บทความวิจัย

สายอากาศกราไฟต์โมโนโพลแบบระนาบสองย่านความถี่ ที่โค้งงอได้และมีต้นทุนต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งาน GSM/ITM/WLAN/LTE/X-band

สุวัฒน์ สกุลชาติ และ อำนวย เรืองวารี*
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วัชรพล นาคทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วรนุศย์ ทองพูล
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2549 4620 อีเมล: amnoiy.r@en.rmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.004
รับเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขเมื่อ 6 พฤษภาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 31 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 4 ธันวาคม 2566
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่โค้งงอได้และมีต้นทุนต่ำ ด้วยแผ่นกราไฟต์ที่สร้างจากส่วนผสมของผงกราไฟต์กับกาวเอนกประสงค์ การดำเนินการเริ่มจากออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน จากนั้นนำมาปรับจูนโครงสร้างด้วยเทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์และเพิ่มสตับที่บริเวณขอบด้านล่างของตัวแผ่พลังงาน การปรับโครงสร้างดังกล่าวส่งผลทำให้สายอากาศที่ปรับจูนโครงสร้างสามารถรองรับการใช้งานย่านความถี่เพิ่มขึ้นจากเดิมจากหนึ่งย่านความถี่เป็นสองย่านความถี่ คือย่านความถี่ต่ำ 1.72–4.29 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่สูง 4.59–9.09 กิกะเฮิรตซ์ ความถี่ใช้งานของสายอากาศทั้งสองย่านครอบคลุมการประยุกต์ใช้งานระบบ GSM ITM WLAN LTE41 และย่านความถี่ X-band ของระบบการสื่อสารย่านดาวเทียม ผลการวัดทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว มีเกณฑ์การขยายเฉลี่ย 1.91 เดซิเบล และ 1.97 เดซิเบล ที่ย่านความถี่ต่ำ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่สูง 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล การประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่ สายอากาศกราไฟต์ เทคนิคการเซาะร่อง สายอากาศโค้งงอได้

การอ้างอิงบทความ: สุวัฒน์ สกุลชาติ, อำนวย เรืองวารี, วัชรพล นาคทอง และ วรนุศย์ ทองพูล, "สายอากาศกราไฟต์โมโนโพลแบบระนาบสองย่านความถี่ ที่โค้งงอได้และมีต้นทุนต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งาน GSM/ITM/WLAN/LTE/X-band," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 241-155838, ม.ค.–มี.ค. 2567.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2567
The Journal of KMUTNB., Vol. 34, No. 1, Jan.–Mar. 2024

Research Article

Low-Cost, Flexible Dual-Band Planar Monopole Graphite Antenna for GSM/ ITM/WLAN/LTE/X-band Applications

Suwat Sakulchat and Amnoiy Ruengwaree*
Department of Electronics and Telecommunication, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand
Watcharaphon Naktong
Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand
Voranuch Thongpool
Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2549 4620, E–mail: amnoiy.r@en.rmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.004
Received 28 February 2021; Revised 13 May 2022; Accepted 31 May 2022; Published online: 4 December 2023
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to design and fabricate a flexible, low-cost planar monopole antenna using a graphite sheet produced from graphite powder and all-purpose glue. The initial step is the design of a simple rectangular monopole antenna. Structural fine-tuning was done by etching the ground plane and incorporating a stub to the end of the antenna radiator. The restructuring resulted in the structurally tuned antenna supporting a frequency bandwidth expansion from single to dual bands: 1.72–4.29 GHz low band and 4.59–9.09 GHz high band, which cover GSM, ITM, WLAN, LTE41, and X-band in satellite communication applications. According to the measurement results, the proposed antennas are omnidirectional in a single plane radiation with an average gain of 1.91 dBi and 1.97 dBi at 2.45 GHz and 5.8 GHz, respectively.

Keywords: Monopole Antenna, Dual-Band Application, Graphite Antenna, Etching Technique, Flexible Antenna

Please cite this article as: S. Sakulchat, A. Ruengwaree, W. Naktong, and V. Thongpool, "Low-cost, flexible dual-band planar monopole graphite antenna for GSM/ITM/WLAN/LTE/X-band applications," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–14, ID. 241-155838, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีดิจิทัลและระบบอัจฉริยะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น ได้แก่ ด้านการติดต่อสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุปกรณ์สำคัญที่รองรับการทำงานดังกล่าว คือ สายอากาศที่ต้องเร่งพัฒนาเพื่อให้สามารถครอบคลุมการประยุกต์ใช้งานส่วนต่างๆ เช่น การรับ-ส่งข้อมูลภาพและวิดีโอที่ทำงานได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [1], [2] ด้านการแพทย์ที่มีการนำเทคโนโลยีด้านการส่งผ่านข้อมูลผ่านสายอากาศมาประยุกต์ใช้รับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายระหว่างห้องปฏิบัติการกับห้องควบคุม เพื่อแจ้งเตือน เฝ้าระวังหรือวิเคราะห์ประเมินอาการของผู้ป่วย [3], [4] ด้านระบบอัจฉริยะ เช่น กลุ่มสมาร์ทโฮม สมาร์ทซิตี้ หรือสมาร์ทฟาร์ม มีการรับส่งข้อมูลผ่านระบบการสื่อสารไร้สายเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ทำงานได้ตามต้องการในระยะไกล [5], [6] และด้านการสำรวจ และบันทึกภาพจากโดรนหรืออากาศยานไร้คนขับได้มีการนำคลื่นในย่านความถี่ไร้สายมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม และส่งผ่านข้อมูลภาพจากโดรนที่บินอยู่บนอากาศไปแสดงผลที่ภาคพื้นดิน อีกทั้งยังพบว่า เทคโนโลยีของโดรนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการนำ โดรนไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ หลากหลายประเภทมากยิ่งขึ้น [7], [8]

จากเหตุผลที่กล่าวมาพบว่า มีความจำเป็นที่ต้องออกแบบพัฒนาสายอากาศเพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่และเมื่อพิจารณาข้อมูลพบว่ายังมีสายอากาศที่นำมาใช้งานกับระบบการสื่อสารไร้ โดยสายสายอากาศหนึ่งตัวรองรับการใช้งานในย่านความถี่เพียงความถี่เดียวตามมาตรฐาน IEEE เช่น ย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (2.40–2.48 กิกะเฮิรตซ์) หรือย่านความถี่ IEEE 802.11b/g/n 5.80 กิกะเฮิรตซ์ (5.75–5.85 กิกะเฮิรตซ์) [9], [10] หรือยังมีสายอากาศที่มีขนาดไม่กะทัดรัดและไม่สามารถติดตั้งบนพื้นผิวที่โค้งได้ดี [11] ดังนั้นการใช้สายอากาศหนึ่งตัวหนึ่งความถี่ร่วมกับอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบการสื่อสารหรือควบคุมแบบไร้สายเป็นความต้องการและได้รับความสนใจที่นักวิจัยทำการพัฒนาและออกแบบให้สายอากาศที่ใช้งานจริงได้สองย่านความถี่และมีคุณสมบัติด้านกายภาพที่มีขนาดกะทัดรัด และน้ำหนักเบา เช่น อุปกรณ์เราเตอร์วายฟาย สายอากาศแบบดองเกิ้ล [12] รวมไปถึงชุดรีโมทคอนโทรลควบคุมการทำงานของโดรน โดยที่สายอากาศที่ใช้กับอุปกรณ์ดังกล่าวนั้นส่วนมากเป็นสายอากาศแบบไดโพลที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโลหะแท่งยาว หรือเป็นแบบแผ่นโลหะที่ไม่สามารถโค้งได้ [13] และเมื่อนำไปติดตั้งบนโครงสร้างที่มีส่วนโค้งจะไม่สามารถทำได้ เช่น พื้นผิวของกระจกรถยนต์ พื้นผิวของท่อทรงกระบอก พื้นผิวโครงสร้างอาคารที่มีส่วนโค้ง พื้นผิวของโครงสร้างยาน พาหนะที่โค้งงอหรือชุดเสื้อผ้าสำหรับผู้ป่วย

จากที่กล่าวมาผู้วิจัยมีแนวคิด และสนใจพัฒนาสายอากาศที่สามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานได้สองย่านความถี่ มีน้ำหนักเบา ราคาการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ และมีโครงสร้างที่สามารถโค้งงอได้ โดยได้ทำการเลือกวัสดุที่เป็นโครงสร้างสายอากาศด้วยการนำสารประเภทกราไฟต์ (Graphite) ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า เมื่อนำมาทำเป็นแผ่นจะมีคุณสมบัติที่สามารถโค้งงอได้ มีราคาถูกและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุตัวนำประเภทเงิน และทองแดง การออกแบบสายอากาศสามารถตอบสนองต่อย่านความถี่สองย่านความถี่ คือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.80 กิกะเฮิรตซ์ จากงานวิจัย [14] พบว่า คุณสมบัติของสารกราไฟต์เมื่อนำไปผลิตเป็นแผ่นจะสามารถวางยึดติดบนวัสดุฐานรองที่โค้งงอได้ มีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการผลิต สุดท้ายผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จะได้สายอากาศแบบระนาบที่สร้างจากแผ่นกราไฟต์ที่รองรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่คือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.80 กิกะเฮิรตซ์ ลักษณะโครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและนำมาปรับจูนด้วยเทคนิคการเซาะร่องบนระนาบกราวด์ร่วม [15], [16] ร่วมกับการเพิ่มสตับที่ขอบด้านล่างแผ่นตัวแผ่พลังงาน [17], [18] เพื่อช่วยเพิ่มย่านความถี่ใช้งานให้ตอบสนองและครอบคลุมตรงกับความถี่ตามมาตรฐานทั้งสองย่านความถี่

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศ

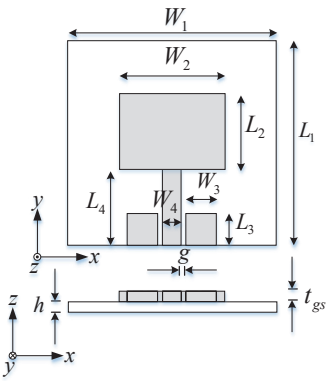
ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศเริ่มจากการเลือก

ออกแบบสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบที่ป้อนด้วยสายส่งระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐานทั่วไป กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) กรณีโครงสร้างแผ่นทองแดงเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นเลือกเปลี่ยนวัสดุจากแผ่นทองแดงไปเป็นแผ่นกราไฟต์ที่ผลิตขึ้นเอง ตามส่วนผสมสูตรที่ 4 ของงานวิจัย [14] แผ่นกราไฟต์ดังกล่าวมีคุณสมบัติคือค่าความนำ σ = 1.56 S/cm ค่าความหนา t_{gs} = 0.15 มิลลิเมตร โดยมีวัสดุฐานรองเป็นพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ε_r = 2.8 ค่าความหนาวัสดุฐานรอง h = 0.135 มิลลิเมตร จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความยาวคลื่น (λ_{gs}) และความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ (f_{gs}) กรณีที่โครงสร้างสายอากาศทำจากแผ่นกราไฟต์ พบว่าค่าความยาวคลื่นและความถี่เรโซแนนซ์ สามารถคำนวณค่าทั้งสองได้โดยนำค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) กรณีโครงสร้างแผ่นทองแดงของสายอากาศที่กำหนดมาร่วมคำนวณดังสมการที่ (1) และ (2) [14] ตามลำดับ

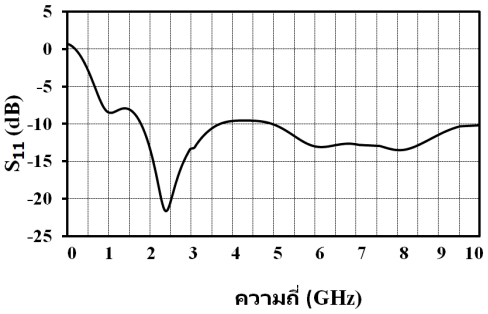
$$\lambda_{gs} = \frac{c}{f_{gs}} \tag{1}$$

$$f_{gs} = \frac{f_r}{2.16} \tag{2}$$

นำผลทั้งสองที่ได้จากการคำนวณไปแทนค่าในสมการพื้นฐาน [19] เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแบบโมโนโพลระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนโครงสร้างแผ่นกราไฟต์ที่ออกแบบ ในขั้นตอนถัดไปนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองสายอากาศเพื่อจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST และดำเนินการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศดังกล่าวจนได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมตามต้องการ ขนาดพารามิเตอร์ที่ได้แสดงผลลัพธ์เบื้องต้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ค่าความกว้างของวัสดุฐานรอง W_1 = 96 มิลลิเมตร ค่าความกว้างของตัวแผ่พลังงาน W_2 = 35 มิลลิเมตร ค่าความกว้างของระนาบกราวด์ W_3 = 12.7 มิลลิเมตร ค่าความกว้างของสายนำสัญญาณ W_4 = 7.6 มิลลิเมตร ค่าความยาวของวัสดุฐานรอง L_1 = 78 มิลลิเมตร ค่าความยาวของตัวแผ่พลังงาน



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [14]



รูปที่ 2 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน

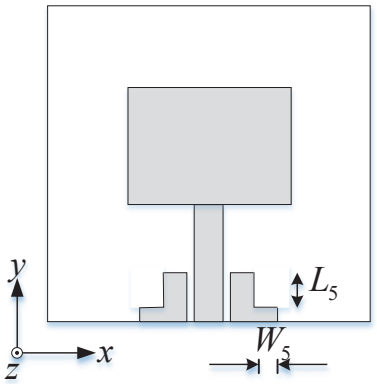
L_2 = 25 มิลลิเมตร ค่าความยาวของระนาบกราวด์ L_3 = 22.75 มิลลิเมตร ค่าความยาวของสายนำสัญญาณ L_4 = 45 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์กับสายนำสัญญาณ g = 0.6 มิลลิเมตร ตำแหน่งพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) แสดงได้ดังรูปที่ 2

เมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองแบบในรูปที่ 2 พบว่าค่า S_{11} ย่านความถี่ที่มีค่าต่ำกว่า –10 เดซิเบล จะมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์สองช่วงความถี่คือ ในช่วงความถี่ต่ำ 1.85–3.65 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 2.435 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าที่ต่ำที่สุดคือ –21.63 เดซิเบล และช่วงความถี่สูง 5.11–9.72 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 8.027 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าที่ต่ำที่สุดคือ –13.50 เดซิเบล สังเกต

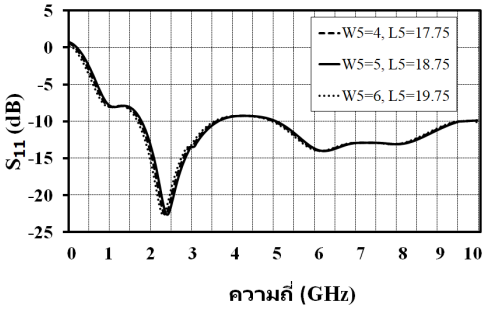
ได้ว่าช่วงความถี่ต่ำจะครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐานในย่าน GSM 1900 (1800–1900 เมกะเฮิรตซ์) ITM 2000 (2000–2100 เมกะเฮิรตซ์) IEEE802.11b/g/n (2.40–2.48 กิกะเฮิรตซ์) และ LTE band 41 (2.469–2.690 กิกะเฮิรตซ์) แต่ที่ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่สูงนี้จะปรากฏที่ความถี่ 8.027 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่ใกล้เคียงสำหรับรองรับการใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดคือย่าน IEEE802.11a (5.15–5.25 กิกะเฮิรตซ์) และ IEEE802.11 b/g/n (5.75–5.85 กิกะเฮิรตซ์) ที่อาจส่งผลกระทบต่อการนำสายอากาศไปทดสอบหรือประยุกต์ใช้งานจริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับจูนให้ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่สูงให้เลื่อนมารองรับการใช้งานช่วงความถี่ 5.80 กิกะเฮิรตซ์ ทางผู้วิจัยได้ออกแบบกระบวนการปรับจูนแบ่งเป็นสามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรก นำโครงสร้างสายอากาศจากรูปที่ 1 ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่บริเวณด้านข้างของระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน [15], [16] ด้วยการปรับค่าความกว้าง W_5 ตั้งแต่ 4, 5 และ 6 มิลลิเมตร และปรับค่าความยาว L_5 ตั้งแต่ 17.75, 18.75 และ 19.75 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่า ที่ความกว้าง W_5 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และความยาว L_5 เท่ากับ 18.75 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด สายอากาศที่ผ่านการปรับโครงสร้างตามขั้นตอนที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 3 หลังจากปรับจูนพบว่า ผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์มีการขยับค่าของความถี่ลดลงจาก 8.027 กิกะเฮิรตซ์ มาปรากฏที่ 6.235 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีค่า S_{11} ต่ำสุดเท่ากับ –14.02 เดซิเบล และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 5.22–9.64 กิกะเฮิรตซ์ แต่เมื่อพิจารณาค่าความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ต่ำมีการปรับเลื่อนมาที่ความถี่ 2.456 กิกะเฮิรตซ์ และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 1.84–3.61 กิกะเฮิรตซ์ มีค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดคือ –22.67 เดซิเบล แสดงได้ดังรูปที่ 4

ขั้นตอนที่สอง ทำการเซาะร่องบริเวณตรงกลางระนาบกราวด์ด้านแนวตั้งรูปตัวแอลทั้งสองข้างด้วยการปรับค่าความกว้าง W_6 ตั้งแต่ 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร และปรับค่าความยาว L_6 ตั้งแต่ 0.5, 1.0 และ 1.5 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างจุดตรงกลางของขนาดจากขอบล่างของระนาบกราวด์คือ L_{61} เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร จากการปรับจูนในขั้นตอนที่สอง

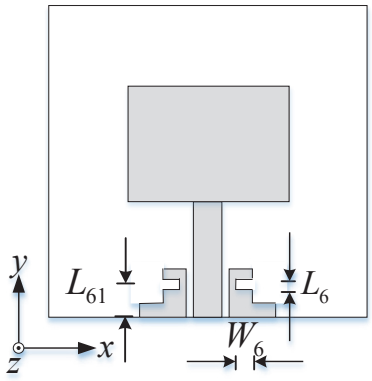


รูปที่ 3 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับจูนในขั้นตอนแรก

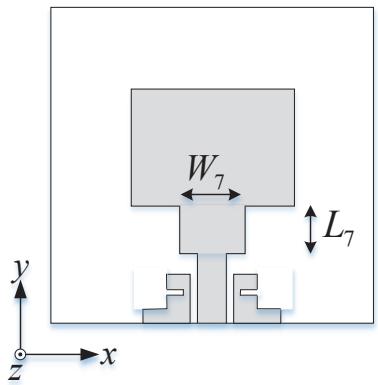


รูปที่ 4 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเปลี่ยนแปลง W_5 กับ L_5

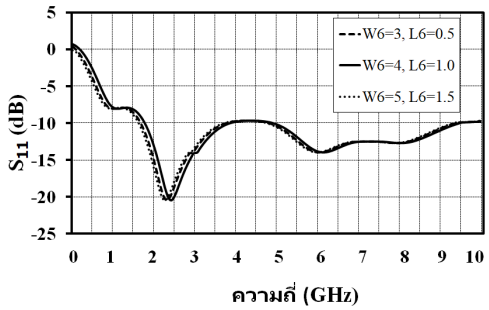
พบว่า ที่ความกว้าง W_6 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด โครงสร้างสายอากาศที่ได้มีการปรับจูนแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 เมื่อทำการพิจารณาผลการจำลองแบบค่า L_6 ที่ได้จากการปรับโครงสร้างสายอากาศในขั้นตอนที่สองพบว่าตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์มีการเลื่อนเข้ามาจากความถี่ 6.235 กิกะเฮิรตซ์ มาปรากฏที่ความถี่ 6.125 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดคือ –13.97 เดซิเบล และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 5.06–9.09 กิกะเฮิรตซ์ แต่พบว่า ค่า S_{11} ในช่วงความถี่ต่ำขยับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือขยับมาที่ความถี่ 2.476 กิกะเฮิรตซ์ และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 1.85–3.82 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดคือ –20.46 เดซิเบล แสดงดังรูปที่ 6



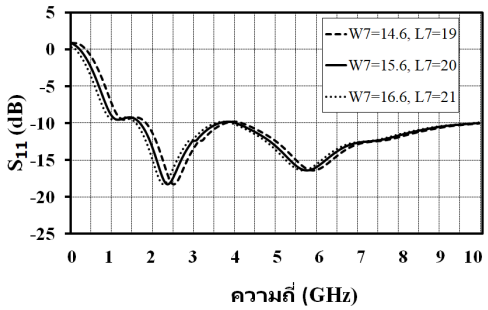
รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับจูนในขั้นตอนที่สอง



รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับจูนในขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 6 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเปลี่ยนแปลง W_6 กับ L_6

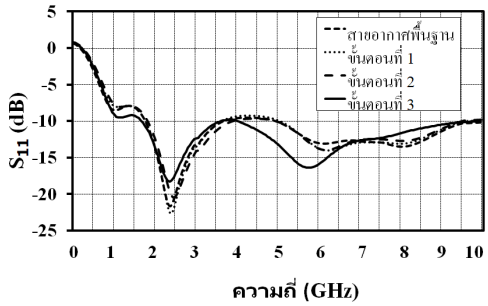


รูปที่ 8 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเปลี่ยนแปลง W_7 กับ L_7

สำหรับขั้นตอนสุดท้าย การปรับจูนโครงสร้างด้วยการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบริเวณด้านใต้แผ่นตัวแผ่พลังงานทั้งสองข้าง [17], [18] กระบวนการปรับเริ่มจากการปรับขนาดค่าความกว้าง W_7 ตั้งแต่ 14.6 15.6 และ 16.6 มิลลิเมตร และปรับขนาดค่าความยาว L_7 ตั้งแต่ 19, 20 และ 21 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดที่เหมาะสมคือที่ความกว้าง W_7 เท่ากับ 15.6 มิลลิเมตร และความยาว L_7 เท่ากับ 20 มิลลิเมตร รูปโครงสร้างสายอากาศที่ปรับจูนแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 7

เมื่อพิจารณาผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของโครงสร้างสายอากาศรูปที่ 7 พบว่า สายอากาศมีการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ให้เลื่อนจากความถี่ 6.125 กิกะเฮิรตซ์ มาปรากฏที่ความถี่ 5.795 กิกะเฮิรตซ์ ค่า S_{11} ที่ต่ำสุดคือ –16.41 เดซิเบล ที่ย่านความถี่ 5.75–5.85 กิกะเฮิรตซ์ และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 4.05–9.51 กิกะเฮิรตซ์ ที่ช่วงความถี่ต่ำมีค่าความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.426 กิกะเฮิรตซ์ และมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 1.76–3.58 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีค่า S_{11} เท่ากับ –18.27 เดซิเบล ผลการจำลองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 8 จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่า S_{11} ที่เกิดจากการปรับโครงสร้างสายอากาศตามขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 9

สรุปพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับจูนในขั้นตอนสุดท้ายมีรายละเอียดดังนี้ ค่าความกว้างช่องที่เซาะร่องบริเวณระนาบกราวด์ W_5 = 5 มิลลิเมตร ค่าความกว้างช่องกราวด์สอง W_6 = 4 มิลลิเมตร ค่าความกว้างสตับ W_7 = 15.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรับจูน ทั้ง 3 ขั้นตอน

ค่าความยาวช่องกราวด์แรก L_5 = 18.75 มิลลิเมตร ค่าความยาวช่องกราวด์สอง L_6 = 1 มิลลิเมตร ค่าความสูงช่องกราวด์สองจากขอบล่าง L_{61} = 12.5 มิลลิเมตร และค่าความยาวสตับ L_7 = 20 มิลลิเมตร

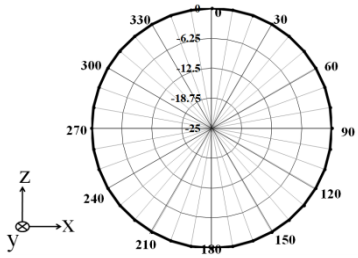
สำหรับผลการจำลองแบบของแบบรูปการแผ่พลังงานตามระนาบ XZ ลักษณะเป็นแบบรอบทิศทางและในส่วนระนาบ YZ จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานลักษณะสองทิศทาง ผลการจำลองแบบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 10–11 และมีค่าเกณฑ์การขยายเท่ากับ 2.71 เดซิเบล และ 4.5 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

2.2 การจำลองแบบการโค้งงอสายอากาศ

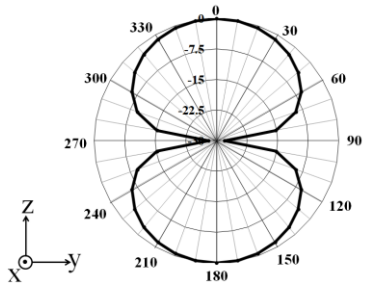
ในส่วนนี้เป็นการจำลองแบบการโค้งงอโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม CST แสดงได้ดังรูปที่ 12 โดยทำการโค้งงอด้วยรัศมีที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 60 40 และ 25 มิลลิเมตร และได้ทำการเปรียบเทียบผลของค่า S_{11} แสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะพบว่า ค่า S_{11} ของทั้งสองความถี่นั้น จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับสายอากาศในระนาบเรียบปกติ

2.3 การผลิตแผ่นกราไฟต์

สำหรับเนื้อหาส่วนนี้เป็นการนำเสนอกระบวนการผลิตแผ่นกราไฟต์ที่ผลิตขึ้นภายในห้องปฏิบัติการด้วยส่วนผสมตามงานวิจัย [14] มีรายละเอียดประกอบด้วยผงกราไฟต์

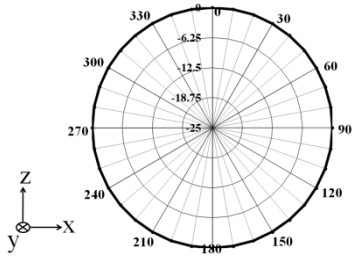


(ก) ระนาบ XZ

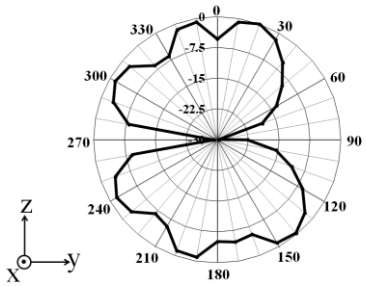


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 10 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

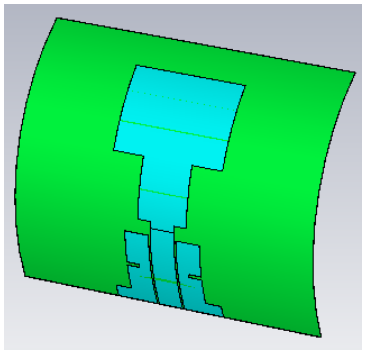


(ก) ระนาบ XZ

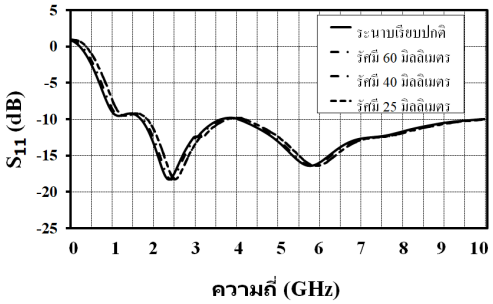


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 11 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในย่านความถี่ 5.80 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 12 การจำลองแบบการโค้งงอโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับบนโครงสร้างสายอากาศที่โค้งงอที่รัศมี 60, 40 และ 25 มิลลิเมตร

(Sigma-Aldrich, Graphite Powder 282863) จำนวน 13 กรัม กาวเอนกประสงค์ (Elmer's brand Glue-All) จำนวน 20 กรัม และน้ำบริสุทธิ์ จำนวน 6.5 กรัม แสดงได้ดังรูปที่ 14 (ก) และหลังจากทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันทำให้ได้กาวกราไฟต์ที่ผสมเสร็จพร้อมนำไปสร้างแผ่นสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 14 (ข)

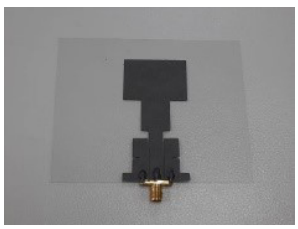
สำหรับขั้นตอนต่อไป นำกาวกราไฟต์ที่ผสมเสร็จแล้วมาเทลงบนแบบพิมพ์กระดาษสติ๊กเกอร์ (Kodak Digital Paper) ที่สร้างตามขนาดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามรูปที่ 7 แสดงดังรูปที่ 15 ขั้นตอนถัดไปใช้ยางปาดสกรีน (SQW7GV-H: 10 cm) ปาดลงบนพื้นผิวแบบพิมพ์เพื่อให้เกิดความเรียบเสมอกันของแผ่นกราไฟต์ จากนั้นทิ้งชิ้นงานดังกล่าวไว้ประมาณ 6 ชั่วโมง จนแห้งสนิทและทำการแกะแบบพิมพ์สติ๊กเกอร์ออกทำให้ได้

(ก) ผงกราไฟต์ กาวและน้ำ

(ข) กาวกราไฟต์ที่ผสมเสร็จแล้ว

รูปที่ 14 ส่วนผสมของกาวกราไฟต์

รูปที่ 15 แบบพิมพ์



รูปที่ 16 สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบต้นแบบ

แผ่นสายอากาศกราไฟต์ที่มีความเหนียวนุ่ม และโค้งงอตามวัสดุฐานรองตามที่ออกแบบ ในขั้นตอนสุดท้ายทำการนำหัว SMA มาติดตั้งในส่วนป้อนสัญญาณ กระบวนการสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบต้นแบบด้วยโครงสร้างแผ่นกราไฟต์เพื่อรองรับการใช้งานสองย่านความถี่จึงเสร็จสิ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16

3. ผลการทดลอง

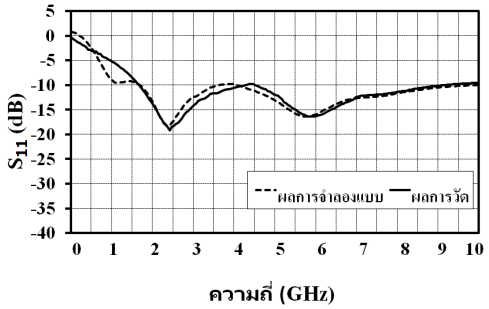
3.1 ผลการวัด

เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบสำเร็จ ขั้นตอนต่อไปเป็นการวัดทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น E8363B การทดสอบประกอบด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์อัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ จากผลการวัดพบว่าย่านความถี่ต่ำมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 2.466 กิกะเฮิรตซ์ ค่า S_{11} = –19.15 เดซิเบล ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ คือ 1.72–4.29 กิกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่สูงมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 5.782 กิกะเฮิรตซ์ ค่า S_{11} = –16.32 เดซิเบล ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ คือ 4.59–9.29 กิกะเฮิรตซ์ และเมื่อนำค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบ พบว่า ค่าทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 17 และตารางที่ 1

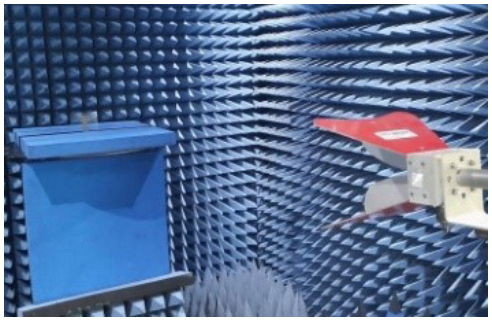
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดจริง

ความถี่ (GHz)	ผลที่ได้	แบนด์วิดท์ (GHz)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	S_{11} (dB)
2.45	ผลการจำลองแบบ	1.76–3.58	2.426	–18.27
	ผลการวัดจริง	1.72–4.29	2.466	–19.15
5.80	ผลการจำลองแบบ	4.05–9.51	5.795	–16.41
	ผลการวัดจริง	4.59–9.29	5.782	–16.32

สำหรับผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้ทำการทดสอบที่สองความถี่ใช้งานคือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ทั้งในระนาบ XZ และ YZ ในห้องทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 18 โดยมีรายละเอียดผลการทดสอบกล่าวคือที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ในระนาบแกน XZ สายอากาศต้นแบบจะมีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง ส่วนในระนาบ YZ มีลักษณะการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองแบบมาเปรียบเทียบกับผล



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดจริง

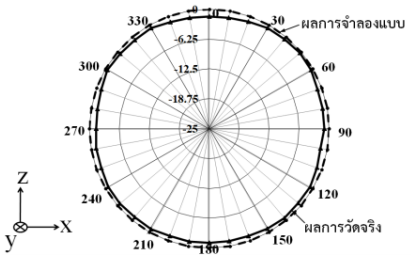


รูปที่ 18 ห้องทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

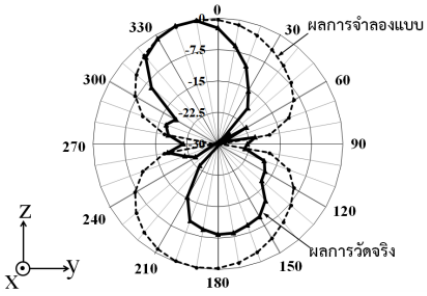
ที่ได้จากการวัดจริงดังกล่าวพบว่า ค่าทั้งสองมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19–20 โดยมีเกณฑ์การขยาย 1.92 เดซิเบล และ 1.97 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

3.2 การทดสอบคุณสมบัติการโค้งงอของสายอากาศ

ในส่วนของการนำโครงสร้างสายอากาศต้นแบบที่สร้างจากแผ่นกราไฟต์มาทำการทดสอบคุณสมบัติการโค้งงอนั้น จะทำการนำมาประยุกต์ด้วยการโค้งงอบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟมทรงกระบอกที่มีรัศมีโค้งสามระดับ คือ 60, 40 และ 25 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 21 โดยทำการวัดค่าคุณสมบัติตามการโค้งงอและนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีระนาบเรียบปกติ ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และยังคงครอบคลุมช่วงความถี่ตามย่านความถี่ที่ใช้งานได้อยู่ แสดงได้ดังรูปที่ 22

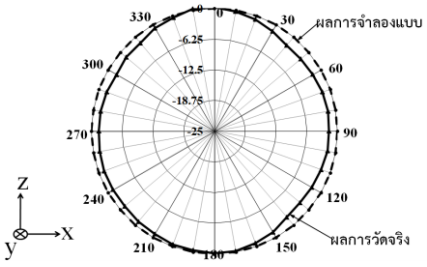


(ก) ระนาบ XZ

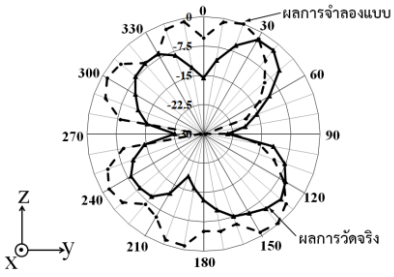


(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 19 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



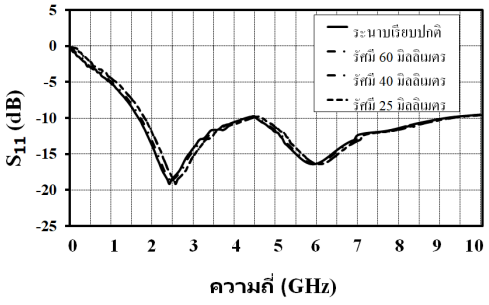
(ก) ระนาบ XZ



(ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 20 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในย่านความถี่ 5.80 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 21 การทดสอบคุณสมบัติ

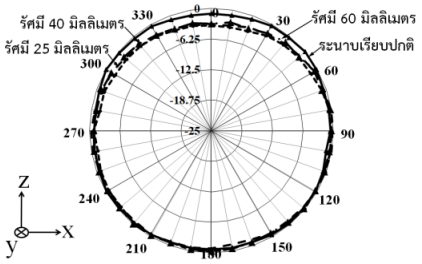


รูปที่ 22 การเปรียบเทียบผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กับ 5.80 กิกะเฮิรตซ์ บนโฟมขนาดรัศมี 60 40 และ 25 มิลลิเมตร

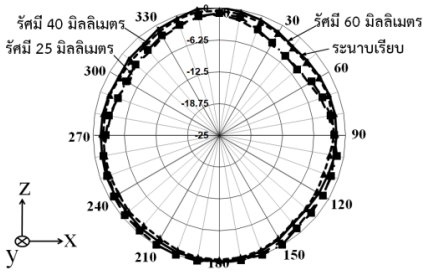
แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีการโค้งงอสายอากาศที่สร้างจากแผ่นกราไฟต์ไปตามความโค้งงอของโฟมทรงกระบอกทั้งสามระดับนั้นจะถูกนำไปวัดผลด้วยระบบการวัดแบบอัตโนมัติในห้องทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองย่านความถี่เพียงเล็กน้อยและยังคงมีแบบรูปที่เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบ XZ แสดงได้ดังรูปที่ 23

3.3 การประยุกต์ใช้งานจริง

จากที่ได้ดำเนินการสร้าง ทดสอบและวัดผลพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศกราไฟต์ทั้งสองย่านความถี่แล้ว เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการนำสายอากาศต้นแบบมาทำการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบ WiFi โดยต่อร่วมกับอุปกรณ์ Access Point



(ก) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



(ข) ความถี่ 5.80 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 23 การเปรียบเทียบผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบนโฟมขนาดรัศมี 60 40 และ 25 มิลลิเมตร

ยี่ห้อ TP-LINK รุ่น TPWDR7400 ที่มีการรับส่งสัญญาณแบบสองย่านความถี่คือย่าน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กับ 5.8 กิกะเฮิรตซ์

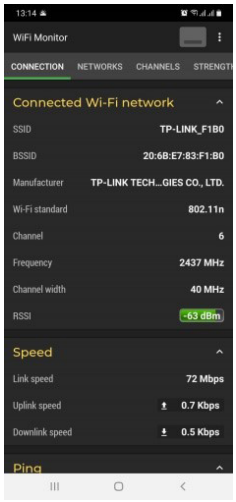
เบื้องต้นจะทำการใช้สายอากาศดั้งเดิมซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นวงจรพิมพ์และทำการวัดค่าระดับสัญญาณและความถี่ในการรับ-ส่งสัญญาณ จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบที่ออกแบบและสร้างของงานวิจัยนี้ไปติดตั้งแทนสายอากาศดั้งเดิมและทำการวัดและทดสอบ บันทึกผลโดยสายอากาศต้นแบบจะถูกติดตั้งไว้ในกล่อง โดยการทดสอบทั้งสองกรณีแสดงได้ดังรูปที่ 24

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณร่วมกับ Access Point ได้เลือกใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อ Samsung รุ่น A50s โดยติดตั้งโปรแกรม WiFi monitor เพื่อทดสอบคุณภาพสัญญาณ ระยะทดสอบสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ Access Point กับโทรศัพท์เคลื่อนที่จะกำหนดระยะเป็น 10, 20 และ 30 เมตร ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 25 และเมื่อทำการบันทึกผลการทดสอบทั้งสามระยะแล้ว นำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณที่วัดได้จากการใช้งาน

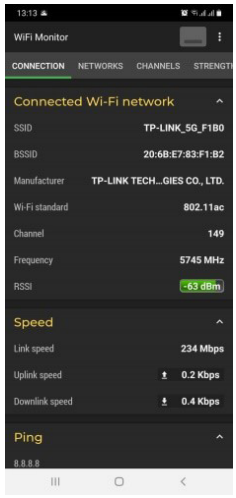
(ก) การทดสอบระบบร่วมกับสายอากาศดั้งเดิม

(ข) การทดสอบระบบร่วมกับสายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 24 การติดตั้งสายอากาศงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบ



(ก) จอแสดงผลย่าน 2.45 กิกะเฮิรตซ์



(ข) จอแสดงผลย่าน 5.8 กิกะเฮิรตซ์

รูปที่ 25 การทดสอบการใช้งาน

ของสายอากาศทั้งสองกรณี แสดงได้ดังตารางที่ 2 จากผลการเปรียบเทียบพบว่า สายอากาศต้นแบบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถรับระดับสัญญาณได้ใกล้เคียงกับสายอากาศดั้งเดิมของ Access Point ซึ่งสามารถนำมาใช้งานแทนที่กันได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2 ค่าระดับสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศดั้งเดิมกับสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอ

สายอากาศ	ความถี่ (GHz)	ระดับสัญญาณ (dBm)		
		10 เมตร	20 เมตร	30 เมตร
สายอากาศดั้งเดิม	2.437	–51	–63	–73
	5.745	–51	–63	–74
สายอากาศต้นแบบ	2.437	–52	–65	–75
	5.745	–52	–65	–76

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองย่านความถี่ด้วยแผ่นกราไฟต์ที่ผลิตจากส่วนผสมของผงกราไฟต์และกาวเอนกประสงค์บนวัสดุฐานรองพอลิเอสเตอร์ที่สามารถโค้งงอได้ และยังมีต้นทุนต่ำกว่าผงตัวนำประเภทเงินและทองแดง ในการสร้างสายอากาศต้นแบบใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ทั้งสองข้างร่วมกับการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขอบด้านล่างของตัวแผ่พลังงาน ส่งผลให้สายอากาศที่ปรับจูนแล้วมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เพิ่มจากหนึ่งย่านความถี่เป็นสองย่านความถี่ใช้งาน โดยที่ช่วงความถี่ต่ำมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 2.466 กิกะเฮิรตซ์ ค่า S_{11} = –19.15 เดซิเบล อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 1.72–4.29 กิกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่สูงมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ ที่ 5.782 กิกะเฮิรตซ์ ค่า S_{11} = –16.32 เดซิเบล อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 4.59–9.29 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งในช่วงความถี่ต่ำครอบคลุมการใช้งานตามมาตรฐานในย่าน GSM (1800–1990 เมกะเฮิรตซ์) ITM 2100 (1960–2180 เมกะเฮิรตซ์) IEEE802.11b/g/n (2.40–2.48 กิกะเฮิรตซ์) และ LTE Band 41 (2.469–2.690 กิกะเฮิรตซ์) ส่วนในช่วงความถี่สูงจะครอบคลุมการใช้งานในย่าน IEEE802.11a (5.15–5.25 กิกะเฮิรตซ์) IEEE802.11 b/g/n (5.75–5.85 กิกะเฮิรตซ์) และย่าน X-band (7.25–7.75 กิกะเฮิรตซ์) ตามที่ต้องการ ในส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว มีอัตราขยาย 1.92 เดซิเบล และ 1.97 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบใช้งานจริงร่วมกับอุปกรณ์ Access Point พบว่า สายอากาศโมโนโพลแบบระนาบสองย่านความถี่บนโครงสร้างแผ่นกราไฟต์ต้นแบบนี้ มีค่าการรับ-ส่งสัญญาณได้ใกล้เคียงกันกับสายอากาศดั้งเดิมที่ติดตั้งมากับ Access Point โดยสายอากาศที่นำเสนอสามารถพัฒนาเพื่อนำไปพิมพ์บนวัสดุฐานรองประเภทกระจก พลาสติกหรือผ้าดิบเพื่อประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านเทคโนโลยีวัสดุอัจฉริยะต่อไปได้ในอนาคต หรือประยุกต์ติดตั้งใช้งานบนพื้นผิวที่มีลักษณะโค้งเช่น บนกระจกรถ โครงสร้างอาคารที่มีลักษณะพื้นผิวที่โค้ง ท่อซีเมนต์หรือพลาสติกส่งน้ำหรือของเหลว พื้นผิวไซโลสำหรับเก็บวัสดุที่เป็นทรงกระบอก สายรัดข้อมือมนุษย์และสัตว์เลี้ยงในฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัยเพื่อใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ดร.ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในการให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Hall Effect Measurement System)

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Thakur and M. Tamrakar, “Dual band ultra slim WLAN antenna design for mobile devices,” in *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, Singapore, 2019, pp. 1203–1205.

[2] A. Toktas and D. Ustun, “Dual-element MIMO inverted-F antenna for mobile devices,” in *IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*, Tbilisi, Georgia, 2020, pp. 126–129.

[3] M. M. Mansor, S. K. A. Rahim, and U. Hashim, “A CPW-fed 2.45 GHz wearable antenna using conductive nanomaterials for on-body

applications," in *IEEE Region 10 Symposium*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 240–243.

[4] H. Sajjad, W. T. Sethi, S. Khan, and L. Jan, "Compact dual-band implantable antenna for E-health monitoring," in *International Symposium on Wireless Systems and Networks*, Lahore, Pakistan, 2017.

[5] T. Cultice, D. Ionel, and H. Thapliyal, "Smart home sensor anomaly detection using convolutional autoencoder neural network," in *IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems*, Chennai, India, 2020, pp. 67–70.

[6] V. Govindraj, M. Sathiyanarayanan, and B. Abubakar, "Customary homes to smart homes using internet of things (IoT) and mobile application," in *International Conference On Smart Technologies For Smart Nation*, Bengaluru, India, 2017, pp. 1059–1063.

[7] E. Yanmaz, S. Yahyanejad, B. Rinner, H. Hellwagner, and C. Bettstetter, "Drone networks: Communications, coordination, and sensing," *Elsevier: Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 1–15, 2018.

[8] F. Veroustraete, "The rise of the drones in agriculture," *EC Agriculture*, vol. 2, no. 2, pp. 235–237, 2015.

[9] M. A. Malek, S. Hakimi, S. K. Abdul Rahim, and A. K. Evizal, "Dual-band CPW-fed transparent antenna for active RFID tags," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 919–922, 2015.

[10] X. Bai, T. Ali, and L. Xu, "A dual-frequency slotted CPW antenna for 2.45/5.8 GHz RF energy harvesting based on PVDF," in *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China*, Nanjing, China, 2019.

[11] S. Lamultree, C. Jansri, and C. Phongcharoenpanich, "A compact dual-band circular monopole antenna with partial ground plane for 2.45/5.5 GHz WLAN applications," in *2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Hua Hin, Thailand, 2019.

[12] S. Jeenawong, P. Sangpet, P. Moeikham, and P. Akkaraekthalin, "A compact modified E-shaped monopole antenna for USB dongle applications," in *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, Korea (South), 2018.

[13] W. S. Chen, M. H. Liang, T.Y. Zhuo, J. H. Lin, and J. H. Hsu, "Dual-strip monopole antenna for USB dongle applications," in *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, Nagoya, Japan, 2018.

[14] S. Sakulchat, A. Ruengwaree, V. Thongpool, and W. Naktong, "Low-cost, flexible graphite monopole patch antenna for wireless communication applications," CMC-Computers, *Materials & Continua*, vol. 71, no. 3, pp. 6069–6088, 2022.

[15] A. Ruengwaree, W. Naktong, and A. Namsang, "A TE-shaped monopole antenna with semicircle etching technique on the ground plane for UWB applications," in *Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, Nanjing, China, 2013.

[16] W. Naktong, A. Ruengwaree, and T. Pumpoung, "A study of tuning the CPW fed basic geometric

monopole antenna for UWB applications," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 17–32, 2020 (in Thai).

[17] A. Ruengwaree, A. Innok, W. Naktong, and P. Boonmaitree, "The bandwidth enhancement of rectangular slot antenna with L-shaped and double I-shaped stub tuning for WLAN/WiMAX applications," in *12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Hua Hin, Thailand, 2015.

[18] S. Chanramrd, W. Naktong, P. Thongbor, S. Sakulchat, A. Ruengwaree, and A. Namsang, "The structure tuning of plugs-shaped monopole antenna for wireless communication applications," in *International Symposium on Antennas and Propagation*, Phuket, Thailand, 2017.

[19] P. Thongbor, "Development of dual rectangular monopole antenna with arrow-shaped slot etching and mutual coupling reduction for MIMO system applications," M.S. thesis, Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2016 (in Thai).