

## สายอากาศสตัปรูปโบที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่ ชนิดปรับเปลี่ยนร่องประกบ

### DUAL-BAND CPW-FED BOWTIE STUB ANTENNAS WITH MODIFIED COUPLING SLOTS

ประกาศิต ดันตือลงการ\*

Prakasit Tunti-a-longkam\*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
Electronic Engineering Technology Department, College of Industrial Technology,  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

\*Corresponding author, E-mail: pstk@kmutnb.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสตัปรูปโบที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่ชนิดปรับเปลี่ยนร่องประกบทั้ง 3 แบบ โดยจำลองการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรมออกแบบวงจรความถี่สูง IE3D จากผลการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้น พบว่าสายอากาศสามารถนำไปใช้งานแบบสองความถี่ได้ การวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ค่าสูญเสียย้อนกลับที่ -10 dB สายอากาศแบบร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ย่านความถี่ต่ำ 1352 MHz (2015-3367 MHz) ย่านความถี่สูง 969 MHz (5031-6000 MHz) สายอากาศร่องประกบรูปตัวยูมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ย่านความถี่ต่ำ 1560 MHz (1952-3512 MHz) ย่านความถี่สูง 1132 MHz (5022-6154 MHz) สายอากาศร่องประกบรูปตัวแอลมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ย่านความถี่ต่ำ 1594 MHz (1963-3557 MHz) ย่านความถี่สูง 1116 MHz (4859-5975 MHz) ซึ่งแถบความถี่อยู่ในย่านการใช้งานของระบบสื่อสารไร้สายมาตรฐาน IEEE802.11b/g ที่ความถี่ 2.4 GHz มาตรฐาน IEEE802.11a ที่ความถี่ 5.2 GHz มาตรฐาน IEEE802.16a ที่ความถี่ 5.2 GHz มาตรฐาน IEEE802.16d ที่ความถี่ 5.8 GHz และ LTE (Long Term Evolution) หรือ 4G ที่ความถี่ 2.3 GHz และ 2.6 GHz

**คำสำคัญ:** สองความถี่ ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม สตัปรูปโบ ร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม ร่องประกบรูปตัวยู ร่องประกบรูปตัวแอล

#### Abstract

This paper presents the designation and implementation of Dual-Band CPW-fed Bowtie stub Antenna with Modified Coupling Slots as 3 types. The antennas has been designed and simulated by IE3D program. The result shows the proposed antennas can be achieved dual-band operations. The maximum impedance bandwidth for a -10 dB return loss of rectangle-shaped

slot antenna at lower frequency band is 1352 MHz (2015–3367 MHz), the upper frequency band is 969 MHz (5031–6000 MHz), the U-shaped slot antenna, lower frequency band is 1560 MHz (1952–3512 MHz), the upper frequency band is 1132 MHz (5022–6154 MHz), the L-shaped slot antenna, lower frequency band is 1594 MHz (1963–3557 MHz), the upper frequency band is 1116 MHz (4859–5975 MHz). These antennas can be employed for several application bands such as IEEE802.11b/g at frequency 2.4 GHz, IEEE802.11a at frequency 5.2 GHz, IEEE802.16a at frequency 5.2 GHz, IEEE802.16d at frequency 5.8 GHz and LTE (Long Term Evolution) or 4G at frequency 2.3 GHz and 2.6 GHz.

**Keywords:** Dual-Band, CPW-fed, Bowtie stub, Rectangle-shaped Slot, U-shaped Slot, L-shaped Slot

## บทนำ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ เครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN: WLAN) ระบบ WiMAX ซึ่งมีสายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้งานเพราะสายอากาศจะทำหน้าที่ในการรับคลื่นที่อยู่ในอากาศและส่งคลื่นออกอากาศ ต้องครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานในย่านต่างๆ หลายความถี่ ตัวอย่างเทคโนโลยีไร้สายที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ WiMAX (3300–3800 MHz), DCS (1710–1880 MHz), PCS (1850–1990 MHz), IMT-2000 (1920–2170 MHz), UMTS (1920–2170 MHz), LTE (Long-Term Evolution) หรือ/4G (2300 MHz, 2600 MHz), WLAN IEEE802.11a ที่ความถี่ 5.2 GHz (5150–5350 MHz), IEEE802.11b/g ที่ความถี่ 2.4 GHz (2400–2484 MHz), WMAN IEEE802.16d ที่ช่วงความถี่ 5.7–5.9 GHz เป็นต้น การวิจัยในปัจจุบันมุ่งพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศ มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบสลับของสายอากาศ การขยายแบนด์วิดท์ การเพิ่มเกนซ์ การขยาย พัฒนาให้มีการสูญเสียต่ำ การสร้างให้มีลักษณะเป็นวงจรรวมอยู่รวมบนระนาบเดียวกัน

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบสองความถี่สลับรูปโบริที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม รูปตัวยู และรูปตัวแอล ให้มีความถี่ใช้งานสองย่านความถี่คือที่ย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz และย่านความถี่สูง 5.2 GHz
2. เพื่อจำลองการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D
3. เพื่อสร้างและทดสอบสายอากาศและเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับค่าที่จำลองการทำงาน

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การศึกษาารูปแบบของร่องประกบและสลับของสายอากาศ

ผู้วิจัยได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศร่องประกบชนิดต่างๆ ที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมีผู้วิจัยมากมายที่ออกแบบร่องประกบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยม ตัวยู ตัวแอล วงกลม [1–9] พบว่าสายอากาศร่องประกบดังที่กล่าวมาสามารถใช้งานแบบสองย่านความถี่ได้สายนำสัญญาณมีทั้งแบบไมโครสตริป (Microstrip) และสายนำสัญญาณระนาบร่วม (Coplanar Waveguide : CPW) แต่สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำเป็นต้องมี

ช่องผ่านในการเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับระบบกราวด์ด้านล่างอาจจะทำให้เกิดความเพี้ยนและการสูญเสียของสัญญาณสูง สายนำสัญญาณระนาบร่วมสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ และมีโครงสร้างแข็งแรง ง่ายต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์แบดด์วิตท์กว้าง [10] จากผลการศึกษาของ Prakasit and Prayoot [11] พบว่าสายอากาศรูปตัวที (T) เมื่อปรับขนาดของร่องประกบจะสามารถพัฒนาจากสายอากาศความถี่กว้าง (Wide Band) เป็นสายอากาศแบบสองความถี่ได้ จากการศึกษาของประกาศิตตันติอลงการ และจิระศักดิ์ ช่วงชัย [12] พบว่ารูปร่างของสตัปที่เป็น รูปสามเหลี่ยมรูปสี่เหลี่ยม และรูปวงกลมในสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมจะมีผลแตกต่างกัน สตัปรูปสี่เหลี่ยมจะมีค่าอิมพีแดนซ์แบดด์วิตท์สูงสุดและค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด และจากการศึกษาของสมโภช วงษ์คำ [13] พบว่าสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่ใช้สตัปจุนรูปหูกะต่าย (Bowtie) จะทำให้อิมพีแดนซ์แบดด์วิตท์กว้างใช้งานได้หลายย่านความถี่ และมีค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำ

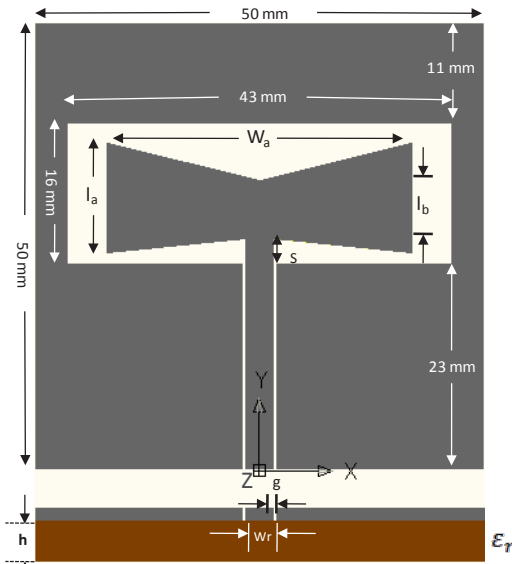
จากการศึกษาข้างต้นผู้วิจัยจึงออกแบบสายอากาศให้มีโครงสร้างเป็นรูปตัวที สตัปภายในเป็นรูปโบริหรือหูกะต่าย ใช้สายนำสัญญาณระนาบร่วมในการป้อนสัญญาณและปรับเปลี่ยนร่องประกบเป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปตัวยู และรูปตัวแอล

#### การออกแบบสายอากาศ

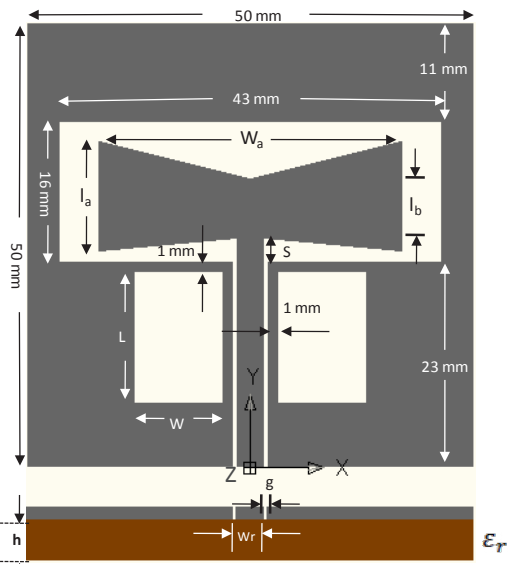
สายอากาศทั้ง 3 แบบได้ออกแบบให้มีโครงสร้างเหมือนกันคือสตัปเป็นรูปโบริ ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีตัวนำด้านเดียวชนิด FR-4 ความหนาของชั้นสเตรท (h) 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) 4.4 ความหนาของแผ่นตัวนำที่เป็นทองแดง 0.035 มิลลิเมตร การสูญเสียแทนเจนท์ ( $\tan\delta$ ) 0.019 สายอากาศมีขนาด 50 x 50 ตารางมิลลิเมตร โดยมีต้นแบบมา

จากสายอากาศสตัปรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบ สองความถี่ [3-4] โดยการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะป้อนเข้าที่กึ่งกลางด้านล่างของสายนำสัญญาณจะเป็นระนาบกราวด์ร่วม สายนำสัญญาณออกแบบที่ 50  $\Omega$  มีความกว้าง ( $W_r$ ) 3 มิลลิเมตร ความกว้างของร่องระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ (g) 0.3 มิลลิเมตร ขนาดของร่องสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในสายอากาศมีขนาดคงที่เท่ากับ 43x16 ตารางมิลลิเมตร ออกแบบให้ขนาดของสตัปรูปโบริมีความกว้าง  $W_u$  ความสูง  $l_u$  และ  $l_b$  เท่ากับ 34, 12.3 และ 6.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ช่องว่างระหว่างสตัปรูปโบริกับกราวด์ (s) 2.8 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1

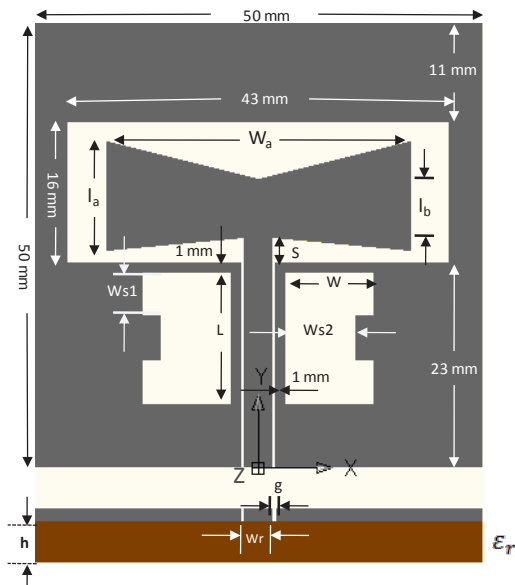
สายอากาศทั้ง 3 แบบมีร่องประกบที่แตกต่างกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ตัวยู และตัวแอล ภาพที่ 2 คือสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม มีความยาว L และความกว้าง W ภาพที่ 3 คือสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู มีความยาว L และความกว้าง W,  $W_{s1}$  และ  $W_{s2}$  ภาพที่ 4 คือสายอากาศร่องประกบรูปตัวแอลมีความยาว L, ความกว้าง W และความกว้างปลายตัวแอล  $W_s$  สายอากาศทั้ง 3 ชนิดมีสตัปและร่องประกบเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์และรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ



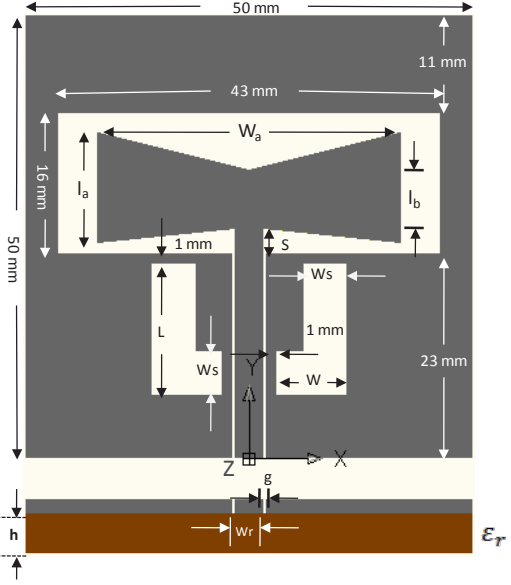
ภาพที่ 1 โครงพื้นฐานในการสร้างสายอากาศ สัตว์รูปโอบ



ภาพที่ 2 สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 3 สายอากาศร่องประกบรูปตัวยู



ภาพที่ 4 สายอากาศร่องประกบรูปตัวแอล

### การจำลองการทำงานและวิจารณ์ผล

ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมโดยการปรับค่าความกว้าง  $W$  ให้เป็น 8, 10, 12, 15 และ 18 มิลลิเมตร และค่าความยาว  $L$  คงที่ ที่ 15 มิลลิเมตร

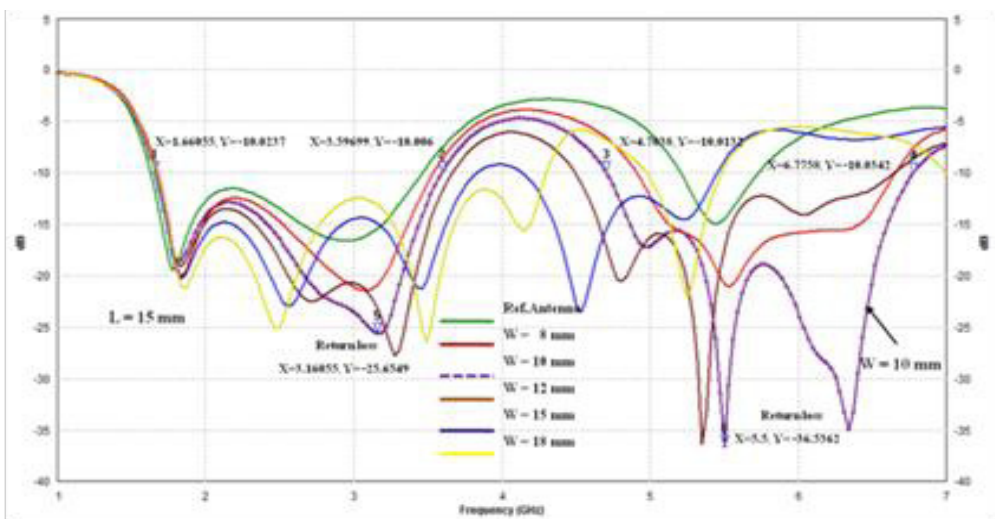
พบว่า อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศด้านความถี่ต่ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้าง  $W$  ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อปรับค่าความกว้าง  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือกค่าความกว้างที่เหมาะสม คือ  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1930 MHz (1660-3590 MHz) หรือร้อยละ 73.52 ของความถี่กลาง ด้านความถี่สูงเท่ากับ 2000 MHz (4700-6700 MHz) หรือ ร้อยละ 35.08 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.65 dB และด้านความถี่สูงคือ -36.53 dB

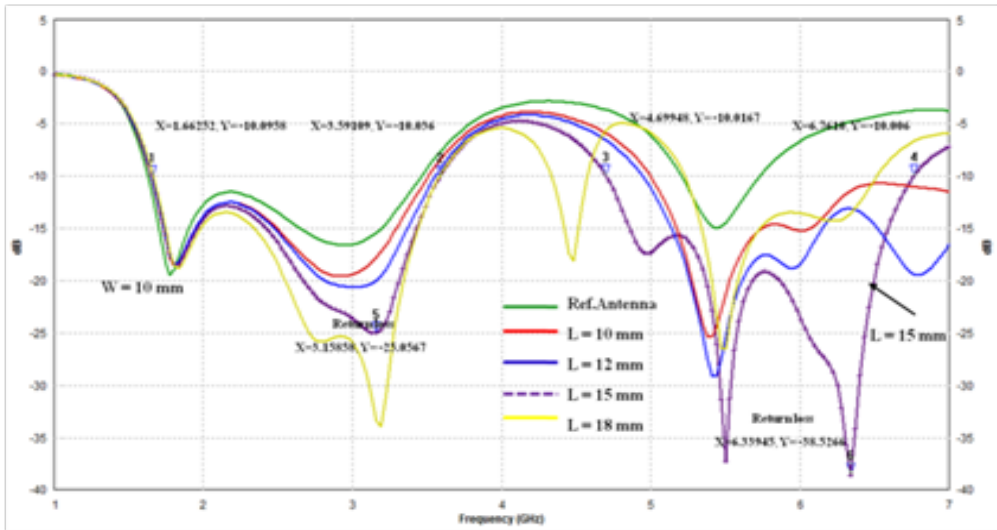
ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม โดยการปรับค่าความยาว L ให้เป็น 10, 12, 15 และ 18 มิลลิเมตรและค่าความกว้าง W คงที่ที่ 10 มิลลิเมตร พบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศทางด้านความถี่ต่ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาว L ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อปรับค่าความยาว L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือกค่าความยาวที่เหมาะสม คือ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1930 MHz (1660-3590 MHz) หรือ ร้อยละ 73.52 ของความถี่กลางและด้านความถี่สูงเท่ากับ 2070 MHz (4690-6760 MHz) หรือร้อยละ 36.15 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.05 dB และด้านความถี่สูงคือ -38.52 dB

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมที่จะนำไปใช้งานคือ W เท่ากับ 10 มิลลิเมตรและ L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร

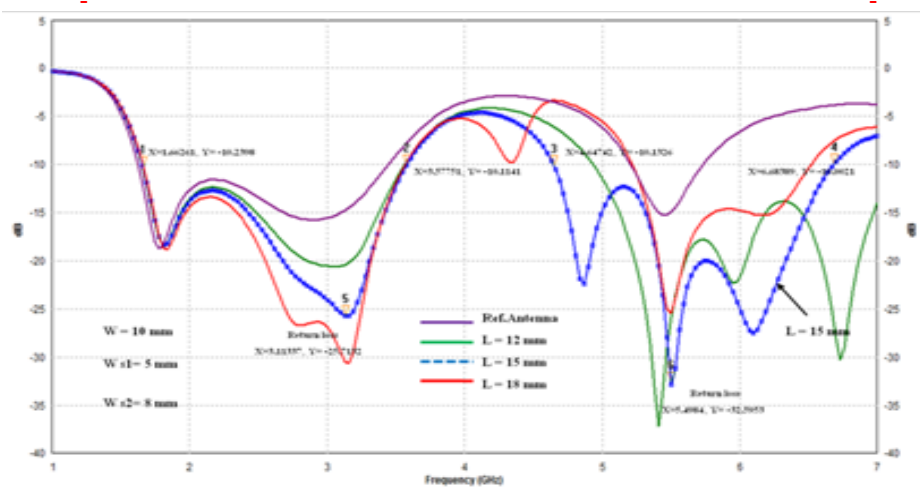
ภาพที่ 7 ผลของการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู โดยการปรับค่า ความยาว L ให้เป็น 12, 15 และ 18 มิลลิเมตรตามลำดับ ค่าความกว้าง W,  $W_{s1}$  และ  $W_{s2}$  คงที่ที่ 10, 5 และ 8 มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศด้านความถี่ต่ำของความยาวทั้ง 3 ค่า มีความกว้างประมาณเท่ากันและอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเพิ่มขึ้นเมื่อลดความยาว L ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงเหมาะสมที่สุดเมื่อความยาว L เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1660-3570 MHz) หรือร้อยละ 73.04 ของความถี่กลาง ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเท่ากับ 2040 MHz (4640-6680 MHz) หรือร้อยละ 36.04 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.50 dB และด้านความถี่สูงคือ -32.32 dB



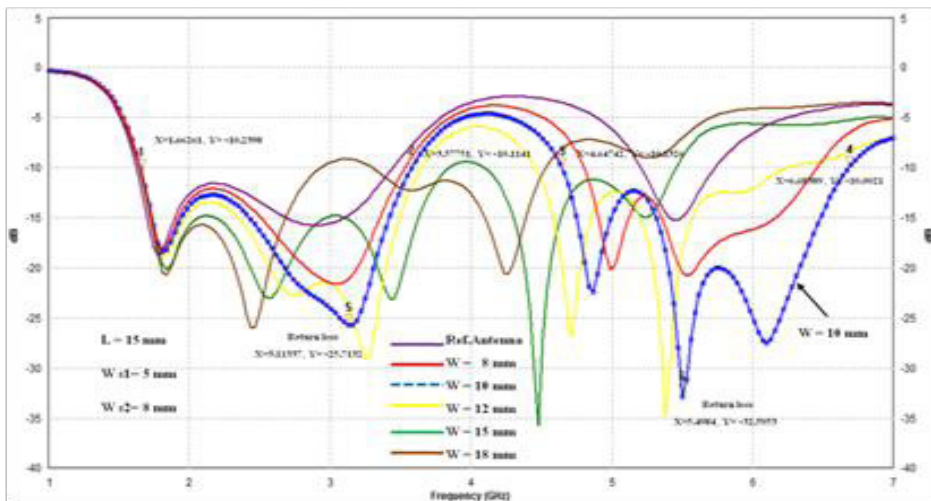
ภาพที่ 5 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความกว้าง W ของร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม



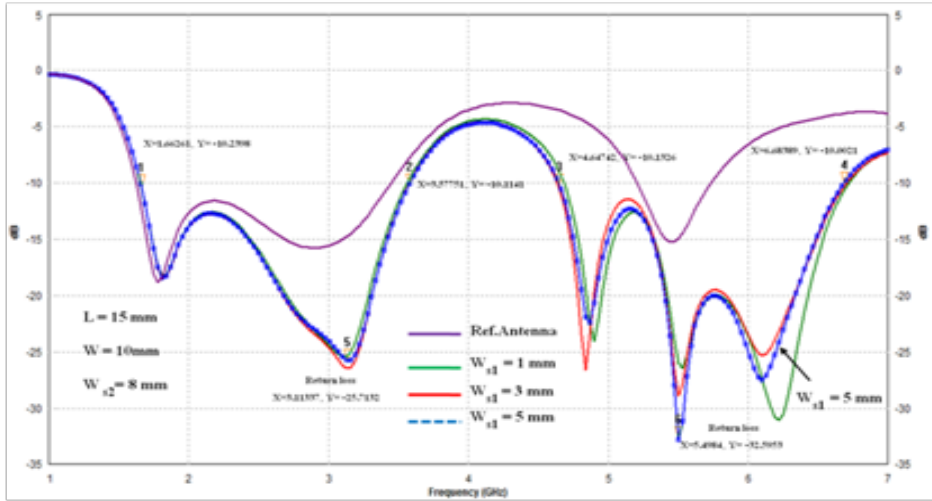
ภาพที่ 6 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความยาว L ของร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม



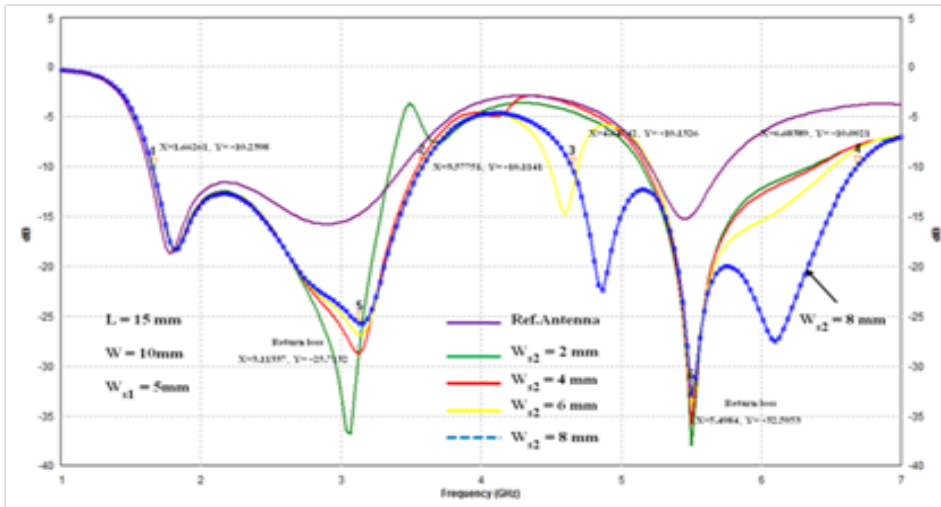
ภาพที่ 7 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความยาว L ของร่องประกบรูปตัวยู



ภาพที่ 8 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความกว้าง W ของร่องประกบรูปตัวยู



ภาพที่ 9 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความกว้าง  $W_{s1}$  ของร่องประกบรูปตัวยู



ภาพที่ 10 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความกว้าง  $W_{s2}$  ของร่องประกบรูปตัวยู

ภาพที่ 8 ของการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู โดยการปรับค่าความกว้าง  $W$  ให้เป็น 8, 10, 12, 15 และ 18 มิลลิเมตรและค่า  $L$ ,  $W_{s1}$  และ  $W_{s2}$  คงที่ที่ 15, 5 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำกว้างขึ้นเมื่อปรับ  $W$  มากขึ้นแต่ถ้า  $W$  มีค่าเกิน 15 มิลลิเมตรจะทำให้อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ลดลง ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงกว้างมากที่สุดเมื่อปรับค่าความกว้าง  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความกว้าง  $W$  ที่เหมาะสมทั้งด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูง

คือ  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1660–3570 MHz) หรือ ร้อยละ 73.04 ของความถี่กลางและค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อปรับค่าความยาว  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 2040 MHz (4640–6680 MHz) หรือ ร้อยละ 36.04 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.71 dB และด้านความถี่สูงคือ -32.54 dB

ภาพที่ 9 ผลของการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาด  $W_{s1}$  เป็น 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร และค่า  $L$ ,  $W$  และ  $W_{s2}$  คงที่ที่ 15, 10 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศทั้งด้านความถี่ต่ำและความถี่สูงของความกว้างทั้ง 3 ค่ามีค่าประมาณเท่ากัน แต่ค่าสูญเสียย้อนกลับดีที่สุดเมื่อปรับ  $W_{s1}$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังนั้นความกว้าง  $W_{s1}$  ที่เหมาะสมคือ 5 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1660-3570 MHz) หรือ ร้อยละ 73.04 ของความถี่กลาง และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเท่ากับ 2040 MHz (4640-6680 MHz) หรือ ร้อยละ 36.04 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.78 dB และด้านความถี่สูงคือ -32.59 dB

ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู โดยการปรับค่าความกว้าง  $W_{s2}$  ที่ 2, 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร และค่า  $L$ ,  $W$  และ  $W_{s1}$  คงที่ที่ 15, 10 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อปรับค่าความกว้าง  $W_{s2}$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร โดยค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1660-3570 MHz) หรือ ร้อยละ 73.04 ของความถี่กลาง และค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเท่ากับ 2040 MHz (4640-6680 MHz) หรือ ร้อยละ 36.04 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -25.25 dB และด้านความถี่สูงคือ -32.59 dB

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยูที่จะนำไปใช้งานคือ  $L$  เท่ากับ 15 มิลลิเมตร,  $W$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร,  $W_{s1}$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และ  $W_{s2}$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร

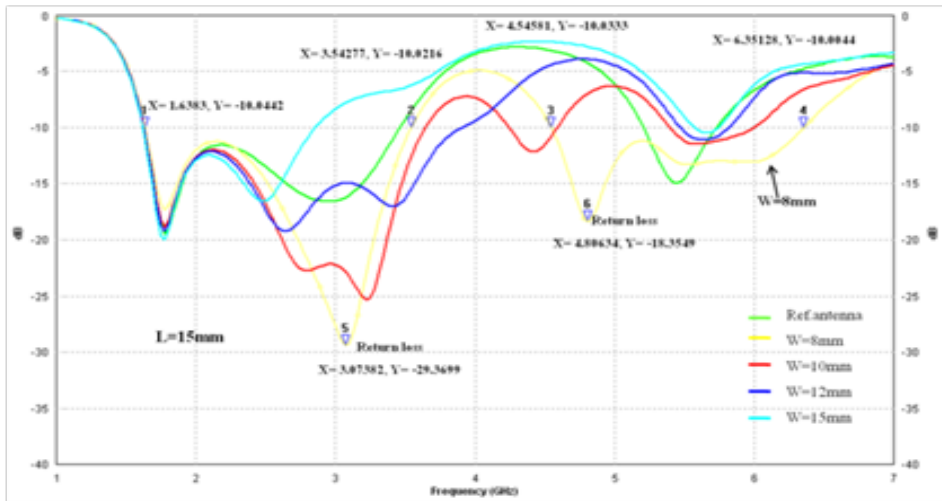
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศร่องประกบรูปตัวแอล

โดยการปรับค่าความกว้าง  $W$  ให้เป็น 8, 10, 12 และ 15 มิลลิเมตรและค่าความกว้าง  $L$  คงที่ที่ 15 มิลลิเมตร  $W_s$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร [8] พบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อ  $W$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดทั้งด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงเมื่อ  $W$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือก  $W$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1630-3540 MHz) หรือร้อยละ 63.05 ของความถี่กลาง ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเท่ากับ 1810 MHz (4540-6350 MHz) หรือ ร้อยละ 33.24 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -29.36 dB และด้านความถี่สูงคือ -18.35 dB

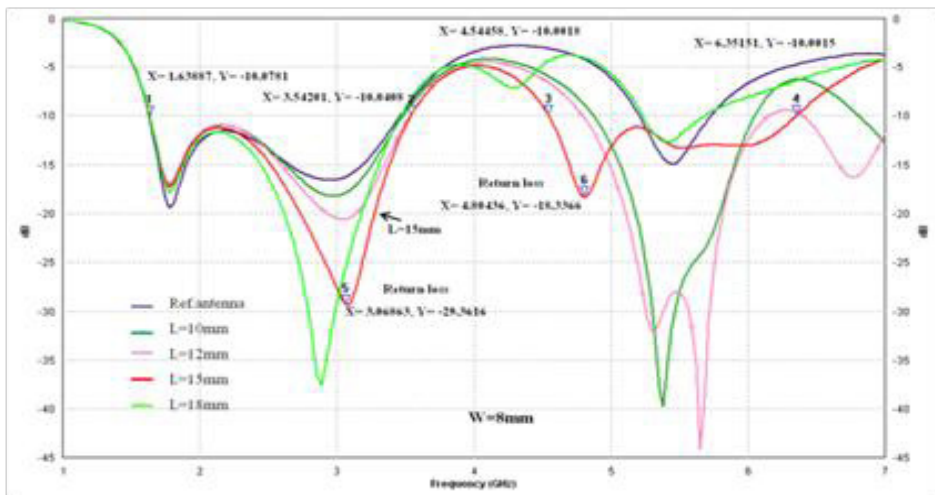
ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ โดยการปรับค่าความยาว  $L$  ให้เป็น 10, 12, 15 และ 18 มิลลิเมตรและค่าความกว้าง  $W$  คงที่ที่ 15 มิลลิเมตร  $W_s$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร [8] พบว่าค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศทางด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงจะกว้างมากที่สุดเมื่อปรับค่าความยาว  $L$  เท่ากับ 15 มิลลิเมตร โดยค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำเท่ากับ 1910 MHz (1630-3540 MHz) หรือร้อยละ 63.05 ของความถี่กลางและค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ด้านความถี่สูงกว้างที่สุดเมื่อปรับค่าความยาว  $L$  เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงเท่ากับ 1810 MHz (4540-6350 MHz) หรือ ร้อยละ 33.24 ของความถี่กลาง ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดด้านความถี่ต่ำคือ -29.36 dB และด้านความถี่สูงคือ -18.35 dB

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยูที่จะนำไปใช้งานคือ  $L$  เท่ากับ 15 มิลลิเมตร,  $W$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร,  $W_s$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

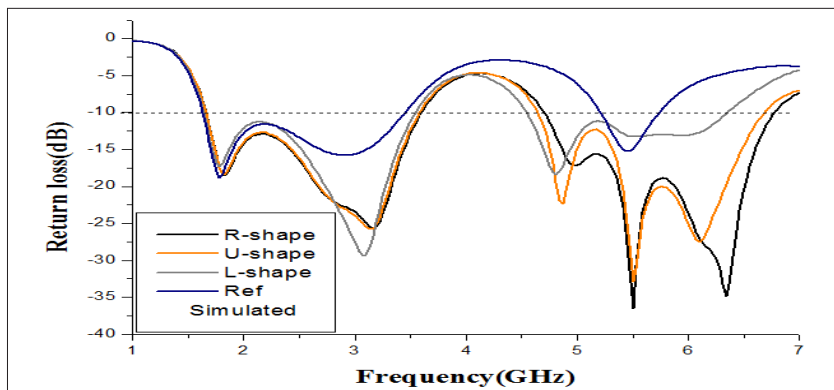




ภาพที่ 11 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความกว้าง W ของร่องประกบรูปตัวแอล



ภาพที่ 12 ค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเมื่อปรับความยาว L ของร่องประกบรูปตัวแอล



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้ง 3 แบบ

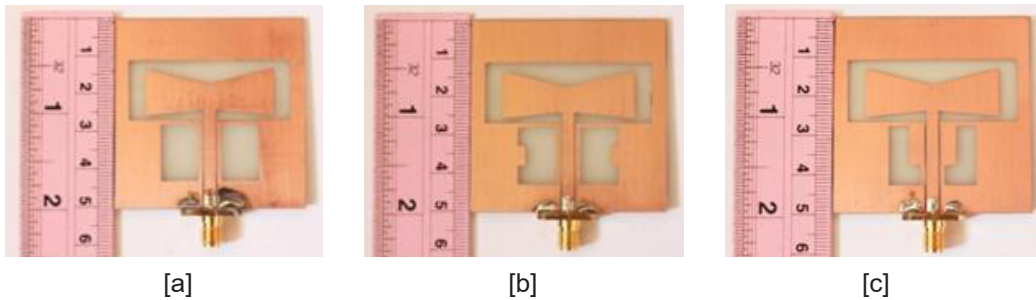
การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ ที่ใช้ขนาดความกว้างและความยาว ที่ได้จากการจำลองการทำงานพบว่าทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมและสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ประมาณเท่ากันแต่สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่กว้างมากกว่าเล็กน้อย สายอากาศร่องประกบรูปตัวแอลมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แคบที่สุด ทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง การเปรียบเทียบค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด พบว่าด้านความถี่ต่ำสายอากาศร่องประกบรูปตัวแอลมีค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมและรูปตัวยูมีค่าค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดใกล้เคียงกัน ด้านความถี่สูงสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยมมีค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำสุด สายอากาศร่องประกบ

รูปตัวแอลมีค่าสูญเสียย้อนกลับสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 13

### ผลการวิจัย

#### การวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

การวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศวัดจากค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า  $-10$  dB ด้านความถี่ต่ำ (BWLS) และด้านความถี่สูง (BWHS) ด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า (Network Analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 8719ES ในการทดสอบจะทำการป้อนสัญญาณความถี่วิทยุที่มีความถี่ตั้งแต่  $1$  GHz ถึง  $7$  GHz ภาพที่ 14 แสดงสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a] รูปตัวยู [b] และรูปตัวแอล [c] ที่สร้างขึ้นตามขนาดที่ได้จากผลการจำลองการทำงาน

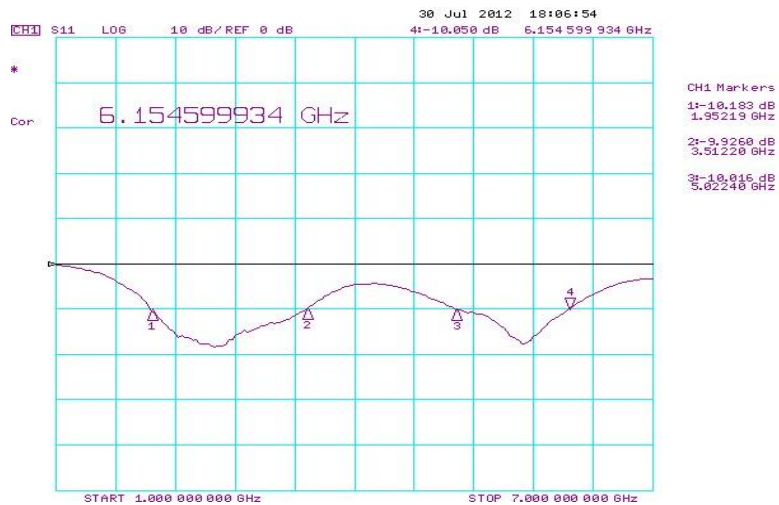


ภาพที่ 14 สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a] ตัวยู [b] และตัวแอล [c] ที่สร้างขึ้น

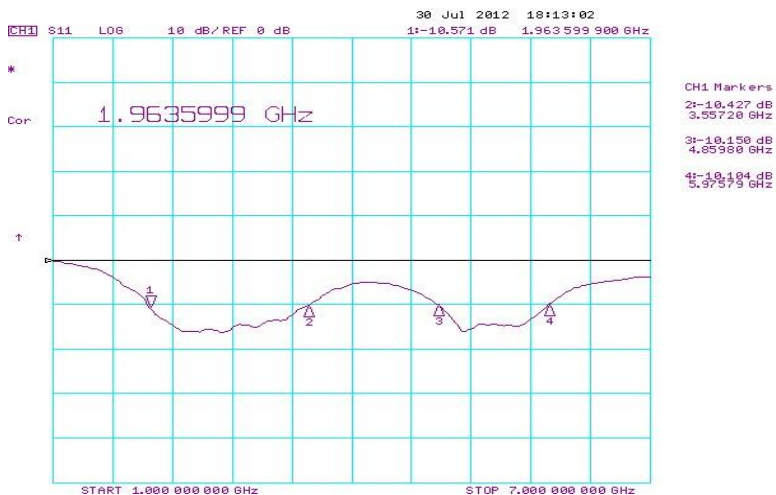
ภาพที่ 15-17 เป็นผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้าของสายอากาศที่สร้างขึ้นทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 15 วัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a]



ภาพที่ 16 วัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องประกบรูปตัวยู [b]



ภาพที่ 17 วัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องประกบรูปตัวแอล [c]

ตารางที่ 1 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a] รูปตัวยู [b] และรูปตัวแอล [c] ทั้งด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูง แล้วคำนวณเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับความถี่กลางของแต่ละด้าน

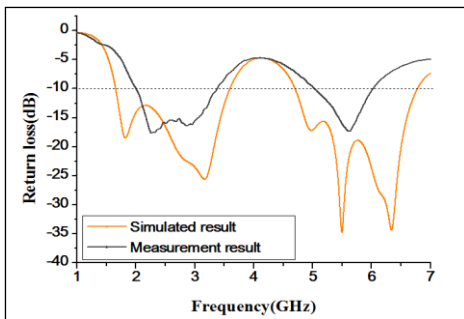
พบว่าสายอากาศสลับรูปไปที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่ชนิดร่องประกบรูปตัวแอล [c] มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่ต่ำกว้างที่สุด สายอากาศร่องประกบรูปตัวยู [b] มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ด้านความถี่สูงกว้างที่สุด

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ

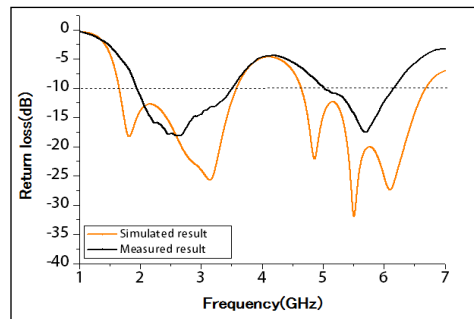
รายการ	รูปสี่เหลี่ยม[a]	รูปตัวยู[b]	รูปตัวแอล[c]
BWLS	1352 MHz (2015-3367 MHz) or 50.24%	1560 MHz (1952-3512 MHz) or 57.10%	1594 MHz (1963-3557 MHz) or 57.75%
BWHS	969 MHz (5031-6000 MHz) or 17.56%	1132 MHz (5022-6154 MHz) or 20.25%	1116 MHz (4859-5975 MHz) or 20.60%

ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์และค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานแสดงในภาพที่ 18 พบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการจำลองของสายอากาศทั้ง 3 แบบ มีความสอดคล้องกัน แต่ค่าที่วัดได้น้อยกว่าค่าจากการจำลองการทำงานเพราะค่าผิดพลาดของขนาดต่างๆ

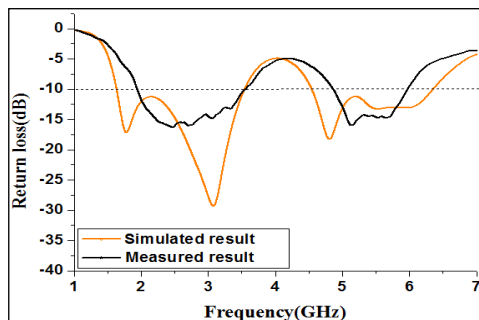
จากการทำแผ่นวงจรพิมพ์และค่าคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นวงจรพิมพ์ เช่น ความหนาของชั้นสเตรท ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก ความหนาของแผ่นตัวนำที่เป็นทองแดง เป็นต้น ที่ใช้ในงานจริงมีค่าไม่คงที่เนื่องจากกระบวนการผลิต แต่ค่าที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นค่าในอุดมคติ ผลที่ได้จึงมีความแตกต่างกัน



[a]



[b]



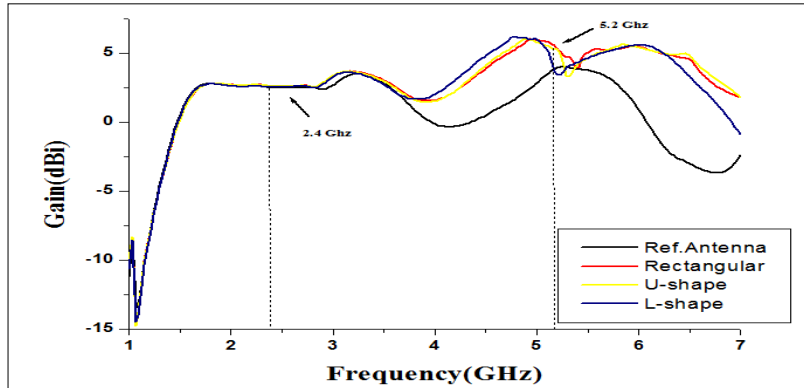
[c]

ภาพที่ 18 ผลการจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ

### อัตราการขยายของสายอากาศ

จากการเปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศทั้ง 3 แบบ พบว่าย่านความถี่ต่ำที่ความถี่ 2.4 GHz สายอากาศทั้ง 3 แบบ มีอัตราการขยายประมาณเท่ากันคือ 2.52 dBi และย่านความถี่

สูงที่ความถี่ 5.2 GHz สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a] รูปตัวยู [b] และรูปตัวแอล [c] มีอัตราการขยายเป็น 5.28, 5.23 และ 3.47 dBi ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 อัตราการขยายของสายอากาศร่องประกบทั้ง 3 แบบ

### สรุปและอภิปรายผล

การออกแบบสายอากาศและจำลองการทำงานสายอากาศทั้ง 3 แบบใช้โปรแกรม IE3D สายอากาศได้ถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีตัวนำด้านเดียวชนิด FR-4 ซึ่งมีค่าความหนาของไดอิเล็กตริก ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 ความหนาของแผ่นตัวนำที่เป็นทองแดงเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร มีค่าการสูญเสียแทนเจนท์ ( $\tan\delta$ ) เท่ากับ 0.019 สายอากาศมีขนาด 50 x 50 ตารางมิลลิเมตร

สายอากาศทั้ง 3 แบบสามารถตอบสนองการใช้งานได้สองย่านความถี่ ค่าอิมพีแดนซ์แบบนอร์มัลไลซ์สายอากาศร่องประกบรูปสี่เหลี่ยม [a] ที่ย่านความถี่ต่ำ 1660-3570 MHz และย่านความถี่ 4700-6760 MHz สายอากาศร่องประกบรูปตัวยู [b] ย่านความถี่ต่ำ 1660-3570 MHz และย่านความถี่สูง 4700-6760 MHz สายอากาศร่องประกบรูปตัวแอล [c] ย่านความถี่ต่ำ 1660-3570 MHz และย่านความถี่สูง 4700-6760 MHz สายอากาศทั้ง 3 แบบ สามารถรองรับระบบการสื่อสารไร้สาย

ได้หลายระบบ เช่น ระบบ DCS (1710-1880 MHz), ระบบ PCS (1850-1990 MHz), ระบบ IMT-2000 (1920-2170 MHz), ระบบ UMTS (1920-2170 MHz), LTE (Long-Term Evolution) หรือ 4G ที่ความถี่ 2.3 GHz และ 2.6 GHz, WLAN IEEE802.11a ที่ความถี่ 5.2 GHz (5130-5350 MHz), IEEE802.11b/g ที่ความถี่ 2.4 GHz (2400-2484 MHz) และ WMAN IEEE802.16d ที่ช่วงความถี่ 5.7-5.9 GHz เป็นต้น

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้โอกาสและทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจนสำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณกลุ่มวิจัยสื่อสารไร้สาย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือสำหรับการวัด ทดสอบ และโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและจำลองการทำงานของสายอากาศ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. D. Chen. (2003, August). Broadband CPW-fed square slot antennas with a widened tuning stub. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 51(8): 1982-1986.
- [2] Prakasit Tunti-a-longkarn; and Jeerasak Chuangchai. (2008, June-December). Study of Various Shapes of the Coupling Slots in CPW-Fed Slot Antennas. *Technical Education Journal*. 2(2): 7-12.
- [3] Jeerasak Chuangchai; and Prakasit Tunti-a-longkarn. (2010, January-April). Dual-band CPW-fed Slot Antennas Using Coupling Slots. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*. 20(1): 10-16.
- [4] Prakasit Tunti-A-longkarn; and Somchai Saleekaw. (2011). A Dual Wide Band CPW-fed Slot Antenna with Modified Coupling Slots. In *Proceeding of The 2011 IEEE Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2011)*. pp. 295-300. Penang: Malaysia.
- [5] ประกาศิต ตันตือลงการ; และ จีระศักดิ์ ช่วงชัย. (2552, กรกฎาคม-ธันวาคม). สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่โดยใช้ร่องคู่รูปตัวยู. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มศว*. 4(2): 85-101.
- [6] Garima, Amanpreet Kaur; and Rajesh Khana. (2013, May). Dual and Triple- Band U-Slot Microstrip Patch Antenna for WLAN Applications. *International Journal of Advance Research in Computer and Communication Engineering. (IJARCCCE)*. 2(4): 2201-2204.
- [7] J. Ghalibafan; and A. R. Attari. (2010). A New Dual-Band Microstrip Antenna with U-shaped Slot. *Progress In Electromagnetics Research C*. 12: 215-223.
- [8] ประกาศิต ตันตือลงการ; และ จีระศักดิ์ ช่วงชัย. (2553, กรกฎาคม-ธันวาคม). สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่โดยใช้ร่องคู่รูปตัวแอล. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 6(2): 1-9.
- [9] R. Sanyal; and M. Mitra. (2013, March). Wide Band Dual frequency Circular slot antennas with a Rectangular stub at X and Ku Band. *International Journal of Engineering Science and Technology. (IJEST)*. 5(3): 564-569.
- [10] R. N. Simons. (2011). *Coplanar Waveguide Circuits Components and Systems*. New York: John Wiley & Son.
- [11] Prakasit Tunti-a-longkarn; and Prayoot Akkaraekthalin. (2007). Wide-Band T-Shaped CPW-fed Inductively Coupled Slot Antennas. In *Proceeding of Electrical Engineering Conference 30<sup>th</sup>, (EECON30)*. pp. 1105-1108. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [12] ประกาศิต ตันตือลงการ; และ จีระศักดิ์ ช่วงชัย. (2551, มกราคม-มิถุนายน). การศึกษารูปแบบของสล็อตในสายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 4(1): 11-16.
- [13] สมโภช วงษ์คำ. (2548). *สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมที่ใช้สล็อตจูนรูปหูกระต่ายแบบหลายความถี่*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.