

การจำลองระบบการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีโดยใช้โครงสร้างไมโครสตริป ที่ความถี่ไอเอสเอ็มร่วมกับตารางค้นหา

Simulation of a Permittivity Measurement System with Microstrip Structure at ISM Frequency Incorporate with Lookup Table

ปวิณ ไชยกุล^{1,*} และ เด่นชัย วรเสวต¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Paween Chokenukul^{*} and Denchai Worasawate

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

^{*}Corresponding Author E-mail: paweench2565@gmail.com

Received: Jun 07, 2023; Revised: Aug 21, 2023; Accepted: Sep 12, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองระบบการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีโดยใช้โครงสร้างไมโครสตริปด้วยซอฟต์แวร์โซนเน็ต เพื่อนำองค์ความรู้ที่ค้นพบไปใช้พัฒนาเครื่องมือวัดเพอร์มิตติวิตีที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกต่อไป งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจำลองโครงสร้างไมโครสตริปที่ความถี่ไอเอสเอ็ม ได้แก่ 13, 27 และ 40 MHz สำหรับค่าเพอร์มิตติวิตีที่ถูกใช้เท่ากับ 35, 55, 75 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่ถูกใช้เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และได้ดำเนินการจำลองระบบการวัดเพื่อสร้างตารางค้นหาขนาด 11×11 , 5×5 และ 3×3 ตามลำดับ แล้วนำผลจากการจำลองมาคำนวณเพื่อหาค่าเพอร์มิตติวิตี และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย จากนั้นหาค่าความคลาดเคลื่อน ผลการวิจัยพบว่า การคำนวณค่าเพอร์มิตติวิตีและค่าแทนเจนต์การสูญเสียโดยตรงจากเอสพารามีเตอร์ส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีเพื่อหาค่าจากตารางค้นหา โดยผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่เสนอนี้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับค่าเพอร์มิตติวิตีจริงด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า 0.1984 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการจำลองระบบการวัดในการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อหาค่าเพอร์มิตติวิตีและค่าแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุที่ไม่ทราบค่าได้ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดจริงที่มีประสิทธิภาพ และคุ้มค่าได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การจำลองการวัดเพอร์มิตติวิตี, โครงสร้างไมโครสตริป, ความถี่ไอเอสเอ็ม

Abstract

This research aims to simulate a permittivity measurement system utilizing a microstrip structure with sonnet software to bring the discovered knowledge to develop the permittivity measurement instrument that has high efficiency and low cost in the next. This research has designed and simulated microstrip structure at ISM frequencies of 13, 27, and 40 MHz, for permittivity values of 35, 55, and 75 are used, also loss tangent values of 0.2, 0.4, and 0.6 are used, and conduct the simulation measurement system for creating a lookup table size of 11×11 , 5×5 , and 3×3 respectively. Then, bring the results from the simulation to calculate to find the permittivity values and loss tangent values. After, find the error values. The research results found that directly calculating permittivity and loss tangent from S-parameters results in significantly

high percentage errors. Therefore, the researcher will propose a method to find values from a lookup table. The results obtained from the proposed method exhibit consistency with the actual permittivity through errors that are below 0.1984 percent. Thus, the simulations of the measurement system in this research can apply to find permittivity values and loss tangent values of material having unknown values. Moreover, it is still able to develop into an actual measuring device that possesses both efficiency and worth in the future.

Keywords: Simulation of Permittivity Measurement, Microstrip Structure, ISM Frequency

1. บทนำ

ปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity: ϵ) และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent: $\tan\delta$) ของสารกลายเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการดำเนินกิจกรรมของหลายภาคส่วนไม่ว่าจะเป็นของรัฐหรือเอกชน เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมยา และการเกษตรกรรม [1],[2] ด้วยเหตุผลที่ว่าข้อมูลนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณสารที่ต้องการทราบในสารละลายตัวอย่างได้ เช่น การหาความเข้มข้นของน้ำตาลในสารละลายตัวอย่าง การหาปริมาณของเกลือและน้ำตาลในอาหารและเครื่องดื่ม การหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นจึงมีความต้องการระบบการวัดที่มีความเชื่อถือได้สามารถวัดค่าได้ถูกต้อง โดยที่ค่าเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนจะมีความสัมพันธ์เป็น $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ โดย ϵ' คือ ส่วนจริง เรียกว่า ค่า Permittivity หรือ Dielectric constant เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งของสารหรือวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากเป็นค่าที่ขึ้นกับความถี่ และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ส่วน ϵ'' คือ ส่วนจินตภาพ หรือ Dielectric loss factor ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าวัตถุจะเกิดความร้อนสูง ค่า Loss tangent มีความสัมพันธ์เป็น $\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ เป็นค่าที่แสดงความสามารถของสารที่จะยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านไปได้และแสดงระดับการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงสารจะเกิดความร้อนได้มากขึ้น

แต่เดิมระบบการวัดค่า Permittivity ของสารจะใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยอาศัยคลื่นวิทยุ โดยจะทำการส่ง

คลื่นวิทยุไปที่สารแล้วทำการประเมินคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมาจากสารตัวอย่าง ผ่านทางหัววัดแบบโคแอกเซียลที่ต่อกับเครื่องเวกเตอร์เน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ โดยเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนที่หัววัดจะถูกนำไปคำนวณเป็นค่า Permittivity ของสาร ทั้งนี้ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายงานได้ทำการศึกษาการวัดค่า Permittivity ของสารด้วยหัววัดแบบโคแอกเซียล ได้แก่ [3–6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Dielectric properties ของสารละลายของพืช และน้ำ พบว่า ค่า Permittivity ของสารละลายมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ความถี่ และอุณหภูมิ จากงานวิจัยที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเป็นการศึกษาที่ย่านความถี่สูงในระดับหลาย MHz ถึง GHz ซึ่งระบบการวัดที่มีความซับซ้อน ดำเนินการศึกษาได้ยาก และมีค่าใช้จ่ายสูง ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาระบบการวัดที่มีความถี่ต่ำลง ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับการวิจัยตามข้อมูลที่นำเสนอต่อไปนี้

งานวิจัยที่ทำการศึกษาวัดค่า Permittivity ของสารด้วยหัววัดแบบโคแอกเซียลที่ความถี่ไอเอสเอ็ม (ISM frequencies) ได้แก่ Nelson and Bartley [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่า Permittivity ของอาหารที่เป็นของเหลว พบว่าค่า Permittivity ของน้ำแอปเปิ้ลมีความสัมพันธ์กับความถี่ Guo และคณะ [8],[9] ทำการศึกษาตัวกำหนดปริมาณน้ำตาลและน้ำในน้ำผึ้งโดยใช้ค่า Permittivity ที่ความถี่ 10 MHz พบว่า ค่า Permittivity ของน้ำผึ้งบริสุทธิ์ และน้ำผึ้งที่เจือน้ำที่ปริมาณต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับความถี่ โดยค่า Permittivity จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในสารละลายน้ำผึ้งมากขึ้น และปริมาณน้ำตาลในน้ำผึ้ง มีความสัมพันธ์ค่า Permittivity คล้ายคลึงกัน จาก [10–13] ได้ทำการศึกษาศักยภาพของ Dielectric properties ของน้ำผลไม้และนม กับความถี่และอุณหภูมิ พบว่า ค่า Permittivity ขึ้นกับ

ความถี่และอุณหภูมิ Guo และคณะ [14] ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของความถี่ของแอปเปิ้ลต่อ Dielectric properties ที่ความถี่ 10 MHz พบว่า ค่า Permittivity ขึ้นกับความถี่ สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับเมล็ดธัญพืช [15–17] ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Dielectric properties ของเมล็ดข้าวโพด peanut kernels ถั่ว Red lentil และถั่ว Kabuli chickpea ที่ความถี่ย่าน MHz พบว่า ค่า Permittivity ขึ้นกับปริมาณความชื้น ความถี่ อุณหภูมิ และความหนาแน่น

อย่างไรก็ตามหากพิจารณากระบวนการวัดค่า Permittivity แบบโคเอกเซียลโพรบจะพบว่ามิชอบกพร่องอันได้แก่ระบบการวัดซับซ้อน เครื่องวัดมีราคาแพง ใช้เวลามาก และเหมาะสำหรับใช้วัดในช่วงความถี่กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับไมโครสตริปโพรบโดย Jafari และคณะ [18] ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการออกแบบตัวตรวจวัด ความชื้นของเมล็ดข้าวด้วยโครงสร้างไมโครสตริปหลายชั้นโดยคลื่นจะถูกส่งจากด้านหนึ่งแล้วรับที่อีกด้านหนึ่ง พบว่า ค่า Permittivity มีความสัมพันธ์กับความชื้นของเมล็ดข้าว และความคลาดเคลื่อนมีค่าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัย [19–23] ทำการศึกษาเกี่ยวกับตรวจหาค่า Permittivity ของความชื้นและของเหลวด้วยตัวตรวจวัดแบบไมโครสตริป เรโซเนเตอร์ Rahman และคณะ [24] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาตัวตรวจวัดปริมาณเกลือและน้ำตาล ด้วยโครงสร้างแบบ ไมโครสตริปที่ความถี่ 1 ถึง 18 GHz พบว่า ปริมาณเกลือและน้ำตาล มีความสัมพันธ์กับค่า Permittivity

Islam และคณะ [25] ศึกษาการออกแบบตัวตรวจวัดแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์เพื่อทำการวัด ค่า Permittivity ที่ความถี่ 2.33 GHz พบว่า ตัวตรวจวัดสามารถใช้วัดความชื้นของอาหาร การตรวจสอบความเค็มของน้ำทะเล และสามารถวัดค่า Permittivity ของวัสดุได้ทั้งของเหลวและของแข็ง Parvathi and Gupta [26] เกี่ยวกับตัวตรวจวัดของเหลวย่านความถี่ไมโครเวฟ แบบกะทัดรัดและมีโครงสร้างแบบช่องว่างแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสองย่านความถี่ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.80 GHz ตัวตรวจวัดประกอบด้วย 2 ขนาดที่ต่างกันของช่องว่างแถบคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าแพทช์ที่จัดเรียงซ้อนกัน พบว่า สามารถวัดค่า Permittivity ของ น้ำ และเอทานอลได้

Moolat และคณะ [27] เกี่ยวกับตัวตรวจวัด ค่า Permittivity ของ ของเหลว แบบแถบระนาบร่วมไม่สมมาตรป้อนด้วยสเต็ปโมโนโพล ทำงานที่ความถี่ 5.3 GHz ทำการวัดโดยจุ่มโพรบลงในของเหลวตัวอย่างที่วัดเป็นของผสมระหว่างอะซิโตนกับน้ำ พบว่า ตัวตรวจวัดสามารถวัดค่า Permittivity ของสารตัวอย่างได้ Sharma and Prajapati [28] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวัดค่า Permittivity ของเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ เช่น กล้ามเนื้อ ไขมัน ผิวหนัง และเนื้องอก ทำการวัดด้วยตัวตรวจวัดเรโซเนเตอร์ระนาบร่วมย่านความถี่ไมโครเวฟ แบบตัวเก็บประจุอินเตอร์ดิจิตอลบนฐานเรโซเนเตอร์ ทำงานที่ความถี่ 5.625 GHz พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด กรณีเนื้อเยื่อที่วัดเป็น ผิวหนัง ไขมัน และเนื้องอก มีค่าเป็น 4.36, 3.98 และ 0.295 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่มีมาก่อน พบว่าข้อเสียของระบบการวัดที่ความถี่สูงและข้อดีของระบบการวัดแบบโคเอกเซียล ดังที่กล่าวมา และข้อดีของไมโครสตริปโพรบ ได้แก่ ต้นทุนต่ำและน้ำหนักเบา จึงเป็นที่มาของการศึกษา การจำลองระบบการวัดค่า Permittivity โดยใช้โครงสร้างไมโครสตริปร่วมกับตารางค้นหา ที่ความถี่ไอเอสเอ็มได้แก่ 13 MHz, 27 MHz และ 40 MHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านไอเอสเอ็มที่ใช้กับวงการ อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ โดยอาศัยวิธีวัดค่าความจุด้วยไมโครสตริปโพรบ 2 ชั้น ซึ่งการศึกษานี้มีความน่าสนใจเนื่องจากจะเป็นการเพิ่มเติมช่องว่างการวิจัยในด้านการวัดค่า Permittivity ของสารให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และเป็นการขยายองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบการวัดด้วยวิธีการจำลองและความสัมพันธ์ของสารกับคลื่นวิทยุ นอกจากนั้นการศึกษเกี่ยวกับการจำลองระบบการวัดมีข้อดีคือ จะทำให้ทราบข้อมูลที่จำเป็นเบื้องต้นของระบบการวัดก่อน โดยยังไม่ต้องลงทุนใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ มากนัก จึงเป็นการประหยัดต้นทุนการวิจัย ก่อนที่จะทำการสร้างระบบการวัดจริงต่อไปในอนาคต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการจำลองระบบการวัดค่า Permittivity โดยใช้โครงสร้างไมโครสตริปที่ออกแบบด้วย

ซอฟต์แวร์ชอนเน็ตและประเมินประสิทธิภาพระบบจำลองการวัดที่สร้างขึ้นด้วยการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อนำไปใช้พัฒนาเครื่องมือวัดค่า Permittivity ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกในอนาคต งานวิจัยนี้เลือกใช้งานความถี่ย่านไอเอสเอ็มเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านความถี่นี้สามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอในสารที่นำมาทดสอบด้วยระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ รวมไปถึงสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีความหนาได้ดี ด้วยเหตุที่ว่าคลื่นความถี่ต่ำจะทะลุทะลวงเข้าไปในสารได้ดีกว่าคลื่นความถี่สูง และย่านความถี่นี้ยังทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่ำ รวมทั้งได้รับผลกระทบจากการรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงน้อย ระบบการวัดที่ผ่านความถี่นี้สามารถสร้างขึ้นได้ง่ายไม่ซับซ้อน และมิตราไม่แพง

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

(1) เครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊ก (2) ซอฟต์แวร์ชอนเน็ต (Sonnet) และ (3) โปรแกรมภาษาไพธอน (Python)

2.2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวิธีการวิจัยดังนี้

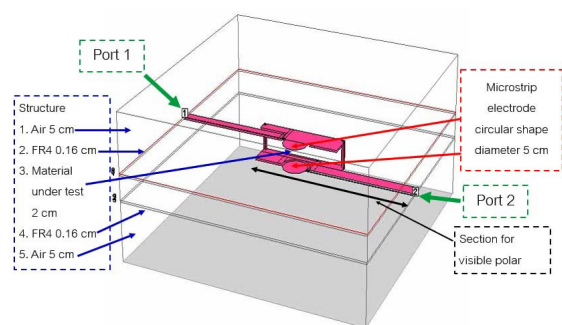
1. ออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบการวัดด้วยซอฟต์แวร์ชอนเน็ต ตามด้วยการจำลองระบบการวัดค่า Permittivity ของสารตัวอย่างที่มีค่า Permittivity เท่ากับ 35, 55 และ 75 ค่า Loss tangent เท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.6 ที่ความถี่ 13, 27 และ 40 MHz โดยใช้โครงสร้างไมโครสตริป

2. นำผลจากการจำลองมาคำนวณหาค่า Permittivity ค่า Loss tangent และค่าคลาดเคลื่อน จากนั้นทำการจำลองระบบการวัดที่ค่า Permittivity เท่ากับ 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 และค่า Loss tangent เท่ากับ 0–1 โดยเพิ่มทีละ 0.1 ที่ความถี่ 10–40 MHz โดยเพิ่มทีละ 1 MHz แล้วนำมาสร้างเป็นตารางค้นหาขนาด 11×11 แล้วทำการคำนวณหา ค่า Permittivity ค่า Loss tangent และค่าคลาดเคลื่อน จากตารางค้นหาขนาด 11×11

3. สร้างตารางค้นหาขนาด $5 \times 5, 3 \times 3$ แล้วทำการจำลองระบบการวัดที่ค่า Permittivity เท่ากับ 40–50 เพิ่มค่าทีละ 1 และค่า Loss tangent เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz นำผลจากการจำลอง มาคำนวณหาค่า Permittivity ค่า Loss tangent และค่าคลาดเคลื่อน ตามด้วยการคำนวณหาค่า Permittivity ค่า Loss tangent และค่าคลาดเคลื่อน จากตารางค้นหาขนาด $11 \times 11, 5 \times 5, 3 \times 3$

2.3. การออกแบบการจำลองระบบการวัด

สำหรับแบบจำลองระบบการวัดที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นดังรูปที่ 1 โดยใช้ซอฟต์แวร์ชอนเน็ต โครงสร้างประกอบด้วยวัสดุจำนวน 5 ชั้น ได้แก่ 1) อากาศ หนา 5 เซนติเมตร ค่า Permittivity = 1 ค่า Loss tangent = 0 2) เอฟอาร์โฟร์ (FR4) หนา 0.16 เซนติเมตร ค่า Permittivity = 4.4 ค่า Loss tangent = 0.025 3) วัสดุภายใต้การทดสอบ หนา 2 เซนติเมตร 4) เอฟอาร์โฟร์ (FR4) หนา 0.16 เซนติเมตร ค่า Permittivity = 4.4 ค่า Loss tangent = 0.025 และ 5) อากาศ หนา 5 เซนติเมตร ค่า Permittivity = 1 ค่า Loss tangent = 0 แบบจำลองการวัดประกอบด้วย ไมโครสตริปอิเล็กโทรด 2 ขั้ว โดยช่องว่างตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดจะเป็นสารที่ทำจำลองหรือวัสดุภายใต้การทดสอบได้แก่ สารที่มีค่า Permittivity เป็น 35, 55, 75 และ 40 ถึง 50 จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อหา ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของวัสดุภายใต้การทดสอบ

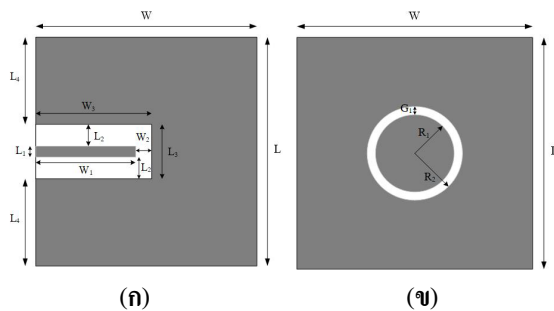


รูปที่ 1 แบบจำลองระบบการวัดที่ใช้ในการวิจัย

2.4. การออกแบบอิเล็กโทรดที่มีโครงสร้างแบบไมโครสตริป

สำหรับไมโครสตริปอิเล็กโทรด (Microstrip electrode) หรือโพรบที่ออกแบบของงานวิจัยนี้ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด

FR-4 ที่มีค่า Permittivity = 4.4 ค่า Loss tangent = 0.025
หนา 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะและรายละเอียดตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไมโครสตริปอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบ (ก) ด้านหน้า
(ข) ด้านหลัง

จากรูปที่ 2 ตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

W = 140 มิลลิเมตร L = 140 มิลลิเมตร L1 = 3 มิลลิเมตร
W1 = 48.5 มิลลิเมตร L2 = 2.5 มิลลิเมตร W2 = 1.5 มิลลิเมตร
L3 = 8 มิลลิเมตร W3 = 50 มิลลิเมตร L4 = 66 มิลลิเมตร R1 =
25 มิลลิเมตร R2 = 30 มิลลิเมตร และ G1 = 5 มิลลิเมตร

2.5.การคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent

จากค่าเอสพารามิเตอร์โดยตรง

ผลลัพธ์จากการจำลองแบบจำลองระบบการวัดด้วย
ซอฟต์แวร์ชอนเน็ตจะทำให้ได้ค่าเอสพารามิเตอร์ซึ่งสามารถ
นำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ (Y-parameter) คือ Y_{21} ได้
ตามสมการที่ (1) โดย Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของ
สายนำสัญญาณ ส่วน S_{11} , S_{22} , S_{12} และ S_{21} คือค่าเอสพารามิเตอร์
จากนั้นจะสามารถคำนวณค่า Permittivity (ϵ_r) ได้
ตามสมการที่ (2) โดย $|\text{Im}(Y_{21})|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ของส่วน
จินตภาพของค่า Y_{21} ค่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (d) = 0.02
เมตร ค่า Permittivity ของสุญญากาศ (ϵ_0) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12}
ค่ารัศมีของอิเล็กโทรดแบบวงกลม (r) = 0.025 เมตร
 f คือ ค่าความถี่ และสามารถคำนวณค่า Loss tangent ($\tan \delta$)
ได้ตามสมการที่ (3) โดย $|\text{Re}(Y_{21})|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ของส่วน
จริงของค่า Y_{21} ส่วน $|\text{Im}(Y_{21})|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ของส่วน
จินตภาพของค่า Y_{21}

$$Y_{21} = -\frac{1}{Z_0} \frac{2S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_0 \pi r^2} \frac{|\text{Im}(Y_{21})| d}{2\pi f} \quad (2)$$

$$\tan \delta = \frac{|\text{Re}(Y_{21})|}{|\text{Im}(Y_{21})|} \quad (3)$$

2.6.การออกแบบชุดค่าตั้งคำนวณค่า Permittivity และค่า

Loss tangent จากตารางค้นหา

การสร้างตารางค้นหา (Lookup table) เริ่มด้วยการสร้าง
แบบจำลองการวัดที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 2 ขั้ว
และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดด้วยซอฟต์แวร์ชอนเน็ต โดยที่
วัสดุภายใต้การทดสอบจะเป็นสารที่เราต้องการวัด เช่น สารที่
มีค่า Permittivity เป็น 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ
100 มีค่า Loss tangent ตั้งแต่ 0 ถึง 1 และทำการวิเคราะห์เพื่อ
จำลองระบบการวัดที่สร้างขึ้นเพื่อผลลัพธ์ค่าเอสพารามิเตอร์
ที่ความถี่ต่าง ๆ ของกรณีค่า Permittivity และ Loss tangent
ต่างๆ จากนั้นนำผลการจำลองมาคำนวณหาค่า Permittivity
และค่า Loss tangent โดยใช้ชุดค่าตั้งภาษาไพธอน
โดยทำการจำลองการวัดหลาย ๆ กรณี เพื่อนำมาสร้างเป็น
ตารางค้นหาซึ่งเป็นตารางที่ใช้เก็บค่า Permittivity และค่า
Loss tangent จากการคำนวณจากผลการจำลองแบบจำลอง
ระบบการวัดที่ค่าพารามิเตอร์กรณีต่าง ๆ โดยเป็น
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Loss tangent และความถี่ โดยที่แต่ละ
ความถี่จะประกอบด้วย ค่า Permittivity ที่ทราบแล้วเช่น 1,
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 โดยการสร้างตาราง
นี้จะต้องมีตัวอย่างสารที่ทราบค่า Permittivity และค่า Loss
tangent แล้วเพื่อทำเป็นตาราง

ตารางค้นหาขนาดต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่
11 × 11, 5 × 5 และ 3 × 3 ซึ่งตารางค้นหาขนาด 11 × 11 คือ
ตารางที่มีค่า Permittivity ที่ทราบแล้ว 11 ค่า และมีค่า Loss
tangent ที่ทราบแล้ว 11 ค่า ที่มีความถี่ 10 ถึง 40 MHz โดยมี
ระยะห่างเท่ากับ 1 MHz โดยที่แต่ละความถี่จะประกอบด้วย
Permittivity 11 ค่า ได้แก่ 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90,
100 และมีค่า Loss tangent 11 ค่า ได้แก่ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5,
0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 และตารางค้นหาขนาด 5 × 5 คือตารางที่มี
ค่า Permittivity ที่ทราบแล้ว 5 ค่า และมีค่า Loss tangent ที่
ทราบแล้ว 5 ค่า ที่มีความถี่ที่ 10, 11, 13, 27, 39 และ 40 MHz
โดยที่แต่ละความถี่จะประกอบด้วยค่า Permittivity 5 ค่า ได้แก่
1, 20, 50, 80 และ 100 และมีค่า Loss tangent 5 ค่า ได้แก่ 0, 0.2,
0.5, 0.8 และ 1 และตารางค้นหาขนาด 3 × 3 คือ ตารางที่มีค่า

Permittivity ที่ทราบแล้ว 3 ค่า และมีค่า Loss tangent ที่ทราบแล้ว 3 ค่า ที่มีค่าความถี่ที่ 10, 11, 13, 27, 39 และ 40 MHz โดยที่แต่ละความถี่จะประกอบด้วย Permittivity 3 ค่า ได้แก่ 1, 50 และ 100 และมีค่า Loss tangent 3 ค่า ได้แก่ 0, 0.5 และ 1

สำหรับการคำนวณหาค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent จากการเปิดตารางค้นหา ฟังก์ชันนี้จะประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนเปิดและค้นหาในตารางค้นหาที่เก็บค่า Complex permittivity ดังแสดงในรูปที่ 3 2) ส่วน Interpolation เป็นส่วนที่คำนวณให้ผลลัพธ์เป็นจำนวนเชิงซ้อนเพื่อนำไปคำนวณต่อในส่วน Optimization และ 3) ส่วน Optimization เป็นส่วนที่คำนวณหาค่าที่เหมาะสมซึ่งฟังก์ชันนี้จะให้ผลลัพธ์เป็นค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ที่ปรับค่าแล้ว ซึ่งจะมีค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริง

การทำงานของชุดคำสั่งคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent จากตารางค้นหา มีการทำงานดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าตัวแปร freq, erp และ tand

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า Complex permittivity ของค่าในขั้นที่ 1 เก็บในตัวแปร er ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นค่า Complex permittivity

ขั้นที่ 3 หาค่าจากตารางค้นหาที่มีค่าใกล้เคียงกับค่า Complex permittivity ในขั้นที่ 2 มากที่สุด ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นค่า Permittivity และค่า Loss tangent

ขั้นที่ 4 นำค่า Permittivity และค่า Loss tangent ในขั้นที่ 3 มาคำนวณ Interpolation และ Optimization ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของวัสดุที่ต้องการหาค่า

ตัวอย่างการใช้ตารางค้นหา กรณีที่จำลองวัสดุภายใต้การทดสอบให้มีค่า Permittivity = 78, Loss tangent = 0.1 ที่ความถี่ 13 MHz เมื่อนำผลการจำลองมาทำการคำนวณจะได้ค่า Permittivity = 63.9438, Loss tangent = 0.1025 ที่ความถี่ 13 MHz จากนั้นใช้เทคนิคตารางค้นหาเพื่อให้ได้ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ที่ใกล้เคียงกับค่าของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

ทำการเปรียบเทียบค่า Permittivity = 63.9438, Loss tangent = 0.1025 กับค่าในตารางที่ 1 พบว่า ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด คือ ค่า Permittivity = 65.6277 และ Loss tangent = 0.1026 จึงเลือกค่า Permittivity = 80 และ Loss tangent = 0.1 เป็นตำแหน่งตรงกลางสำหรับการทำขั้นตอน Interpolation จากนั้นใช้ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 เพื่อคำนวณหาค่า Permittivity และ Loss tangent ด้วยการคำนวณ Interpolation และ Optimization ซึ่งจะได้ค่า Permittivity = 77.9975 และค่า Loss tangent = 0.0999 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 1 ข้อมูลของ ค่า Permittivity และค่า Loss tangent จากการค้นหา ที่ความถี่ 13 MHz

Frequency	Loss tangent Permittivity	0		0.1		0.2		0.3	
		0	0.000238	0.1	0.1024	0.2	0.2052	0.3	0.3083
13	70	57.2253	0.000238	57.2186	0.1024	57.1904	0.2052	57.1413	0.3083
13	80	65.6396	0.000194	65.6277	0.1026	65.5915	0.2055	65.5331	0.3086
13	90	74.0931	0.000201	74.0738	0.1028	74.0312	0.2058	73.9537	0.3091

ตารางที่ 2 การหาค่า Permittivity

Loss tangent Permittivity	0		0.1		0.2	
	0	0.000238	0.1	0.1024	0.2	0.2052
70	57.2253	0.000238	57.2186	0.1024	57.1904	0.2052
80	65.6396	0.000194	65.6277	0.1026	65.5915	0.2055
90	74.0931	0.000201	74.0738	0.1028	74.0312	0.2058

ตารางที่ 3 การหาค่า Loss tangent

Permittivity \ Loss tangent	0	0.1	0.2
70	0.000238	0.1024	0.2052
80	0.000194	0.1026	0.2055
90	0.000201	0.1028	0.2058

	freq	er	100	101	102	103
33	13.0	1	0.723400-0.000236j	0.723400-0.073136j	0.7231000-0.1465000j	0.7227000-0.2198450j
34	13.0	10	7.709500-0.005889j	7.708600-0.792444j	7.7052000-1.5918940j	7.6993000-2.3914030j
35	13.0	20	15.787500-0.010252j	15.786100-1.619654j	15.780900-3.247709j	15.772400-4.878403j
36	13.0	30	23.972100-0.011964j	23.969700-2.454497j	23.961900-4.919378j	23.948900-7.388236j
37	13.0	40	32.218400-0.013258j	32.213400-3.298652j	32.203700-6.604979j	32.185200-9.916260j
38	13.0	50	40.512800-0.013418j	40.507400-4.143907j	40.492700-8.301004j	40.468000-12.460097j
39	13.0	60	48.849700-0.014845j	48.842100-5.001431j	48.821600-10.013310j	48.783200-15.030104j
40	13.0	70	57.225300-0.013608j	57.218600-5.859185j	57.190400-11.735470j	57.141300-17.616663j
41	13.0	80	65.639600-0.012741j	65.627700-6.733402j	65.591500-13.479053j	65.533100-20.223515j
42	13.0	90	74.093100-0.014900j	74.073800-7.614787j	74.031200-15.235621j	73.953700-22.859089j
43	13.0	100	82.580800-0.012222j	82.562100-8.495640j	82.506000-17.004487j	82.410900-25.514415j

รูปที่ 3 ตัวอย่างตารางค้นหาที่เก็บค่า Complex permittivity

3. ผลการทดลอง

ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารตัวอย่าง คือ สารที่มีค่า Permittivity เป็น 35, 55 และ 75 จากผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ชอนเน็ต จะเป็นตามที่แสดงใน ตารางที่ 4-6 ตามลำดับ ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารตัวอย่างเทียบกับค่าอ้างอิงจะเป็นตามที่แสดงในรูปที่ 4-6 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงในระดับหนึ่ง ด้วยเหตุนี้เพื่อให้ค่าที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนลดลง ผู้วิจัยจึงนำค่าที่คำนวณได้จากผลการจำลองในขั้นแรกนี้ ไปคำนวณต่อด้วยวิธีการคำนวณค่าจากการเปิดตารางค้นหา โดยผลจากการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารตัวอย่าง จากการเปิดตารางค้นหา จะเป็นตาม ตารางที่ 7-9 ตามลำดับ ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารตัวอย่างจากค่าอ้างอิงจะเป็นตามรูปที่ 7-9 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในขณะที่ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มค่าที่ละ 1

และค่า Loss tangent เป็น 0.4, 0.5 และ 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากผลการจำลอง และจากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11 , 5×5 และ 3×3 จะเป็นตาม ตารางที่ 10-13 ตามลำดับ

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity จากผลการจำลอง มีค่าลดลง จากค่า Reference Permittivity เท่ากับ 40 ถึง 50

จากรูปที่ 11-12 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 5×5 และ 3×3 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ได้แก่ ที่ค่า Reference Permittivity = 50 ค่าความคลาดเคลื่อน จะมีค่าเป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 จากนั้นค่าความคลาดเคลื่อน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไปจนมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งค่า Reference Permittivity = 40

จากรูปที่ 13 จะพบว่าผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11 ที่ค่า Reference Permittivity = 40 ค่าความคลาดเคลื่อน จะมีค่าเป็น 0 ส่วนที่ค่า Reference Permittivity = 50 ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็น 0 ด้วยเช่นกัน ในขณะที่ค่า Reference Permittivity ระหว่าง 40 กับ 50 ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมากที่สุดแล้วลดลงจนมีค่าเป็น 0

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 35 จากผลการจำลอง

Substances with permittivity of 35							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from the simulation results					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
35	0.2	28.07657	0.2052	29.01879	0.2107	30.5713	0.2204
35	0.4	28.03924	0.4115	28.8876	0.4235	30.2887	0.4441
35	0.6	27.9825	0.6190	28.6684	0.6404	29.7394	0.6775

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 55 จากผลการจำลอง

Substances with permittivity of 55							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from the simulation results					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
55	0.2	44.6511	0.2051	46.8042	0.2137	50.5297	0.2294
55	0.4	44.5812	0.4111	46.4589	0.4307	49.6296	0.4659
55	0.6	44.4646	0.6186	45.9113	0.6533	48.07699	0.7177

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 75 จากผลการจำลอง

Substances with permittivity of 75							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from the simulation results					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
75	0.2	61.3872	0.2054	65.2623	0.2175	72.2402	0.2410
75	0.4	61.2588	0.4119	64.5576	0.4395	70.4251	0.4919
75	0.6	61.0502	0.6201	63.5667	0.6688	67.1452	0.7667

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 35 จากการเปิดตารางค้นหา

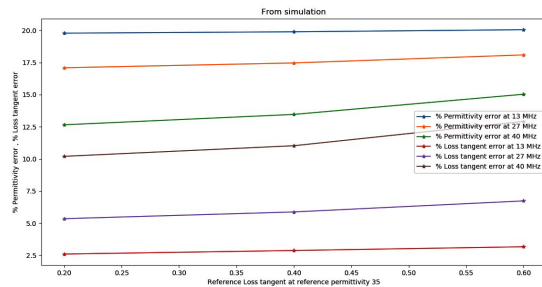
Substances with permittivity of 35							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from open lookup table					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
35	0.2	34.9925	0.2000	34.9747	0.1999	34.9364	0.1997
35	0.4	34.9909	0.3841	34.9748	0.3842	34.9428	0.3720
35	0.6	34.9937	0.5734	34.9742	0.5787	34.9351	0.5862

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 55 จากการเปิดตารางค้นหา

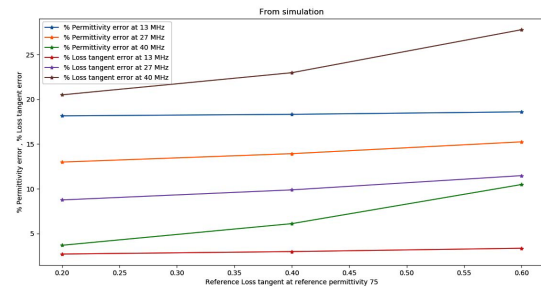
Substances with permittivity of 55							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from open lookup table					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
55	0.2	54.9928	0.2000	54.9786	0.1999	54.9506	0.1997
55	0.4	54.9976	0.3999	54.9485	0.4000	54.9330	0.3995
55	0.6	54.9962	0.5923	54.9646	0.5883	54.9103	0.5624

ตารางที่ 9 ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 75 จากการเปิดตารางค้นหา

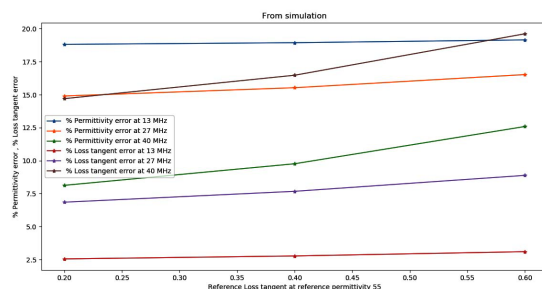
Substances with permittivity of 75							
Permittivity tested	Loss tangent tested	Calculated from open lookup table					
		13 MHz		27 MHz		40 MHz	
		Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
75	0.2	74.9955	0.2000	74.9698	0.2000	75.0071	0.1995
75	0.4	74.9990	0.3999	74.9018	0.4003	75.1487	0.3990
75	0.6	74.9995	0.5999	75.0517	0.5994	74.9317	0.5994



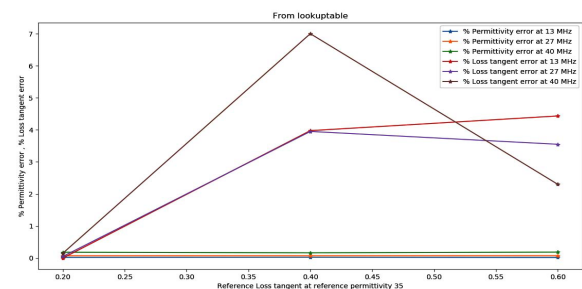
รูปที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity=35 จากผลการจำลอง



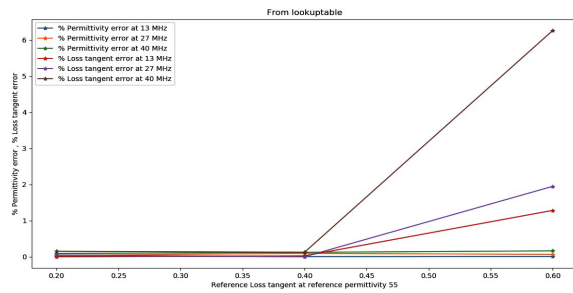
รูปที่ 6 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity=75 จากผลการจำลอง



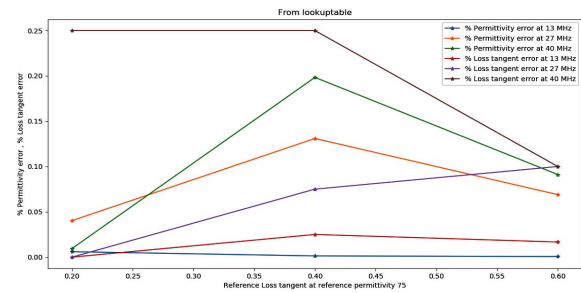
รูปที่ 5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity=55 จากผลการจำลอง



รูปที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity=35 จากการเปิดตารางค้นหา



รูปที่ 8 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ
ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มี
ค่า Permittivity=55 จากการเปิดตารางค้นหา



รูปที่ 9 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ
ค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารที่มี
ค่า Permittivity=75 จากการเปิดตารางค้นหา

ตารางที่ 10 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity tested เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Loss tangent tested เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากผลการจำลอง

Calculated from the simulation results						
Permittivity tested	Frequency 13 MHz					
	Loss tangent tested: 0.4		Loss tangent tested: 0.5		Loss tangent tested: 0.6	
	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
40	32.1611	0.4112	32.1291	0.5147	32.0905	0.6186
41	32.9856	0.4112	32.9548	0.5146	32.9122	0.6186
42	33.8100	0.4112	33.7771	0.5147	33.7364	0.6185
43	34.6369	0.4112	34.6019	0.5147	34.5561	0.6186
44	35.4635	0.4112	35.4289	0.5146	35.3811	0.6186
45	36.2923	0.4111	36.2520	0.5147	36.2052	0.6185
46	37.1178	0.4111	37.07758	0.5147	37.0277	0.6186
47	37.9460	0.4111	37.9056	0.5146	37.8564	0.6185
48	38.7736	0.4111	38.7329	0.5146	38.6803	0.6185
49	39.6009	0.4112	39.5595	0.5146	39.5067	0.6184
50	40.4309	0.4111	40.3848	0.5147	40.3319	0.6185

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity tested เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Loss tangent tested เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11 × 11

Calculated from open lookup table 11 × 11						
Permittivity tested	Frequency 13 MHz					
	Loss tangent tested: 0.4		Loss tangent tested: 0.5		Loss tangent tested: 0.6	
	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
40	40.0000	0.4000	40.0000	0.5000	40.0000	0.6000
41	40.9970	0.4000	41.0002	0.4999	40.9970	0.6000

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity tested เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Loss tangent tested เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11 (ต่อ)

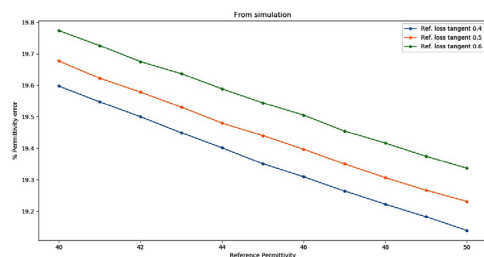
Calculated from open lookup table 11×11						
Permittivity tested	Frequency 13 MHz					
	Loss tangent tested: 0.4		Loss tangent tested: 0.5		Loss tangent tested: 0.6	
	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
42	41.9939	0.4000	41.9962	0.5000	41.9970	0.5999
43	42.9938	0.4000	42.9953	0.5000	42.9918	0.6000
44	43.9934	0.4000	43.9969	0.4999	43.9936	0.5925
45	44.9955	0.4000	44.9940	0.4751	44.9918	0.5559
46	45.9937	0.4000	45.9940	0.5000	45.9908	0.6001
47	46.9952	0.4000	46.9969	0.4999	46.9963	0.6000
48	47.9959	0.4000	47.9991	0.4999	47.9960	0.6000
49	48.9964	0.4001	49.0002	0.4999	48.9986	0.5999
50	50.0000	0.4000	50.0000	0.5000	50.0000	0.6000

ตารางที่ 12 ผลการคำนวณ ค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity tested เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Loss tangent tested เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 5×5

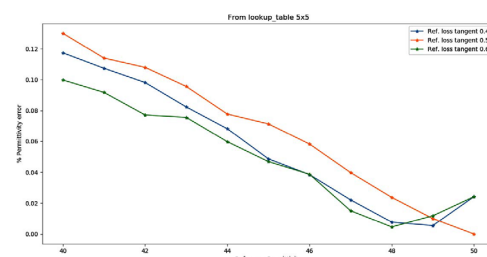
Calculated from open lookup table 5×5						
Permittivity tested	Frequency 13 MHz					
	Loss tangent tested: 0.4		Loss tangent tested: 0.5		Loss tangent tested: 0.6	
	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
40	39.9531	0.3996	39.9481	0.4996	39.9601	0.5994
41	40.9560	0.3997	40.9533	0.4996	40.9624	0.5994
42	41.9588	0.3997	41.9547	0.4997	41.9676	0.5994
43	42.9646	0.3997	42.9589	0.4998	42.9675	0.5995
44	43.9700	0.3998	43.9658	0.4997	43.9737	0.5996
45	44.9781	0.3997	44.9679	0.4998	44.9789	0.5996
46	45.9823	0.3997	45.9732	0.4999	45.9822	0.5997
47	46.9896	0.3997	46.9813	0.4998	46.9929	0.5996
48	47.9963	0.3998	47.9886	0.4998	47.9978	0.5997
49	49.0027	0.3999	48.9951	0.4999	49.0058	0.5996
50	50.0121	0.3998	50.0000	0.5000	50.0121	0.5998

ตารางที่ 13 ผลการคำนวณค่า Permittivity และ ค่า Loss tangent ของสารที่มีค่า Permittivity tested เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Loss tangent tested เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 3×3

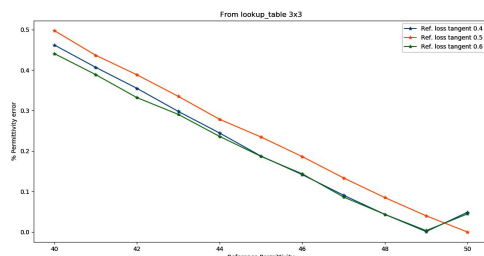
Calculated from open lookup table 3×3						
Permittivity tested	Frequency 13 MHz					
	Loss tangent tested: 0.4		Loss tangent tested: 0.5		Loss tangent tested: 0.6	
	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent	Permittivity	Loss tangent
40	39.8152	0.3997	39.8010	0.5000	39.8237	0.5998
41	40.8332	0.3997	40.8210	0.4999	40.8406	0.5997
42	41.8510	0.3997	41.8369	0.5000	41.8606	0.5996
43	42.8719	0.3997	42.8559	0.5000	42.8751	0.5997
44	43.8924	0.3997	43.8775	0.4999	43.8961	0.5997
45	44.9156	0.3996	44.8944	0.5000	44.9159	0.5996
46	45.9348	0.3996	45.9143	0.5000	45.9339	0.5997
47	46.9573	0.3996	46.9372	0.4999	46.9594	0.5996
48	47.9791	0.3996	47.9592	0.4999	47.9791	0.5996
49	49.0005	0.3996	48.9804	0.4999	49.0017	0.5995
50	50.0244	0.3995	50.0000	0.5000	50.0224	0.5996



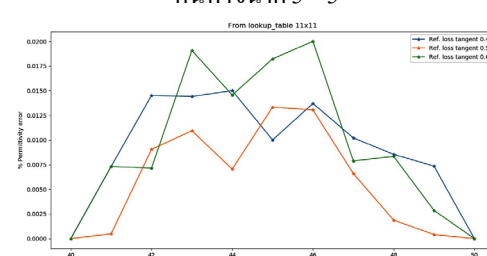
รูปที่ 10 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ ค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 จากผลการจำลอง



รูปที่ 12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ ค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 5×5



รูปที่ 11 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ ค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 3×3



รูปที่ 13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ ค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11

4. อภิปรายผลและสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการจำลองระบบการวัดค่า Permittivity ของสารตัวอย่าง โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างไมโครสตริป ที่ความถี่ 13, 27 และ 40 MHz ด้วยซอฟต์แวร์ซอนเน็ต แล้วจึงคำนวณหาค่า Permittivity และค่า Loss tangent ซึ่งจากการวิจัยพบว่า ผลการคำนวณค่า Permittivity และค่า Loss tangent ของสารตัวอย่าง จากผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซอนเน็ต มีความคลาดเคลื่อนสูงระดับหนึ่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาโดยการนำค่าที่ได้จากการคำนวณนี้ไปคำนวณต่อ ด้วยวิธีการคำนวณหาค่าจากการเปิดตารางค้นหา ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำ

ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 กรณีใช้ตารางค้นหาขนาด 5×5 และ 3×3 พบว่า ที่ค่า Reference Permittivity = 50 มีค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 จากนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไป จนมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งค่า Reference Permittivity = 40 เนื่องจากที่ค่า Permittivity = 50 เป็นค่าที่มีในตารางค้นหา ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าเป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 และเมื่อลดค่า Permittivity ลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าเท่ากับ 40 ซึ่งไม่มีในตารางค้นหาและเป็นค่าที่ห่างจากค่า Permittivity = 50 มากที่สุด ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนจึงมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งนี้

ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity ที่ Reference Permittivity จาก 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11 ที่ค่า Reference Permittivity เท่ากับ 40 และ 50 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็น 0 ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากทั้ง 2 ค่านี้เป็นค่าที่มีในตารางค้นหา ในขณะที่ค่าตรงกลางระหว่างค่า Reference Permittivity เท่ากับ 40 และ 50 จะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงมีสาเหตุมาจากค่าในตำแหน่งนี้ไม่มีในตารางค้นหาและอยู่ระหว่างค่าที่มีในตาราง คือ 40 และ 50

ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity ของสารที่มีค่า Permittivity เป็น 35, 55, 75 ที่ Reference Loss tangent เป็น 0.2, 0.4, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz, 27 MHz, 40 MHz จากการเปิดตารางค้นหา พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่า 0.1984 เปอร์เซนต์ และผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Permittivity ของสารที่มีค่า Reference permittivity เป็น 40 ถึง 50 โดยเพิ่มทีละ 1 ค่า และค่า Reference Loss tangent เป็น 0.4, 0.5, 0.6 ที่ความถี่ 13 MHz จากการเปิดตารางค้นหาขนาด 11×11 , 5×5 และ 3×3 พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่า 0.02001, 0.1301 และ 0.4976 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบการจำลองการวัดค่า Permittivity ด้วยโครงสร้างไมโครสตริปโพรบ ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้วัดค่า Permittivity ของสารตัวอย่างที่ไม่ทราบค่า Permittivity และค่า Loss tangent ได้ สำหรับเทคนิคการใช้ตารางค้นหาในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้กับสารตัวอย่างที่มีค่า Permittivity อยู่ในช่วง 1 – 100 และค่า Loss tangent อยู่ในช่วง 0 – 1 อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถรองรับการนำไปใช้งานกับสารตัวอย่างที่มีค่า Permittivity มากกว่า 100 ได้ โดยจะต้องทำการจำลองผลระบบการวัดค่าเพิ่มเติมในกรณีที่มีค่า Permittivity มากกว่า 100

สำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต กรณีที่ไม่สามารถมีสารตัวอย่างที่มีคุณสมบัติที่ทราบค่าเป็นมาตรฐานเพื่อนำมาสร้างตารางค้นหา อาจจะต้องหาวิธีเทียบวัดเพื่อให้ผลการจำลองกับผลการวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกันเพื่อให้วัดค่าได้ถูกต้อง รวมถึงจะทำการสร้างเครื่องมือวัดค่า Permittivity และ Loss tangent เพื่อใช้งานร่วมกับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Lizhi, K. Toyoda and I. Ihara, "Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition," *Journal of Food Engineering*, vol. 88, no. 2, pp. 151–158, 2008, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.12.035.
- [2] W. Routray and V. Orsat, "Recent advances in

- dielectric properties—measurements and importance,” *Current Opinion in Food Science*, vol. 23, pp. 120–126, 2018, doi: 10.1016/j.cofs.2018.10.001.
- [3] J. Ahmed, H. S. Ramaswamy and G. S. V Raghavan, “Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 71–81, 2008, doi: 10.1016/j.lwt.2007.01.017
- [4] A. A. Salema, Y. K. Yeow, K. Ishaque, F. N. Ani, M. T. Afzal and A. Hassan, “Dielectric properties and microwave heating of oil palm biomass and biochar,” *Industrial Crops and Products*, vol. 50, pp. 366–374, 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.08.007.
- [5] A. P. Franco, L. Y. Yamamoto, C. C. Tadini and J. A. W. Gut, “Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency,” *Journal of Food Engineering*, vol. 155, pp. 69–78, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.01.011.
- [6] Y. A. Gezahegn, J. Tang, S. S. Sablani, P. D. Pedrow, Y. -K Hong, H. Lin and Z. Tang, “Dielectric properties of water relevant to microwave assisted thermal pasteurization and sterilization of packaged foods,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 74, 2021, Art. no. 102837, doi: 10.1016/j.ifset.2021.102837.
- [7] S. O. Nelson and P. G. Bartley, “Measuring frequency- and temperature-dependent permittivities of food materials,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 4, pp. 589–592, 2002, doi: 10.1109/TIM.2002.802244.
- [8] W. Guo, X. Zhu, Y. Liu and H. Zhuang, “Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing,” *Journal of Food Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 275–281, 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.10.024.
- [9] W. Guo, Y. Liu, X. Zhu, and S. Wang, “Dielectric properties of honey adulterated with sucrose syrup,” *Journal of Food Engineering*, vol. 107, no. 1, pp. 1–7, 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.06.013.
- [10] X. Zhu, W. Guo and X. Wu, “Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating,” *Journal of Food Engineering*, vol. 109, no. 2, pp. 258–266, 2012, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.005.
- [11] I. Muñoz, P. Gou, P. A. Picouet, A. Barlabé and X. Felipe, “Dielectric properties of milk during ultra-heat treatment,” *Journal of Food Engineering*, vol. 219, pp. 137–146, 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.09.025.
- [12] D. Dag, R. K. Singh and F. Kong, “Dielectric properties, effect of geometry, and quality changes of whole, nonfat milk powder and their mixtures associated with radio frequency heating,” *Journal of Food Engineering*, vol. 261, pp. 40–50, 2019, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.04.017.
- [13] X. Zhou, R. Li, J. G. Lyng and S. Wang, “Dielectric properties of kiwifruit associated with a combined radio frequency vacuum and osmotic drying,” *Journal of Food Engineering*, vol. 239, pp. 72–82, 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.07.006.
- [14] W. Guo, X. Zhu, S. O. Nelson, R. Yue, H. Liu and Y. Liu, “Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 224–230, 2011, doi: 10.1016/j.lwt.2010.05.032.
- [15] K. Sacilik and A. Colak, “Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz,” *Powder Technology*, vol. 203, no. 2, pp. 365–370, 2010, doi: 10.1016/j.powtec.2010.05.031.
- [16] S. Zhang, L. Zhou, B. Ling and S. Wang, “Dielectric properties of peanut kernels associated with microwave and radio frequency drying,” *Biosystems*

- Engineering*, vol. 145, pp. 108–117, 2016, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.03.002.
- [17] A. B. Oke and O.-D. Baik, “Role of moisture content, temperature, and frequency on dielectric behaviour of red lentil and Kabuli chickpea in relation to radio frequency heating,” *Applied Food Research*, vol. 2, no. 1, 2022, Art. no. 100046, doi: 10.1016/j.afres.2022.100046.
- [18] F. Jafari, K. Khalid, W. M. D. W. Yusoff and J. Hassan, “The analysis and design of multi-layer microstrip moisture sensor for rice grain,” *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 3, pp. 324–331, 2010, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2010.04.005.
- [19] Y. L. Then, K. Y. You, M. N. Dimon and C. Y. Lee, “A modified microstrip ring resonator sensor with lumped element modeling for soil moisture and dielectric predictions measurement,” *Measurement*, vol. 94, pp. 119–125, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.07.046.
- [20] S. Majidifar and G. Karimi, “New approach for dielectric constant detection using a microstrip sensor,” *Measurement*, vol. 93, pp. 310–314, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.06.051.
- [21] J. Wu, P. Wang, X. Huang, F. Rao, X. Chen, Z. Shen and H. Yang, “Design and validation of liquid permittivity sensor based on RCRR microstrip metamaterial,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 280, pp. 222–227, 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.07.037.
- [22] S. Kiani, P. Rezaei and M. Navaei, “Dual-sensing and dual-frequency microwave SRR sensor for liquid samples permittivity detection,” *Measurement*, vol. 160, 2020, Art. no. 107805, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107805.
- [23] A. Buragohain, A. T. T. Mostako and G. S. Das, “Low-Cost CSRR Based Sensor for Determination of Dielectric Constant of Liquid Samples,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 24, pp. 27450–27457, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3124329.
- [24] M. N. Rahman, M. T. Islam and M. Samsuzzaman, “Development of a microstrip based sensor aimed at salinity and sugar detection in water considering dielectric properties,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 3, pp. 667–672, 2018, doi: 10.1002/mop.31027.
- [25] M. T. Islam, S. S. Islam, A. S. Rocky, A. Alam, M. H. Chy and M. R. I. Faruque, “Design of a microstrip patch sensor antenna for the measurement of permittivity,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 1341–1344, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1192.
- [26] K. S. L. Parvathi and S. R. Gupta, “Two-channel dual-band microwave EBG sensor for simultaneous dielectric detection of liquids,” *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, vol. 146, 2022, Art. no. 154099, doi: 10.1016/j.aeue.2021.154099.
- [27] R. Moolat, M. Mani and M. Pezholil, “Asymmetric coplanar strip based stepped monopole sensor for liquid permittivity measurements,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 32, 2022, Art. no. 101063, doi: 10.1016/j.jestch.2021.09.009.
- [28] S. Sharma and P. R. Prajapati, “Permittivity measurement of biological tissues using interdigital capacitor based resonator,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 169, 2023, Art. no. 154755, doi: 10.1016/j.aeue.2023.154755.