



เครื่องส่งกำลังสูงทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์  
FABRICATION OF HIGH POWER RF GENERATOR AND HORN ANTENNA AT 2.45 GHZ

นายวัชรกฤษณ์	เลิศธรรมไพบุลย์
นายอดิสร	รามทิพย์
นายประสิทธิ์ชัย	ชูพรรคพานิช

โครงการวิทยุกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2559

เครื่องส่งกำลังสูงทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์  
FABRICATION OF HIGH POWER RF GENERATOR AND HORN ANTENNA AT 2.45 GHZ

นายวัชรกฤษฎ์	เลิศธรรมไพบูลย์
นายอดิสร	รามทิพย์
นายประสิทธิ์ชัย	ชูพรรณคพานิช

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงการวิศวกรรม

เรื่อง

เครื่องส่งกำลังสูงทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ของ

นายวัชรกฤษฎ์ เลิศธรรมไพบูลย์

นายอดิสร รามทิพย์

นายประสิทธิ์ชัย ชูพรรณพานิช

ได้รับอนุมัติจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำคุณ ศรีสนิท)

.....กรรมการ

(อาจารย์สุนิศา คุณารักษ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา)

เครื่องส่งกำลังสูงทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์  
ปีการศึกษา 2559

โดย

นายวัชรกฤษณ์ เลิศธรรมไพบูลย์  
นายอดิสร รามทิพย์  
นายประสิทธิ์ชัย ชูพรรณพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา

บทคัดย่อ

โครงการวิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุกำลังสูงทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้โพรงในการส่งกำลังงานจากแหล่งกำเนิดแมกนีตรอน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเครื่องส่งสามารถส่งกำลังสูงสุดได้ 799.83 วัตต์ นอกจากนี้ยังทำการออกแบบและสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อรองรับการส่งสัญญาณที่มีกำลังสูง ซึ่งสายอากาศปากแตรที่สร้างมีอัตราขยาย 22.92 เดซิเบล และมีความกว้างครึ่งกำลังประมาณ 25 องศา

**คำสำคัญ:** ท่อนำคลื่น เครื่องส่งกำลังสูง สายอากาศปากแตร การแมตซ์อิมพีแดนซ์ การแมตซ์ด้วย 3 สกรู

**FABRICATION OF HIGH POWER RF GENERATOR AND HORN ANTENNA  
AT 2.45 GHZ  
Academic Year 2016**

**By**

Mr. Watcharakrit lertthamphaiboon

Mr. Adisorn Ramthip

Mr. Prasitchai Choopakpanit

**Advisor**

Pichaya Chaipanya, Ph.D.

**Abstract**

This engineering project presents designed and fabricated of high power radio frequency generator and pyramid horn antenna at 2.45 GHz. Cavity is transfer energy from the radiating probe, the maximum power of proposed generator is 799.83 watt. Moreover, the pyramid horn antenna is designed and fabricated to cope the high power transmission systems. From the measurement the proposed antenna provides gain of 22.92 dB and half power beam width about 25 degree

**Keywords:** Cavity, High Power Generator, Horn Antenna, Impedance Matching and 3- Screw Matching

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงให้คณะผู้จัดทำนำมาใช้ในการศึกษาโครงการวิศวกรรมนี้จนสำเร็จลุล่วง

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใด ๆ จากโครงการวิศวกรรมนี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด

คณะผู้จัดทำโครงการ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
รายการสัญลักษณ์	ฌ
ประมวลคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)	3
2.1.2 การแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation)	6
2.1.3 สายอากาศปากแตร (Horn antenna)	7
2.1.4 การคำนวณหาค่าอัตราขยายและกำลังของสายอากาศ	10
2.1.5 หลักการปรับอิมพีแดนซ์ของคลื่นแบบใช้สกรู 3 ตัว (Three Screws Method)	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	12
3.1 การออกแบบโพรง (Cavity)	12
3.2 การปรับค่าอิมพีแดนซ์ของโพรง	16
3.3 การออกแบบและสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด	17
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจากการ คำนวณ	21
3.3.2 การออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	22
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	25
4.1 การสร้างและวัดอิมพีแดนซ์ของโพรง	25
4.2 การทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งของเครื่องส่งความถี่วิทยุ	27
4.3 การสร้างและวัดผลของสายอากาศปากแตร	32
4.3.1 สายอากาศปากแตรต้นที่ 1	32
4.3.2 สายอากาศปากแตรต้นที่ 2	36
4.4 การทดสอบวัดอัตราขยายของสายอากาศ	43
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผล	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	48
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	51



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าการลดทอน (Attenuation) และ ค่าการสูญเสียกำลังงาน (Power loss) ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	13
3.2 หาความถี่ตัดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด	15
3.3 ปรับขนาดสายอากาศที่ออกแบบให้สามารถสร้างได้จริง	23
4.1 ผลการวัดกำลังที่ภาครับจากเครื่องส่งความถี่โดยได้ค่ากำลังที่ภาครับ	30
4.2 ผลการทดสอบจากการวัดและที่ได้จากการคำนวณ	31
4.3 ผลการวัดสายอากาศภาคส่งและภาครับ	41
4.4 ผลการวัดกำลังที่ภาครับ	45

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหลอดแมกนีตรอน	3
2.2 หลอดแมกนีตรอน	3
2.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็นสองเท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง	4
2.4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน	5
2.5 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอนจะมีค่าคงที่เท่ากับ -4000 โวลต์	5
2.6 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศที่ปลายแมกนีตรอนเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟ	6
2.7 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งใช้พิกัดฉากในการวิเคราะห์	6
2.8 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE <sub>10</sub>	7
2.9 ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก	8
2.10 ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า	8
2.11 ปากแตรทรงพีระมิด	8
2.12 ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบ (ก) ท่อเหลี่ยมและ (ข) ท่อกลม	9
2.13 สายอากาศปากแตรต่อด้วยท่อนำคลื่นที่มีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อนสัญญาณ	9
2.14 แสดงระยะห่างระหว่างสกรู	10
3.1 ขนาดของโพรงตาม (ก) ภาพด้านบน และ (ข) ภาพด้านข้างของโพรง	16
3.2 ภาพแสดงระยะห่างระหว่างสกรูทั้ง 3 ตัว	17
3.3 ภาพแสดงการติดตั้งสกรูที่โพรง	17
3.4 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด	18
3.5 มุมมองในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตร	18
3.6 มุมมองในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	18
3.7 ค่า S <sub>11</sub> ของสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	23
3.8 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการปรับค่าเพื่อทำให้เกิดแมตซ์ของอิมพีแดนซ์	24
4.1 โพรงจากการสร้างจริง	25
4.2 วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยโพรง	25
4.3 S <sub>11</sub> ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	26

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 SWR ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	26
4.5 อิมพีแดนซ์ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์	27
4.6 สายอากาศโมโนโพลจากการสร้างจริง	27
4.7 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศโมโนโพลเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	28
4.8 ค่า $S_{11}$ ของ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2	28
4.9 ค่า SWR ของ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2	28
4.10 ค่าอิมพีแดนซ์ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2	29
4.11 แผนภาพแสดงการวัดแรงดันเพื่อหาค่ากำลังของเครื่องส่งความถี่	29
4.12 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดกำลังงานโดยผ่านทางสายอากาศส่งและรับ	30
4.13 วัดกำลังงานภาครับที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่	30
4.14 สายอากาศปากแตรจากการสร้างจริง	32
4.15 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	33
4.16 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	33
4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	34
4.18 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	34
4.19 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	35
4.20 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	35
4.21 ช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 1 สามารถทำงานได้	36
4.22 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	37
4.23 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	37
4.24 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	38
4.25 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	38
4.26 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	39
4.27 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์	39
4.28 ช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 2 สามารถทำงานได้	40
4.29 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตร	43
4.30 ลักษณะของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ และขีดจำกัดในการรับพลังงาน	44
4.31 การวัดกำลังงานที่ภาครับกรณีใช้สายอากาศโมโนโพล	44
4.32 การวัดกำลังงานที่ภาครับกรณีใช้สายอากาศปากแตร	44

## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\lambda_g$	ความยาวคลื่นของสัญญาณในท่อ	เมตร
$\lambda_0$	ความยาวคลื่นในอากาศว่าง	เมตร
$\alpha_c$	ค่าอัตราการลดทอน	เดซิเบลต่อเมตร
$\eta$	ค่าอิมพีแดนซ์จริงของวัสดุไดอิเล็กตริก	โอห์ม
$\sigma$	ค่าสภาพนำไฟฟ้า	โอห์มต่อเมตร
$\delta$	ค่าความตึงผิวของอะลูมิเนียม	เมตร
$\rho$	ค่าความนำไฟฟ้าของอะลูมิเนียม	โอห์มต่อเมตร
$\rho_e$	ระยะห่างจุด u และ v	เมตร
$\rho_h$	ระยะห่างจุด u และ v	เมตร
$\omega_r$	ความถี่เชิงมุม	เรเดียนต่อวินาที
$\chi$	ค่าจากการกำหนด ความกว้างและความยาวของท่อนำคลื่น และอัตราขยายในกาออกแบบสายอากาศปากแตร	-
$\mu$	ค่าสภาพซึมทราบได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ	นิวตันต่อแอมแปร์ กำลังสอง
$a$	ความกว้างของโพรงและท่อนำคลื่น	เมตร
$a_1$	ความกว้างของปลายสายอากาศปากแตร	เมตร
$b$	ความสูงของโพรงและท่อนำคลื่น	เมตร
$b_1$	ความสูงของปลายสายอากาศปากแตร	เมตร
$c$	ความยาวของโพรงและท่อนำคลื่น	เมตร
$f_c$	ความถี่ตัด	เฮิรตซ์
$(f_r)_{10}^{TE}$	ค่าความถี่ต่ำสุดที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นในโหมด TE <sub>10</sub>	เฮิรตซ์
$G_0$	อัตราขยายของสายอากาศปากแตร	เดซิเบล
$G_r$	อัตราขยายของสายอากาศภาครับ	เดซิเบล
$G_t$	อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง	เดซิเบล
$k$	ค่าคงที่ของระยะระหว่างสกรู	-

## รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$P_e$	ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบสนามไฟฟ้า	เมตร
$P_h$	ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบสนามแม่เหล็ก	เมตร
$P_r$	กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ	เดซิเบล
$P_t$	กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง	เดซิเบล
$Q$	ค่าประสิทธิภาพของโพรง	-
$R$	ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ	เมตร
$R_s$	ค่าความต้านทานของอะลูมิเนียม	โอห์ม

## ประมวลคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย
dB	เดซิเบล
dBm	มิลลิวัตต์เดซิเบล
$E_z$	สนามไฟฟ้าในระนาบแกน z
GHz	กิกะเฮิรตซ์
$H_z$	สนามแม่เหล็กในระนาบแกน z
$S_{11}$	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน
SWR	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง
$TE_{10}$	โหมดพื้นฐานของสนามไฟฟ้าตามขวาง
TE-Mode	โหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง
TM-Mode	โหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง
$V_{peak}$	แรงดันยอด

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันสายอากาศที่ใช้ในการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุโทรทัศน์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยสายอากาศส่วนใหญ่เป็นสายอากาศที่รองรับกำลังงานสูง ซึ่งภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรม โทรคมนาคมยังต้องการเครื่องผลิตความถี่วิทยุกำลังสูงเพื่อใช้ในการทดสอบการรองรับและการทนทานต่อ กำลังงานสูงของสายอากาศ

ในส่วนของสายอากาศแบบปากแตรนิยมใช้งานกับย่านความถี่ไมโครเวฟ เพราะมีคุณสมบัติที่เป็น จุดเด่นคือ สภาพเงาเชิงทิศทางสูง มีอัตราขยายสูงและมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังให้ความกว้าง แถบคอนข้างกว้าง สามารถออกแบบและสร้างได้โดยง่าย จากข้อดีของสายอากาศปากแตร จึงมีงานวิจัยที่ สนใจการใช้สายอากาศปากแตร เพื่อทดสอบสายอากาศต่าง ๆ รวมถึงสายอากาศที่ใช้ในการแพร่กระจาย สัญญาณวิทยุโทรทัศน์ด้วย อย่างไรก็ตามเครื่องส่งกำลังงานสูงที่มีการผลิตออกมาขายตามท้องตลาดยังมี ราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นโครงการนี้จึงเสนอเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานสูง ทำงาน ร่วมกับสายอากาศปากแตร เพื่อใช้ในการทดสอบการรองรับและการทนทานต่อกำลังงานสูงของ สายอากาศ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 สามารถสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุกำลังงานสูงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังส่งมากกว่า 700 วัตต์ได้

1.2.2 สามารถออกแบบและสร้างสายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิดได้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ออกแบบและสร้างโพรงสำหรับเชื่อมต่อกับส่วนกำเนิดคลื่นเพื่อส่งความถี่วิทยุกำลังงานสูง

1.3.2 ทดสอบการแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์และกำลังส่งของโพรง

1.3.3 ออกแบบและสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

1.3.4 ทดสอบการแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ ปากแตรทรงพีระมิด

1.3.5 ทดสอบกำลังส่งของเครื่องส่งโดยใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเปรียบเทียบกับ สายอากาศโมนโพล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังสูง

1.4.2 ได้สายอากาศแบบปากแตรทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับโพรงที่ออกแบบได้

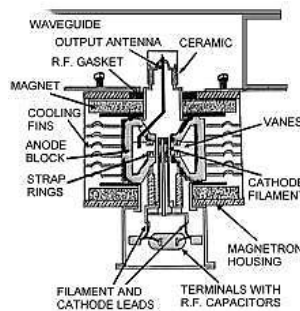


## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี

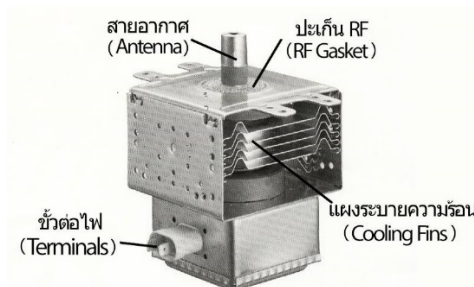
#### 2.1.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)

หลอดแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จะมีลักษณะโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) คาโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบ ๆ จะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดยผ่านสายอากาศที่มีลักษณะเป็นโพรบ (Probe Antenna)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหลอดแมกนีตรอน

ที่มา: พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทรนอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

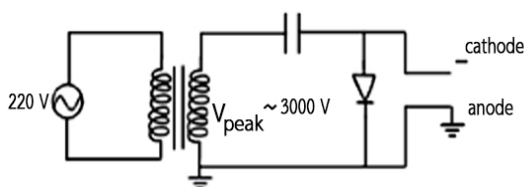


รูปที่ 2.2 หลอดแมกนีตรอน

ที่มา: พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทรนอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

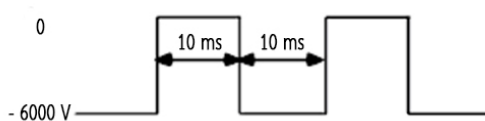
ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้น แมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ ประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วโค้วหนึ่งขั้วของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วอโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในของช่องสูญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วอโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมที่จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นออกมาที่ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขณะที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ ให้กับไส้หลอดอยู่นั้น แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้อโนดและคาโทดจะต้องมีค่าสูงประมาณ -4000 โวลต์ จึงจะทำให้หลอดแมกนีตรอนปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ เต้าไมโครเวฟโดยทั่วไปจะมีชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงแบบแปลงขึ้น (Step Up Transformer) ซึ่งมีแรงดันด้านขดทุติยภูมิสูงสุด ( $V_{peak}$ ) ประมาณ 3,000 โวลต์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และต่อเข้ากับไดโอดและตัวเก็บประจุในลักษณะวงจรทวีแรงดัน 2 เท่า ดังรูปที่ 2.3

ในขณะที่ยังไม่ต่อชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้านี้ให้แก่แมกนีตรอนจะสามารถวัดค่าแรงดันสูงสุดตรงขาออกได้เท่ากับ -6,000 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรทวีแรงดัน โดยจะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ 50 เฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.3** วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็นสองเท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง

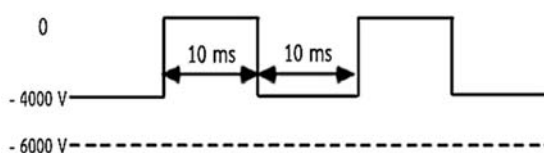
**ที่มา:** พิชญ์ ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังงานสูง.



**รูปที่ 2.4** ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน

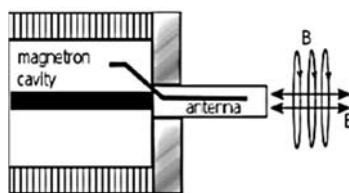
**ที่มา:** พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

สำหรับลักษณะการทำงานของวงจรทีวีแรงดันในรูปที่ 2.4 คือ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงมีค่าเป็นบวก ( $V_{peak}$  เท่ากับ 3,000 โวลต์) ไดโอดจะนำกระแส และตัวเก็บประจุจะทำการประจุกระแสไว้ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมคาโทดและอานอดมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงเปลี่ยนเป็นลบไดโอดก็จะหยุดนำกระแสซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมคาโทดและอานอดเป็นแรงดันไฟฟ้ารวมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงซึ่งเท่ากับ -6,000 โวลต์ เมื่อต่อวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 2.3 เข้ากับแมกนีตรอน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอานอดและคาโทดจะลดเหลือ -4,000 โวลต์ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าผลต่างประมาณ -2,000 โวลต์ จะเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟสูงสุดที่ถูกส่งออกมา ซึ่งคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจะมีลักษณะเป็นพัลส์เช่นเดียวกับรูปที่ 2.6



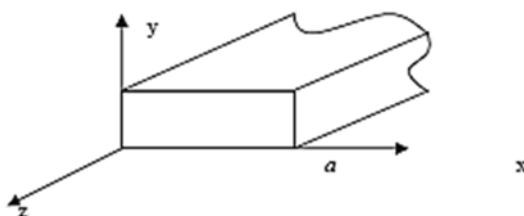
**รูปที่ 2.5** ลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอนจะมีค่าคงที่เท่ากับ -4000 โวลต์

**ที่มา:** พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.



**รูปที่ 2.6** ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศที่ปลายแมกนีตรอนเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟ  
**ที่มา:** พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลัง  
 งานสูง.

### 2.1.2 การแพร่กระจายคลื่น (Wave Propagation)

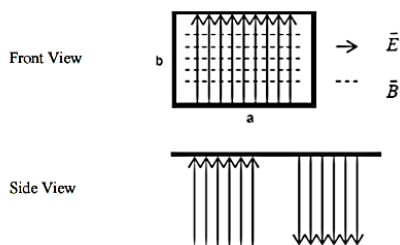


**รูปที่ 2.7** ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งใช้พิกัดฉากในการวิเคราะห์  
**ที่มา:** พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลัง  
 งานสูง.

2.1.2.1 โหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Mode: TE-Mode) สนามไฟฟ้า  
 จะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น แต่จะมีสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศทางเดียวกับ  
 ทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น ( $E_z = 0, H_z \neq 0$ )

2.1.2.2 โหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Mode: TM-Mode)  
 สนามแม่เหล็กจะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น แต่จะมีสนามไฟฟ้าอยู่ใน  
 ทิศทางเดียวกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น ( $H_z = 0, E_z \neq 0$ )

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวผ่านท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide) โดยเลือกโหมดของ  
 การส่งให้เป็น  $TE_{10}$  จะได้คลื่นภายในท่อนำคลื่น มีลักษณะดังรูปที่ 2.8

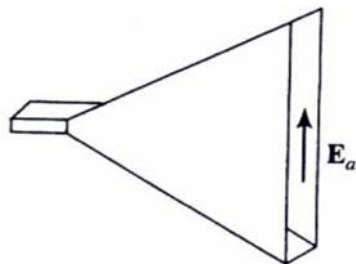


รูปที่ 2.8 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด  $TE_{10}$

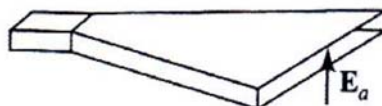
ที่มา: พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทรนอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

### 2.1.3 สายอากาศปากแตร (Horn Antenna)

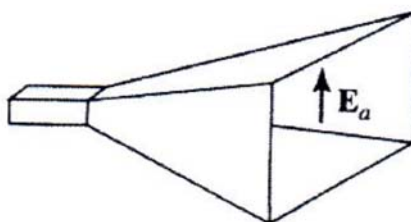
สายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Antenna) ที่มีการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาจากอะเพอร์เจอร์หรือช่องเปิดของสายอากาศ ซึ่งจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องขยายเสียงที่เรียกว่าเมกะโฟน (Megaphone) หรือไมโครโฟน (Microphone) แบบที่มีตัวสะท้อนพาราโบล่า ในกรณีที่ใช้สายอากาศปากแตรทำหน้าที่ในการรับสัญญาณ อะเพอร์เจอร์จะถูกใช้สำหรับรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการออกแบบสายอากาศปากแตรให้มีความกว้างแถบมากขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยการกาง (Flaring) ส่วนของปากแตรให้มีลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของสนามเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Horn Antenna) นิยมใช้งานกับความถี่ย่านไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่น คือ มีอัตราขยายสูง และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังให้ความกว้างแถบค่อนข้างกว้าง สามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane Sectoral Horn) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane Sectoral Horn) และปากแตรทรงพีระมิด แสดงดังรูปที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก  
ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ.

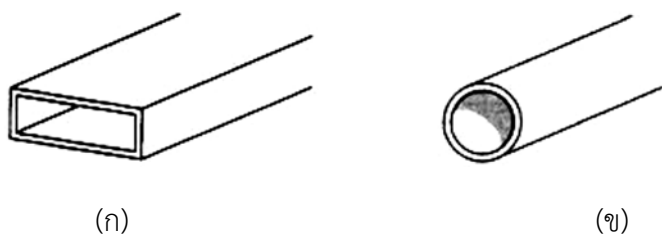


รูปที่ 2.10 ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า  
ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ.

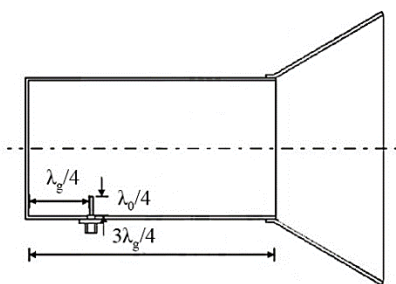


รูปที่ 2.11 ปากแตรทรงพีระมิด  
ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ.

สำหรับการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศปากแตรนั้น จะใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ซึ่งเป็นสายส่งสัญญาณชนิดหนึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายกับสายโคแอกเชียลที่ไม่มีตัวนำตรงกลาง โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยมขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.12 ท่อนำคลื่นนิยมทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม และผิวด้านในฉาบด้วยเงินเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี ใช้สำหรับการส่งผ่านกำลังงานจากจุดป้อน คือสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก (Short Dipole) ไปยังสายอากาศปากแตร รูปที่ 2.13 แสดงสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ต่อกับท่อนำคลื่นแบบท่อเหลี่ยมซึ่งภายในมีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อนและระยะห่างในการออกแบบจุดป้อน โดยที่  $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณในท่อ (Wavelength Of The Signal In The Guide) และ  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศว่าง (Wavelength In Freespace)



รูปที่ 2.12 ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบ (ก) ท่อเหลี่ยมและ (ข) ท่อกลม  
ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ.



รูปที่ 2.13 สายอากาศปากแตรต่อกับท่อนำคลื่นที่มีสายอากาศไดโพลขนาดเล็กเป็นจุดป้อนสัญญาณ  
ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ.

### 2.1.4 การคำนวณหาค่าอัตราขยายและกำลังของสายอากาศ

สำหรับการคำนวณหาค่าอัตราขยายและกำลังของสายอากาศจะใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis Transmission Equation) เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายและกำลังของสายอากาศ โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้ ดังสมการที่ 2.1

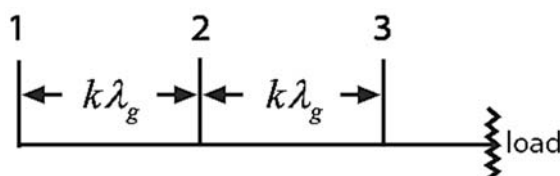
$$P_r(dB) - P_t(dB) = G_r(dB) + G_t(dB) + 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (2.1)$$

โดยที่	$P_t$	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง
	$P_r$	คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ
	$G_t$	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
	$G_r$	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
	$R$	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

### 2.1.5 หลักการปรับอิมพีแดนซ์ของคลื่นแบบใช้สกรู 3 ตัว (Three Screws Method)

ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เกิดการแมตช์ มีค่าตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าซัสเซปแทนซ์ในสายนำสัญญาณหรือท่อนำคลื่นโดยค่าซัสเซปแทนซ์นี้มีผลมากจากการติดตั้งวงจรสตับหรือติดตั้งสกรู ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการทำการแมตช์ซิงอิมพีแดนซ์

วิธี 3 สกรู ถูกนำมาใช้ในการปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่น โดยในการเจาะสกรูแต่ละตัวต้องมีระยะห่าง  $k\lambda_g$  เมื่อ  $k$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{4}$  หรือ  $\frac{3}{8}$  และ  $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นโดยสามารถปรับค่าความลึกของสกรูแต่ละตัวได้เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดการแมตช์กับโหลดที่ต้องการ



รูปที่ 2.14 แสดงระยะห่างระหว่างสกรู



## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ พิชญา ชัยปัญญา และ อภิญญา อินทร์นอก ได้นำเสนอเครื่องส่งกำลังงานโดยใช้หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูงสุดไม่ต่ำกว่า 700 วัตต์ ซึ่งมีการเชื่อมต่อสัญญาณไปยังสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยใช้วงจรเชื่อมต่อแบบโพรงกับสายอากาศภายนอกและประกอบลงแทนมาตรฐานเพื่อพร้อมใช้งาน และทำการทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งเพื่อให้ส่งได้ที่กำลังสูงสุดไม่ต่ำกว่า 700 วัตต์ โดยกำลังงานสูงสุดของงานวิจัยนี้คือ 806.31 วัตต์ ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศโมนโพลซึ่งไม่สามารถรองรับกำลังงานที่มีค่าสูง

ส่วนงานวิจัยของ Akinori Oda, Hironori Sawahara, Mai Ishiba, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa ได้นำเสนอระบบติดตามเครื่องบินโดยเลือกใช้สายอากาศปากแตร (Horn Antenna) ในการส่งคลื่นเพื่อติดตามตำแหน่งของเครื่องบิน เพราะมีกำลังส่งเสถียรภาพและอัตราการขยายสูง ทางผู้เสนอโครงการได้เห็นถึงข้อดีของสายอากาศแบบปากแตร จึงนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงถึงการออกแบบเครื่องส่งความถี่วิทยุกำลังสูง ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือโพรง รวมถึงการออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

#### 3.1 การออกแบบโพรง (Cavity)

โดยส่วนใหญ่ท่อนำคลื่นและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมมักจะทำจากอะลูมิเนียม เนื่องจากมีข้อดีคือไม่เกิดสนิมและอัตราการลดทอนมีค่าต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าอัตราการลดทอนเป็นตัวบอกถึงค่าการสูญเสียที่บริเวณผิวของโลหะ สามารถพิจารณาได้จาก

$$\alpha_c = \frac{1}{\eta b} \left[ \frac{\pi f \mu}{\sigma \left( 1 - \left( \frac{f_c}{f} \right)^2 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left( \frac{f_c}{f} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ	$\alpha_c$	คือค่าอัตราการลดทอน (dB/m)
	$\eta$	คือค่าอิมพีแดนซ์จริงของวัสดุไดอิเล็กตริก
	$a$	คือความกว้างของโพรง
	$b$	คือความสูงของโพรง
	$\sigma$	คือค่าสภาพนำไฟฟ้า
	$f_c$	คือความถี่ตัด

ตารางที่ 3.1 ค่าการลดทอน (Attenuation) และ ค่าการสูญเสียกำลังงาน (Power Loss) ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

พารามิเตอร์	ขนาดของโพรง $a \times b$ (มิลลิเมตร)	ทองแดง	อะลูมิเนียม	เหล็กกล้า ไร้สนิม
สภาพนำไฟฟ้า (โอห์ม/เมตร)	$n/a$	$5.5 \times 10^7$	$3.0 \times 10^7$	$1.4 \times 10^6$
อัตราการลดทอน (เดซิเบล/เมตร)	$86 \times 43$	$2.28 \times 10^{-2}$	$3.09 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-1}$
กำลังสูญเสีย (วัตต์/เมตร) ที่ 25 กิโลวัตต์	$86 \times 43$	132	178	837

ที่มา: พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

จากการคำนวณความถี่ต่ำสุดของคลื่นไมโครเวฟ (Cut-Off Frequency,  $f_c$ ) ที่สามารถส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นในโหมด  $TE_{10}$  นั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$(f_r)_{10}^{TE} = \frac{3 \times 10^8}{2a} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$Q_{10}^{TE} = \frac{\pi\eta}{2R_s} \left[ \frac{b(a+c)^{3/2}}{ac(a^2+c^2)+2b(a^3+c^3)} \right] \quad (3.3)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega_r \mu}{2\sigma}} \quad (3.4)$$

$$= \sqrt{\frac{2\pi(2.45 \times 10^9) \times (4\pi \times 10^{-7})}{2(0.37 \times 10^8)}} = 2.7 \times 10^{-8}$$

โดย

$$f = 2.45\text{GHz}$$

$$\rho = 0.37 \times 10^8$$

$$f_c = \frac{3 \times 10^8}{2a} \quad (3.5)$$

ความหนาของอะลูมิเนียมหาได้จาก

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi(2.45 \times 10^9) \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (0.37 \times 10^8)}} \quad (3.6)$$

$$= 1.67 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

ต้องใช้ความหนาของอะลูมิเนียมอย่างน้อย  $1.67 \times 10^{-4}$  เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 หาค่าความถี่ตัดที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

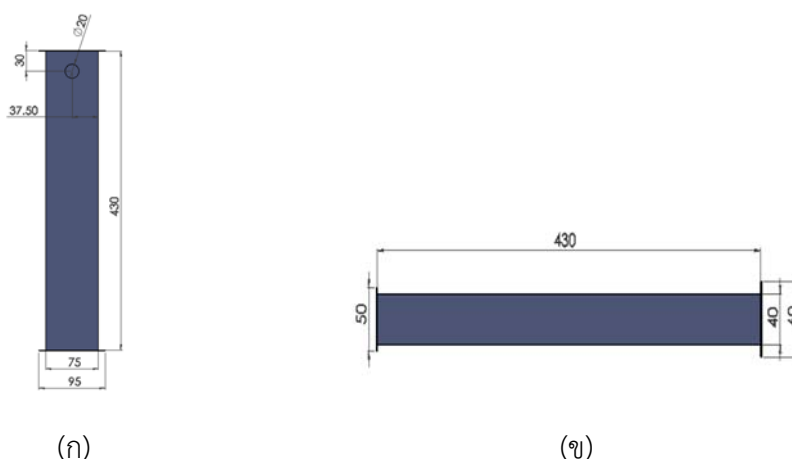
ความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	$Q$	$a$ (เมตร)	$b$ (เมตร)	$c$ (เมตร)
2.00	$1.1417 \times 10^6$	0.075	0.0375	0.106
2.05	$1.1174 \times 10^6$	0.0732	0.0732	0.1118
2.10	$1.0921 \times 10^6$	0.0714	0.0357	0.1189
2.15	$1.0658 \times 10^6$	0.0698	0.0349	0.1277
2.20	$1.0385 \times 10^6$	0.0628	0.0341	0.1391
2.25	$1.0103 \times 10^6$	0.0667	0.033	0.1547
2.30	$9.8119 \times 10^5$	0.0652	0.0326	0.1777
2.35	$9.8118 \times 10^5$	0.0638	0.0319	0.2165
2.40	$9.1975 \times 10^5$	0.0313	0.0313	0.3046
2.45	NaN	0.0612	0.0612	$\infty$

จากตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าอัตราการลดทอนและค่ากำลังสูญเสียที่ 25 กิโลวัตต์ จึงเลือกใช้อะลูมิเนียมในการสร้างโพรง ซึ่งนอกจากอะลูมิเนียมมีค่าการลดทอนและสูญเสียกำลังงานต่ำแล้วอะลูมิเนียมยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถหาได้ง่าย และสามารถสรุปขนาดของโพรงรวมถึงประสิทธิภาพของโพรงที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.2

หลังจากเลือกวัสดุในการสร้างโพรงแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบขนาดของโพรงโดยสามารถพิจารณาจากตารางที่ 3.2 ซึ่งตารางที่ 3.2 ค่า  $Q$  แสดงถึงประสิทธิภาพของโพรง ค่า  $a$  คือ ความกว้างของโพรง  $b$  คือ ความสูงของโพรงและ  $c$  คือ ความยาวของโพรง เมื่อพิจารณาที่ความถี่ตัด 2.45 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าไม่สามารถทำการออกแบบโพรงได้ เนื่องจากมีค่าความยาว  $c$  เท่ากับ  $\infty$  ดังนั้นจึงเลือกค่าความถี่ตัดที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ความถี่ 2.00 กิกะเฮิรตซ์ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ซึ่งกำหนดให้ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีประสิทธิภาพร้อยละ 100 ทำให้สามารถหาประสิทธิภาพที่ความถี่ 2.00 กิกะเฮิรตซ์ ได้ดังนี้

$$\frac{2.00\text{GHz} \times 100}{2.45\text{GHz}} = 81.63 \quad (3.7)$$

ดังนั้นขนาดของโพรงที่ความถี่ตัด 2.00 กิกะเฮิร์ตซ์ มีความกว้าง  $a$  เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ความสูง  $b$  เท่ากับ 3.75 เซนติเมตร และความยาว  $c$  เท่ากับ 10.6 เซนติเมตร ซึ่งในท้องตลาดมีท่ออะลูมิเนียมขนาดหน้าตัดกว้าง 7.5 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร และสูง 4.0 เซนติเมตรหนา 1 มิลลิเมตร เป็นขนาดมาตรฐานที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปดังนั้นจึงเลือกใช้อะลูมิเนียมขนาด 7.5 เซนติเมตร  $\times$  4 เซนติเมตร  $\times$  10.6 เซนติเมตร เป็นวัสดุหลักของโพรง ซึ่งขนาดโครงสร้างของโพรงแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

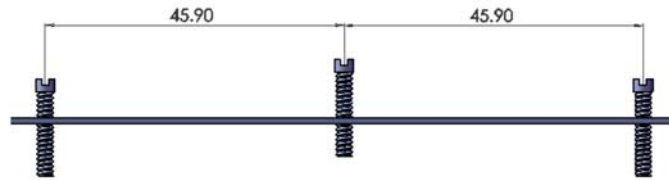


รูปที่ 3.1 ขนาดของโพรงตาม (ก) ภาพด้านบน และ (ข) ภาพด้านข้างของโพรง

ที่มา: พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานสูง.

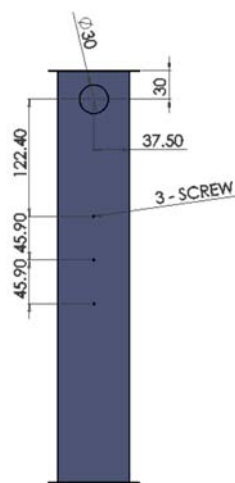
### 3.2 การปรับค่าอิมพีแดนซ์ของโพรง

เนื่องจากโพรงอะลูมิเนียมที่ถูกสร้างตามการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.1 ไม่ตรงตามการคำนวณเนื่องจากเลือกใช้อะลูมิเนียมค่ามาตรฐานที่มีจำหน่ายจึงอาจทำให้เกิดการไม่แมตช์ของอิมพีแดนซ์ตามความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องทำการติดตั้งสกรูเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของโพรงให้เกิดการแมตช์ โดยจากค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 122.4 มิลลิเมตร ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างจุดป้อนสัญญาณถึงสกรูตัวแรกซึ่งมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นคือ 122.4 มิลลิเมตร และระยะจากปลายท่อถึงจุดป้อนสัญญาณมีความยาว 30.6 มิลลิเมตร ซึ่งมีความยาวเป็น  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่น สำหรับระยะห่างของสกรูแต่ละตัวคือ  $\frac{3}{8}$  ของความยาวคลื่น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.59 เซนติเมตร สามารถแสดงรูประยะห่างของสกรูแต่ละตัวได้ดังรูปที่ 3.2 และขนาดของโพรงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงระยะห่างระหว่างสกรูทั้ง 3 ตัว

ที่มา: พิชญ์ ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

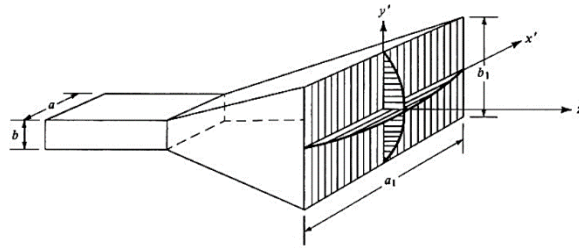


รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการติดตั้งสกรูที่โพรง

ที่มา: พิชญ์ ชัยปัญญา; และ อภิญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสูง.

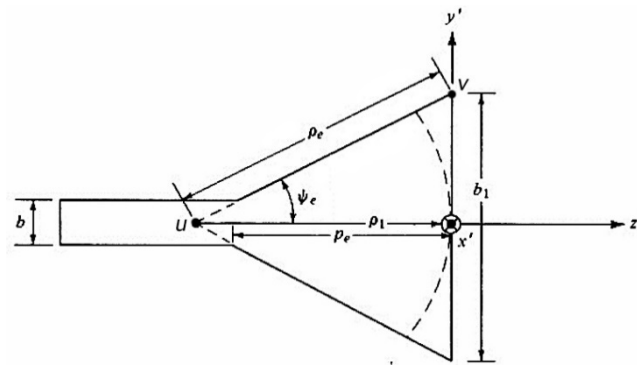
### 3.3 การออกแบบและสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด นิยมใช้เป็นสายอากาศมาตรฐานในการวัดอัตราขยายเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ๆ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดคือ ค่าอัตราขยาย ค่าขนาดของท่อนำคลื่นที่ใช้ในการป้อนสัญญาณ ( $a, b$ ) และพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อกำหนดขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศปากแตรคือ ( $a_1, b_1, \rho_e, \rho_h, P_e, P_h$ ) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 ถึง 3.6



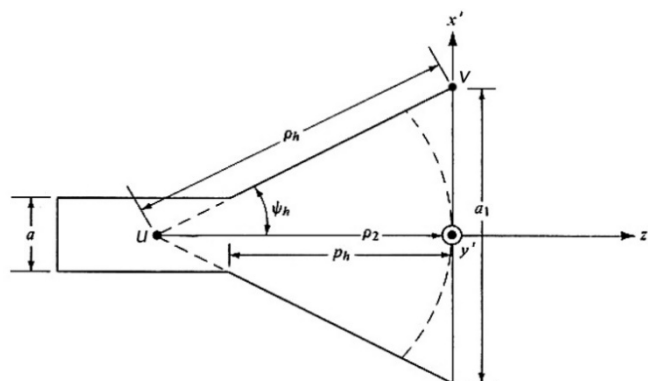
รูปที่ 3.4 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

ที่มา: Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory Analysis and Design. p. 770.



รูปที่ 3.5 มุมมองในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตร

ที่มา: Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory Analysis and Design. p. 770.



รูปที่ 3.6 มุมมองในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

ที่มา: Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory Analysis and Design. p. 770.



ลักษณะทั่วไปของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด ขนาด  $\rho_e$  ในรูปที่ 3.5 สามารถหาได้จาก

$$P_e = (b_1 - b) \left[ \left( \frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

- เมื่อ  $P_e$  คือ ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบ  
สนามไฟฟ้า
- $b$  คือ ความสูงของท่อนำคลื่น
- $b_1$  คือ ความสูงของปลายสายอากาศปากแตร
- $\rho_e$  คือ ระยะห่างจุด  $u$  และ  $v$

ซึ่ง  $\rho_e$  ควรมีค่าเท่ากับ  $\rho_h$  ในรูปที่ 3.6 สามารถหาได้จากสมการ

$$P_h = (a_1 - a) \left[ \left( \frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

- เมื่อ  $P_h$  คือ ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบ  
สนามแม่เหล็ก
- $a$  คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น
- $a_1$  คือ ความกว้างของปลายสายอากาศปากแตร
- $\rho_h$  คือ ระยะห่างจุด  $u$  และ  $v$

อัตราขยายของสายอากาศสามารถหาได้จากสมการ

$$G_0 = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\lambda^2} (a_1 b_1) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda\rho_2} \sqrt{2\lambda\rho_1} \cong \sqrt{3\lambda\rho_h} \sqrt{2\lambda\rho_e} \quad (3.10)$$

โดยที่  $\rho_2 = \rho_h$  และ  $\rho_1 = \rho_e$  สำหรับลักษณะของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด  $P_e$  และ  $P_h$  มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$\left( \sqrt{2\chi} - \frac{b}{\lambda} \right)^2 (2\chi - 1) = \left( \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\chi}} - \frac{a}{\lambda} \right)^2 \left( \frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{\chi} - 1 \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$\frac{\rho_e}{\lambda} = \chi \quad (3.12)$$

$$\frac{\rho_h}{\lambda} = \frac{G_0}{8\pi^3} \left( \frac{1}{\chi} \right) \quad (3.13)$$

จากนั้นทำการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำการหาขนาดของสายอากาศจากสมการ จากนั้นนำขนาดที่คำนวณได้ไปจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

### 3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจากการคำนวณ

1. หาค่า  $\chi$  สำหรับสายอากาศที่มีค่าอัตราขยาย  $G_0$  และขนาดท่อนำคลื่นกว้าง  $a$  สูง  $b$  ซึ่งสามารถหาค่า  $\chi$  ได้จาก

$$\chi \text{ (trial)} = \chi_1 = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (3.14)$$

2. เมื่อได้ค่า  $\chi$  ที่ถูกต้องแล้ว จะสามารถหาค่า  $\rho_e$  และ  $\rho_h$  โดยใช้สมการ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ

3. หา  $a_1$  และ  $b_1$  จาก

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_2} \cong \sqrt{3\lambda\rho_h} = \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi\chi}} \lambda \quad (3.15)$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda\rho_1} \cong \sqrt{2\lambda\rho_e} = \sqrt{2\chi\lambda} \quad (3.16)$$

4. หาค่า  $P_e$  และ  $P_h$  จากสมการ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ

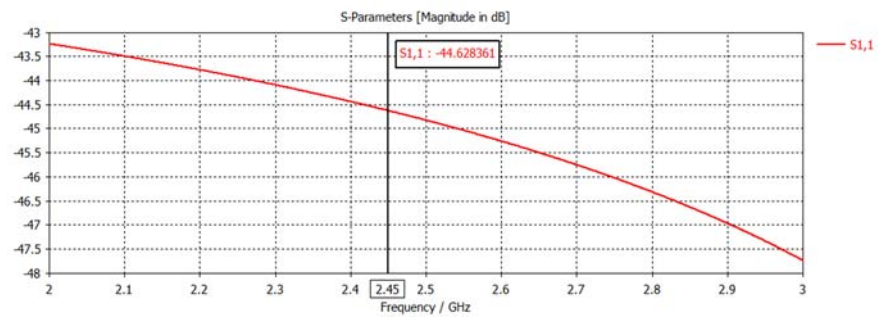
จากขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรดังกล่าว กำหนดให้อัตราขยายของสายอากาศปากแตรที่ต้องการมีค่า 15 dB ความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ความกว้างของท่อนำคลื่น ( $a$ ) เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และความสูงของท่อนำคลื่น ( $b$ ) เท่ากับ 4.5 เซนติเมตรจะได้

$a_1$	=	31.030713	เซนติเมตร
$b_1$	=	23.764267	เซนติเมตร
$\rho_e$	=	23.060232	เซนติเมตร
$\rho_h$	=	26.212417	เซนติเมตร
$P_e$	=	16.020947	เซนติเมตร
$P_h$	=	16.020947	เซนติเมตร

จากการคำนวณที่ได้พบว่าคุณค่าพารามิเตอร์สำหรับการสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่มีอัตราขยาย 15 dB ใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ความกว้างของท่อนำคลื่น  $a$  มีค่าเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ความสูงของท่อนำคลื่น  $b$  มีค่าเท่ากับ 4.5 เซนติเมตร ความกว้างของปลายสายอากาศปากแตร  $a_1$  มีค่าเท่ากับ 31.030713 เซนติเมตร และความสูงของปลายสายอากาศปากแตร  $b_1$  มีค่าเท่ากับ 23.764267 เซนติเมตร  $\rho_e$  มีค่าเท่ากับ 23.060232 เซนติเมตร  $\rho_h$  มีค่าเท่ากับ 26.212417 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.020947 เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดนี้จะถูกนำไปจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio ต่อไป

### 3.3.2 การออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

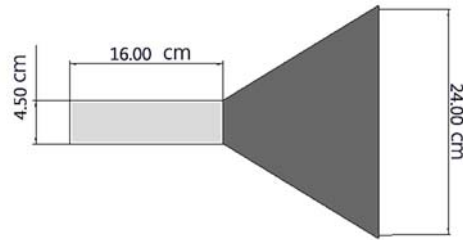
จากการคำนวณขนาดสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดในหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่าสายอากาศปากแตรที่ออกแบบไม่สามารถสร้างจริงได้เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณมีความละเอียดสูง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้สายอากาศเกิดการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ดังกล่าว โดยจากการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำให้ได้สายอากาศตามรูปที่ 3.8 มีค่า  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ -44.628361 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ปรับค่าแล้วได้ดังตารางที่ 3.3



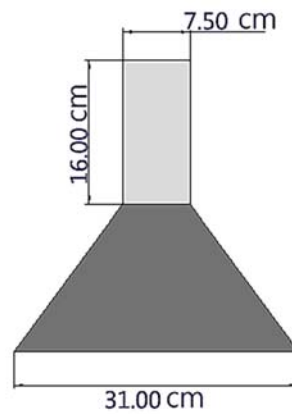
รูปที่ 3.7 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศปากแตรความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 3.3 ปรับขนาดสายอากาศที่ออกแบบให้สามารถสร้างได้จริง

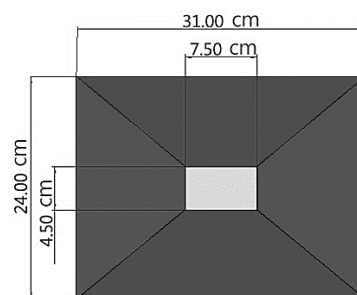
ค่าพารามิเตอร์	ความยาว (ซม.)
A	7.5
B	4.5
Pe	16
a	31
b	24



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศที่ทำการปรับค่าเพื่อทำให้เกิดแมตซ์ของอิมพีแดนซ์ โดย (ก) มุมมองด้านข้างของสายอากาศปากแตร (ข) มุมมองด้านบนของสายอากาศปากแตร และ (ค) มุมมองด้านหน้าของสายอากาศปากแตร

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในส่วนของขั้นตอนและผลการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การสร้างและวัดอิมพีแดนซ์ของโพรง การทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งของเครื่องความถี่วิทยุ และการสร้างและวัดอิมพีแดนซ์รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศปากแตร

#### 4.1 การสร้างและวัดอิมพีแดนซ์ของโพรง

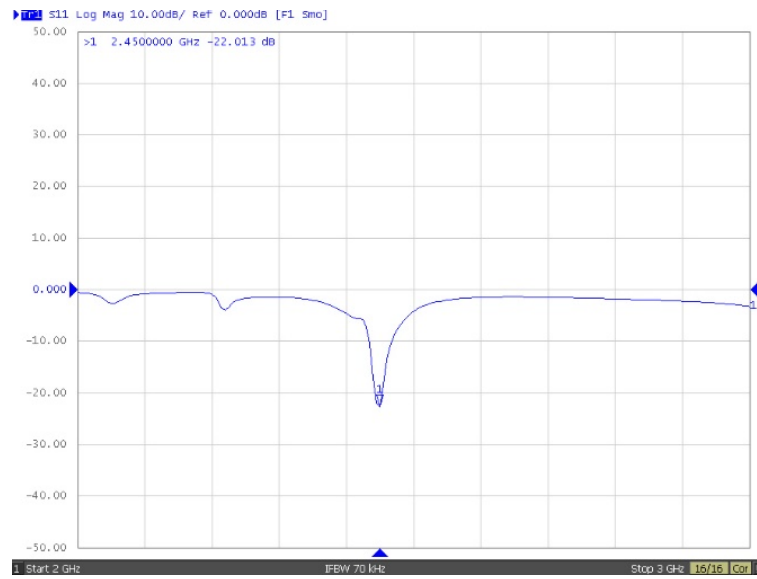
ทำการสร้างโพรงตามการออกแบบในบทที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หลังจากนั้นทำการติดตั้งโพรงเข้ากับวงจรเครื่องกำเนิดกำลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นนำโพรงที่ติดตั้งแล้วมาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่าโพรงยังไม่เกิดการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์จึงต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของโพรง โดยการปรับสกรูที่ติดตั้งไว้จนเกิดการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์ซึ่งมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-22.013$  dB ค่า SWR 1.20482 และได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $53.429 + j5.4123$  โอห์ม ดังรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับโดยจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของโพรงมีค่าเข้าใกล้ 50 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดพลังงาน หลังจากเกิดการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์แล้ว ต่อไปจะทำการวัดกำลังงานเพื่อหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่วิทยุ



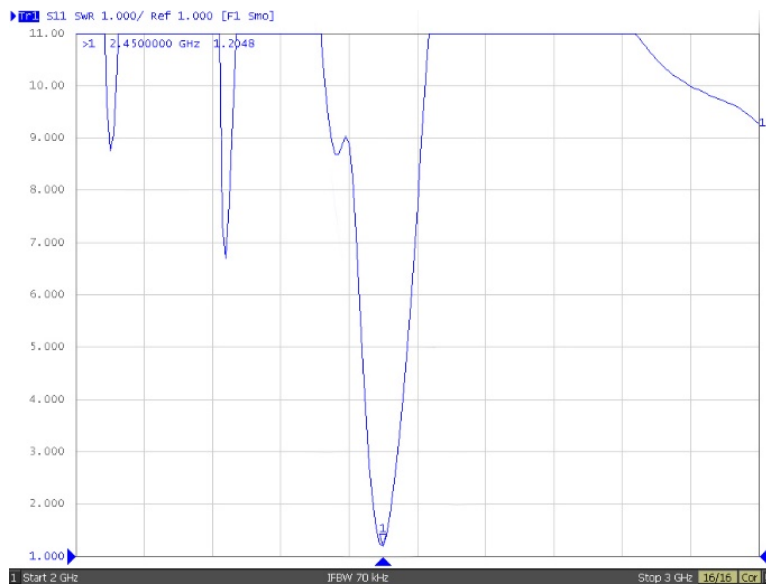
รูปที่ 4.1 โพรงจากการสร้างจริง



รูปที่ 4.2 วงจรไฟฟ้าประกอบร่วมกับโพรง

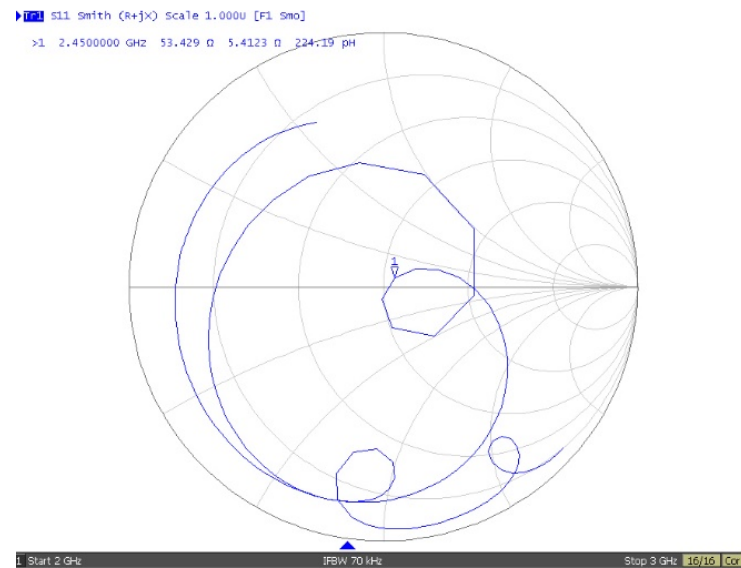


รูปที่ 4.3  $S_{11}$  ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.4 SWR ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์





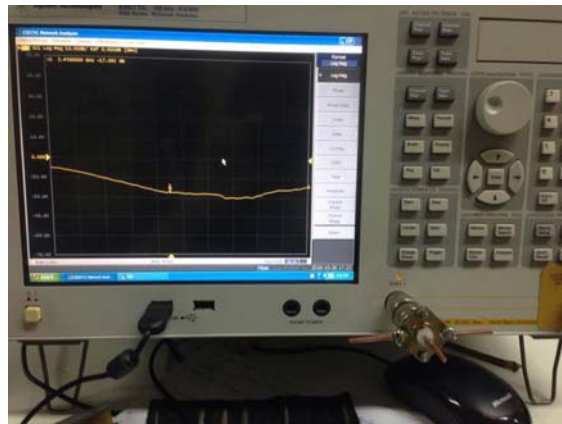
รูปที่ 4.5 อิมพีแดนซ์ของโพรงที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

#### 4.2 การทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งของเครื่องส่งความถี่วิทยุ

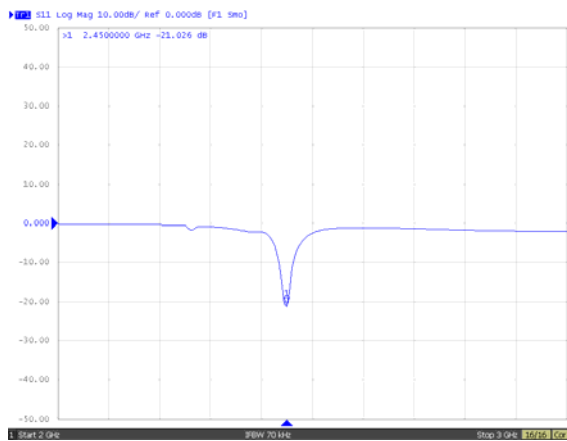
เนื่องจากการวัดกำลังส่งจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพื่อให้สามารถพิจารณาความแรงของสัญญาณที่รับได้ ดังนั้นในเบื้องต้น จึงต้องสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบง่ายเพื่อทดสอบกำลังส่งของเครื่องส่งที่สร้างขึ้นในเบื้องต้น โดยจะทำการสร้างและวัดสายอากาศโมโนโพล 2 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จากนั้นวัดค่าและทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งพบว่าสายอากาศต้นที่ 1 มีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-21.026$  dB SWR เท่ากับ  $1.2006$  และอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $53.431+j3.9121$  โอห์ม และสายอากาศต้นที่ 2 มีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-22.508$  dB SWR เท่ากับ  $1.2344$  และอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $55.167+j2.4750$  โอห์ม ซึ่งแสดงค่า  $S_{11}$  SWR และอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



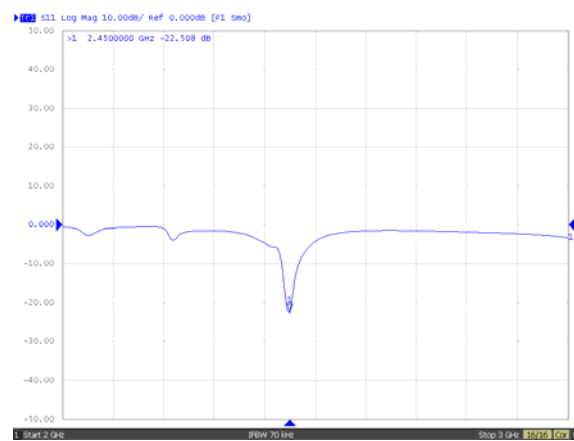
รูปที่ 4.6 สายอากาศโมโนโพลจากการสร้างจริง



รูปที่ 4.7 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศโมโนโพลเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

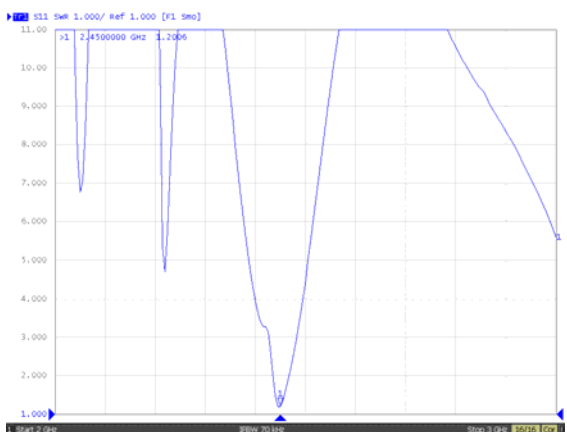


(ก)

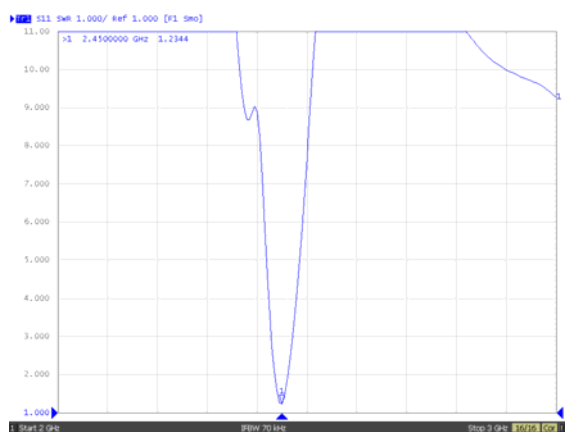


(ข)

รูปที่ 4.8 ค่า  $S_{11}$  ของ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2

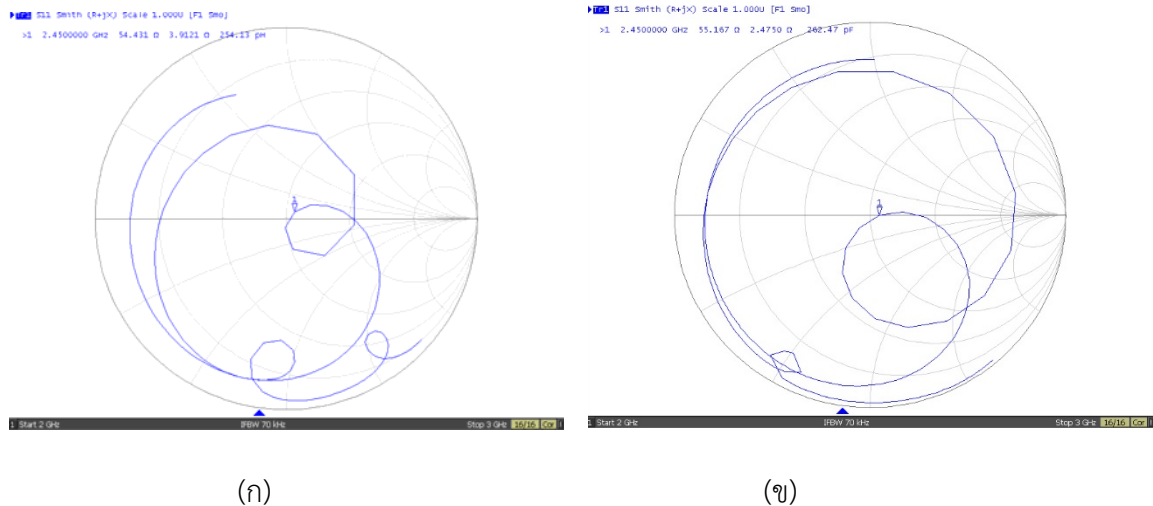


(ก)



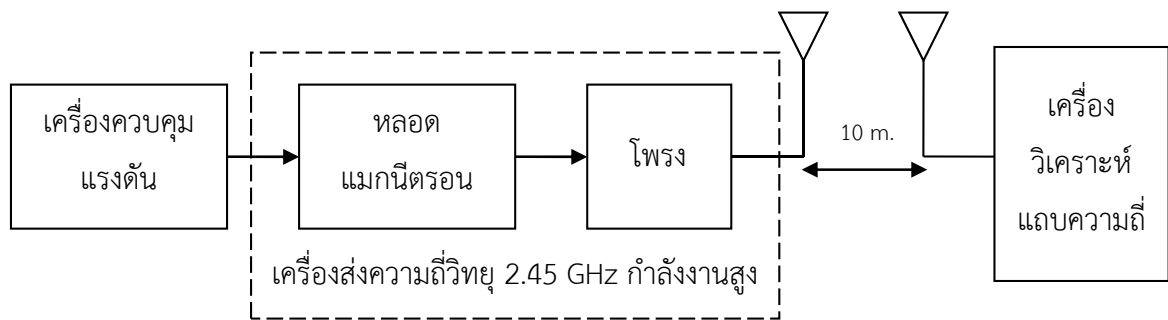
(ข)

รูปที่ 4.9 ค่า SWR ของ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2



รูปที่ 4.10 ค่าอิมพีแดนซ์ (ก) สายอากาศต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศต้นที่ 2

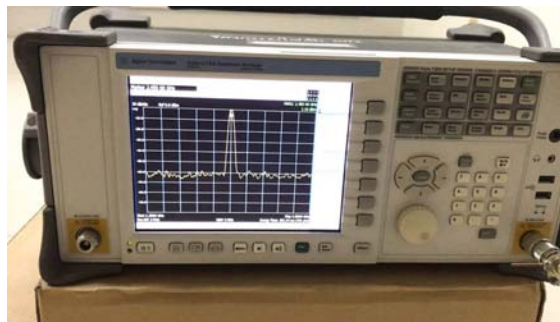
หลังจากแมตซ์อิมพีแดนซ์ของโพรงและสายอากาศได้โพลแล้วต่อไปจะเป็นการทดสอบสอบวัตต์แรงดันและกำลังส่งโดยกำหนดให้ค่าแรงดันกระแสสลับที่ 200 โวลต์ จากนั้นทำการปรับระดับของแรงดันซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับ และวัดค่ากำลังที่ภาครับ  $P_r$  เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังส่ง  $P_t$  ที่ป้อนให้แก่เครื่องส่ง ในการทดสอบวัตต์แรงดันและกำลังส่งเครื่องส่งความถี่วิทยุมีการจัดอุปกรณ์ของเครื่องมือที่ใช้วัดโดยมีแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ขณะวัดแสดงดังในรูป ที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 แสดงกำลังงานที่รับได้ที่ภาครับ



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงการวัดแรงดันเพื่อหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่



รูปที่ 4.12 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดกำลังงานโดยผ่านทางสายอากาศส่งและรับ



รูปที่ 4.13 วัดกำลังงานภาครับที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

การหาค่ากำลังของเครื่องส่งความถี่สามารถทำได้โดยการนำค่ากำลังที่ภาครับจากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ไปคำนวณกลับหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่ โดยในการทดลองระยะห่างระหว่างเครื่องส่งความถี่วิทยุกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่คือ 10 เมตร สายอากาศภาคส่งและภาครับมีอัตราขยาย 7.1 dB วัดค่ากำลังงานที่รับได้ที่ระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับ 1 จนถึงระดับ 5 ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดกำลังที่ภาครับจากเครื่องส่งความถี่โดยได้ค่ากำลังที่ภาครับ

ระดับ	กำลังที่รับได้ $P_r$ (dB)
1	1.50
2	1.90
3	2.18
4	2.55
5	2.83

จากสมการที่ 2.8 ทำให้สามารถหาค่ากำลังส่งได้เมื่อความถี่ 2.45 GHz ระยะห่างระหว่างภาคส่ง และภาครับ 10 เมตร สายอากาศมีอัตราขยาย 7.1 dB จะได้

$$P_r(dB) - P_t(dB) = 2(7.1) + 10 \log \left( \frac{0.12}{4\pi \times 10} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$P_r - P_t = -26.2 \quad (4.2)$$

$$P_t = P_r + 26.2 \quad (4.3)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่ากำลังของเครื่องส่งความถี่วิทยุได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจากการวัดและที่ได้จากการคำนวณ

ระดับ	ผลจากการวัด	ผลจากการคำนวณ	
	$P_r$ (เดซิเบล)	$P_t$ (เดซิเบล)	$P_t$ (วัตต์)
1	1.50	27.70	588.84
2	1.90	28.10	645.65
3	2.18	28.38	688.65
4	2.55	28.50	707.95
5	2.83	29.03	799.83

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้แรงดันกระแสสลับมีค่าไม่เกิน 200 โวลต์ ค่ากำลังงานในการส่งความถี่ที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 588.84 ถึง 799.83 วัตต์ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการคือ เครื่องส่งสามารถส่งกำลังงานได้มากกว่า 700 วัตต์

### 4.3 การสร้างและวัดผลของสายอากาศปากแตร

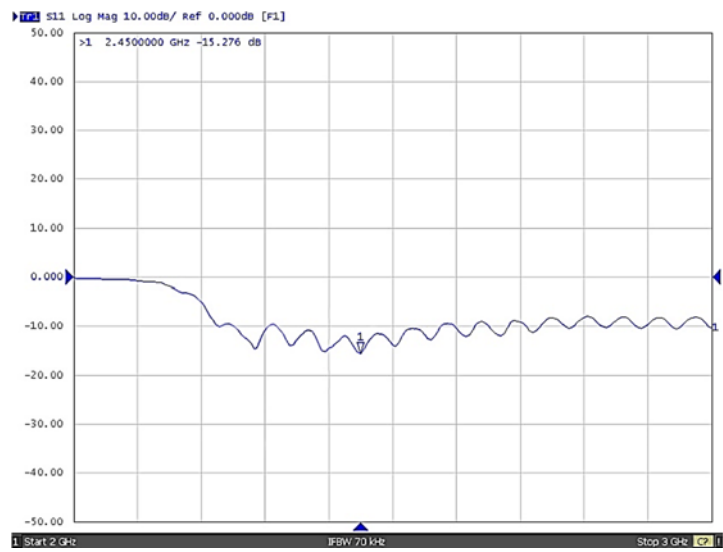
สายอากาศถูกสร้างจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดในบทที่ 3 โดยสร้างสายอากาศ 2 ต้นเพื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากนั้นนำสายอากาศปากแตรที่สร้างขึ้นมาทำการวัดค่า  $S_{11}$  SWR และค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อทดสอบว่าสายอากาศปากแตรที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์



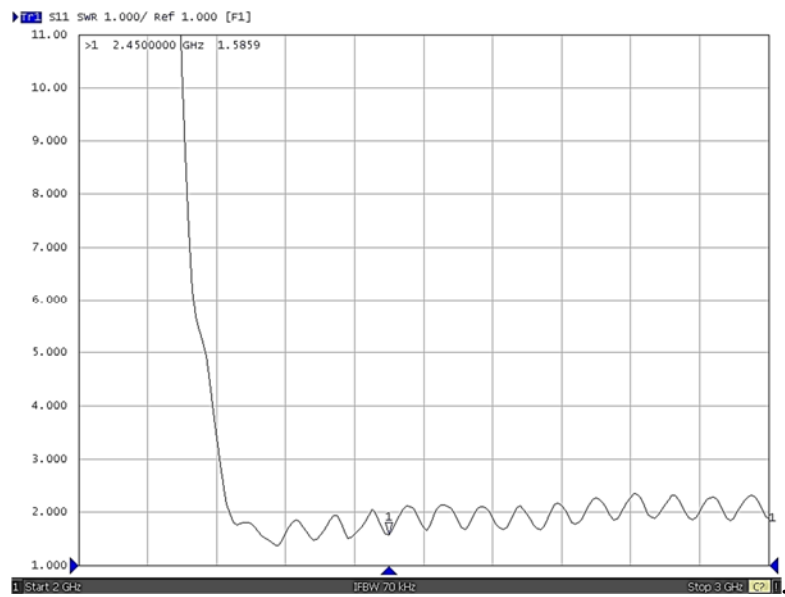
รูปที่ 4.14 สายอากาศปากแตรจากการสร้างจริง

#### 4.3.1 สายอากาศปากแตรต้นที่ 1

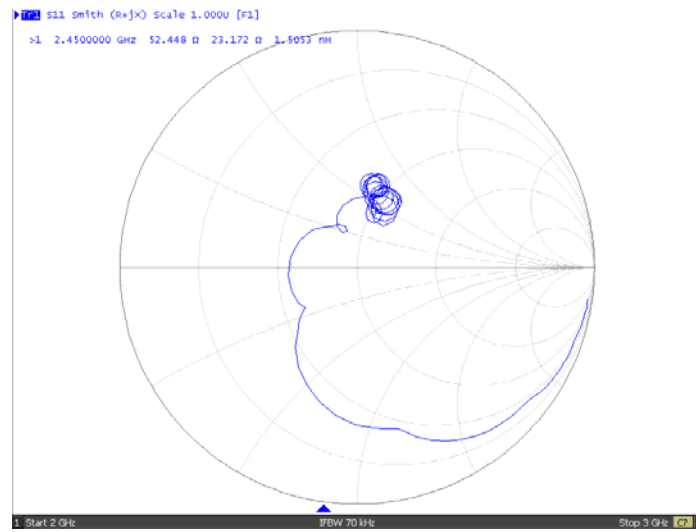
หลังจากสร้างสายอากาศจริงแล้วจึงนำมาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยทำการทดลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าสายอากาศมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-15.276$  dB ค่า SWR เท่ากับ  $1.5859$  และค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $52.448 + j23.127$  โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าที่วัดได้ทำให้ทราบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นยังไม่เกิดการแมตซ์ จึงทำการติดตั้งสกรู และทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยปรับสกรูจนสายอากาศมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-32.247$  dB SWR เท่ากับ  $1.0412$  และได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50.13 + j2.166$  โอห์ม ดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 โดยจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของโพรงมีค่าเข้าใกล้  $50$  โอห์ม ซึ่งเท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งและเครื่องรับ ดังนั้นจึงสามารถนำสายอากาศนี้ไปใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ได้



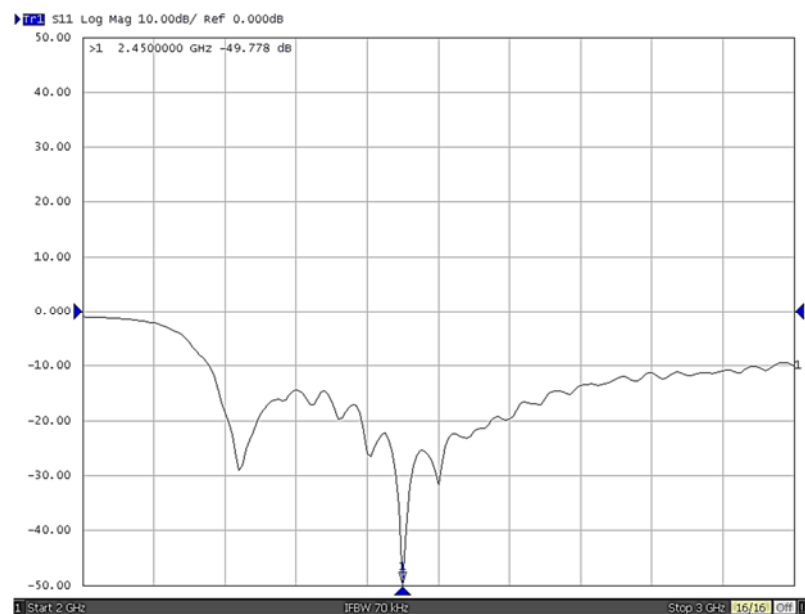
รูปที่ 4.15 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.16 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์

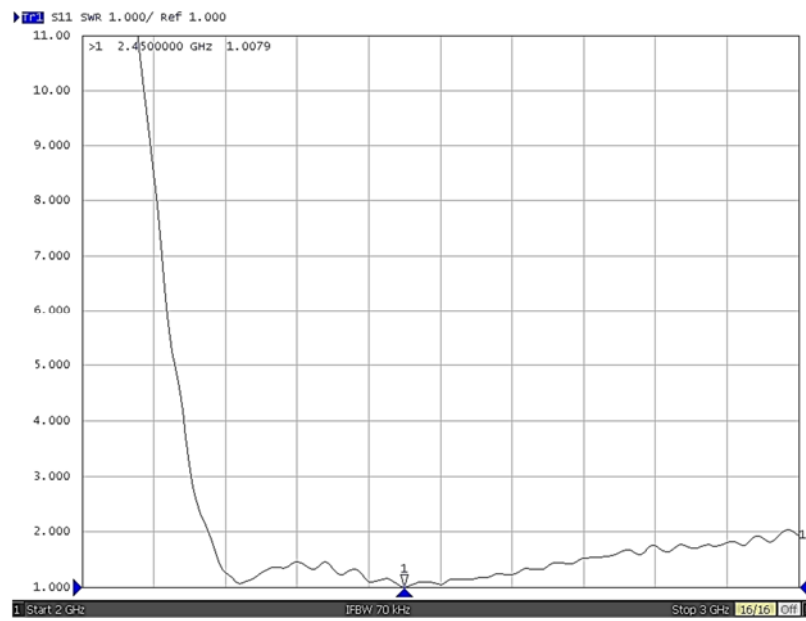


รูปที่ 4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 1 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์

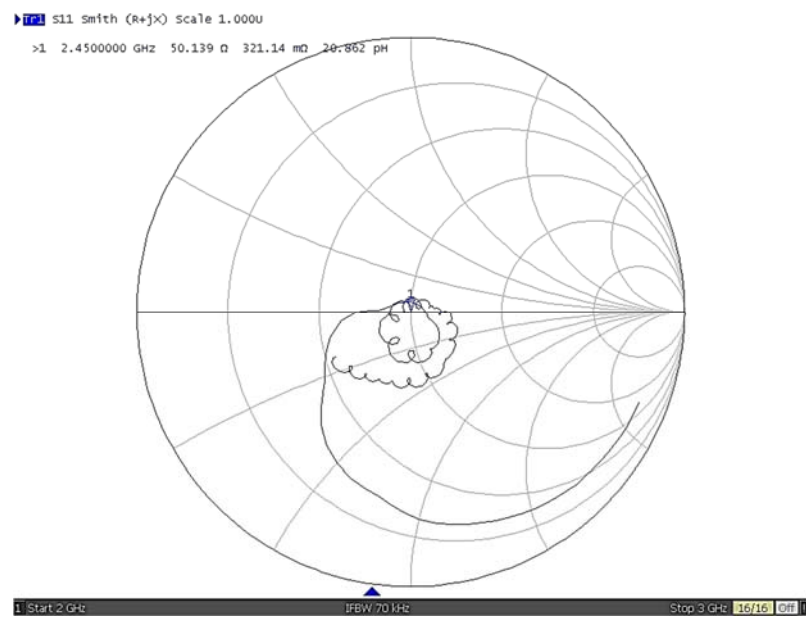


รูปที่ 4.18 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์

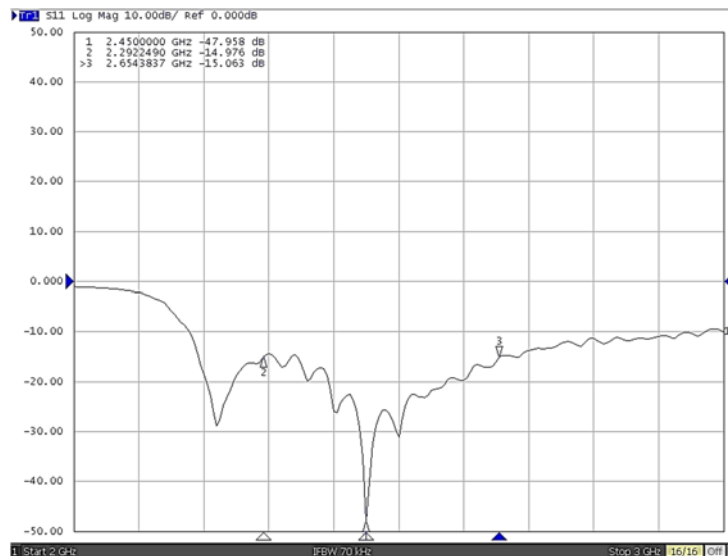




รูปที่ 4.19 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 1 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์

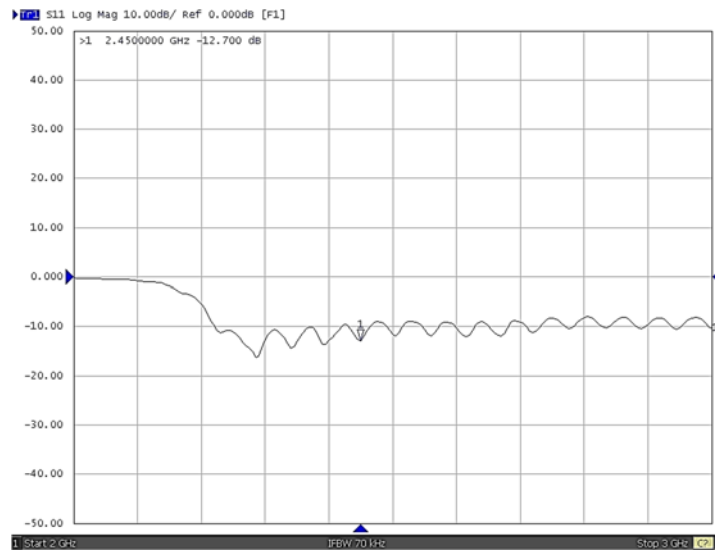


รูปที่ 4.21 ช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 1 สามารถทำงานได้

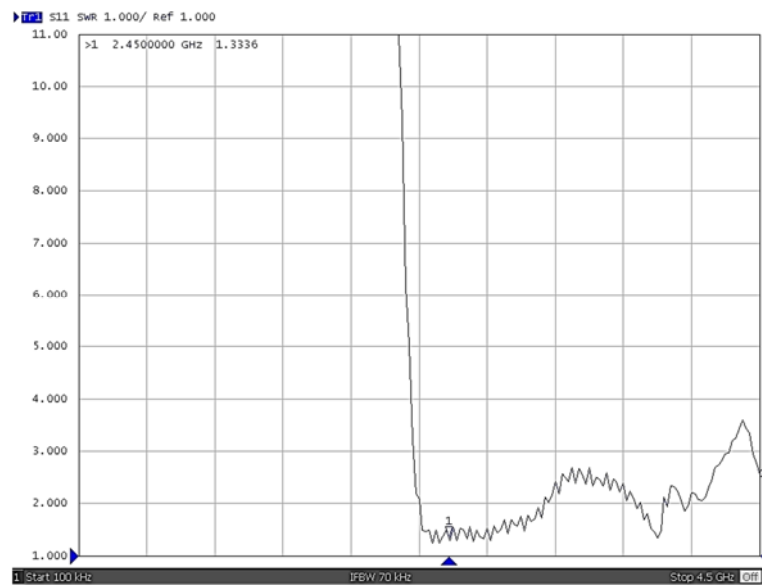
รูปที่ 4.21 แสดงช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 1 สามารถทำงานได้ ซึ่งพิจารณาจากค่า  $S_{11}$  ที่ต่ำกว่า  $-15$  dB ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.29 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.65 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศมีความกว้างแถบ 360 เมกะเฮิรตซ์

#### 4.3.2 สายอากาศปากแตรต้นที่ 2

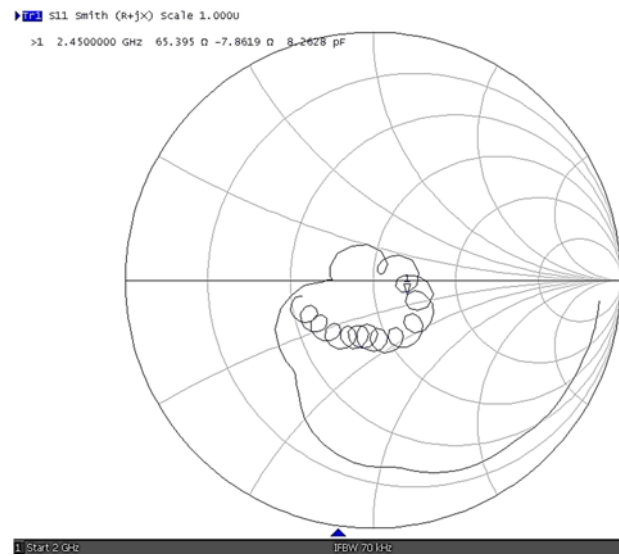
ทำการทดลองเช่นเดียวกับสายอากาศต้นที่ 1 คือ นำสายอากาศต้นที่ 2 มาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยทำการทดลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าสายอากาศมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-12.700$  dB ค่า SWR เท่ากับ 1.3336 และค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $65.359-j7.6819$  โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าที่วัดได้ทำให้ทราบว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นยังไม่เกิดการแมตซ์ จึงทำการติดตั้งสกรูและทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยปรับสกรูจนสายอากาศมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-32.247$  dB ค่า SWR เท่ากับ 1.0412 และได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50.13+j2.166$  โอห์ม ดังรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 โดยจะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของโพรงมีค่าเข้าใกล้ 50 โอห์ม ซึ่งเท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งและเครื่องรับ ดังนั้นจึงสามารถนำสายอากาศนี้ไปใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ได้



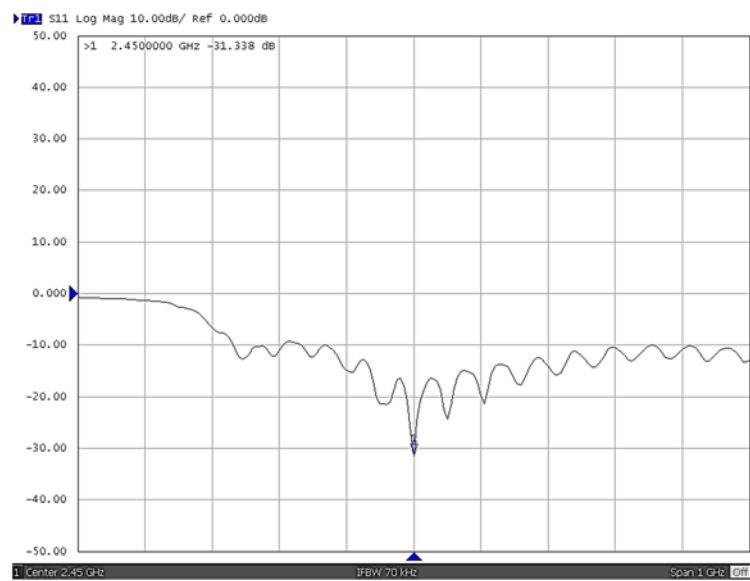
รูปที่ 4.22 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



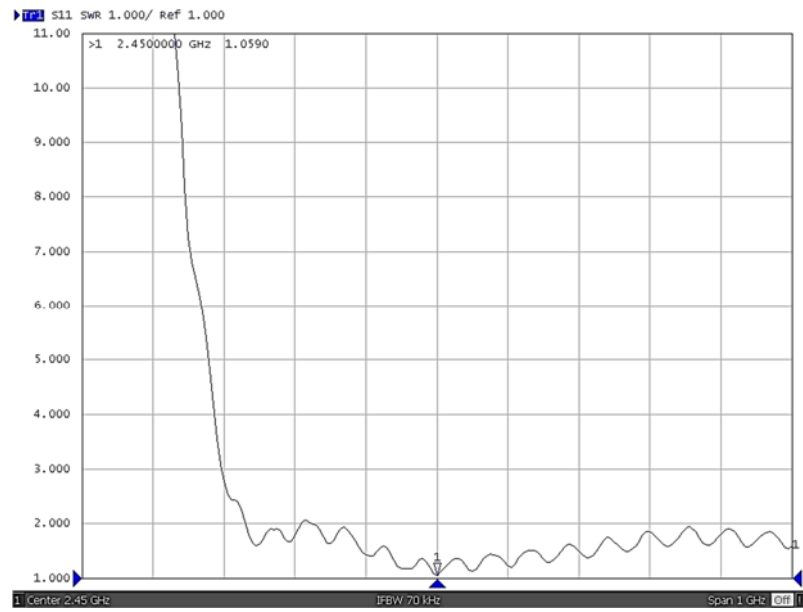
รูปที่ 4.23 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



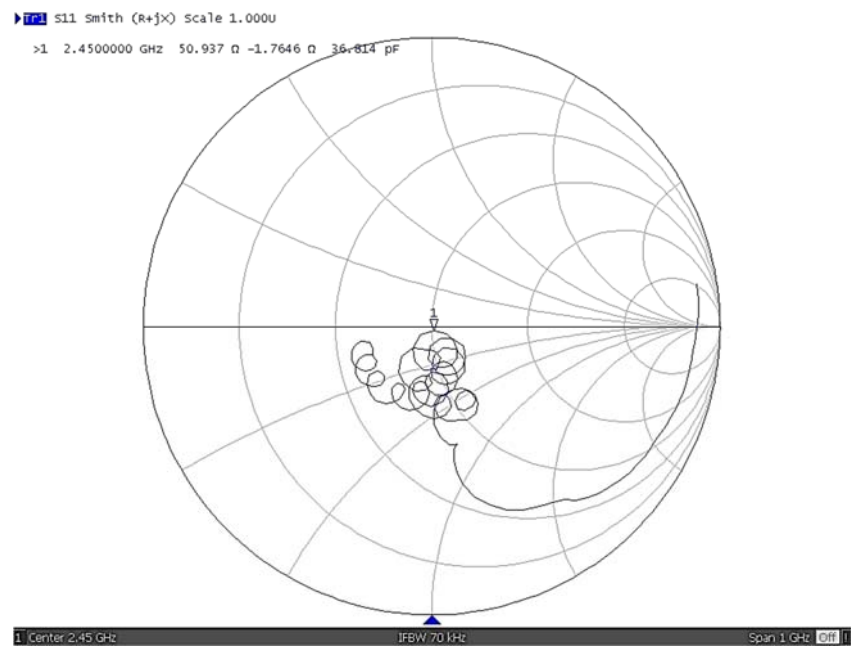
รูปที่ 4.24 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 2 ก่อนทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



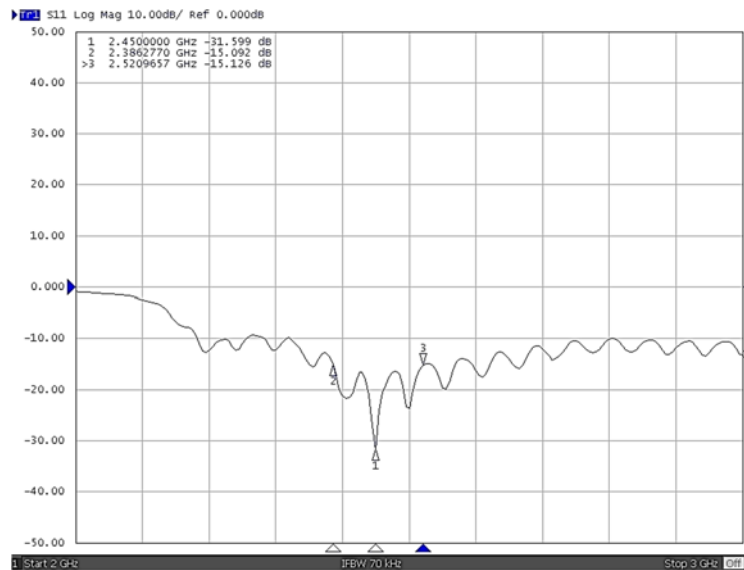
รูปที่ 4.25 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.26 ค่า SWR ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.27 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นที่ 2 หลังทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.28 ช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 2 สามารถทำงานได้

รูปที่ 4.28 แสดงช่วงความถี่ใกล้เคียงที่สายอากาศต้นที่ 2 สามารถทำงานได้ ซึ่งพิจารณาจากค่า  $S_{11}$  ที่ต่ำกว่า  $-15$  dB ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.38 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.52 กิกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศมีความกว้างแถบ 140 เมกะเฮิรตซ์

หลังจากทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแล้วทำการวัดรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 2 ต้น ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งมีกำลังส่ง  $-10$  dB โดยทำการวัดสายอากาศครั้งละ 10 องศา จนครบ 360 องศา โดยวางสายอากาศภาครับและภาคส่งห่างกัน 3 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างในช่วงสนามระยะไกลของสายอากาศ โดยผลจากการแสดงดังตารางที่ 4.3 จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาทำการพล็อตแบบรูปแบบการแผ่พลังงานซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 (ก) และ 4.29 (ข) ตามลำดับ

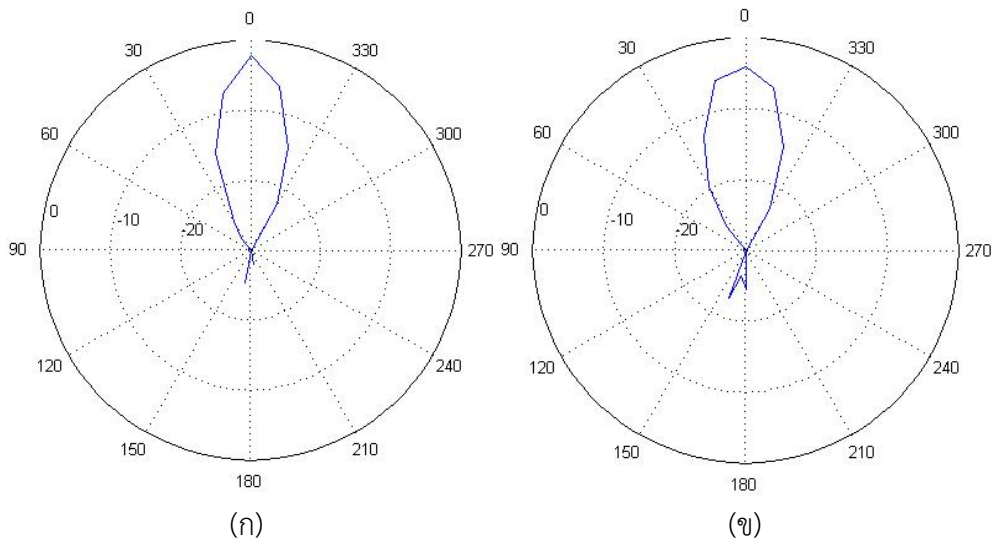
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดสายอากาศภาคส่งและภาครับ

องศา	สายอากาศต้นที่ 2 เป็นตัวส่ง สายอากาศต้นที่ 1 เป็นตัวรับ	สายอากาศต้นที่ 2 เป็นตัวรับ สายอากาศต้นที่ 1 เป็นตัวส่ง
	dB	dB
0	-27.1	-26.08
10	-27.81	-28.64
20	-31.42	-32.64
30	-34.76	-37.64
40	-37.82	-38.96
50	-42.08	-40.76
60	-52.48	-46.16
70	-53.26	-51.68
80	-50.78	-58.54
90	-48.86	-59.8
100	-54.3	-56.62
110	-54.1	-53.09
120	-48.25	-51.33
130	-44.3	-49.64
140	-45.35	-46.92
150	-41.51	-48.92
160	-36.41	-42.51
170	-38.13	-37.64
180	-37.22	-41.13

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดสายอากาศภาคส่งและภาครับ (ต่อ)

องศา	สายอากาศต้นที่ 2 เป็นตัวส่ง สายอากาศต้นที่ 1 เป็นตัวรับ	สายอากาศต้นที่ 2 เป็นตัวรับ สายอากาศต้นที่ 1 เป็นตัวส่ง
190	-40.23	-38.98
200	-41.68	-39.98
210	-43.6	-46.18
220	-54.23	-50.43
230	-54.08	-49.87
240	-51.21	-52.14
250	-56.62	-50.55
260	-54.12	-56.9
270	-52.6	-54.16
280	-51.23	-50.43
290	-47.91	-60.42
300	-49.76	-47.36
310	-41.72	-44.44
320	-44.21	-47.13
330	-36.57	-36.16
340	-32.23	-32.23
350	-28.42	-28.11





**รูปที่ 4.29** แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตร (ก) สายอากาศปากแตรต้นที่ 1 และ (ข) สายอากาศปากแตรต้นที่ 2

จากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 2 ต้น จะเห็นว่าสายอากาศทั้ง 2 ต้น มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นไปตามทฤษฎีของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดซึ่งมีลำคลื่นหลักอยู่ด้านอะเพอร์เจอร์และมีพูหลังต่ำกว่าลำคลื่นหลัก ซึ่งจากการวัดค่าและการคำนวณพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth) ประมาณ 25 องศา และมีอัตราขยายเท่ากับ 22.92 dB

#### 4.4 การทดสอบวัดอัตราขยายของสายอากาศ

จากนั้นทำการวัดกำลังงานที่รับได้โดยใช้สายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศรับและส่ง เทียบกับกรณีใช้สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศตัวรับและส่ง โดยทำการส่งกำลังงานจากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แต่เนื่องจากความสามารถในการรับกำลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความถี่สามารถรับได้ไม่เกิน +33 dBm ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ดังนั้นจึงทำการกำหนดการรับส่งทั้งหมด 4 ระดับ คือ -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm และ 20 dBm เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่จะเกิดกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ ในการวัดสัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์ความถี่ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่งมีระยะห่าง 1 เมตร ทั้งกรณีที่ใช้สายอากาศโมโนโพลและสายอากาศปากแตร โดยจัดวางอุปกรณ์ในการวัดสัญญาณกรณีที่ใช้สายอากาศโมโนโพลแสดงในรูปที่ 4.31 และ กรณีใช้สายอากาศปากแตรแสดงในรูปที่ 4.32 และมีผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.30 ลักษณะของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ และขีดจำกัดในการรับพลังงาน



รูปที่ 4.31 การวัดกำลังงานที่ภาครับกรณีใช้สายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 4.32 การวัดกำลังงานที่ภาครับกรณีใช้สายอากาศปากแตร

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดกำลังที่ภาครับ

กำลังส่ง	กำลังงานที่ภาครับ (dBm)	
	สายอากาศโมโนโพล	สายอากาศปากแตร
-10	-55.21	-33.7
0	-46.81	-23.96
10	-35.64	-13.93
20	-27.52	-4.72

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ากรณีที่มีการใช้สายอากาศปากแตรจะสามารถรับกำลังงานที่ภาครับได้มากกว่ากรณีที่ใช้สายอากาศโมโนโพลในทุกระดับของกำลังส่งที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากสายอากาศปากแตรมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศโมโนโพล นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะทางกายภาพจะเห็นว่าสายอากาศปากแตรแข็งแรงทนทานมากกว่าสายอากาศโมโนโพล จึงถูกนำมาใช้สำหรับเป็นสายอากาศในการทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะการนำไปใช้ร่วมกับเครื่องส่งที่มีกำลังสูง

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในโครงการวิทยุคมนาคมนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุกำลังสูง 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ส่งคลื่นผ่านโพรงสำหรับขั้นตอนในการสร้างนั้นโพรงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งนั้นยังไม่เกิดการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์จึงต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของโพรงโดยใช้วิธีติดตั้งสกรู หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังส่งเบื้องต้นของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งพบว่าเครื่องส่งที่สร้างขึ้นมีกำลังส่งสูงสุด 799.83 วัตต์ จากนั้นทำการออกแบบและสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเพื่อใช้รองรับการส่งสัญญาณที่มีกำลังสูง และใช้สำหรับเป็นสายอากาศพื้นฐานในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับอุปกรณ์สื่อสาร โดยสายอากาศปากแตรที่สร้างขึ้นมีอัตราขยาย 22.92 dB และมีความกว้างครึ่งกำลังประมาณ 25 องศา

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุกำลังสูง 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด หลังจากการออกแบบและนำมาสร้างจริงพบว่าเกิดปัญหาค่าพารามิเตอร์ที่วัดจริงนั้นไม่เป็นไปตามค่าจากการออกแบบ จึงต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยการติดตั้งสกรูเพื่อให้โพรงและสายอากาศสามารถนำมาใช้งานในการทดสอบได้ ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวต้องใช้ความระมัดระวังในการปรับสกรู เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย จึงควรหาวิธีการหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้ยึดสกรูให้แน่นขึ้นกว่าเดิม

## เอกสารอ้างอิง

- พิชญา ชัยปัญญา; และ อภิญญา อินทร์นอก. (2550). เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานสูง. วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมโทรคมนาคม). นครราชสีมา: สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ. นครราชสีมา: สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory :Analysis and Design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Son.
- Griffin EJ. (1976). Design of 3-screw tuners. In The New Electronics Letters, V.12. pp. 657-658. Great Malvern: n.p.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก

## คำสั่งแมทแลปที่ใช้ออกแบบโพรง

```

n=377;           ;dielectric Intrinsic impedance
Rs=2.7e-8;      ;aluminum resistance
fc=2.20x10^9    ;cut-off frequency
a=(3e8/(2*fc)); ;width of waveguide
b=a/2;          ;highof waveguide
c1=4*(fr^2);
c2=(3e8)^2;
c3=c1/c2;
c4=1/(a^2);
c5=c3-c4;
c6=sqrt(c5);
c=1/c6;
q1=(a^2)+(c^2);
q2=b*(q1^(3/2));
q3=a*c*q1;
q4=(a^3)+(c^3);
q5=2*b*q4;
q6=q3+q5;
q7=(pi*n)*(2*Rs);
Q=q7*(q2/q6)

```

## คำสั่งแมทแลปที่ใช้ออกแบบสายอากาศปากแตร

```

clear;
global G a b Lambda f;
fprintf('\nOUTPUT DEVICE OPTION\n');
fprintf('\tOPTION (1): SCREEN\n');
fprintf('\tOPTION (2): OUTPUT FILE\n');
output=input('OUTPUT DEVICE: ');
fprintf('\n-----');
fprintf('\nSpecify the following input parameters:\n');
fprintf('-----');

Go=input('\nDESIRED GAIN OF THE HORN IN dB: Go(dB)= ');
fo=input('FREQUENCY OF OPERATION IN GHz: fo(GHz)= ');
a=input('HORN DIMENSION A IN CM: a(cm)= ');
b=input('HORN DIMENSION B IN CM: b(cm)= ');
f=fo*1e9;
G=10^(Go/10);
Lambda=((3e8)/f)*100;
Xl=G/(2*pi*sqrt(2*pi));
Chi=fzero(@Subroutine,Xl);
RHOe=Chi*Lambda;
RHOh=((G^2)/(8*pi^3))*(1/Chi)*Lambda;
a1=(G/(2*pi))*sqrt(3/(2*pi*Chi))*Lambda;
b1=sqrt(2*Chi)*Lambda;
Pe=(b1-b)*sqrt((RHOe/b1)^2-1/4);
Ph=(a1-a)*sqrt((RHOh/a1)^2-1/4);
switch output
case 1
fprintf('\n-----');
fprintf('\nDESIGNED PARAMETERS FOR THE OPTIMUM GAIN HORN');
fprintf('\n-----');
fprintf('\na1\t\t=\t%f',a1);
fprintf('\tcm');
fprintf('\nb1\t\t=\t%f',b1);
fprintf('\tcm');
fprintf('\nRHOe\t=\t%f',RHOe);
fprintf('\tcm');
fprintf('\nRHOh\t=\t%f',RHOh);
fprintf('\tcm');
fprintf('\nPe\t\t=\t%f',Pe);
fprintf('\tcm');

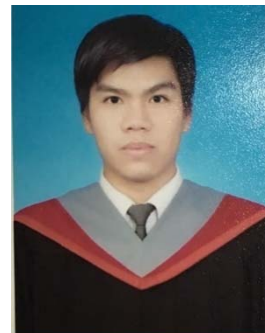
```



ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

## ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายวัชรกฤษฎ์ เลิศธรรมไพบูลย์
วันเดือนปีเกิด	2 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1111/104 หมู่ 4 ต.หนองจะบก อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	090-290-5252
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนบุญวัฒนา
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



## ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอดิสร รามทิพย์
วันเดือนปีเกิด	9 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	24 หมู่ 10 ต.เขาเจ็ยก อ.เมือง จ.พัทลุง 93000
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	086-957-1242
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนพัทลุง
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



## ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ชื่อ ชื่อสกุล	นายประสิทธิ์ชัย ชูพรรคพานิช
วันเดือนปีเกิด	20 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	87/16 ถ.เศรษฐสัมพันธ์ ต.หนองแค อ.หนองแค จ.สระบุรี 18140
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	090-962-8785
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี
พ.ศ. 2560	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

