

การปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด
สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สาย
Performance enhancement of compact inverted C patch antenna
for WLAN application

ศุภกิต แก้วดวงตา^{1*}, นิพนธ์ เลิศมโนกุล¹, นพดล มณีเตียร¹ และ สิทธิชัย เด่นตรี²

Supakit Kawdungta^{1*}, Nipon Lertmanokul¹, Nopadon Maneetien¹, and Sitthichai Dentri²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

²ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai

²Department of Electronics Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

*Email: supakitting@rmutl.ac.th

Received: September 19, 2019; Revised: October 18, 2019; Accepted: November 05, 2019

บทคัดย่อ

การปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศขนาดกะทัดรัดแบบแผ่นรูปตัวซีกลับหัวสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สายในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.484 GHz ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการใช้งานในประเทศไทยและมาตรฐาน IEEE 802.11b,g,n ได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ โดยสายอากาศที่นำเสนอถูกปรับปรุงมาจากสายอากาศรูปตัวซีให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นระนาบแผ่นทองแดงรูปตัวซีกลับหัวและถูกปรับขอบให้เป็นแนวตรงวางอยู่บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 โดยมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 7 mm และ 30 mm ตามลำดับ จากผลการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบพบว่า มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 Ω มีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบเดียวด้วยโพลาไรซ์เชิงเส้นและมีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz จากผลการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการจำลอง จากนั้นได้นำสายอากาศต้นแบบไปทดสอบกับระบบเครือข่ายไร้สายและทดสอบประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารด้วยอัตราการส่งถ่ายข้อมูลพบว่าสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบเครือข่ายไร้สาย, สายอากาศขนาดกะทัดรัด, สายอากาศแบบแผ่นรูปตัวซีกลับหัว

Abstract

Performance enhancement of compact inverted C patch antenna is presented in this paper for WLAN application. It is operated in the frequency of 2.4 to 2.484 GHz under the standard of Thailand and IEEE 802.11b,g,n. The antenna structure has been improved from a C letter copper patch, which is an inverted C copper patch on the FR4 substrate. The antenna has the total width and length are equal to 7 mm and 30 mm, respectively. From fabrication and measurement, the prototype antenna has an input impedance closed to 50 Ω and $|S_{11}|$ less than -10 dB covered the frequency of 2.4 to 2.5 GHz, omnidirectional radiation

pattern and 2 dBi of gain at 2.45 GHz. It is found that the results are good agreement with simulated results. Moreover, the prototype antenna was tested in the WLAN system with throughput measurement. It is found that it can be used in the WLAN application effectively.

Keywords: Inverted C Patch Antenna, Compact Antenna, WLAN

1. บทนำ

จากวิวัฒนาการของระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนทำให้สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ในหลากหลายรูปแบบด้วยระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายโดยเฉพาะระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีการใช้ข้อมูลเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมีความสำคัญ อีกทั้งในปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคโนโลยีระบบไอโอที (Internet of Things : IoT) มาใช้งานอย่างแพร่หลายซึ่งเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่อุปกรณ์ทุกอย่างถูกเชื่อมโยงเข้าสู่โลกอินเทอร์เน็ตเพื่อให้มนุษย์สามารถที่จะควบคุมสั่งงานได้ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ดังนั้นอุปกรณ์ทุกอย่างที่อยู่ในระบบไอโอทีนี้ต้องมีหน้าที่ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายรวมไปถึงสายอากาศอยู่ภายในด้วยและอุปกรณ์เหล่านั้นรวมไปถึงสายอากาศจึงต้องมีขนาดเล็กเพื่อที่จะสามารถรวมอยู่ในอุปกรณ์นั้นได้และเพื่อให้มีขนาดเล็กและกะทัดรัดสามารถที่จะติดตั้ง พกพา และใช้งานได้สะดวกจึงทำให้การพัฒนาสายอากาศขนาดกระทัดรัดนั้นมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการคิดค้นและพัฒนาสายอากาศขนาดเล็กออกมาอย่างแพร่หลายดังจะกล่าวต่อไปเป็นลำดับ เริ่มจากการพัฒนาสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับใช้งานกับระบบไอโอทีที่ความถี่ 915 MHz (US LoRa Band) และ 1.57 GHz (GPS) โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอขึ้นถูกออกแบบพร้อมกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานจริงมีลักษณะเป็นสายอากาศแบบพับรูปตัวเอฟหัวกลับ (Folded Inverted F Antenna : IFA) มีขนาดความยาว 40 mm และความกว้าง 25 mm [1] และมีการนำเสนอสายอากาศโครงสร้างที่

คล้ายกันในเอกสารอ้างอิงที่ [2] อีกทั้งในเอกสารอ้างอิงที่ [3] และ [4] ที่นำเสนอการออกแบบการลดขนาดของสายอากาศสำหรับระบบไอโอที โดยในเอกสารอ้างอิงที่ [3] ใช้การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กว้างมีขนาดความยาว 28 mm และความกว้าง 24 mm สามารถรองรับช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 11 GHz และในเอกสารอ้างอิงที่ [4] นำเสนอการลดขนาดของสายอากาศและออกแบบเป็นตัวอักษร เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นมีการนำเสนอสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติการตอบสนองทางความถี่ได้ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าได้ด้วยสัญญาณดิจิทัล (Digitally Tunable Capacitor : DTC) ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [5] ต่อไปจะเป็นบทความทางวิชาการที่มุ่งเน้นการออกแบบในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz ของระบบเครือข่ายไร้สายในประเทศไทย เริ่มจากสายอากาศแบบวงที่สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ป้อนสัญญาณแบบเชื่อมต่อร่วม (Coupled Feed) ถูกนำเสนอโดย Saou-Wen Su และคณะ พบว่าสายอากาศมีขนาดความกว้าง 5 mm และความยาว 29.75 mm โดยสายอากาศมีคุณสมบัติช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมความถี่ 2390 MHz ถึง 2520 MHz [6] ถัดมาเป็นการพยายามลดขนาดของสายอากาศในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz ของระบบเครือข่ายไร้สายและเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยอภิวัด (Metamaterial) โดยออกแบบโครงสร้างของอภิวัดเป็นรูปเห็ด (Mushroom) สร้างด้วยวัสดุฐานรองชนิด FR4 พบว่าสายอากาศมีขนาดความกว้าง 20 mm และความยาว 22 mm มีค่าประสิทธิภาพสูง [7] ซึ่งสายอากาศขนาดกะทัดรัดมีค่าประสิทธิภาพสายอากาศ (Antenna Efficiency) มากกว่า 90%

นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศขนาดเล็กด้วยเทคนิคการปรับเปลี่ยนลักษณะของสายอากาศยกตัวอย่างเช่น การใช้เทคนิคเส้นคดเคี้ยว (Meander Line) มาทำเป็นสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก

พบว่าสายอากาศมีขนาดความกว้าง 5.1 mm ความยาว 11.2 mm และความหนา 1.575 mm [8] ถัดมานำเสนอสายอากาศแบบระนาบตัวเอฟหัวกลับ (Planar Inverted-F Antenna) ที่ใช้เทคนิคเส้นคดเคี้ยวและไดอิเล็กทริกโพลัดเข้ามาช่วยทำให้สายอากาศมีขนาดความกว้าง 5 mm ความยาว 10 mm และความหนา 5 mm และสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz [9] สุดท้ายได้มีการพัฒนาสายอากาศขนาดเล็กออกไปอีกด้วยโครงสร้างแผ่นวงแหวนร่วมกับเส้นคดเคี้ยวเชื่อมต่อโพลัดแบบตัวด้านทานทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดความกว้าง 19 mm ความยาว 19 mm และความหนา 0.4 mm และมีโพลาริซิงกลมอีกด้วย [10] ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการนำเสนอสายอากาศขนาดกะทัดรัดและสามารถตอบสนองช่วงความถี่กว้างในเอกสารอ้างอิงที่ [11]-[13] และมีการพัฒนาให้มีอัตราการขยายที่สูงขึ้นใน [14]

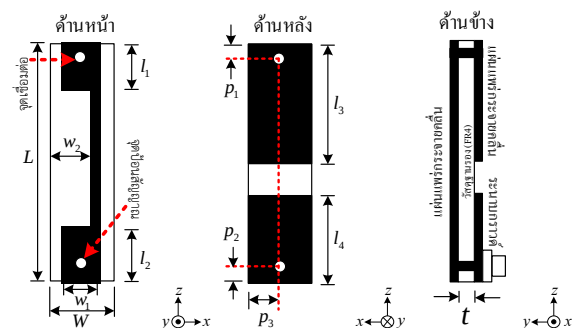
จากที่ได้ศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องมาแล้วนั้นพบว่าสายอากาศขนาดกะทัดรัดส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ดังนั้นในบทความนี้จึงมุ่งเน้นในการนำเสนอการออกแบบสายอากาศขนาดกะทัดรัดสำหรับระบบเครือข่ายไร้สายในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.484 GHz ด้วยเทคนิคการเจาะรูให้เป็นรูปตัวซีและการเชื่อมต่อแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหลัง ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีลักษณะกะทัดรัด ง่ายต่อการสร้างเพื่อให้สามารถที่จะนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยเฉพาะในระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายของเทคโนโลยีไอโอทีผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย

โดยในบทความนี้จะกล่าวแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้ หัวข้อที่สองและสามจะกล่าวถึงโครงสร้างและผลการจำลองสายอากาศ ในส่วนของผลการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อที่สี่และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงสรุปผลของการออกแบบและการทดสอบ

2. โครงสร้างของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด

ในบทความนี้ได้นำเสนอสายอากาศขนาดกะทัดรัดรูปตัวซีกลับหัวเพื่อใช้งานกับระบบเครือข่ายไร้สายช่วง

ความถี่ 2.4 ถึง 2.484 GHz โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.3$) มีความหนา 1.8 mm ในการออกแบบซึ่งเป็นวัสดุที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปและมีราคาถูก โดยเริ่มจากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมทั่วไปซึ่งจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และปรับปรุงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเจาะรูให้เป็นรูปตัวซีกลับหัวและการเชื่อมต่อแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหลังเพื่อเพิ่มความยาวทางไฟฟ้า ในขณะที่โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเท่าเดิมจึงเป็นผลทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็กลงที่ความถี่ใช้งานเท่าเดิม โครงสร้างของสายอากาศที่พัฒนานี้จะประกอบไปด้วยแผ่นทองแดงสองด้านที่คั่นกลางด้วยวัสดุฐานรองชนิดอีพ็อกซี (Epoxy) แผ่นทองแดงด้านที่หนึ่งใช้เป็นแผ่นแพรกระจายคลื่นวางอยู่ด้านหน้าและแผ่นทองแดงด้านที่สองใช้เป็นแผ่นแพรกระจายคลื่นและระนาบกราวด์วางอยู่ด้านหลัง ซึ่งแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหน้าจะมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปตัวซีกลับหัวส่วนด้านบนของตัวซีจะมีจุดเชื่อมต่อจากแผ่นแพรกระจายคลื่นด้านหน้าไปยังแผ่นแพรกระจายคลื่นอีกแผ่นที่ขนานกันอยู่ด้านหลัง โดยมีการบ่อนสัญญาณแบบโคแอกเซียล (Coaxial Probe) ที่ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 1

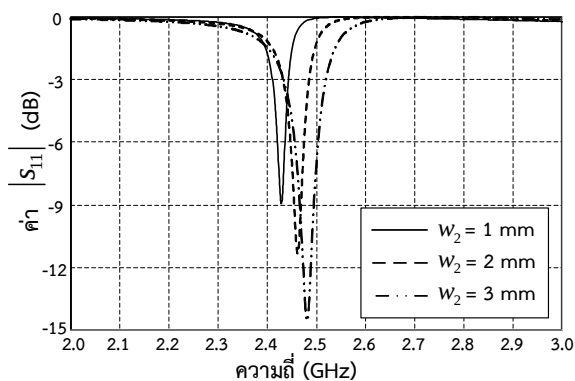


รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัว
ขนาดกะทัดรัด

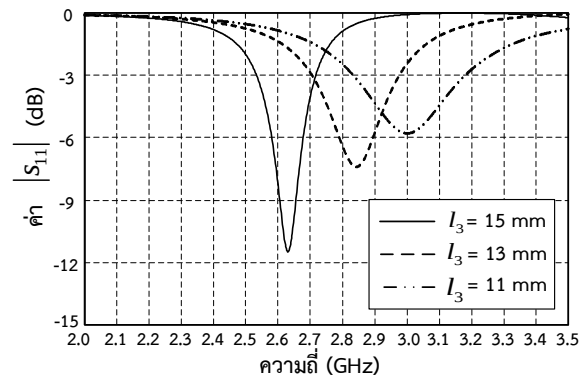
3. ผลการจำลองของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด

จากโครงสร้างของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ได้ทำการจำลองโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศที่ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแล้วพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักโดยจะมีแบบ

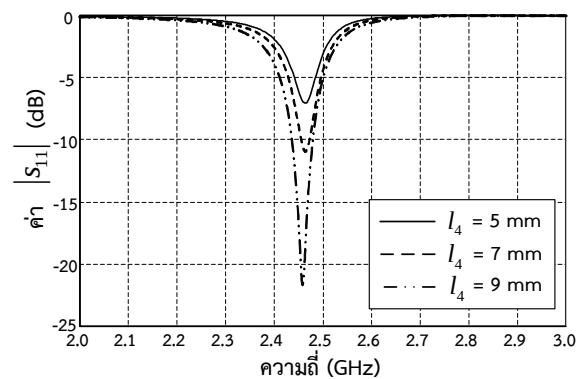
รูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Radiation Pattern) และมีโพลาไรซ์เชิงเส้นตลอดการเปลี่ยนพารามิเตอร์ แต่คุณลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างชัดเจนคือ ความถี่ปฏิบัติการ (Operating Frequency) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พารามิเตอร์ w_2 จะทำให้เกิดปฏิบัติการมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่สูงขึ้นเมื่อค่า w_2 มีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น พารามิเตอร์ l_3 และ l_4 ก็มีผลในลักษณะที่คล้ายกันคือ เมื่อ l_3 มีค่าลดลงจะทำให้ความถี่ปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้นและเมื่อ l_3 มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำลงและเมื่อ l_4 มีค่าลดลงจะทำให้ความถี่ปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้นและเมื่อ l_4 มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำลงแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของความถี่ปฏิบัติการเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในขณะเดียวกัน l_4 จะช่วยทำให้ช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย อีกทั้งพารามิเตอร์ p_1 และ p_2 ก็ยังสามารถที่จะทำให้เกิดปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้นเมื่อทั้งสองมีค่าเข้าใกล้จุดกึ่งกลางของโครงสร้างสายอากาศตามแนวแกน Z และจะทำให้เกิดความถี่ปฏิบัติการเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำลงเมื่อทั้งสองมีค่าออกจากจุดกึ่งกลางของโครงสร้างสายอากาศตามแนวแกน Z ผลการจำลองได้จากโปรแกรมจำลองทางด้านไมโครเวฟ ดังแสดงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปที่ 2 ถึง 5



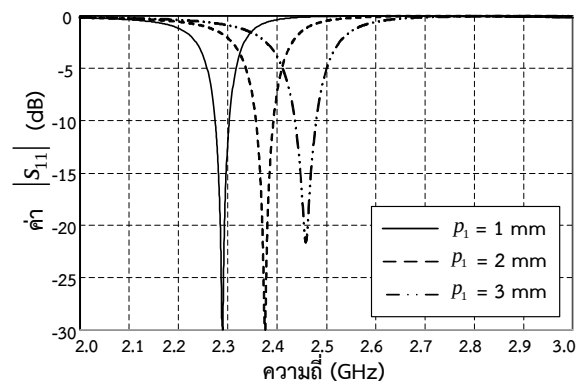
รูปที่ 2 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ w_2



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ l_3



รูปที่ 4 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ l_4



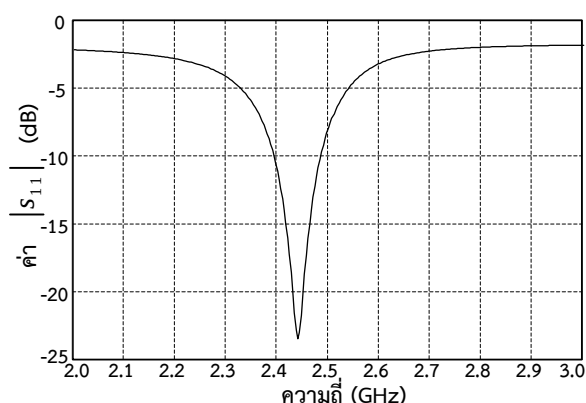
รูปที่ 5 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ p_1

จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาทำให้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์และจำลองผลเพื่อให้ขนาดโครงสร้างของสายอากาศรูปตัวซี ขนาดกะทัดรัดที่มีความถี่ปฏิบัติการที่ความถี่กลางเท่ากับ 2.45 GHz ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)
W	7	l_3	16.5
L	30	l_4	9
w_1	5	p_1	3
w_2	4	p_2	1
l_1	7	p_3	3.5
l_2	7	t	1.8

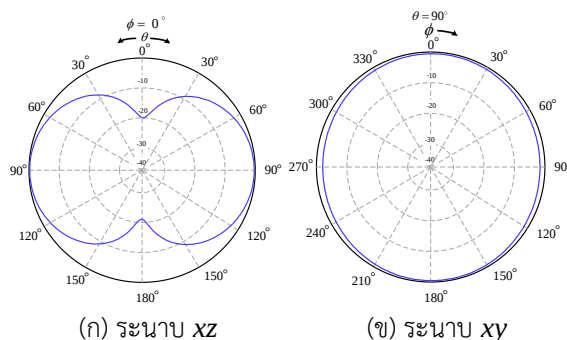
จากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศรูปตัวซีขนาดกะทัดรัดตามตารางที่ 1 ทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดโดยรวมกว้างเท่ากับ 7 mm และยาวเท่ากับ 30 mm ซึ่งถือได้ว่ามีขนาดกะทัดรัดมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz ($\lambda_{2.45\text{GHz}} = 122.45\text{ mm}$)



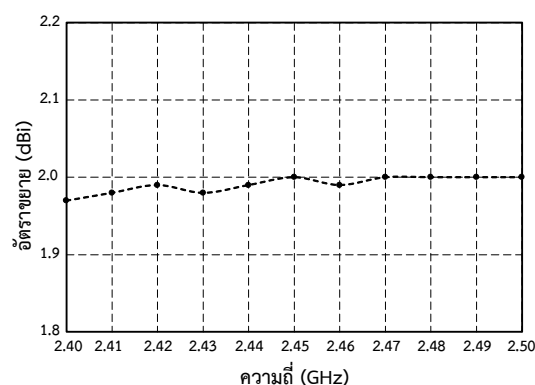
รูปที่ 6 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด

จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศนี้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง $50\ \Omega$ มีค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 2.4-2.49 GHz หรือ 3.7% ของช่วงกว้างความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 6 และในรูปที่ 7 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ xz และระนาบ xy ตามลำดับ พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทาง มีโพลาริเซชันเชิงเส้น และมีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi ที่

ความถี่ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้ในส่วนของคุณค่าประสิทธิภาพสายอากาศมีค่าเท่ากับ 95% ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานเป็นสายอากาศขนาดกะทัดรัดกับระบบเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 7 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ xz และระนาบ xy

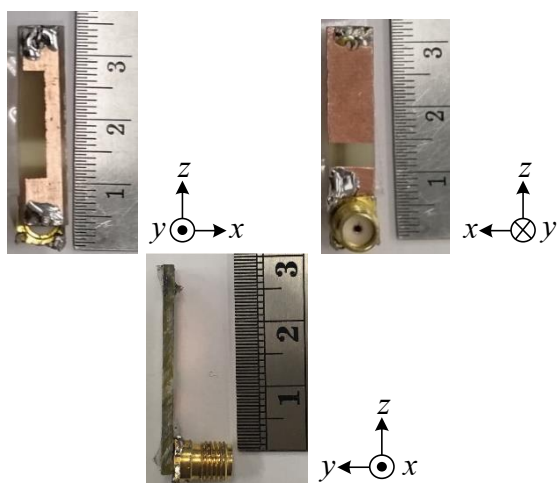


รูปที่ 8 ผลการอัตราขยายของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz

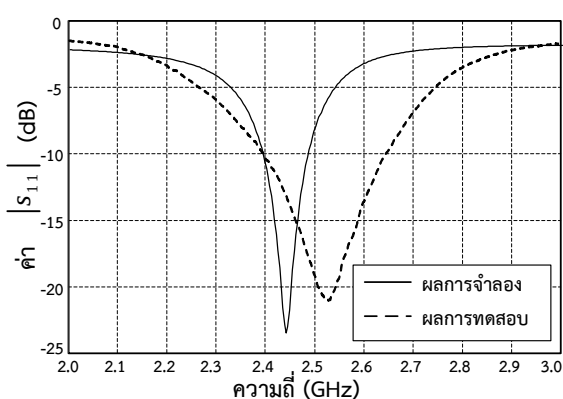
4. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากผลการจำลองที่ได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้และใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.3$) มีความหนา 1.8 mm ในรูปที่ 9 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบ จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศนี้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง $50\ \Omega$ มีค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 2.4-2.65 GHz หรือ 10% ของช่วงกว้างความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ามีความ

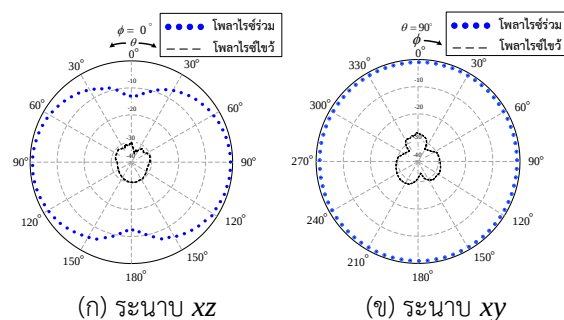
สอดคล้องกับผลการจำลอง อีกทั้งในรูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปตัวซี ขนาดกะทัดรัดที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ xz และระนาบ xy ตามลำดับ พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว มีช่วงกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 60 องศาในระนาบ xz มีโพลาไรซ์ไขว้ในทิศทางใช้งานมากกว่า 30 เท่า โดยมีผลการทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi และสายอากาศมีโพลาไรซ์เชิงเส้นเนื่องจากมีระดับของโพลาไรซ์ไขว้ที่ต่ำมาก และตารางที่ 2 แสดงผลสรุปของการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 9 ภาพถ่ายของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบ



รูปที่ 10 ผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัด



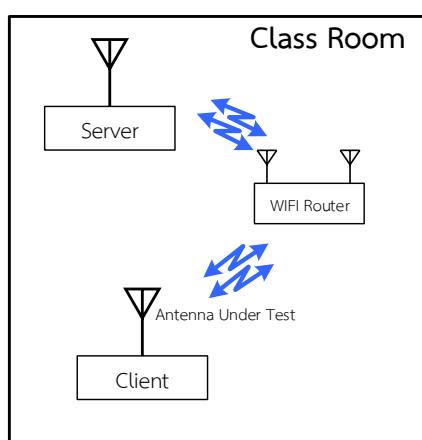
รูปที่ 11 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ xz และระนาบ xy

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบ

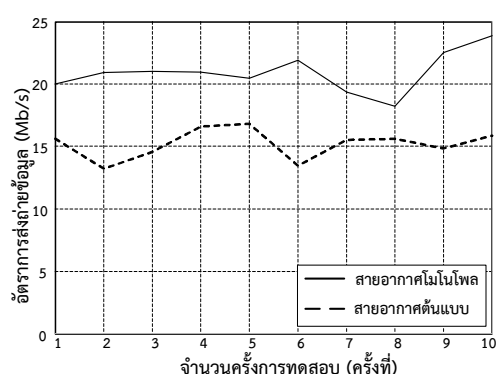
คุณลักษณะ	ผลการทดสอบ
$ S_{11} > -10$ dB	2.4 - 2.65 GHz
%ช่วงกว้างความถี่	10%
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	รอบทิศทางในระนาบเดียว
ช่วงกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	60 องศาในระนาบ xz
อัตราขยาย	2 dBi (ที่ 2.45 GHz)

จากนั้นทำการทดสอบสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบกับระบบเครือข่ายไร้สายด้วยการพิจารณาค่าอัตราการส่งถ่ายข้อมูล (Throughput) โดยมีการทดสอบในสภาพแวดล้อมภายในอาคารและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 12 ประกอบด้วยเครื่องแม่ข่าย (Server) เครื่องลูกข่าย (Client) และอุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สาย (WIFI Router) ซึ่งลักษณะการส่งผ่านข้อมูลจะส่งผ่านข้อมูลไปกลับระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องแม่ข่ายผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สายทั้งนี้สายอากาศต้นแบบจะถูกติดตั้งที่เครื่องลูกข่ายและสายอากาศไดโพลมาตรฐานถูกติดตั้งกับเครื่องแม่ข่าย ได้ผลของอัตราการส่งถ่ายข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 13 โดยตัวอย่างที่ถูกเลือกมานั้นเป็นตัวแทนของค่าที่วัดได้ตามขนาดของตัวอย่างที่ถูกกำหนดไว้โดยทั่วไปแล้วตัวอย่างควรได้มาจากวิธีการสุ่มที่เรียกว่าตัวอย่างสุ่ม ซึ่งจำนวนตัวอย่างสุ่มที่อาจเกิดขึ้นได้ในการวัดครั้งหนึ่งๆ มีจำนวน $N C_n$ ซึ่งถ้าต้องการศึกษา (N) จำนวน 100 ตัวอย่าง ต้องใช้จำนวนครั้งทดสอบ (n) จำนวน 10 ครั้ง

ซึ่งเป็นจำนวนครั้งที่เพียงพอต่อการทดสอบ จากผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบพบว่ามิต่อการส่งถ่ายข้อมูลอยู่ในช่วง 14 ถึง 16 Mb/s น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายอากาศโมโนโพลที่มีใช้งานทั่วไปแต่ยังคงสามารถอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้ดี ทั้งนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีข้อดีคือ มีขนาดกะทัดรัด สามารถประยุกต์ใช้งานติดกับโครงของ WIFI Router หรือ Client ได้เนื่องจากสายอากาศออกแบบให้มีขนาดกระทัดรัดและบาง แต่ยังคงความสามารถในการติดต่อสื่อสารข้อมูลได้ในระดับดีเมื่อเทียบกับสายอากาศโมโนโพลทั่วไป



รูปที่ 12 รูปแบบการทดสอบอัตราการส่งถ่ายข้อมูล



รูปที่ 13 อัตราการส่งถ่ายข้อมูลของสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดต้นแบบ

5. สรุปผลการวิจัย

สายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดที่ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้งานในระบบเครือข่ายไร้สายในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 GHz ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการใช้งานในประเทศไทยและมาตรฐาน IEEE 802.11b,g,n ได้ โดย

สายอากาศนี้ถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด (ความกว้าง 7 mm และความยาว 30 mm) ทำให้สามารถที่จะนำไปอยู่ในอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยเฉพาะอุปกรณ์ในระบบไอโอทีที่มีขนาดเล็ก มีต้นทุนต่ำเนื่องจากใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 จากผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าสายอากาศนี้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω มีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.65 GHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบเดียว มีช่วงกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 60 องศาในระนาบ xz มีโพลาไรซ์เชิงเส้นและมีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi ที่ความถี่กลาง และจากการทดสอบสายอากาศรูปตัวซีกลับหัวขนาดกะทัดรัดกับระบบเครือข่ายไร้สายพบว่ามิต่อการส่งถ่ายข้อมูลอยู่ในช่วง 14 ถึง 16 Mb/s และสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ภายใต้โครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) เรื่องออกแบบและสร้างบอร์ดอินเตอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งเพื่อการเรียนรู้ด้วยชีวิตไอเอสพี 32 และเอฟทีจีเอ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Lizzi, F. Ferrero, P. Monin, C. Danches, and S. Boudaud, "Design of Miniature Antennas for IoT Applications," *IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, July 2016, pp. 234- 237.
- [2] W.-I. Kwak, S.-o. Park, and J.-S. Kim, "A Folded Planar Inverted-F Antenna for GSM/DCS/Bluetooth Triple-Band Application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 5, 2006, pp. 18-21.
- [3] M. A. Khan, M. A. ul Haqy and S. ur Rehman, "A Practical Miniature Antenna Design for

-
- Future Internet of Things Enabled Smart Devices,” *International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, December 2016, pp. 1-6.
- [4] L. H. Trinh, T. Q. K. Nguyen, D. D. Phan, V. Q. Tran, V. X. Bui, N. V. Truong and F. Ferrero, “Miniature antenna for IoT devices using LoRa technology,” *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, October 2017.
- [5] F. A. Asadallah, J. Costantine, Y. Tawk, L. Lizzi, F. Ferrero and C. G. Christodoulou, “A Digitally Tuned Reconfigurable Patch Antenna for IoT Devices,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, July 2017, pp. 917- 918.
- [6] S. W. Su, T.-C. Hong, and F.-S. Chang, “Compact and Printed, Coupled-fed, 2.4 GHz Loop Antenna,” *International Conference on Applications of Electromagnetism and Student Innovation Competition Awards (AEM2C)*, August 2010, pp. 157-161.
- [7] H. B. Chu, H. Shirai, C. N. Dao, “High Efficiency Small Antenna for WLAN Application,” *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, September 2013, pp. 757-760.
- [8] M. Wahib, S. Clauzier, S. Mikki and Y. Antar, “A 2.45 GHz Novel Electrically Small Planar Dipole Antenna,” *International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, March 2016, pp. 106-109.
- [9] W.-J. Liao, T.-M. Liu and S.-Y. Ho, “Miniaturized PIFA Antenna for 2.4 GHz ISM Band Applications,” *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, March 2012, pp. 3034-3037.
- [10] J.-W. Yang, T.-Y. Tsai, C.-C. Chan, and C.-Y.-D. Sim, “Small Size Circularly Polarized Patch Antenna for 2.4 GHz WLAN Applications,” *IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, July 2016, pp. 153-154.
- [11] A. Okba, A. Takacs, and H. Aubert, “Compact Flat Dipole Rectenna for IoT Applications,” *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 87, 2018, pp. 39-49.
- [12] H. AL-Saif, M. Usman, M. T. Chughtai, and J. Nasir, “Compact Ultra-Wide Band MIMO Antenna System for Lower 5G Bands,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018, pp. 1-6.
- [13] H. Raad, “An UWB Antenna Array for Flexible IoT Wireless Systems,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 162, 2018, pp. 109–121.
- [14] A. A. Masiusa, Y. C. Wonga, and K. T. Lau, “Miniature high gain slot-fed rectangular dielectric resonator antenna for IoT RF energy harvesting,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 85, pp. 39-46, February 2018.
-