



การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณ  
แบบ CPW ที่มีสลับจูนรูปใบเลื่อยสำหรับการใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย  
Design of Wide-Slot Antenna Fed by CPW width Saw-shaped Tuning Stub for Wireless  
communication Systems

เทพ เกื้อทวีกุล

Thep Kueathaweekun

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสลับจูนรูปใบเลื่อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้มีแบนด์กว้างมากขึ้นสำหรับการสื่อสารไร้สาย ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศได้นำวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์ และทำการศึกษาคุณสมบัติพารามิเตอร์บางตัวของสายอากาศ ประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล ตามลำดับผลที่ได้จากการจำลองพบว่า มีความถี่ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.81-8.86 GHz และแบนด์วิดท์ เท่ากับ 6.05 GHz สำหรับนำไปใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย โดยแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศนี้เป็นแบบสองทิศทาง

**คำสำคัญ :** สายอากาศช่องเปิด/ สลับจูนรูปใบเลื่อย/ แบนด์วิดท์

**Abstract**

This paper presents a design and development of wide-slot antenna fed by CPW with saw-shaped tuning. The objectives of the proposed research increase the bandwidth for wireless communication systems. This proposed antenna is analyzed by using MoM method of IE3D software. The proposed antenna are study and analyzed for return loss ( $S_{11}$  parameter), input impedance ( $Z_{in}$ ), VSWR, bandwidth and far field radiation patterns, respectively. The simulations results of the proposed antenna can be obtained the frequency band from 2.81 GHz to 8.81 GHz, the impedance bandwidth of 6.05 GHz for wireless communication systems. The far-field radiation pattern of frequencies is bi-directional.

**Keywords :** Wide-slot antenna/Saw-shaped stub tuning/Bandwidth

**ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา**

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) ซึ่งถูกกำหนดอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11a (5.150-5.350 GHz) IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g (2.4-2.4835 GHz) เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) และการสื่อสาร UWB เป็นต้น ซึ่งได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง และ สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ดังนั้น จึงมี



นักวิจัยทำออกแบบและพัฒนาสายอากาศเพื่อนำไปใช้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งสายอากาศชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยเฉพาะสายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากสายอากาศนี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก เป็นต้น ปัจจุบันจึงมีนักวิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาสายอากาศนี้เพื่อนำมาใช้กับย่านการสื่อสารต่างๆ เช่น การออกแบบและพัฒนาสายอากาศหนึ่งความถี่ และสองความถี่ (Chulvanich และคณะ, 2007), (เทพ เกื้อทวีกุล, 2561), (เทพ เกื้อทวีกุล, 2558), (เทพ เกื้อทวีกุล และคณะ, 2558) และ (Chavan, et al., 2013) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) จากการศึกษาพบว่าสายอากาศเหล่านี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศหนึ่งความถี่และสองความถี่เพื่อใช้งานเฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้น และมีการออกแบบเฉพาะความถี่เท่านั้นจึงไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้งานในปัจจุบันเนื่องจากต้องการแบนด์วิดท์ที่มากขึ้น และได้มีการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่แบบแถบกว้าง (Kueathaweekun, W. และคณะ, 2007) โดยที่ได้จากการออกแบบของสายอากาศนี้มีแบนด์วิดท์ประมาณ 60% และมีการพัฒนาสายอากาศโดยใช้การปรับเปลี่ยนรูปร่างสายอากาศและสลับเพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น โดย Pratap และ Jayashree (2015) ออกแบบสายอากาศแบบเปิดรูปห้าเหลี่ยมโดยมีแบนด์วิดท์ครอบคลุม 3.281–7.45 GHz โดยสายอากาศเหล่านี้ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการ และมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ค่อนข้างยาก และมีสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์ที่สามารถนำไปใช้งานในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ แต่จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาสายอากาศที่รูปร่างที่ไม่ซับซ้อนทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ ได้อย่างเหมาะสม จะทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอแนะเสนอการออกแบบและศึกษาวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสลับจุนรูปใบเลื่อย เพื่อช่วยในการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยโครงสร้างของสายอากาศเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถปรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ดี ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศได้ของนำวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์และทำการศึกษาคณสมบัติพารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวของสายอากาศ คือ การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนามระยะไกลตามลำดับ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสลับจุนรูปใบเลื่อยสำหรับการใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย

### ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอแนะเสนอการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสลับจุนรูปใบเลื่อยสำหรับการใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย โดยได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของพารามิเตอร์บางตัวของสายอากาศประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนามระยะไกล

### วิธีการดำเนินการวิจัย



1. โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัดจ์จูนรูปไบเลื่อย

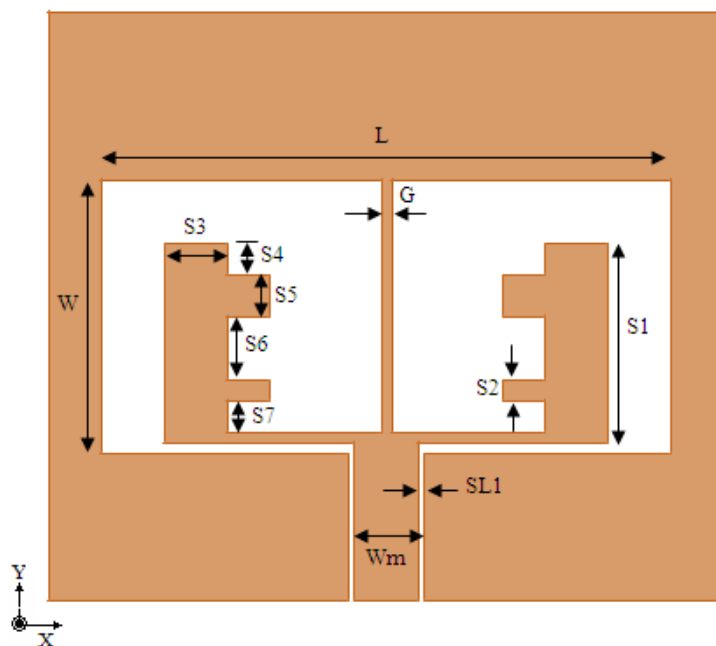
ออกแบบและศึกษาวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัดจ์จูนรูปไบเลื่อย ลำดับแรกคือ การเลือกชนิดของวัสดุฐานรอง (Substrate) และความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาความกว้างของ CPW ( $W_m$ ) และขนาดช่องเปิดของสายส่งสัญญาณ (SL1) และความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) (Balanis, A. C., 2005) เพื่อออกแบบความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้วัสดุฐานรอง (Substrate) FR4 โดยมีค่าคุณสมบัติดังนี้คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.5 และความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในการออกแบบและศึกษาวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัดจ์จูนรูปไบเลื่อย เพื่อนำมาคำนวณความยาวโดยรวมของวงรอบช่องเปิด การออกแบบสายอากาศในบทความนี้จะเริ่มทำการออกแบบที่ความถี่แรก คือ ความถี่ 3.0 GHz โดยค่าความยาวที่ทำการคำนวณจาก (1)-(3) ซึ่งจะมีการอ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) เพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (3)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ  $c$  คือ ความเร็วของแสง ( $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที)  $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นสัมพันธ์  $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ และ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง





**ภาพที่ 1** โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัปจูนรูปไบเลื่อย

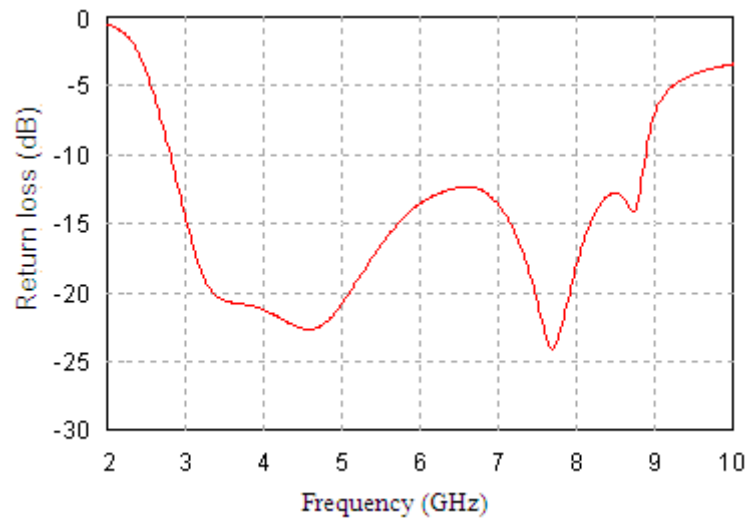
การออกแบบสายอากาศเมื่อคำนวณค่าความยาวคลื่นกับความกว้างของสายส่งสัญญาณได้แล้ว โดยความถี่ที่นำมาทำออกแบบคือ 3.0 GHz โดยในลำดับแรกเป็นการการออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW เพื่อศึกษาวิธีการขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น ลำดับที่สองทำการปรับปรุงรูปร่างของสตัปจูนที่สายส่งสัญญาณ CPW ที่มีสตัปจูนรูปไบเลื่อย และวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ลำดับที่สามทำการปรับปรุงรูปร่างสตัปจูนโดยทำการเพิ่มแผ่นสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆ แสดงดังภาพที่ 1 เพื่อให้สามารถขยายแบนด์วิดท์ให้มากขึ้น ซึ่งในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศในงานวิจัยฉบับนี้มีพารามิเตอร์สำคัญแสดงในภาพที่ 1 และค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างโดยป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความยาวของสายอากาศช่องเปิดด้านนอก (L)	27 มิลลิเมตร
ความกว้างของสายอากาศช่องเปิดด้านนอก (W)	13 มิลลิเมตร
เส้นสตริประหว่างช่องแบบเปิด (G)	0.5 มิลลิเมตร
ความของสตัปจูน (S1)	9.5 มิลลิเมตร
ขนาดของสตัปจูน saw ชั้นที่ 1 (S2)	1.0 มิลลิเมตร
ความกว้างของสตัปจูน (S3)	3.0 มิลลิเมตร
ความสูงของสตัปจูน saw ชั้นที่ 3 ขอบบน (S4)	1.5 มิลลิเมตร
ขนาดของสตัปจูน saw ชั้นที่ 2 (S5)	2.0 มิลลิเมตร
ความสูงระหว่าง saw ชั้น 1 และ 2 ของสตัปจูน (S6)	3.0 มิลลิเมตร
ความสูงของสตัปจูน saw ชั้นที่ 1 ขอบบน (S7)	1.5 มิลลิเมตร
ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (W <sub>m</sub> )	3.0 มิลลิเมตร
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ )	4.5
ความหนาของวัสดุฐานรอง (h)	1.6 มิลลิเมตร
ขนาดช่องเปิดของสายส่งสัญญาณแบบ CPW (SL1)	0.3 มิลลิเมตร

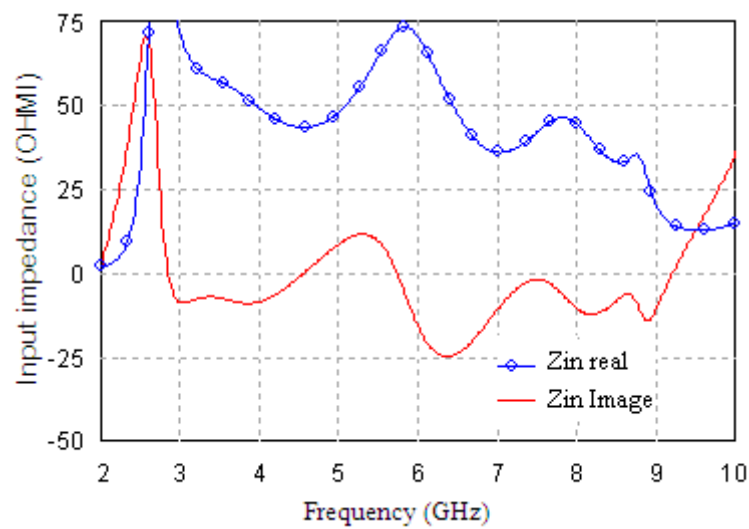
**2. ผลการจำลองของสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัปจูนรูปไบเลื่อย**

จากการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสตัปจูนรูปไบเลื่อย เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้สามารถใช้งานย่านการสื่อสารไร้สาย โดยจะการจำลองเพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ ได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D (Zeland Software, 2010) มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และทำการศึกษพารามิเตอร์ของสายอากาศบางตัวเพื่อดูคุณสมบัติของสายอากาศ ประกอบด้วย การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แบนด์วิดท์ อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่พลังงานสนามระยะไกล โดยผลที่ได้จากการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) แสดงดังภาพที่ 2

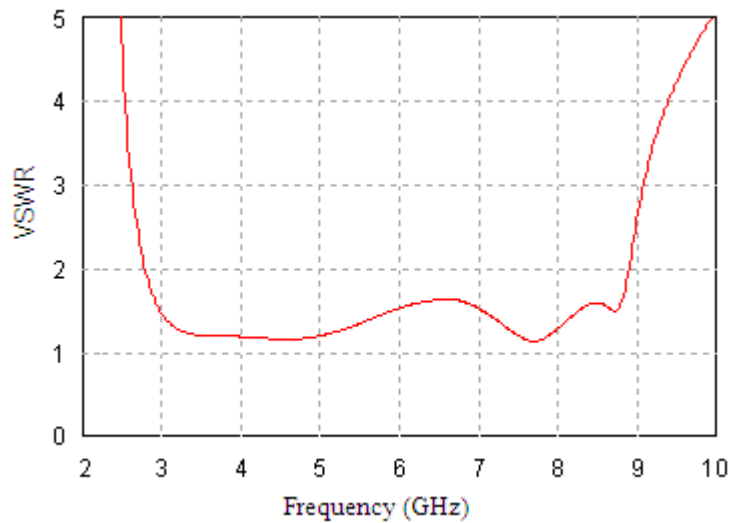


ภาพที่ 2 การสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งแบบ CPW

จากภาพที่ 2 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ในกรณีที่มีสับจูนรูปไบเลื่อย โดยผลที่ได้จากการจำลองมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB อยู่ในช่วง -10 dB ถึง -24 dB ครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.81-8.86 GHz ตามลำดับ

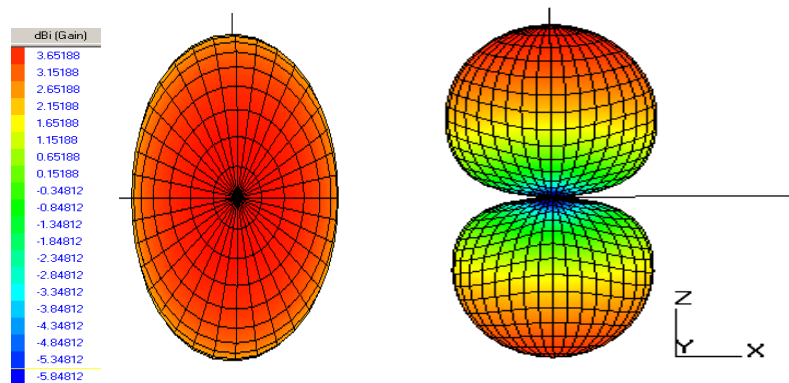


ภาพที่ 3 อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งแบบ CPW



ภาพที่ 4 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศแบบช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งแบบ CPW

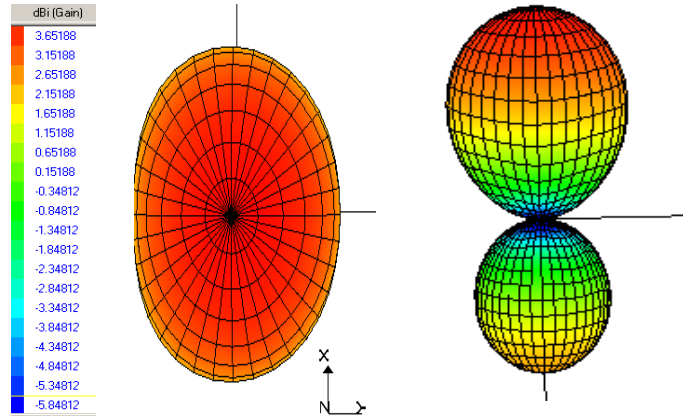
จากภาพที่ 3 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สายอากาศแบบช่องเปิดทั้งเทอมจริง และเทอมจินตภาพ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.81-8.86 GHz ซึ่งทั้งสองเทอมนี้เมื่อนำมารวมกันจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณเท่ากับ 50 โอห์มตามสายส่งสัญญาณ และอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ที่แสดงในภาพที่ 4 จะมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 ซึ่งครอบคลุมแถบความถี่ตั้งแต่ 2.81-8.86 GHz โดยทั่วไปแล้วค่าที่ยอมรับได้คือ VSWR ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 และ แบบรูปการแผ่พลังงานนามระยยะไกลจะแสดงในภาพที่ 5-6



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (xy-plane)

(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (xz-plane)

ภาพที่ 5 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 3.50 GHz



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (xy-plane)

(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า (xz-plane)

ภาพที่ 6 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 7 GHz

จากภาพที่ 5 และภาพที่ 6 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลของสายอากาศช่องเปิดที่ความถี่ 3.50 GHz และที่ความถี่ 7 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกลในระนาบ azimuth (xy-plane) เป็นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) และระนาบ elevation (xz-plane) เป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional)

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การออกแบบและพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบ CPW ที่มีสลับจูนรูปไบเลื้อย มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยขยายแบนด์วิดท์สำหรับใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์ด้วยโปรแกรม IE3D มาช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ โดยผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศได้แถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ ตั้งแต่ 2.81-8.86 GHz และแบนด์วิดท์เท่ากับ 6.05 GHz และรูปแบบการแผ่พลังงานสนามระยะไกลเป็นแบบสองทิศทาง ดังนั้นสายอากาศที่ทำการพัฒนานี้สามารถนำไปใช้งานสำหรับย่านการสื่อสารไร้สายต่างๆ ได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม IE3D ซึ่งนำมาใช้ในการจำลองสายอากาศในงานวิจัยฉบับนี้

### เอกสารอ้างอิง

เทพ เกื้อทวีกุล. (2561). การปรับปรุงสายอากาศช่องเปิดที่ป้อนด้วยสายส่งแบบไมโครสริปไลท์ที่มีสลับจูนแบบง่าม โดยระเบียบวิธี FDTD สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรครั้งที่ 5. วันที่ 21 ธันวาคม 2561 (หน้า 463-472). กำแพงเพชร: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.



เทพ เกื้อทวีกุล. (2561). การพัฒนาสายอากาศช่องเปิดแบบกว้างที่ป้อนด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีระดับจูนสำหรับการใช้งานในการสื่อสาร WLAN.การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรครั้งที่ 5. วันที่ 21 ธันวาคม 2561 (หน้า 473-487).กำแพงเพชร: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.

เทพ เกื้อทวีกุล. (2558). การออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปแอลคู่สำหรับใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมครั้งที่ 1 (หน้า 68-71). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

เทพ เกื้อทวีกุล และคณะ. (2558). การออกแบบสายอากาศช่องเปิดสองความถี่ที่มีแผ่นสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้วิธี FDTD สำหรับประยุกต์ใช้งานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมครั้งที่ 1 (หน้า 76-79). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

Balanis, A. C. (2005). **Antenna Theory Analysis and Design**. John Wiley & Sons, Inc.

Chavan, A. S., Pragnesh, N. S. and Seema, M. (2013). Analysis of Dual Frequency Microstrip Antenna Using Shorting Wall. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 3, 578-582.

Chulvanich, C., Nakasuwan, J., Songthanapitak, N., Anantrasirichai, N. and T. Wakabayashi. (2007). Design Narrow Slot Antenna for Dual Frequency. **PIERS**, 3, 1024-1028.

Kueathaweekun, W., Anantrasirichai N., Nakasuwan, J. and Wakabayashi, T. (2007). Broadband Slot Antenna Fed by Microstrip Line. **The International conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)**, 21-23 November, Thailand.

Pratap N. Shinde & Jayashree P. Shinde. (2015). Design of compact pentagonal slot antenna with bandwidth enhancement for multiband wireless applications. **Int. J. Electron. Commun. (AEU)**, 69, 1489-1494.

Sanchita, B., Srivastava, A. and Goswami, A. (2013). Dual Frequency Hexagonal Microstrip Patch Antenna. **International Journal of Scientific and Research Publications**, 3, 1-9.

Zeland Software, Inc., IE3D, New York.