปที่ 2.14 สนามไฟฟ้าแผ่ครึ่งคลื่นไซน์

การแสดงออกในลักษณะครึ่งคลื่นไซน์นั้นก็เป็นโหมดหนึ่งในการจัดเรียงตัวสำหรับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม และยังมีเต็มคลื่นไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งก็มีค่าสนามเป็นศูนย์ที่บริเวณขอบผิวผนัง b ด้วย



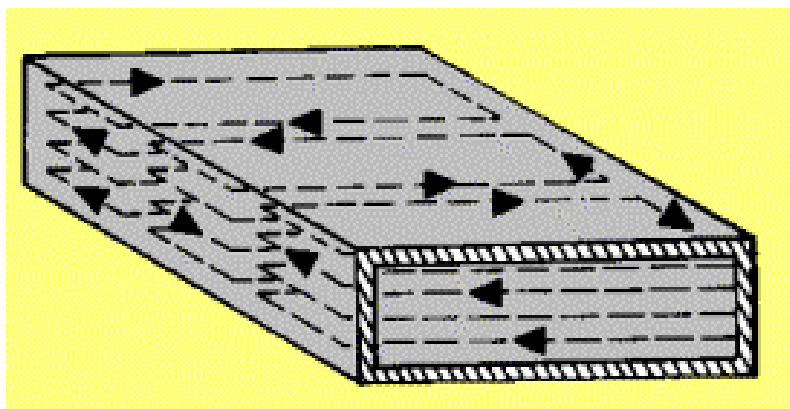
รูปที่ 2.15 สนามไฟฟ้าแผ่เต็มคลื่นไซน์

ซึ่งก็เหมือนกันกับหนึ่งคลื่นครึ่งที่เดินทางผ่านท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จะมีค่าสนามเป็นศูนย์ที่บริเวณขอบผิวผนัง b เช่นกัน



รูปที่ 2.16 คลื่นไซน์หนึ่งคลื่นครึ่ง

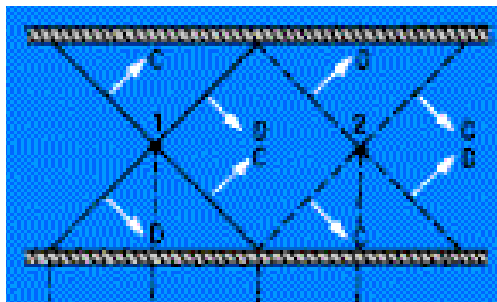
ส่วนสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม จะอยู่ในวงปิดที่ขนานไปกับผิวของตัวนำ ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับสนามไฟฟ้ารูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบของสนามแม่เหล็กที่มีผลจากการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าด้วย ขนาดของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนในลักษณะของคลื่นรูปไซน์ และที่ตรงกลางของท่อนำคลื่นจะเกิดเวลากวาดเฟสกับสนามไฟฟ้า เมื่อเกิดเวลากวาดเฟสหมายถึง เส้นแรงแม่เหล็กและเส้นแรงไฟฟ้ามีขนาดมากที่สุดทั้งคู่ในเวลาเดียวกัน ถึงแม้จะไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันที่ความยาวของท่อนำคลื่น



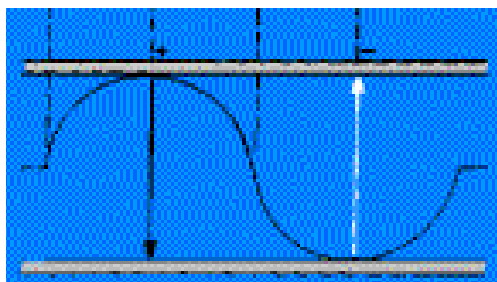
รูปที่ 2.17 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามไฟฟ้าครึ่งไซน์

สนามไฟฟ้าในรูปแบบคลื่นรูปไซน์จะวางตัวอยู่ที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 2.18(ก) จะแสดงหน้าคลื่น C และ D รวมกันที่จุด (1) และ (2) เมื่อหน้าคลื่นเดินทางผ่านจุดที่ (1) และ (2) สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มมาก และที่จุดจะเกิดการรวมกัน ทำให้มีความเข้มเพิ่มขึ้น การเกิดในลักษณะนี้จะมีขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะจะมีการแทนที่ของคลื่นเรื่อยๆ ส่วนในรูปที่

2.18 (ก) จะแสดงผลในรูปแบบไซน์ของสนามไฟฟ้าที่ตรงกลางของท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นโหมดหนึ่งของการส่งพลังงานผ่านท่อนำคลื่นโหมดที่ง่ายที่สุดเรียกว่าแบบแผนคลื่นเป็นใหญ่



รูปที่ 2.18(ก) ครอบคลุมหน้าคลื่นและผลลัพธ์สนามไฟฟ้า

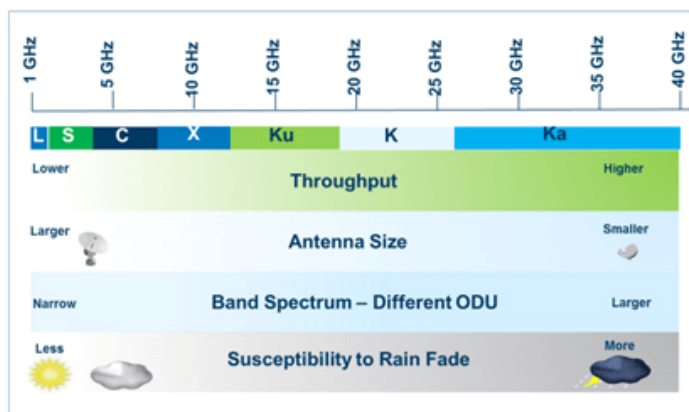


รูปที่ 2.18(ข) ครอบคลุมหน้าคลื่นและผลลัพธ์สนามไฟฟ้า

แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่จะเป็นโหมดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เป็นโหมดที่ใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่น โดยจะมีความกว้างของท่อนำคลื่นเป็นค่า $\frac{1}{2}$ ของความยาวคลื่นของความถี่ที่จะทำการส่ง และต้องแน่ใจว่าจะมีเพียงแบบแผนคลื่นเป็นใหญ่เท่านั้นที่จะเกิดขึ้นภายใน

2.6 ทฤษฎีการแบ่งช่วงความถี่ไมโครเวฟ

สำหรับการแบ่งช่วงความถี่ไมโครเวฟ ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 10 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 10 เทระเฮิรตซ์หรือมีความยาวคลื่นในช่วง 1 เมตรถึง 0.1 มิลลิเมตร (300 เมกะเฮิรตซ์ถึง 3000 จิกะเฮิรตซ์) และความยาวคลื่นอยู่ในระดับของมิลลิเมตร โดยคลื่นไมโครเวฟถูกแบ่งออกเป็น ช่วงๆ หรือแถบ (Band) ดังตารางที่ 2.1 [6]



รูปที่ 2.19 ช่วงของคลื่น ไมโครเวฟ

ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงความถี่ไมโครเวฟ

Letter Designation	ช่วงความถี่
L band	1 - 2 จิกะเฮิรตซ์
S band	2 - 4 จิกะเฮิรตซ์
C band	4 - 8 จิกะเฮิรตซ์
X band	8 - 12 จิกะเฮิรตซ์
Ku band	12 - 18 จิกะเฮิรตซ์
K band	18 - 26.5 จิกะเฮิรตซ์
Ka band	26.5 - 40 จิกะเฮิรตซ์
Q band	30 - 50 จิกะเฮิรตซ์
U band	40 - 60 จิกะเฮิรตซ์
V band	50 - 75 จิกะเฮิรตซ์
E band	60 - 90 จิกะเฮิรตซ์
W band	75 - 110 จิกะเฮิรตซ์
F band	90 - 140 จิกะเฮิรตซ์
D band	110 - 170 จิกะเฮิรตซ์

2.7 สรุป

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า เป็นสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สะสมและสูญเสียภายในสารที่อยู่ในสนามไฟฟ้า ซึ่งจะบอกถึงค่าไดอิเล็กตริกที่เป็นปริมาณเกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในสารเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารได้แก่ ความหนาแน่น อุณหภูมิ ความชื้น ความบริสุทธิ์และความสม่ำเสมอของสาร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในหลายๆด้าน

ในโครงการเล่มนี้จะเลือกใช้หลักการสายส่งในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า เพราะหลักการสายส่งเป็นวิธีที่สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องแลปของมหาวิทยาลัย สามารถใช้กับวัสดุที่มีความหนาในระดับหนึ่ง และมีความผิดพลาดของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าน้อย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

3.1 กล่าวนำ

โครงสร้างการจำลองวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นการประกอบชุดอุปกรณ์ทดลองไมโครเวฟขึ้นมา โดยมีส่วนประกอบต่างๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย สล็อตไลน์ ตัวเปลี่ยนท่อนำคลื่นเป็นโค-แอกเซียล โหลดปลายท่อ Movable Short และ Calibration Waveguide แล้วทำการวัดทดสอบวัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ซึ่งในการประกอบทดลองสามารถทำได้ดังนี้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 ตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียล (Waveguide To Coax Adapter)

เป็นท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างสำหรับแนวทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมักใช้สำหรับความถี่ไมโครเวฟ



รูปที่ 3.1 ตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็น โคแอกเซียล

3.2.2 สล็อตไลน์ (Slotted Line)

เป็นอุปกรณ์แบบดั้งเดิมที่ใช้ในการวัดค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของคลื่นและอัตราส่วนของแรงแดันสูงสุดและแรงแดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณและใช้วัดหาความยาวคลื่นของคลื่นนิ่งภายในท่อนำคลื่นได้ สล็อตไลน์จะมีโครงสร้างเหมือนกับสายส่งที่ใช้ในระบบ เช่น ถ้ำสาย

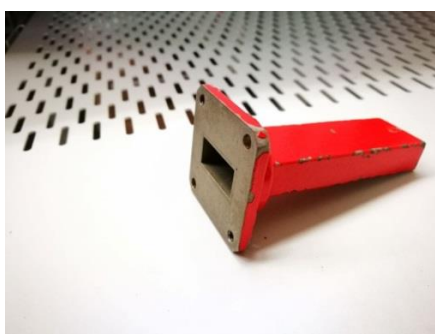
ส่งเป็นท่อนำคลื่น สล็อตไลน์ก็จะมีโครงสร้างเป็นท่อนำคลื่นด้วย ตัวสล็อตไลน์จะมีการเจาะช่องแคบๆ เป็นแนวยาวสำหรับยื่นโพรบเข้าไป และมีความสัมพันธ์กับขนาดของคลื่นนิ่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ณ ตำแหน่งนั้นสามารถขยับไปมาซ้าย-ขวาได้



รูปที่ 3.2 สล็อตไลน์

3.2.3 โหลดปลายท่อ (Waveguide Termination)

เป็นอุปกรณ์สำหรับการดูดซับคลื่นสัญญาณในท่อนำคลื่น โดยการใช้ลิ่มที่อยู่ภายในของท่อนำคลื่นที่มีการวางตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อคลื่นสัญญาณตัดผ่านลิ่มจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเช่นเดียวกับวิธีการอื่นๆ ที่สูญเสียอยู่ในรูปของความร้อน เนื่องจากพลังงานน้อยมากถึงจุดสิ้นสุดของท่อนำคลื่นที่สะท้อนเป็นขั้นต่ำ ทั้งหมดที่กล่าวถึงการได้รับการออกแบบมาเพื่อแผ่หรือดูดซับพลังงานโดยไม่สะท้อนในหลายกรณี แต่พลังงานทั้งหมดจะต้องสะท้อนให้เห็นจากจุดสิ้นสุดของท่อนำคลื่น



รูปที่ 3.3 โหลดปลายท่อ

3.2.4 Movable short

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลัดวงจรและเคลื่อนย้ายวัสดุต่างๆภายในท่อนำคลื่น ปกติจะใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะของการสะท้อนของคลื่น ความถี่ ความยาวคลื่นและระยะเวลาในคลื่น พื้นที่ว่าง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างมีความเที่ยงตรง แม่นยำ เนื่องจากมีสเกลการวัดค่อนข้างละเอียด



รูปที่ 3.4 Movable Short

3.2.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วงจรแบบเครือข่าย ใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 10 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 40 จิกะเฮิรตซ์ ใช้สำหรับงานการศึกษาด้านคลื่น ความถี่ที่สูงมาก คลื่นเรดาร์ คลื่นมิลลิเมตร โดยปกติจะสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนค่าได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายนอกจากนี้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ยังสามารถใช้วัดค่าคงที่อื่นๆ ของคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟได้ เช่น สัมประสิทธิ์ การส่งผ่าน (transmission coefficient) การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insert Loss) การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) และมุม (phase) เป็นต้น



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

3.2.6 Calibration Waveguide

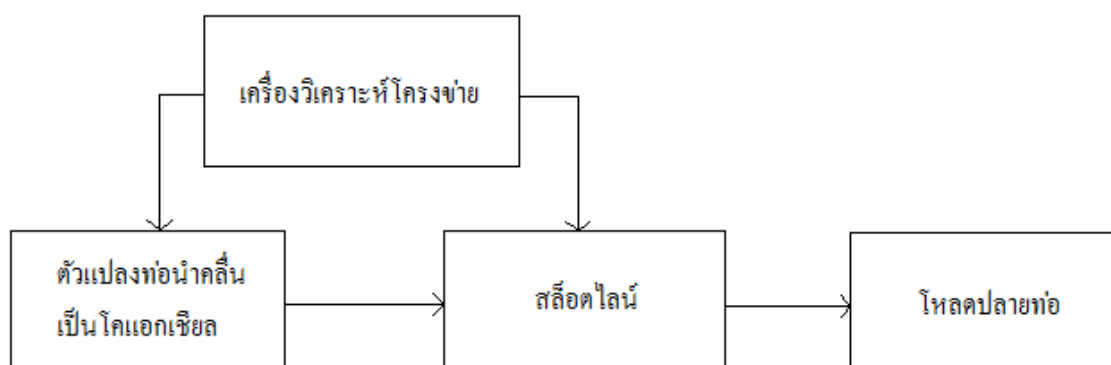
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ไขความไม่สมบูรณ์ ขั้นตอนวิธีการคือเปรียบเทียบการตอบสนองในขณะที่ความถี่ตอบสนองภายในของ VNA อาจจะทำเปรียบเทียบสายที่เชื่อมต่อภายนอกจะมีความถี่การตอบสนองที่จะต้องเปรียบเทียบออกมาสำหรับการตรวจวัดที่มีคุณภาพสูง



รูปที่ 3.6 Calibration Waveguide

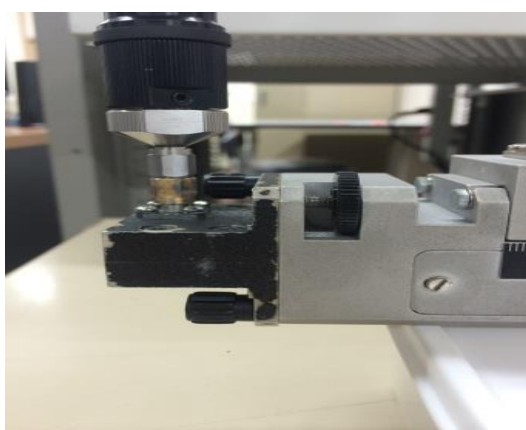
3.3 วิธีดำเนินการ

โครงสร้างการจำลองการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าโดยใช้หลักการสายส่ง



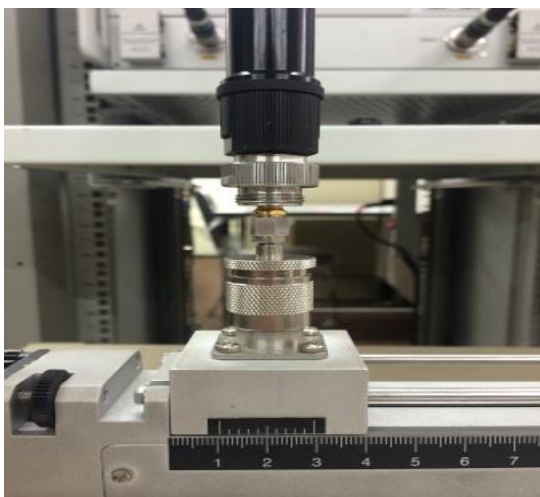
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการจำลองการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าโดยใช้หลักการสายส่ง

การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าโดยใช้หลักการสายส่งประกอบด้วย ตัวเปลี่ยนท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียล เข้าที่ปลายด้านปลายเปิดด้านหนึ่งของสล็อตไลน์และ ต่อสายเชื่อมเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับตัวเปลี่ยนท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียลที่ พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายรูปที่ 3.8



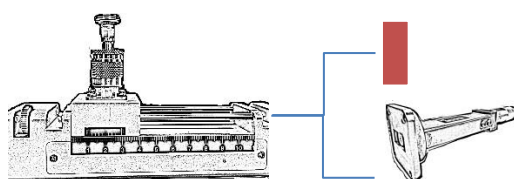
รูปที่ 3.8 ต่อตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียลเข้าที่ด้านปลายเปิดด้านหนึ่งของสล็อตไลน์

ต่อไปให้ทำการต่อสายเชื่อมเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับสล็อตไลน์เข้าที่ พอร์ต 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การต่อสายเชื่อมเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับสล็อตไลน์

ต่อไปทำการใส่วัสดุทดลองใน Movable Short แล้วประกอบเข้ากับปลายเปิดของสล็อตไลน์ จากนั้นหมุน Movable Short จนสุดเพื่อดันวัสดุทดลองให้เข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์ รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การใส่วัสดุทดลองในสล็อตไลน์

เมื่อดันวัสดุทดลองเข้าไปในสล็อตไลน์แล้ว ขั้นตอนสุดท้ายให้ถอด Movable Short ออก แล้วทำการประกอบตัวโหนดปลายท่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทนดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การประกอบตัวโพลีคลายทอเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์

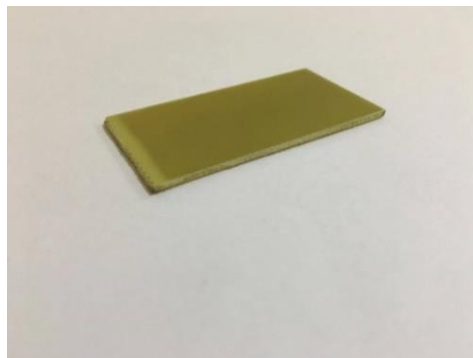
เมื่อทำการประกอบอุปกรณ์ในการทดลองเสร็จแล้ว ให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายการวัดที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะประกอบไปด้วยขนาดและเฟส แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่อไป

3.4 วัสดุสำหรับการทดลอง

สำหรับวัสดุที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกในโครงการนี้ มีทั้งหมด 5 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ ไม้ (รูปที่ 3.12) , แผ่น Fr-4 (รูปที่ 3.13) , อะคริลิก (รูปที่ 3.14) , กระดาษ (รูปที่ 3.15) และยาง (รูปที่ 3.16)



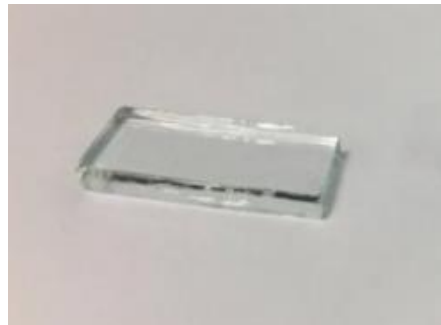
รูปที่ 3.12 ไม้



รูปที่ 3.13 แผ่น FR4



รูปที่ 3.14 อะคริลิก



รูปที่ 3.15 กระจกใส



รูปที่ 3.16 ยาง

3.5 สรุป

การประกอบชุดอุปกรณ์ในการทดลองนี้ เพื่อทำการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้านั้น ยังไม่สามารถบอกค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ เนื่องจากค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นค่า S_{11} ต้องนำค่าที่ได้ไปแปลงเป็นค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยต้องใช้สมการที่สอดคล้องเพื่อกำหนดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4

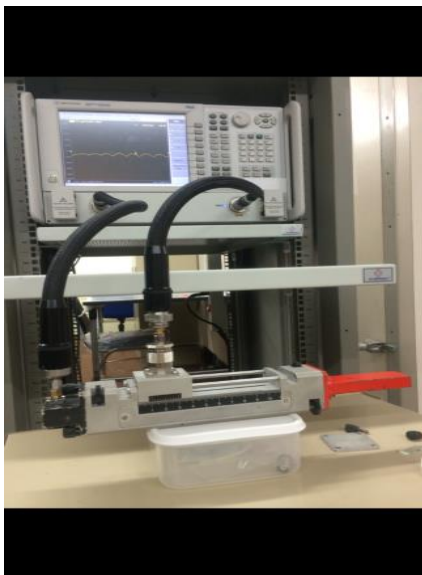
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาทฤษฎีของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในบทที่ 2 และได้นำทฤษฎีต่างๆ มาทำการประกอบโครงสร้างชุดทดลองวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าตามบทที่ 3 แล้วนั้น ในบทนี้จะเป็นการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณสมการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า โดยการนำเอาวัสดุทดลองต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่มีในตำราอยู่แล้วนั้นว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นการยืนยันว่าโครงสร้างการวัดทดลองหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า สามารถนำมาใช้ในการออกแบบวงจรต่างๆ ได้จริง

4.2 การทดสอบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

4.2.1 ต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง

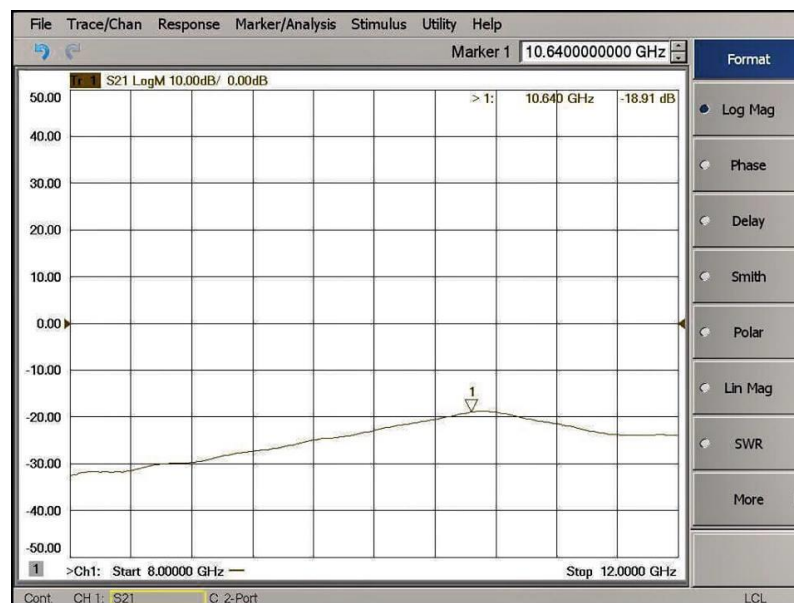


รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

4.2.2 หาความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

ขั้นตอนการวัดหาความถี่ที่จะใช้งาน โดยความถี่ที่ดีที่สุดในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) มีขั้นตอนการวัดหาค่าดังนี้

- 1.) ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 4.1 (โดยไม่ต้องใส่วัสดุ)
- 2.) ใส่โหลดปลายท่อ เข้าที่ปลายเปิดด้านหนึ่งของสล็อตไลน์
- 3.) ปรับ Marker ไปยังตำแหน่งของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่มีความแรงสัญญาณสูงสุด ดังรูปที่ 4.2
- 4.) จะได้ความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าคือ 10.64 จิกะเฮิร์ตซ์

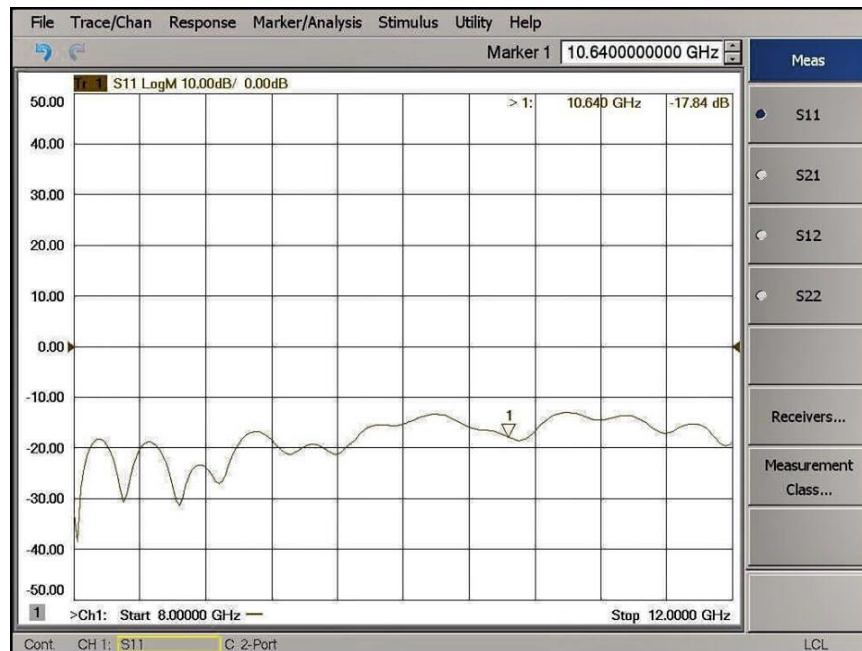


รูปที่ 4.2 ความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

4.2.3 ผลการทดสอบวัดค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (λ_g)



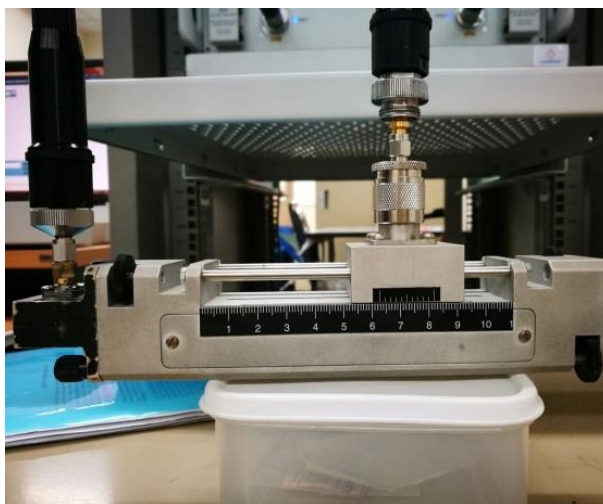
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งความยาวของ x_0



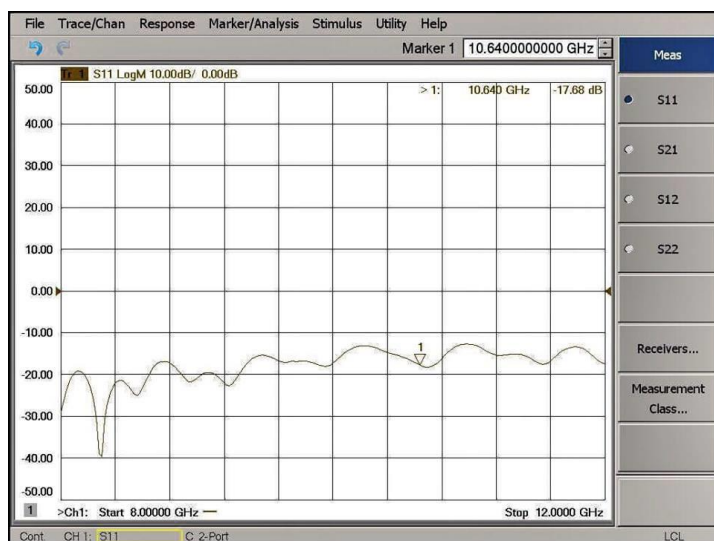
รูปที่ 4.4 ความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่ง x_0

จากรูปที่ 4.3 เป็นขั้นตอนการวัดหาค่า x_0 ซึ่งมีระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่งแรก โดยวัดจากทางซ้ายของสล็อตไลน์ มีขั้นตอนการวัดค่าดังนี้

- 1) ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 4.1 (โดยไม่ต้องใส่วัสดุที่ใช้หาค่าสภาพยอมทางฟ้าในสล็อตไลน์)
- 2) ถอดโพลดปลายท่อออกแล้ว ปิดแผ่นลัดวงจร เข้าที่ปลายเปิดด้านหนึ่งของสล็อตไลน์
- 3) หาดำแหน่ง x_0 ที่มีระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่งแรก โดยวัดจากทางซ้ายของสล็อตไลน์
- 4) บันทึกค่าความยาวที่ได้บนสล็อตไลน์ลงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งความยาวของ x_1



รูปที่ 4.6 ความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่ง x_1

จากรูปที่ 4.5 เป็นขั้นตอนการวัดหาค่า x_1 ซึ่งมีระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่งสาม โดยวัดจากทางซ้ายของสล็อตไลน์ มีขั้นตอนการวัดค่าดังนี้

- 1) เมื่อวัดค่า x_0 ได้แล้วนั้นให้ทำการเลื่อนสล็อตไลน์ต่อไปเพื่อหาตำแหน่ง x_1 ที่มีระดับความแรงต่ำที่สุดในตำแหน่งที่สาม
- 2) บันทึกค่าความยาวที่ได้บนสล็อตไลน์ลงในตารางที่ 4.1

คำนวณหาค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (λ_g) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ

$$\lambda_g = |x_0 - x_1|$$

เมื่อ λ_g คือ ค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น
 x_0 คือ ระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่งแรก
 x_1 คือ ระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดตำแหน่งที่สาม

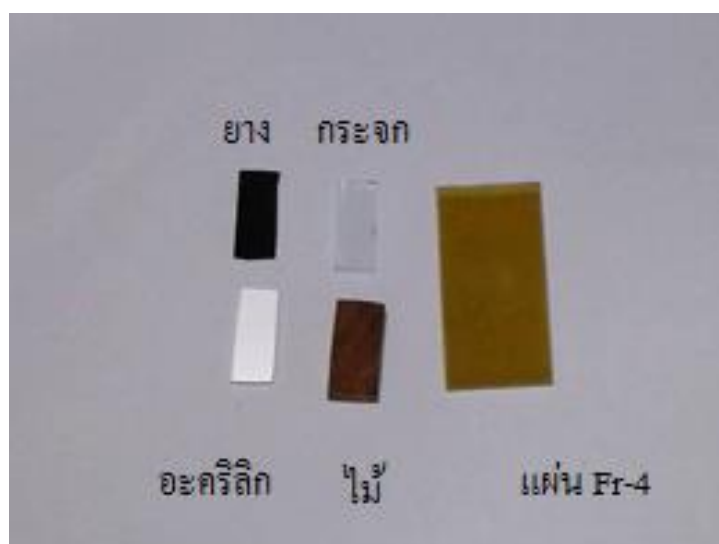
ได้ $x_0 = 27.6$ มิลลิเมตร
 $x_1 = 62.8$ มิลลิเมตร

ดังนั้น $\lambda_g = |27.6 - 62.8|$
 $\lambda_g = 35.2$ มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 การวัดหาค่าความยาวคลื่นในท่อคลื่น (λ_g)

ลำดับ	รายการ	ผลการทดลอง
1	ความยาวคลื่นของ x_0 ที่ระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดที่ตำแหน่งแรก	26.7 mm
2	ความยาวคลื่นของ x_1 ที่ระดับความแรงของสัญญาณต่ำที่สุดที่ตำแหน่งที่สาม	62.8 mm
3	ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (λ_g)	35.2 mm

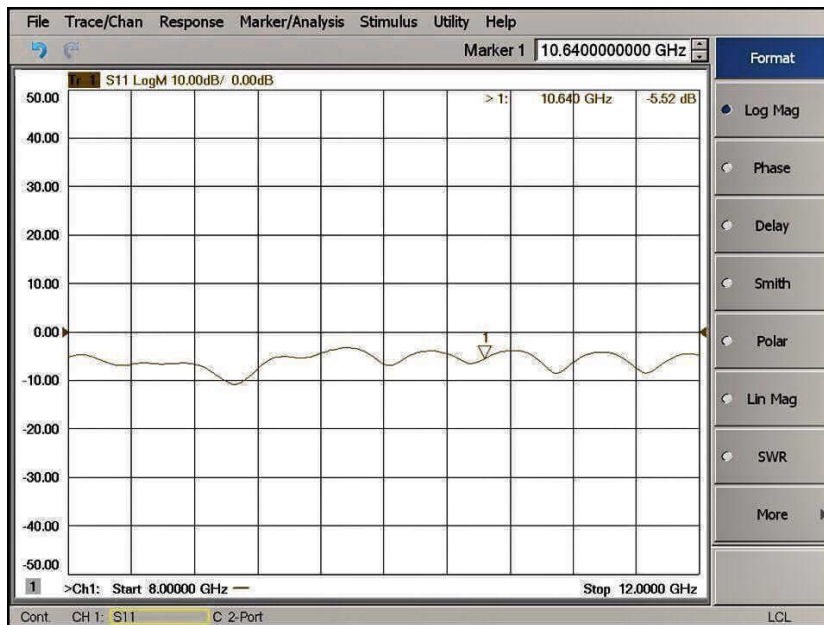
4.2.4 วัสดุที่นำมาใช้วัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า



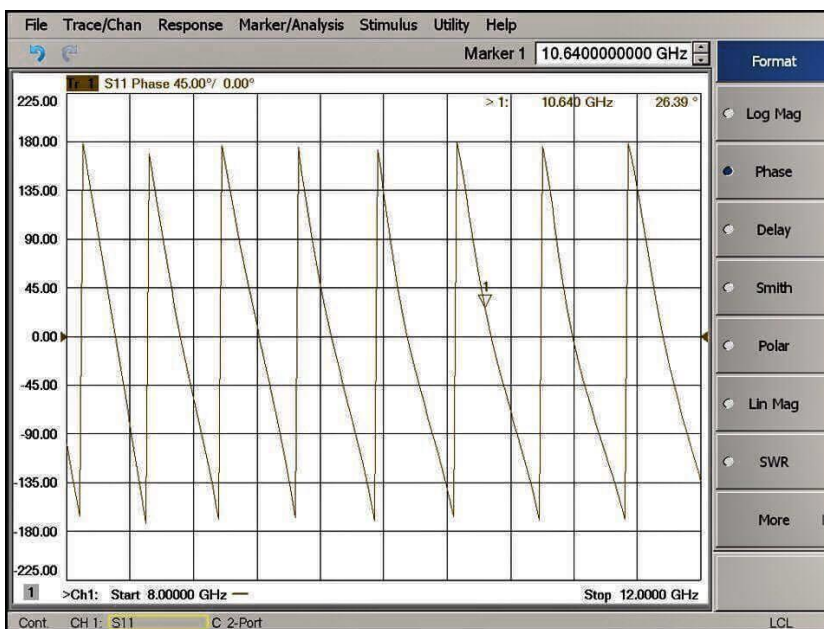
รูปที่ 4.7 วัสดุที่นำมาใช้วัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

4.2.5 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (แผ่น Fr-4)

1. ใส่วัสดุตัวอย่างใน Movable Short เพื่อดันวัสดุเข้าไปในสล็อตไลน์
2. เมื่อวัสดุเข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์แล้วให้ทำการถอด Movable Short ออก
3. แล้วทำการประกอบตัวโหลดปลายท่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทน
4. จากนั้นให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเฟสและขนาด
5. บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง 4.2



รูปที่ 4.8 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Fr-4



รูปที่ 4.9 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Fr-4

ตารางที่ 4.2 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (แผ่น Fr-4)

วัสดุทดลอง	รายการ	ผลการทดลอง
แผ่น Fr-4	S_{11}	-5.52 dB
	$ \Gamma = 10^{(S_{11}/10)}$	-0.25
	$\phi = 180 + \phi_{s11}$	206.35°

จากตารางที่ 4.2 ϕ จะได้

$$\phi = 180 + \phi_{s11}$$

$$\phi = 180 + 26.35$$

$$\phi = 206.35^\circ$$

จากตารางที่ 4.2 $|\Gamma|$ จะได้

$$\text{จาก } \Gamma = 0.28 \angle 206.35$$

$$\text{จะได้ } \Gamma = -0.25 - j0.1242$$

จากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 - j\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - 2jk_z / \tau k^2 \right] \Gamma}{1 + (1 + j\tau k_z) \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{22.5 \times 10^{-3}} \right)^2 - j(0.5 \times 10^{-3})(112.84) \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{2(22.5 \times 10^{-3})} \right)^2 - \frac{2j(112.84)}{(0.5 \times 10^{-3})(179.52)^2} \right] \Gamma}{1 + [(0.5 \times 10^{-3})(112.84)] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [1 - 1.2099 - j0.0342 - j14.0055] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.2099 - j14.0397] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma} \quad ; \quad \Gamma = -0.25 - j0.1242$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [(-0.2099 - j14.0397)(-0.25 - j0.1242)]}{1 + [(1 + j0.05642)(-0.25 - j0.1242)]}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [-1.691 + j3.535]}{1 + [-0.2429 - j0.1383]}$$

$$\varepsilon = \frac{2.691 - j3.535}{0.7571 - j0.1383}$$

$$\varepsilon = \frac{4.4\angle -52.71}{0.769\angle -10.35}$$

$$\varepsilon = 5.773\angle -42.36$$

$$\varepsilon = 4.265 - j3.889$$

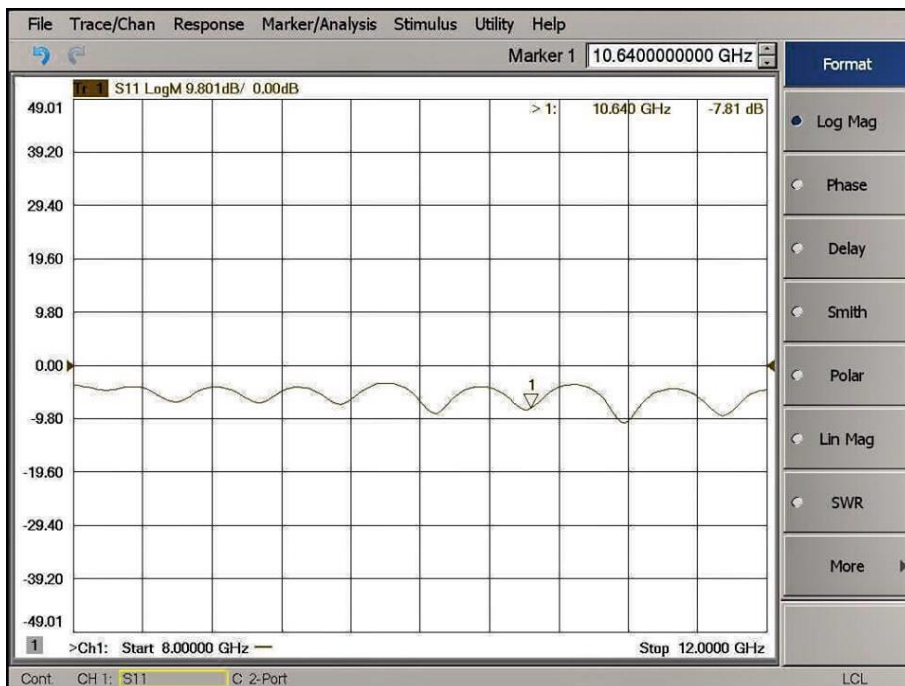
$$\varepsilon_r = 4.265$$

จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุตัวอย่าง (Fr-4) มีค่าเท่ากับ 4.265

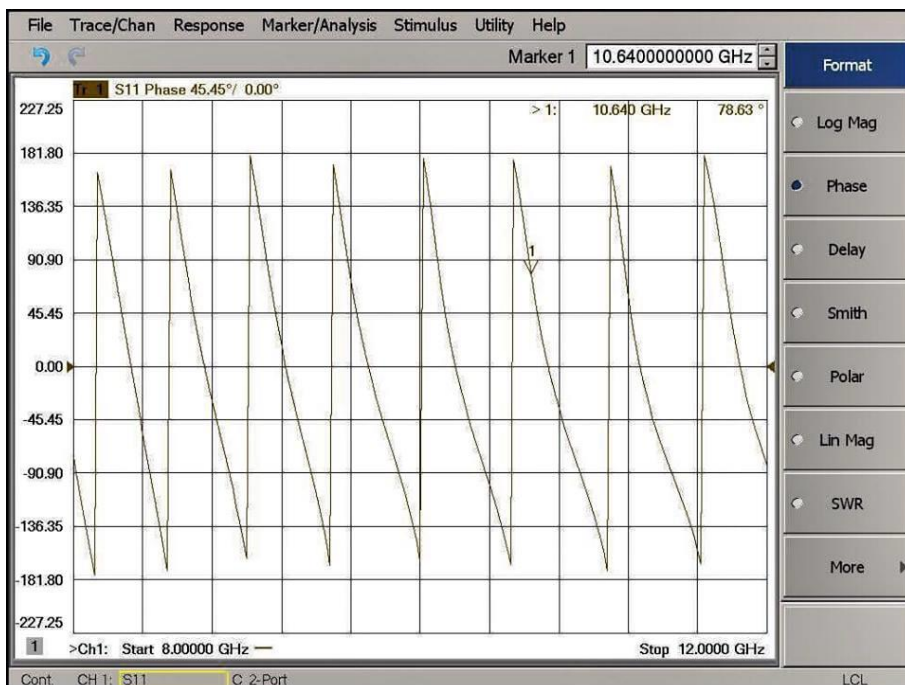
ค่า ε_r ของแผ่น Fr-4 ตามตำรานั้นมีค่าอยู่ที่ 4.2 - 4.7 ซึ่งเป็นไปตามตำรา ทำให้รู้ว่าสมการที่นำมาใช้คำนวณนั้นสามารถใช้ได้จริง ต่อจากนี้ไปจะทำการทดลองกับวัสดุทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ อะคริลิก กระดาษ ยาง และไม้

4.2.6 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (อะคริลิก)

1. ใส่วัสดุตัวอย่างใน Movable Short เพื่อดันวัสดุเข้าไปในสล็อตไลน์
2. เมื่อวัสดุเข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์แล้วให้ทำการถอด Movable Short ออก
3. แล้วทำการประกอบตัวโหนดปลายท่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทน
4. จากนั้นให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเฟสและขนาด
5. บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง 4.3



รูปที่ 4.10 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอะคริลิก



รูปที่ 4.11 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอะคริลิก

ตารางที่ 4.3 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (อะคริลิก)

วัสดุทดลอง	รายการ	ผลการทดลอง
อะคริลิก	S_{11}	-7.81 dB
	$ \Gamma = 10^{(S_{11}/10)}$	-0.0326
	$\phi = 180 + \phi_{s11}$	258.63°

จากตารางที่ 4.2 ϕ จะได้

$$\phi = 180 + \phi_{s11}$$

$$\phi = 180 + 78.63$$

$$\phi = 258.63^\circ$$

จากตารางที่ 4.2 $|\Gamma|$ จะได้

$$\text{จาก } \Gamma = 0.1655 \angle 258.63$$

$$\text{จะได้ } \Gamma = -0.0326 - j 0.1623$$

จากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 - j \tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - 2j k_z / \tau k^2 \right] \Gamma}{1 + (1 + j \tau k_z) \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{22.5 \times 10^{-3}} \right)^2 - j (0.5 \times 10^{-3}) (112.84) \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{2(22.5 \times 10^{-3})} \right)^2 - \frac{2j (112.84)}{(0.5 \times 10^{-3}) (179.52)^2} \right] \Gamma}{1 + [(0.5 \times 10^{-3}) (112.84)] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [1 - 1.2099 - j 0.0342 - j 14.0055] \Gamma}{1 + [1 + j 0.05642] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.2099 - j 14.0397] \Gamma}{1 + [1 + j 0.05642] \Gamma} \quad ; \quad \Gamma = -0.0326 - j 0.1623$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [(-0.2099 - j14.0397)(-0.0326 - j0.1623)]}{1 + [(1 + j0.05642)(-0.0326 - j0.1623)]}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [-2.2718 + j0.4918]}{1 + [-0.02344 - j0.1641]}$$

$$\varepsilon = \frac{3.2718 - j0.4916}{0.97656 - j0.1641}$$

$$\varepsilon = \frac{3.3086 \angle -8.5484}{0.9903 \angle -9.5388}$$

$$\varepsilon = 3.341 \angle 0.3204$$

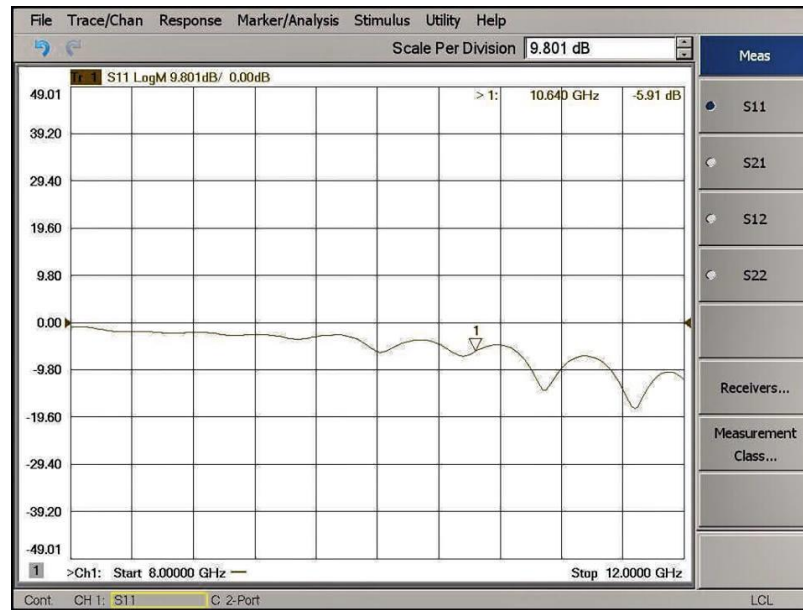
$$\varepsilon = 3.3405 - j0.0577$$

$$\varepsilon_r = 3.3405$$

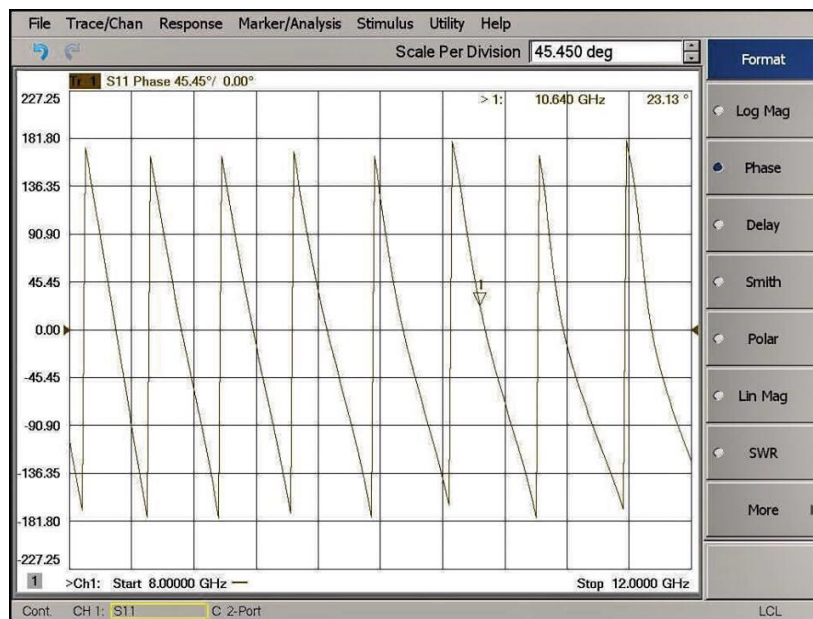
จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุตัวอย่าง (อะคริลิก) มีค่าเท่ากับ 3.34

4.2.7 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (กระจก)

1. ใส่วัสดุตัวอย่างใน Movable Short เพื่อค้นวัสดุเข้าในสล็อตไลน์
2. เมื่อวัสดุเข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์แล้วให้ทำการถอด Movable Short ออก
3. แล้วทำการประกอบตัวโหนดปลายต่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทน
4. จากนั้นให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเฟสและขนาด
5. บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง 4.4



รูปที่ 4.12 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกระบอก



รูปที่ 4.13 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกระบอก

ตารางที่ 4.4 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (กระจก)

วัสดุทดลอง	รายการ	ผลการทดลอง
กระจก	S_{11}	-5.24 dB
	$ \Gamma = 10^{(S_{11}/10)}$	-0.1868
	$\phi = 180 + \phi_{s11}$	231.37°

จากตารางที่ 4.3 ϕ จะได้

$$\phi = 180 + \phi_{s11}$$

$$\phi = 180 + 51.37$$

$$\phi = 231.37^\circ$$

จากตารางที่ 4.3 $|\Gamma|$ จะได้

$$\text{จาก } \Gamma = 0.2992 \angle 203.13$$

$$\text{จะได้ } \Gamma = -0.1868 - j0.2337$$

จากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 - j\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - 2jk_z / \tau k^2 \right] \Gamma}{1 + (1 + j\tau k_z) \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{22.5 \times 10^{-3}} \right)^2 - j(0.5 \times 10^{-3})(112.84) \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{2(22.5 \times 10^{-3})} \right)^2 - \frac{2j(112.84)}{(0.5 \times 10^{-3})(179.52)^2} \right] \Gamma}{1 + [(0.5 \times 10^{-3})(112.84)] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [1 - 1.2099 - j0.0342 - j14.0055] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.2099 - j14.0397] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma} \quad ; \quad \Gamma = -0.1868 - j0.2337$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [(-0.2099 - j14.0397)(-0.1868 - j0.2337)]}{1 + [(1 + j0.05642)(-0.1868 - j0.2337)]}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [-3.2419 + j2.6717]}{1 + [-0.1736 - j0.2442]}$$

$$\varepsilon = \frac{4.2419 - j2.6717}{0.8264 - j0.2442}$$

$$\varepsilon = \frac{5.0131 \angle -32.2042}{0.8617 \angle -16.4623}$$

$$\varepsilon = 5.8177 \angle -15.7419$$

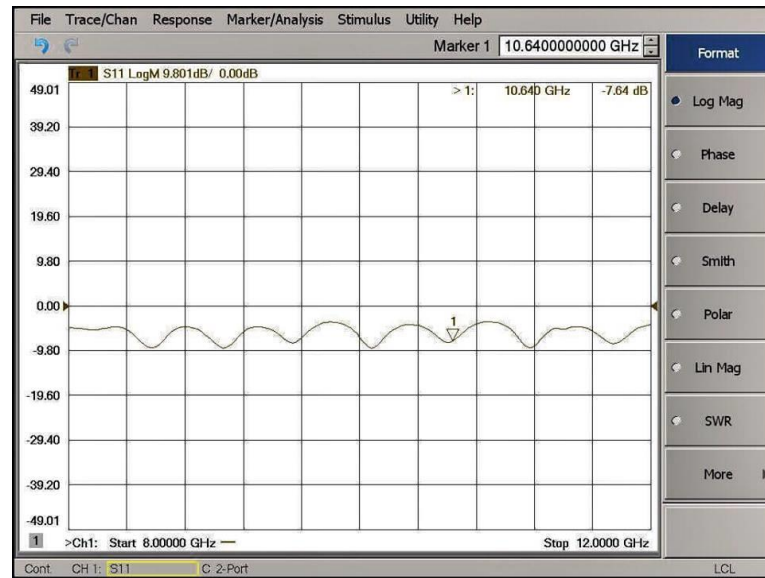
$$\varepsilon = 5.5995 - j1.5784$$

$$\varepsilon_r = 5.5995$$

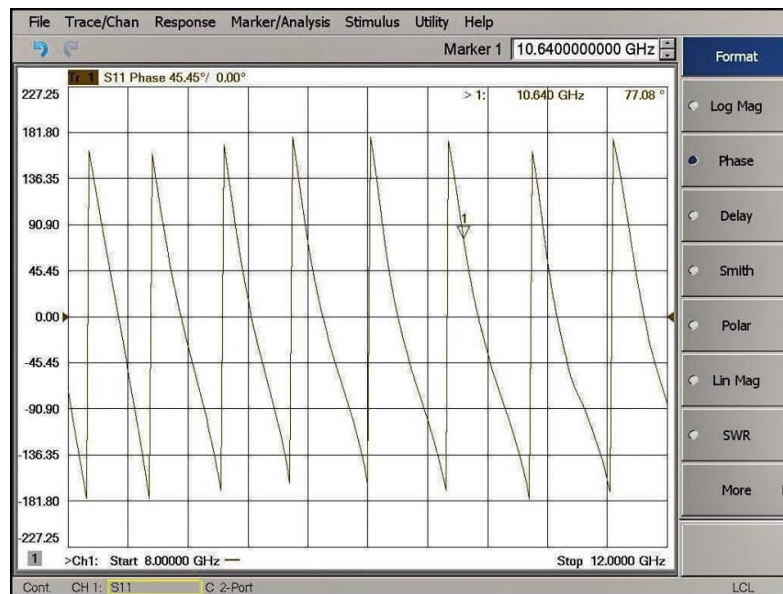
จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุตัวอย่าง (กระจก) มีค่าเท่ากับ 5.59

4.2.8 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (ยาง)

1. ใส่วัสดุตัวอย่างใน Movable Short เพื่อค้นวัสดุเข้าในสล็อตไลน์
2. เมื่อวัสดุเข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์แล้วให้ทำการถอด Movable Short ออก
3. แล้วทำการประกอบตัวโหนดปลายต่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทน
4. จากนั้นให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเฟสและขนาด
5. บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง 4.5



รูปที่ 4.14 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของยาง



รูปที่ 4.15 แสดงค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของยาง

ตารางที่ 4.5 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (ยาง)

วัสดุทดลอง	รายการ	ผลการทดลอง
ยาง	S_{11}	-7.64 dB
	$ \Gamma = 10^{(S_{11}/10)}$	-0.0384
	$\phi = 180 + \phi_{s11}$	257.08°

จากตารางที่ 4.4 ϕ จะได้

$$\phi = 180 + \phi_{s11}$$

$$\phi = 180 + 77.08$$

$$\phi = 257.08^\circ$$

จากตารางที่ 4.4 $|\Gamma|$ จะได้

$$\text{จาก } \Gamma = 0.1721 \angle 257.08$$

$$\text{จะได้ } \Gamma = -0.0384 - j0.1677$$

จากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 - j\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - 2jk_z / \tau k^2 \right] \Gamma}{1 + (1 + j\tau k_z) \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{22.5 \times 10^{-3}} \right)^2 - j(0.5 \times 10^{-3})(112.84) \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{2(22.5 \times 10^{-3})} \right)^2 - \frac{2j(112.84)}{(0.5 \times 10^{-3})(179.52)^2} \right] \Gamma}{1 + [(0.5 \times 10^{-3})(112.84)] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [1 - 1.2099 - j0.0342 - j14.0055] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.2099 - j14.0397] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma} \quad ; \quad \Gamma = -0.0384 - j0.1677$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [(-0.2099 - j14.0397)(-0.0384 - j0.1677)]}{1 + [(1 + j0.05642)(-0.0384 - j0.1677)]}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - [-2.346 + j0.574]}{1 + [-0.0289 - j0.1698]}$$

$$\varepsilon = \frac{3.346 - j0.574}{0.9711 - j0.1698}$$

$$\varepsilon = \frac{3.374 \angle -9.73}{0.985 \angle -9.91}$$

$$\varepsilon = 3.44 \angle 0.18$$

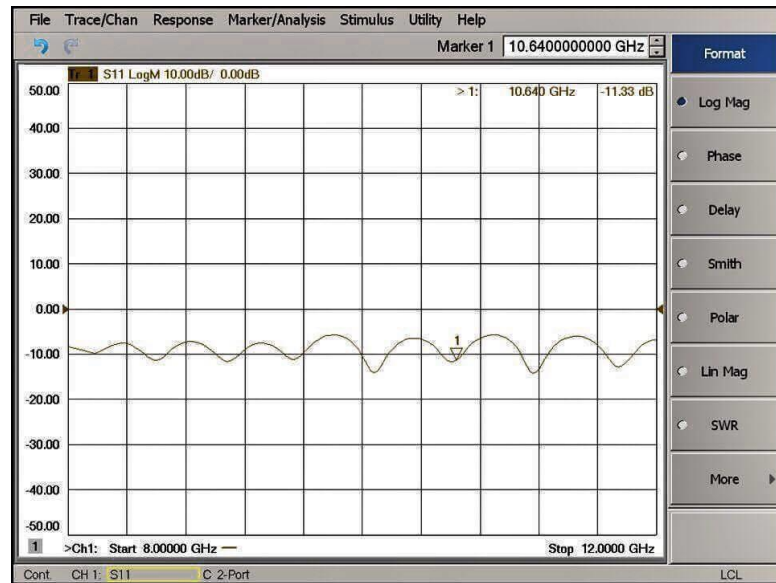
$$\varepsilon = 3.439 - j0.01$$

$$\varepsilon_r = 3.439$$

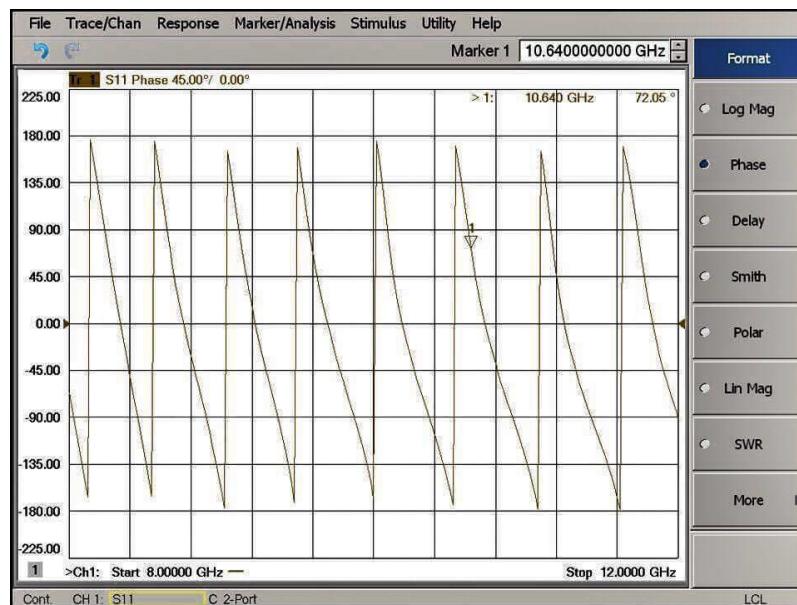
จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุตัวอย่าง (ยาง) มีค่าเท่ากับ 3.43

4.2.9 ทำการทดสอบวัสดุตัวอย่าง (ไม้)

1. ใส่วัสดุตัวอย่างใน Movable Short เพื่อค้นวัสดุเข้าในสล็อตไลน์
2. เมื่อวัสดุเข้าไปอยู่ในสล็อตไลน์แล้วให้ทำการถอด Movable Short ออก
3. แล้วทำการประกอบตัวโหนดปลายต่อเข้าที่ปลายเปิดของสล็อตไลน์แทน
4. จากนั้นให้หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเฟสและขนาด
5. บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง 4.6



รูปที่ 4.16 ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของไม้



รูปที่ 4.17 ค่าเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนของไม้

ตารางที่ 4.6 การวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัสดุตัวอย่าง (ไม้)

วัสดุทดลอง	รายการ	ผลการทดลอง
ไม้	S_{11}	-11.30 dB
	$ \Gamma = 10^{(S_{11}/10)}$	-0.0229
	$\phi = 180 + \phi_{s11}$	251.93°

จากตารางที่ 4.2 ϕ จะได้

$$\phi = 180 + \phi_{s11}$$

$$\phi = 180 + 71.93$$

$$\phi = 251.93^\circ$$

จากตารางที่ 4.2 $|\Gamma|$ จะได้

$$\text{จาก } \Gamma = 0.0741 \angle 251.93$$

$$\text{จะได้ } \Gamma = -0.0229 - j0.07$$

จากสมการที่ 2.16 สามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 - j\tau k_z \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - 2jk_z / \tau k^2 \right] \Gamma}{1 + (1 + j\tau k_z) \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{22.5 \times 10^{-3}} \right)^2 - j(0.5 \times 10^{-3})(112.84) \left(\frac{35 \times 10^{-3}}{2(22.5 \times 10^{-3})} \right)^2 - \frac{2j(112.84)}{(0.5 \times 10^{-3})(179.52)^2} \right] \Gamma}{1 + [(0.5 \times 10^{-3})(112.84)] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [1 - 1.2099 - j0.0342 - j14.0055] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.2099 - j14.0397] \Gamma}{1 + [1 + j0.05642] \Gamma} \quad ; \quad \Gamma = -0.0229 - j0.07$$

$$\epsilon = \frac{1 - [(-0.2099 - j14.0397)(-0.0229 - j0.07)]}{1 + [(1 + j0.05642)(-0.0229 - j0.07)]}$$

$$\epsilon = \frac{1 - [-0.9779 + j0.336]}{1 + [-0.01895 - j0.07129]}$$

$$\epsilon = \frac{1.9779 - j0.336}{0.981 - j0.07129}$$

$$\epsilon = \frac{2.006\angle -9.64}{0.983\angle -4.156}$$

$$\epsilon = 2.04\angle -5.484$$

$$\epsilon = 2.03 - j0.194$$

$$\epsilon_r = 2.03$$

จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุตัวอย่าง (ไม้) มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.03

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

วัสดุ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่วัดได้	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจากคิต้า ซีท
Fr-4	4.265	4.2 - 4.7
อะคริลิก	3.34	2.7 - 4.5
กระจก	5.59	3.7 - 10
ยาง	3.43	3.0
ไม้	2.03	2 - 7

4.3 สรุปผล

จากผลการทดลองการวัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าด้วยความถี่ 10.64 จิกะเฮิรตซ์นั้น เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่มีอยู่ในดาต้าชีท ซึ่งจะเห็นว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจากการคำนวณจะมีค่าอยู่ในช่วงของค่าจากดาต้าชีท โดยใช้สมการที่สอดคล้องมาทำการคำนวณในการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

บทที่ 5

บทสรุปโครงการ

5.1 กล่าวนำ

การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า สามารถที่จะสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม เพื่อการพิจารณาใน การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นโดยใช้หลักการทางทฤษฎี ในการ วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่ได้ศึกษามานั้น ดังนี้

5.2 ปัญหาที่พบ และสาเหตุของปัญหา รวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา

ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่พบ และสาเหตุของปัญหา รวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1. สูตรคำนวณ	<p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีสูตรคำนวณที่ซับซ้อน</p> <p><u>วิธีแก้ไขปัญหา</u> ศึกษาทฤษฎีการคำนวณ ให้ดีเสียก่อนเพื่อลดความผิดพลาดในการคำนวณ</p>
2. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	<p><u>สาเหตุ</u> วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีขนาดไม่เหมาะสมในการใช้งาน</p> <p><u>วิธีแก้ไขปัญหา</u> การสร้างวัสดุทดลองมีผลต่อค่าการคำนวณ ต้องใช้ความประณีตและใช้ความชำนาญในการทำอย่างสูง</p>
3. มุมเปลี่ยนแปลง 180°	<p><u>สาเหตุ</u> ระยะตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็นโคแอกเซียลจากโพรบถึงขอบมีระยะ $\frac{\lambda}{4}$ ทำให้มุมเฟสเปลี่ยนไป</p> <p><u>วิธีแก้ไขปัญหา</u> ทำการเพิ่มมุมของเฟสไปอีก 180° จากเดิมในการคำนวณ</p>

5.3 ข้อเสนอแนะ

การหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่คณะผู้จัดทำได้ทำการวัดค่าขึ้นมา โดยความถี่ที่นำมาวัดค่าคือ ความถี่ที่ 10.64 จิกะเฮิรตซ์ เท่านั้น (สามารถวัดได้ตั้งแต่ 8 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 12 จิกะเฮิรตซ์) ซึ่งแนวทางการนำไปพัฒนาต่อยอดคือ สามารถนำไปใช้วัดที่ความถี่หลากหลายความถี่ได้มากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับความถี่เรโซแนนซ์ของท่อนำคลื่น และสามารถวัดค่าวัสดุต่างๆ ที่มีขนาดหลากหลายมากขึ้น

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ทางคณะผู้จัดทำเล็งเห็นว่า การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบอุปกรณ์สื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทางมหาวิทยาลัยไม่ได้มีการสอนเกี่ยวกับการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้านี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงคาดว่า โครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย

5.5 สรุปผลการทดลอง

จากการวัดหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า โดยการใช้ความถี่ 10.64 จิกะเฮิรตซ์ ในการทดลอง เพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงสุด ควรศึกษาทฤษฎีในการคำนวณหาต่างๆ ให้ละเอียดและมีความรอบคอบในการคิดคำนวณ วัสดุควรมีขนาดเท่ากับช่องของท่อนำคลื่นในทุกสัดส่วน เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในแต่ละขั้นตอน

เอกสารอ้างอิง

- [1] O.V.Tereshchenko¹, F. J. K. Buesink, F. B. J. Leferink, “An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials”, IEEE Trans. General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, Papers (7), 2011
- [2] นางสาวทิพย์ภักดิ์ ไชยวรรณ, ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า, ปรินซิเพิล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2557
- [3] Sarabandi, K. and F. T. Ulaby, “Technique for measuring the dielectric constant of thin materials,” IEEE Trans. on Instrum. Meas., Vol. 37, No. 4, 631–636, Dec. 1988.
- [4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก, สายส่งแบบ (Coaxial line) [เอกสารออนไลน์] แหล่งที่มา
https://elearning.sut.ac.th/pluginfile.php/5383/mod_resource/content/0/Lab_2_Coaxial_line.pdf
- [5] นางสาวสมชนก จันทร์เพชร ท่อนำคลื่น (Waveguide) [เอกสารออนไลน์] แหล่งที่มา
http://www.ee.eng.cmu.ac.th/~tharadol/teach/ee442/442_48/442_48rp/45384_waveguide.pdf
- [6] นางสาวฐิติมา เฮ็งเจริญ การวัดสภาพยอม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ การวัดค่าสภาพยอมเชิงซ้อนและเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริกของของเหลวที่ช่วงเวลาความถี่ไมโครเวฟ [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0428/title-biography.pdf>

ภาคผนวก

ตารางค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า [2]

Material	Dielectric Constant - ϵ_r -
Acetaldehyde (41° F)	21.8
Acetic Acid (68° F)	6.2
Acetic Acid (36° F)	4.1
Acetone (77° F)	20.7
Acetone (127° F)	17.7
Acetone (32° F)	1.0159
Acetyl Acetone (68° F)	23.1
Acetyl Bromide (68° F)	16.5
Acetyl Chloride (68° F)	15.8
Acetylene Acetone (68° F)	25.0
Acetylene (32° F)	1.0217
Air (Dry) (68° F)	1.000536
Air, Liquid (-191oC)	1.4
Alcohol, Industrial	16-31
Alumina	9.3-11.5
Aluminum Bromide (212° F)	3.4
Aluminum Fluoride	2.2
Amber	2.8-2.9
Ammonia (-74° F)	25
Ammonia (-30° F)	22.0
Ammonia (40° F)	18.9
Ammonia (69° F)	16.5
Aniline (32° F)	7.8
Aniline (68° F)	7.3
Aniline (212° F)	5.5
Araldite	3.6
Argon (68° F)	1.000513

Material	Dielectric Constant - ϵ_r -
Bakelite	3.5-5.0
Benzene (68° F)	2.3
Butane (30° F)	1.4
Carbondioxide (68° F)	1.000921
Calcium	3.0
Casting compound	2.5
Caster oil	4.7
Chlorine (32° F)	2.0
Chloroform (68° F)	4.8
Ebonite	2.5-2.9
Epoxy Resin (Cast)	3.6
Ethanol (77° F)	24.3
Ethyl Acetate (77° F)	6.0
Ethyl Alcohol (77° F)	24.3
Freon 12 (70° F)	2.4
Glass	3.7 - 10
Glycerin, Liquid	47-68
Glycerol (77° F)	42.5
Granite	7 - 9
Guttapercha	4
Hard paper, laminated	4.5
Ice (-2oC)	3.2
Isoprene (77° F)	2.1
Insulation of high voltage cables	4.2
Insulation of telephone cables	1.5
Marble	8
Mica	2.5 - 7

Material	Dielectric Constant - ϵ_r -
Nitrogen (68° F)	1.000580
Nylon	4.0 - 5.0
Oil paper	4
Olive oil	3
Paper	2.3
Paper, impregnated	5
Paraffin oil	2.2
Paraffin Wax	2.1-2.5
Petroleum	2.2
Phenolic resin	8
Plexiglass	3.2
Polyester Resin	2.8 - 4.5
Polyethylene	2.2-2.4
Polyamide	2.8
Polypropylene	2.2
Polystyrene	3
Porcelain	5.0-7.0
Pressed board	4
Pyrex Glass	4.3 - 5.0
Quartz	4.5
Rubber	3.0
Salt	3.0 - 15.0
Shellac	3.5
Silica Sand	2.5-3.5
Silicon	11.0 - 12.0
Slate	4
Soft rubber	2.5
Steatite	6

Material	Dielectric Constant - ϵ_r -
Sulfur	3.5
Teflon, PTFE	2.2
Transformer oil, mineral	2.2
Transformer oil, vegetable	2.5
Turpentine	2.2
Vulcanized fibres	2.5
Water	4 – 88
Wood, Dry	2-7

คุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

ไม้



รูป แผ่นไม้ที่ยังไม่ได้ตัดมาทดลอง

ไม้แบ่งออกเป็นสองชนิดคือไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง โดยอาศัยวิชาการทางพฤกษศาสตร์เป็นรากฐานในการแบ่งออกเป็นสองชนิดดังกล่าวคือไม้เนื้ออ่อนเป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้พวกสน Coniferae ที่มีลักษณะใบเรียวยาวเล็ก (ใบเข็ม) ผลมีรูปลักษณะเป็นรูปทรงกรวย (Cone)

ต้นไม้พวกนี้ส่วนมากขึ้นอยู่ในที่สูงมีอากาศเย็นในประเทศที่มีอากาศหนาว ลักษณะโครงสร้างของไม้เนื้ออ่อนเป็นแบบธรรมดาซึ่งแตกต่างจากไม้เนื้อแข็งอย่างชัดเจนและมีความเหมาะสมในการใช้งานก่อสร้างได้ถึงว่าจะมีเนื้อไม้ของไม้สนหลายชนิดค่อนข้างอ่อน แต่ก็ง่ายต่อการตกแต่ง มีน้ำหนักเบาและแข็งพอที่จะใช้สำหรับงานก่อสร้างโดยทั่วไปได้เช่นกัน

ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่ได้มาจากต้นไม้ที่มีใบกว้าง ซึ่งเป็นไม้จำนวนมากที่มีอยู่ในป่าไม้ของประเทศไทยไม้ที่เป็นของไทยส่วนมากหรือทั้งหมดที่เป็นการค้าเป็นไม้เนื้อแข็งมีจำนวนหลายสิบชนิด ลักษณะโครงสร้างของไม้เนื้อแข็งมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าไม้เนื้ออ่อนและมีลักษณะแตกต่างระหว่างไม้เนื้อแข็งด้วยกันเองมากคุณสมบัติของไม้เนื้อแข็งมีความแตกต่างระหว่างพวกไม้เนื้อแข็งด้วยกันทั้งในด้านความแข็งแรงของ การรับน้ำและความแข็งของเนื้อไม้อย่างกว้างขวาง

ยางสังเคราะห์



รูป แผ่นยางสังเคราะห์ที่ยังไม่ได้ตัดมาทดลอง

ยางสังเคราะห์ มีการผลิตขึ้นมาใช้หลายชนิด เช่น พอลิบิวทาไดอิน มีสูตรโครงสร้างพอลิเมอร์คือ $(-CH_2-CH=CH-CH_2-)_n$ เป็นยางสังเคราะห์ชนิดแรกของโลก ผลิตขึ้นในประเทศเยอรมนีในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากการขาดแคลนยางธรรมชาติโดยใช้มอนอเมอร์คือ

บิวทาไดอีน ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$) เมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้ว มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติ ใช้ทำยางรถยนต์ได้ ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์เป็นวัสดุที่มีคุณภาพคล้ายกับยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อน้ำมัน สารเคมี และความร้อนได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนานยางสังเคราะห์ไม่มีความยืดหยุ่นเหมือนยางธรรมชาติดังนั้นในการใช้งานจึงมีการผสมระหว่างยางแท่งกับยางเทียมซึ่งจะทำให้ ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติของยางแท่งและยางเทียมในตัวเดียวกัน

อะคริลิก



รูป แผ่นอะคริลิกที่ยังไม่ได้ตัดมาทดลอง

อะคริลิก หรือ อะคริลิกรีซิน (Acrylic Resins) เป็นพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากกรดอะคริลิก และอนุพันธ์ของกรดอะคริลิก และเอสเทอร์ของกรดอะคริลิก มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{CH}_2=\text{CHR}$ โดยใช้สารตั้งต้น ได้แก่ Methyl Acrylate, Ethyl Acrylate และ Methyl Methacrylate ผลิตออกมาเป็นอะคริลิกที่นิยมใช้มากคือ Polymethyl Methacrylate (PMMA)

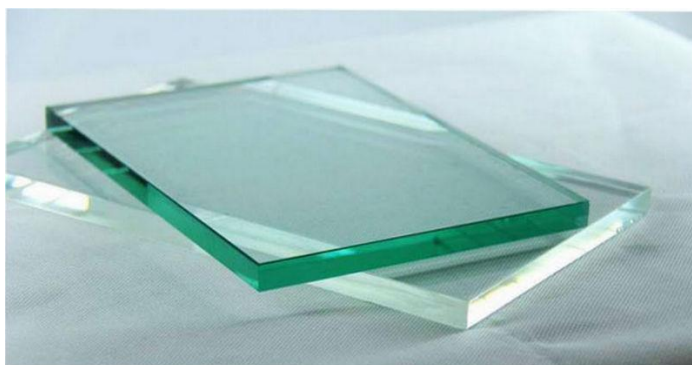
สมบัติทั่วไปของแผ่นอะคริลิก

- มีความโปร่งใสคล้ายกระจก
- ทนทานต่อแรงกระแทก แรงกด และสภาพแวดล้อมดินฟ้าอากาศ
- ทนทานต่อสารเคมีหลายชนิด ยกเว้นสารตัวทำละลาย และกรดที่ส่วนมากมีผลต่ออะคริลิก รวมถึง

ต่างแก้วทุกชนิด

- สามารถเติมแต่งด้วยสี ให้มีสีสันทันได้ตามความต้องการ
- มีจุดอ่อนตัวต่ำ ทนต่อความร้อน และมีความเหนียว
- มีสภาพทรงรูปที่ดี และทนต่อการขีดข่วน
- เป็นฉนวนไฟฟ้า และฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี
- ไม่ดูดความชื้น

กระจกใส



รูป แผ่นกระจกใสที่ยังไม่ได้ตัดมาทดลอง

กระจก หมายถึงวัสดุที่ทำมาจากแก้ว ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือซิลิกอน ซึ่งสามารถหลอมและนำไปขึ้นรูปได้ เมื่อเย็นตัวแล้วมีลักษณะ โปร่งใส และเป็นของแข็งโดยไม่จับผลึก (มีค่าความหัยด์ตัวสูง) กระจกจึงสามารถแตกได้เหมือนแก้ว และมีความคมมากกว่าแก้วเมื่อแตกเพราะมีความบางในการผลิต

ความแตกต่างในการใช้คำเมื่อเทียบกับคำว่าแก้วคือ กระจกจะใช้เรียกแก้วที่นำมาทำให้เป็นแผ่นโดยมีลักษณะแบนราบและมีความหนาประมาณหนึ่งเป็นส่วนใหญ่

กระจกใส คือกระจกโปร่งแสงที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน กระจกชนิดนี้จะยอมให้แสงผ่านประมาณ 75 – 92 % ของแสงที่ตกกระทบขึ้นอยู่กับความหนาของกระจก

แผ่น FR4



รูป แผ่น FR4 ที่ยังไม่ได้ตัดมาทำการทดลอง

แผ่นพิมพ์วงจรหรือแผ่นปริ้น หรือแผ่น PCB (PCB = Print Circuit Board) ในยุคแรกๆ ของการคิดประดิษฐ์พีซีบีขึ้นมาใช้นั้น ได้ใช้หมึกที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าเช่น หมึกที่เป็นผงคาร์บอนด์ (จะพบเห็นได้ในวิทยุรุ่นเก่ามากๆ) พิมพ์ลงบนแผ่นฉนวน เพื่อการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์แต่ละตัวที่อยู่บนแผ่นฉนวนที่นำ มาใช้ แม้ว่าต่อมาจนถึงปัจจุบันนี้ใช้แผ่นทองแดง บางๆที่เป็นตัวนำมาเคลือบบนฉนวน แทนแล้วก็ตาม แต่เราก็ยังเรียกขานกันว่า "พีซีบี" (PCB)มาจนทุกวันนี้ FR-4 พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยัดด้วยอีพอกซีเรซิน สามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูง และสามารถใช้งานกับแรงดันสูงได้ดีกว่า เกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

ประวัติผู้เขียน

นายทิวานนท์ อยู่สุข เกิดวันที่ 6 พฤศจิกายน 2537

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 476 หมู่ 23 ตำบลบ้านเป็ด อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

นายคณากร ลอนจันทิก เกิดวันที่ 10 พฤศจิกายน 2537

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 299/179 หมู่ 9 ตำบลสีคิ้ว อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา 30140

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

นายจักรกฤษ ภูนมิกิจ เกิดวันที่ 29 ธันวาคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 171 ซอยลาดพร้าว 47 แขวงสะพานสอง เขตวังทองหลาง

จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10310

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน พิบูลมังสาหาร ปีการศึกษา 2552

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน นารีนุกูล ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000