

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบโมโหลายย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย Wi-Fi 6E

Design of a Multi-Band MIMO Microstrip Antenna for Wi-Fi 6E Wireless Communication

สุรียพร เดชพันธ์¹ จารุวรรณ นาดสูงเนิน¹ ศุภนิตา แสงมณี¹ คมเดช ภาพัฒน์บุรี¹ สำราญ สันทาลุนัย² และนุชนาฏ สันทาลุนัย^{1*}
Suriphon Detphan¹ Jaruwat Nadsungnoen¹ Supanita Sengmanee¹ Khomdet Phapatanaburi¹ Samran Santalunai² and Nuchanart Santhalunai^{1*}

Received: October 11, 2024; Revised: June 17, 2025; Accepted: June 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบหลายย่านความถี่สำหรับระบบโมโ (MIMO) ที่รองรับเทคโนโลยี Wi-Fi 6E โดยใช้เทคนิคโครงสร้างเรโซแนนซ์หลายชุดรวมกับการเพิ่มช่องว่างในแผ่นตัวนำ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นและการแยกสัญญาณ สายอากาศประกอบด้วยอิลิเมนต์ จำนวน 4 ชุด รองรับการทำงานในย่านความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz โดยเน้นการลดค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) ระหว่างพอร์ตทั้ง 4 ให้ได้ค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST Studio Suite 2024 พบว่าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB และค่าการแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตต่ำกว่า -30 dB ในทุกย่านความถี่แสดงถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์และการลดสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำแบบจำลองไปสร้างต้นแบบและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย พบว่าค่าพารามิเตอร์ S จากการวัดจริงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการจำลอง โดยเฉพาะในย่าน 6.5 GHz ที่ได้ค่าการแยกสัญญาณต่ำกว่า -34 dB และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ -39.87 dB ยืนยันความเหมาะสมของสายอากาศดังกล่าวต่อการใช้งานในระบบโมโความถี่สูง

คำสำคัญ : สายอากาศไมโครสตริป; สายอากาศหลายย่านความถี่; Wi-Fi 6E; ค่าการแยกโดดเดี่ยว

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 study introduces the design of a multi-band microstrip antenna for multiple-input multiple-output (MIMO) systems that facilitate Wi-Fi 6E wireless communication. The design utilizes various resonator structures integrated with defective ground slots to improve radiation properties and inter-port isolation. The suggested antenna comprises four elements, each proficient in functioning inside the 2.45, 5.5, and 6.5 GHz frequency bands. The design aims to reduce below the standard threshold across all four ports. Simulation results from CST Studio Suite 2024 demonstrate that the antenna attains a reflection coefficient (S_{11}) below -10 dB and inter-port isolation below -30 dB throughout all operational bands, indicating optimal impedance matching and efficient signal separation. The constructed prototype underwent testing using a vector network analyzer, and the obtained S-parameters closely aligned with the simulation outcomes. The 6.5 GHz band exhibited an isolation level below -34 dB and a minimum reflection coefficient of -39.87 dB, demonstrating that the proposed antenna design is suitable for high-frequency MIMO applications.

Keywords: Microstrip Antenna; Multi-Band Antenna; Wi-Fi 6E; Isolation

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้งานในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นด้านธุรกิจ การศึกษา หรือความบันเทิง ระบบสื่อสารไร้สายภายในพื้นที่จำกัด เช่น ภายในบ้าน สำนักงาน และพื้นที่สาธารณะ ได้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญในการเชื่อมโยงข้อมูล (Tanjaroen, 2012; Praditthira, 2024) การใช้งานมิได้จำกัดเพียงอุปกรณ์พื้นฐานอย่างโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือคอมพิวเตอร์พกพาเท่านั้น แต่ยังขยายไปสู่กลุ่มอุปกรณ์อัจฉริยะ เช่น กล้องวงจรปิด เครื่องใช้ไฟฟ้าอัตโนมัติ และระบบควบคุมภายในบ้าน (Thirasupha, 2019; Chantratip and Na Thalang, 2023) เพื่อตอบสนองการใช้งานที่ซับซ้อนและหลากหลายมาตรฐาน Wi-Fi รุ่นใหม่จึงได้รับการพัฒนา โดยเฉพาะ Wi-Fi 6E ซึ่งมีจุดเด่นคือ การเพิ่มย่านความถี่ใหม่ที่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ควบคู่กับย่านเดิมที่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.4 - 2.5 กิกะเฮิรตซ์ 5.15 - 5.85 กิกะเฮิรตซ์ และขยายไปถึงช่วง 5.925 - 7.125 กิกะเฮิรตซ์ (Brunner et al., 2022; Bartolin-Arnau et al., 2025) การเพิ่มย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ช่วยลดความแออัดของสัญญาณในย่านเดิม และเปิดช่องสัญญาณใหม่ที่กว้างขึ้น ส่งผลให้สามารถรองรับอุปกรณ์จำนวนมากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการชนกันของสัญญาณ เพิ่มความเร็วและความเสถียรในการเชื่อมต่อ เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานในระบบอัจฉริยะและสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของข้อมูลสูง เช่น ระบบบ้านอัจฉริยะ โรงงานอัตโนมัติ หรือสถานที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก

ความท้าทายที่สำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในมาตรฐานใหม่นี้ คือ การออกแบบสายอากาศที่สามารถรองรับการทำงานได้หลายย่านความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ยังคงมีขนาดเล็ก (Kaewtasang and Akkathimagul, 2017) และสามารถแยกสัญญาณได้ดีในระบบการส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง (Yotwipan and Boonpalit, 2021) หากไม่มีสายอากาศที่ออกแบบอย่างเหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดปัญหาในการสื่อสาร เช่น สัญญาณรบกวน การถ่ายโอนข้อมูลไม่สมบูรณ์ หรือการเชื่อมต่อที่ไม่เสถียร (Kitchaichaporn, 2021) นอกจากนี้ การออกแบบสายอากาศให้ทำงานในย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ใหม่ในมาตรฐาน Wi-Fi 6E ยังเผชิญข้อจำกัดด้านการคงรูปแบบการแผ่รังสีให้เสถียร การจัดการกับขนาดสายอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และการควบคุมแถบความถี่ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Nilvivek, 2021; Hemmongkol and Pongsiriuthaipong, 2021) อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุ ความสามารถในการปรับจูนค่าความถี่ และการจัดการโครงสร้าง

เรโซแนนซ์หลายตำแหน่ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อหลายย่านความถี่ได้ในขนาดที่จำกัด (Nakthong, 2021; Mahmood, 2013) โดยเฉพาะในระบบที่มีการใช้งานพร้อมกันของอุปกรณ์จำนวนมาก การออกแบบที่สามารถลดการรบกวน ข้ามช่องทางและเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสัญญาณถือเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนา (Nguyen et al., 2023)

แม้ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศที่มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศที่รองรับหลายย่านความถี่อย่างต่อเนื่อง โดยมีการประยุกต์เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้โครงสร้างเรโซแนนซ์หลายชุด (Nguyen et al., 2023) การเพิ่มช่องว่างในแผ่นตัวนำ การใช้โครงสร้างป้อนสัญญาณแบบหลายจุด (Lamultree et al., 2020) และการออกแบบรูปทรงที่ซับซ้อน เพื่อให้รองรับย่านความถี่หลากหลายสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย เช่น การสื่อสารระยะใกล้ ระบบสื่อสารแบบเซลลูลาร์ และเครือข่ายอุปกรณ์อัจฉริยะ (Patel and Makwana, 2021) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญหลายประการ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณที่ยังไม่เพียงพอสำหรับระบบที่มีการส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง (Syed et al., 2024) ความยุ่งยากในการปรับแต่งโครงสร้างให้มีขนาดกะทัดรัด และความไม่ต่อเนื่องของประสิทธิภาพเมื่อขยายช่วงการใช้งานไปยังย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านใหม่ในมาตรฐาน Wi-Fi 6E (Chien et al., 2022)

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศไมโครสตริปขนาดกะทัดรัดที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายย่านความถี่ ได้แก่ ย่าน 2.45 5.5 และ 6.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งครอบคลุมช่วงใช้งานของมาตรฐาน Wi-Fi 6E การออกแบบดังกล่าวได้รับการจำลองแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ CST Microwave Studio 2024 (Dassault Systèmes, 2023) ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ค่าอัตราขยาย (Gain) และ ค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) สำหรับการแก้ปัญหาเรื่องการแยกสัญญาณในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายช่องพร้อมกัน (MIMO: Multiple Input Multiple Output) โดยประกอบไปด้วยสายอากาศทั้งหมด 4 อิลิเมนต์ ผลการจำลองยังได้รับการยืนยันด้วยการสร้างต้นแบบจริงและการวัดค่าทางกายภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน

การออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

1. สายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมที่รองรับย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้วัสดุ FR4 ที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity: ϵ_r) เท่ากับ 4.6 และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ขนาดเริ่มต้นของสายอากาศสามารถคำนวณได้ตามสมการพื้นฐานสำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิม ดังสมการที่ (1) - (4) (Balanis, 2016)

$$W = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \left(\frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left(\frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \right) \quad (3)$$

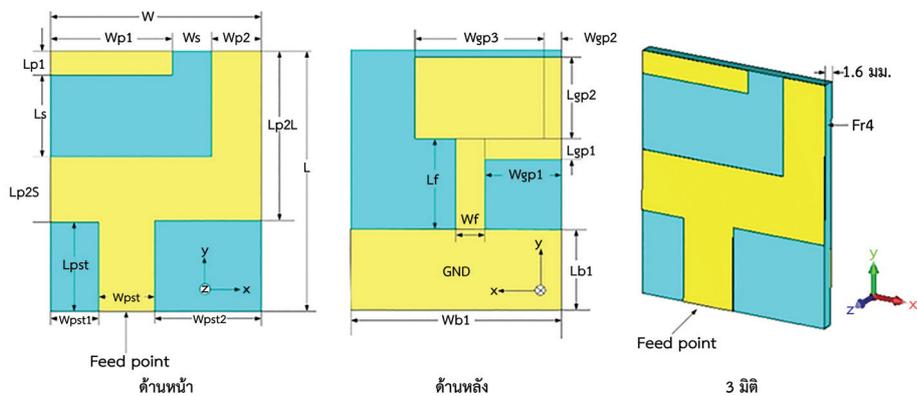
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

โดย

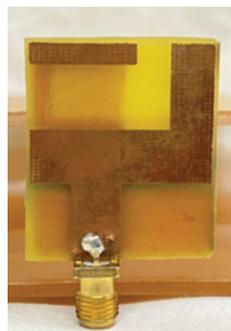
- ϵ_{eff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)
- W คือ ความกว้างของแผ่นแพทช์ (Width of Patch)
- ϵ_r คือ ค่าคงที่ของการนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวน (Dielectric constant)
- L คือ ความยาวของแผ่นแพทช์ (Length of Patch)

การออกแบบเริ่มต้นจากการคำนวณค่าพื้นฐานของสายอากาศโดยใช้สมการที่ (1) - (4) กำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุซับสเตรต (ϵ_r) เป็น 4.4 ความสูงของซับสเตรต (h) เป็น 1.6 มิลลิเมตร และเลือกความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) เริ่มต้นที่ 2.45 GHz สำหรับการออกแบบเบื้องต้น ด้วยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถคำนวณหาขนาดเริ่มต้นของแผ่นแพทช์ได้ โดยที่ W และ L มีขนาดเท่ากับ 37.27 และ 30.30 มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าเริ่มต้นไปปรับแต่งเพื่อให้รองรับหลายย่านความถี่ในลำดับถัดไป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ดังรูปที่ 1 ปลายด้านบนของสายอากาศถูกเชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ที่ลดขนาดลง โดยระนาบกราวด์แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแนวนอน ขนาด $W_{gp1} \times L_{gp1}$ และส่วนแนวตั้ง ขนาด $W_{gp2} \times L_{gp2}$ นอกจากนี้ยังมีการขยายความยาวเพิ่มเติม W_{gp3} ต่อจาก W_{gp2} เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของคลื่นสะท้อนและการแมตชิงอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น คือให้ใกล้เคียง 50 โอห์ม ผลลัพธ์จากการออกแบบด้วยการจำลอง พบว่าสายอากาศที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการทำงานในหลายย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีลักษณะการแผ่คลื่นที่ดี ภายหลังการออกแบบจึงได้สร้างต้นแบบจริงเพื่อยืนยันผลการจำลอง ขนาดรวมของสายอากาศคือ 25.75×32.00 มิลลิเมตร โดยตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ ในการออกแบบตามโครงสร้างดังรูปที่ 1(ก) และ (ข)



(ก) การจำลองแบบ

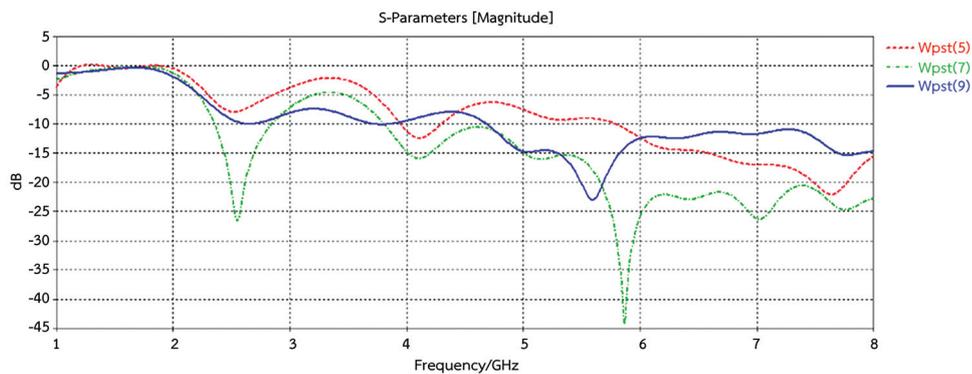


(ข) การสร้างจริง

รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ถูกดัดแปลงโครงสร้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	25.75	$Lp2l$	21
$Wp1$	14.88	L	32
Ws	5	$Wb1$	25.75
$Wp2$	5.88	$Lb1$	10
$Lp1$	3	Lf	11
Ls	10	Wf	3.5
$Lp2s$	8	$Wgp1$	9.2
$Lpst$	11	$Lgp1$	2.5
$pst1$	5.88	$Lgp2$	9.95
$Wpst$	7	$Wgp2$	2.7
$Wpst2$	12.88	$Wgp3$	15

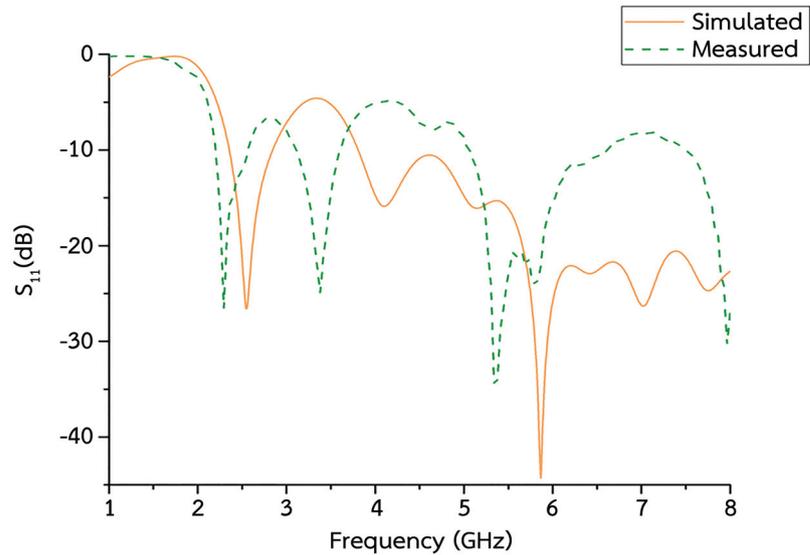


รูปที่ 2 ค่า S_{11} (dB) เมื่อ $Wpst$ เปลี่ยนแปลง

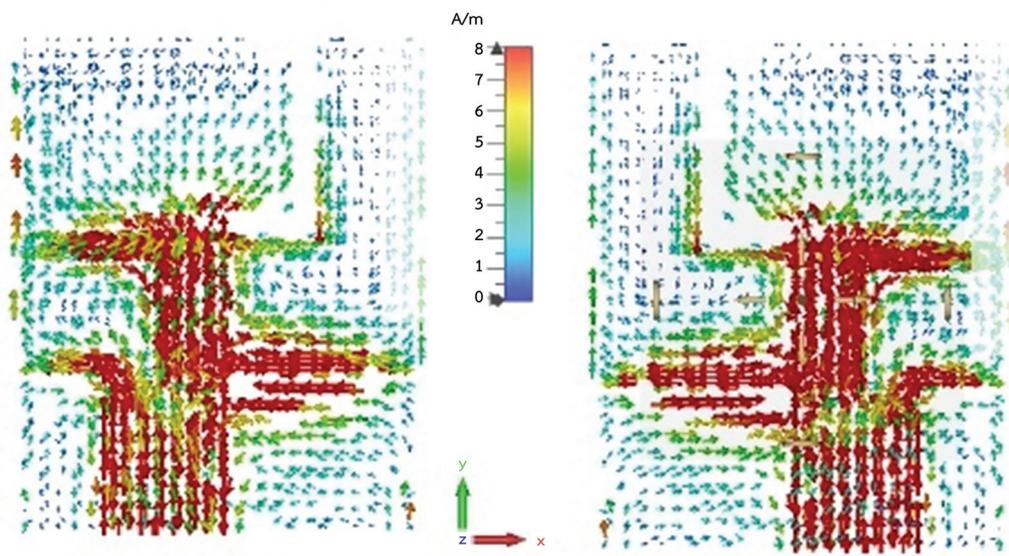
รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของขนาดความกว้างของเส้นสตริป ($Wpst$) ต่อค่าพารามิเตอร์ S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่กลาง 2.45 GHz โดยมีการวิเคราะห์ที่ความถี่ต่างกัน 3 ค่า คือ 5 7 และ 9 มิลลิเมตร จากกราฟจะเห็นได้ว่าความกว้างของเส้นสตริปมีผลอย่างมากต่อการสะท้อนของคลื่น โดยค่าพารามิเตอร์ S_{11} (dB) ที่ความถี่ 2.45 GHz มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความกว้าง $Wpst$ เปลี่ยนแปลง ในกรณีของ $Wpst = 5$ มิลลิเมตร สายอากาศแสดงค่า S_{11} (dB) ที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของ $Wpst = 7$ มิลลิเมตร และ $Wpst = 9$ มิลลิเมตร สายอากาศที่มี $Wpst = 9$ มิลลิเมตร แสดงประสิทธิภาพดีที่สุดในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น ในขณะที่ $Wpst = 5$ มิลลิเมตร แสดงความแม่นยำที่เด่นชัดที่ความถี่ใกล้เคียง 2.45 GHz $Wpst = 7$ มิลลิเมตร ที่ช่วงความถี่ 5.15 - 7.125 GHz ค่า S_{11} (dB) ของ $Wpst = 7$ มิลลิเมตรจะแสดงการสะท้อนที่ค่อนข้างสูงในบางช่วง โดยมีจุดที่ลดลงไปต่ำกว่า -10 dB เล็กน้อยที่ประมาณ 5.8 GHz แสดงให้เห็นว่าช่วงนี้สามารถมีการส่งสัญญาณที่ดี

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ $Wpst = 7$ มิลลิเมตร เนื่องจากสามารถครอบคลุมได้ทั้งย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.15 - 7.125 GHz ได้ดีที่สุด นอกจากนี้รูปที่ 3 แสดงผลการวัดทดสอบค่า S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์ เมื่อ $Wpst$ มีค่าเท่ากับ 7 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันว่า ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการสร้างจริง แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างผลการจำลอง และผลการวัดที่ความถี่ 6.5 GHz อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตต้นแบบ เช่น ขนาดของแพตช์ หรือช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุจริงที่แตกต่างจากค่าที่ใช้ในการจำลอง โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริกของแผ่น FR-4 นอกจากนี้

การป้อนสัญญาณและการเชื่อมต่อในกระบวนการวัด รวมถึงสภาพแวดล้อมขณะทดสอบก็อาจมีผลต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพของสายอากาศในย่านความถี่สูง และจากรูปที่ 4 แสดงการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศ ในแต่ละย่านความถี่ พบว่ากระแสมีความเข้มข้นบริเวณแพทช์และช่องว่างในทุกความถี่ โดยเฉพาะที่ 6.5 GHz มีการรวมตัวของกระแสที่เด่นชัดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการแผ่พลังงานที่มีทิศทางชัดเจน กระแสกระจายอย่างสมมาตรในโครงสร้างแต่ละด้าน



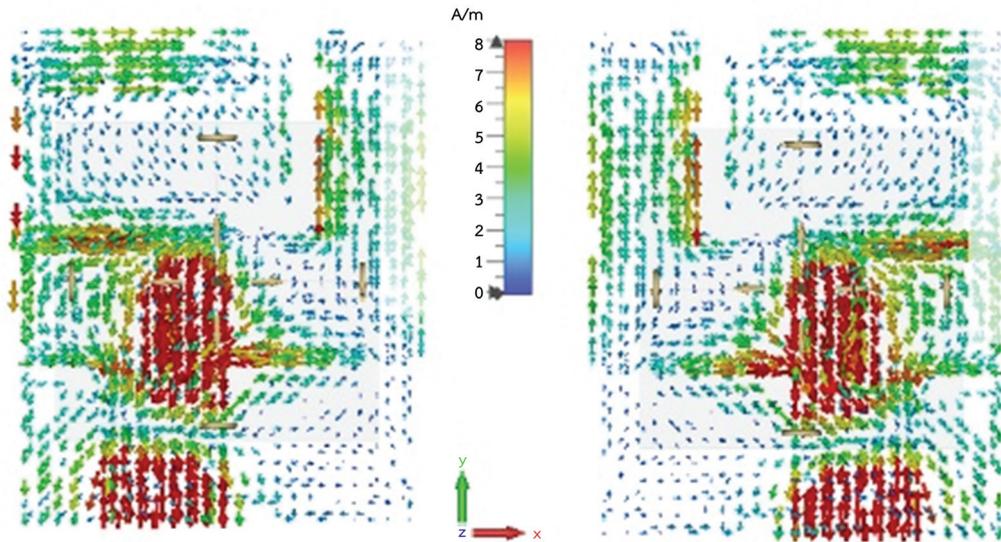
รูปที่ 3 ผลการวัดทดสอบค่า S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์



(ก) ด้านหน้า 2.45 GHz

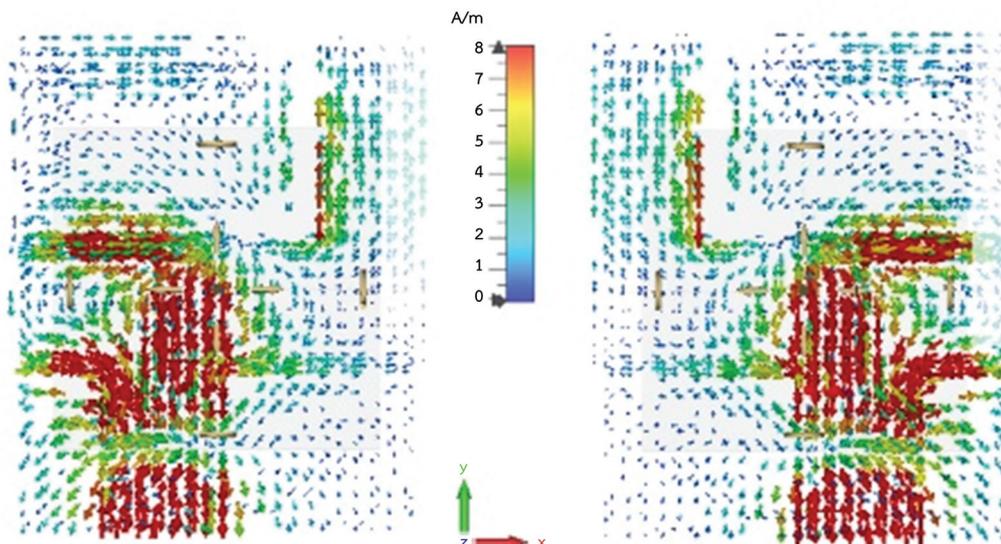
(ข) ด้านหลัง 2.45 GHz

รูปที่ 4 การกระจายกระแสบนผิวสายอากาศ



(ค) ด้านหน้า 5.5 GHz

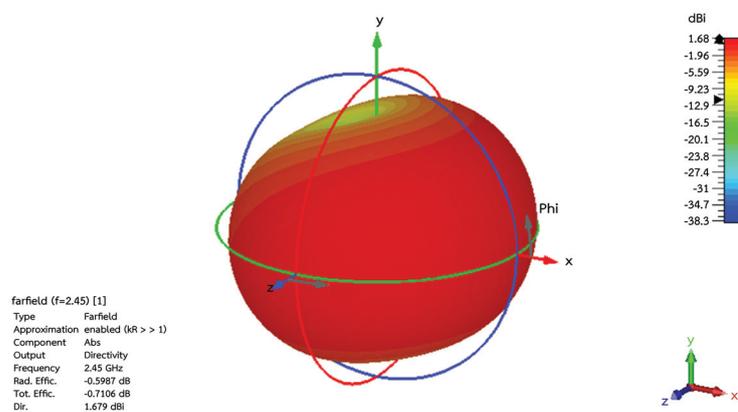
(ง) ด้านหลัง 5.5 GHz



(จ) ด้านหน้า 6.5 GHz

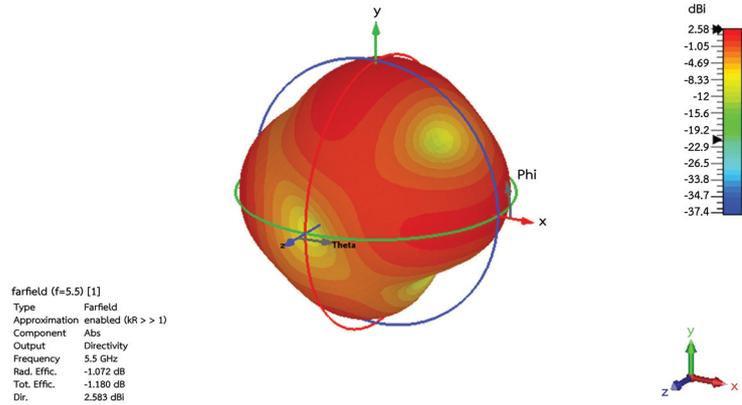
(ฉ) ด้านหลัง 6.5 GHz

รูปที่ 4 การกระจายกระแสบนผิวสายอากาศ (ต่อ)

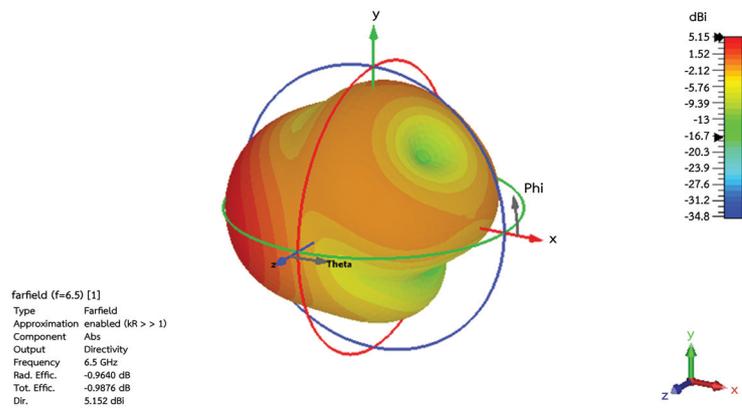


(ก) 2.45 GHz

รูปที่ 5 3D แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่

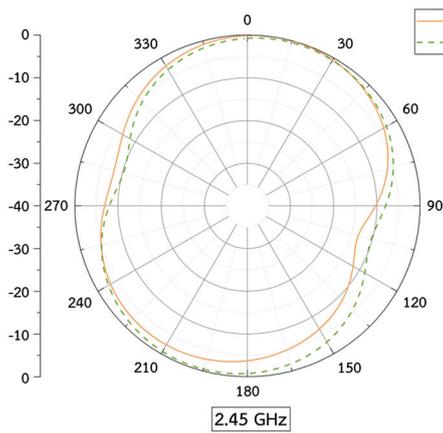


(ข) 5.5 GHz

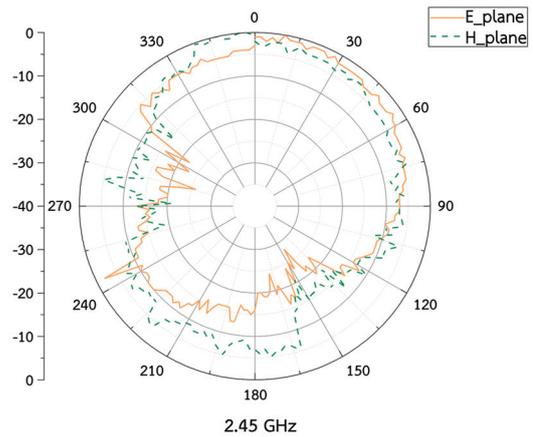


(ค) 6.5 GHz

รูปที่ 5 3D แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ (ต่อ)

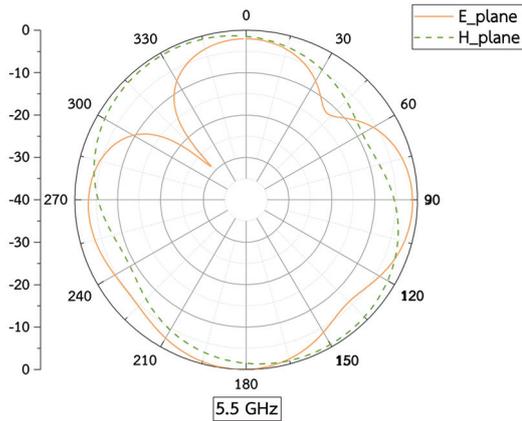


(ก) ผลการจำลอง 2.45 GHz

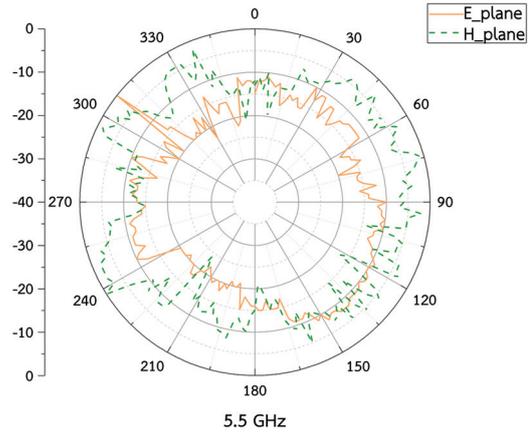


(ข) ผลการวัด 2.45 GHz

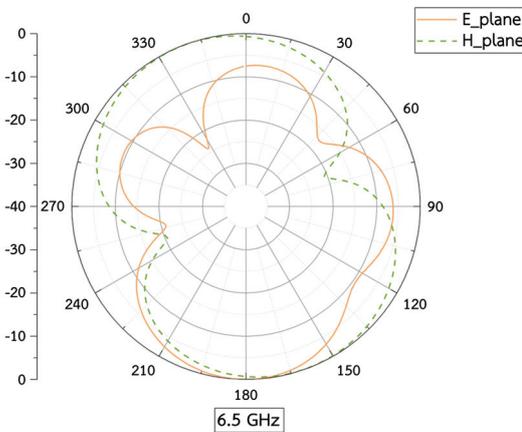
รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 2 แบบมิติ



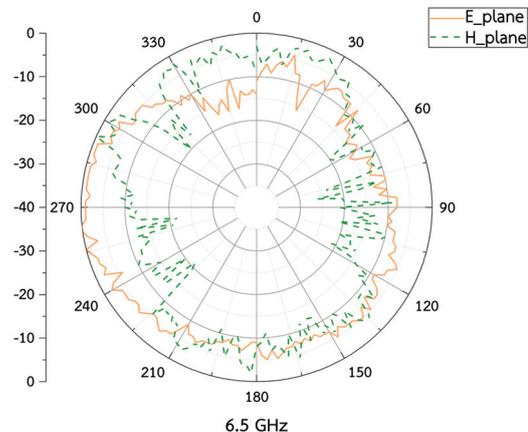
(ค) ผลการจำลอง 5.5 GHz



(ง) ผลการวัด 5.5 GHz



(จ) ผลการจำลอง 6.5 GHz



(ฉ) ผลการวัด 6.5 GHz

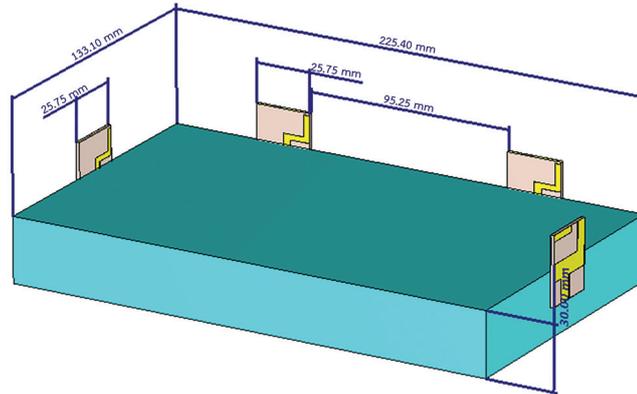
รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 2 แบบมิติ (ต่อ)

รูปที่ 5 แสดงภาพ 3D ของการกระจายพลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่รองรับหลายย่านความถี่ ได้แก่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz โดยในย่านความถี่ 2.45 GHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอยู่ที่ประมาณ 1.680 dBi ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายคลื่นเป็นไปอย่างกว้างและไม่เน้นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน ลักษณะนี้เรียกว่า แบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางในระนาบเดียว ส่วนในย่านความถี่ 5.5 และ 6.5 GHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นเป็น 2.583 และ 5.151 dBi ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายพลังงานมีการโฟกัสมากขึ้นและเข้มข้นขึ้นในทิศทางที่ชัดเจนขึ้น แม้ยังคงรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว การออกแบบเช่นนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งาน WiFi ซึ่งต้องการการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถ รับสัญญาณได้รอบทิศทาง

นอกจากนี้รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการแผ่พลังงานเพื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการวัดจริงของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ พบว่าผลลัพธ์ทั้งสองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันในภาพรวม โดยเฉพาะในย่านความถี่ 2.45 GHz อย่างไรก็ตาม ในความถี่ 5.5 และ 6.5 GHz พบว่ามีความแตกต่างของรูปแบบการแผ่พลังงานบางประการ ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดในระบบการวัด เช่น ความไม่แน่นอนของตำแหน่งติดตั้งสายอากาศหรือการสะท้อนจากสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบ ที่อาจส่งผลต่อทิศทางของการแผ่พลังงานโดยเฉพาะในย่านความถี่สูง ทั้งนี้ควรมีการปรับปรุงกระบวนการวัดหรือควบคุมปัจจัยแวดล้อมให้แม่นยำยิ่งขึ้นในการศึกษาในอนาคต เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดได้อย่างใกล้เคียงกันมากขึ้น และยืนยันประสิทธิภาพของการออกแบบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นในทุกย่านความถี่

2. สายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์บนเรเตอร์ไร้สาย

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์จำลอง ด้วยวัสดุที่ทำจากอะคริลิก โครงสร้างนี้ถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถติดตั้งบนเรเตอร์ไร้สายได้อย่างเหมาะสม โดยรูปที่ 7(ก) แสดงแบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรมจำลอง และรูปที่ 7(ข) แสดงโครงสร้างจริงของต้นแบบสายอากาศ



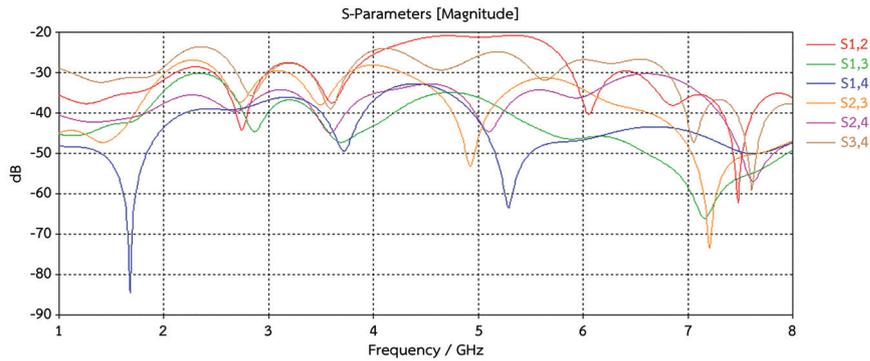
(ก) แบบจำลองในโปรแกรมจำลอง



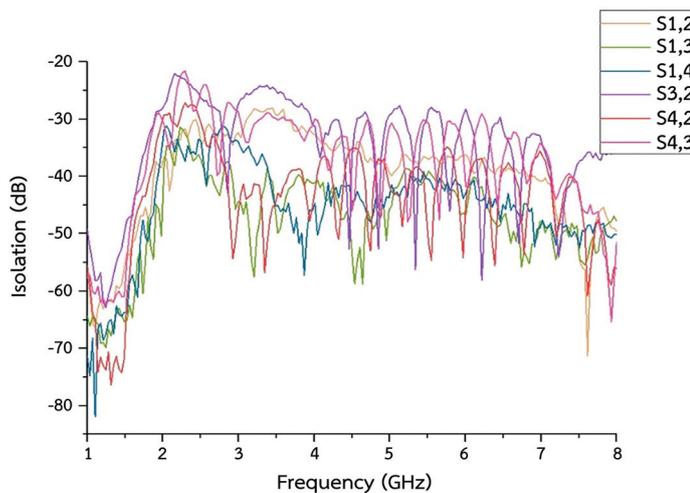
(ข) โครงสร้างจริงจำลองของต้นแบบสายอากาศ

รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) จากการจำลองแบบซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงถึงการรบกวนระหว่างพอร์ตของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ MIMO การจำลองพารามิเตอร์ S ทำในช่วงความถี่ 1 - 8 GHz เพื่อวิเคราะห์การส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการแยกตัวของสัญญาณระหว่างพอร์ตมีประสิทธิภาพดีซึ่งมีค่าต่ำกว่า -15 dB โดยมีการแยกโดดเดี่ยวอย่างชัดเจนในย่านความถี่ต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดการรบกวนและเพิ่มความเสถียรในการรับ-ส่งสัญญาณ รูปที่ 9 แสดงผลการวัดจริงของค่าการแยกโดดเดี่ยว การวัดพารามิเตอร์ S ในช่วงความถี่เดียวกัน (1 - 8 GHz) แสดงให้เห็นถึงค่าการแยกตัวระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ซึ่งผลการวัดจริงมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง



รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าการแยกโดดเดี่ยว



รูปที่ 9 ผลการวัดจริงค่าการแยกโดดเดี่ยว

ตารางที่ 2 แสดงค่าการแยกโดดเดี่ยวของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์จำลอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้ถูกวัดในความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz เพื่อประเมินประสิทธิภาพค่าการแยกโดดเดี่ยว โดยผลการจำลองและผลการวัดจริงถูกนำมาเปรียบเทียบกัน พอร์ต $S_{1,2}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 2) มีค่าการแยกตัวที่ความถี่ 2.45 GHz อยู่ระหว่าง -29.601 ถึง -30.919 dB แสดงถึงประสิทธิภาพการแยกตัวที่ดีและมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ความถี่ 5.5 GHz และ 6.5 GHz (-24.088 ถึง -39.346 dB) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ พอร์ต $S_{1,3}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 3) มีค่า Isolation ต่ำกว่า -30 dB ตลอดทั้งย่านความถี่แสดงถึงการแยกตัวที่ดี พอร์ต $S_{1,4}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 4) มีค่าแยกตัวอยู่ระหว่าง -35.909 ถึง -49.822 dB ในความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz แสดงถึงการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ พอร์ต $S_{3,2}$ (ระหว่างพอร์ต 3 และ 2) แสดงถึงการแยกตัวที่ดี โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -25.563 ถึง -39.401 dB ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามความถี่ ส่วนพอร์ต $S_{4,2}$ และ $S_{4,3}$ (ระหว่างพอร์ต 4 กับพอร์ตอื่น ๆ) มีค่าการแยกตัวใกล้เคียงกับผลการจำลอง โดยมีค่า Isolation ต่ำสุดที่ -22.354 dB แต่ยังคงเพียงพอสำหรับการใช้งาน ผลการจำลองและผลการวัดจริงมีความสอดคล้องกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพสูงในการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ทำให้สามารถใช้ในระบบสื่อสารไร้สายที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่ได้ครอบคลุมการทดสอบการวางสายอากาศในลักษณะคู่พอร์ตที่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมของค่าการแยกโดดเดี่ยวในบางเงื่อนไข การศึกษารูปแบบการจัดเรียงพอร์ตในลักษณะต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในการวิจัยในอนาคต เพื่อเพิ่มความชัดเจนและครอบคลุมการใช้งานในสถานการณ์จริงได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบค่าการแยกโดดเดี่ยวของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์บนเรเตอร์

Isolation (dB)	ความถี่ (GHz)	2.45 GHz		5.5 GHz		6.5 GHz	
		การจำลอง	การวัดจริง	การจำลอง	การวัดจริง	การจำลอง	การวัดจริง
	$S_{1,2}$	-29.601	-30.919	-24.088	-36.378	-30.069	-39.346
	$S_{1,3}$	-30.654	-35.149	-43.036	-39.406	-48.466	-48.195
	$S_{1,4}$	-38.933	-35.909	-49.822	-40.355	-43.69	-45.166
	$S_{3,2}$	-30.664	-25.563	-31.904	-29.339	-39.401	-31.839
	$S_{4,2}$	-42.732	-28.192	-36.46	-47.605	-32.47	-39.488
	$S_{4,3}$	-22.354	-29.607	-29.369	-30.685	-26.542	-36.911

การอภิปรายผลลัพธ์

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่นี้ ได้เลือกใช้โครงสร้างแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในย่านความถี่กลางที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่พื้นฐานของการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากมีข้อดีด้านความเรียบง่ายในการออกแบบความแข็งแรง น้ำหนักเบา และสามารถผลิตได้ในต้นทุนที่ต่ำ สายอากาศได้รับการป้อนสัญญาณด้วยหัวเชื่อมต่อสัญญาณแบบ SMA (Sub Miniature Version A) โดยที่สายอากาศถูกจำลองแบบและสร้างด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.6 และมีความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้กัน

ผลการศึกษารามิเตอร์ S_{11} ซึ่งสะท้อนถึงการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของสัญญาณ พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทั้งสามย่านความถี่ที่ออกแบบไว้ โดยมีค่าของ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ในทุกย่านความถี่ และลดลงถึง -22.62 dB ที่ความถี่ 6.5 GHz แสดงถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้น การสะท้อนสัญญาณที่ต่ำแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงานที่น้อยลง และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานในสนามระยะไกล (Far-Field) ยังแสดงถึงการกระจายตัวของสนามที่มีความสม่ำเสมอในทิศทางที่เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยวที่ความถี่ 2.45 GHz โดยค่ากำหนดทิศทาง (Directivity) อยู่ที่ 1.680 dBi ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกระจายสนามได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 5.5 และ 6.5 GHz การกระจายของสนามมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำคลื่นที่แคบลง และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ความถี่ 6.5 GHz ซึ่งมีค่าความเจาะจงทิศทางสูงถึง 5.151 dBi แสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการแผ่กำลังงานในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การที่สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่สอดคล้องกันในแต่ละความถี่ ส่งผลกระทบบ่อยตรงต่อความสม่ำเสมอของสัญญาณ ประสิทธิภาพของระบบ MIMO และการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง โดยเฉพาะในเครือข่ายความหนาแน่นสูงหรือพื้นที่ที่ต้องการความครอบคลุมรอบทิศทางเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการปรับโครงสร้างหรือเพิ่มองค์ประกอบควบคุมทิศทางของการแผ่พลังงาน เช่น การเพิ่มตัวสะท้อน (Reflector) หรือการจัดเรียงตำแหน่งอิลิเมนต์ใหม่ เพื่อให้รูปแบบการแผ่พลังงานในแต่ละย่านความถี่มีแนวโน้มทิศทางที่สอดคล้องกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไมโมแบบหลายความถี่ในการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ในด้านของค่า Isolation ซึ่งแสดงถึงการแยกสัญญาณระหว่างพอร์ตของสายอากาศ พบว่าผลการจำลองและผลการวัดจริงให้ค่าที่สอดคล้องกัน โดยค่าการแยกโดดเดี่ยวต่ำกว่า -30 dB ในหลายคู่พอร์ต โดยเฉพาะคู่พอร์ต $S_{1,4}$ และ $S_{1,3}$ ซึ่งให้ค่าการแยกต่ำสุดถึง -49.822 dB และ -33.705 dB แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการรบกวนจากสัญญาณ

ข้ามพอร์ตได้อย่างดีเยี่ยม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับระบบโมโนที่มีการรับ-ส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง โดยค่าการแยกโดดเดี่ยวที่อยู่ในระดับต่ำกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (-20 dB) ถือว่าเป็นตัวชี้วัดถึง การออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความพร้อมต่อการนำไปใช้งานในระบบไร้สายที่ต้องการความเสถียร เช่น ในอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi IoT Gateway และเราเตอร์เชิงพาณิชย์

สรุปและวิจารณ์

สายอากาศไมโครสตริปถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา โดยใช้วัสดุ FR-4 ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าดี และโครงสร้างประกอบด้วยแพทช์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบตัว L คว่ำ ซึ่งช่วยให้สามารถรองรับการทำงานในหลายย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างดังกล่าวได้รับการออกแบบเพื่อให้เกิดการแยกตัวของสัญญาณที่ดีในระบบ MIMO และมีการแผ่รังสีที่เหมาะสมกับการใช้งานไร้สายหลายย่านความถี่

จากการจำลองและการสร้างจริงเพื่อวัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ S ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิมเมนต์ พบว่าผลการจำลองและการวัดจริงมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยเฉพาะในย่านความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz ค่าการแยกตัวของสัญญาณ (Isolation) ระหว่างพอร์ต $S_{1,2}$ $S_{1,3}$ และ $S_{1,4}$ อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า -30 dB ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายที่ต้องการค่าการแยกโดดเดี่ยวสูง เช่น Wi-Fi 6E และ MIMO สำหรับพอร์ต $S_{3,2}$ $S_{4,2}$ และ $S_{4,3}$ แม้ว่าค่าการแยกตัวบางช่วงจะต่ำกว่า -25 dB แต่ก็ยังเพียงพอสำหรับการแยกสัญญาณที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ ทำให้การออกแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบหลายย่านความถี่นี้มีศักยภาพสูงในการรองรับการใช้งานจริงในระบบสื่อสารที่หลากหลาย ทั้งในด้านความคุ้มค่า การผลิต และการติดตั้ง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม CST Microwave Studio 2024 และเครื่องมือวัดจากสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4thed). Wiley.
- Bartolin-Arnau, L.M., Orozco-Santos, F., Sempere-Payá, V., Silvestre-Blanes, J., Albero-Albero, T. and Llacer-Garcia, D. (2025). Exploring the Potential of Wi-Fi in Industrial Environments: A Comparative Performance Analysis of IEEE 802.11 Standards. *Telecom*, 6(2), <https://doi.org/10.3390/telecom6020040>
- Brunner, H., Stocker, M., Schuh, M., Schuß, M., Boano, C.A. and Römer, K. (2022). Understanding and Mitigating the Impact of Wi-Fi 6E Interference on Ultra-Wideband Communications and Ranging. In *21th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 92-104. <https://doi.org/10.1109/IPSNS54338.2022.00015>
- Chantratip, C. and Na Thalang, C. (2023). Approaches to the Development of Tourism in a Holistic Smart City: A Case Study in Phuket. *Journal of Nakhonratchasima College (Humanities and Social Sciences)*, 17(2), 198-212. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/hsjournalnmc/article/view/267298>

- Chien, W., Chiu, C.C., Chen, P.H., Jiang, H. and Chen, W.H. (2022). Wi-Fi 6E Antenna Design for All-metal Housing of Notebook. *Sensors and Materials*, 34(7), 2869-2878. <https://doi.org/10.18494/SAM3928>
- Dassault Systèmes. (2023). *CST Studio Suite 2024 - Cluster Integration Guide*. https://updates.cst.com/downloads/Cluster_Integration_Guide_2024.pdf
- Hemmongkol, J. and Pongsiriuthaiphong, C. (2021). *Design of Circular-Ring Patch Antenna on Metamaterial Ring Resonator Surface for Dual-Band Applications* [Academic Article]. King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang.
- Kaewtasang, W. and Akkathimagul, S. (2017). The Development of Instructional Aids of the Basic Antenna Design of the Telecommunication Engineering Education. *RMUTSB Academic Journal (Humanities and Social Sciences)*, 2(2), 179-190. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-hs/article/view/105392/83717>
- Kitchaichaporn, N. (2021). *The Study on Efficiency of the Wireless Network usage of Students at Rajamangala University of Technology Thanyaburi* [Research Report]. Office of Academic Resources and Information Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/4044>
- Lamultree, S., Srisukhot, S., Sukphengphanao, K. and Kulawong, C. (2020). A Compact Tri-Band Antenna for Wireless Communications. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 13(2), 72-85. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/221219/164647>
- Mahmood, T.Y., Ali, J.K., Salim, A.J., Abdulkareem, S.F., Hammoodi, A.I. and Hussan, M.R. (2013). A New Compact Slot Antenna for Dual-band WLAN Applications. *International Journal of Science and Modern Engineering (IJISME)*, 1(10), 80-83.
- Nakthong, W. (2021). *Tructure-Adjusted Antenna for Wireless Communication Applications* [Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Electrical Engineering]. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/4068>
- Nguyen, T.D., Lee, Y. and Jung, C.W. (2023). Transparent and Flexible Patch Antenna Using MMF for Conformal Wi-Fi 6E Applications. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 23(4), 310-317. <https://doi.org/10.26866/jees.2023.4.r.172>
- Nilvivek, K. (2021). *The Bandwidth Enhancement of Wideband CPW-Fed Monopole Antenna Using I - Shaped Stub and Strip Load Tuning Technique* [Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology]. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/3913>
- Patel, D.H. and Makwana, G.D. (2021). A Comprehensive Review on Multi-Band Microstrip Patch Antenna Comprising 5G Wireless Communication. *International Journal of Computing and Digital System*. 11(1), 941-953. <https://journal.uob.edu.bh/server/api/core/bitstreams/e12b60d9-e5b7-4a7d-9491-d080f63b78f1/content>
- Praditthira, I. (2024). The 5G Technological Awareness and Utilization in the Context of Wireless Communication. *Sutthiparithat Journal*, 38(3), 16-35. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/DPUstthiparithatJournal/article/view/273151/183741>
- Syed, N.R.R., Md, A.S., Niamat, H., Yangbae, C., Park, S.G., Sunggoo, K. and Nam, K. (2024). Isolation Enhancement of a Capacitively-Fed MIMO Antenna Using a Quasi-Fractal Parasitic Element and Defected Ground Structure, *Heliyon*, 10(20), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39228>

- Tanjaroen, D. (2012). The Evolution of Wireless Communication Technology. *Panyapiwat Journal*, 3(2), 111-120. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/pimjournal/article/view/12017/10835>
- Thirasupha, R. (2019). *Cloud Infrastructure Design Model for Green Smart City: A Case Study of Electricity Generating Authority of Thailand* [Master's thesis, Chulalongkorn University]. <https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2019.1250>
- Yotwipan, A. and Boonpalit, A. (2021). *Marketing Mix and Social Value Effecting Samut Songkhram Customers Behaviours in Using Coffeehouse Services* [Doctoral Dissertation, Silpakorn University]. <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/3594>