

การวัดค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

The Measurement of Dielectric Properties of Medium Using Electromagnetic Waves

วัชรพล นาคทอง¹ ยศวดี คำสุกร¹ จุฑามณี เหลวกุล¹ คมเดช ภาพัฒน์บุรี¹ สำราญ สันทาลุนัย² และ
นุชนาฏ สันทาลุนัย^{1*}

Watcharaphon Nakdong¹ Yossawadee Khasukorn¹ Chuthamani Leokun¹ Khomdet Phapatanaburi¹
Samran Santalunai² and Nuchanart Santalunai^{1*}

Received: October 15, 2024; Revised: June 17, 2025; Accepted: June 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุในรูปแบบตัวกลางไดอิเล็กทริกทั้งหมด 4 รูปแบบ โดยระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแยกเป็นสององค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) ชุดเครื่องมือวัด ซึ่งใช้สายอากาศปากแตร ที่ความถี่ 2.1 GHz จำนวน 2 ตัว ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์เวกเตอร์เครือข่าย (VNA) และ (2) ระบบประมวลผลสัญญาณด้วย MATLAB สำหรับคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบสามารถประเมินค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ในช่วง 1.04 - 1.58 ด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2\%$ เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง การวัดทดสอบด้วยระบบ วัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุกับการจำลองแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio เมื่อเปรียบเทียบ ความแตกต่างของการวัดผลเชิงประสิทธิภาพของโครงสร้างวัสดุแบบอลูมิเนียมแท่งพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของ วัสดุช่วยขยายแถบความถี่ส่งผ่านเป็น 1.65 - 2.50 GHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนประมาณ 46 % ผลลัพธ์นี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทางที่นำเสนอทั้งในการออกแบบวัสดุและในการสร้างระบบวัดต้นทุนต่ำที่สามารถ ทดแทนอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกเชิงพาณิชย์ที่มีราคาสูงในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ค่าไดอิเล็กทริก; วัสดุ; สายอากาศ; คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. 08 3124 3684, E - mail: nuchanart.fa@rmuti.ac.th

Abstract

This research presents the development of a dielectric measurement system for metamaterials, using four different configurations of dielectric media. The system has two main parts: (1) a measurement setup with two horn antennas that work at 2.1 GHz along with a vector network analyzer (VNA), and (2) a signal processing unit created in MATLAB to calculate electrical parameters. Test results confirm that the system can estimate the relative permittivity (ϵ_r) in the range of 1.04 - 1.58 with an error margin not exceeding $\pm 2\%$, based on a comparison between measurements obtained from the proposed system and results from full-wave simulation using CST Microwave Studio. When comparing the performance of aluminum rod-based metamaterial structures, it was found that increasing the number of layers significantly expanded the transmission bandwidth to 1.65 - 2.50 GHz, corresponding to a fractional bandwidth of approximately 46 %. These are the results of the proposed approach in both the effective design of metamaterial structures and the development of a low-cost measurement system that serves as a practical alternative to expensive commercial dielectric measurement equipment.

Keywords: Dielectric; Metamaterials; Antenna; Electromagnetic Wave

บทนำ

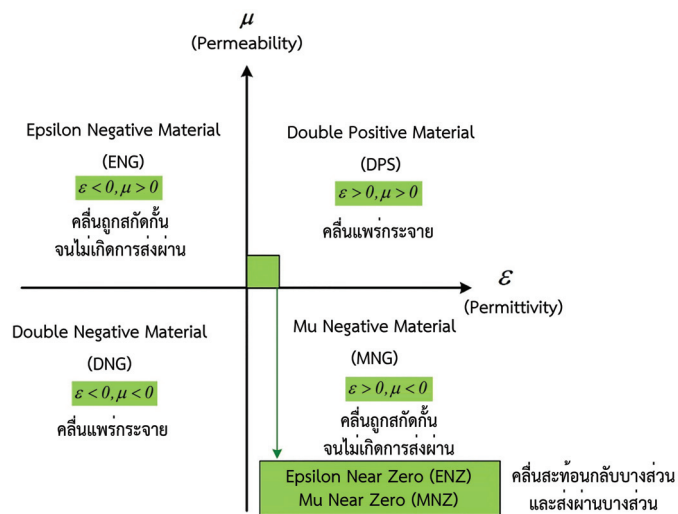
ในยุคที่การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์มุ่งเน้นการสร้างบัณฑิตทักษะสูง นวัตกรรม และผู้ประกอบการ การเรียนรู้เชิงปฏิบัติ (Practice-Based Learning) ได้กลายเป็นหัวใจสำคัญของระบบการศึกษาและการวิจัยสมัยใหม่ โดยเฉพาะในสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือที่สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางทฤษฎีสู่การประยุกต์ใช้อย่างแท้จริง หนึ่งในเครื่องมือสำคัญคือ ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบอุปกรณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สายอากาศ ตัวกรอง หรือเซนเซอร์ (Chen et al., 2004; McRae et al., 2020) นอกจากนี้ในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ค่าไดอิเล็กทริกยังมีบทบาทในการตรวจวัดความสุก ความชื้น และคุณภาพของผลผลิต ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) (Teseme and Weldeselassie, 2020)

แม้การวัดค่าไดอิเล็กทริกจะมีบทบาทหลากหลายดังกล่าว แต่เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ที่มีความแม่นยำสูง เช่น โพรงเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) หัววัดปลายเปิดแบบโคแอกเซียล (Open-Ended Coaxial Probe) และอุปกรณ์ฟิกเจอร์แบบสายส่ง (Transmission Line Fixture) ยังคงมีราคาสูง ติดตั้งและใช้งานได้ยาก อีกทั้งจำกัดการใช้งานเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น (Šarolić and Matković, 2022; Rammah et al., 2015) นอกจากนี้เครื่องมือเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดด้านขนาดและรูปร่างของตัวอย่าง รวมถึงช่วงความถี่ที่สามารถรองรับได้ จึงไม่เหมาะกับการวัดวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงภาคสนาม (Vergnano et al., 2020; Gregory and Clarke, 2005) นอกจากนี้ระบบวัดแบบเชิงพาณิชย์ยังต้องอาศัยกระบวนการปรับเทียบที่มีความซับซ้อน ใช้เวลานาน และต้องใช้ชุดมาตรฐานที่มีราคาสูง ทำให้ต้นทุนรวมในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความจำเป็นในการพัฒนาระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกต้นทุนต่ำที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อรองรับการใช้งานในด้านการเรียนการสอน งานวิจัย และการประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรม

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา อภิวัด ได้ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ปรากฏในธรรมชาติ เช่น การมีค่าความยอมได้ทางไฟฟ้า (Permittivity) หรือสภาพให้ซึมผ่านได้ (Permeability) เป็นลบ หรือมีค่าต่ำใกล้ศูนย์ (Singh

et al., 2015; Fan et al., 2021) ดังรูปที่ 1 คุณสมบัติดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะสูง อาทิ เสาอากาศประสิทธิภาพสูง (Shahid Aziz et al., 2024) ตัวกรองความถี่เฉพาะ (Vineetha et al., 2023) รวมถึง อุปกรณ์ควบคุมคลื่นในระบบสื่อสารยุคใหม่ เช่น ระบบ 5G และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Thakur et al., 2024; Cho et al., 2021) อย่างไรก็ตาม การออกแบบอภิวัดทำให้ความแม่นยำยังคงต้องอาศัยข้อมูลค่าความยอมทางไฟฟ้าของวัสดุจริงที่ถูกต้อง เพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองแบบจำลองเชิงตัวแบบ และลดจำนวนรอบการออกแบบ ซึ่งยังเป็นข้อจำกัดสำคัญในงานวิจัยที่ผ่านมา (Cummer et al., 2008)

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยนำเสนอการออกแบบและทดสอบโครงสร้างอภิวัดที่ทำงานในย่านความถี่ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สายยุคปัจจุบัน เช่น LTE และ 5G ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิรตซ์ (Li et al., 2020) การศึกษาประกอบด้วยทั้งการจำลองด้วยโปรแกรม CST Studio Suite และการทดลองจริง โดยใช้สายอากาศปากแตรจำนวนสองชุดร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในการวัดค่าการสะท้อนกลับ (S_{11}) และการส่งผ่าน (S_{21}) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์สมบัติของอภิวัดที่จัดวางเป็นตัวกลางระหว่างสายอากาศทั้งสอง ระบบการวัดนี้ทำงานร่วมกับชุดประมวลผลสัญญาณในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลาง ทั้งนี้สายอากาศปากแตรเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอและแม่นยำในย่านความถี่ไมโครเวฟ (Murthy, 2020) ผลจากการทดลองและการจำลองพบว่าโครงสร้างอภิวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมพฤติกรรมของการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย อุปกรณ์เรดาร์ และระบบตรวจจับความถี่สูงที่ต้องการความแม่นยำในระดับอุตสาหกรรม

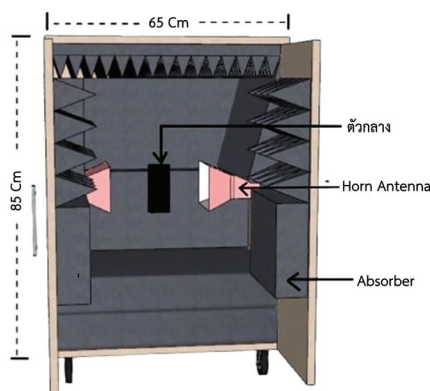


รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของอภิวัด (Santalunai et al., 2022)

การออกแบบและการวิเคราะห์ผล

1. โครงสร้างชุดทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของชุดทดสอบสำหรับการวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัด ซึ่งออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ องค์ประกอบหลักของชุดทดสอบประกอบด้วย 1) สายอากาศปากแตรสองตัวที่ทำหน้าที่ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ที่ติดตั้งตามผนังและมุมต่าง ๆ ของตู้ทดสอบ เพื่อป้องกันการสะท้อนและการกระจายคลื่นอย่างไม่ต้อง การ สายอากาศปากแตรทั้งสองตัวถูกจัดวางหันหน้าเข้าหากัน และ 3) อภิวัดที่ต้องการทดสอบวางอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น ซึ่งการตั้งค่าของชุดทดสอบนี้จะถูกตั้งให้เหมือนกันทั้งในขั้นตอนการจำลองแบบด้วยโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง



รูปที่ 2 ชุดทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลาง

1.1 ตัวแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.1 GHz

สายอากาศปากแตรดังรูปที่ 3 เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในย่านความถี่สูง เช่น 2.1 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สาย การออกแบบและการคำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้การส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ ของสายอากาศปากแตรที่ความถี่ 2.1 GHz สามารถทำได้ดังสมการที่ (1) - (2)

ความยาวคลื่น (Wavelength: λ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) (Balanis, 2016; Polzar, 2011)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

โดยที่

λ	คือ	ความยาวคลื่น (m)
c	คือ	ความเร็วแสงในสุญญากาศ (m/s)
f	คือ	ความถี่ (MHz)



รูปที่ 3 สายอากาศปากแตรที่ความถี่ 2.1 GHz

สำหรับความถี่ 2.1 GHz ความยาวคลื่นคำนวณได้เท่ากับ 0.143 เมตร หรือ 143 มิลลิเมตร ขนาดปากแตร (Horn Dimension) ขนาดของปากแตรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ใช้ความยาวคลื่นและมุมการแผ่รังสี (Beamwidth) โดยสมการที่ (2) (Balanis, 2016)

$$D = \frac{k\lambda}{\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

โดยที่

D	คือ	ขนาดของปากแตร (เมตร)
k	คือ	ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับรูปทรงของปากแตร สำหรับปากแตรรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $k \approx 0.51$)
θ	คือ	ความกว้างลำคลื่น (องศา)

เมื่อกำหนดให้ความกว้างลำคลื่นมีค่าเท่ากับ 15 องศา สามารถคำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรได้จากสมการที่ (2) คือ

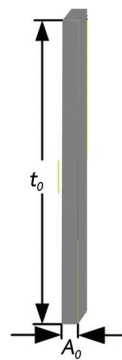
$$D = \frac{0.51 \times 0.143}{\sin(15/2)}$$

$$D \approx \frac{0.07293}{0.1305} \approx 0.56 \text{ เมตร}$$

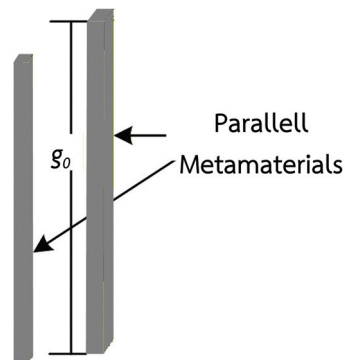
ความกว้างลำคลื่น 15 องศา คำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรได้เท่ากับ 0.56 เมตร หรือ 560 มิลลิเมตร

1.2 ตัวกลางแบบแท่งอลูมิเนียมที่มีความถี่ 2.1 GHz

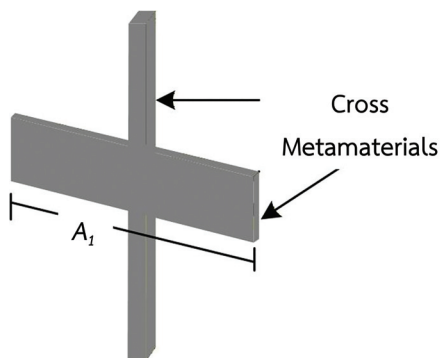
โครงสร้างหนึ่งหน่วยของอภิวัดที่ทำจากแท่งอลูมิเนียมดังรูปที่ 4 โดยประกอบด้วยหลายองค์ประกอบที่ช่วยในการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เริ่มจากรูปที่ 4(ก) ซึ่งแสดงโครงสร้างพื้นฐานของอภิวัดที่เป็นแท่งอลูมิเนียม 1 ชั้น รูปที่ 4(ข) แสดงการจัดเรียงแผงอภิวัดแบบขนาน โดยที่แผ่นอภิวัดสองแผ่นถูกจัดเรียงในแนวตั้งและขนานกัน รูปที่ 4(ค) แสดงการจัดเรียงแผงอภิวัดแบบไขว้ ซึ่งแผงทั้งสองจะวางในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อสร้างโครงสร้างที่สามารถตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลายมิติหรือหลายโพลาไรซ์ รูปที่ 4(ง) แสดงแท่งอลูมิเนียมวางแบบไขว้กันแต่ประกอบไปด้วยการวางเรียงกันทั้งหมด 3 ชั้น จากโครงสร้างทั้งหมด รายละเอียดขนาดของโครงสร้างอภิวัดแบบแท่งอลูมิเนียมซึ่งถูกใช้ในการศึกษานี้ ดังตารางที่ 1 ขนาดของอภิวัดประกอบด้วยพารามิเตอร์สำคัญหลายค่า ได้แก่ A_0 และ A_1 ซึ่งเป็นความกว้างของแท่งอลูมิเนียมในแต่ละชั้น ขนาดของ g_0 คือความสูงของโครงสร้าง รวมถึง t_0 ซึ่งแสดงถึงความยาวของอภิวัด ขนาดทั้งหมดนี้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และถูกคำนวณมาเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.1 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



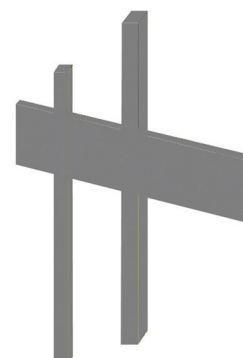
(ก) 1 ชั้น



(ข) 2 ชั้นแบบขนาน



(ค) 2 ชั้นแบบไขว้



(ง) 3 ชั้น

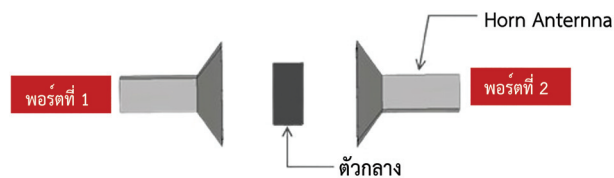
รูปที่ 4 โครงสร้างหนึ่งหน่วยของอภิวัดแบบแท่งอลูมิเนียม

ตารางที่ 1 ขนาดของโครงสร้าง

อภิวัดแบบแท่งอลูมิเนียม	ขนาด (มิลลิเมตร)
A_0 : ความกว้าง	3.85
A_1 : ความกว้าง	15.47
g_0 : ความสูง	2.38
t_0 : ความยาว	140

2. การจำลองแบบชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการรับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายอากาศปากแตรที่ย่านความถี่ 2.1 GHz เพื่อวิเคราะห์ค่า S-parameter โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกคือการจำลองแบบที่ไม่มีการใช้อภิวัด และกรณีที่สองคือการวางอภิวัดไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น ดังรูปที่ 5 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการใช้อภิวัดโครงสร้างของอภิวัดถูกแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ



รูปที่ 5 โครงสร้างการจำลองแบบเพื่อหาค่าไดอิเล็กทริก

2.1 การหาค่าไดอิเล็กทริกกรณีปราศจากตัวกลางหรือตัวกลางคืออากาศว่าง

รูปที่ 6(ก) แสดงค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ กรณีไม่ได้วางอภิวัดหรือตัวกลางเป็นอากาศว่าง ซึ่งเป็นการแสดงถึงค่าขนาดของการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางในช่วงความถี่ 1 - 4 GHz และรูปที่ 6(ข) แสดงค่าเฟสของการสะท้อนกลับและการส่งผ่าน ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าความยอมทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (3) (Baker-Jarvis et al., 1992; Nicolson and Ross, 1970)

$$\epsilon_r = \frac{2(1 - v_I)}{jk_0 d(1 + v_I)} \quad (3)$$

โดยที่ $v_I = S_{2I} + S_{1I}, k_0 = \omega / c$

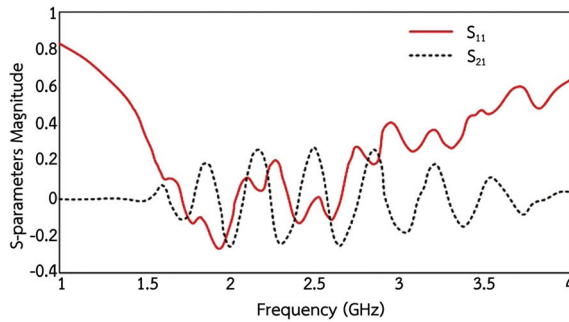
ω คือ ความถี่เชิงมุม
 d คือ ความหนาของไดอิเล็กทริก
 c คือ ความเร็วแสง

กรณีตัวกลางคืออากาศว่าง จากรูปที่ 6(ค) แสดงค่า ϵ_r ของอากาศว่าง โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 - 4 GHz โดยค่า ϵ_r มีค่าเท่ากับ 1.2491 ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งเป็นค่า ϵ_r ของอากาศว่าง

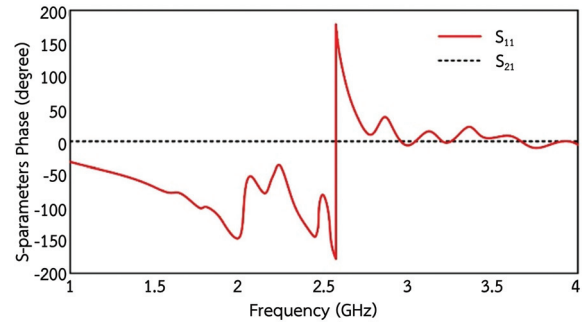
ในกรณีที่มีตัวกลางอื่นเข้ามาแทนที่อากาศว่าง ค่า ϵ_r ของวัสดุอาจเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อ 2.2 การหาค่าไดอิเล็กทริกในกรณีมีตัวกลาง จะเป็นการศึกษาถึงผลของตัวกลางต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกและคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุ

2.2 การหาค่าไดอิเล็กทริกกรณีมีตัวกลาง

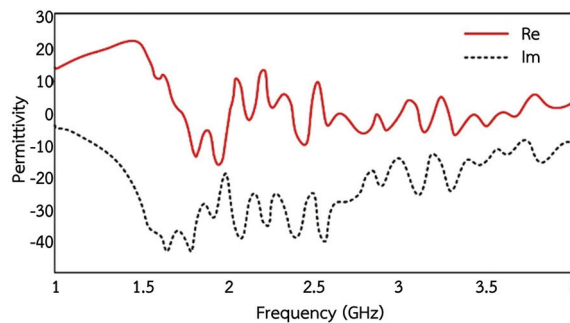
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาค่าความยอมทางไฟฟ้าของวัสดุที่มีตัวกลาง โดยในงานวิจัยได้ทำการจำลองด้วยวัสดุตัวกลางหลายรูปแบบ ได้แก่ แท่งอลูมิเนียมชั้นเดียว แท่งอลูมิเนียมสองชั้นในลักษณะการวางขนานและแบบไขว้ และโครงสร้างแท่งอลูมิเนียมสามชั้นที่จัดเรียงแบบไขว้กัน



(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter

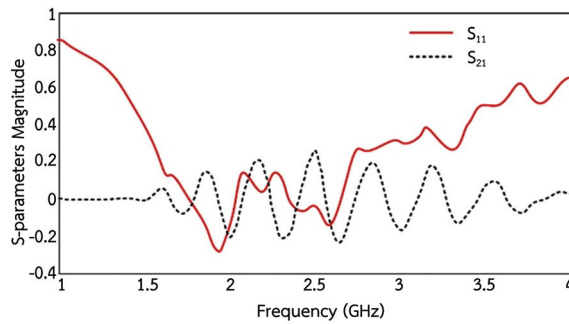


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

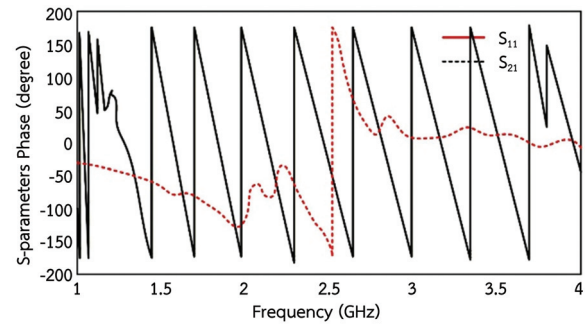
รูปที่ 6 ผลการจำลองกรณีปราศจากอวิสต์

2.2.1 แท่งอลูมิเนียมแบบ 1 ชั้น เมื่อทำการเพิ่มตัวกลางแบบแท่งอลูมิเนียม 1 ชั้น ที่บริเวณตรงกลางระหว่างสายอากาศจากรูปที่ 7(ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าค่า S_{11} มีค่าประมาณ 0.34 ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งบ่งบอกถึงการสะท้อนในระดับปานกลาง ขณะที่ S_{21} มีแนวโน้มลดลงอย่างมากในความถี่ต่ำกว่า 2.1 GHz แต่เพิ่มขึ้นในความถี่ที่สูงกว่า 2.1 GHz สะท้อนถึงการส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าเฟสของ S_{11} มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่ประมาณ 80 องศา ซึ่งบ่งบอกถึงการสะท้อนที่มีเฟสสวิงขึ้นลง ส่วน S_{21} มีการเปลี่ยนแปลงเฟสในลักษณะคล้ายกัน แสดงถึงความซับซ้อนของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลาง เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า ในกรณีนี้พบว่าแท่งอะลูมิเนียมถูกจัดอยู่ในตัวกลางที่มีทั้งค่าความยอมทางไฟฟ้าและค่าความยอมทางแม่เหล็กที่มากกว่าสุญญากาศ ($\epsilon_r > 0$) ดังรูปที่ 7(ค)

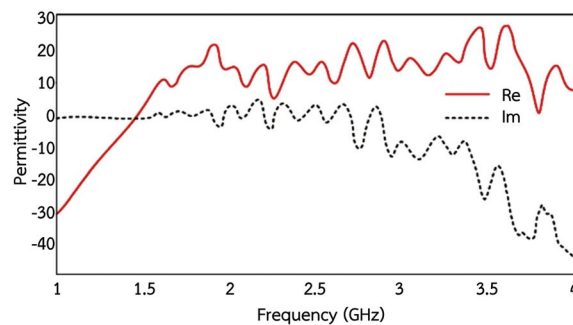
ดังนั้น เมื่อการแพร่กระจายของคลื่นกระทบกับผิวระนาบที่แยกตัวกลางสองชนิด คลื่นจะเกิดการหักเหเมื่อเข้าสู่ตัวกลางที่สอง หากคลื่นที่กระทบมีมุมเฉียงกับผิวระนาบ มุมตกกระทบจะสัมพันธ์กับมุมหักเหตามความสัมพันธ์ง่าย ๆ ที่รู้จักกันในชื่อกฎของสเนลล์ (Snell's Law)



(ก) ขนาดของ S-parameter



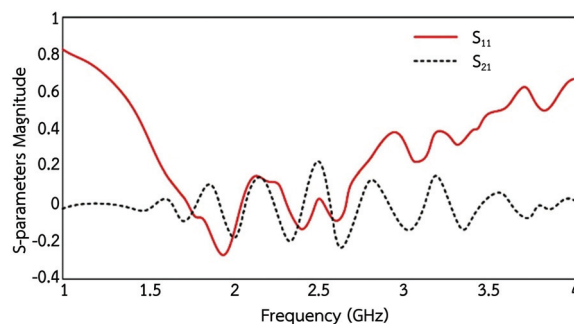
(ข) เฟสของ S-parameter



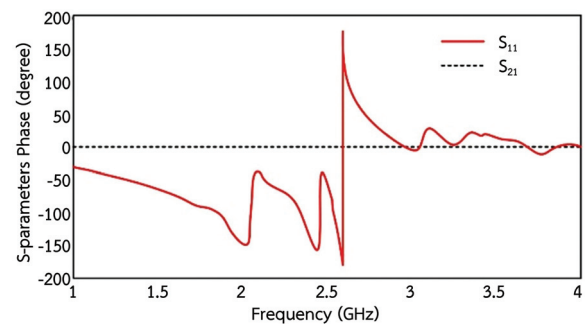
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 7 ผลการจำลองกรณีวัสดุหนึ่งชั้น

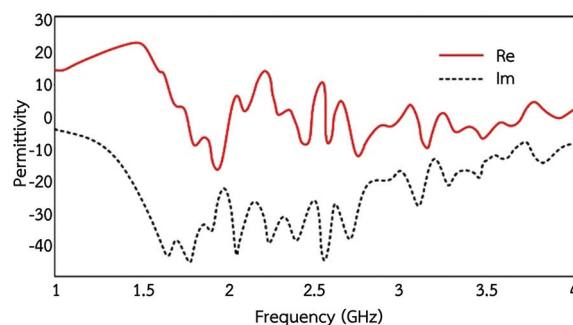
2.2.2 แท่งอลูมิเนียมแบบขนาน 2 ชั้น รูปที่ 8(ก) และ (ข) แสดงขนาดของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ในกรณีตัวกลางมีลักษณะเป็นแท่งอลูมิเนียมสองชั้นวางขนานกัน พบว่าช่วงความถี่แบนด์วิดท์ที่มีความแคบ และผลการคำนวณค่า ϵ_r ที่ 2.1 GHz มีค่าเท่ากับ 1.57881 ดังรูปที่ 8(ค)



(ก) ขนาดของ S-parameter



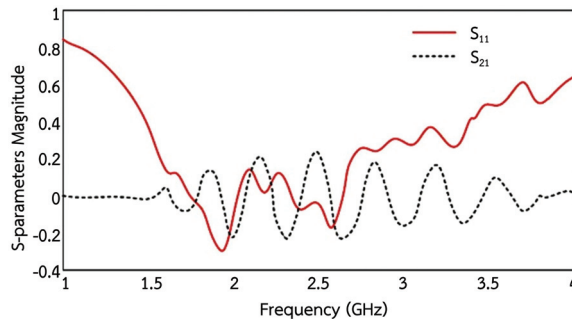
(ข) เฟสของ S-parameter



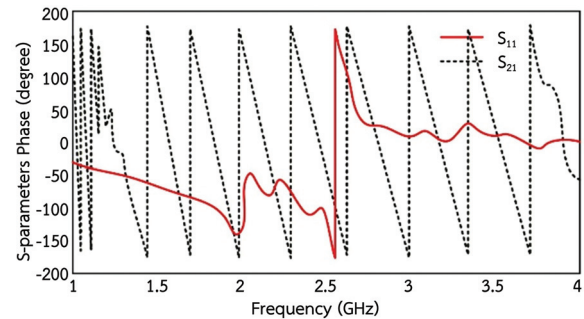
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 8 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมแบบขนาน 2 ชั้น

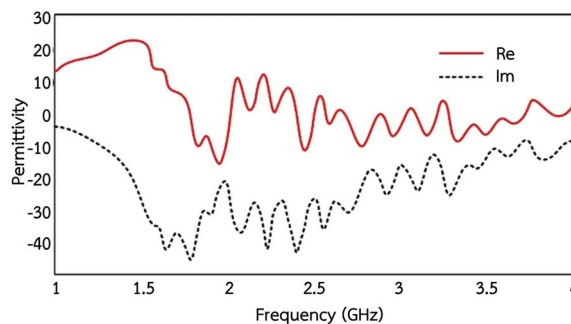
2.2.3 แท่งอลูมิเนียมแบบไขว้ 2 ชั้น รูปที่ 9(ก) และ (ข) แสดงขนาดและเฟสของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ผลของค่า ϵ_r ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.76824 ดังรูปที่ 9(ค)



(ก) ขนาดของ S-parameter



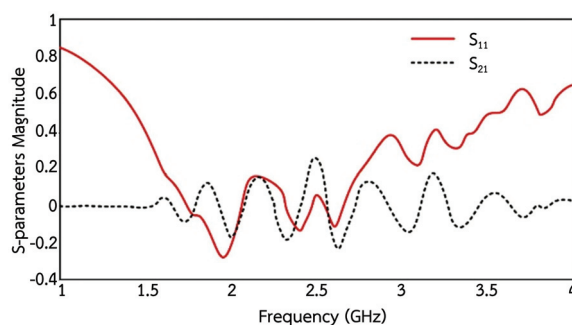
(ข) เฟสของ S-parameter



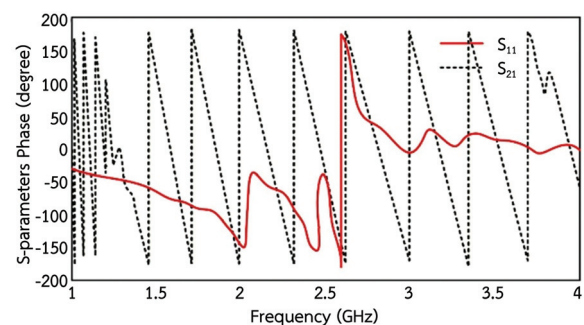
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 9 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมแบบไขว้ 2 ชั้น

2.2.4 แท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น โครงสร้างแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น สามารถแสดงขนาดและเฟสของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ดังรูปที่ 10(ก) และ (ข) รูปที่ 10(ค) แสดงค่าความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางได้ผลเท่ากับ 1.56702

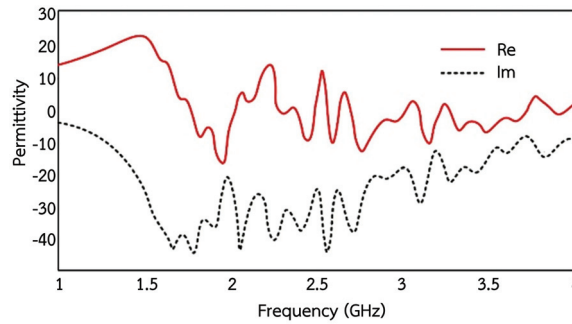


(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter

รูปที่ 10 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น



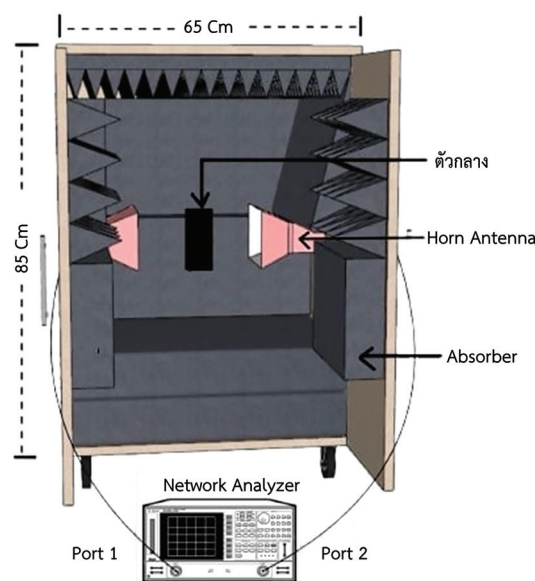
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 10 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น (ต่อ)

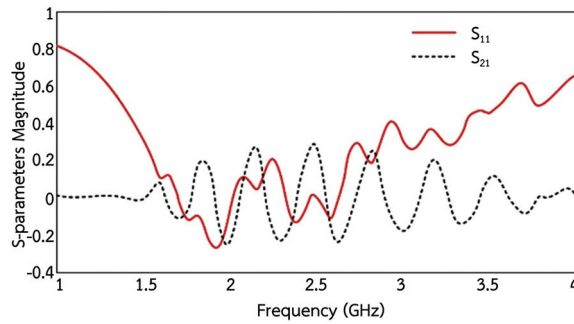
3. การวัดทดสอบจริง

ชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัด ดูดรูปที่ 11 ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 2.1 GHz ทำการส่งและรับคลื่นผ่านสายอากาศปากแตร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เป็นตัวกำเนิดคลื่นภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ป้องกันการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การทดสอบนี้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติตรงตามสมมติฐานที่กำหนดไว้

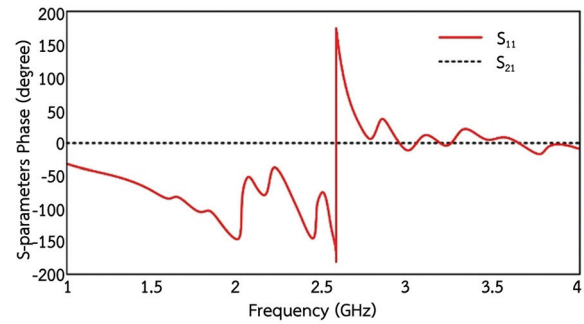
จากการทดสอบค่า S-parameter ของอภิวัด (Metamaterial) ในกรณีต่าง ๆ ดังในรูปที่ 12 - 16 ทั้งแบบไม่มีอภิวัดและกรณีที่มีอภิวัดชั้นเดียว สองชั้น และสามชั้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนกลับ (S_{11}) และการส่งผ่าน (S_{21}) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.1 GHz การเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันของวัสดุ โดยค่า ϵ_r ในแต่ละกรณีมีความสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ เมื่อไม่มีอภิวัด ค่า ϵ_r มีค่าเท่ากับ 1.24091 ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุที่ไม่มีการดัดแปลง ในกรณีที่มีอภิวัดแบบชั้นเดียว พบว่าค่า ϵ_r เป็น 1.11289 ซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมที่ซับซ้อนและการสะท้อนคลื่นบางส่วน สำหรับกรณีที่มีอภิวัดสองชั้นแบบขนาน ค่า ϵ_r มีค่าเป็นบวกที่ 1.57881 และ 1.04381 ซึ่งบ่งบอกถึงการส่งผ่านที่ดีขึ้น ในกรณีที่มีอภิวัดสามชั้น ค่า ϵ_r อยู่ที่ 1.56702 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุในการควบคุมการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการคำนวณค่า ϵ_r ทั้งในกรณีจำลองแบบและวัดจริง ดังตารางที่ 2



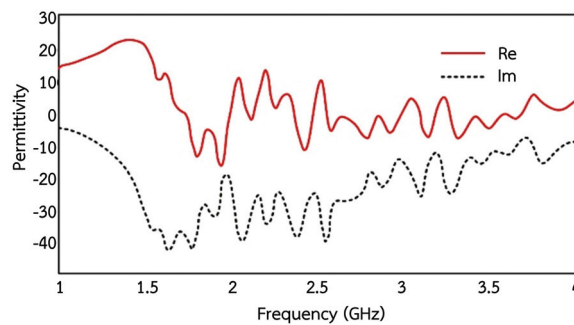
รูปที่ 11 ชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัด



(ก) ขนาดของ S-parameter

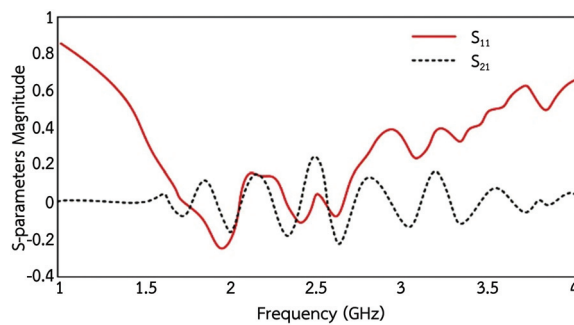


(ข) เฟสของ S-parameter

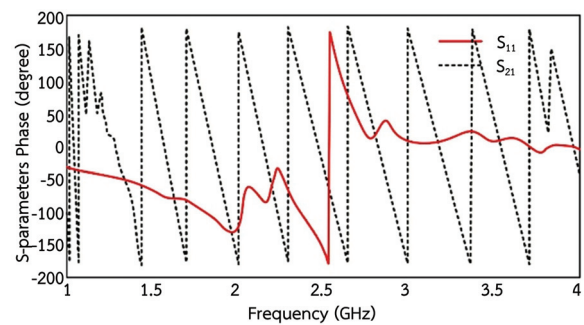


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

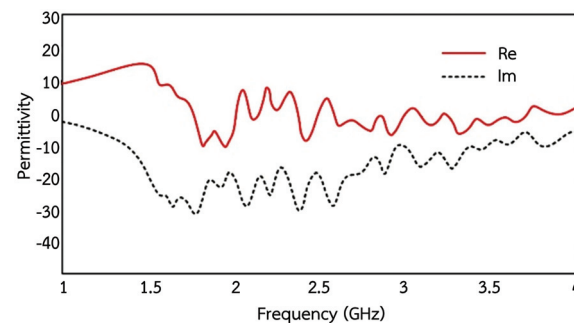
รูปที่ 12 ผลการวัดกรณีปราศจากอิวิสต์



(ก) ขนาดของ S-parameter

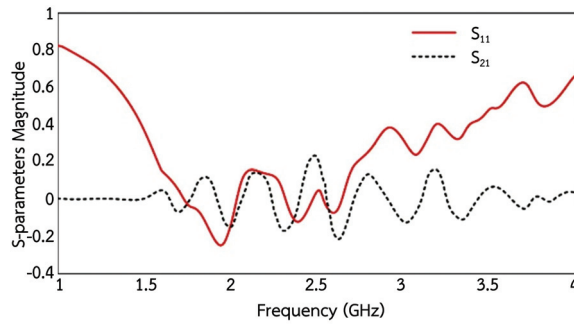


(ข) เฟสของ S-parameter

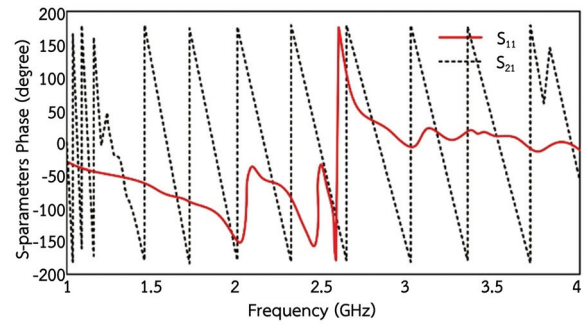


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

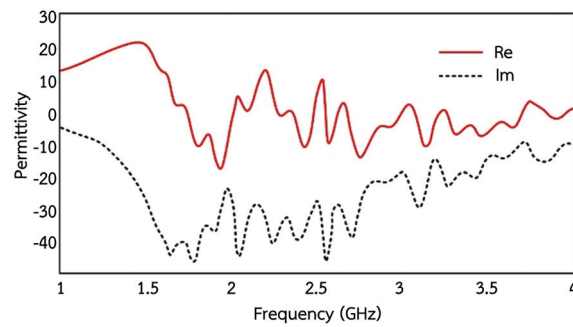
รูปที่ 13 ผลการวัดกรณีอิวิสต์แบบหนึ่งชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter

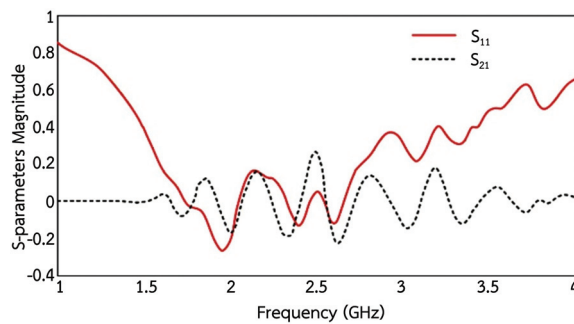


(ข) เฟสของ S-parameter

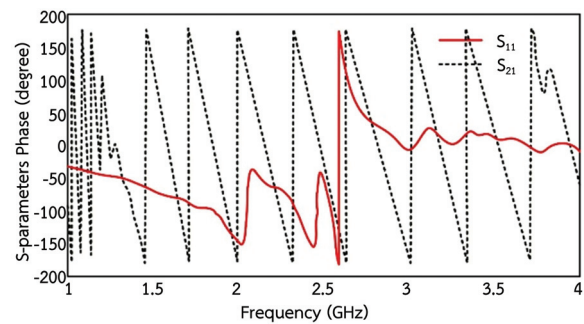


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

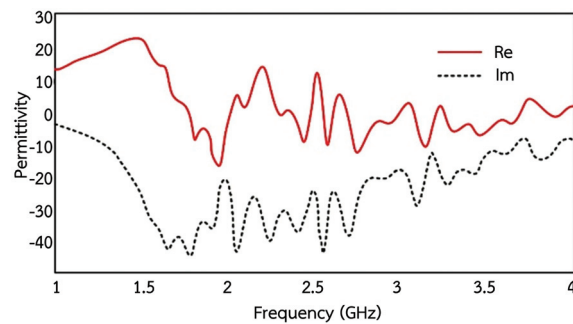
รูปที่ 14 ผลการวัดกรณีวัสดุขุ่นแบบสองชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter

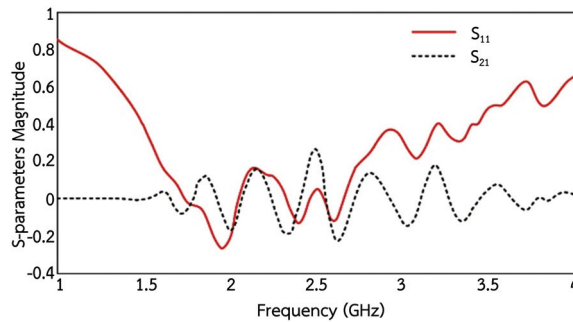


(ข) เฟสของ S-parameter

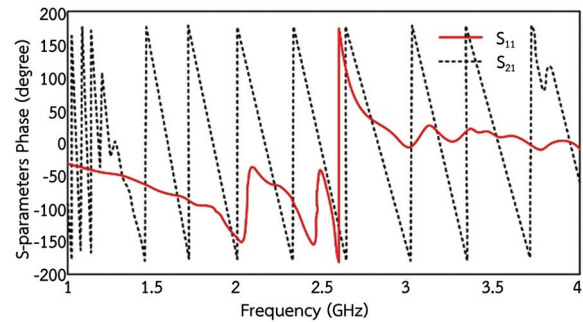


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

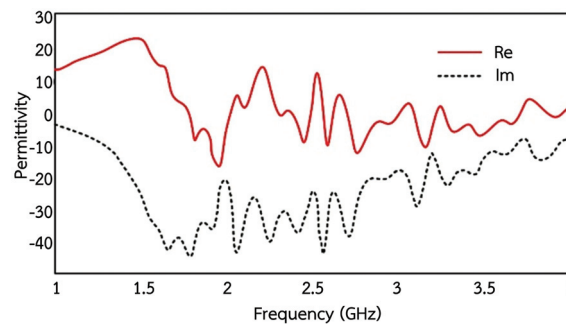
รูปที่ 15 ผลการวัดกรณีวัสดุแบบไขว้สองชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter



(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 16 ผลการวัดกรณีวัสดุแบบไขว้สามชั้น

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าไดอิเล็กทริกจากการจำลองและการทดลองจริง

โครงสร้างอวิสต์	ϵ_r จากการจำลอง (Simulation)	ϵ_r จากการทดลอง (Measured)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
ชั้นเดียว (Single Layer)	1.10	1.11	0.91 %
สองชั้นขนาน (2-Layer Parallel)	1.60	1.58	1.25 %
สองชั้นไขว้ (2-Layer Crossed)	1.05	1.04	0.95 %
สามชั้นไขว้ (3-Layer Crossed)	1.60	1.57	1.88 %

การอภิปรายผล

ผลการจำลองโครงสร้างแท่งโลหะชั้นเดียวแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างดังกล่าวสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้บางส่วน แต่มีช่วงความกว้างของแถบความถี่ที่ค่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีจำนวนชั้นมากขึ้น โดยพฤติกรรม การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นที่เกิดขึ้นสะท้อนถึงคุณลักษณะของอวิสต์ที่สามารถควบคุมการกระจายตัวของคลื่นได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสะท้อนในวัสดุที่มีความยอมทางไฟฟ้าเป็นบวก ลักษณะดังกล่าว ทำให้โครงสร้างชั้นเดียวเหมาะสำหรับการควบคุมคลื่นในย่านความถี่เฉพาะจุด เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเป็นสองชั้น ในลักษณะการจัดเรียงแบบขนาน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแถบความถี่มีความกว้างขึ้น และความสามารถในการ ควบคุมพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ดีขึ้น โดยสามารถลดการสะท้อนและเพิ่มการส่งผ่านในย่านความถี่ที่หลากหลาย ซึ่งผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับกฎของสเนลล์ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบและมุมหักเหเมื่อคลื่นเคลื่อนผ่าน วัสดุสองชนิดที่มีความยอมทางไฟฟ้าต่างกัน สำหรับกรณีที่เพิ่มจำนวนชั้นเป็นสามชั้น ผลการจำลองพบว่าแถบความถี่ ที่สามารถใช้งานได้ขยายจาก 1.65 - 2.5 GHz และโครงสร้างมีความสามารถในการสะท้อนและส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังพบว่าค่าการสะท้อนกลับในเชิงเฟส มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

แสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมคลื่นได้สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างที่มีคุณสมบัติเป็นแถบหยุดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap) ที่สามารถห้ามการแพร่กระจายของคลื่นในบางย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับการวัดจริง ผลการทดลองและการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาค่าไดอิเล็กทริกที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับผลจากการจำลอง พบว่าความคลาดเคลื่อน มีค่าน้อยมาก โดยอยู่ในช่วง 0.91 - 1.88 % ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของระบบวัดที่พัฒนาและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้โครงสร้างสองชั้นและสามชั้น มีความแม่นยำในการควบคุมคลื่นและพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าสอดคล้องกับค่าความยอมทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองอย่างชัดเจน ส่งผลให้ระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบอวัยวะหรือตัวกรองความถี่ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำตรงในระดับที่สามารถรองรับการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมได้

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการดังตารางที่ 3 ได้แก่ วิธีหัววัดแบบโคเอกเซียล และเทคนิคเรโซแนนซ์ควิตี้ จากการเปรียบเทียบพบว่า แม้ความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้นจะน้อยกว่าวิธีเรโซแนนซ์ควิตี้เพียงเล็กน้อย แต่มีข้อได้เปรียบชัดเจนในด้านต้นทุนต่ำ รองรับตัวอย่างได้หลากหลายขนาดและรูปร่าง และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมภาคสนามได้สะดวก จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัย การเรียนการสอน และการประเมินวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น อวัยวะชนิดแท่งโลหะที่ใช้ในงานนี้ ในด้านความปลอดภัย ระบบใช้คลื่นความถี่ต่ำที่ระดับ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ และเป็นระบบวัดแบบไม่ใช้กำลังส่ง จึงอยู่ในขอบเขตที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานตามมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาออกแบบฉนวนป้องกันคลื่น หรือกำหนดระยะห่างในการวัดให้เหมาะสมในกรณีที่ใช้ร่วมกับวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนคลื่นได้สูง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะระบบวัดไดอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้กับวิธีมาตรฐานก่อนหน้า

รายการเปรียบเทียบ	งานวิจัยนี้	มาตรฐานก่อนหน้า (Keysight Technologies, 2019)	ระบบระดับสูงมาก (Levine et al., 2022)
ความแม่นยำในการวัด	±2 %	±0.5 %	±0.2 %
ต้นทุนอุปกรณ์	ต่ำ	สูงมาก	ต่ำ
ความสะดวกในการใช้งาน	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การนำไปประยุกต์กับ MTMs	ทำได้โดยตรงจากพฤติกรรมคลื่น	ไม่เหมาะสมกับคลื่นที่มีมุมเฉียง	เหมาะสมกับคลื่นแนวตรงอย่างเดียว
ความเสี่ยงต่อผู้ใช้งาน	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ

สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองและการออกแบบระบบการวัดค่าไดอิเล็กทริกของโครงสร้างอวัยวะที่ทำจากแท่งอลูมิเนียมในหลายรูปแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านและสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.1 GHz ผลการจำลองและการวัดจริงแสดงผลที่สอดคล้องกัน โดยในโครงสร้างแท่งอลูมิเนียมชั้นเดียวสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้บางส่วนแต่มีแถบความถี่ค่อนข้างแคบ เมื่อเพิ่มจำนวนชั้น การสะท้อนและส่งผ่านคลื่นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะโครงสร้างแท่งสองชั้นและสามชั้นที่ช่วยขยายแถบความถี่และควบคุมการส่งผ่านคลื่นได้ดียิ่งขึ้น ค่า S-parameter (S_{11} และ S_{21}) และ Permittivity ที่ได้จากการทดลองจริงสามารถยืนยันผลการจำลอง ที่ระบุว่าโครงสร้างอวัยวะมีความสามารถในการควบคุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มีความสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างอภิวัดเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะการพัฒนาสายอากาศที่มีความสามารถในการควบคุมคลื่นและทิศทางได้อย่างแม่นยำ การใช้สายอากาศปากแตรในการทดสอบส่งผลให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำและสอดคล้องกับการจำลอง อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเพิ่มเติมอาจพิจารณาเพิ่มรูปแบบการจัดเรียงของแท่งอูมิเนียมให้หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สามารถออกแบบวัสดุที่ตอบสนองต่อความต้องการในอุตสาหกรรมสื่อสารได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยเล็งเห็นขอขอบคุณคุณอาจารย์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา อันเนื่องมาจากวิชาความรู้ต่าง ๆ ที่ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาและจากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ และได้ความรู้จากคณะอาจารย์ ที่ได้ให้คำแนะนำในด้านเทคนิคการสร้างสายอากาศ การใช้โปรแกรมออกแบบสายอากาศ รวมถึงการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนทำให้การจัดทำวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม CST Microwave Studio 2024 จากสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- Baker-Jarvis, J.R., Janezic, M.D., Grosvenor, J.H and Geyer, R.G. (1992). *Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*. National Institute of Standards and Technology Technical Note 1355.
- Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4thed). Wiley.
- Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V. and Varadan, V.K. (2004). *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester. <http://dx.doi.org/10.1002/0470020466>
- Cho, K.W., Mazaheri, M.H., Gummesson, J., Abari, O. and Jamieson, K. (2021). mmWall: A Reconfigurable Metamaterial Surface for mmWave Networks. *Proceedings of the 22nd International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 119-125. <https://doi.org/10.1145/3446382.3448665>
- Cummer, S.A., Popa, B.-I. and Hand, T.H. (2008). Q-based Design Equations and Loss Limits for Resonant Metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(1), 127-132. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.912959>
- Fan, G., Sun, K., Hou, Q., Wang, Z., Liu, Y. and Fan, R. (2021). Epsilon-Negative Media from the Viewpoint of Materials Science. *The European Physical Journal Applied Metamaterials, (EPJ Applied Metamaterials)*, 8, 1-17. <https://doi.org/10.1051/epjam/2021005>
- Gregory, A.P. and Clarke, R.N. (2005). *Dielectric Metrology with Coaxial Sensors*. Metrology Division, National Physical Laboratory.
- Keysight Technologies. (2019). *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials* [Application Note]. Keysight.
- Lang, R., Li, M., O'Dell, B., Zhou, Y. and Vine, D.L. (2022). A Cavity System for Seawater Dielectric Measurements at P-band. *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (pp. 6978-6981). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9884131>

- Li, Z., Mu, Y., Han, J., Gao, X. and Li, L. (2020). Dual-Polarized Antenna Design Integrated with Metasurface and Partially Reflective Surface for 5G Communication. *The European Physical Journal Applied Metamaterials (EPJ Applied Metamaterials)*, 7(3), <https://doi.org/10.1051/epjam/2020004>
- McRae, C.R.H., Wang, H., Gao, J., Brecht, T. and Reagor, M., Vissers, M.R., Brecht, T., Dunsworth, A., Pappas, D.P. and Mutus, J. (2020). Materials Loss Measurements Using Superconducting Microwave Resonators. *Review of Scientific Instruments*, 91(9). <https://doi.org/10.1063/5.0017378>
- Murthy, N.S. (2020). Improved Isolation Metamaterial-Inspired mm-Wave MIMO Dielectric Resonator Antenna for 5G Applications. *Progress in Electromagnetics Research C*, 100, 247-261. <https://doi.org/10.2528/PIERC19112603>
- Nicolson, A.M. and Ross, G.F. (1970). Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19(4), 377-382. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>
- Pozar, D.M. (2011). *Microwave Engineering* (4thed). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470631553>
- Rammah, A.A., Zakaria, Z., Ruslan, E. and Isa, A.A.M. (2015). Comparative Study of Materials Characterization Using Microwave Resonators. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(1), 76-85. <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/76-85.pdf>
- Santalunai, N., Santalunai, S., Rattananamlom, A., Chaipanya, P., Meesawad, P., Thongsopa, C. and Pumpoung, T. (2022). Investigation on Characteristics of Metamaterials by Using Metallic Rod Structure for Antenna Engineering. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(5), 103-109. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.19>
- Shahid Aziz, R., Koziel, S. and Pietrenko-Dabrowska, A. (2024). Millimeter Wave Negative Refractive Index Metamaterial Antenna Array. *Scientific Reports*, 14, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67234-z>
- Singh, G., Ni, R. and Marwaha, A. (2015). A Review of Metamaterials and it's Applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 19(6), 305-310. <http://dx.doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V19P254>
- Šarolić, A. and Matković, A. (2022). Dielectric Permittivity Measurement Using Open-Ended Coaxial Probe-Modeling and Simulation Based on the Simple Capacitive-load model. *Sensors*, 22(16), <https://doi.org/10.3390/s22166024>
- Teseme, W.B. and Weldeselassie, H.W. (2020). Review on the Study of Dielectric Properties of Food Materials. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 5(5), 76-83. <https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20200505.11>
- Thakur, K., Singhai, R. and Kushwaha, A.S. (2024). Metamaterial Antennas for 5G and Beyond: A Comprehensive Review of Advances, Challenges and Future Directions. *2024 IEEE 2nd International Conference on Innovations in High-Speed Communication and Signal Processing (IHCSP)*, 1-5. <http://doi.org/10.1109/IHCSP63227.2024.10959886>
- Vergnano, A., Godio, A., Raffa, C.M., Chiampo, F., Tobon Vasquez, J.A. and Vipiana, F. (2020). Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil During Bioremediation. *Sensors*, 20(22), <https://doi.org/10.3390/s20226677>
- Vineetha, K.V., Madhav, B.T.P., Kumar, M.S., Das, S., Islam, T. and Alathbah, M. (2023). Development of Compact Bandpass Filter Using Symmetrical Metamaterial Structures for GPS, ISM, Wi-MAX, and WLAN Applications. *Symmetry*, 15(11), <https://doi.org/10.3390/sym15112058>