



การออกแบบและพัฒนาสายอากาศเซอรัคูลาร์ที่ใช้ในระบบ  
กระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม

โดย

กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2561



Design and Development of Circular Antenna for  
FM Broadcasting Radio

By  
Kunnthphonng Srisathit  
Pitchanun Wongsiritorn

Granted by  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Fiscal year 2018

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยและพัฒนาเรื่อง “การออกแบบและพัฒนาสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ใช้ในระบบกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (Design and development of circular antenna for FM broadcasting radio)” นี้ คณะผู้วิจัยฯ ต้องขอขอบคุณคณะผู้บริหารมูลนิธิสถาบันกัลยาณ์ราชนครินทร์และมูลนิธิสว่างจิตนครปฐม ที่เปิดโอกาสให้คณะผู้วิจัยฯ ได้เข้าไปเสนอแนะและมีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาการส่งกระจายเสียงให้กับสถานีวิทยุของมูลนิธิฯ ซึ่งได้รับการอนุญาตให้ทดลองประกอบกิจการแบบสาธารณะและแบบชุมชน จากสำนักงาน กสทช.

คณะผู้วิจัยฯ ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ผ่านช่องทางการจัดสรรงบประมาณโดยสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ซึ่งได้รับการจัดสรรงบประมาณแผ่นดิน หมวดเงินอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ในแผนงานบูรณาการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา ภายใต้โครงการวิจัยเพื่อสะสมองค์ความรู้ที่มีศักยภาพกิจกรรมวิจัยและพัฒนา

นอกจากนี้แล้ว คณะผู้วิจัยฯ ต้องขอขอบคุณนักศึกษาที่มีส่วนช่วยงานวิจัยในโครงการวิจัยนี้ทั้งในส่วนของการทดลองในห้องปฏิบัติการและการสอบภาคสนามที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ รวมไปถึงการทดสอบและติดตั้งเพื่อการใช้งานจริงกับสถานีวิทยุกระจายเสียง

กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์

พิชชานันท์ วงษ์ศิริธร

สิงหาคม 2562

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A-7/2561

ชื่อโครงการ : การออกแบบและพัฒนาสายอากาศเซอร์คูล่าร์ที่ใช้ในระบบกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม

ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร.กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์ และ ดร.พิชชานันท์ วงษ์ศิริธร

รายงานนี้เป็นการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบเซอร์คูล่าร์ในย่านความถี่วิทยุ การออกแบบสายอากาศเซอร์คูล่าร์ใช้ความรู้ทางด้านวิชาวิศวกรรมสายอากาศนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำการออกแบบสายอากาศเซอร์คูล่าร์ เพื่อศึกษาการแผ่กระจายของคลื่นพารามิเตอร์ต่างๆ ในสายอากาศ เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น เป็นต้น โดยทำการคำนวณความถี่ที่ต้องการ แล้วนำไปออกแบบสายอากาศในโปรแกรม CST Microwave Studio หลังจากทำการออกแบบแล้วนำค่าไดมิเตอร์ของสายอากาศ นำมาสร้างชิ้นงาน โดยสายอากาศเซอร์คูล่าร์ที่ทำการสร้างนี้ใช้วัสดุสแตนเลสทั้งหมด เมื่อสร้างสายอากาศสำเร็จนำสายอากาศไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม CST Microwave Studio ในการทดสอบสายอากาศใช้เครื่องมืออุปกรณ์เช่น เครื่อง MFJ เครื่องกำเนิดสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศกับในโปรแกรม CST Microwave Studio มีผลลัพธ์ที่เป็นแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และเป็นไปตามทฤษฎีวิชาวิศวกรรมสายอากาศที่ได้ศึกษามา

คำสำคัญ : สายอากาศ, เซอร์คูล่าร์, ระบบส่งกระจายเสียงเอฟเอ็ม, การวัด

E-mail Address : kunthphong.sri@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ต.ค.2560 – ส.ค. 2562

## Abstract

**Code of project** : A-7/2561

**Project name** : Design and development of circular antenna for FM broadcasting radio

**Researcher name:** Assit. Prof. Dr.Kunnthphong Srisathit and Dr.Pitchanun Wongsiritorn

The report is a planning of create a circular antenna with in radio frequency which applies some knowledge about antenna engineering to build it for learning about the diffraction of waves and parameter in antenna. For example, reflection coefficient ( $S_{11}$ ), voltage standing wave ratio ( $VSWR$ ), impedance, and radiation pattern. The test should calculate a radio frequency and the aerial were made by the CST Microwave Studio program. Then, uses stainless steel to create all of a circular aerial after calculates diameter antenna. After that, brings it to do the parameter test for compare in the CST Microwave Studio program. For the aerial testing, uses some equipment like MFJ, the Signal generator, the Spectrum analyzer, and Network analyzer to do the parameter test. In conclusion, the result of the aerial testing has the same tendency with the theory which had learned before

**Keywords:** Antenna, Circular, FM Broadcasting Systems, Measurements

---

**E-mail Address** : kunnthphong.sri@rmutr.ac.th

**Period of project** : Oct. 2017- Aug.2019

## สารบัญ

## หน้า

กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ช
สารบัญภาพ		ซ
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
	1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	2. วัตถุประสงค์การวิจัย	1
	3. ขอบเขตการวิจัย	2
	4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
	1. ทฤษฎีสายอากาศ	3
	2. สายอากาศไดโพล	4
	2.1 สายอากาศไดโพลแบบจิว	6
	2.2 ความเข้มของสนามไฟฟ้า	7
	2.3 ลักษณะของคลื่นฟ้าและคลื่นดิน	7
	2.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน	9
	2.5 สภาพเจาะจงทิศทางหรือไดเรกทิวิตี	12
	2.6 ประสิทธิภาพสายอากาศ	14
	2.7 อัตราขยาย	15
	2.8 แบนด์วิดท์	16
	2.9 โพลาริเซชัน	17
	2.10 อินพุตอิมพีแดนซ์	19
	2.11 ประสิทธิภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศ	19

	2.12 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	21
	2.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	22
	2.14 ดัมมีโหลด	22
	2.15 คอนเนคเตอร์	23
	2.16 สายโคแอกเชียล	24
	2.17 โคร่งข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์	27
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงาน</b>	<b>33</b>
	1. การออกแบบในโปรแกรม CST Microwave studio	33
	1.1 คำนวณหาขนาดของสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เทียบกับขนาดของเซอร์คูลาร์	22
	1.2 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	33
	1.3 การหาขนาดสายอากาศเซอร์คูลาร์	37
	2. การสร้างชิ้นงานจริงโดยใช้ขนาดที่ได้ออกแบบเป็นขนาดอ้างอิง	39
	2.1 การตัดขนาดความยาวสายนำสัญญาณที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	43
	3. การออกแบบสายอากาศเซอร์คูลาร์ในย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็มในช่วงความถี่ต้น, ความถี่กลาง และความถี่ปลาย	44
	3.1 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่ต้น 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์	44
	3.2 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กลาง 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	46
	3.3 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่ปลายที่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	48
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์</b>	<b>51</b>
	1. ผลการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	51
	2. ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง MFJ-259b	53
	2.1 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 1 ด้วย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร	53
	2.2 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 2 ด้วย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร	54
	2.3 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 1 ด้วย RG-8 ความยาว 4.80 เมตร	55
	2.4 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 2 ด้วย RG-8 ความยาว 4.80 เมตร	56

3.	การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	57
3.1	การเปรียบเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 2 พอร์ต	57
3.2	การเปรียบเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 1 พอร์ต	62
3.3	การทดสอบสายอากาศตัวที่ 1 ด้วย RG-8 ความยาว 4.80 เมตร	55
4.	การวัดและทดสอบหาค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ RG-8	66
5.	การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	67
6.	การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	68
7.	การทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม	71
7.1	การวัดค่าแพทเทิร์นของสายอากาศที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์	72
7.2	การพล็อตโพลาร์กราฟในระนาบแนวตั้ง (E-Plane)	77
7.3	การพล็อตโพลาร์กราฟในระนาบแนวนอน (H-Plane)	78
7.4	การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศตัวรับ-ตัวส่ง	78
8.	การทดสอบสายอากาศร่วมกับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มที่ผ่านมาตรฐาน	79
8.1	เครื่องเอ็กไซเตอร์	79
8.2	เครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มขนาด 500 วัตต์	80
8.3	มิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ	80
8.4	การทดสอบแบนด์วิดท์ของสายอากาศ	85
8.5	การคำนวณหาแบนด์วิดท์	87
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลและข้อพึงระวังในการทดสอบ</b>	<b>88</b>
1.	สรุปผล	88
2.	ข้อพึงระวังในการทดสอบ	89
<b>บรรณานุกรม</b>		<b>90</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>		<b>91</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า $VSWR$ ในสภาวะต่างๆ	21
2	ผลการทดสอบการแมตซ์สายอากาศ ด้วยสาย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร	55
3	ผลการทดสอบการแมตซ์สายอากาศ ด้วยสาย RG-58 ความยาว 4.80 เมตร	56
4	การทดสอบวัดค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 ความยาว 7.92 เมตร	66
5	ผลการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	70
6	ผลการวัดค่ากำลังงานในแนวตั้ง (E-plane) ที่รับค่าได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์	74
7	ผลการวัดค่ากำลังงานในแนวนอน (H-Plane) ที่รับค่าได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์	76
8	ผลการทดสอบการจ่ายกำลังงานให้กับสายอากาศ	84
9	แบนด์วิดท์ของสายอากาศ	87

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของสายอากาศไดโพล	5
2	การเดินทางของคลื่นฟ้าและคลื่นดิน	8
3	แบบรูปการแผ่พลังงาน	9
4	การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	11
5	ลักษณะของโพลาริเซชัน	18
6	ดัมมี่โหลด	23
7	คอนเนคเตอร์	24
8	โครงสร้างภายในสายโคแอกเชียล	25
9	การจัดวางของสายอากาศตัวส่งและรับสำหรับสมการของพรีส	26
10	สัดับแบบขนาน	28
11	สัดับแบบอนุกรม	30
12	การเปิดใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio	34
13	การเลือกโหมดที่ต้องการใช้งาน	34
14	การเลือกโหมดเพื่อออกแบบสายอากาศแบบเส้น	35
15	กำหนดค่าหน่วยต่างๆ	35
16	สายอากาศที่ออกแบบตามที่คำนวณไว้	36
17	การประมวลผลสายอากาศ	36
18	รัศมีของห้วงวงกลมและระยะตัด	38
19	ช่องอทั้ง 2 ข้างของสายอากาศ	38
20	แขนตัวสายอากาศ	39
21	อุปกรณ์ชิ้นส่วนทั้งหมด	40
22	การนำเอาอุปกรณ์ชิ้นส่วนทั้งหมดมาเชื่อมติดกัน	40
23	การบัดกรีหางปลาเข้ากับคอนเนคเตอร์ เพื่อใช้เป็นตัวยึดสัดับ	41
24	การเจาะแป้นยึดเพื่อยึดคอนเนคเตอร์	41

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	การตัดสตัดและนำไปเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์และปลายอีกข้างยึดกับเข็ม ขีดรีด	42
26	สายอากาศเซอร์คูลาร์แบบสมบรูณ์	42
28	รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์	45
29	ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์	45
30	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์	45
31	ความยาวของแขนทั้ง 2 ข้างของสายอากาศความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	46
32	รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	47
33	ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	47
34	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	47
35	ความยาวของแขนทั้ง 2 ข้างของสายอากาศความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	48
36	รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	49
37	ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	49
38	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 107.75 เมกกะ เฮิร์ตซ์	49
39	ค่าการสูญเสียย้อนกลับในโปรแกรม CST Microwave Studio	51
40	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ในโปรแกรม CST Microwave Studio	51
41	รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศใน โปรแกรม CST Microwave Studio	52
42	รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามแม่เหล็ก (E-Field) ของสายอากาศจาก การ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	52
43	รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) ของสายอากาศในรูปแบบ 3 มิติ ในโปรแกรม CST Microwave Studio	53
44	ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 1 กับสาย RG-8 ด้วยเครื่อง MFJ-259b	54
45	ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 2 กับสาย RG-8 ด้วยเครื่อง MFJ-259b	54
46	ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยเครื่อง MFJ-259b	55

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 2 ด้วยเครื่อง MFJ-259b	56
48	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	57
49	การตั้งค่าเริ่มต้นความถี่ที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	58
50	การตั้งค่าสิ้นสุดความถี่ที่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	58
51	การเปรียบเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	59
52	การเลือกเปรียบเทียบแบบ 2 พอร์ต	59
53	การต่อโหลดเข้ากับสายของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	60
54	กำหนดค่าใช้งาน OPEN, SHORT, LOAD และ THRU	60
55	การต่อพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เข้าด้วยกัน	61
56	การเลือกค่า THRU	61
57	การต่อพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เข้ากับหัวปรับเทียบแบบ โหลด (BROADBAND LOAD)	62
58	การตั้งค่าความถี่เริ่มต้นที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	63
59	การตั้งค่าความถี่สิ้นสุดที่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	63
60	เลือกคำสั่ง Calibration Wizard	64
61	การเลือก 1 พอร์ต (1 port)	64
62	การต่อโหลด OPEN, SHORT, LOADS กับ Port1	65
63	ผลการวัดค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณ RG-8	66
64	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1	67
65	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1	67
66	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1	68
67	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2	69
68	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2	69
69	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2	70
70	เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (RF Signal Generator)	71

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)	71
72	ค่ากำลังที่วัดได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์	72
73	การกำหนดค่าเครื่องกำเนิดความถี่	73
74	การวางระยะห่างของสายอากาศรับ-ส่ง	73
75	แพทเทิร์นแบบ Polar graph แนวตั้ง (E-Plane)	77
76	แพทเทิร์นแบบ Polar graph แนวนอน (H-Plane)	78
77	เครื่องเอ็กไซเตอร์	79
78	เครื่องส่งเอฟเอ็ม	80
79	มิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ	80
80	รูปเครื่องส่งเอ็กไซเตอร์และมิเตอร์วัดกำลังงาน	81
81	เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 20 วัตต์	82
82	เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 300 วัตต์	82
83	เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 400 วัตต์	83
84	เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 460 วัตต์	84
85	ลักษณะการจับยึดสายอากาศกับขาตั้ง	85
86	การวัดความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1	86
87	การวัดความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2	86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คลื่นวิทยุเอฟเอ็ม (Frequency Modulation) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 88-108 เมกกะเฮิรตซ์ ระบบวิทยุเอฟเอ็ม (Frequency Modulation) เป็นการส่งคลื่น โดยการผสมสัญญาณด้วยความถี่ของคลื่นพาหะที่ต้องการแล้วส่งออกไปในอากาศ โดยการส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม (Frequency Modulation) จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์สายอากาศต่างๆ

ในสภาพปัญหาการรับส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม ที่เกิดเหตุขัดข้องของสัญญาณบ่อยครั้ง อาจเกิดจากปัญหาสาเหตุเช่น สภาพของอากาศ คุณสมบัติของอุปกรณ์ พื้นที่ในการรับส่งสัญญาณลักษณะของสายอากาศ และสายอากาศที่ออกแบบมาไม่ถูกต้องกับลักษณะการทำงาน ทั้งหมดนี้เป็นปัจจัยที่ทำให้การรับส่งสัญญาณเกิดเหตุขัดข้อง

จากสภาพปัญหาดังกล่าวทำให้กลุ่มของผู้จัดทำคิดจัดทำโครงการสายอากาศแบบสายอากาศเซอร์คูล่าที่ย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทางกายภาพ ในสายอากาศแบบเซอร์คูล่าเช่น ขนาด รัศมี ความกว้างของแขน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient), อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (voltage standing wave ratio: VSWR), แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (radiation pattern) และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (impedance) โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งจะช่วยวิเคราะห์เพื่อที่จะใช้ในการแก้ปัญหาในการรับ-ส่งสัญญาณของสายอากาศแบบเซอร์คูล่า

#### 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ได้รูปแบบสายอากาศที่เหมาะสมกับระบบส่งกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุ FM ภายใต้อัจฉริยะกำลังงานส่ง 500 วัตต์
2. เพื่อให้ได้ขนาดทางกายภาพที่ง่ายต่อการคำนวณและออกแบบ มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างจริงในทางปฏิบัติโดยไม่จำเป็นต้องใช้คณิตศาสตร์ที่คำนวณมากนัก
3. เพื่อให้ทราบถึงข้อด้อยของสายอากาศที่มีใช้ในปัจจุบัน อันจะทำให้เข้าใจถึงเหตุแห่งการเกิดการรบกวนสัญญาณแปลกปลอม (Spurious Signal)
4. เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรต่างๆ ที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของสายอากาศ

5. เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเซอร์คูลาร์เทียบกับสายอากาศแบบอื่นๆ

6. เพื่อนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในระบบส่งกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุ FM

7. จากองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัย จะนำไปเผยแพร่ให้กับนักศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผ่านทางการเรียน-การสอนในรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศและนำไปเผยแพร่ให้กับผู้ประกอบการสถานีวิทยุ FM ให้สามารถสร้างขึ้นใช้งานเองได้

### 3. ขอบเขตการวิจัย

โครงการนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ใช้ในระบบกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของโครงการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะของสายอากาศที่มีใช้งานในระบบส่งกระจายเสียง FM
2. ศึกษาสายอากาศที่ให้แบนด์วิดท์แคบๆ เพื่อให้เหมาะกับระบบส่งกระจายเสียง FM
3. หาความเชื่อมโยงระหว่างโครงสร้างสายอากาศที่น่าเสนอกับโครงสร้างของสายอากาศพื้นฐาน
4. จำลองสายอากาศเซอร์คูลาร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และนำขนาดทางกายภาพมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ
5. ทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเซอร์คูลาร์ด้วยเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ
6. ทดสอบสมรรถนะของสายอากาศขณะต่อใช้งานร่วมกับเครื่องส่งมาตรฐาน
7. สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบที่ได้ออกแบบ พร้อมเขียนลำดับการออกแบบและทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและสะดวกต่อการนำไปออกแบบที่ความถี่อื่นๆ

### 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ลำดับขั้นตอนการออกแบบอย่างเป็นระบบที่สามารถสร้างและทดสอบได้ค่าพารามิเตอร์ถูกต้อง
2. ได้สายอากาศที่สามารถออกแบบให้ทำงานในย่านความถี่ใดๆ ตามต้องการโดยอาศัยความรู้ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้
3. ได้สายอากาศต้นแบบที่สามารถสอนให้นักศึกษาหัดสร้างและทดสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีสายอากาศ การออกแบบสายอากาศในโปรแกรม CST Microwave Studio และนำผลจากการออกแบบในโปรแกรมมาสร้างเป็นชิ้นงานจริงเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ รูปแบบการกระจายคลื่น ของสายอากาศที่ออกแบบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน เช่นใด มีรายละเอียดเป็นดังนี้

#### 1. ทฤษฎีสายอากาศ

ทฤษฎีสายอากาศ (Antenna Theory) เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับอุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟสลับความถี่สูงให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและในทางกลับกันก็เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าไฟฟ้าเช่นกัน สายอากาศมีหลายขนาดและรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งานเช่น สายอากาศโทรทัศน์ในบ้านมักติดตั้งไว้บนหลังคาทำด้วยอะลูมิเนียม เพราะน้ำหนักเบาและทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่าโลหะทั่วไป สายอากาศของไม้ค้ลอยเป็นเพียงสายไฟสั้นๆ หรือสายอากาศของโทรศัพท์มือถือเป็นเพียงจุดเชื่อมต่อเล็กๆ เท่านั้นเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

คำว่าสายอากาศ เป็นศัพท์เฉพาะด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ บัญญัติขึ้นจากคำศัพท์ในภาษาอังกฤษ "Antenna" หรือ "Aerial" ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อาจเขียนอักษรย่อ Ant ในระบบสื่อสารใดๆ เราต้องการให้สัญญาณที่รับได้ปลายทางมีความแรงมากๆ อย่างน้อยที่สุดแรงพอที่จะชนะสัญญาณรบกวนได้และอยู่ในเกณฑ์ที่ความไวของเครื่องรับจะทำงานได้ ความแรงที่สถานีปลายทางจะมีค่าสูงหรือต่ำเพียงใดนั้นขึ้นกับองค์ประกอบที่สำคัญคือ ถ้าเป็นการส่งสัญญาณไปตามสายส่งสัญญาณส่วนมากจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนในสายส่งเนื่องจากความต้านทานของสายส่ง และเนื่องจากฉนวนที่นำมาทำสายส่งไม่เป็นฉนวนที่แท้จริงการสูญเสียของสัญญาณในแผ่กระจายคลื่นออกอากาศคลื่นวิทยุบางส่วนถูกลดทอนกำลังลงในตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านไป การสื่อสารในย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) นั้นต้องอาศัยการสะท้อนคลื่นจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กลับมายังโลก ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวกลางที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีอนุภาคประจุไฟฟ้าบวกและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางไปถึงสะท้อนชั้นบรรยากาศคลื่นบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยชั้นบรรยากาศนั้น การสื่อสารที่ใช้ความถี่สูงมาก (Very High Frequency: VHF) เช่น การติดต่อของหน่วยตำรวจตระเวนชายแดนในป่าการสื่อสารจะไปไม่ได้ไกลทั้งนี้เพราะต้นไม้ใบไม้ในป่าจะ



ดูดกลืนคลื่นวิทยุไว้เป็นส่วนมาก การสื่อสารที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เชื่อมโยงระหว่างสถานีถ่ายทอดทวนสัญญาณการสูญเสียของคลื่นวิทยุ

เนื่องจากบรรยากาศเมื่อดูฝุ่นละอองหรืออนุภาคของออกซิเจนดูดกลืนไว้ การสูญเสียในการแผ่กระจายคลื่นจะคล้ายกับการสูญเสียในสายส่งและยังมีการสูญเสียกำลังส่งเนื่องจากการถ่างออกของรังสีคลื่นวิทยุ โดยการแผ่กระจายคลื่นทุกๆ ครั้งทีระยะห่างเพิ่มเป็นสองเท่า ความเข้มจะลดลง 4 เท่า

### สายอากาศแบ่งตามรูปแบบการรับ-ส่งคลื่น

1. สายอากาศแบบรอบตัว สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีในทุกทิศทางเฉลี่ยกันไปโดยรอบ
2. สายอากาศแบบกึ่งรอบตัว สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีเกือบรอบตัวแต่มีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศแบบรอบตัว
3. สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง สามารถรับ-ส่งคลื่นได้ดีในทิศทางที่กำหนดและจะมีอัตราขยาย (Gain) สูงกว่าประเภทอื่นๆ

อัตราขยาย (Gain) เป็นความสามารถของสายอากาศในการรับ-ส่งคลื่นวิทยุ สายอากาศแต่ละแบบมีอัตราขยายแตกต่างกัน สายอากาศแบบทิศทางเดียวจะมีอัตราการขยายมากกว่าสายอากาศแบบกึ่งรอบตัวและแบบรอบตัว โดยลักษณะการใช้งานจึงแตกต่างกันไป สายอากาศที่มีอัตราขยายสูงจะสามารถรับ-ส่งคลื่นวิทยุได้ดีมาก ซึ่งอัตราขยายมีหน่วยวัดเป็น dBi และ dBd

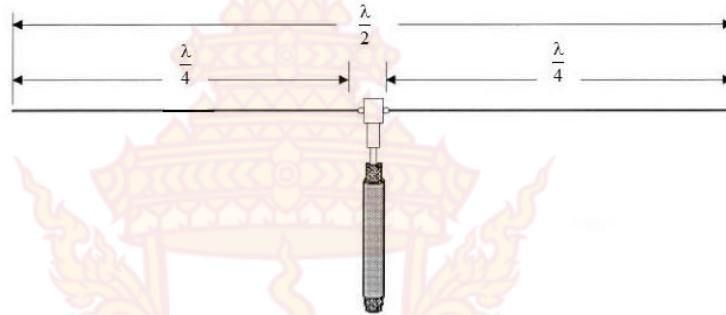
dBi เป็นหน่วยของอัตราขยายของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ตัว i นั้นหมายถึงสายอากาศแบบไอโซโทรปิก เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไดโพล (Dipole) มีอัตราขยายเท่ากับ 2.15 dBi

dBd เป็นหน่วยของอัตราขยายของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบไดโพล (Dipole) ตัว d นั้นหมายถึงสายอากาศแบบไดโพล สายอากาศแบบไดโพล มีอัตราขยายเท่ากับ 0 dB

## 2. สายอากาศไดโพล

สายอากาศไดโพล (Dipole) คำว่า “ไดโพล” นั้นมาจากคำว่า “ได” ซึ่งแปลว่าสองและคำว่า “โพล” แปลว่าขั้ว ดังนั้นคำว่าไดโพลจึงแปลว่า สองขั้ว ซึ่งหมายถึงการเรียงตัวของประจุไฟฟ้าสองประจุที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกันซึ่งประจุทั้งสองวางอยู่ใกล้กัน ซึ่งโมเมนต์ของธาตุดังกล่าวนั้นมีสมบัติเป็นไดโพลไฟฟ้าถาวร ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของประจุที่ไม่ได้สมมาตรภายในโมเมนต์ เช่น โมเมนต์ของน้ำ ซึ่งเราจะเรียกโมเมนต์เหล่านี้ว่าโมเมนต์มีขั้ว ส่วนโมเมนต์บางชนิดจะไม่เป็นไดโพล แต่สามารถกลายเป็นไดโพลได้ในสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเรียกว่าเกิดไดโพลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิด

จากการเรียงตัวของประจุของธาตุในสนามไฟฟ้า โดยที่สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดขั้วกล่าวคือ อิเล็กตรอนในวงโคจรในอะตอมจะเคลื่อนที่สวนทางกับสนามส่วนประจุบวกในนิวเคลียส จะเคลื่อนไปตามทิศของสนามทำให้จุดศูนย์รวมมวลของอิเล็กตรอนแยกออกจากนิวเคลียส ลักษณะของสายอากาศไดโพล ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะของสายอากาศไดโพล

จากภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างสายอากาศแบบไดโพล แขนทั้ง 2 ข้างของตัวสายอากาศจะมีขนาดเท่ากัน โดยจะมีสายอากาศไดโพลแบบ  $\lambda$ ,  $\lambda / 2$ ,  $\lambda / 4$ , และ  $\lambda / 8$  เป็นต้น

การออกแบบสายอากาศไดโพล ที่ความถี่ที่ต้องการมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} \times VF_{Stainless} \quad (1)$$

เมื่อ

- $\lambda$  แทนความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)
- $c$  แทนความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
- $f$  แทนความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
- $VF_{Stainless}$  แทนค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุสแตนเลส (Velocity Factor)

การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศเพราะว่าการแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายหลังจากที่มันได้ออกจากสายอากาศไปแล้วเป็นเรื่องสำคัญอยู่ไม่น้อย ในการสื่อสารวิทยุเราสนใจเป็นพิเศษกับการที่จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แผ่กระจายออกไปในทิศทางหรือให้เดินไปยังบริเวณที่เราต้องการจะให้การสื่อสารด้วย ดังนั้นคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นภายหลังจากที่ได้กระจายออกไปในชั้นบรรยากาศแล้วจึงเป็นเรื่องที่สมควรสนใจอย่างยิ่งทั้งนี้ เพราะคุณสมบัตินั้นมีความหมายอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการรับสัญญาณและการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารนั้น

## 2.1 สายอากาศไดโพลแบบจิว

สายอากาศไดโพลจิวไม่เหมาะที่จะใช้งาน แต่มักจะใช้เป็นส่วนย่อยของสายอากาศที่มีรูปทรงยุ่งยากเช่น ลวดขนาดจิว ( $l_{small} \ll \lambda$ ) เมื่อ  $l_{small}$  เท่ากับความยาวของสายอากาศไดโพลจิว ถูกวางอย่างสมมาตรที่ออริจินระบบโคออดิเนตตามแนวแกน  $Z$  นอกจากจะมีความยาวน้อยมากแล้วยังต้องผอมมากด้วย ซึ่งจะสมมติได้ว่ากระแสที่ไหลในลวดนี้มีค่าคงที่ได้

ในการหาสนามการแผ่กระจายจากไดโพลจิวมี 2 ขั้นตอนคือ หาศักดาเวกเตอร์  $\vec{A}$  และ  $\vec{F}$  จากนั้นจะหาสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  และสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่าง  $E_\theta$  ต่อ  $H_\phi$  เท่ากับ

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} \simeq \eta \quad (2)$$

เมื่อ

$Z_w$  แทนค่าอิมพีแดนซ์คลื่น (wave impedance)

$\eta$  แทนค่าอินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) มีค่า  $377$  โอห์ม  $\simeq 120\pi$  สำหรับตัวกลางที่เป็นอากาศว่าง

องค์ประกอบสนาม  $E$  และ  $H$  จะมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน เคลื่อนที่ขวางแนวรัศมีของการแผ่พลังงานและค่า  $r$  แยกออกจากมุม  $\theta$  และมุม  $\phi$  รูปร่างของแบบรูปจะไม่เป็นฟังก์ชันตามระยะทาง  $r$  และสนามจะเป็นคลื่น TEM (Transverse Electro Magnetic) ซึ่งอิมพีแดนซ์คลื่นจะเท่ากับค่าอินทรินสิคอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นชัดว่าความสัมพันธ์ที่กล่าวมานี้มีประโยชน์มากในการทำสายอากาศที่มีขนาดจำกัดใช้งานในสนามระยะไกล

## 2.2 ความเข้มของสนามไฟฟ้า

ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Radiation intensity) คือความแรงของคลื่นวิทยุนิยมวัดจากค่าระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากคลื่นวิทยุ นั้นหน่วยมาตรฐานที่ใช้วัดความเข้มของสนามไฟฟ้านั้นคือ โวลต์ต่อเมตร แต่ในทางปฏิบัติ นั้นค่าของสนามไฟฟ้ามักจะมีค่าน้อยเราจึงนิยมให้อยู่ในหน่วยวัตต์ต่อเมตร หรือ ไมโครโวลต์ต่อเมตร เมื่อสมมติว่าพื้นที่แหล่งกำเนิดกระจายออกมาจากสายอากาศมีลักษณะเป็นจุดตามทฤษฎีแล้วขึ้นก็แตกกระจายออกไปรอบๆ สายอากาศที่มีลักษณะเป็นจุดนั้นอย่างสม่ำเสมอคล้ายแสงไฟที่กระจายออกไปจากหลอดไฟกลมๆ พลังงานของคลื่นนั้นจะไม่มีการสูญเสียไปหากมันไม่ได้ไปกระทบกับวัตถุ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซึมพลังงานจากมันไปสายอากาศนั้นแตกกระจายระลอกคลื่นในด้านหน้าออกไปเป็นคลื่นหน้าในลักษณะของทรงกลมที่ใกล้เคียงๆ ใหญ่ขึ้น ดังนั้นหน้าคลื่นที่อยู่ใกล้กับสายอากาศก็ย่อมจะมีความเข้มมากกว่าหน้าคลื่นที่อยู่ไกลออกไป ทั้งนี้เพราะว่าพื้นที่ของผิวทรงกลมจะขยายออกมามากขึ้นเมื่อทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้พลังงานของคลื่นตลอดผิวหน้าของทรงกลมนั้นมีค่าเฉลี่ยต่อพื้นที่น้อยลง

$$\text{ความหนาแน่นของกำลังงาน} = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (3)$$

เมื่อ

$P$  แทนค่ากำลังของคลื่นจากสายอากาศหรือแหล่งกำเนิดคลื่น มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

$d$  แทนค่าระยะทางจากจุดกำเนิดคลื่นมายังบริเวณที่ทำการวัดความแรงของคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

## 2.3 ลักษณะของคลื่นฟ้าและคลื่นดิน

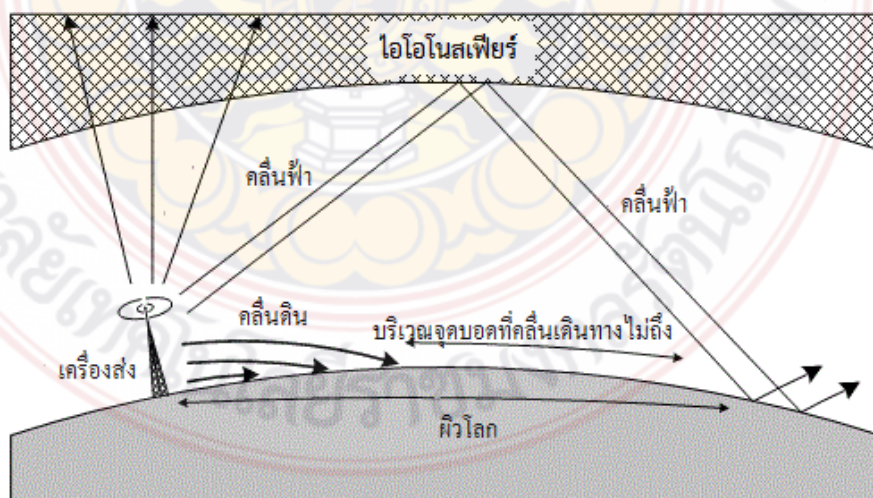
### 2.3.1 คลื่นฟ้า

คลื่นฟ้า (Sky Wave) คือคลื่นที่วิ่งขึ้นไปกระทบบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) แล้วสะท้อนกลับลงมายังผู้รับฟังวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาเรื่องความโค้งของผิวโลกได้สำหรับการส่งกระจายเสียงด้วยคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็ม ซึ่งมีความถี่สูงกว่าจะมีการสะท้อนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้จึงไม่สามารถใช้คลื่นฟ้าได้คงใช้เฉพาะคลื่นดินอย่างเดียว ดังนั้นถ้าต้องการส่งกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็มให้คลุมพื้นที่ไกลๆ จึงต้องมีสถานีถ่ายทอดเป็นระยะๆ และผู้รับฟังต้องตั้งสายอากาศสูงๆ เป็นการแผ่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุที่สะท้อนบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ และสะท้อนกลับมายังผิวโลก

การกระจายคลื่นชนิดนี้จะมีอิทธิพลต่อการแผ่กระจายคลื่นในย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) ซึ่งจะสะท้อนในชั้นนี้จะทำให้ได้ระยะทางการติดต่อได้ไกลมาก โดยที่การเดินทางของคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงคือ การเดินทางโดยการสะท้อนชั้นบรรยากาศเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องพิจารณาถึงชั้นบรรยากาศต่างๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์

### 2.3.2 คลื่นดิน

คลื่นดิน (Ground Wave) คือคลื่นที่เดินตามไปยังผิวโลกอาจเป็นผิวดินหรือผิวน้ำ พิสัยของการกระจายคลื่นชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าความนำทางไฟฟ้าของผิวที่คลื่นนี้เดินทางผ่านไป เพราะค่าความนำจะเป็นตัวกำหนดการดูดกลืนพลังงานของคลื่นผิวโลก การดูดกลืนของคลื่นผิวน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้นเป็นคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศโดยผิวพื้นดินเป็นสื่อนำคลื่นผิวดินจะมีขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสายอากาศของเครื่องส่งจะต้องอยู่ใกล้ชิดกับพื้นดิน ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความถี่ในย่านความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency: VLF) ความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) และความถี่ปานกลาง (Medium Frequency: MF) การแผ่กระจายคลื่นชนิดนี้สามารถแผ่กระจายได้ระยะทางไกลมาก ส่วนย่านความถี่สูงมาก (Very High Frequency: VHF) และความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) ก็สามารที่จะแผ่กระจายคลื่นชนิดนี้ได้เช่นกัน แต่ระยะทางติดต่อไม่ไกลนัก เพราะค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพื้นดินจะมีผลต่อความถี่สูงๆ เป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไปในพื้นดินนั่นคือ เมื่อคลื่นแผ่ผ่านผิวดินไปเส้นแรงของสนามไฟฟ้าของคลื่นจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนดิน ทำให้เกิดกระแสไหลในดินขึ้นและเนื่องจากพื้นดินไม่ใช่เป็นตัวนำสมบูรณ์แบบทำให้มีความต้านทานเกิดขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียกำลัง



ภาพที่ 2 การเดินทางของคลื่นฟ้าและคลื่นดิน

จากภาพที่ 2 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นดิน คลื่นฟ้า ที่เดินทางในอากาศ ลักษณะการสะท้อนของคลื่นที่ตกกระทบผิวดินและชั้นไอโอโนสเฟียร์

## 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) หรือแบบรูปสายอากาศ (Antenna Pattern) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “แพทเทิร์น” ถูกนิยามไว้ว่าเป็น ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือรูปภาพที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันพิกัดระยะห่าง (Space coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปจะได้รับการคำนวณและแสดงค่าที่สนามระยะไกลในรูปแบบของฟังก์ชันทิศทาง คุณสมบัติของแบบรูป ประกอบด้วยความหนาแน่นของฟลักซ์กำลัง (Power flux density) ความเข้มการแผ่พลังงาน (Radiation intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) เฟสหรือโพลาไรเซชัน (Phase or polarization) คุณสมบัติของรูปแบบที่ใช้พิจารณา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปการกระจายสองหรือสามมิติในอวกาศของพลังงาน การแผ่กระจายเทียบกับฟังก์ชันจากตำแหน่งของผู้สังเกตไปตามเส้นทางหรือผิวของรัศมีคงที่ ในที่นี้จะใช้พิกัดตามภาพที่ 3 ซึ่งแสดงเส้นวาดของสนามไฟฟ้า (แม่เหล็ก) ของการรับที่รัศมีคงที่ซึ่งจะเรียกว่า แบบรูปสนามเชิงขนาด (Amplitude Field Pattern) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ กราฟของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกำลังงานตามแนวรัศมีคงที่ซึ่งเรียกว่า “แบบรูปกำลังเชิงขนาด (Amplitude Power Pattern)” จากภาพที่ 3 แสดงภาพตัดภายในของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น



ภาพที่ 3 แบบรูปการแผ่พลังงาน

บริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ บริเวณสนามรีแอกทีฟ ระยะใกล้ (Reactive-near field region) บริเวณสนามแผ่พลังงานระยะใกล้ (Radiating-near field or Fresnel region) และบริเวณสนามแผ่พลังงานระยะไกล (Far field region) ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยบริเวณสนามเหล่านี้ถูกกำหนดเพื่อใช้ในการระบุลักษณะรูปร่างของสนามในแต่ละบริเวณ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในรูปแบบของสนามแต่เมื่อข้ามจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งแต่สนามดังกล่าวจะมีข้อที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

#### 2.4.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-near field region) หมายถึงสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดหรือจุดที่กระจายสัญญาณได้รอบทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเรายืนใกล้ลำโพงที่มีกำลังวัตต์มากๆ เราจะไม่สามารถแยกได้ว่าด้านไหนเป็นด้านหน้าลำโพง และตรงบริเวณนี้จะมีสนามชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งบริเวณนี้จะมีระยะทางจากผิวของสายอากาศด้วย

#### 2.4.2 บริเวณสนามพลังงานระยะใกล้

บริเวณสนามแผ่พลังงานระยะใกล้ (Radiating near-field or Fresnel region) เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟกับสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายสัญญาณของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น สมการในการหาพื้นที่บริเวณสนามพลังงานระยะใกล้ดังนี้

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (4)$$

เมื่อ

$R_1$	แทนค่าระยะบริเวณสนามรีแอกทีฟ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$D$	แทนค่ามิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$\lambda$	แทนค่าความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

### 2.4.3 บริเวณสนามพลังงานระยะไกล (Far field region)

บริเวณสนามพลังงานระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแผ่กระจายของสนามเชิงมุมต่างๆ ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $2D^2 / \lambda$  จากสายอากาศ ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse field) ค่าสนาม  $E$  จะตั้งฉากกับสนาม  $H$  และการแผ่พลังงานของสนามเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในสนามบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $2D^2 / \lambda$  และขอบนอกอยู่ที่อนันต์ (Infinity) ใช้สมการในการหาพื้นที่บริเวณสนามระยะไกลดังนี้

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

เมื่อ

$R_2$	แทนค่าระยะบริเวณสนามรีแอกทีฟ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$D$	แทนค่ามิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$\lambda$	แทนค่าความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)



ภาพที่ 4 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

จากภาพที่ 4 แสดงระยะของบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้, บริเวณสนามพลังงานระยะไกล, บริเวณสนามพลังงานระยะไกลของสายอากาศ



## 2.5 สภาพเจาะจงทิศทางหรือไดเรกทิวิตี้

สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางนั้นจากสายอากาศต่อความเข้มของการแผ่พลังงานเฉลี่ยในทุกทิศทาง ความเข้มของการแผ่พลังงานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับกำลังงานทั้งหมด โดยสายอากาศหารด้วย  $4\pi$  ถ้าไม่กำหนดทิศทางจะหมายถึงทิศทางของความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุดคือ ทิศทางของค่าสภาพเจาะจงทิศทางหรือกล่าวง่าย ๆ ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของต้นกำเนิดสายอากาศที่ไม่ใช่ไอโซทรอปิก (Non-isotropic) จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางนั้น ๆ ต่อความเข้มของการแผ่พลังงานของแหล่งจ่ายไอโซทรอปิก เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้สมการที่ 5

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (6)$$

ถ้าทิศทางไม่ได้ถูกกำหนดเฉพาะเจาะจงจะหมายถึง ทิศทางของความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุด (สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด) แสดงได้ดังนี้

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (7)$$

เมื่อ

$D$

แทนค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ไม่มีหน่วย

$U$

แทนค่าความเข้มของการแผ่พลังงาน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหน่วยมุมตัน

$D_0$

แทนค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ไม่มีหน่วย

$U_0$

แทนค่าความเข้มของการแผ่พลังงานของแหล่งจ่ายไอโซทรอปิก มีหน่วยเป็น

วัตต์ต่อหน่วยมุม

$U_{max}$

แทนค่าของความเข้มสูงสุดของการแผ่พลังงาน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหน่วยมุม

ตัน

$P_{rad}$

แทนค่ากำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด มีหน่วยเป็นวัตต์

สำหรับสายอากาศที่มีองค์ประกอบโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกัน เราจะนิยามสภาพเจาะจงทิศทางบางส่วนของสายอากาศสำหรับโพลาริเซชันที่กำหนด ในทิศทางที่กำหนดให้ว่าเป็นส่วนของความเข้มการแผ่พลังงาน ลักษณะเดียวกันในทิศทางที่กำหนดให้หารด้วยความเข้มการแผ่พลังงานรวมเฉลี่ยในทุกทิศทาง สำหรับนิยามที่กล่าวมานี้สำหรับสภาพเจาะจงทิศทางบางส่วนในทิศทางที่กำหนดให้สภาพเจาะจงทิศทางรวมคือ ผลรวมของสภาพเจาะจงทิศทางบางส่วนสำหรับสองโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกันสำหรับระบบโคออดิเนตทรงกลม สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดรวม  $D_0$  สำหรับองค์ประกอบตั้งฉาก  $\theta$  และ  $\phi$  ของสายอากาศสามารถเขียนดังนี้

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (8)$$

เมื่อสภาพเจาะจงทิศทางบางส่วน  $D_\theta$  และ  $D_\phi$  แสดงได้ดังนี้

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{P_{rad\ \theta} + P_{rad\ \phi}} \quad (9)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{P_{rad\ \theta} + P_{rad\ \phi}} \quad (10)$$

เมื่อ

$U_\theta$  แทนค่าความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $\theta$

$U_\phi$  แทนค่าความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $\phi$

$(P_{rad})_\theta$  แทนค่ากำลังการแผ่พลังงานในทุกทิศทางที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $\theta$

$(P_{rad})_\phi$  แทนค่ากำลังการแผ่พลังงานในทุกทิศทางที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $\phi$

## 2.6 ประสิทธิภาพสายอากาศ

ประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของสายอากาศ  $e_t$  โดยเรากำลังถึงค่าสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วอินพุตและภายในโครงสร้างของสายอากาศโดยการสูญเสียต่างๆ อาจเนื่องมาจาก

1. การสะท้อนเนื่องจากความไม่แมตช์ (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ
2. การสูญเสียทั้งในตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพรวมทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (11)$$

เมื่อ

$e_t$	แทนประสิทธิภาพรวม ไม่มีหน่วย
$e_r$	แทนประสิทธิภาพการสะท้อน $(1 -  \Gamma ^2)$ ไม่มีหน่วย
$e_c$	แทนประสิทธิภาพตัวนำ ไม่มีหน่วย
$e_d$	แทนประสิทธิภาพของไดอิเล็กตริก ไม่มีหน่วย
$\Gamma$	แทนสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ $(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)$
$Z_{in}$	แทนอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
$Z_0$	แทนอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

โดยปกติค่า  $e_c$  และ  $e_d$  ยากต่อการคำนวณหา ส่วนใหญ่จะหาได้จากการทดลองแต่ถึงกระนั้นการแยกค่า  $e_c$  ออกจากค่าของ  $e_d$  ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \quad (12)$$

เมื่อ  $e_{cd} = e_c e_d$  คือประสิทธิภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศซึ่งจะสัมพันธ์กับสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยาย

## 2.7 อัตราขยาย

สิ่งหนึ่งจากการวัดที่อธิบายประสิทธิภาพของสายอากาศคือ อัตราขยายหรือเกน (Gain) ถึงแม้ว่าอัตราขยายจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง แต่มันเป็นค่าที่ได้จากการวัดซึ่งใช้บอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้เป็นอย่างดี อัตราขยายของสายอากาศจะวัดคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของรูปแบบและรวมประสิทธิภาพของสายอากาศรวมเข้าด้วยกัน ในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของรูปแบบสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศ ในทิศทางที่ถูกกำหนดถูกนิยามว่า เป็นอัตราส่วนของความเข้มในทิศทางที่กำหนดต่อความเข้มการแผ่พลังงานที่ได้รับจากสายอากาศที่เป็นไอโซทรอปิก กำลังแผ่พลังงานของไอโซทรอปิกที่ให้ความเข้มการแผ่พลังงานมีค่าเท่ากับกำลังที่ได้รับ (อินพุต) ด้วยสายอากาศหารด้วย  $4\pi$  สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$P_r = P_t + \ell_t + \ell_r + G_t + G_r + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right) \quad (13)$$

เมื่อ

$P_r$	แทนกำลังงานที่รับค่าได้ (dBm)
$P_t$	แทนกำลังงานที่ส่งออก (dBm)
$\ell_t$	แทนค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณ (dB)
$\ell_r$	แทนค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณ (dB)
$G_t$	แทนอัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง (dBi)
$G_r$	แทนอัตราขยายของสายอากาศตัวรับ (dBi)
$20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)$	แทนค่าสูญเสียในอากาศ (dB)

โดยทั่วไปแล้วเรามักจะกล่าวถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain) ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากันสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นแหล่งจ่ายไอโซทรอปิก (ปกติใช้บอกเป็นหน่วย dBi) สายอากาศไดโพล (ปกติใช้บอกเป็นหน่วย dBd) สายอากาศปากแตร (Horn Antenna) หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายได้

ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นแหล่งจ่ายไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย

## 2.8 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสายอากาศถูกนิยามว่าเป็นช่วงของความถี่ซึ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศในคุณลักษณะบางอย่างที่สนใจเพื่อให้ใช้ได้กับมาตรฐาน แบนด์วิดท์อาจจะพิจารณาเป็นช่วงของความถี่หรือความกว้างแต่ละด้านที่ความถี่กลาง โดยทั่วไปจะใช้ความถี่เรโซแนนซ์เมื่อคุณลักษณะของสายอากาศเช่น อินพุตอิมพีแดนซ์ รูปแบบโพลาริเซชัน อัตราขยาย ทิศทางปริม ประสิทธิภาพการแผ่พลังงานมีค่าใช้ได้ในช่วงที่พิจารณา สำหรับสายอากาศบรอดแบนด์ แบนด์วิดท์ส่วนใหญ่จะแสดงในรูปของอัตราส่วนของความถี่ด้านสูงต่อความถี่ด้านต่ำในช่วงที่ใช้งานได้ ตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10:1 หมายความว่า ความถี่ด้านสูงมีค่าเป็นสิบเท่าของความถี่ด้านต่ำ เช่น แบนด์วิดท์อยู่ในช่วง 1-10 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ส่วนสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์แคบ ส่วนใหญ่จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ของผลต่างของความถี่ ความถี่ด้านสูงลบความถี่ด้านต่ำต่อความถี่กลาง ตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าผลต่างของความถี่ที่ใช้งานต่อความถี่กลางเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ เช่น แบนด์วิดท์อยู่ในช่วง 1.0-1.0526 กิกะเฮิรตซ์ (GHz)

เพราะว่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ อินพุตอิมพีแดนซ์ รูปแบบโพลาริเซชัน อัตราขยาย ทิศทางปริม ประสิทธิภาพการแผ่พลังงาน ไม่จำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่เหมือนกันตลอดช่วงแบนด์วิดท์หรืออาจจะมีบางช่วงที่ไม่ดี ดังนั้นคุณลักษณะของแบนด์วิดท์จะมีค่าไม่เหมือนกันตลอดช่วงคุณสมบัติที่ต้องการคือ เซ็ตของความถี่ที่ต้องการที่จะประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ โดยที่เห็นเด่นชัดจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของรูปแบบและอินพุตอิมพีแดนซ์ ดังนั้นจึงแบ่งแบนด์วิดท์ออกเป็น 2 แบบหลักคือ แบนด์วิดท์แบบรูป (Pattern bandwidth) และแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ (Impedance bandwidth) แบนด์วิดท์แบบรูปจะเกี่ยวข้องกับอัตราขยาย ระดับพหุคูณด้านข้าง ปีมวิทท์ โพลาริเซชันและทิศทางของพู่ ขณะที่อินพุตอิมพีแดนซ์และประสิทธิภาพการแผ่พลังงานจะเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ ตัวอย่างเช่น แบบรูปของสายอากาศไดโพลเชิงเส้นที่มีความยาวรวมไม่เกินครึ่งความยาวคลื่น  $l < \lambda/2$  ซึ่งไม่ขึ้นกับความถี่ ตัวแปรที่สำคัญที่จำกัดของสายอากาศชนิดนี้คืออิมพีแดนซ์ของมัน โดยอิมพีแดนซ์ของมันจะอยู่ในรูปของ  $Q$  (resonant frequency bandwidth) ซึ่งค่า  $Q$  ของสายอากาศหรืออาร์เรย์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นไม่รวมการออกแบบ Super directive จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ดังนั้นแบนด์วิดท์จะอยู่ในรูปของปีมวิทท์ระดับพหุคูณด้านข้าง และ

คุณลักษณะของแบบรูปสำหรับสายอากาศที่มีความยาวระดับกลางแบนด์วิดท์จะถูกจำกัดด้วยรูปแบบหรืออิมพีแดนซ์ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละแบบ โดยสายอากาศเหล่านี้มีแบนด์วิดท์ประมาณ 2:1 ก็ถือว่าออกแบบได้ดี นอกจากนี้สายอากาศบางอย่างยังมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากๆ (อาจจะ 40:1 หรือมากกว่า) ซึ่งจะรู้จักสายอากาศเหล่านี้ในชื่อ สายอากาศที่ไม่ขึ้นกับความถี่ (Frequency Independent Antenna)

จากที่กล่าวข้างต้นไม่ได้รวมผลของโครงข่ายการคัปปลิง (Coupling network) ตัวอย่างเช่น ตัวแปลง (Transformer) บาลัน (Balun) ซึ่งจะทำให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปได้อย่างไรเราสามารถเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์แคบให้มีความกว้างมากขึ้นโดยการเลือกโครงข่ายการคัปปลิงที่เหมาะสมกับสายอากาศอาจจะไม่ง่ายที่จะทำได้แต่ก็เป็นไปได้ที่จะทำให้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างสายอากาศที่เห็นคือ สายอากาศของรถยนต์ และสายอากาศหุกระต่ายที่ใช้กับเครื่องรับโทรทัศน์ โดยใช้การปรับความยาวของสายอากาศรวมทั้งทิศทางซึ่งจะให้การรับดีขึ้น สมการหาแบนด์วิดท์มีดังนี้

$$f_m = \sqrt{f_L \times f_U} \quad (14)$$

เมื่อ

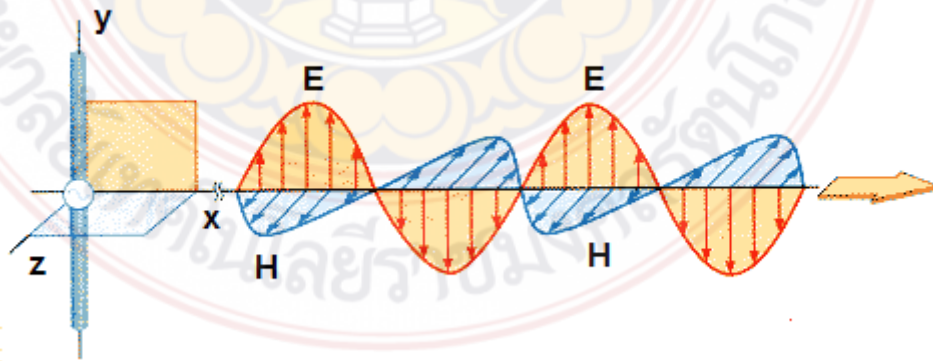
$f_m$	แทนค่าเฉลี่ยของความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
$f_L$	แทนค่าความถี่ที่ต่ำที่สุด มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
$f_U$	แทนค่าความถี่ที่สูงที่สุด มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

## 2.9 โพลาริเซชัน

โพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศในทิศทางที่ถูกกำหนดถูกนิยามว่า โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศตัวส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น (เมื่อสายอากาศเป็นตัวรับ) จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะมีค่าแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดโพลาไรเซชันแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization) และโพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization) ซึ่งแต่ละแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดแควเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าแควเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศ ซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่า โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนแบบวงรีจะเรียกสนามแบบนี้ว่า เป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี ทั้งโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นและโพลาไรเซชันแบบวงกลมต่างก็เป็นหนึ่งในกรณีของโพลาไรเซชันแบบวงรี โดยถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา จะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันมือขวา (Right-hand Polarization: RP) ในขณะที่ถ้าหากสนามไฟฟ้าเกิดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CCW) จะเป็นโพลาไรเซชันมือซ้าย (Left-hand polarization: LP)

โดยทั่วไป คุณลักษณะของโพลาไรเซชันของสายอากาศจะแสดงด้วยแบบรูปโพลาไรเซชัน ซึ่งถูกนิยามว่าเป็น การกระจายโพลาไรเซชันในอวกาศของแควเตอร์สนามของการแผ่พลังงานจากสายอากาศบนทรงกลมการแผ่พลังงานเมื่ออธิบายโพลาไรเซชันบนทรงกลมการแผ่พลังงาน จะมีเส้นอ้างอิงบนทรงกลมเพื่อที่จะใช้วัดมุมเอียง (Tilt) ของโพลาไรเซชันแบบวงรีและทิศทางของโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น โดยที่นิยมใช้กันคือระบบโคออดิเนตทรงกลมที่ใช้มุม  $\phi$  กับ  $\theta$  ในการระบุถึงเส้นอ้างอิงที่จุดใดๆ บนทรงกลมการแผ่พลังงาน โพลาไรเซชันจะแบ่งออกเป็นสองโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกันคือ โพลาไรเซชันตาม (Co-polarization) และโพลาไรเซชันไขว้ (Cross-polarization) โดยโพลาไรเซชันตามแสดงถึงโพลาไรเซชันของสายอากาศที่ตรงกับโพลาไรเซชันในการจะส่ง (รับ) ขณะที่โพลาไรเซชันแบบไขว้จะแสดงถึงโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกับโพลาไรเซชันที่ต้องการ (กำหนด) โดยปกติโพลาไรเซชันที่ต้องการหมายถึงโพลาไรเซชันตาม จากภาพที่ 5 แสดงการเดินทางของคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 5 ลักษณะของโพลาไรเซชัน

## 2.10 อินพุตอิมพีแดนซ์

อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ถูกนิยามว่า “เป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่จุดเชื่อมต่อหรืออัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสที่จุดเชื่อมต่อหรืออัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดจุดหนึ่ง” อินพุตอิมพีแดนซ์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศในเบื้องต้น

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (15)$$

เมื่อ

$Z_A$	แทนอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศ มีหน่วยเป็นโอห์ม
$R_A$	แทนความต้านทานที่ขั้วของสายอากาศ มีหน่วยเป็นโอห์ม
$X_A$	แทนค่ารีแอกแตนซ์ที่ขั้วของสายอากาศ มีหน่วยเป็นโอห์ม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานจะประกอบด้วยสองส่วนดังนี้

$$R_A = R_r + R_{Loss} \quad (16)$$

เมื่อ

$R_r$	แทนความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation resistance) ของสายอากาศ
$R_{Loss}$	แทนความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

## 2.11 ประสิทธิภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) ซึ่งคำนวณจากการสูญเสียของการสะท้อน (ไม่แมตซ์) จากตัวนำและจากไดโพลเล็กตริก ซึ่งอธิบายไว้ใน การคำนวณค่าการสูญเสียที่เกิดจากตัวนำและไดโพลเล็กตริกเป็นเรื่องที่ค่อนข้างลำบาก ดังนั้นการสูญเสียจะได้ผลจากการวัดมากกว่าในทำนองเดียวกันผลจากการวัดก็เป็นเรื่องที่ยากที่จะแยกแยะระหว่างการสูญเสียของตัวนำและไดโพลเล็กตริก ดังนั้นค่าที่ได้จากวัดและแสดงจะอยู่ในรูปของการสูญเสียรวมของทั้งสองโดยแสดงในรูปของประสิทธิภาพการสูญเสียรวมทั้งตัวนำและไดโพลเล็กตริก  $e_{cd}$  และแสดงให้อยู่ในรูปของลัมป์ตัวเดียวกัน



$R_L$  ประสิทธิภาพการสูญเสียรวมทั้งตัวนำและไดอิเล็กตริก  $e_{cd}$  ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่ถูกจ่ายไปยังค่าความต้านทานในการแผ่พลังงาน เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_{Loss}} \quad (17)$$

สำหรับโลหะเส้นที่มีความยาว  $\ell_{steel}$  และมีหน้าตัดเท่ากันตลอดเส้นเป็น  $A$  ดังนั้นความต้านทานสามารถหาได้จาก

$$R_{dc} = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell_{steel}}{A} \quad (18)$$

เมื่อ

$R_{dc}$	แทนความต้านทานของโลหะเส้น มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )
$\ell_{steel}$	แทนความยาวโลหะเส้น มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$\sigma$	แทนสภาพความนำของโลหะ มีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเมตร ( $S/m$ )
$A$	แทนหน้าตัดโลหะเส้น มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ถ้าความลึกผิว (Skin depth)  $\delta \left[ \delta = \sqrt{\omega \mu_o \sigma} \right]$  ของโลหะมีขนาดเล็กเปรียบเทียบกับเส้นทแยงมุมที่เล็กที่สุดของขนาดของเส้นลวด กระแสจะวิ่งอยู่ในบริเวณที่จำกัดใกล้ๆ ที่ผิวของโลหะ ดังนั้นความต้านทานที่ความถี่สูง ( $R_{hf}$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_{hf} = \frac{t}{p_1} R_s = \frac{t}{p_1} \sqrt{\frac{\omega \mu_o}{20}} \quad (19)$$

เมื่อ

$p_1$	แทนเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด ( $p_1 = C = 2\pi b$ ) เส้นลวดวงกลมรัศมี $b$
$R_s$	แทนความต้านทานที่ผิวตัวนำ

$\omega$	แทนความถี่เชิงมุม
$\mu_0$	แทนสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กในอวกาศ
$\sigma$	แทนสภาพความนำของโลหะ มีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเมตร ( $S/m$ )

## 2.12 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง ( $VSWR$ ) คืออัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณแรงดันที่โหลดว่าผิดไปจากสภาวะที่โหลดแมตซ์ ทั้งนี้ ค่า  $VSWR$  ในสภาวะต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า  $VSWR$  ในสภาวะต่างๆ

$VSWR$	ค่ากำลังงานของคลื่นที่ส่งต่อให้ตัวโหลดเป็นเปอร์เซ็นต์	ข้อเสนอแนะ
1:1	100	เป็นค่าในอุดมคติ ซึ่งทำไม่ได้ในทางปฏิบัติ เพราะในทางปฏิบัติต้องมีค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ
1.05:1	99.93	ดีมากในทางปฏิบัติยากที่จะทำให้ดีกว่านี้ได้
1.1:1	99.78	ดี
1.2:1	99	ดีพอใช้
1.5:1	96	ดีพอใช้ได้ แต่ต้องควรปรับปรุงให้มีค่า $SWR$ ให้น้อยกว่านี้
2:1	88	พอใช้ได้แต่ต้องควรปรับปรุงอย่างยิ่ง
3:1	75	ไม่เป็นที่ยอมรับ เพราะมีพลังงานสะท้อนกลับมากถึง 25 %

ตัวอย่างเช่น  $VSWR = 1$  หมายความว่าคลื่นสม่ำเสมอตลอดสาย ซึ่งเป็นสภาวะที่โหลดแมตซ์พอดี  $VSWR = \infty$  เมื่อโหลด ( $R_L$ ) เปิดวงจรหรือลัดวงจร เราสามารถคำนวณค่า  $VSWR$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (20)$$

เมื่อ

$\Gamma$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

$VSWR$  แทนอัตราแรงดันต่อคลื่นนิ่ง

### 2.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) คืออัตราส่วนของปริมาณสัญญาณที่สะท้อนกลับจากสายนำสัญญาณไปสู่พอร์ต ซึ่งในสายนำสัญญาณจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับอยู่ทุกสายนำสัญญาณจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของสายนำสัญญาณที่ใช้งาน มีสมการในการคำนวณหาค่าดังนี้

$$R_L(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r} \quad (21)$$

เมื่อ

$R_L$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ มีหน่วยเป็น dB

$P_i$  แทนค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุต

$P_r$  แทนค่ากำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

หรือ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (22)$$

เมื่อ

$\Gamma$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

$Z_L$  แทนอิมพีแดนซ์ของโหลด มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

$Z_0$  แทนอิมพีแดนซ์ประจำสายนำสัญญาณ มีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

### 2.14 ดัมมี่โหลด

ดัมมี่โหลด (Dummy Load) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันเนื่องจากอุปกรณ์ตัวนี้เราใช้เมื่อต้องการวัดกำลังส่งของเครื่อง โดยไม่ต้องการให้คลื่นแผ่กระจายออกไปภายนอกในทางปฏิบัติเรา

พยายามสร้างหรือจัดหาดัมมี่โหลด (Dummy Load) ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงความต้านทานบริสุทธิ์ให้มากที่สุดที่ย่านความถี่ต้องใช้งาน และเราสามารถได้ประโยชน์จากดัมมี่โหลดได้หลายอย่างเช่น กำลังส่งของเครื่อง ใช้แทนสายอากาศเมื่อเราต้องการจะพ่วงสายอากาศเข้าด้วยกันเช่น การ Bay หรือ Stack สายอากาศยาก็ที่แต่ละต้นเราแมตซ์ได้แล้ว

หลักการก็คือ การนำอุปกรณ์ประเภทตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศหรือเอาต์พุตของเครื่องมือสื่อสาร เพื่อเป็นโหลดที่มีค่าค่าสัมพันธ์การสะท้อนกลับมีค่าเป็น 1:1 แต่ในทางปฏิบัติยอมมีค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อยและจะใช้ตัวต้านทานตัวเดียวดังรูป อาจจะหาค่า 50 โอห์ม และทนกำลังวัตต์สูงๆ ได้ยาก จึงแนะนำให้ใช้ตัวต้านทานจำนวนหลายๆ ตัวมาต่อขนานกัน โดยค่าของแต่ละตัว เมื่อนำมาขนานกันแล้วต้องได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 50 โอห์ม



ภาพที่ 6 ดัมมี่โหลด

ภาพที่ 6 ดัมมี่โหลดซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้แทนโหลด ซึ่งดัมมี่โหลดมีค่าความต้านทาน 50 โอห์ม สามารถรับกำลังได้ตั้งแต่ 50 วัตต์, 100 วัตต์, 500 วัตต์ และ 1000 วัตต์ เป็นต้น

### 2.15 คอนเนคเตอร์

คอนเนคเตอร์ (Connectors) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อสายนำสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ ในคอนเนคเตอร์แต่ละขนาดแต่ละเบอร์จะมีค่าการสูญเสียและรับกำลังงานได้มากน้อยไม่เท่ากัน จากภาพที่ 7 เป็นหัวคอนเนคเตอร์แบบตัวผู้ สำหรับสายเบอร์ RG-8

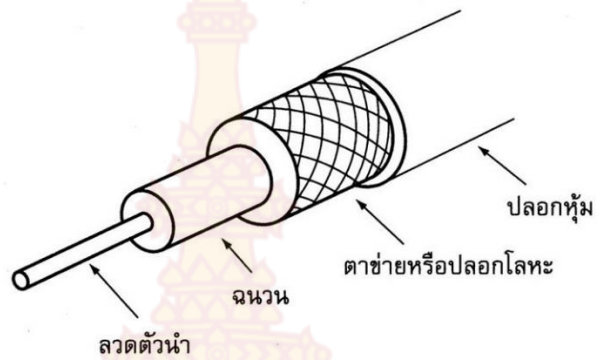


ภาพที่ 7 คอนเนคเตอร์

## 2.16 สายโคแอกเชียล

สายโคแอกเชียล (coaxial) เป็นสายซึ่งถูกพัฒนามากจากสายเคเบิลธรรมดา ทั้งนี้สายเคเบิลที่ใช้เป็นคู่นั้นจะถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างของสายเคเบิลขึ้น โดยการทำสายๆ หนึ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหุ้มสายอีกหนึ่งที่เป็นคู่อื่นๆ ไว้ภายใน เพราะเหตุที่โครงสร้างของสายเคเบิลตามลักษณะที่มีแกนร่วมกัน ดังนั้นสายเคเบิลแบบนี้ถึงเรียกว่าสายโคแอกเชียลซึ่งแปลตรงตัวว่าสายที่มีแกนร่วม ส่วนทรงกระบอกที่เป็นสายด้านนอกจะทำการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกไม่ให้เล็ดลอดเข้าไปเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนที่แกนในสายได้เพราะฉะนั้นโดยปกติแล้วในการใช้งานจึงนิยมใช้สายนอกเป็นสายกราวด์ และใช้เป็นสายสัญญาณในการป้องกันสัญญาณรบกวนดังกล่าว

สายนอกซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกนั้นนอกจากจะป้องกันสัญญาณรบกวนแล้วยังช่วยลดการสูญเสียของสัญญาณ อันเนื่องมาจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของสัญญาณได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าสายโคแอกเชียลจะมีโครงสร้างทางกายภาพต่างไปจากสายเคเบิลธรรมดา แต่คุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นยังคงเหมือนกับสายเคเบิลธรรมดา ปกติโครงสร้างสายโคแอกเชียลจะทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของสายมากกว่าสายเคเบิลธรรมดา ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ประจำของสายโคแอกเชียลจึงมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ประจำของสายส่งสัญญาณที่เป็นเคเบิลแบบคู่ขนานธรรมดาโครงสร้างภายใน



ภาพที่ 8 โครงสร้างภายในสายโคแอกเชียล

จากภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างภายในของสายโคแอกเชียล ชั้นนอกสุดเป็นปลอกหุ้ม ตามด้วยตาข่าย ฉนวน และขดลวดตัวนำ

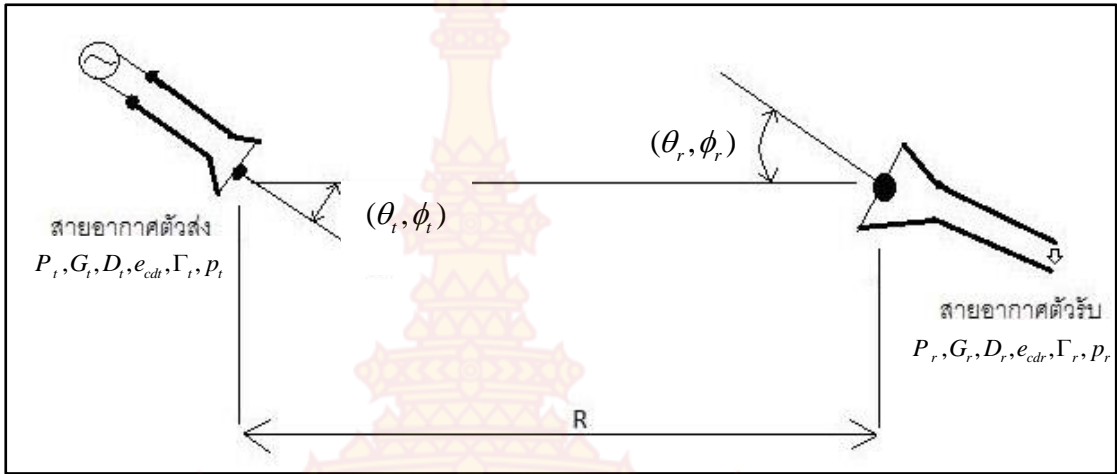
### 2.16.1 สมการการส่งผ่านของฟรีส

สมการการส่งผ่านของฟรีส เป็นความสัมพันธ์ของกำลังที่รับได้กับกำลังที่ใช้ส่งระหว่างสายอากาศสองตัวระยะทาง  $R > 2D^2 / \lambda$  เมื่อ  $D$  คือ ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศอย่างใดอย่างหนึ่งในสองตัว จากภาพที่ 9 ถ้าสมมติว่าสายอากาศส่งเป็นไอโซทรอปิก ถ้ากำลังที่อินพุตที่หัวของสายอากาศส่งมีค่าเป็น  $P_t$  ดังนั้นความหนาแน่นของกำลังงานไอโซทรอปิก  $W_0$  ที่ระยะทาง  $R$  ของสายอากาศคือ

$$W_0 = e_t \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (23)$$

เมื่อ  $e_t$  คือประสิทธิภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวส่ง สำหรับสายอากาศตัวส่งที่ไม่เป็นไอโซทรอปิกความหนาแน่นกำลังงานจากสมการที่ 22 ในทิศทาง  $\theta_t$  และ  $\phi_t$  สามารถเขียนได้เป็น

$$W_t = \frac{P_t G_t \theta_t \phi_t}{4\pi R^2} = e_t \frac{P_t D_t \theta_t \phi_t}{4\pi R^2} \quad (24)$$



ภาพที่ 9 การจัดวางของสายอากาศตัวส่งและรับสำหรับสมการของฟรีส

เมื่อ  $G_t$   $\theta_t \phi_t$  คืออัตราขยายและ  $D_t$   $\theta_t \phi_t$  คือสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศส่งในทิศทาง  $\theta_t$  และ  $\phi_t$  เนื่องจากพื้นที่ประสิทธิผล  $A_r$  ของสายอากาศรับสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของสายอากาศตัวส่ง  $e_r$  และสภาพเจาะจงทิศทาง  $D_r$  โดย

$$A_r = e_r D_r \theta_r \phi_r \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \quad (25)$$

กำลังงานรับรวม  $P_r$  ที่ได้รับที่สายอากาศตัวรับคือ

$$P_r = e_r D_r \theta_r \phi_r \frac{\lambda^2}{4\pi} W_t = e_t e_r \frac{\lambda^2 D_t \theta_t \phi_t D_r \theta_r \phi_r P_t}{4\pi R^2} \left| \frac{P_t}{P_t} \cdot \frac{P_r}{P_r} \right|^2 \quad (26)$$

หรืออัตราส่วนของกำลังงานที่รับได้ต่อกำลังงานอินพุต

$$\frac{P_r}{P_t} = e_t e_r \frac{\lambda^2 D_t \theta_t \phi_t D_r \theta_r \phi_r}{4\pi R^2} \quad (27)$$

กำลังงานที่รับได้จากสมการที่ 26 โดยสมมติว่าสายอากาศตัวส่งและตัวรับแมตซ์กับสายส่ง (สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเท่ากับหนึ่ง) และโพลาริเซชันของคลื่นที่เข้ามากระทบกับสายอากาศแมตซ์กัน (ตัวประกอบการสูญเสียโพลาริเซชันและประสิทธิภาพโพลาริเซชันเท่ากับหนึ่ง) แต่ถ้ารวมตัวประกอบทั้งสองเข้าไปยังสมการ อัตราส่วนของกำลังงานที่รับได้ต่อกำลังอินพุตของสมการที่ 26 แสดงได้เป็น

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} e_{cdr} \left(1 - |\Gamma_t|^2\right) \left(1 - |\Gamma_r|^2\right) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_t \theta_t, \phi_t D_r \theta_r, \phi_r \left|\overline{p_t} \cdot \overline{p_r}\right|^2 \quad (28)$$

สำหรับสายอากาศที่เกิดการแมตซ์ทั้งการสะท้อนและโพลาริเซชันจะเกิดอัตราขยายสูงสุด ดังนั้นสมการที่ 26 จะลดเหลือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_{ot} G_{or} \quad (29)$$

สมการที่ 26, 27 และ 28 รู้จักกันในชื่อ “สมการการส่งผ่านของฟรีส” ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังงานที่รับ  $P_r$  ต่อกำลังงานอินพุตของสายอากาศตัวส่ง  $P_t$  ในเทอมของ  $\lambda / 4\pi R$ <sup>2</sup> เรียกว่า ตัวประกอบการสูญเสียในอวกาศว่าง (Free-space loss factor)

## 2.17 โครจข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์

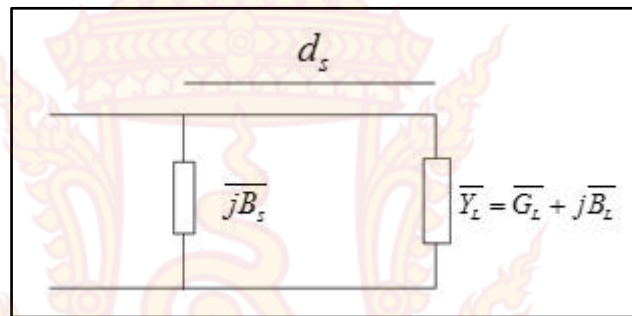
โครจข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching network) เมื่อสายส่งสัญญาณที่ไม่มี การสูญเสียทางไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์  $Z_L$  จะทำให้ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ที่มีค่าคงที่ แต่มุมเฟสของการสะท้อนกลับจะมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 180^\circ$  สมิตชาร์ตและจุดบนวงกลมจะ ใช้แทนนอร์แมลไลซ์โพลดซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ออกจากโพลดซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป การเคลื่อนที่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาบนวงกลม  $VSWR$  คงที่ จะทำให้เทอมจริงของนอลแมลไลท์อิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ 1 วงบนเส้นวงกลม ณ จุดนี้เองการเพิ่มหรือต่ออุปกรณ์ที่มีค่าคงที่รี แอคแตนต์หรือสายส่งสตัป (Transmission line stub) จะสามารถลดผลของการสะท้อนกลับของสัญญาณเนื่องจากการมิสแมตซ์หรือเป็นการลดค่า  $VSWR$  ลงได้ เราเรียกสายส่งสัญญาณที่มีความ



ยาวจำกัดที่มีการเปิดปลายสายหรือการปิดปลายสายว่า “สตับ” ซึ่งกระทำตัวเสมือนเป็นอุปกรณ์รีแอกแตนซ์ได้แก่ ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำตามลำดับ

### 2.17.1 สตับขนาน (Shunt Stub)

พิจารณาสายส่งแบบไม่มีการสูญเสียที่มีอิมพีแดนซ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ  $Z_0$  และมีโหลดแอดมิตแตนซ์เท่ากับ  $Y_L$  ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สตับแบบขนาน

การหาค่านอร์มัลไลซ์อินพุตแอดมิตแตนซ์ ( $\overline{Y}_{in}$ ) ที่ระยะ  $d_s$  ห่างจากระนาบโหลดจะหาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\overline{Y}_{in} = \frac{\overline{Y}_L + j \tan(\beta d_s)}{1 + j \overline{Y}_L \tan(\beta d_s)} \quad (30)$$

การทำให้เกิดการแมตช์กันระหว่างอิมพีแดนซ์ที่ระยะ  $d_s$  นั้นคือการทำให้อิมพีแดนซ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะของสายส่ง (Characteristic admittance) จะเห็นว่าเทอมที่เป็นจำนวนจริงของสมการนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 จะใช้เงื่อนไขนี้ช่วยในการหาระยะ  $d_s$  นอกจากนี้แล้ว เมื่อพิจารณาภาพที่ 10 เทอมชัสเซปแตนซ์  $B_s$  นั้นจะถูกต่อเข้าไปที่ตำแหน่ง  $d_s$  ห่างจากระนาบโหลดเพื่อไปหักล้างกับเทอมจินตภาพของ  $Y_{in}$  ดังนั้นระยะ  $d_s$  ที่เหมาะสมนั้นจะเป็นไปตามสมการและความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{\overline{B}_L \pm \sqrt{\overline{B}_L^2 - A(1 - \overline{G}_L)}}{A} \right) \quad (31)$$

เมื่อกำหนดให้

$$A = \overline{G}_L(\overline{G}_L - 1) + \overline{B}_L^2 \quad (32)$$

ขณะที่เทอมจินตภาพของนอร์แมลไลซ์อินพุตแอดมิตแตนซ์ ( $\overline{B}_{in}$ ) ที่ระยะห่าง  $d_s$  มีค่า

$$\overline{B}_{in} = \frac{[\overline{B}_L + \tan(\beta d_s)] \times [1 - \overline{B}_L \tan(\beta d_s)] - \overline{G}_L^2 \tan(\beta d_s)}{[\overline{G}_L \tan(\beta d_s)]^2 + [1 - \overline{B}_L \tan(\beta d_s)]^2} \quad (33)$$

โดยมีเงื่อนไขการแมตซ์ดังนี้

$$\overline{B}_s = -\overline{B}_{in} \quad (34)$$

จะเห็นได้ว่าเทอมซัสเซปแตนซ์ ( $\overline{B}_s$ ) ของสายส่งที่ต่อขนานเข้าไปนั้น จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับเทอมจินตภาพนอร์แมลไลซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $\overline{B}_{in}$ ) นั้นเป็นนัยว่า หากอินพุตแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{in}$ ) อยู่ในสถานะเป็นตัวเก็บประจุ จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานเข้าไปที่ระยะ  $d_s$  เพื่อทำให้เกิดเงื่อนไขในการแมตซ์

ในทางตรงกันข้ามถ้าหากอินพุตแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{in}$ ) อยู่ในสถานะเป็นอินดักทีฟ (ตัวเหนี่ยวนำ) จะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าไปที่ระยะ  $d_s$  ในที่นี้เราจะอาศัยวิธีการสังเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำจากสายส่งปลายลัดและสังเคราะห์ตัวเก็บประจุจากสายส่งปลายปิด เรียกสายส่งที่ทำหน้าที่แมตซ์อิมพีแดนซ์ดังกล่าวว่า “สตัปแมตซ์ซิ่ง” โดยสามารถหาความยาว  $L_s$  ของสตัปปลายลัดได้จากสมการ

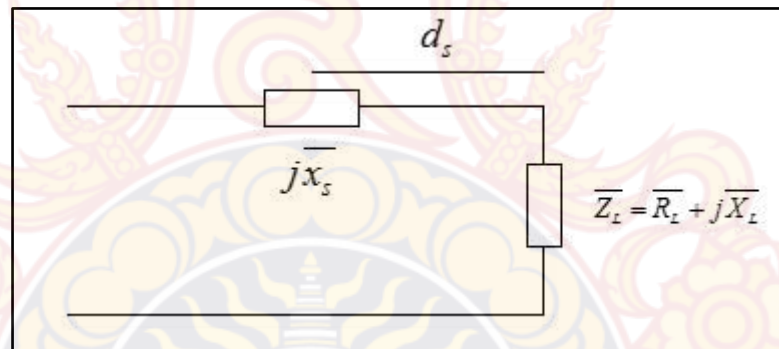
$$L_s = \frac{1}{\beta} \cot^{-1}(-\overline{B}_s) = \frac{1}{\beta} \cot^{-1}(-\overline{B}_{in}) \quad (35)$$

ดังนั้นการออกแบบสตัดป์แมตซ์ซึ่งแบบขนานจะต้องหาระยะ  $d_s$  จากขนาดบโหนดและความยาวของสตัดป์  $L_s$  ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้เกิดการแมตซ์ได้อย่างสมบูรณ์

### 2.17.2 สตัดป์แบบอนุกรม (Series Stub)

การต่อใช้งานสตัดป์แมตซ์ซึ่งแบบอนุกรมตามภาพที่ 11 จะต่อเข้าไปในลักษณะอนุกรมเข้ากับอิมพีแดนซ์โหลด  $Z_L$  ผ่านทางสายส่งเป็นระยะ  $d_s$  จากขนาดบโหนด ทำให้เกิดค่านอร์แมลไลซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ระยะดังกล่าวให้ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\overline{Z}_{in} = \frac{\overline{Z}_L + j \tan(\beta d_s)}{1 + j \overline{Z}_L \tan(\beta d_s)} \quad (36)$$



ภาพที่ 11 สตัดป์แบบอนุกรม

ในกรณีที่เกิดการแมตซ์ที่ระยะ  $d_s$  ดังนั้นเทอมจริงของอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ ตัวอย่างเทอมจริงในสมการ  $\overline{Z}_{in} = \frac{\overline{Z}_L + j \tan(\beta d_s)}{1 + j \overline{Z}_L \tan(\beta d_s)}$  นั้นจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 และเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับหาระยะ  $d_s$  โดยมีรีแอกแตนซ์  $X_s$  ของสตัดป์จะถูกต่อเข้าไปในลักษณะอนุกรมเพื่อหักล้างเทอมจินตภาพของ  $Z_L$  ที่ระยะ  $d_s$  ห่างจากขนาดบโหนดโดย

$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{\overline{X}_L \pm \sqrt{\overline{X}_L^2 - A_Z(1 - \overline{R}_L)}}{A_Z} \right) \quad (37)$$

เมื่อ

$$A_z = \overline{R_L}(\overline{R_L} - 1) + \overline{X_L}^2 \quad (38)$$

ทำให้เกิดเทอมจินตภาพของนอร์แมลไลซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $\overline{X_{in}}$ ) ที่ระยะ  $d_s$  มีค่าตามสมการ

$$\overline{X_L} = \frac{[\overline{X_L} + \tan(\beta d_s)] \times [1 - \overline{X_L} \tan(\beta d_s)] - \overline{R_L}^2 \tan(\beta d_s)}{[\overline{R_L} \tan(\beta d_s)]^2 + [1 - \overline{X_L} \tan(\beta d_s)]^2} \quad (39)$$

ขณะที่เทอมรีแอกแตนซ์ของ  $X_{in}$  นั้นจะต้องถูกกำจัดออกไปโดยการต่ออุปกรณ์ที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามดังกล่าวคือ

$$\overline{X_s} = -\overline{X_{in}} \quad (40)$$

เมื่อพิจารณาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ้าอินพุตอิมพีแดนซ์อยู่ในสภาวะเป็นอินดักทีฟในที่นี่ การกำจัดเทอมจินตภาพออกไปได้นั้นจะต้องอาศัยหลักการรีโซแนนท์ ดังนั้นสำหรับกรณีนี้จะต้องต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้าไปกับสายส่งด้วย

ในทางตรงกันข้ามถ้าหากว่าอินพุตอิมพีแดนซ์อยู่ในสภาวะคาปาซิทีฟแล้ว จะต้องต่อตัวเหนี่ยวนำเข้าไปกับสายส่งกรณีที่สังเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำด้วยสายส่งปลายลัดโดยความยาว  $L_s$  ของสต็ปมีค่าเท่ากับ

$$L_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1}(\overline{X_s}) = \frac{1}{\beta} \tan^{-1}(-\overline{X_{in}}) \quad (41)$$

ขณะที่การสังเคราะห์ตัวเก็บประจุด้วยสายส่งปลายเปิดนั้น ค่าความยาว  $L_s$  ของสต็ปที่เหมาะสมนั้น จะหาได้จากสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$L_s = \frac{1}{\beta} \cot^{-1}(\overline{-X_s}) = \frac{1}{\beta} \cot^{-1}(\overline{X_{in}}) \quad (42)$$

เนื่องจากสายส่งให้ผลตอบสนองแบบรายคาบ (Periodic response) ดังนั้นจะสังเกตว่าการต่อสายส่งที่ระยะ  $d_s$  ห่างจากระนาบโหลดและความยาว  $L_s$  ของสแตปนั้นทุกๆ ความยาวที่เพิ่มขึ้น  $\lambda / 2$  หรือ  $\pi$  เรเดียน ก็จะทำให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติผู้ออกแบบมักจะเลือกระยะ  $d_s$  และความยาว  $L_s$  ที่สั้นที่สุดเพื่อลดปัญหาผลที่เกิดจากการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของสายส่งที่ใช้ในการสร้างสแตป

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบและการสร้างสายอากาศเซอรัคูลาร์ที่ใช้งานย่านความถี่วิทยุ 99.75 เมกะเฮิรตซ์ จะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการออกแบบสายอากาศเซอรัคูลาร์ด้วยโปรแกรม CST Microwave studio แล้วนำค่าไดมิเตอร์ที่ได้จำลองได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio นำมาสร้างชิ้นงานจริง

#### 1. การออกแบบในโปรแกรม CST Microwave studio

ในที่นี้จะใช้สมการไดโพลมาอ้างอิงในการตัดแปลงเป็นตัวหาขนาดของสายอากาศเซอรัคูลาร์

##### 1.1 คำนวณหาขนาดของสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เทียบกับขนาดของเซอรัคูลาร์

คำนวณหาขนาดของสายอากาศจากสมการที่ 1

$$\lambda = \frac{c}{f} \times VF$$

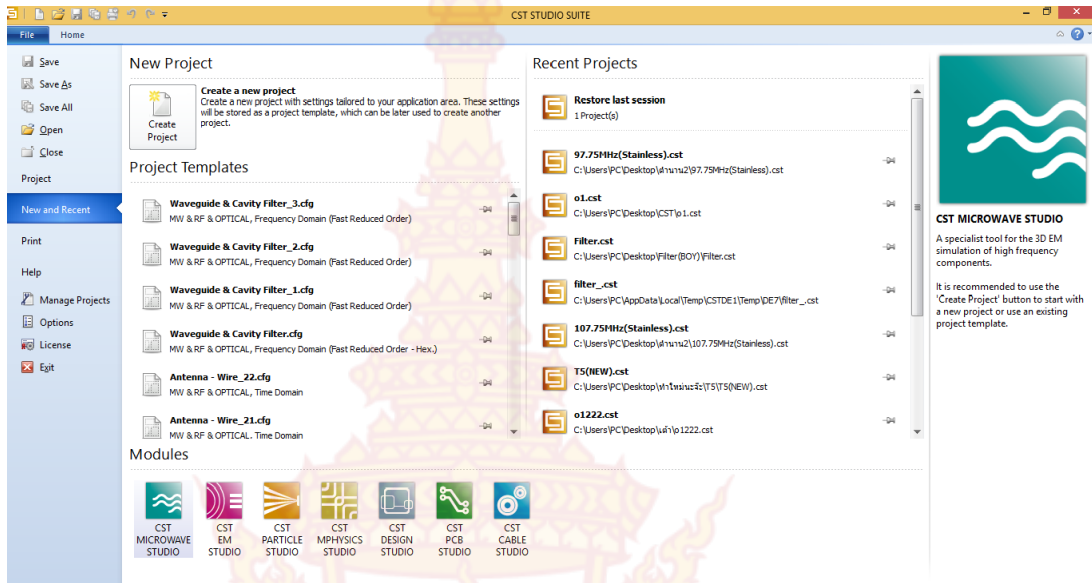
$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{99.75 \times 10^6} \times 0.956 \approx 287.5 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\lambda / 2 \approx 143.75 \text{ เซนติเมตร}$$

ขนาดของสายอากาศประมาณ 143.75 เซนติเมตร แล้วนำค่าของขนาดที่คำนวณได้มาออกแบบสายอากาศในโปรแกรม CST Microwave Studio

##### 1.2 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

1. เปิดโปรแกรม CST Microwave Studio เลือกหัวข้อ Create Project



ภาพที่ 12 การเปิดใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio

2. เลือกการใช้งานแบบ MW & RF & Optical เลือก Antennas เพื่อทำการออกแบบสายอากาศ

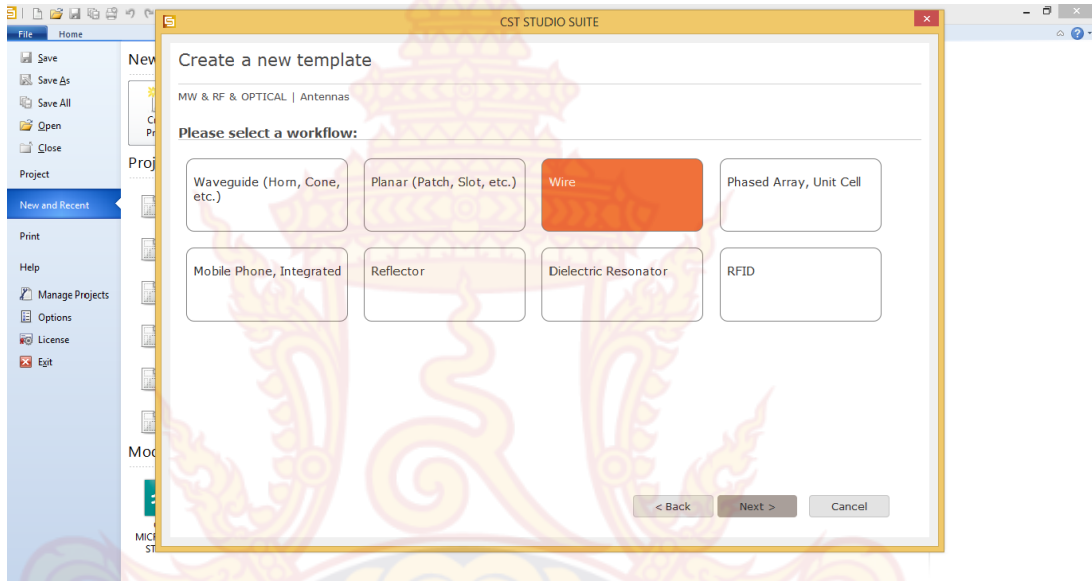


ภาพที่ 13 การเลือกโหมดที่ต้องการใช้งาน

ภาพที่ 12 เป็นการเปิดโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศเซอร์คูลาร์ในย่านความถี่วิทยุเอเอ็ม ส่วนภาพที่ 13 นั้นเป็นการเลือกฟังก์ชัน MW & RF

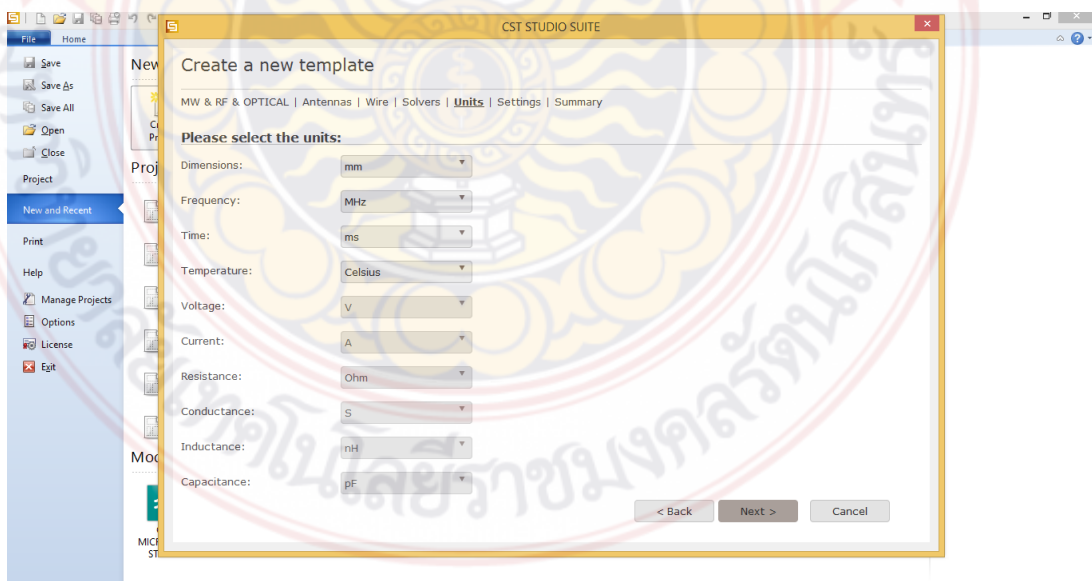
เพื่อทำการออกแบบในย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) และย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency) เลือก Antenna เพื่อทำการออกแบบสายอากาศ

3. เลือกหัวข้อ Wire เพื่อทำการออกแบบสายอากาศแบบเส้น



ภาพที่ 14 การเลือกโหมดเพื่อออกแบบสายอากาศแบบเส้น

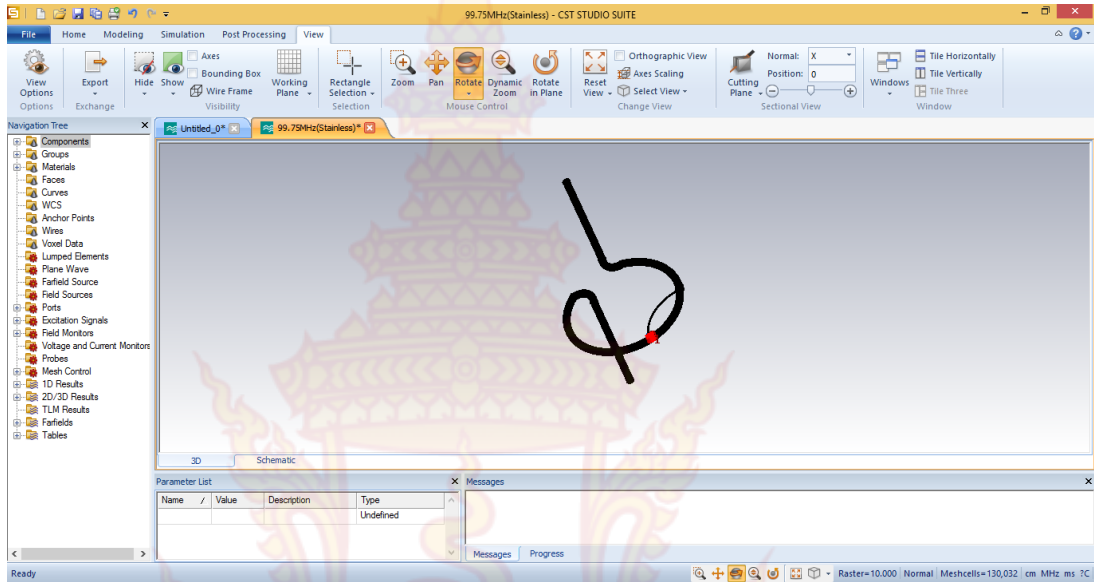
4. กำหนดหน่วยในการใช้งานต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการออกแบบ



ภาพที่ 15 กำหนดค่าหน่วยต่างๆ

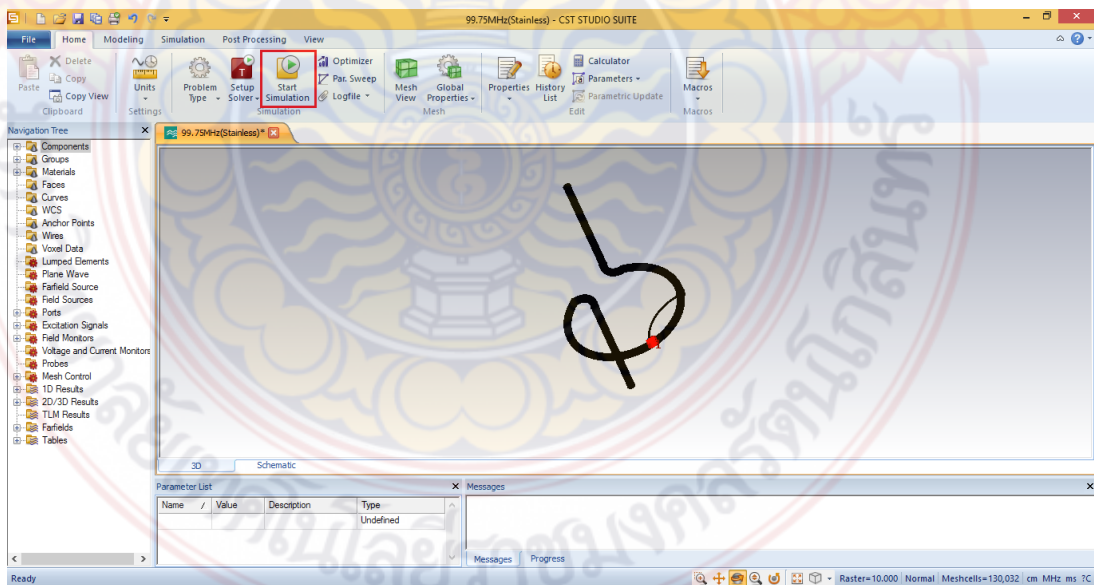


5. ออกแบบสายอากาศตามขนาดที่คำนวณได้จากสมการที่ 1



ภาพที่ 16 สายอากาศที่ออกแบบตามที่ได้คำนวณไว้

6. เลือก Start Simulation เพื่อทำการประมวลผลโดยโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ



ภาพที่ 17 การประมวลผลสายอากาศ

ภาพที่ 14 เป็นการเลือกโหมดการออกแบบสายอากาศแบบเส้น (Wire) ในโปรแกรม CST Micro wave Studio กด Next เพื่อไปขั้นตอนต่อไป ภาพที่ 15 เป็นการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใช้งานความยาว, หน่วยความถี่, หน่วยของเวลา, หน่วยของแรงดันไฟฟ้า, หน่วยของกระแสไฟฟ้า และหน่วยของความต้านทาน เป็นต้น ภาพที่ 16 แสดงสายอากาศเป็นวัสดุทำจากสแตนเลสขนาด 6 หุน หรือ 1.91 เซนติเมตร รัศมีวงกลมของสายอากาศมีขนาด 30 เซนติเมตร และความยาวของแขนมีขนาด 33 เซนติเมตร ภาพที่ 17 เมื่อโปรแกรมทำการประมวลผลเสร็จสิ้น เราสามารถดูผลทดสอบที่ต้องการได้ เช่น รูปแบบแพทเทิร์นของสายอากาศ, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ, บริเวณสนามแผ่พลังงานทั้งระยะใกล้และระยะไกล, แบนด์วิดท์ของสายอากาศ เป็นต้น

### 1.3 การหาขนาดสายอากาศเซอร์คูลาร์

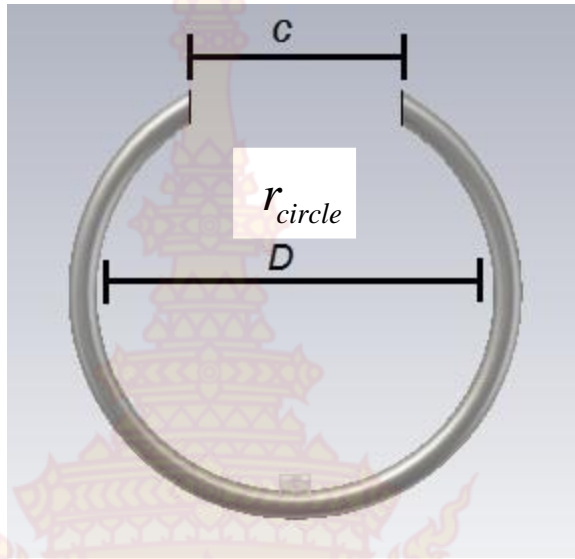
การหาขนาดสายอากาศเซอร์คูลาร์ จะใช้สมการในการคำนวณหาดังนี้

$$\lambda = [r_{circle} \pi - C] + a_1 + a_2 + b_1 + b_2 \quad (43)$$

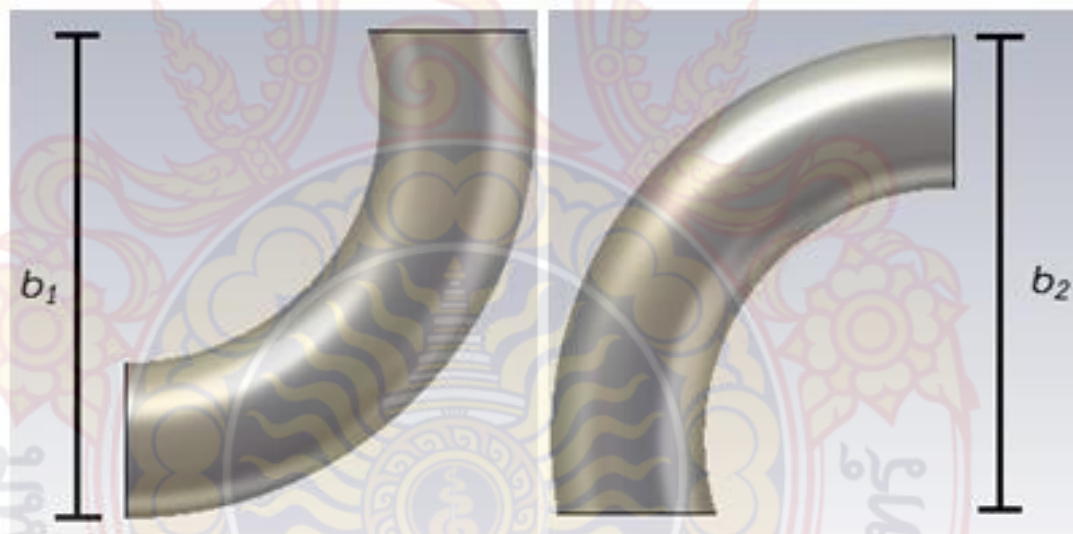
เมื่อ

$\lambda$	แทนค่าความยาวคลื่น
$r_{circle}$	แทนรัศมีของวงกลม
$C$	แทนระยะตัด
$a_1$	แทนความยาวแขนตัวที่ 1
$a_2$	แทนความยาวแขนตัวที่ 2
$b_1$	แทนความยาวข้อต่อตัวที่ 1
$b_2$	แทนความยาวข้อต่อตัวที่ 2

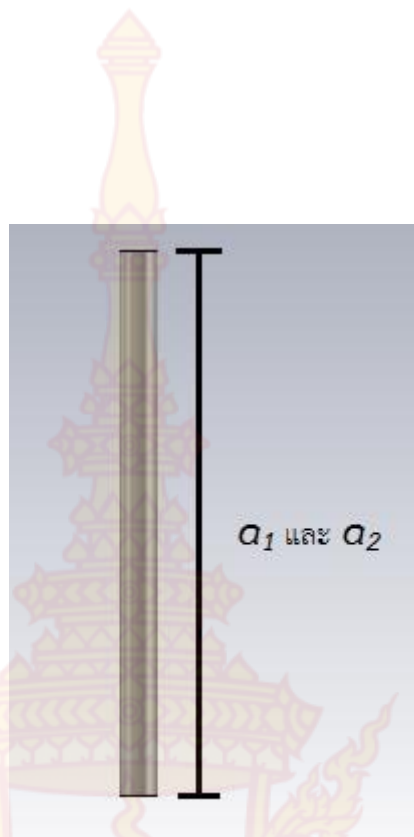
ในการออกแบบใช้สมการที่ 43 เปรียบเทียบกับสมการในหน้าที่ 33 พบว่าผลที่ได้จากทั้ง 2 สมการ ให้ค่าที่มีความใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 18 รัศมีของห่วงวงกลมและระยะตัด



ภาพที่ 19 ช่องอทั้ง 2 ข้างของสายอากาศ



ภาพที่ 20 แขนงตัวสายอากาศ

จากสมการที่ 43 เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda / 2 &= [r_{circle} \pi - C] + a_1 + a_2 + b_1 + b_2 \\ &= [28\pi - 14] + 33 + 3 + 3 + 3 \end{aligned}$$

$$\lambda / 2 \approx 145.964 \text{ เซนติเมตร}$$

สายอากาศเซอ์คูลาร์ควมมีความยาวของสายอากาศทั้งหมดประมาณ 146 เซนติเมตร

2. การสร้างชิ้นงานจริงโดยใช้ขนาดที่ได้ออกแบบเป็นขนาดอ้างอิง



ภาพที่ 21 อุปกรณ์ชิ้นส่วนทั้งหมด



ภาพที่ 22 การนำเอาอุปกรณ์ชิ้นส่วนทั้งหมดมาเชื่อมติดกัน



ภาพที่ 23 การบัดกรีหางปลาเข้ากับคอนเนคเตอร์ เพื่อใช้เป็นตัวยึดสตัป



ภาพที่ 24 การเจาะแป้นยึดเพื่อยึดคอนเนคเตอร์



ภาพที่ 25 การตัดสตัปและนำไปเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์และปลายอีกข้างยึดกับเข็มขัดรัด



ภาพที่ 26 สายอากาศเซอร์คูลาร์แบบสมบูรณ์

ภาพที่ 21 สเตนเลสที่ตัดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 28 เซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนโครงของสายอากาศ บวมสเตนเลสแบบสี่เหลี่ยมขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร มีความยาว 75 เซนติเมตร ใช้เป็นตัวจับยึดระหว่างตัวสายอากาศกับต้นเสาจับยึด ช่องอ 90 องศา และสเตนเลสขนาด 6 หุน ความยาว 33 เซนติเมตรให้เป็นแขนของสายอากาศ ภาพที่ 22 นำสเตนเลสทั้งหมดมาเชื่อมเป็นโครงสร้างของสายอากาศแบบเซอร์คูลาร์ โดยเชื่อมแบบอาร์กอน หลังเชื่อมเสร็จจึงนำชิ้นงานไปขัดเก็บรายละเอียดและเพิ่มความสวยงามของชิ้นงานด้วยเครื่องขัดเงาโลหะกับไขมันปลาภาพ ภาพที่ 23 นำขั้วบวกของคอนเนคเตอร์บัดกรีเข้ากับหางปลา เพื่อใช้เป็นตัวจับยึดระหว่างคอนเนคเตอร์กับสตั๊ป ภาพที่ 24 ใช้สว่านเจาะแป้นยึดเพื่อทำการยึดคอนเนคเตอร์เข้ากับโครงสร้างสายอากาศเซอร์คูลาร์ พร้อมทั้งขันสกรูทั้ง 4 ด้านเพื่อเพิ่มความแข็งแรง จากภาพที่ 25 การนำสตั๊ปมาใช้งานควรให้ความหนาพอสมควรเพื่อป้องกันไม่ให้สตั๊ปเกิดการกะทบกระเทือนทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย ควรให้ขนาดความกว้างของสตั๊ปมีขนาดเท่ากับขนาดของท่อที่นำมาทำสายอากาศและความยาวของสตั๊ปควรยาวเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม และภาพที่ 26 ลักษณะของสายอากาศที่ทำการประกอบชิ้นส่วนทุกอย่างเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์

## 2.1 การตัดขนาดความยาวสายนำสัญญาณที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

สายที่ใช้งานเป็นสายพีด RG-8 สมการในการหาขนาดความยาวที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังนี้

$$\lambda_L = \frac{c}{f} \times VF_{RG-8} \quad (44)$$

เมื่อ

$\lambda_L$	แทนค่าความยาวของสายพีด มีหน่วยเป็นเมตร (m)
$c$	แทนค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8$ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
$f$	แทนความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ (Hz)
$VF_{RG-8}$	แทนค่าความนำไฟฟ้าของสาย RG-8

ในการคำนวณหาความยาวสายนำสัญญาณ เราจะใช้สมการที่ 44 ในการคำนวณได้ดังนี้



$$\lambda_L = \frac{3 \times 10^8}{99.75 \times 10^6} \times 0.66 \approx 198 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\lambda_L / 2 = 0.99 \text{ เซนติเมตร}$$

เราจะได้ขนาดความยาวของสายนำสัญญาณขนาด  $8\lambda_L = 8 \times 99 = 7.92$  เมตร

3. การออกแบบสายอากาศเซอรัคูลาร์ในย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ในช่วงความถี่ต้น, ความถี่กลาง และความถี่ปลาย

3.1 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่ต้น 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์

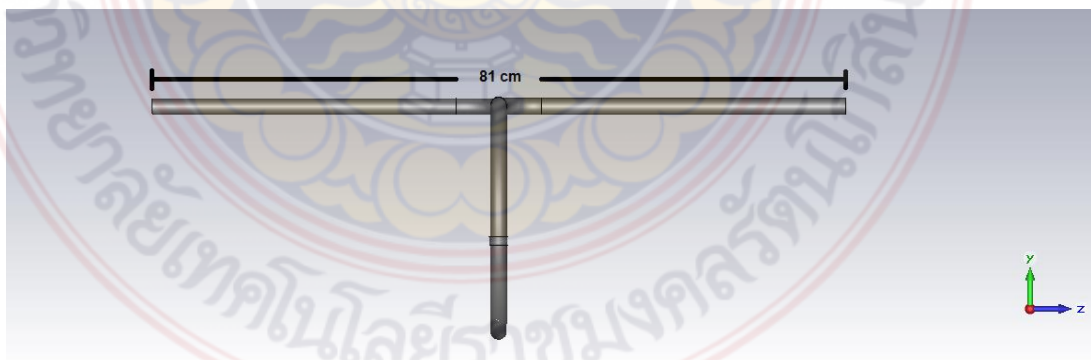
คำนวณหาขนาดของสายอากาศจากสมการที่ 1

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{87.5 \times 10^6} \times 0.956 \approx 328 \text{ เซนติเมตร}$$

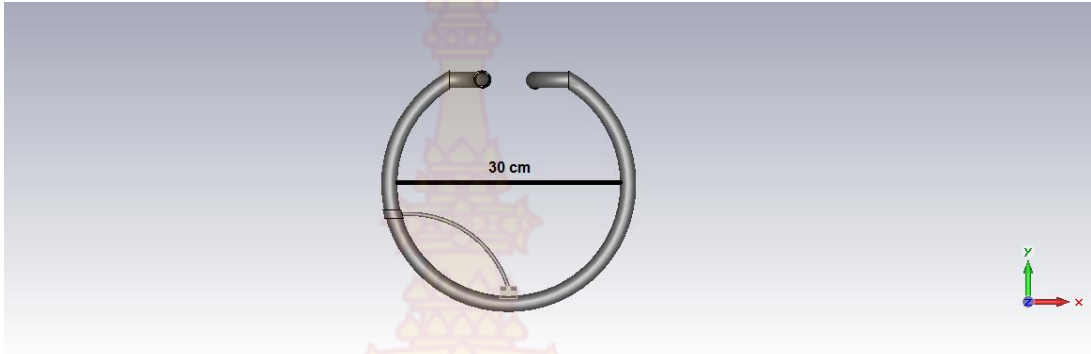
$$\lambda / 2 \approx 164 \text{ เซนติเมตร}$$

ขนาดของความยาวของสายอากาศเซอรัคูลาร์ที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์

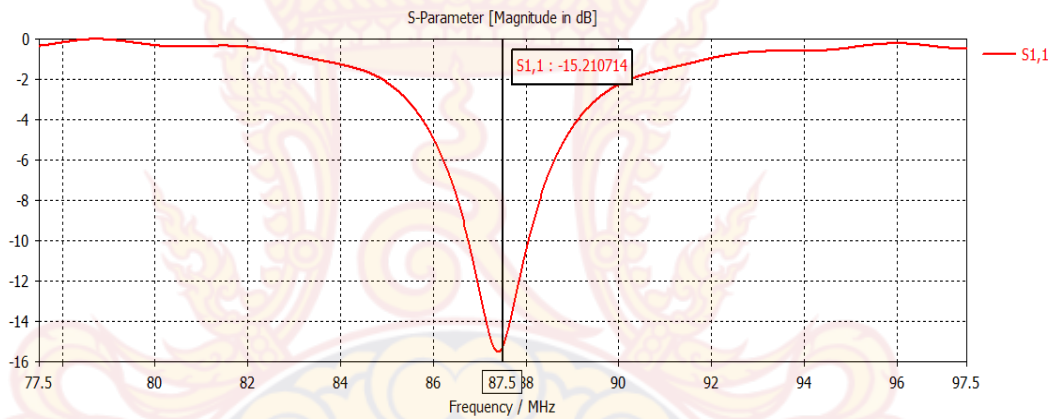
$$\lambda / 2 = 80 + 40.5 + 40.5 = 161 \text{ เซนติเมตร}$$



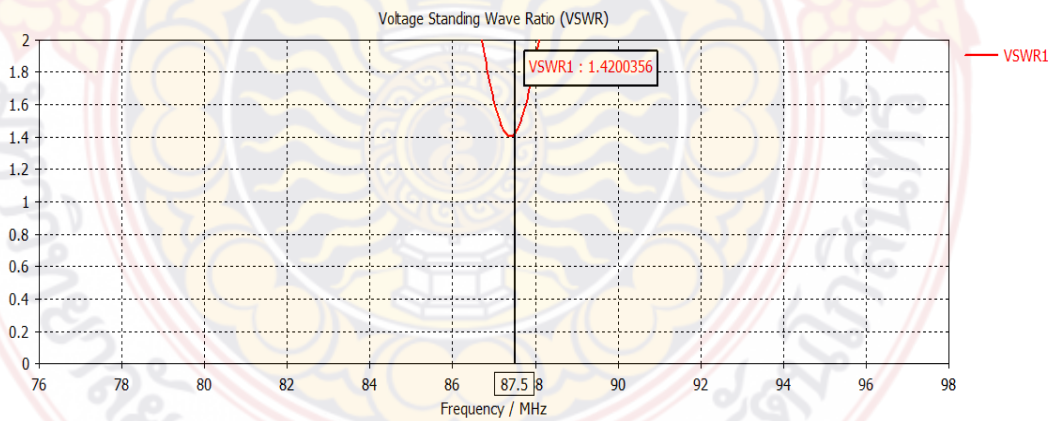
ภาพที่ 27 ความยาวของแขนทั้ง 2 ข้างของสายอากาศความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 28 รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 87.5 เมกกะเฮิรตซ์



ภาพที่ 29 ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิรตซ์



ภาพที่ 30 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิรตซ์

ภาพที่ 27 แสดงความยาวรวมของแขนสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 87.5 เมกกะเฮิรตซ์ โดยมีความยาวของแขนตัวสายอากาศประมาณ 81 เซนติเมตร ภาพที่ 28 แสดงถึงความกว้างของเส้น

ผ่านศูนย์กลางของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 เซนติเมตร ส่วนภาพที่ 29 แสดงค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -15.21 dB และภาพที่ 30 แสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 87.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.42

### 3.2 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่กลาง 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

คำนวณหาขนาดของสายอากาศจากสมการที่ 1

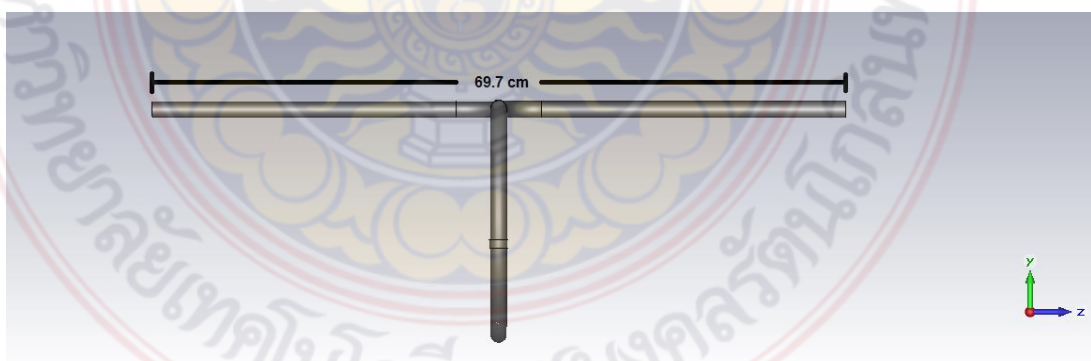
$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{97.75 \times 10^6} \times 0.956 = 293 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\lambda / 2 \approx 146.5 \text{ เซนติเมตร}$$

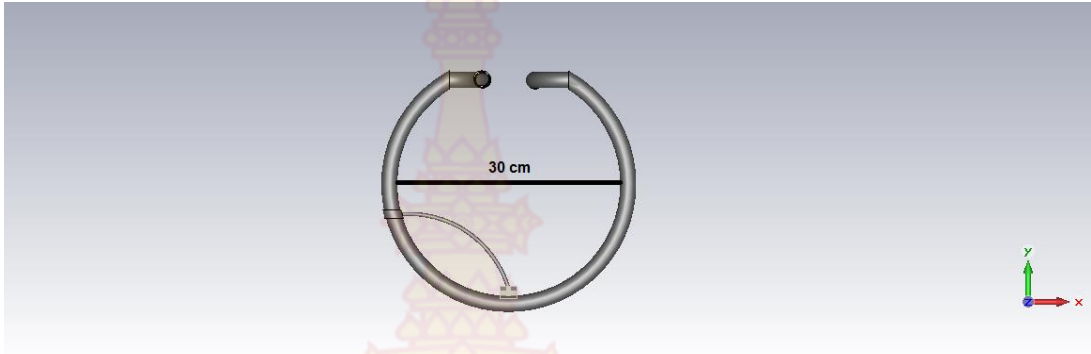
ขนาดความยาวของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

$$\lambda / 2 = 80 + 34.85 + 34.85$$

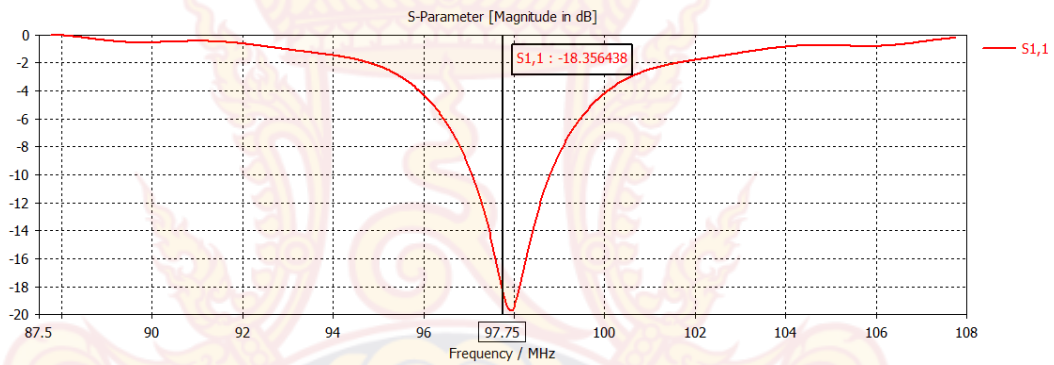
$$\lambda / 2 \approx 149 \text{ เซนติเมตร}$$



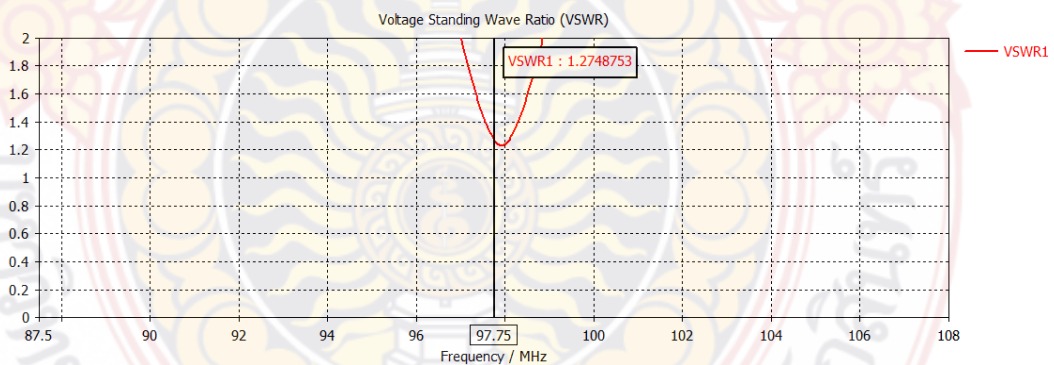
ภาพที่ 31 ความยาวของแขนทั้ง 2 ข้างของสายอากาศความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 32 รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 33 ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 34 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

ภาพที่ 31 แสดงความยาวรวมของแขนสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 97.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยมีความยาวของแขนตัวสายอากาศประมาณ 70 เซนติเมตร ภาพที่ 32 แสดงความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 เซนติเมตร ในขณะที่ภาพที่ 33 แสดงค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศ

เซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -18.356 dB และภาพที่ 34 แสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 97.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.274

### 3.3 การออกแบบสายอากาศช่วงความถี่ปลาย 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

คำนวณหาขนาดของสายอากาศจากสมการที่ 1

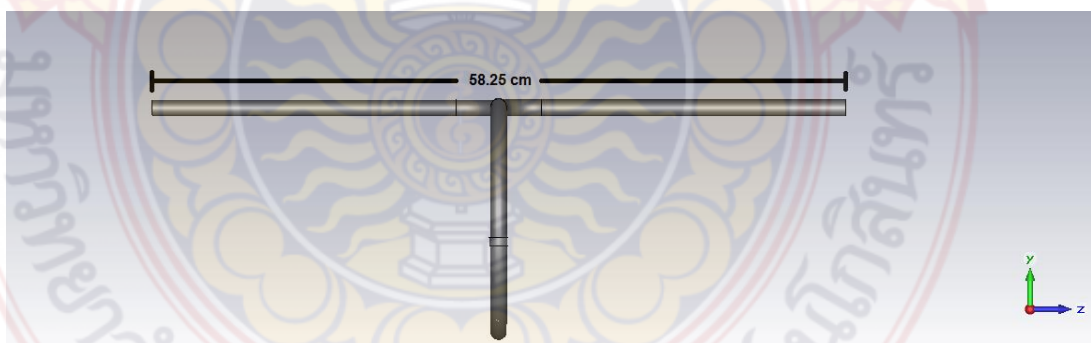
$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{107.75 \times 10^6} \times 0.956$$

$$\lambda = 133 \text{ เซนติเมตร}$$

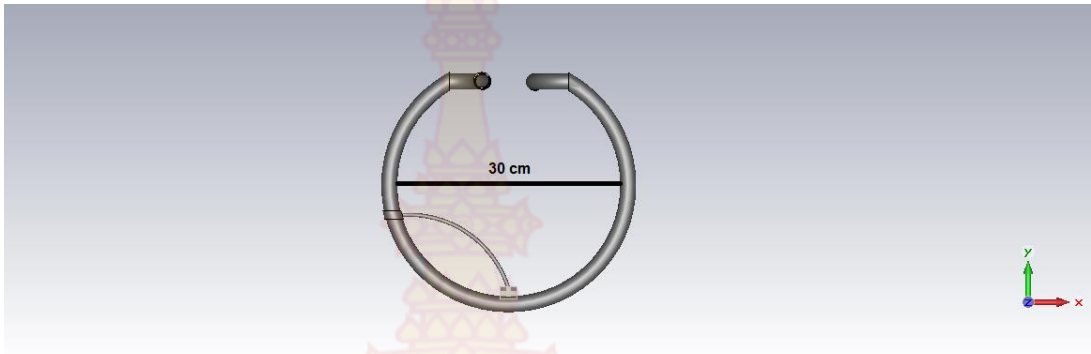
ขนาดความยาวของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

$$\lambda = 80 + 29.13 + 29.13$$

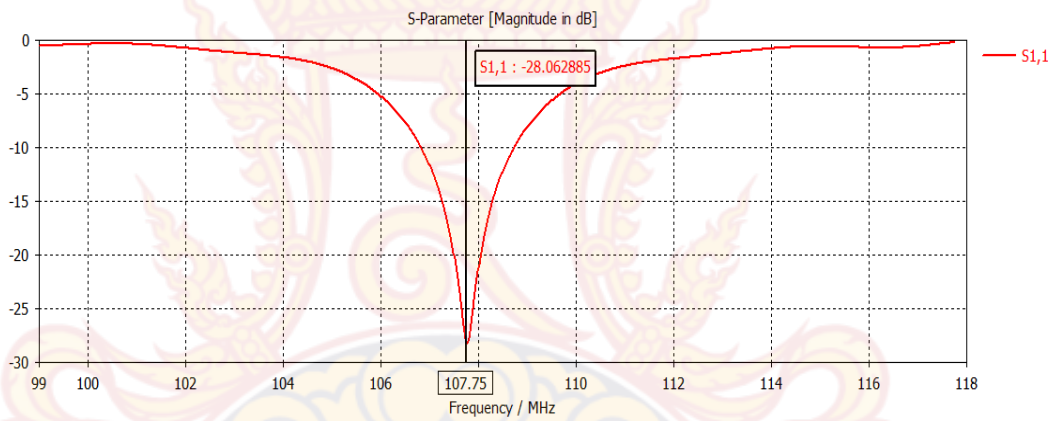
$$\lambda \approx 138 \text{ เซนติเมตร}$$



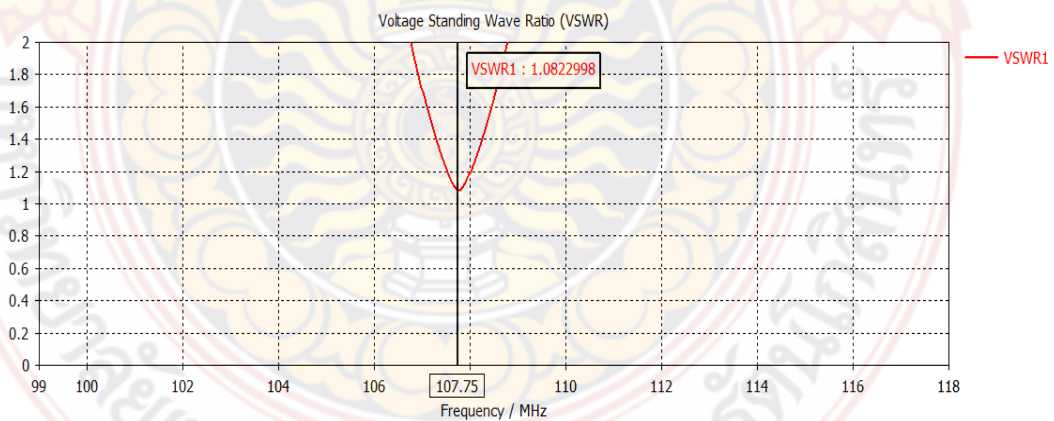
ภาพที่ 35 ความยาวของแขนทั้ง 2 ข้างของสายอากาศความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 36 รัศมีของตัวสายอากาศความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 37 ค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 38 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

ภาพที่ 35 แสดงความยาวรวมของแขนสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยมีความยาวของแขนตัวสายอากาศประมาณ 58 เซนติเมตร ภาพที่ 36 แสดงถึงความกว้างของเส้น

ผ่านศูนย์กลางของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 เซนติเมตร ส่วนภาพที่ 37 แสดงค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าสูญเสียการย้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -28 dB และภาพที่ 38 แสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ความถี่ 107.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.08



## บทที่ 4

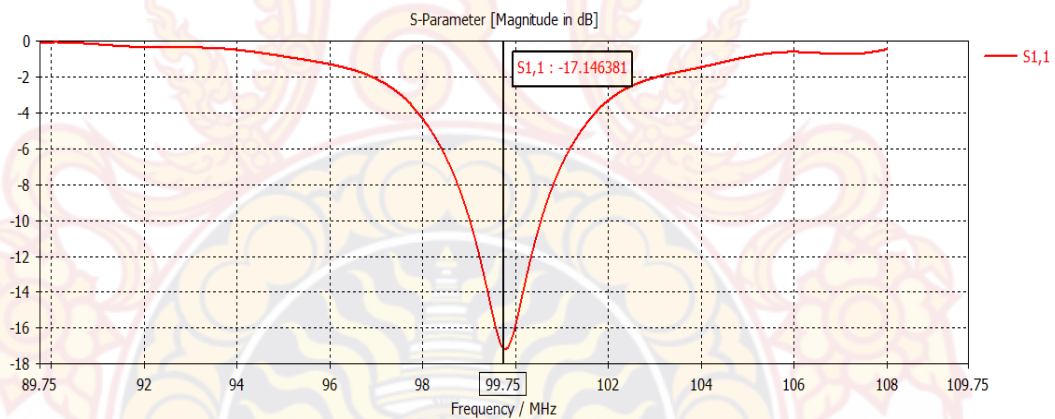
### ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการทดสอบสายอากาศเซอร์คูลาร์ในย่านความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์ มาทดสอบหาเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

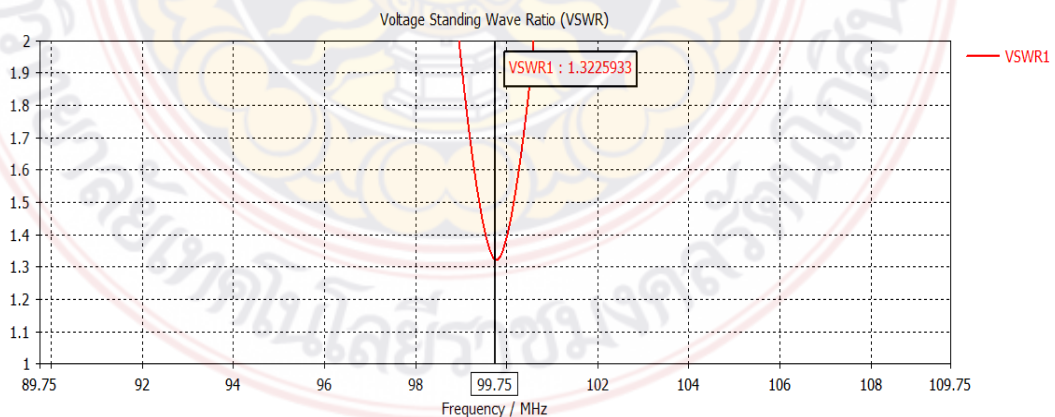
#### 1. ผลการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

1. การทดสอบวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) จากการ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

2. การทดสอบวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) จากการ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



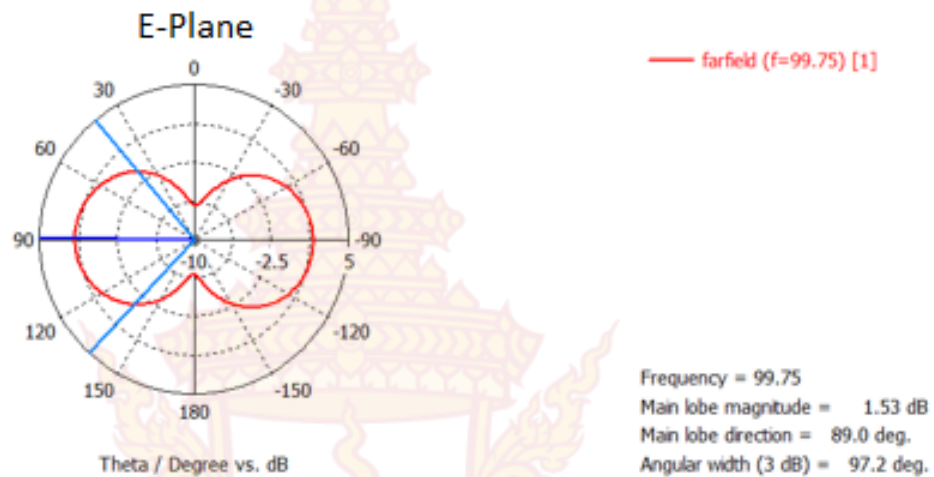
ภาพที่ 39 ค่าการสูญเสียย้อนกลับในโปรแกรม CST Microwave Studio



ภาพที่ 40 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ในโปรแกรม CST Microwave Studio

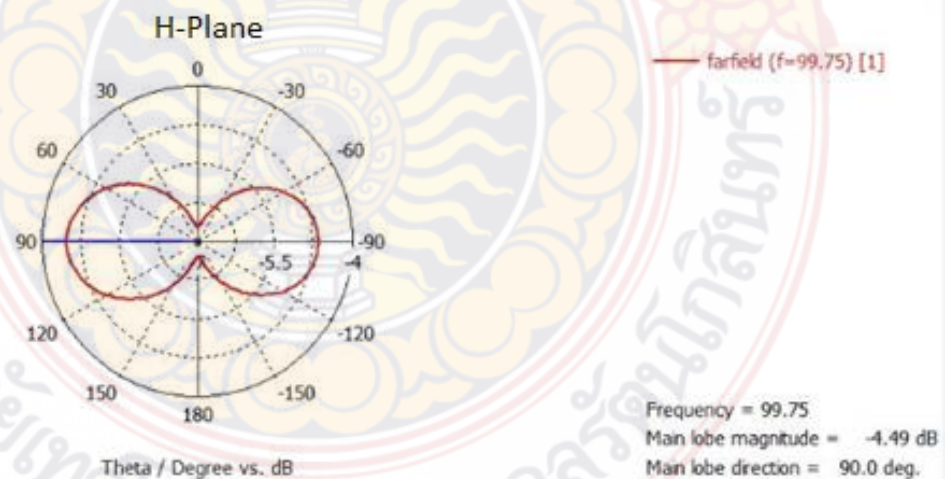


3. รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศจาก Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



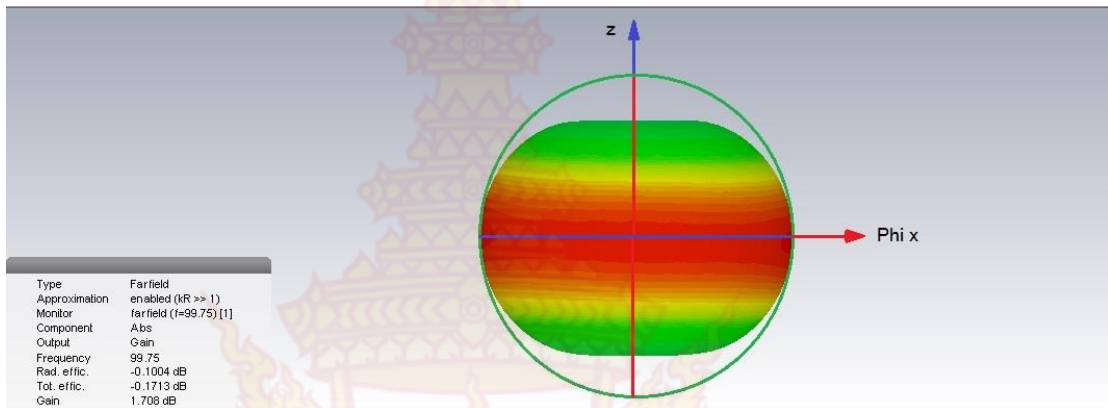
ภาพที่ 41 รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศในโปรแกรม CST Microwave Studio

4. รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศจากการ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



ภาพที่ 42 รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) สนามแม่เหล็ก (E-Field) ของสายอากาศจากการ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

5. รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) ของสายอากาศในรูปแบบแบบ 3 มิติ จากการ Simulation ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



ภาพที่ 43 รูปแบบแพทเทิร์น (Pattern) ของสายอากาศในรูปแบบ 3 มิติ ในโปรแกรม CST Microwave Studio

ภาพที่ 39 แสดงถึงการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับทาง ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ วัดได้ค่าเท่ากับ -17.14 dB จากภาพที่ 40 จากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ สามารถวัดค่าได้ 1.32 ภาพที่ 41 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้า ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จากภาพที่ 42 แสดงแพทเทิร์นของสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยมีภาพที่ 43 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

## 2. ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง MFJ-259b

การทดสอบหาจุดแมตช์ของสายอากาศที่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ทั้งสองตัวนั้นด้วยเครื่อง MFJ-259b ตามภาพที่ 44 และ 4-7 สามารถบันทึกค่าได้ดังตารางที่ 2

### 2.1 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 1 ด้วย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร



ภาพที่ 44 ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 1 กับสาย RG-8 ด้วยเครื่อง MFJ-259b

ภาพที่ 44 แสดงผลการปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ด้วยเครื่อง MFJ-259b ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 ที่มีความยาว 7.92 เมตร

## 2.2 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 2 ด้วย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร



ภาพที่ 45 ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 2 กับสาย RG-8 ด้วยเครื่อง MFJ-259b

ภาพที่ 45 แสดงผลการปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ด้วยเครื่อง MFJ-259b ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 ที่มีความยาว 7.92 เมตร การ

ปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ทั้ง 2 ตัว ให้เกิดการแมตซ์ ณ ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ด้วยการใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 ความยาว 7.92 เมตรได้ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการแมตซ์สายอากาศ ด้วยสาย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร

การแมตซ์โดยใช้สายสัญญาณ RG-8 ความยาว 7.92 เมตร					
สายอากาศตัวที่ 1					
Frequency (MHz)	RL (dB)	SWR	$\rho$	Z	Resonant
99.752	-36	1	0.1	55	0
สายอากาศตัวที่ 2					
Frequency (MHz)	RL (dB)	SWR	$\rho$	Z	Resonant
99.755	-36	1	0.1	54	0

### 2.3 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 1 ด้วย RG-8 ความยาว 4.80 เมตร



ภาพที่ 46 ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยเครื่อง MFJ-259b

ภาพที่ 46 แสดงผลการปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ด้วยเครื่อง MFJ-259b ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-58 ที่มีความยาว 4.80 เมตร

## 2.4 การทดสอบสายอากาศตัวที่ 2 ด้วย RG-8 ความยาว 4.80 เมตร



ภาพที่ 47 ผลการทดสอบของสายอากาศตัวที่ 2 ด้วยเครื่อง MFJ-259b

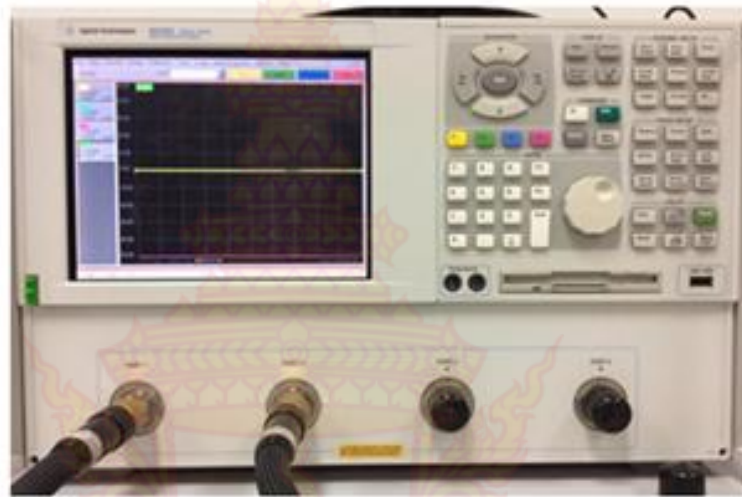
ภาพที่ 47 แสดงผลการปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ด้วยเครื่อง MJF-259b ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้สายนำสัญญาณเบอร์ RG-58 ที่มีความยาว 4.80 เมตร

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงผลการปรับแมตซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ทั้ง 2 ตัว โดยให้แมตซ์ ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ผ่านทางสายนำสัญญาณเบอร์ RG-58 ความยาว 4.80 เมตร ได้ผลลัพธ์ เป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการแมตซ์สายอากาศ ด้วยสาย RG-58 ความยาว 4.80 เมตร

การแมตซ์โดยใช้สายสัญญาณ RG-58 ความยาว 4.80 เมตร					
สายอากาศตัวที่ 1					
Frequency (MHz)	RL (dB)	SWR	e	impedance	Resonant
99.751	-42	1.0	0	56	0
สายอากาศตัวที่ 2					
Frequency (MHz)	RL (dB)	SWR	e	impedance	Resonant
99.752	-38	1.0	0.1	58	0

### 3. การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

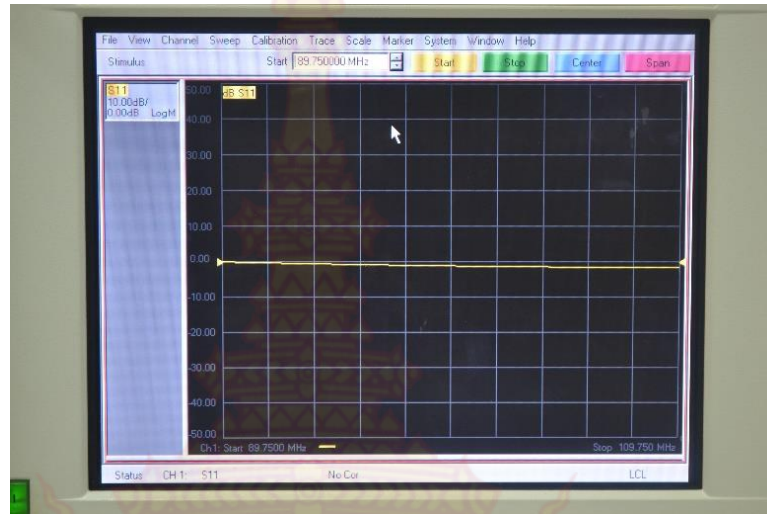


ภาพที่ 48 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

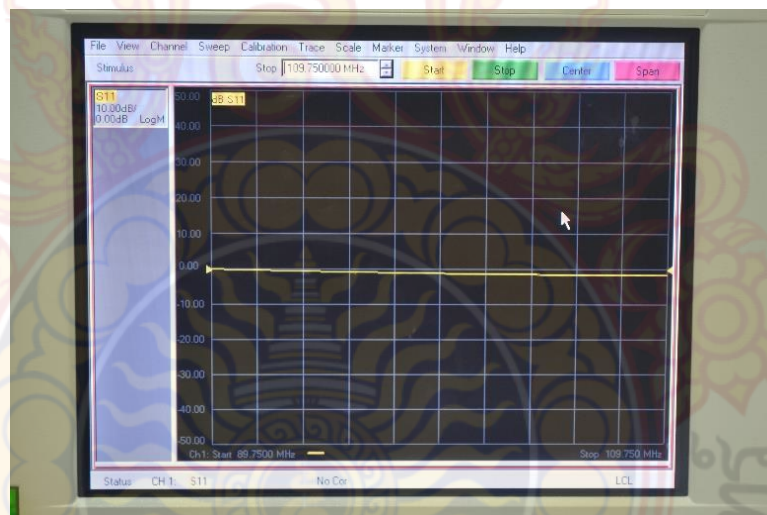
ภาพที่ 48 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น N5230A สามารถกำหนดความถี่ได้ตั้งแต่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งก่อนใช้งานจะต้องทำการ ปรับเทียบเครื่อง (Calibration) เครื่องก่อนเพื่อให้ได้ค่าที่ได้มีความถูกต้องที่สุดในการทดสอบต่อระบบที่วัดระวาง อุปกรณ์ที่จะเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะต้องไม่ให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

#### 3.1 การปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 2 พอร์ต

1. ตั้งค่าย่านความถี่เริ่มต้นที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ และตั้งค่าสิ้นสุดที่ย่านความถี่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังภาพที่ 49 และภาพที่ 50
2. ปรับเทียบเครื่องให้กดไปที่ปุ่ม Calibration แล้วเลือก Calibration Wizard กดปุ่ม Next และเลือก 2 พอร์ต (2Port) ตามภาพที่ 51



ภาพที่ 49 การตั้งค่าเริ่มต้นความถี่ที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

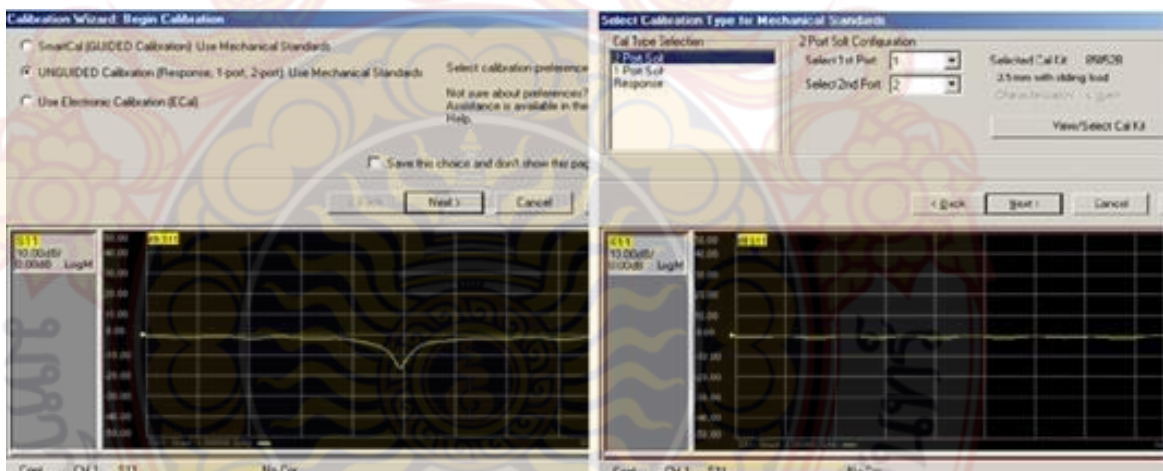


ภาพที่ 50 การตั้งค่าสิ้นสุดความถี่ที่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

ภาพที่ 49 แสดงให้เห็นถึงการตั้งค่าความถี่เริ่มต้นในการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายภาพจากจอเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ส่วนภาพที่ 50 เป็นการตั้งค่าความถี่สิ้นสุดในการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



ภาพที่ 51 การปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



ภาพที่ 52 การเลือกปรับเทียบแบบ 2 พอร์ต

จากภาพที่ 51 แสดงขั้นตอนการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Calibration) เพื่อให้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทำการตรวจวัดค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

จากภาพที่ 52 แสดงขั้นตอนการเลือกการปรับเทียบแบบ 1 พอร์ต (1Port) การเลือกแบบ 1 พอร์ต เมื่อทำการเลือกแบบนี้จะสามารถใช้สายที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้แค่ 2 สายเท่านั้น

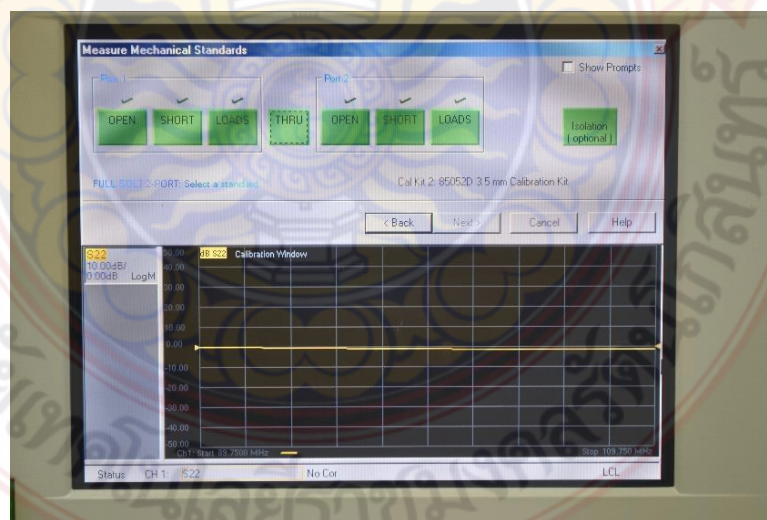


3. นำหัวโหลดปรับเทียบแบบเปิด (OPEN), หัวโหลดปรับเทียบแบบชอร์ต (SHORT) และ หัวปรับเทียบแบบโหลด (BROAD BAND LOAD) มาต่อเข้ากับพอร์ต 1 (Port1) และ พอร์ต 2 (Port2) แล้วเลือกหัวปรับเทียบแบบตัวเมีย (Female Load) ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 การต่อโหลดเข้ากับสายของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

4. คลิกเลือก OPEN, SHORT, LOADS ที่พอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) ตามลำดับ หลังจากนั้นนำปลายสายของข้างต่อเข้าหากัน เลือกคำสั่ง THRU ดังภาพที่ 54 และ ภาพที่ 55



ภาพที่ 54 กำหนดค่าใช้งาน OPEN, SHORT, LOAD และ THRU

จากภาพที่ 53 แสดงการต่อหัวโหลดแบบต่างๆ เพื่อทำการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์  
โครงข่ายที่ใช้งานแบบ 2 พอร์ต ส่วนภาพที่ 54 แสดงการเลือกโหมดปรับเทียบด้วยโหลดแบบ OPEN,  
SHORT, BROAD BAND LOAD ทั้งพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2)

5. ต่อสายพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (port2) เข้าด้วยกันหลังจากนั้นเลือกคำสั่ง THRU



ภาพที่ 55 การต่อพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เข้าด้วยกัน

จากภาพที่ 55 แสดงการต่อสายพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เข้าด้วยกันเพื่อใช้  
คำสั่ง THRU ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



ภาพที่ 56 การเลือกค่า THRU

6. ขั้นตอนสุดท้ายต่อหัวปรับเทียบแบบโพลด (BROAD BAND LOAD) เข้ากับพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เลือกคำสั่ง Isolation (optional)



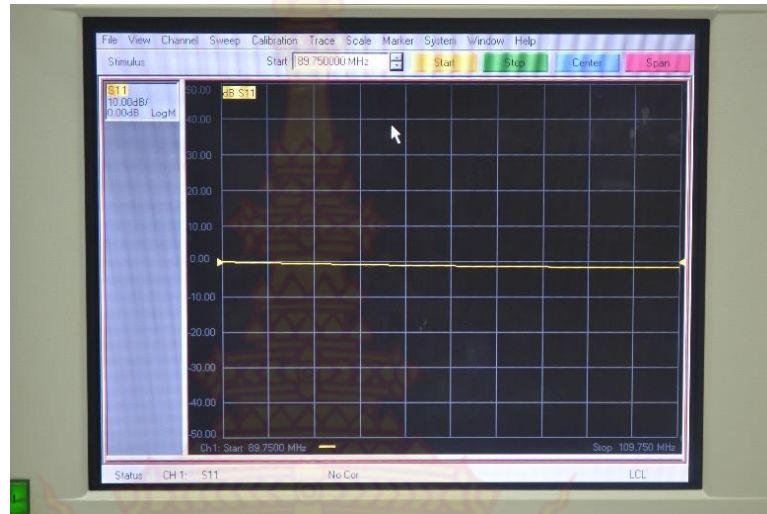
ภาพที่ 57 การต่อพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) เข้ากับหัวปรับเทียบแบบโพลด (BROADBAND LOAD)

จากภาพที่ 56 แสดงการใช้คำสั่งในการปรับเทียบของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

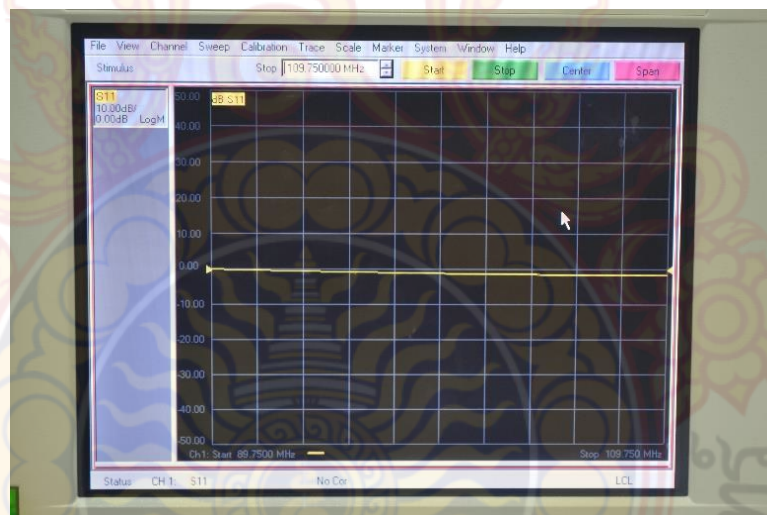
จากภาพที่ 57 เป็นการต่อหัวปรับเทียบแบบโพลด (BROAD BAND LOAD) เข้ากับพอร์ต 1 (Port1) และพอร์ต 2 (Port2) และเลือกคำสั่ง Isolation (optional) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการปรับเทียบแบบ 2 พอร์ต (2Port)

### 3.2 การปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 1 พอร์ต

1. ตั้งค่านานความถี่เริ่มต้นที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ และตั้งค่าสิ้นสุดที่ย่านความถี่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังภาพที่ 58 และภาพที่ 59



ภาพที่ 58 การตั้งค่าความถี่เริ่มต้นที่ 89.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 59 การตั้งค่าความถี่สิ้นสุดที่ 109.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

จากภาพที่ 58 การตั้งค่าความถี่เริ่มต้นในการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ภาพจากจอเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

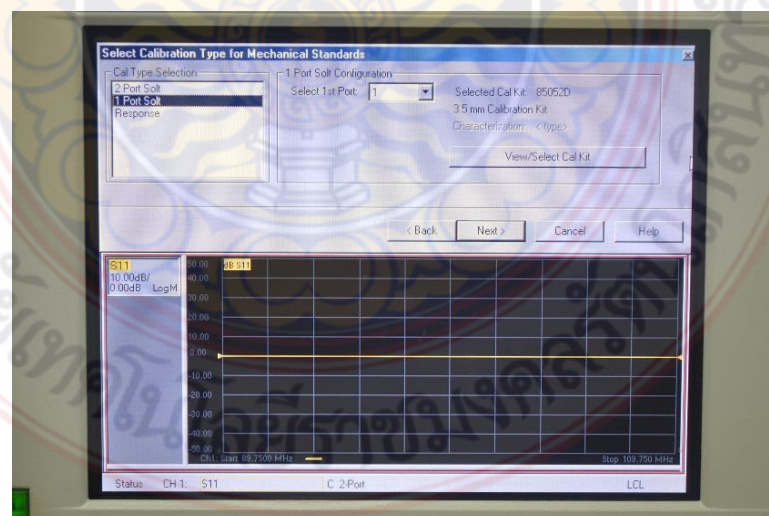
จากภาพที่ 59 การตั้งค่าความถี่สิ้นสุดในการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ภาพจากจอเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

2. กดที่ปุ่ม Calibration แล้วเลือก Calibration Wizard กดปุ่ม Next และเลือกคำสั่ง 1 พอร์ต (1Port)



ภาพที่ 60 เลือกคำสั่ง Calibration Wizard

3. เลือกคำสั่ง 1 พอร์ต (1Port) เพื่อทำการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 1 พอร์ต (1Port)



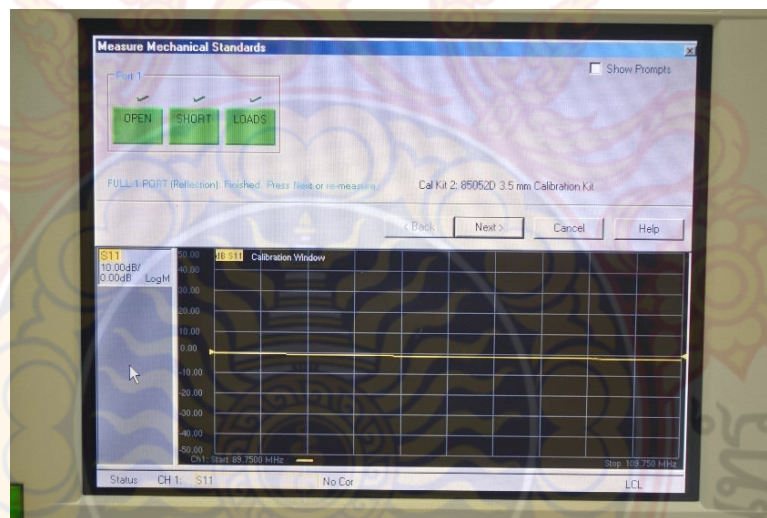
ภาพที่ 61 การเลือก 1 พอร์ต (1 port)

ภาพที่ 60 แสดงขั้นตอนการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Calibration) เพื่อให้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทำการตรวจวัดค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

ภาพที่ 61 แสดงขั้นตอนการเลือกการปรับเทียบแบบ 1 พอร์ต (1Port) การเลือกแบบ 1 พอร์ต เมื่อทำการเลือกแบบนี้จะสามารถใช้สายที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้แค่ 1 สายเท่านั้น

4. นำหัวโหนดปรับเทียบแบบเปิด (OPEN), หัวโหนดปรับเทียบแบบชอร์ต (SHORT) และหัวปรับเทียบแบบโหลด (BROAD BAND LOAD) มาต่อเข้ากับพอร์ต 1 (Port1) และแล้วเลือกหัวปรับเทียบแบบตัวเมีย (Female Load) ดังภาพที่ 53

5. เลือกคำสั่ง OPEN, SHORT, LOADS ตามลำดับ เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการปรับเทียบ (Calibration) แบบ 1 พอร์ต (Port1)

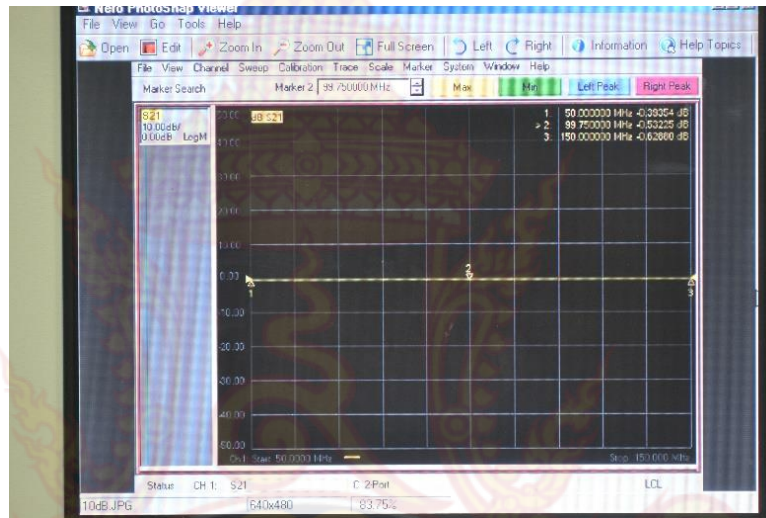


ภาพที่ 62 การต่อโหนด OPEN, SHORT, LOADS กับ Port1

ภาพที่ 62 ทำการปรับเทียบด้วยหัวโหนดปรับเทียบแบบเปิด (OPEN), หัวโหนดปรับเทียบแบบชอร์ต (SHORT) และหัวปรับเทียบแบบโหลด (BROAD BAND LOAD) แล้วคลิกเลือกตามคำสั่งตามแต่ละโหนดที่ต่อเข้ากับพอร์ต1 (Port1) เป็นขั้นตอนสุดท้าย

#### 4. การวัดและทดสอบหาค่าการสูญเสียในสายนำสัญญาณ RG-8

1. ให้ปรับเทียบ (Calibration) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 2 Port ดังหัวข้อที่ 3.1
2. ต่อสายหัวสายและ ปลายสายของสายโคแอกเชียล RG-8 เข้ากับ Port1 และ Port2
3. ตั้ง Marker ที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 50, 99.75, 150 เมกกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ



ภาพที่ 63 ผลการวัดค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณ RG-8

#### ตารางที่ 4 การทดสอบวัดค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 ความยาว 7.92 เมตร

ความถี่ (MHz)	Loss (dB)
50.00	-0.393
99.75	-0.532
150.00	-0.628

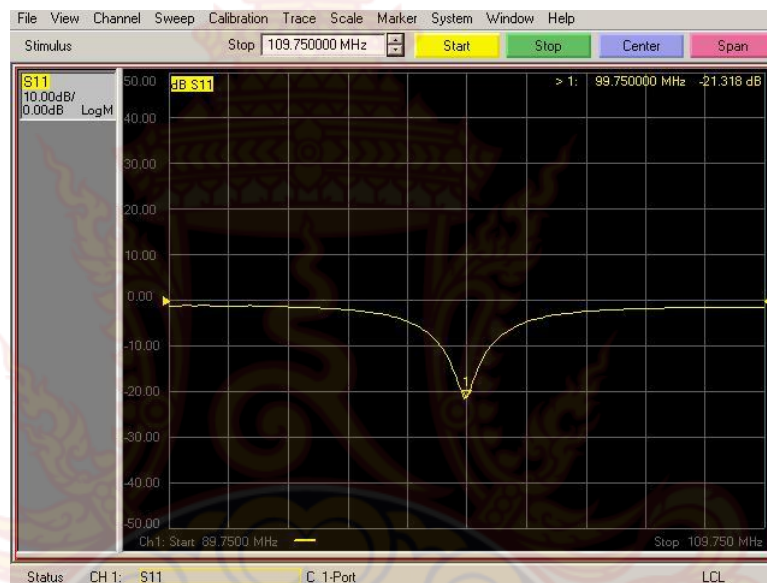
ภาพที่ 63 แสดงค่าความสูญเสียของสาย RG-8 ความยาว 7.92 เมตร ที่ความถี่ 50, 99.75, 150 เมกกะเฮิรตซ์ มีค่าการสูญเสียของสาย RG-8 เท่ากับ -0.393 dB, -0.532 dB, -0.628 dB ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 แสดงค่าการสูญเสียภายในสายนำสัญญาณ RG-8 มีความยาวเท่ากับ 7.92 เมตร ที่ความถี่ 50, 99.75, 150 เมกกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

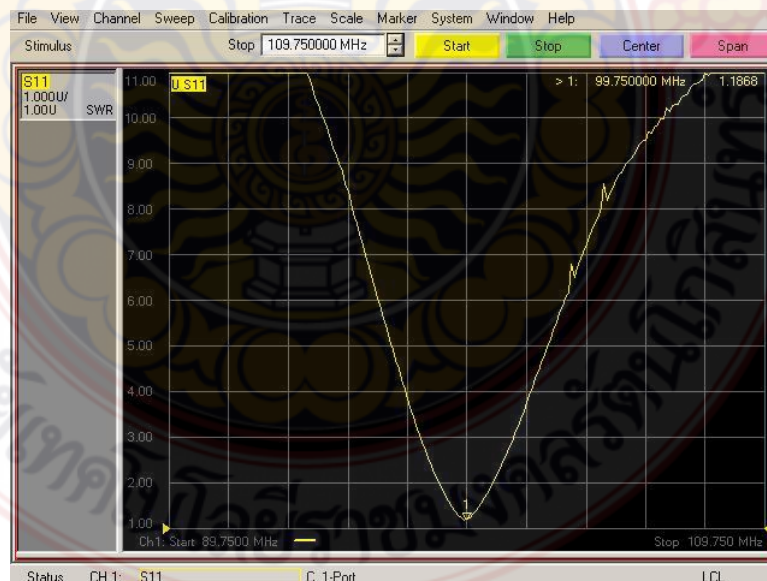
## 5. การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

1. การทดสอบวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ได้ผลเป็นดังภาพที่ 64

2. การทดสอบวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ ได้ผลเป็นดังภาพที่ 65



ภาพที่ 64 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1



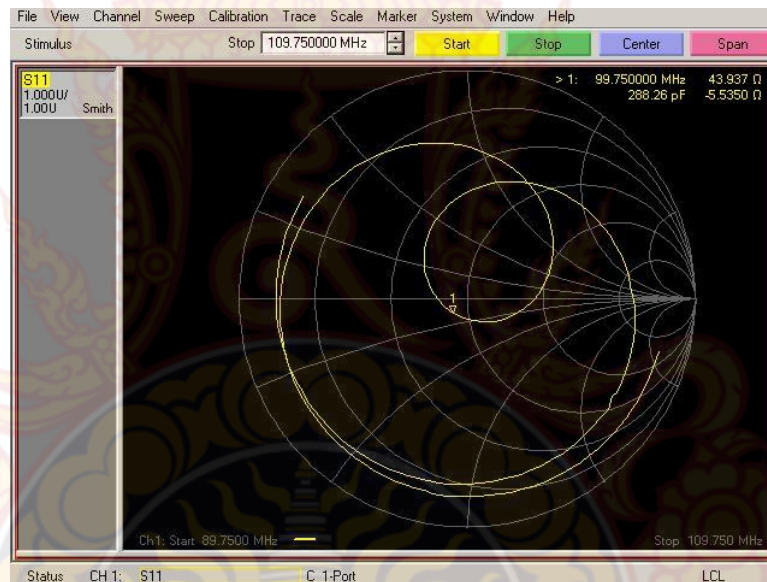
ภาพที่ 65 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1



ภาพที่ 64 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ -21.318 dB

ภาพที่ 65 แสดงให้เห็นถึงกราฟอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) เท่ากับ 1.186

3. การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

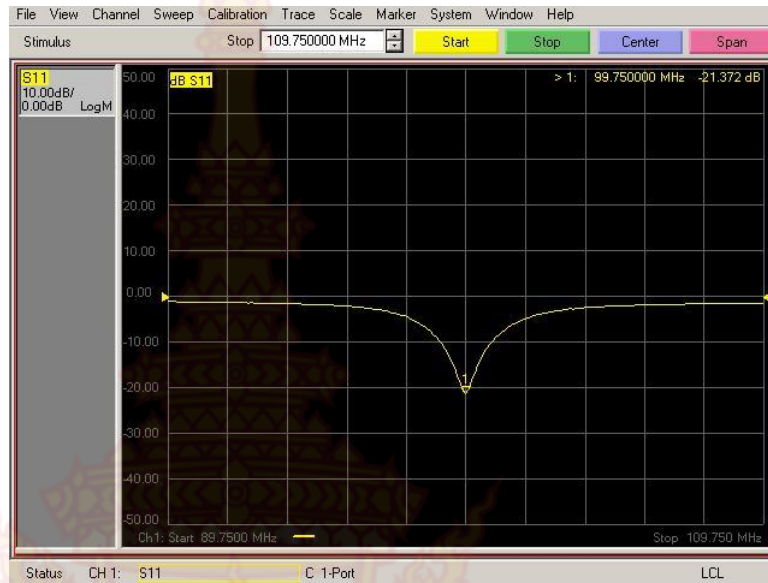


ภาพที่ 66 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1

จากภาพที่ 66 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ เท่ากับ 43.937 โอห์ม

6. การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตัวที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

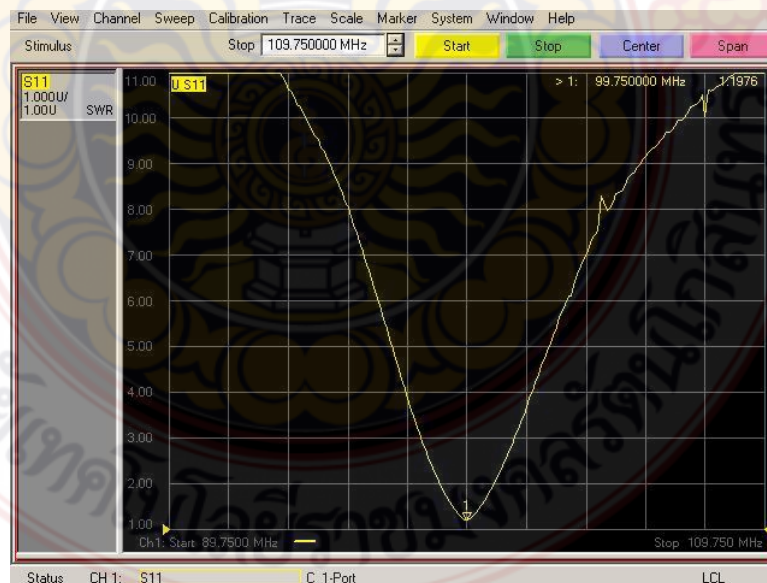
1. การทดสอบวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ ตัวที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 67 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2

จากภาพที่ 67 ภาพแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์ มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ -21.372 dB

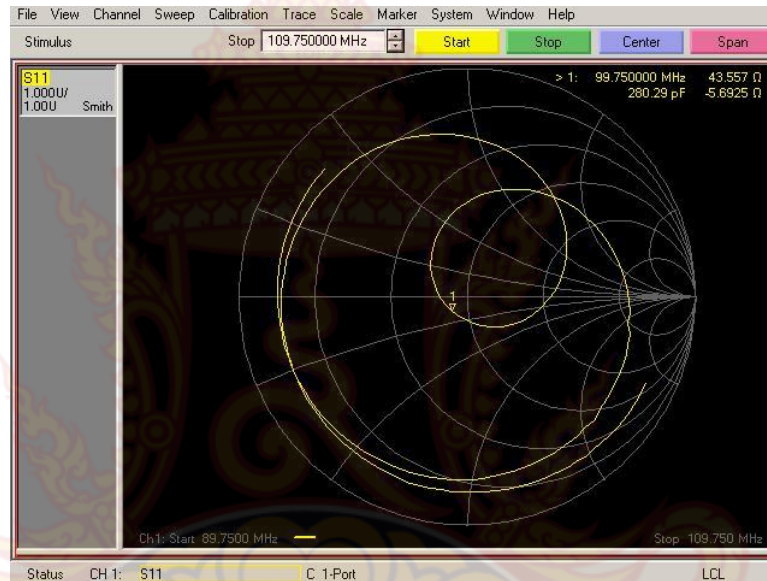
2. การทดสอบวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์



ภาพที่ 68 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2

จากภาพที่ 68 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (*VSWR*) ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (*VSWR*) เท่ากับ 1.197

3. การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 69 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2

จากภาพที่ 66 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์เท่ากับ 43.557 โอห์ม

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

สายอากาศตัวที่ 1		
ค่าสูญเสียย้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
-21.318	1.186	43.937
สายอากาศตัวที่ 2		
ค่าสูญเสียย้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
-21.320	1.197	43.550

ตารางที่ 5 เป็นผลการทดสอบ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และ ค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 และสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 ตามลำดับ

## 7. การทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



ภาพที่ 70 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (RF Signal Generator)

ภาพที่ 70 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ยี่ห้อ AGILENT รุ่น MXG Analog Signal Generator N51817 สามารถกำหนดความถี่ได้ตั้งแต่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ์ และสามารถสร้างกำลังงานสัญญาณตั้งแต่ -110 dBm ถึง 17 dBm ในที่นี้เราใช้กำหนดความถี่ที่ 99.75 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังงานที่ 0 dBm

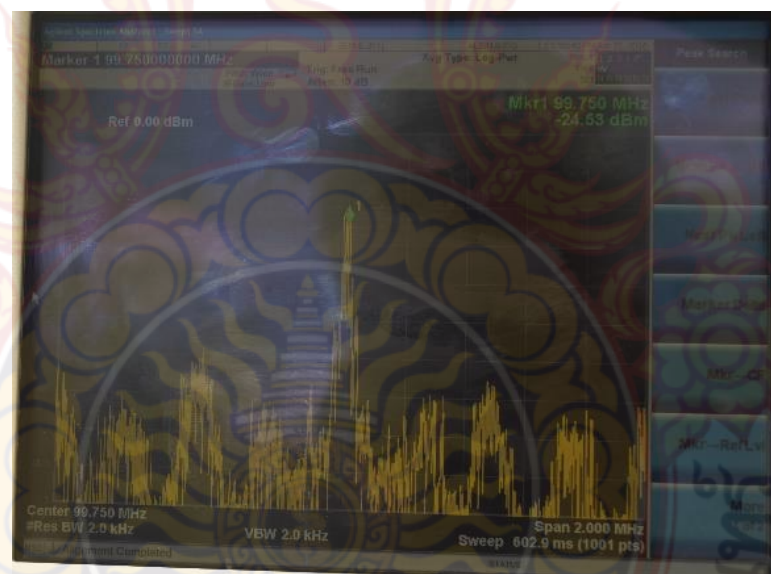


ภาพที่ 71 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)

ภาพที่ 71 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น EXA Signal Analyzer N90107 สามารถวัดกำลังงานของสัญญาณได้สูงสุด 30 dBm และสามารถกำหนดความถี่ได้ตั้งแต่ 9 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 13.6 กิกะเฮิรตซ์ ใช้อ่านค่าแอมพลิจูดที่รับค่าได้จากสายอากาศตัวส่งสัญญาณ

### 7.1 การวัดค่าแพทเทิร์นของสายอากาศที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์

การวัดค่าแพทเทิร์น จะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) และเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (RF Signal Generator) ในการทดสอบ นี้จะตั้งสายอากาศรับและสายอากาศตัวส่งในระยะห่าง 4 เมตร ในการทดสอบจะหมุนสายอากาศตัวรับครึ่งละ 10 องศา และใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในการวัดกำลังงานของสัญญาณที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์ ส่วนสายอากาศตัวส่งจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณผลิตความถี่ที่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์ และกำลังงานที่ 0 dBm



ภาพที่ 72 ค่ากำลังที่วัดได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์

ภาพที่ 72 ภาพจากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ต่อกับสายอากาศตัวรับ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสามารถวัดค่ากำลังงานได้ -24.53 dBm ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์



ภาพที่ 73 การกำหนดค่าเครื่องกำเนิดความถี่

ภาพที่ 73 ภาพจากจอเครื่องกำเนิดสัญญาณ ทำการตั้งค่าเครื่องให้ทำการผลิต ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์ และแรงดันที่ 0 dBm เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณให้กับสายอากาศตัวส่ง



ภาพที่ 74 การวางระยะห่างของสายอากาศรับ-ส่ง

ภาพที่ 74 แสดงพื้นที่ในการติดตั้งสายอากาศตัวรับและตัวส่ง ระยะห่างของสายอากาศตัวรับ และตัวส่งห่างจากกัน 4 เมตร และมีความสูงจากพื้น 3 เมตร

ตารางที่ 6 ผลการวัดค่ากำลังงานในแนวตั้ง (E-plane) ที่รับค่าได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์

องศา	กำลังงานที่รับได้ (dBm)	ค่ากำลังงานนอร์มัลไลเซชัน (dB)
0	-18.90	0
10	-19.21	-0.31
20	-19.43	-0.53
30	-19.75	-0.85
40	-19.81	-0.91
50	-20.41	-1.51
60	-19.30	-0.83
70	-20.69	-1.79
80	-20.80	-1.90
90	-21.47	-2.57
100	-20.10	-1.20
110	-20.13	-1.23
120	-19.28	-0.38
130	-19.19	-0.29
140	-19.72	-0.82
150	-19.59	-0.66
160	-19.10	-0.20
170	-19.22	-0.32
180	-19.29	-0.39
190	-19.24	-0.34
200	-19.14	-0.24
210	-19.58	-0.68
220	-19.82	-0.92
230	-19.52	-0.62
240	-19.84	-0.94
250	-20.52	-1.62
260	-22.00	-3.10

ตารางที่ 6 (ต่อ)

องศา	กำลังงานที่รับได้ (dBm)	ค่ากำลังงานนอร์มัลไลเซชัน (dB)
270	-19.93	-1.03
280	-19.42	-0.52
290	-20.62	-1.71
300	-19.90	-1.00
310	-20.30	-1.40
320	-19.89	-0.99
330	-19.83	-0.93
340	-19.52	-0.62
350	-19.25	-0.35
360	-19.11	-0.21

จากตารางที่ 6 แสดงค่ากำลังงานที่รับได้ ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึงมุม 360 องศา ที่ระนาบแนวตั้ง (E-Plane) โดยมีระยะห่างจากสายอากาศตัวรับและตัวส่ง 4 เมตร ความสูง 3 เมตร



ตารางที่ 7 ผลการวัดค่ากำลังงานในแนวนอน (H-Plane) ที่รับค่าได้ที่ความถี่ 99.75 เมกกะเฮิรตซ์

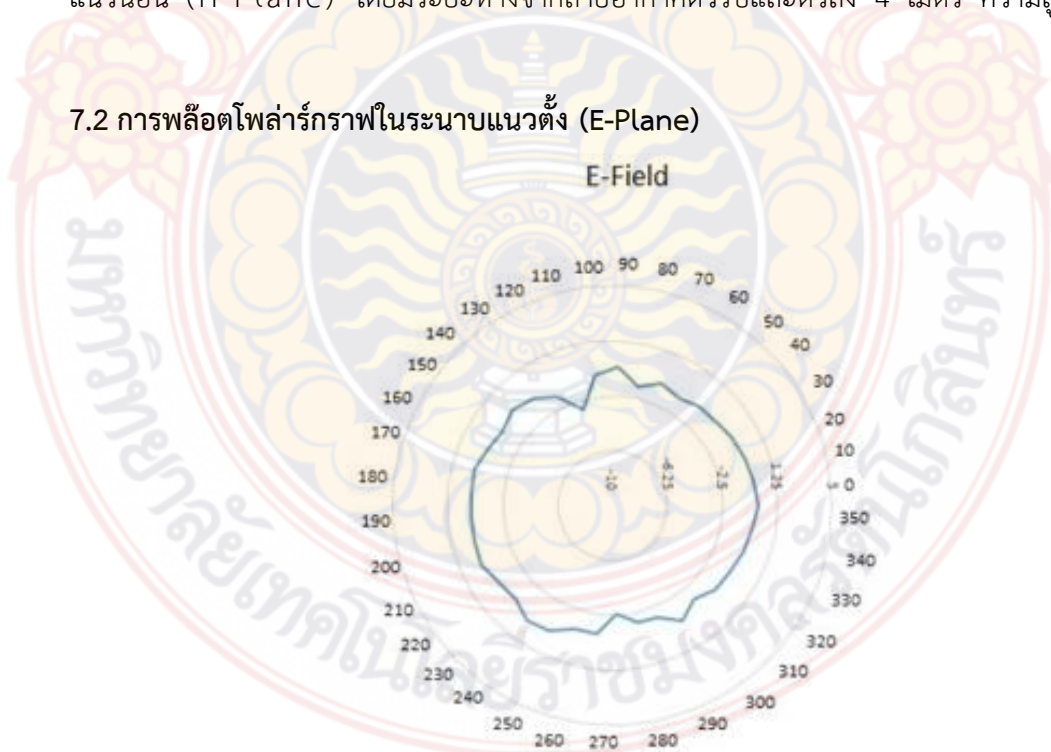
องศา	กำลังงานที่รับได้ (dBm)	ค่ากำลังงานนอร์มัลไลเซชัน (dB)
0	- 23.1	0
10	- 24.51	-1.37
20	- 26.27	-3.13
30	- 26.58	-3.44
40	- 29.12	-5.98
50	- 30.74	-7.6
60	- 30.23	-7.09
70	- 31.96	-8.82
80	- 31.9	-8.76
90	- 31.58	-8.44
100	- 30.03	-6.89
110	- 29.35	-6.21
120	- 24.15	-0.7
130	- 24.68	-1.54
140	- 25.92	-2.78
150	- 24.8	-1.66
160	- 24.93	-1.79
170	- 24.99	-1.85
180	- 24.74	-1.6
190	- 25.01	-1.87
200	- 25.24	-2.1
210	- 24.4	-1.26
220	- 23.64	-0.5
230	- 23.7	-0.56
240	- 24.0	-0.87
250	- 27.32	-4.18
260	- 27.64	-4.5

ตารางที่ 7 (ต่อ)

องศา	กำลังงานที่รับได้ (dBm)	ค่ากำลังงานนอร์มัลไลเซชัน (dB)
270	- 31.62	-8.48
280	- 32.78	-9.64
290	- 32.93	-9.78
300	- 32.22	-9.08
310	- 30.34	-7.2
320	- 29.61	-6.47
330	- 26.77	-3.63
340	- 23.41	-0.27
350	- 23.42	-0.28
360	- 23.91	-0.77

จากตารางที่ 7 แสดงค่ากำลังงานที่รับได้ตั้งแต่มุม 0 องศา ถึงมุม 360 องศา ที่ระนาบแนวนอน (H-Plane) โดยมีระยะห่างจากสายอากาศตัวรับและตัวส่ง 4 เมตร ความสูง 3 เมตร

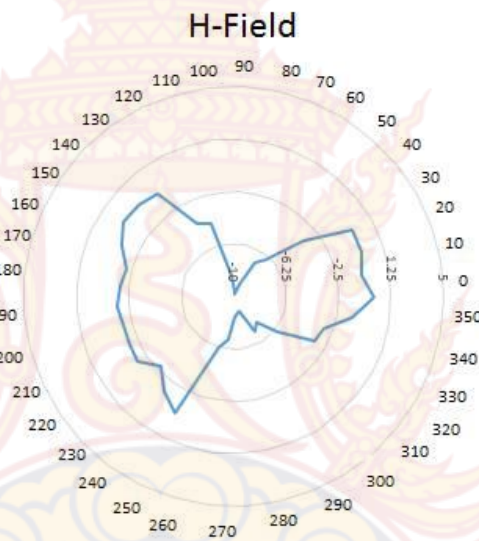
### 7.2 การพล็อตโพลาร์กราฟในระนาบแนวตั้ง (E-Plane)



ภาพที่ 75 แพทเทิร์นแบบ Polar graph แนวตั้ง (E-Plane)

ภาพที่ 75 แสดงรูปแบบของแพทเทิร์นระนาบ E ของสายอากาศ โดยนำค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเริ่มจากมุม 0 ถึง 360 องศา นำค่าที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่วัดได้ทำการ Normalized นำค่าที่ Normalized แล้วมาพล็อตกราฟแบบ Polar graph

### 7.3 การพล็อตโพลาร์กราฟในระนาบแนวนอน (H-Plane)



ภาพที่ 76 แพทเทิร์นแบบ Polar graph แนวนอน (H-Plane)

ภาพที่ 76 แสดงรูปแบบของแพทเทิร์นระนาบ H ของสายอากาศโดย นำค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเริ่มจากมุม 0 ถึง 360 องศา นำค่าที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่วัดได้ทำการ Normalized นำค่าที่ Normalized แล้วมาพล็อตกราฟแบบ Polar graph

### 7.4 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศตัวรับ-ตัวส่ง

1. นำค่าในตารางที่ 6 ที่มุม 0 องศา เป็นตัวแปร  $P_r$
2. กำหนด  $P_t$  เท่ากับ 0 dBm อ้างอิงจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ
3. ค่า  $l_t$  และ  $l_r$  มาจากตารางที่ 4 จากสมการที่ 12

$$P_r = P_t + \ell_t + \ell_r + G_t + G_r + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)$$

$$-18.90 = 0 + 0.53 + 0.53 + G_t + G_r + 24$$

$$G_t + G_r = 6.16$$

$$G_t = G_r = \frac{6.16}{2} = 3.8 \text{ dBi}$$

อัตราขยายของสายอากาศเซอรัลาร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 3.8 dBi

## 8. การทดสอบสายอากาศร่วมกับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มที่ผ่านมาตรฐาน

### 8.1 เครื่องเอ็กไซเตอร์



ภาพที่ 77 เครื่องเอ็กไซเตอร์

จากภาพที่ 77 เครื่องเอ็กไซเตอร์คือเครื่องผลิตความถี่และมอดัสสัญญาณต่างๆ ให้อยู่ในความถี่ที่ต้องการเครื่องสามารถปรับความถี่ตามที่ต้องการได้ แต่เอ็กไซเตอร์จะผลิตสัญญาณที่กำลังไม่สูงมาก จึงต้องใช้เครื่องส่งเป็นตัวช่วยในการส่ง

## 8.2 เครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มขนาด 500 วัตต์



ภาพที่ 78 เครื่องส่งเอฟเอ็ม

จากภาพที่ 78 เครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ที่รวมเอาเครื่องเอ็กไซเตอริ์ไว้ภายในเครื่องส่งเดียวกับเครื่องขยายกำลังงานของสัญญาณ ทำให้สะดวกต่อผู้ใช้งาน

## 8.3 มิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ



ภาพที่ 79 มิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ

จากภาพที่ 79 เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับยี่ห้อ DAIWA รุ่น CN-801 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ สามารถปรับย่านการใช้งานได้ 3 ย่าน คือ ย่าน 20

วัตต์, 200วัตต์, 2กิโลวัตต์ ซึ่งเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับยี่ห้อ DAIWA รุ่น CN-801 จะแสดงผลจากจอแบบเข็ม มีลักษณะการใช้งานดังนี้

1. ต่อสายเอาต์พุตเครื่องอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับอินพุตของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็ม
2. ต่อเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุเข้ากับอินพุตของเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อน
3. ต่อเอาต์พุตของเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนเข้ากับสายอากาศ



ภาพที่ 80 รูปเครื่องส่งอิเล็กทรอนิกส์และมิเตอร์วัดกำลังงาน

ภาพที่ 80 แสดงการทดสอบวัดกำลังงานว่ามีผลอย่างไรกับสายอากาศที่จะส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับ โดยทำการต่อเครื่องอิเล็กทรอนิกส์, เครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็ม, และมิเตอร์วัดค่าการสะท้อนกลับ โดยสามารถจ่ายกำลังงานที่ 20 วัตต์, 300 วัตต์, 400 วัตต์, 500 วัตต์ ตามลำดับ

4. ปรับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มให้มีระดับกำลังงานที่ 20 วัตต์



ภาพที่ 81 เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 20 วัตต์

ภาพที่ 81 แสดงจอเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับเพื่อวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน, การสะท้อนกลับ, และกำลังงานที่วัดได้ในขณะที่จ่ายกำลังงานให้แก่ระบบวิทยุ ที่ 20 วัตต์

5. ปรับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มให้มีระดับกำลังงานที่ 300 วัตต์



ภาพที่ 82 เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 300 วัตต์

ภาพที่ 82 แสดงจอเครื่องมือวัดกำลังงานและการสะท้อนกลับเพื่อวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน, การสะท้อนกลับ, และกำลังงานที่วัดได้ในขณะที่ส่งออกกระจายเสียงได้ 300 วัตต์

6. ปรับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มให้มีระดับกำลังงานที่ 400 วัตต์



ภาพที่ 83 เครื่องมือวัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 400 วัตต์

ภาพที่ 83 แสดงจอเครื่องมือวัดกำลังงานและการสะท้อนกลับเพื่อวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน, การสะท้อนกลับ, และกำลังงานที่วัดได้ในขณะที่ส่งออกกระจายเสียงได้ 400 วัตต์

7. ปรับเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มให้มีระดับกำลังงานที่ 460 วัตต์





ภาพที่ 84 เครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ ณ กำลังงานเครื่องส่งขนาด 460 วัตต์

ภาพที่ 84 แสดงจอเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับเพื่อวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน, การสะท้อนกลับ, และกำลังงานที่วัดได้ในขณะที่ส่งออกกระจายเสียงได้ 460 วัตต์

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการจ่ายกำลังงานให้กับสายอากาศ

กำลังงานที่ส่ง (วัตต์)	อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน	หมายเหตุ
20	1.1	เข็มอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อยู่ที่ 1.1
300	1.1	เข็มอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อยู่ที่ 1.1
400	1.1	เข็ม อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อยู่ที่ 1.1
460	1.1	เข็ม อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน อยู่ที่ 1.1
มากกว่า 500	-	ไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากเครื่องส่งสามารถจ่ายกำลังงานได้สูงสุดที่ 500 วัตต์

จากตารางที่ 8 แสดงสถานะของเครื่องมิเตอร์วัดกำลังงานและการสะท้อนกลับ เมื่อทำการปรับเพิ่มกำลังงานจากเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็ม ที่ 20, 300, 400, 460 และมากกว่า 500 วัตต์ ตามลำดับ

#### 8.4 การทดสอบแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

1. ให้ปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ 1 พอร์ต ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้า
2. ติดตั้งสายอากาศสูงจากพื้นดิน 1.5 เมตร (ประมาณ  $\lambda / 2$ )



ภาพที่ 85 ลักษณะการจับยึดสายอากาศกับขาตั้ง

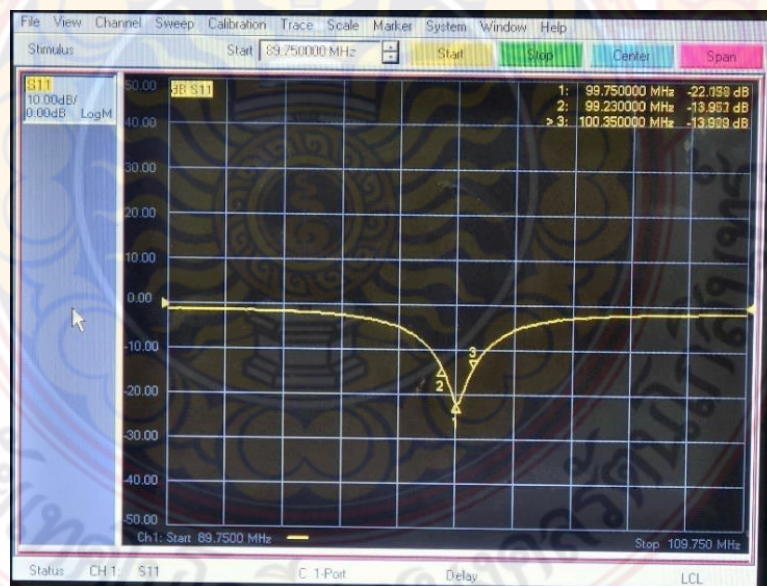
จากภาพที่ 85 ทำการติดสายอากาศเซอร์คูลาร์กับเสาที่ความสูง 1.5 เมตร (ประมาณ  $\lambda / 2$ ) เพื่อทำการทดสอบแบนด์วิดท์ของสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

3. ต่อสายนำสัญญาณ RG-8 ปลายขั้วด้านหนึ่งต่อกับคอนเนคเตอร์ของสายอากาศ ส่วนอีกด้านต่อเข้ากับพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
4. ตั้ง Marker ทั้งหมด 3 จุด จุดแรกที่มีความถี่ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ จุดที่ 2 ตั้งที่ความถี่ด้านสูงของช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) เท่ากับ 1.5 หรือที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ -14 dB และจุดที่ 3 ตั้งที่ความถี่ด้านต่ำของช่วงความถี่ที่ใช้งานที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ( $VSWR$ ) เท่ากับ 1.5 หรือที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ประมาณ -14 dB



ภาพที่ 86 การวัดความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1

จากภาพที่ 86 แสดงแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 โดยมีความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 99.29 เมกกะเฮิร์ตซ์ ความถี่กลางเท่ากับ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ด้านสูงเท่ากับ 100.41 เมกกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ



ภาพที่ 87 การวัดความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2

จากภาพที่ 87 แสดงความกว้างแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 โดยมีความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 99.23 เมกกะเฮิร์ตซ์ ความถี่กลางเท่ากับ 99.75 เมกกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ด้านสูงเท่ากับ 100.35 เมกกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

### 8.5 การคำนวณหาแบนด์วิดท์

คำนวณความกว้างแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 1 จากสมการที่ 13

$$BW = f_U - f_L$$

$$BW = 100.41 \times 10^6 - 99.29 \times 10^6 = 1.12 \text{ เมกกะเฮิร์ตซ์}$$

คำนวณความกว้างแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ตัวที่ 2 จากสมการที่ 13

$$BW = f_U - f_L$$

$$BW = 100.35 \times 10^6 - 99.23 \times 10^6 = 1.12 \text{ เมกกะเฮิร์ตซ์}$$

ตารางที่ 9 แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

สายอากาศตัวที่	ความถี่ต่ำ (MHz)	ความถี่กลาง (MHz)	ความถี่สูง (MHz)	แบนด์วิดท์ (MHz)
1	99.29	99.75	100.41	1.21
2	99.23	99.75	100.35	1.21

จากตารางที่ 9 แสดงแบนด์วิดท์ของสายอากาศเซอร์คูลาร์ทั้ง 2 ตัว โดยสายอากาศทั้ง 2 ตัว มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.21 เมกกะเฮิร์ตซ์

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อพึงระวังในการทดสอบ

ตามที่โครงการวิจัย การออกแบบและพัฒนาสายอากาศเซอร์คูลาร์ที่ใช้ในระบบกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็ม ได้มุ่งหวังหารูปแบบการออกแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้ในการสร้างชิ้นงานจริง ด้วยการพิจารณาเทียบกับสายอากาศพื้นฐานที่มีขนาดความยาวครึ่งความยาวคลื่น ณ ความถี่ใช้งานนั้น สามารถสรุป ได้ดังนี้

#### 1. สรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบโครงวิจัยนี้เราจะใช้สายอากาศตัวส่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ กำหนดความถี่และกำลังงานที่ต้องการแล้วส่งสัญญาณไปยังสายอากาศตัวรับที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อวัดค่าที่รับกำลังงานได้ สรุปได้ว่าสามารถรับกำลังงานจากสายอากาศตัวส่งได้ แต่อาจมีสัญญาณอื่นๆ มารบกวนควรทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบวัดสัญญาณวิทยุ จากการทดสอบจะพบว่า

การทดสอบที่ 1 การจำลอง (Simulation) สายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio การทดสอบนี้เป็นการจำลองเพื่อหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศและแพทเทิร์นการกระจายสัญญาณ เพื่อนำมาเป็นตัวอ้างอิงในการสร้างสายอากาศตัวจริง

การทดสอบที่ 2 การหาจุดแมตซ์ด้วยเครื่อง MFJ-259b การทดสอบนี้เป็นทดสอบการแมตซ์สายอากาศเพื่อหาจุดแมตซ์คร่าวๆ เพราะความละเอียดของสเกลเครื่อง MFJ-259b มีความละเอียดไม่มากพอ แต่พอใช้ในการไกด์คร่าวๆ ในการปรับจุดแมตซ์ได้

การทดสอบที่ 3 การปรับเทียบเครื่องมือวัดก่อนที่จะใช้งานเพื่อการทดสอบสายนำสัญญาณและปรับหาจุดแมตซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย การทดสอบนี้จะเป็นการวัดหาค่า Loss ในสายนำสัญญาณและแมตซ์สายอากาศโดยตรงกับความถี่ที่ต้องการ ผลที่ทดสอบได้คือค่าสูญเสียในสายนำสัญญาณมีค่า  $-0.52$  dB และแมตซ์สายอากาศที่ความถี่  $99.75$  เมกกะเฮิรตซ์

การทดสอบที่ 4 การทดสอบจ่ายกำลังงานให้สายอากาศ การทดสอบนี้จะเป็นการกำหนดความถี่ที่ใช้งานและจ่ายกำลังให้สายอากาศตัวส่งแล้ววัดค่ากำลังงานที่วัดได้ โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับตัวรับมีความห่าง  $4$  เมตร และมีความสูงที่  $3$  เมตร เมื่อวัดได้ค่ากำลังงานเราจะนำมาคำนวณอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ

การทดสอบเหล่านี้ใช้ในการยืนยันว่าหลักแนวคิดในการออกแบบสายอากาศที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นมีความสะดวกในการสร้างและมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนค่อนข้างน้อย ผู้สนใจสามารถใช้สมการที่นำเสนอไว้ในรายงานวิจัยนี้เป็นค่าตั้งต้นในการสร้างและปรับจูนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ก็สามารถนำไปใช้งานกับระบบส่งกระจายเสียงย่านความถี่วิทยุเอฟเอ็มที่มีขนาดกำลังงาน 500 วัตต์ ได้เป็นอย่างดี โดยไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นในระบบส่งกระจายเสียงได้

## 2. ข้อพึงระวังในการทดสอบ

หากผู้ทดลองประกอบกิจการกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตจาก สำนักงาน กสทช. ต้องการนำหลักการที่ได้นำเสนอขึ้นไปสร้างเพื่อใช้งาน ผู้ใช้งานดังกล่าวควรมีความรู้ในการทดสอบสัญญาณพื้นฐาน การประกอบชิ้นงาน การเลือกใช้วัสดุ หากเมื่อประกอบเสร็จแล้วให้ทดสอบระบบด้วยการจ่ายกำลังงานจากเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่มีระดับกำลังงานต่ำๆ จากนั้นค่อยเสียก่อนและจะต้องมีเครื่องมือพื้นฐานที่สามารถหาซื้อได้ตามร้านขายเครื่องมือสื่อสารในระดับราคาสามถึงสี่พันบาทเพื่อใช้ป้อนเครื่องมือในการทดสอบการเกิดคลื่นสะท้อนซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ไม่พึงประสงค์ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องส่งวิทยุ

## บรรณานุกรม

- โมนอย ไกรฤกษ์, (2535), ทฤษฎีสายอากาศ, กรุงเทพมหานคร, พิสิกซ์เซ็นเตอร์
- รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์, (2538), พื้นฐานการสื่อสาร, พิมพ์ครั้งที่ 3, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ชัยมูล, (2556), วิศวกรรมสายอากาศ, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 2, ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- มิตรชัย จงเขี้ยวชำนาญ, กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์, (2556), โครงข่าย สายส่ง และการประยุกต์ใช้งานคุณสมบัติทางกายภาพของสแตนเลส [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2558, เข้าได้ถึงจาก: <http://www.siamstainless.com/?p=1038>
- ค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายนำสัญญาณ [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 16 ธันวาคม 2558, เข้าได้ถึงจาก: [http://www.hs8jyx.com/html/velocity\\_factor.html](http://www.hs8jyx.com/html/velocity_factor.html)
- ค่าความนำทางไฟฟ้าของสแตนเลส [ออนไลน์], สืบค้นเมื่อ 16 ธันวาคม 2558, เข้าได้ถึงจาก: <http://www.cygnus-instruments.com/support/velocity-table/>



ประวัติผู้วิจัย



## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล                      ผศ.ดร.กัณฑ์พงษ์ ศรีสถิตย์

2. ตำแหน่งปัจจุบัน            อาจารย์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

96 หมู่ 3 ถ.พุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม

โทรศัพท์: 02-441-6000 ต่อ 2632 และ 2667

โทรสาร: 02-441-6000 ต่อ 2632

มือถือ: 099-214-8833

e-mail: kunnthphong.sri@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, “ปี พ.ศ. 2555”

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม, “ปี พ.ศ. 2545”

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, “ปี พ.ศ. 2539”

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Passive & Active Microwave Devices and Circuits

Wireless Communication Circuits and Systems

Linearization Techniques in Power Amplifier

RF CMOS Integrated Circuit Designs

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

1. นักวิจัยร่วมในโครงการ วงจรกรองแถบผ่านย่านไมโครเวฟแบบคาวิตีสำหรับสถานีสื่อสารไร้สาย โดยมี ผศ.ดร.มิตรชัย จงเขี้ยวชำนาญ เป็นหัวหน้าโครงการฯ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรีประจำปี 2547 (IPUS) รหัสโครงการ FE0019/47 และการสนับสนุนการทำงานจากบริษัทไมโครเวฟเทคโนโลยีคอร์ปอเรชัน จำกัด
2. นักวิจัยร่วม ในการออกแบบวงจรรขยายกำลังโตเฮอร์ตีแบบวงจรรวมไมโครเวฟ (Monolithic Microwave Integrated Circuits: MMICs) ร่วมกับศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์มหานคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประจำปี 2548 เป็นระยะเวลา 6 เดือน
3. นักวิจัยร่วม ในโครงการนวัตกรรม “วิทยุชุมชน” ร่วมกับห้องปฏิบัติการไมโครเวฟและสายอากาศ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประจำปี 2548 ระยะเวลา 6 เดือน
4. หัวหน้าโครงการวิจัยและพัฒนา : ชื่อโครงการวิจัย “วงจรดูเพล็กซ์เซอร์แบบคาวิตีสำหรับระบบสื่อสารแบบ CDMA2000-1X” ทุนอุดหนุนการวิจัยจากบริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) ประจำปี 2548 ระยะเวลา 10 เดือน งบประมาณ 310,000 บาท
5. นักวิจัยในโครงการ “ระบบสื่อสารดิจิทัลไร้สาย” สำหรับชุดโครงการระบบเฝ้าระวังแบบไร้สาย ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม (สวพ.กท.) ประจำปี 2548 ระยะเวลา 1 ปี
6. นักวิจัยผู้ช่วยในโครงการ เมธีวิจัยอาวุโส ตั้งแต่ปี 2549-2550 ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยมี ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ สุระกำพลธร เป็นหัวหน้ากลุ่มวิจัย
7. นักวิจัยผู้ช่วยในโครงการ เครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา ปี 2549 ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2549 – 31 มีนาคม 2553 ภายใต้อำนวยการของกลุ่มวิจัยด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการสื่อสาร ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ทุนโครงการพัฒนากลุ่มวิจัย โดยมี ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ สุระกำพลธร เป็นหัวหน้ากลุ่มวิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล                      ดร.พิชานันท์ วงศ์ศิริธร

2. ตำแหน่งปัจจุบัน            อาจารย์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
96 หมู่ 3 ถ.พุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม  
โทรศัพท์: 02-441-6000 ต่อ 2632 และ 2667  
โทรสาร: 02-441-6000 ต่อ 2632  
มือถือ: 098-941-7466  
e-mail: pitchanun.won@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรม  
ศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม (เกียรตินิยมอันดับ2)

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- ระเบียบวิธีการทางความถี่สูง
- การออกแบบสายอากาศ
- เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

1. “RFID Sensor for Quality Determination of Some Agricultural Products” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2551: ผู้ร่วมโครงการวิจัย
2. “สายอากาศเท็กย่านความถี่กว้างสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง” ได้รับทุนงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2556 ระยะเวลา 1 ปี :ผู้ร่วมโครงการวิจัย

