

การศึกษาการปรับสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม
สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

A Study of Tuning the CPW Fed Basic Geometric Monopole Antenna for UWB
Applications

วัชรพล นาคทอง¹, อำนวย เรืองวารี^{1*}, ธีชัย พุ่มพวง²

Watcharaphon Nakton¹, Amnoiy Ruengwaree^{1*}, Tajchai Pumpoung²

¹สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹Department of Electronics Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Department of Telecommunications Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author e-mail: amnoiy.r@en.rmutt.ac.th

(Received: 5 October 2019, Revised: 4 December 2019, Accepted: 28 February 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 แบบ คือ สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และ สามเหลี่ยม ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 3.1-10.6 GHz ด้วยเทคนิคการเจาะบนระนาบกราวด์ สายอากาศทุกแบบจากการออกแบบในบทความฉบับนี้มีขนาดโดยรวม 34×34 มม.² ถูกสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ บอร์ดมาตรฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 0.764 มม. โดยการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาศัยการจำลองแบบทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม CST เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างสายอากาศที่ดีที่สุดเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าโครงสร้างสายอากาศที่ตอบสนองต่อช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ดีที่สุด คือ สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.97-12.26 GHz มีค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 4.53:1 มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง มีค่าอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน 3.07 dBi และมีประสิทธิภาพของสายอากาศมากกว่าร้อยละ 99.63

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, ท่อนำคลื่นระนาบร่วม, สายอากาศแบบเจาะร่อง, ความถี่กว้างยิ่งยวด

Abstract

This paper proposed the study of the tuning of 3 basic geometric structures of monopole antenna: rectangular, circular, and triangular shape. The coplanar waveguide fed input signals to these antennas for ultra-wideband (UWB) applications as the IEEE 802.15.3a standard, which covers the frequency band of 3.1-10.6 GHz. The frequency bandwidth enhancement technique exploited in this work which is the slotted on the ground plane. All types of designed antennas have an overall size of 34×34 mm². The fabricated antenna structures were on the FR-4 printed circuit board (PCB), whose thickness is 0.764 mm. The antennas are analyzed and designed by using the electromagnetic field simulation CST program to optimize to the best structure for antenna fabrication. In the measurement process, the results showed that the best response, $S_{11} < -10$ dB, cover the frequency band of 2.97-

12.26 GHz, was obtained from the rectangular monopole. The bandwidth ratio was 4.13:1. The radiation pattern was omnidirectional. The average gain over the frequency band was 3.07 dBi, and the antenna efficiency was over 99.63%.

Keywords: Monopole antenna, Co-planar waveguide, Slotted antenna, Ultra-wideband

1. บทนำ

ปัจจุบันในระบบสื่อสารแบบไร้สายในแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communications Commission: FCC) สามารถรองรับการใช้งานได้ 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ใช้งานต่ำ 960 MHz และช่วงความถี่สูง 3.1-10.6 GHz ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 7.5 GHz และจะมีแบนด์วิดท์ในแต่ละสัดส่วนของการส่งสัญญาณมากกว่าร้อยละ 20 หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่า 500MHz ใช้พลังงานต่ำระยะใกล้และค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (group delay time) มีค่าการหน่วงเวลาไม่เกิน ± 2 ns (Bustamante et al., 2017; US Federal Communications Commission, 2002; Coase, 2013) ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวดมีบทบาทเป็นอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้งานด้านการรับส่งข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูงและการส่งข้อมูลข่าวสารเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้สื่อสารโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เพื่อหาความผิดปกติทางร่างกายหรือตรวจสอบโรคต่าง ๆ ภายในร่างกายหรือทางการแพทย์นำไปใช้งานในด้านเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำในการผ่าตัด ในด้านของอาคารสำนักงานจะถูกใช้งานด้านการสื่อสารความเร็วสูงเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทโน้ตบุ๊ก โปรเจคเตอร์ ปริ้นเตอร์ กล้องถ่ายรูปหรือกล้องถ่ายวิดีโอจอแสดงผลภาพ ระบบเครื่องเสียง หรือระบบควบคุมอัตโนมัติต่าง ๆ ในตัวอาคาร และในด้านการค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความแม่นยำสูงถึงระดับเซนติเมตร เป็นต้น จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมานั้น ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สายสายอากาศจึงถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ทำหน้าที่ให้กับระบบสื่อสารแบบไร้สายสามารถส่งข้อมูลได้ถูกต้องตามที่ต้องการ จึงได้นักวิจัยหลายคนที่ยพยายาม คิดค้นและพัฒนาสายอากาศในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะพัฒนาด้านโครงสร้างสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น การเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ให้กว้างมากยิ่งขึ้นหรือการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

ให้สามารถใช้งานเฉพาะย่านความถี่ที่ต้องการ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การเจาะรูหรือเจาะผิวทองแดงที่ตัวแผ่พลังงาน (radiator) และระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007) หรือเพิ่มสลับปรับที่ตัวแผ่พลังงานระนาบกราวด์ (Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016) การปรับเปลี่ยนตัวแผ่พลังงานในรูปทรงเลขาคณิตต่าง ๆ ร่วมกับการเจาะผิวทองแดงของระนาบกราวด์แบบรูปบันได (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ดังที่กล่าวมา ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะส่งผลให้โครงสร้างสายอากาศสามารถมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างขึ้นทำให้รองรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่แถบกว้างยิ่งยวด ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a แต่เมื่อค้นคว้าเพิ่มเติมพบว่ายังมีจุดด้อยคือ มีจุดปรับมีจำนวนมากซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของสายอากาศเกิดความซับซ้อนยากต่อการนำไปสร้างจริง (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018)

จากปัญหาที่กล่าวไปในข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อศึกษาและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ที่มีการลดขั้นตอนการปรับโครงสร้างที่ซับซ้อนด้วยการเลือกใช้รูปร่างตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพล จากรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานได้แก่ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลม จากงานวิจัยที่ (Naktong et al., 2016) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการปรับโครงสร้างสายอากาศ 2

ส่วนคือ ในส่วนแรกทำการปรับโครงสร้างของตัวแผ่พลังงาน และ ส่วนที่สองทำการปรับที่บริเวณระนาบกราวด์ด้วยการเจาะ ผิวดวงแดงทั้งสองด้านแบบ 2 ชั้น ส่งผลทำให้เกิดสายอากาศที่ ผ่านการปรับสามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ครอบคลุม ย่านความถี่ UWB ทั้งหมดที่ต้องการ แต่พบข้อเสียคือมีความ ซับซ้อนของโครงสร้างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดว่าเสนอ การลดความซับซ้อนของการปรับโครงสร้างด้วยการปรับเจาะ ผิวดวงแดงเพียง 1 ครั้งเท่านั้นเพื่อให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ แบบดิวิตีที่รองรับการใช้งานครอบคลุมย่านความถี่ UWB ได้ เช่นเดียวกัน การเจาะผิวดวงแดงเพียงครั้งเดียวมีข้อดีคือทำให้ เกิดความซับซ้อนทางโครงสร้างสายอากาศน้อยลง หัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้เน้นการปรับโครงสร้างแบบง่าย ด้วยการป้อน สัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) เพื่อให้โครงสร้างสายอากาศอยู่ในระนาบเดียวกันตัวป้อน สัญญาณ จึงเลือกโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานลักษณะเป็นรอบทิศทาง (omnidirectional) หรือส่งรับสัญญาณได้ทุกทิศทาง โดยมีค่า อัตราขยายสูงสุดสูงไม่ต่ำกว่า 3.28 dBi ที่ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่ง กำลัง (Half Power Beam Width: HPBW) เท่ากับ 80° (Balanis, 2005) และสามารถตอบสนองต่อการประยุกต์ใช้งานกับแถบ ความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี เทคนิคการเจาะผิวดวงแดงบน ระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) ถูกนำมาใช้ สำหรับการวิเคราะห์ผลของค่าอิมพีแดนซ์ แบบดิวิตีที่ว่ามีการครอบคลุมแถบความถี่ UWB ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ (dB) มาประกอบการวิเคราะห์เนื่องจากผล ของค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการแปลงผลกลับจะส่งผลต่อค่า อิมพีแดนซ์แบบดิวิตีโดยตรง (Balanis, 2005) งานวิจัยนี้ใช้การ จำลองแบบมาช่วยสำหรับการปรับโครงสร้างสายอากาศโดยเลือกใช้ โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST)

โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีคุณสมบัติในด้านของค่าความ นำกระแสไฟฟ้าคงที่ เหมาะกับการใช้งานในย่านความถี่สูงได้เป็น อย่างดี (Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011)

สำหรับขั้นตอนในนำเสนอการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการศึกษา พัฒนาโครงสร้างสายอากาศในส่วนที่ 2 การออกแบบและผลการ จำลองส่วนที่ 3 การสร้างและทดสอบนำมาเปรียบเทียบผล สายอากาศกับงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนที่ 4 และการสรุปผลส่วน สุดท้ายจะถูกนำเสนอในส่วนที่ 5

2. การศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศ

การศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศสำหรับรองรับการใช้ งานแถบความถี่กว้างยิ่งที่มีการปรับเน้นความไม่ซับซ้อนเริ่มด้วย การเลือกรูปร่างของตัวแผ่พลังงานของสายอากาศ บทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 รูปแบบได้แก่ รูป สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม (Naktong et al., 2016) โดยการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบ่ง ขั้นตอนออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

2.1 การกำหนดขนาดของสายอากาศโดยรวม

ขนาดของสายอากาศโดยรวมเบื้องต้นจะถูกพิจารณาและถูก กำหนดเป็นอันดับแรก เพื่อใช้ในการกำหนดและคำนวณหา พารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศในลำดับถัดไป ขนาดสายอากาศ โดยรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) - (4) (Balanis, 2005; Prasanna & Sridevi, 2014) โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1 ในรูปที่ 1 เป็นโครงสร้าง ของสายอากาศโมโนโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำ คลื่นระนาบร่วม โดยในการคำนวณเบื้องต้นนั้นจะพิจารณาช่วง ความถี่ต่ำของระบบ UWB (3.1 GHz) ก่อนเนื่องจากจะส่งผลต่อ ระยะความยาวคลื่น (λ) ที่มากที่สุดเมื่อ

$$W_1 = \frac{0.57c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{มม.}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} (1 + 0.3h) \quad (\text{มม.}) \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W_1}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W_1}{h} + 0.8 \right)} \quad (\text{มม.}) \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{0.63\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{มม.}) \quad (4)$$

โดยที่

C คือ ความเร็วแสง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (3.1 GHz)

h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง FR4 (0.764 มม.)

W_1 คือ ความกว้างของแผ่นสายอากาศ (34 มม.)

L_1 คือ ความยาวของแผ่นสายอากาศ (34 มม.)

λ คือ ความยาวคลื่น (96.77 มม.)

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (4.3)

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (3.26)

ΔL คือ ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า (0.37 มม.)

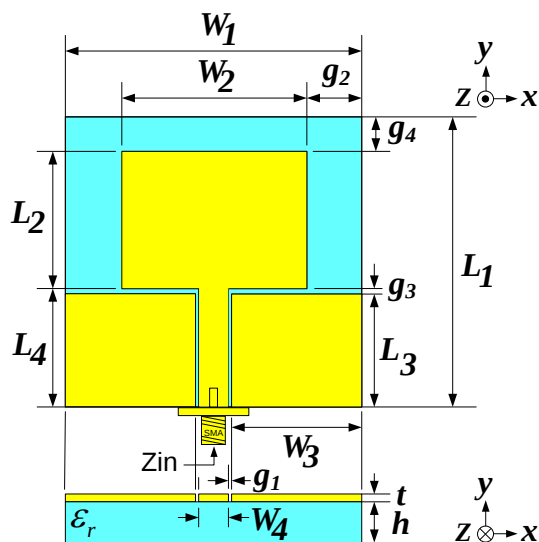
t คือ ความหนาของแผ่นทองแดง (0.017 มม.)

g_1 คือ ความกว้างระหว่างสายนำสัญญาณถึงระนาบกราวด์

g_2 คือ ความกว้างระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงแผ่นฐานรอง FR4

g_3 คือ ความยาวระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงระนาบกราวด์

g_4 คือ ความยาวระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงแผ่นฐานรอง FR4



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำคลื่น
ระนาบร่วม

2.2 การกำหนดขนาดของตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

หากพิจารณาจากโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมแสดงดังรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาความกว้างและความยาวของตัวแผ่นพลังงานได้จากสมการที่ (5) และ (6) (Balanis, 2005) คือ

$$W_2 = 0.35\lambda \left[\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right]^{-1/2} \quad (\text{มม.}) \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{0.35\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (\text{มม.}) \quad (6)$$

โดยที่

W_2 คือ ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน

L_2 คือ ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน

ซึ่งในส่วนการป้อนสัญญาณด้านอินพุต (Z_{in}) เข้าที่หัวเชื่อมต่อ SMA แสดงดังรูปที่ 1 ให้กับตัวสายอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ลักษณะของสายนำสัญญาณรูปแบบนี้ตัวนำสัญญาณกับระนาบกราวด์จะอยู่ในระนาบเดียวกันโดยจะมีระนาบกราวด์วางร่วมกันอยู่ทั้งสองข้างตัวนำสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 1 โดยอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศเบื้องต้น

ขนาดความกว้าง		ขนาดความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W_1	34.00	L_1	34.00
W_2	21.00	L_2	16.00
W_3	3.10	L_3	13.40
W_4	15.15	L_4	12.00
g_1	0.30	g_3	1.40
g_2	6.50	g_4	4.60

ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 ส่วนที่เหลือสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$W_3 = \frac{0.057 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (7)$$

$$L_3 = \frac{0.25 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (8)$$

$$W_4 = \frac{0.283 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (9)$$

$$L_4 = \frac{0.224 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (10)$$

โดยที่

W_3 คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณ

L_3 คือ ความยาวของสายนำสัญญาณ

W_4 คือ ความกว้างของระนาบกราวด์ร่วม

L_4 คือ ความยาวของระนาบกราวด์ร่วม

2.3 การกำหนดขนาดของตัวแผ่พลังงานรูปวงกลม

การคำนวณค่ารัศมีของสายอากาศรูปวงกลมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) (Balanis, 2005) เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

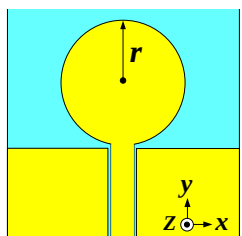
$$r = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (\text{มม.}) \quad (11)$$

โดยที่

F คือ รัศมีประสิทธิผลของตัวแผ่พลังงานแบบวงกลม (13.68)

r คือ รัศมีของตัวแผ่พลังงานแบบวงกลม (12.32 มม.)

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (10)-(11) สามารถแสดงดังโครงสร้างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมป้อนด้วยท่อนำคลื่น
ระนาบร่วม

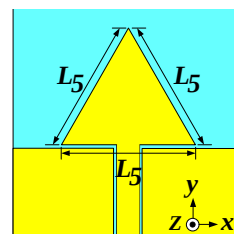
2.4 การกำหนดขนาดของตัวแผ่พลังงานรูปสามเหลี่ยม

งานวิจัยนี้เลือกสายอากาศรูปสามเหลี่ยมเป็นลักษณะสามด้านเท่า การคำนวณหาขนาดความยาวแต่ละด้านของสายอากาศใช้สมการที่ (12) (Vishwakarma et al., 2006; Sharma et al., 2008) และโครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3

$$L_5 = \frac{2c}{3f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{มม.}) \quad (12)$$

โดยที่

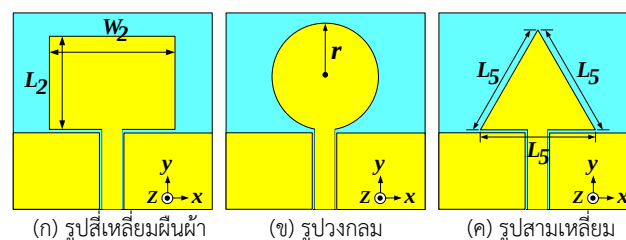
L_5 คือ ความยาวในหนึ่งด้านของสายอากาศรูปสามเหลี่ยม
(31.11 มม.)



รูปที่ 3 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมป้อนด้วยท่อนำคลื่น
ระนาบร่วม

2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติจากการจำลองแบบ

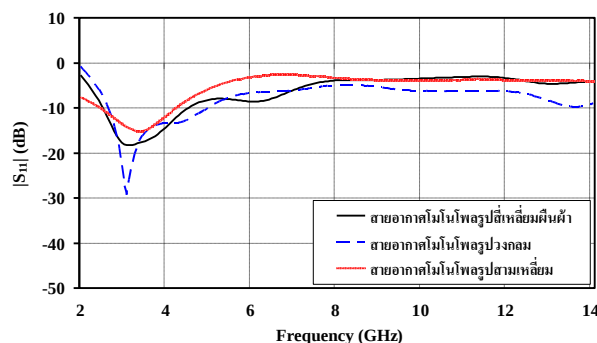
พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่มีตัวแผ่พลังงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้านเข้าด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับขนาดพารามิเตอร์ของตัวแผ่พลังงานแบบสามเหลี่ยมและวงกลมแสดงค่าได้ดังรูปที่ 2 และ 3 แต่ยังใช้พารามิเตอร์ในส่วนระนาบกราวด์เช่นเดียวกันกับในรูปที่ 1 สำหรับการปรับโครงสร้างสายอากาศของทั้ง 3 รูปแบบจะอธิบายให้ชัดเจนในส่วนต่อไป



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเริ่มต้น

เพื่อให้เห็นภาพรวมการออกแบบสายอากาศตามหัวข้อ 2.1 – 2.4 จึงทำการสรุปรวมลักษณะของโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมพื้นฐานทั้ง 3 รูปแบบไว้ในรูปภาพเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4 และนำโครงสร้างของสายอากาศพร้อมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ผลด้วยการการจำลอง

แบบโดยใช้โปรแกรม CST จากผลการจำลองแบบพบว่า สายอากาศทั้ง 3 รูปแบบที่ได้นำเสนอมาก่อนหัวข้อย่อก่อนหน้า นี้มีค่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงบริเวณความถี่ 3.1 GHz ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ในขั้นตอน ผลการตอบสนองดังกล่าวดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบของค่า $|S_{11}|$ (dB) ที่ได้จากสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลมและสามเหลี่ยมก่อนการปรับโครงสร้าง

จากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่า สายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีการตอบสนองกับความถี่ 3.1 GHz มากที่สุด รองลงมาคือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปสามเหลี่ยมตามลำดับ ดังแสดงผลคุณสมบัติจากการจำลองแบบของค่าพารามิเตอร์ ๆ ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบจากรูปที่ 5 ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติจากการจำลองของค่าพารามิเตอร์ ๆ ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ

สายอากาศ	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	วงกลม	สามเหลี่ยม
ขนาดของตัวแผ่พลังงาน	$W_2 = 21$ มม. $L_2 = 16$ มม.	$r = 12.32$ มม.	$L_5 = 31.11$ มม.
$ S_{11} $ (dB)	-18.16	-28.97	-14.89
VSWR	1.24:1	1.09:1	1.48:1
Gain (dBi)	3.14	3.78	2.95
BW (GHz)	1.96	2.37	2.16
Z_{Ant} (Ω)	43.91+1.35	53.62+j6.26	40.22+j20.66

3. การออกแบบและการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลต้นแบบ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศต้นแบบเริ่มต้นจากการนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปเรขาคณิตพื้นฐานทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 4 มาปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทำให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในแถบ

ความถี่กว้างยิ่งยวดได้ กล่าวคือขั้นตอนแรกทำการวิเคราะห์ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าที่ย่านความถี่ 3.1 GHz นั้น $|S_{11}|$ (dB) มีค่าต่ำกว่า -10 dB แต่เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่สูงคือที่ความถี่ 4.5 - 10.6 GHz ค่า $|S_{11}|$ (dB) มีค่าสูงกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ UWB ซึ่งไม่สามารถนำสายอากาศไปใช้งานในย่านความถี่สูงได้ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการเซาะพื้นผิวทองแดงบนระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) ของสายอากาศ ร่วมกับการพิจารณาผลตอบสนองของสายอากาศต่อความถี่กลางของช่วงความถี่ 4.5 - 10.6 GHz (7.5 GHz) ด้วยการวิเคราะห์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศใหม่อีกครั้งด้วยสมการที่ (13-14) (Naidu & Malhotra, 2016; Matin & Sayeed, 2010; Mahmoud & Hamad, 2016)

$$R_m \begin{cases} 45 \left(\frac{\lambda}{W_4} \right)^2 & W_1 \ll \lambda \\ 60 \left(\frac{\lambda}{W_4} \right)^2 & W_1 \gg \lambda \end{cases} \quad (\Omega) \quad (13)$$

$$L_6 = \frac{L_4}{32\pi} \cos^{-1} \left(\frac{Z_o}{R_m} \right) \quad (\text{มม.}) \quad (14)$$

โดยที่

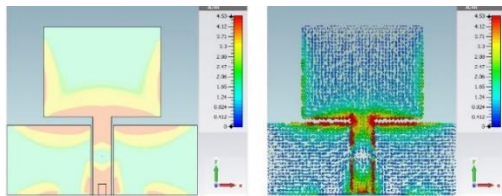
L_6 คือ ความยาวของร่องระนาบกราวด์ (มม.)

R_m คือ ค่าความต้านทานอินพุต (Ω)

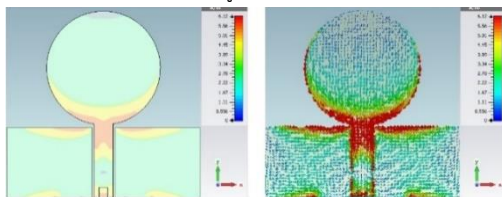
Z_o คือ ค่าอิมพีแดนซ์เฮอร์ตซ์พุด (50Ω)

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเซาะพื้นผิวทองแดงบนระนาบกราวด์สิ่งสำคัญคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเซาะผิวทองแดง กล่าวคือทำการจำลองแบบหาค่าความหนาแน่นและรูปแบบทิศทางของกระแสบนพื้นผิวทองแดงของตัวสายอากาศเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์หาตำแหน่งการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ส่งผลตอบสนองกับความถี่ที่ต้องการมากที่สุด จากผลจำลองแบบสายอากาศทั้งสามรูปแบบที่ความถี่ 5.5 6.5 7.5 8.5 และ 9.5 GHz พบว่าผลจากการจำลองแบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือค่าความหนาแน่นและทิศทางของกระแสที่ปรากฏจะมาก

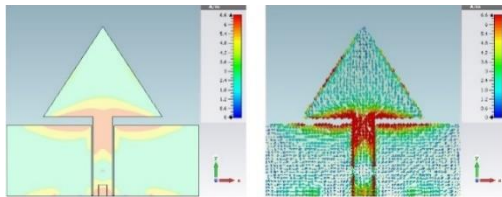
บริเวณเดียวกันคือ บริเวณด้านล่างของตัวแผ่นพลังงานที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณสำหรับป้อนสัญญาณและบริเวณด้านบนแผ่นระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 6 (บริเวณพื้นที่สีแดง) แสดงความหนาแน่นและทิศทางการกระจายที่ได้จากการจำลองแบบที่ความถี่ 7.5 GHz สรุปได้ว่าการปรับโครงสร้างสายอากาศด้วยการเจาะรูบริเวณดังกล่าวจึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศ (Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) เช่นค่าแบนด์วิดท์ อิมพีแดนซ์และอัตราขยาย เป็นต้น มากที่สุด



(ก) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ข) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปวงกลม



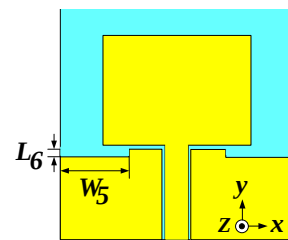
(ค) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปสามเหลี่ยม

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ที่ความถี่ 7.5 GHz

จากการศึกษา คำนวณและวิเคราะห์ผลการจำลองแบบของความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบและได้ทำการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณที่กล่าวมา ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับโครงสร้างดังกล่าวได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

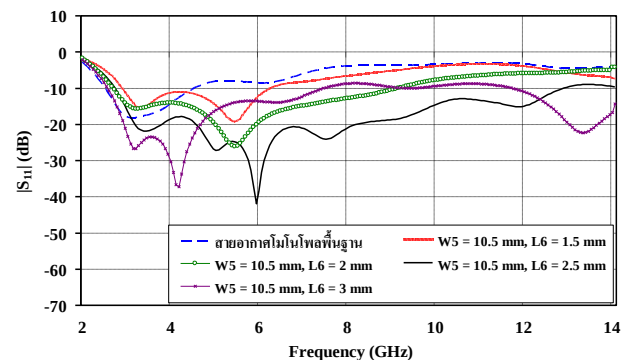
3.1 ผลจากการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ผลการจำลองแบบของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณระนาบกราวด์ทั้งสองด้านแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 7 พบว่าการปรับเจาะโครงสร้างสายอากาศส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า $|S_{11}|$ (dB) พารามิเตอร์ทางกายภาพที่พิจารณาในการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณระนาบกราวด์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัวคือขนาด W_5 และ L_6 เหตุที่ทำการปรับพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวเพื่อความไม่ซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ ตำแหน่งของพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 7 การปรับขนาด W_5 จะกำหนดค่าคงที่ไว้เท่ากับ 10.5 มม. แต่ทำการปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. ค่าที่เลือกปรับดังกล่าวเป็นค่าที่ได้ประมาณค่าจากการคำนวณตามสมการ (14) มาในเบื้องต้น



รูปที่ 7 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

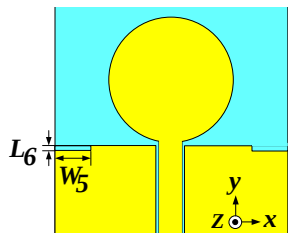
นำผลการจำลองแบบการปรับโครงสร้างของสายอากาศตามรูปที่ 7 มาเปรียบเทียบกับผลแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าขนาด W_5 มีขนาดเท่ากับ 10.5 มม. ส่วน L_6 ที่ขนาดเท่ากับ 2.5 มม. ส่งผลต่อค่า $|S_{11}|$ (dB) ทำให้สายอากาศตอบสนองช่วงความถี่ที่ดีที่สุดและครอบคลุมความถี่ที่ใช้กันมากที่สุด มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 4.58:1 (2.81-12.86 GHz)



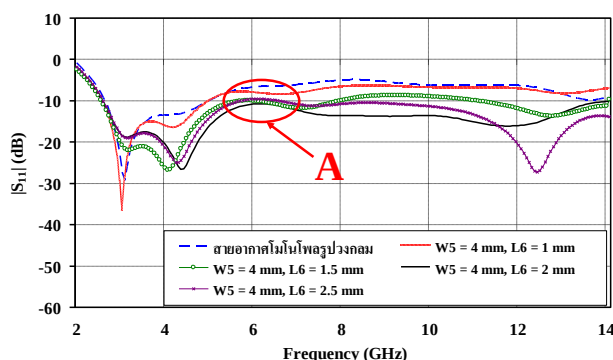
รูปที่ 8 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้จากการปรับ W_5 และ L_6

3.2 ผลจากการเจาะผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปวงกลม

รูปแบบโครงสร้างสายอากาศรูปแบบที่สองคือสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมที่มีการปรับบริเวณระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 9 กรณีนี้ได้กำหนดค่าคงที่ให้กับ W_5 เท่ากับ 4 มม. แล้วเลือกปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. เช่นเดียวกับกรณีแรกจากการจำลองแบบพบว่าที่ขนาด W_5 เท่ากับ 4 มม. และขนาด L_6 เท่ากับ 2 มม. นั้นทำให้ค่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดและมีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 5.30:1 (2.61-13.82GHz) ซึ่งครอบคลุมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a (3.1-10.6 GHz) ผลการจำลองแบบที่ได้จากการปรับโครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 10 แต่มีข้อสังเกตในช่วงความถี่ 6.25 GHz นั้น $|S_{11}|$ (dB) ที่ต่ำกว่า -10 dB ค่อนข้างเข้าใกล้เส้น -10 dB มาก ดังแสดงที่จุด A เมื่อนำไปสร้างจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับตัวสายอากาศที่ส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของ $|S_{11}|$ (dB) ที่เพิ่มมากขึ้น (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016)

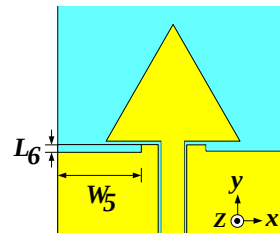


รูปที่ 9 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม

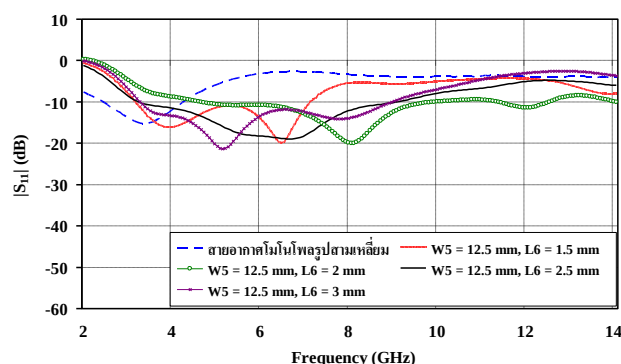


รูปที่ 10 ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปวงกลมเมื่อปรับ W_5 และ L_6

3.3 ผลจากการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 11 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

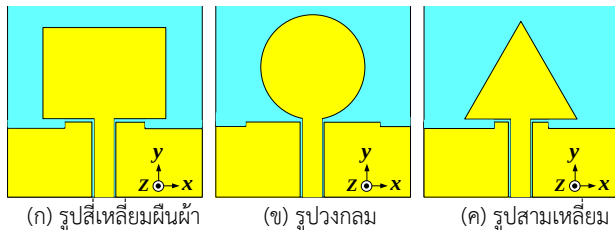


รูปที่ 12 ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสามเหลี่ยมเมื่อปรับ W_5 และ L_6

โครงสร้างสายอากาศแบบสุดท้ายเป็นโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 11 โดยกำหนดขนาด W_5 เท่ากับ 12.5 มม. และทำการเลือกปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. เช่นเดียวกับกรณีแรก จากผลการจำลองแบบแสดงดังรูปที่ 12 พบว่าการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ขนาด W_5 เท่ากับ 12.5 มม. และขนาด L_6 เท่ากับ 2.5 มม. ส่งผลให้ค่าของ $|S_{11}|$ (dB) ตอบสนองช่วงความถี่ใช้งานได้ดีที่สุด โดยครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดและมีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 2.41:1 (3.58 - 8.63 GHz) แต่ยังไม่ครอบคลุมตามย่านความถี่ UWB

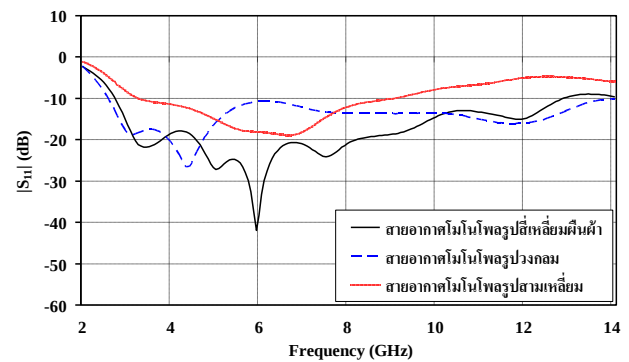
3.4 เปรียบเทียบผลคุณสมบัติจากการจำลองแบบด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ

การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบที่มีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งผลจากการปรับเปลี่ยนพบว่า การเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ของสายอากาศสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ให้กว้างมากขึ้นตามข้อสันนิษฐานที่ตั้งไว้ก่อนหน้านี้จริง



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

ผลสรุปจากการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบจากโครงสร้างทั้ง 3 พบว่าโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมาะสมต่อการใช้งานในย่านความถี่ UWB มากที่สุด รองลงมาคือ โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม ถึงแม้ว่าสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีแบนด์วิดท์ใช้งานกว้างกว่าแบบสี่เหลี่ยมเพียงเล็กน้อย แต่ข้อด้อยที่พบคือค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม ประมาณช่วงความถี่ 5 – 7 GHz มีค่าใกล้เคียง -10 dB ในขณะที่รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นมีค่าต่ำกว่า -20 dB ในช่วงความถี่ดังกล่าวหรือประมาณ -15 dB เกือบตลอดทั้งแถบความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a สำหรับโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นค่า $|S_{11}|$ (dB) สังเกตได้ชัดเจนสายอากาศโครงสร้างกรณีนี้ยังไม่ครอบคลุมรองรับการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบทั้ง 3 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 และผลสรุปรายละเอียดต่าง ๆ เพิ่มเติมของผลการจำลองแบบที่ของโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 แบบ แสดงดังตารางที่ 3

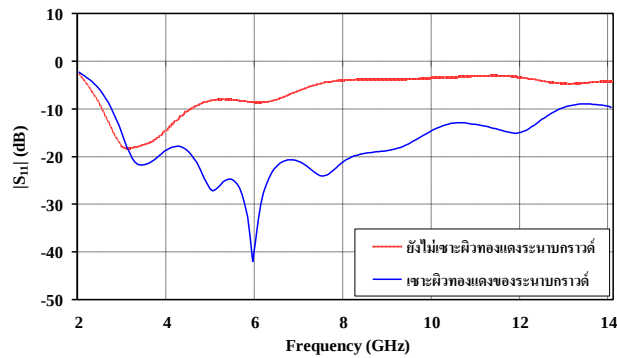


รูปที่ 14 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการจำลองแบบที่ได้จากโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 แบบ	ขนาด		f_c (GHz)	BW (GHz)	BW อัตราส่วน
	W_5 (มม.)	L_6 (มม.)			
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10.5	2.5	7.84	2.81-12.86	4.58:1
รูปวงกลม	4.0	2.0	8.22	2.61-13.82	5.30:1
รูปสามเหลี่ยม	12.5	2.5	6.11	3.58-8.63	2.41:1

จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยังไม่ได้เซาะและเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์แสดงดังในรูปที่ 15 จากรูปสังเกตได้ว่าการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์จะส่งผลโดยตรงกับการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศคือได้ค่า $|S_{11}|$ (dB) มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ 2.81 - 12.86 GHz ซึ่งทำให้สายอากาศดังกล่าวรองรับการใช้งานตลอดย่านความถี่ UWB การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้ง 2 กรณีแสดงดังตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 สังเกตได้ว่าการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ส่งผลให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในส่วนค่าจำนวนจินตภาพ ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานมีค่าใกล้เคียง 0 มากกว่ากรณีไม่เซาะพื้นผิวทองแดง ทำให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีกว่า สำหรับค่าจำนวนจริงของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกันกับ Z_0 (50 Ω) มากเช่นเดียวกัน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ความสัมพันธ์ของค่า $|S_{11}|$ (dB) สามารถคำนวณย้อนกลับเป็นค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้ดังสมการที่ 15-18



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูบีสี่เหลี่ยมที่ยังไม่เจาะและเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (15)$$

$$\Gamma l = \Gamma_L e^{-2j\beta l} ; \beta l = (2\pi / \lambda)l \quad (16)$$

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta l)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (\Omega) \quad (18)$$

โดยที่

Γ_L คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ

Γl คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายนำสัญญาณที่ไม่มี

สูญเสีย

l คือ ความยาวสายอากาศ

Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Ω)

Z_o คือ ค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต (50 Ω)

Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์อินพุต (Ω)

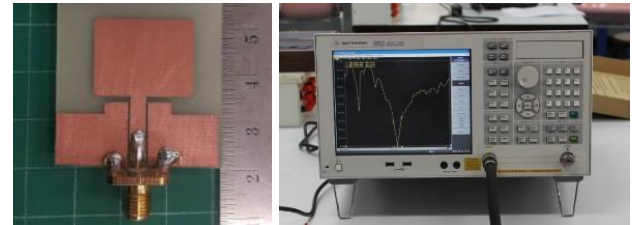
RL คือ การสูญเสียย้อนกลับ (dB)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

f_c	ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ก่อน การเจาะรู (Ω)	ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์หลัง การเจาะรู (Ω)
3 GHz	43.19 + j1.35	57.34 + j0.89
4 GHz	45.85 - j29.42	62.72 - j2.13
5 GHz	32.05 + j28.64	48.09 - j1.65
6 GHz	95.93 - j30.74	43.68 - j8.69
7 GHz	72.47 - j66.11	48.09 - j1.65

8 GHz	13.61 - j23.50	39.91 - j2.81
9 GHz	15.34 - j54.22	45.31 - j9.91
10 GHz	20.14 - j49.08	60.16 - j17.99

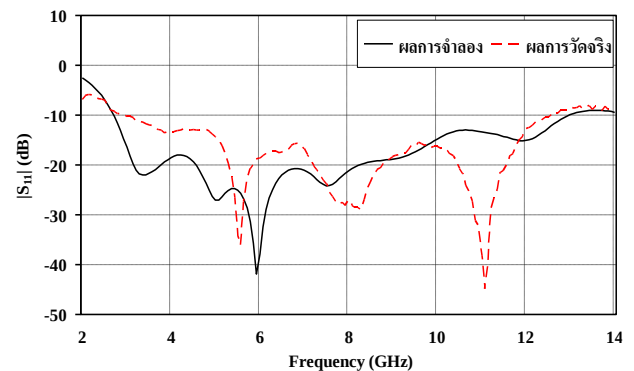
4. การสร้างและผลการทดสอบ



(ก) สายอากาศโมโนโพล

(ข) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

รูปที่ 16 สายอากาศโมโนโพลรูบีสี่เหลี่ยมที่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์และเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



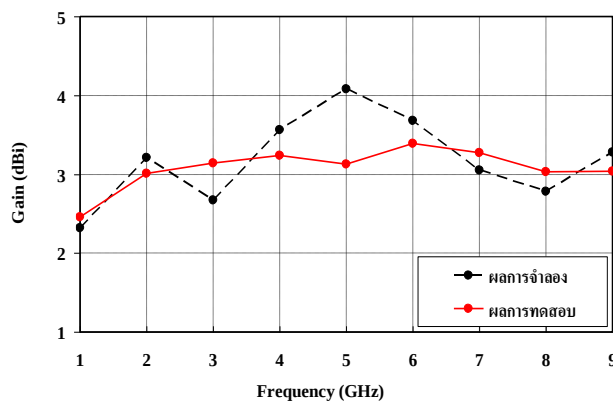
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูบีสี่เหลี่ยมต้นแบบที่ได้นำเสนอ

จากการคำนวณวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมการจำลองแบบจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศโมโนโพลรูบีสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยเทคนิคการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ดังรูปที่ 7 และนำพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวมาประกอบประกอบสร้างสายอากาศจริงแสดงดังรูปที่ 16 (ก) และทำการทดสอบสายอากาศดังกล่าวด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C แสดงดังรูปที่ 16 (ข) เพื่อวัดหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบที่ได้ในส่วนก่อนหน้านี้นี้ คุณสมบัติที่ทดสอบคือ $|S_{11}|$ (dB) ดังแสดงในรูปที่ 17 อัตราขยาย (Gain) ดังแสดงรูปที่ 18 การวัดค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 19 และผลการจำลองแบบกับการทดสอบผลในรูปที่ 20 ผลจากการทดสอบจริง

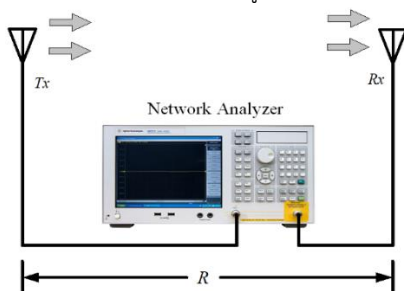
พบว่าสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมที่มีการเซาะพื้นผิวที่ระนาบกราวด์มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 4.13: 1 (2.97-12.26 GHz) มีอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ (3-11 GHz) ที่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงคือมีค่าเท่ากับ 3.07 dBi ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ของสายอากาศระหว่างผลการจำลองแบบและผลการทดสอบจริงแสดงได้ดังตารางที่ 5 จากตารางพบว่าค่าทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและการทดสอบของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมที่ได้นำเสนอ

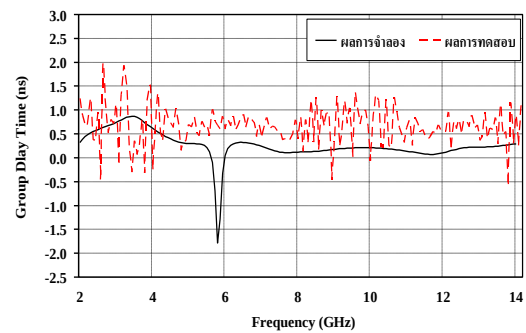
สายอากาศ	f_c (GHz)	Gain (dBi)	BW (GHz)	BW Ratio
จำลองผล	7.83	3.18	2.81-12.86	4.58:1
ผลการทดสอบ	7.61	3.07	2.97-12.26	4.13:1



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบจริงอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมต้นแบบ



รูปที่ 19 การติดตั้งระบบส่งสัญญาณเพื่อทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม

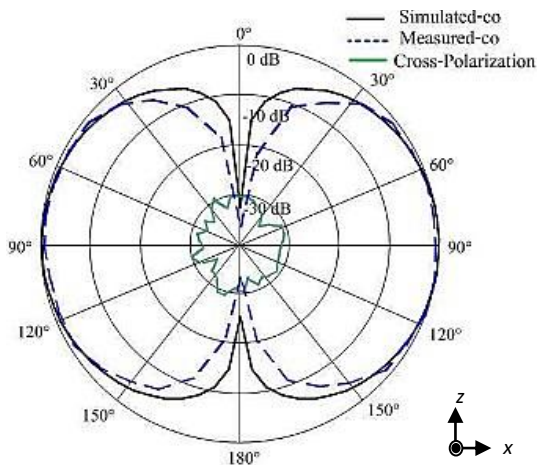


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่มของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมต้นแบบ

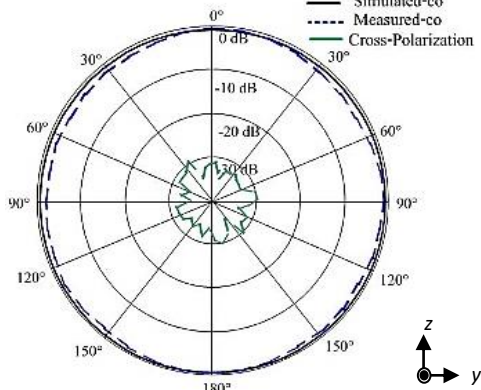
สำหรับการศึกษาผลกระทบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (group delay time) ได้ทำการติดตั้งระบบส่งสัญญาณเพื่อทำการทดสอบค่าดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 19 เนื่องจากมาตรฐานในการรับส่งสัญญาณพัลส์ที่ส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องมีการแกว่งของค่าการหน่วงเวลาไม่เกิน ± 2 ns ตลอดย่านความถี่ UWB เมื่อทำการทดสอบด้วยการปรับระยะห่าง R ตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ซม. พบว่าที่ระยะห่าง R เท่ากับ 30 ซม. ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานรับส่งสัญญาณพัลส์ ทำให้ผลตอบสนองการรับส่งข้อมูลถูกต้องตามที่ต้องการ การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่มในระยะห่าง R เท่ากับ 30 ซม. แสดงดังรูปที่ 20

การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบจริงของแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ช่วงความถี่ต่ำ (3.1 GHz) ความถี่กลาง (6.85 GHz) และความถี่สูง (10.6 GHz) แสดงดังรูปที่ 21 ถึง 23 การเปรียบเทียบผลดังกล่าวเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ต่ำมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทางทั้งผลการจำลองแบบและทดสอบดังแสดงในรูปที่ 21

กรณีการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่กลางและความถี่สูง พบว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบให้แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางแต่ขณะที่ได้ผลจากการทดสอบจริงกลับมีลักษณะเป็นแบบสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 22 และ 23 รายละเอียดค่าต่าง ๆ ด้านความถี่ มุม ขนาดของลำคลื่นหลัก และค่า HPBW ของระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 6

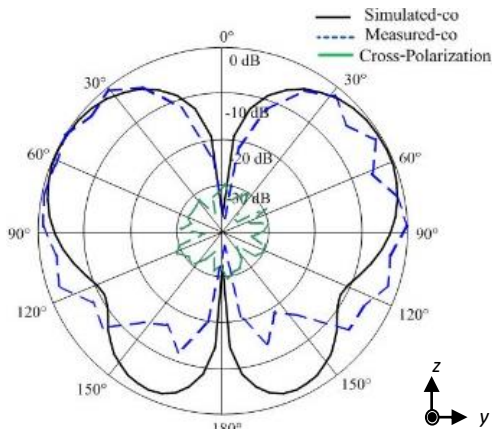


(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.10 GHz

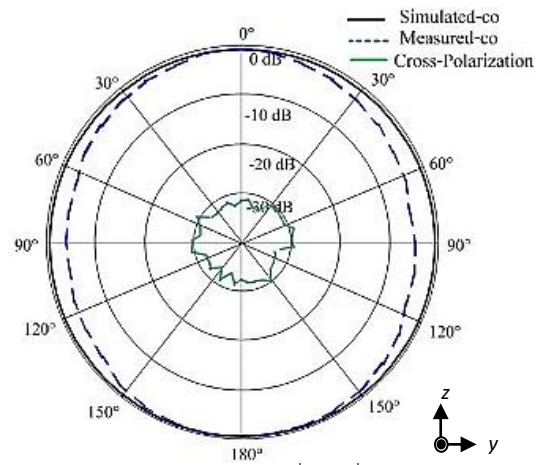


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.10 GHz

รูปที่ 21 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.10 GHz

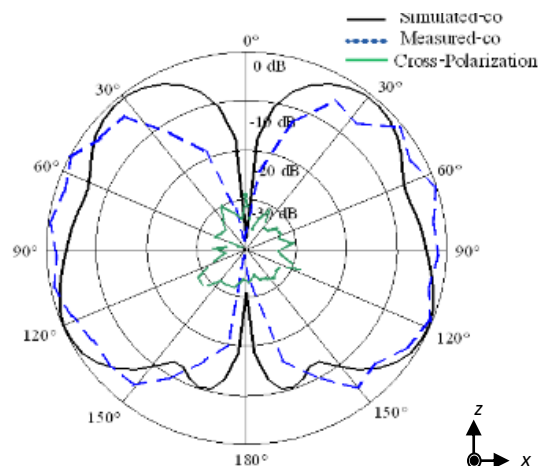


(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 6.85 GHz

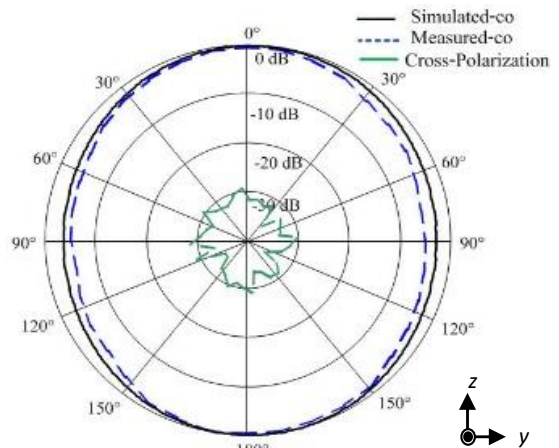


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 6.85 GHz

รูปที่ 22 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 6.85 GHz



(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.60 GHz



(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.60 GHz

รูปที่ 23 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 10.60 GHz

ตารางที่ 6 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ระนาบ	ความถี่	ลำคลื่นหลัก		HPBW	
		จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
สนามไฟฟ้า	3.10 GHz	90°	114°	150°	120°
	6.85 GHz	54°	52°	90°	100°
	10.60 GHz	120°	118°	50°	95°
สนามแม่เหล็ก	3.10 GHz	0°	180°	360°	360°
	6.85 GHz	180°	0°	360°	313°
	10.60 GHz	180°	0°	360°	352°

การเปรียบเทียบผลกำลังงานที่ได้รับ (power received) จากการทดสอบที่สนามระยะไกล (far field) ที่ระยะเท่ากับ 1 ม. การที่เลือกระยะ 1 ม. เนื่องจากระยะดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังงานได้ชัดเจนมากที่สุดของสายอากาศไดโพลกับสายอากาศที่นำเสนอ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3-11 GHz ดังแสดงรูปที่ 24 นำมาคำนวณด้วยสมการที่ 19 (Balanis, 2005) กำหนดให้ภาคส่งกำลังงานเท่ากับ 0 dBm พบว่ากำลังงานที่ได้รับเมื่อพิจารณาเป็นสายอากาศไดโพลมีกำลังงานเฉลี่ยประมาณ -54.99 dBm ขณะที่สายอากาศที่นำเสนอมีกำลังงานที่ได้รับเฉลี่ยประมาณ -55.19 dBm สายอากาศที่นำเสนอมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสายอากาศไดโพลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.63

$$P_r = G_t G_r P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (\text{dBm}) \quad (19)$$

โดยที่

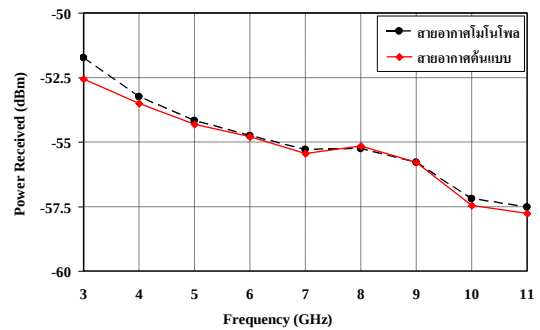
P_t คือ กำลังงานภาคส่ง (dBm)

P_r คือ กำลังงานภาครับ (dBm)

G_t คือ กำลังงานภาคส่งของสายอากาศ (dBi)

G_r คือ กำลังงานภาครับของสายอากาศ (dBi)

r คือ ระยะทางภาคส่งถึงภาครับ (ม.)



รูปที่ 24 ผลการทดสอบค่ากำลังงานภาครับของสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018)

งานวิจัย	โครงสร้างสายอากาศ		BW Ratio/ % BW	ความถี่ (GHz)
	รูปร่าง	ขนาด (mm)		
[4]		32x22.5x0.8	4.74:1	3.80-18.20
[5]		40x40x0.8	6.54:1	2.28-14.90
[6]		28x34x1.6	1.05:1 1.85:1	2.36-2.50 3.45-6.40
[7]		38x45x0.764	9.67:1	2.49 - 24.09
[8]		30x30x0.764	5.27:1	2.71-14.28
[9]		19.22x36x1.6	5.26:1	2.85 -15
[10]		20x18x1.6	2.10:1	3.80-8
[11]		30x30x0.764	3.47:1	3.09 - 10.73
[12]		30 x 32 x 1.6	3.5:1	2.60-9.10
[13]		14x18x1	4.34:1	2.95-12.81
[14]		16x24x1.6	3.14	3.50-10.90

ตารางที่ 7 (ต่อ)

งานวิจัย	โครงสร้างสายอากาศ		BW Ratio/ % BW	ความถี่ (GHz)
	รูปร่าง	ขนาด (mm)		
[15]		34x40x0.764	3.88:1	3.09-12
[16]		34x36x0.764	4.53:1	2.42 - 10.98
		34x36x0.764	4.03	2.79-11.25
		34x36x0.764	2.04:1 1.23:1	2.58-5.27 7.64-9.44
[17]		34x34x0.764	4.81	2.78-13.38
[18]		20x24x1.6	1.05:1 3.53:1	2.40-2.52 3-10.60
[19]		43.9x50.13x1.58	3.08:1	2.50-7.70
[20]		24x32.4x1.6	6.35:1	1.70-10.80
[21]		12x30x1.6	3.97:1	2.90-11.50
งานวิจัยนี้		34x34x0.764	4.13:1	2.97-12.26

จากการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศของงานจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดและนำพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างสายอากาศจริง งานวิจัยนี้พบว่าสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าส่งผลดีที่สุดและนำไปปรับโครงสร้างงานร่วมกับการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้รองรับการใช้งานย่าน UWB จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีการปรับโครงสร้างเพื่อขยายแบนด์วิดท์สำหรับรองรับการใช้งานย่าน UWB กับงานวิจัยที่มีในอดีตที่ผ่านมา (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีข้อดีคือมีความไม่ซับซ้อนและ

มีขั้นตอนในการปรับโครงสร้างที่น้อยกว่างานวิจัยอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบแสดงรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 7

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนพลังงานด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศวิเคราะห์และพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ (dB) เริ่มจากการพิจารณาผลจากการจำลองแบบของโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมจากตัวแผ่นพลังงานที่มีรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 รูปแบบ คือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และสามเหลี่ยมตามลำดับ เพื่อนำมาพัฒนาเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กว้างรองรับการใช้งานแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ที่ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ความถี่ 3.1-10.6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์เพียงชั้นเดียว ข้อดีของเทคนิคดังกล่าวคือสามารถมีขั้นตอนการปรับโครงสร้างสายอากาศไม่มีความซับซ้อน

จากผลการศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีตัวแผ่พลังงาน รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม ร่วมกับการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ทั้งสองฝั่ง พบว่าโครงสร้างสายอากาศที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์และรองรับการใช้งานย่าน UWB ได้เหมาะสมที่สุดคือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีร้อยละแบนด์วิดท์ก่อนทำการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์อยู่ที่ร้อยละ 57.14 ครอบคลุมการใช้งานได้ตั้งแต่ย่านความถี่ 2.45 - 4.41 GHz และเมื่อทำการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 4.53: 1 หรือคิดเป็นร้อยละ 122.07 ครอบคลุมการใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่ 2.97 - 12.26 GHz ซึ่งกว้างกว่าโครงสร้างสายอากาศที่ไม่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงประมาณ 2.13 เท่า มีอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ (3-11 GHz) เท่ากับ 3.07dBi และมีค่าประสิทธิภาพกำลังงานภาครับของสายอากาศต้นแบบใกล้เคียงสายอากาศโมโนโพลเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 99.63 ข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลจากการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน พบว่าเมื่อความถี่ที่ประยุกต์ใช้งานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่แบบ

รูปการแผ่พลังงานจะเบี่ยงเบนเป็นไปในลักษณะสองทิศทางเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก และเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าพบว่าที่ความถี่ปรับเพิ่มสูงขึ้นแบบรูปการแผ่พลังงานจะมีแนวโน้มบ่งชี้ทิศทางไปทางด้านบนมากขึ้นแทนที่จะออกไปทางด้านข้าง ตัวอย่างสำหรับประโยชน์ของสายอากาศในกลุ่มรูปแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พบว่ามีความนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการแพทย์โดยนำสายอากาศติดตั้งบนร่างกายเพื่อวัดหาความผิดปกติของกล้ามเนื้อหรือหลอดเลือดในร่างกายหรือเป็นเครื่องมือตรวจรู้สำหรับช่วยวิเคราะห์หาโรคต่าง ๆ ส่วนในด้านอื่นได้มีการนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์หาตำแหน่งพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ปิดเสียงอันตรายเพื่อทำการสำรวจพร้อมเฝ้าตรวจรักษาความปลอดภัยเพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดในพื้นที่ดังกล่าวอย่างถูกต้องรวดเร็วและมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการและสำหรับด้านการส่งสัญญาณสื่อสารไร้สายในอนาคตใช้งานติดตั้งสายอากาศร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงเพื่อนำหน้าที่ส่ง-รับสัญญาณแบบรองรับข้อมูลขนาดใหญ่ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองแบบและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ศูนย์กลางในส่วนเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C ในการทดสอบผลงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Akkaraekthalin, P. (1994). *Microwave circuit design* Mister Copy. King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory and design* (3rd ed.). John Wiley & sons New Jersey.
- Bhaskar, S., Brar, R. S., & Singh, A. K. (2016, December 9-11). *Compact planar rectangular monopole antenna for Bluetooth and UWB applications* [Paper presentation]. In 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON), Varanasi, India.
- Bikram, B., Amit, K., Basant, P., Tejraj, G., & Dharti R. S., (2017) Design of CPW- Fed Triangular Shaped UWB Antenna for Multiband Applications. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7), 2123-2128.
- Bustamante, P., Weiss, M. B., & Sicker, D. (2017, March 6-9). *Analysis of the Experimental Licenses of the Federal Communication Commission* [Paper presentation]. In IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, Piscataway, USA.
- Chang, D. C., Liu, M. Y., & Lin, C. H. (2005, July 3-8). *A CPW-fed U type monopole antenna for UWB applications* [Paper presentation]. In 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, USA.
- Coase, R. H. (2013). *The federal communications commission*. In Private and Common Property.
- Edalati, A., Shao, W., McCollough, T., & McCollough, W. (2017). A novel cavity backed monopole antenna with UWB unidirectional radiation. *Progress in Electromagnetics Research*, 72, 1-13.
- Jalali, M., & Sedghi, T. (2014). Very compact UWB CPW-fed fractal antenna using modified ground plane and unit cells. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(4), 851-854.
- Jan, J. Y., Kao, J. C., Cheng, Y. T., Chen, W. S., & Chen, H. M. (2006, July 9-14). *CPW-fed wideband printed planar monopole antenna for ultra-wideband operation* [Paper presentation]. In 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, Mexico.
- Kaewchan, B., & Ruengwaree, A. (2011). *Stepped grooving with half-circle stub on ground plane monopole antenna for UWB application*. http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2011/pdf/%5BWeE35%5D%20A01_1036.pdf
- Madanan, G., KRISHNA, D. D., & Aanandan, C. K. (2018). A Compact Rectangular Monopole Antenna Design with a Novel Feed for an Improved UWB Performance. *RADIOENGINEERING*, 27(1), 63-69.
- Mahmoud, N., & Hamad, E. K. (2016, February 22-25). *Tri-band microstrip antenna with L-shaped slots for bluetooth/WLAN/WiMAX applications* [Paper presentation]. In 2016 33rd National Radio Science Conference (NRSC), Aswan, Egypt.
- Matin, M. A., & Sayeed, A. I. (2010). A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna. *WSEAS Transactions on Communications*, 9(1), 63-72.
- Moeikham, P., & Akkaraekthalin, P. (2011, May 17-19). *A compact ultrawideband monopole antenna with tapered CPW feed and slot stubs* [Paper presentation]. In The 8th Electrical

- Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011, Khon Kaen, Thailand.
- Naidu, P. V., & Malhotra, A. (2016). A compact stair case shaped monopole dual band antenna for bluetooth/WLAN and UWB applications. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 11(1), 64-71.
- Naji, D. K. (2013). Compact Broadband CPW-fed Taper-shaped Monopole Antenna with L- slots for C- band Applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 3, 136-143.
- Naktong, W., & Ruengwaree, A. (2011, May 17-19). *Increasing bandwidth of flambeau-shape monopole antenna for UWB application* [Paper presentation]. In The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011, Khon Kaen, Thailand.
- Naktong, W., Apinya, I., Korsing, S., & Ruengwaree, A. (2016). *Mushroom Shaped Monopole Antenna which has Tuning on Ground Plane with Slot Etching Technique is Two Layers of Stair for Applying Ultra Wideband (UWB) Technology* [Paper presentation]. 10th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, at Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- Naktong, W., Korsing, S., Boonmaitree, P., Dabbug, P., & Ruengwaree, A. (2016 June 28 – July 1). *Study of geometry-shaped monopole antenna with step- shaped etching technique on ground plane* [Paper presentation]. In 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand.
- Prasanna, K. L., & Sridevi, B. R. D. P. (2014). Design of CPW-Fed Monopole Antenna with L- shape and T-shape for WLAN/Wi-MAX Applications. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5, 594-598.
- Ruengwaree, A., Naktong, W., & Namsang, A. (2013, October 23-25). *A TE-shaped monopole antenna with semicircle etching technique on ground plane for UWB applications* [Paper presentation]. In 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation, Nanjing, China.
- Sharma, P., Koul, S. K., & Chandra, S. (2008). Ka-band triangular patch antenna on micromachined high- k substrate. *IEICE transactions on communications*, 91(6), 2073-2076.
- Song, Y., Jiao, Y. C., Zhao, G., & Zhang, F. S. (2007). Multiband CPW- fed triangle- shaped monopole antenna for wireless applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 70, 329-336.
- Thongbor, P., Ruengwaree, A., Pirajanchai, V., Naktong, W., & Fhaphiem, N. (2016 June 28 – July 1). *Rectangular monopole antenna with arrow-shaped slot etching for UWB- MIMO application* [Paper presentation]. In 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI- CON), Chiang Mai, Thailand.
- US Federal Communications Commission. (2002). *FCC Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems: First report and order*. Technical Report.
- Vishwakarma, R. K., Ansari, J. A., & Meshram, M. K. (2006). Equilateral triangular microstrip antenna for circular polarization dual-band operation. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 35, 293-296.
- Vyas, K., & Singhal, P. K. (2014). Bandwidth Enhancement in CPW Fed Rectangular Patch Antenna by Modified Ground Structure. *International Journal of Modern Communication Technologies and Research*, 2(2), 25-28.