

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสายอากาศรยคู่สำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง

DESIGN OF BI-CONICAL ANTENNA FOR WIDE BAND  
APPLICATIONS



โดย

นายอดิพงษ์ เหมือนนดม

นายอภิรักษ์ เรืองเกษรกรกิจ

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 71940

วัน,เดือน,ปี - 6 ส.ย. 2550

b. 117 60579  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

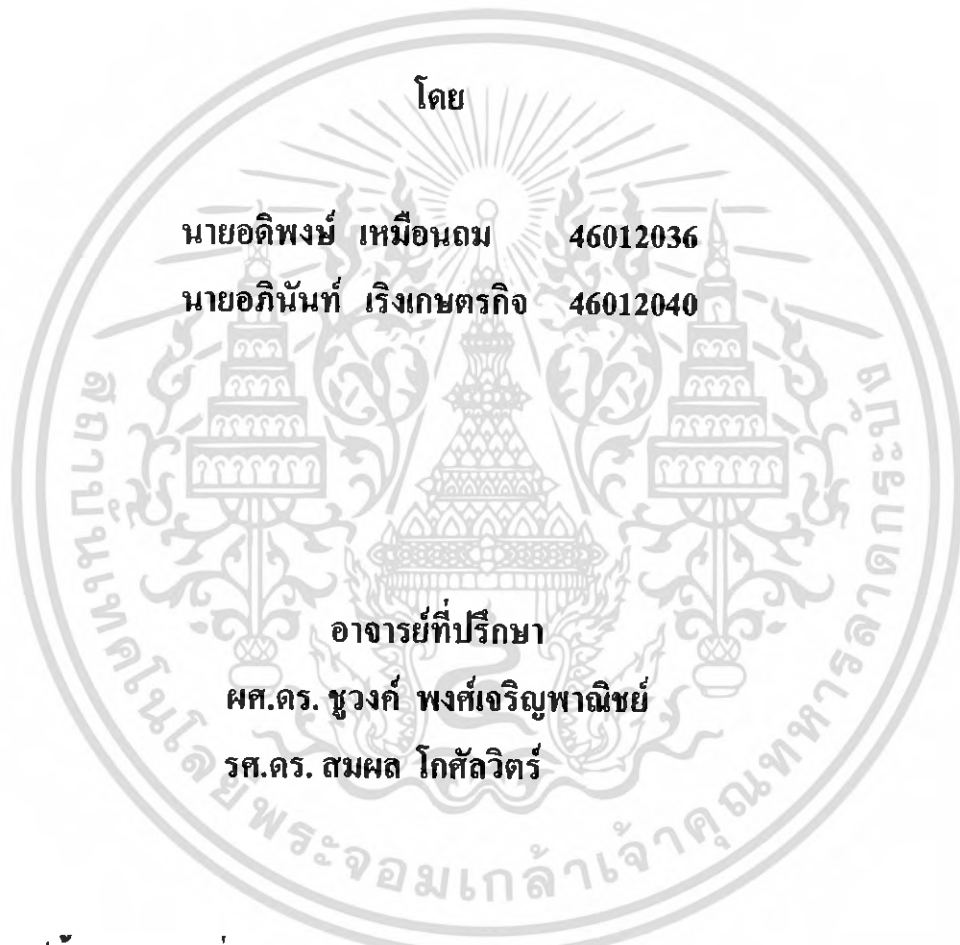
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับภาควิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อธิการบดีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว  
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ภาควิชา  
วิศวกรรมโทรคมนาคม

การออกแบบสายอากาศกรวยคู่สำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง  
DESIGN OF BI-CONICAL ANTENNA FOR WIDE BAND  
APPLICATIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสายอากาศรยู่สำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง

DESIGN OF BI-CONICAL ANTENNA FOR WIDE BAND APPLICATIONS

ผู้จัดทำ

1. นายอดิพงษ์ เหมือนถม 46012036

2. นายอภิรักษ์ เริงเกษตรกิจ 46012040

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศกรวยคู่สำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่กว้าง  
DESIGN OF BI-CONICAL ANTENNA FOR WIDE BAND APPLICATIONS

โดย นาย อติพงษ์ เหมือนดม 46012036

นาย อภินันท์ เริงเกษตรกิจ 46012040

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร

**บทคัดย่อ**

โครงการนี้เป็นการนำเสนอ การศึกษากับการออกแบบและ สร้างสายอากาศกรวยคู่ ที่สามารถ  
ตอบสนองย่านความถี่กว้าง โดยคุณสมบัติของสายอากาศกรวยคู่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง  
สร้างได้ง่าย สามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่ที่ทำการออกแบบ จากนั้นได้สร้างสายอากาศกรวยคู่  
ต้นแบบที่สามารถส่งและรับในย่านความถี่ดังกล่าว ซึ่งสามารถใช้งานได้ในระบบการสื่อสารครอบคลุม  
หลายระบบ เช่น ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบโทรศัพท์พกพาส่วนบุคคล และ โทรศัพท์ไร้สายและ  
เคลื่อนที่ จากนั้นทำการทดสอบเพื่อยืนยันการใช้งานได้ของสายอากาศ

**ABSTRACT**

This project presents the study, design and fabrication of the bi-conical antenna for wide  
band applications. The pattern of bi-conical antenna is omni-directional beam. This antenna is simple  
fabrication and it is designed to cover the wide band operation. The bi-conical antenna will be fabricated  
for transmitting and receiving of wide band applications. The wide band communication includes  
Wireless Local Area Network system, Personal Communication Telephone system, and Wireless and  
Mobile systems. Then, the bi-conical antenna was measured to verify the antenna usefulness.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำสอนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอดในการทำโครงการ ขอขอบคุณ พี่ๆห้องโปรเจกต์ที่ให้คำแนะนำและคอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี โดยเฉพาะ คุณกิตติศักดิ์ แพบัว และคุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณบิดามารดาที่คอยให้กำลังใจเสมอและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆ ด้าน

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	2
รูปที่ 2.2 รูป (ก) ล้อคลื่นต่างๆ และความกว้างของล้อคลื่นแบบรูปสายอากาศ และรูป (ข) แบบรูปในแบบเชิงเส้น	4
รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	5
รูปที่ 2.4 รูป (ก) มุมบนระนาบ ที่มีหน่วยเป็นเรเดียน และรูป (ข) การวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศกรวยคู่	11
รูปที่ 2.6 จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศกรวยคู่	12
รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของกระแสตามแนวพื้นผิวของสายอากาศและทิศทางของแรงดัน	12
รูปที่ 2.8 ทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก	13
รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่จะมีลักษณะเป็นคลื่นทรงกลม	13
รูปที่ 2.10 รูป(ก) สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตไม่จำกัด(ข) สายนำสัญญาณที่มีความยาวไม่จำกัด	14
รูปที่ 2.11 สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตไม่จำกัดแสดงการเกิดกระแส (I) และแรงดัน (V)	14
รูปที่ 2.12 เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (H) ซึ่ง อยู่ในสภาวะกระตุ้นแบบโหมด TEM	15
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของสายอากาศกรวยคู่กับระนาบพิกัดทรงกลม	16
รูปที่ 2.14 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระยะทาง $r$ จากจุดพีค	18
รูปที่ 2.15 การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า	19
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสายอากาศกรวยคู่และกรวยเดี่ยว	20
รูปที่ 2.17 บริเวณพื้นที่ทรงกลมที่กำหนดโดย เซอร์คินอฟ (Schelkunoff's)	21
รูปที่ 2.18 สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัดกับขอบเขตทรงกลม	22
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเชื่อมต่อของค่าอิมพีแดนซ์ $Z_L$	22
รูปที่ 2.20 สายอากาศกรวยคู่ที่มีลักษณะบางมาก	23
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงค่าของ อิมพีแดนซ์ เมื่อเปลี่ยนค่ามุม	26
รูปที่ 3.2 สายอากาศกรวยคู่ที่มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด	27
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก	28
รูปที่ 3.4 ลักษณะของสายอากาศกรวยคู่ที่ได้จากการคำนวณ	29
รูปที่ 3.5 ลักษณะความยาวของสายส่งของสายอากาศกรวยคู่	29
รูปที่ 3.6 ความยาวของสายรีจิด โคแอกเซียลของสายอากาศกรวยคู่	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการจำลองและออกแบบสายอากาศ	33
รูปที่ 3.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากโปรแกรม CST	34
รูปที่ 3.9 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากโปรแกรม CST	35
รูปที่ 3.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากโปรแกรม CST	36
รูปที่ 3.11 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2 GHz	37
รูปที่ 3.12 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz	39
รูปที่ 3.13 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3 GHz	40
รูปที่ 3.14 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 4GHz	42
รูปที่ 3.15 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz	43
รูปที่ 3.16 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz	45
รูปที่ 3.17 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.5 GHz	46
รูปที่ 3.18 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 7 GHz	48
รูปที่ 3.19 แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 8 GHz	49
รูปที่ 4.1 สายรีจิด โคแอกเซียล ด้านที่นำไปต่อเข้ากับสายอากาศ	51
รูปที่ 4.2 สายอากาศกรวยคู่ที่นำชิ้นส่วนต่างๆมาประกอบกัน	51
รูปที่ 4.3 สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลอง	53
รูปที่ 4.4 สายอากาศโมโนโพลที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณที่อยู่ในช่วง 2.45 GHz	54
รูปที่ 4.5 สายอากาศทอเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว	55
รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากการทดสอบ	56
รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศ ที่ได้จากการทดสอบ	57
รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากการทดสอบ	58
รูปที่ 4.9 การวัดคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศกรวยคู่และทดสอบการใช้งาน	59
รูปที่ 4.10 การจัดวางสายอากาศกรวยคู่เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ กับสายอากาศโมโนโพล	61
รูปที่ 4.11 การจัดวางสายอากาศกรวยคู่เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ กับสายอากาศทอเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว	62
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 2.45 GHz	63
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 2.8 GHz	64
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 3 GHz	65
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 3.5 GHz	66
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 4 GHz	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 5.2 GHz	68
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 5.8 GHz	69
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 6.5 GHz	70
รูปที่ 4.20 การวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่โดยทดสอบกับสายอากาศโมโนโพล	72
รูปที่ 4.21 การวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่โดยทดสอบกับสายอากาศท่อเวฟไกด์ สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว	72
รูปที่ 4.22 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 2.45 GHz	73
รูปที่ 4.23 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 3 GHz	73
รูปที่ 4.24 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 4 GHz	74
รูปที่ 4.25 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 5.2 GHz	74
รูปที่ 4.26 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 5.8 GHz	75
รูปที่ 4.27 ผลการวัดหาค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 6.5 GHz	75
รูปที่ 4.28 การวัดหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศกรวยคู่ 2 อัน	77
รูปที่ 4.29 ผลของการคำนวณหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศกรวยคู่ 2 อัน	78
รูปที่ 4.30 การวัดผลของการส่งสัญญาณของสายอากาศกรวยคู่	79
รูปที่ 4.31 กราฟการทดสอบหาความเร็วในการรับส่งข้อมูลของสายอากาศกรวยคู่	80

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่	56
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่	57
ตารางที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศกรวยคู่	59
ตารางที่ 4.4 การทดสอบการใช้งานจริงกับระบบ Wireless LAN	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	2
2.1.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	2
2.1.2 รูปคลื่นหลัก (Main Pattern)	3
2.1.3 ลำคลื่นของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)	3
2.1.4 ระยะของสนามที่แผ่กระจายจากสายอากาศ	5
2.1.5 เรเดียน และ สเตอเรเดียน (Radian and Steradian)	6
2.1.6 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น	7
2.1.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	7
2.1.8 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width)	8
2.1.9 อัตราการขยาย (Gain)	9
2.1.10 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Efficiency)	10
2.2 ทฤษฎีสายอากาศกรวยคู่	11
2.2.1 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด	13
2.2.2 สนามการแผ่กระจายคลื่น	15
2.2.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด	20
2.2.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัด	21
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	25
3.1 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศกรวยคู่	25
3.1.1 การกำหนดขนาดความหนาของสายอากาศกรวยคู่	25
3.1.2 การกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน	25
3.1.3 การกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่	25
3.1.4 คำนวณหาค่าความยาวคลื่น	26
3.1.5 คำนวณหาค่าความสูงของสายอากาศกรวยคู่	28
3.1.6 ส่วนประกอบของสายอากาศกรวยคู่ที่ได้จากการคำนวณ	28
3.2 การคำนวณหาความยาวสายส่งของสายอากาศกรวยคู่	29
3.3 การจำลองสายอากาศกรวยคู่	33
3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองสายอากาศกรวยคู่	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	34
3.4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)	34
3.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance)	35
3.4.4 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่	36
<b>บทที่ 4 การสร้าง และการทดสอบ</b>	<b>50</b>
4.1 กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่	50
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศกรวยคู่	50
4.1.2 การสร้างสายอากาศกรวยคู่	50
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	54
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ	55
4.4 ผลการทดสอบ	56
4.4.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	56
4.4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	57
4.4.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)	58
4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)	60
4.5.1 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่ที่ย่านความถี่ต่างๆ	63
4.6 ทดสอบการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศ (Polarization)	71
4.6.1 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ย่านความถี่ต่างๆ	73
4.7 พิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	76
<b>บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์</b>	<b>82</b>
5.1 สรุปและวิจารณ์	82
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	82
5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข	83
5.3.1 ปัญหา	83
5.3.2 แนวทางแก้ไข	83
<b>ภาคผนวก ก</b>	<b>84</b>
<b>ภาคผนวก ข</b>	<b>87</b>
<b>กิตติกรรมประกาศ</b>	
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งในระบบสื่อสารที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System) ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สาย เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยี ที่ให้ความสะดวกสบาย ใช้ได้ง่าย ใช้ได้ทุกที่ ราคาไม่แพง สามารถที่จะติดต่อกันได้ตลอดเวลา ซึ่งในระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้น มีอยู่หลายเทคโนโลยีและที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากสายอากาศมีหน้าที่ รับและส่งสัญญาณที่ถูกผสม (Modulation) ด้วยกรรมวิธีต่างๆ โดยส่วนมากจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โดยวิธีการเหนี่ยวนำกระแส กลายเป็นคลื่นวิทยุ (Radio Wave) ส่งผ่านตัวกลางที่เป็น สายอากาศส่งออกไปในอากาศ ไปยังเครื่องรับ แล้วสายอากาศที่เครื่องรับก็จะรับสัญญาณที่เข้ามา เปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วก็นำส่งไปยัง ระบบที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณข้อมูล เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารต่อไป ในการสร้างสายอากาศนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ก็คือ วัตถุประสงค์ที่เราจะใช้งาน เช่น ต้องการสร้างสายอากาศไว้ใช้งานในการรับ - ส่ง อะไร ใช้คลื่นความถี่ทำไร และคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การที่เราจะสร้างและออกแบบสายอากาศต่างๆเหล่านั้นจำเป็นจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิต ความคุ้มค่าแก่การลงทุน และ ลักษณะภูมิประเทศ เป็นต้น และ โครงสร้างของสายอากาศต้องไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถสร้างได้ง่าย และใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ สำหรับในโครงการนี้จะเป็นการสร้างสายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna) เป็นสายอากาศชนิดหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติของบรอดแบนด์อยู่ด้วย คือ สามารถประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้หลายอย่าง และยังมีช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้นกว้างมาก อีกทั้งมีรูปร่างลักษณะที่ไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย ดังนั้นสายอากาศกรวยคู่ จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้งานในระบบการสื่อสาร ไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ ทำให้สายอากาศกรวยคู่เป็นสายอากาศที่น่าสนใจอย่างมาก และเหมาะสำหรับที่จะนำไปใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบมือถือ, Wi-Fi, WIMAX ,Bluetooth, และเทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-length) จึงได้มีแนวความคิดว่าจะทำการสร้างและออกแบบสายอากาศกรวยคู่ ที่สามารถรับและส่ง คลื่นที่อยู่ในช่วงความถี่ คือ 2 GHz ถึง 8 GHz ซึ่งช่วงความถี่นี้จะครอบคลุม ระบบไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ สำหรับการสร้างและการออกนั้นจะใช้โปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) มาช่วยในการจำลอง (Simulate) และวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

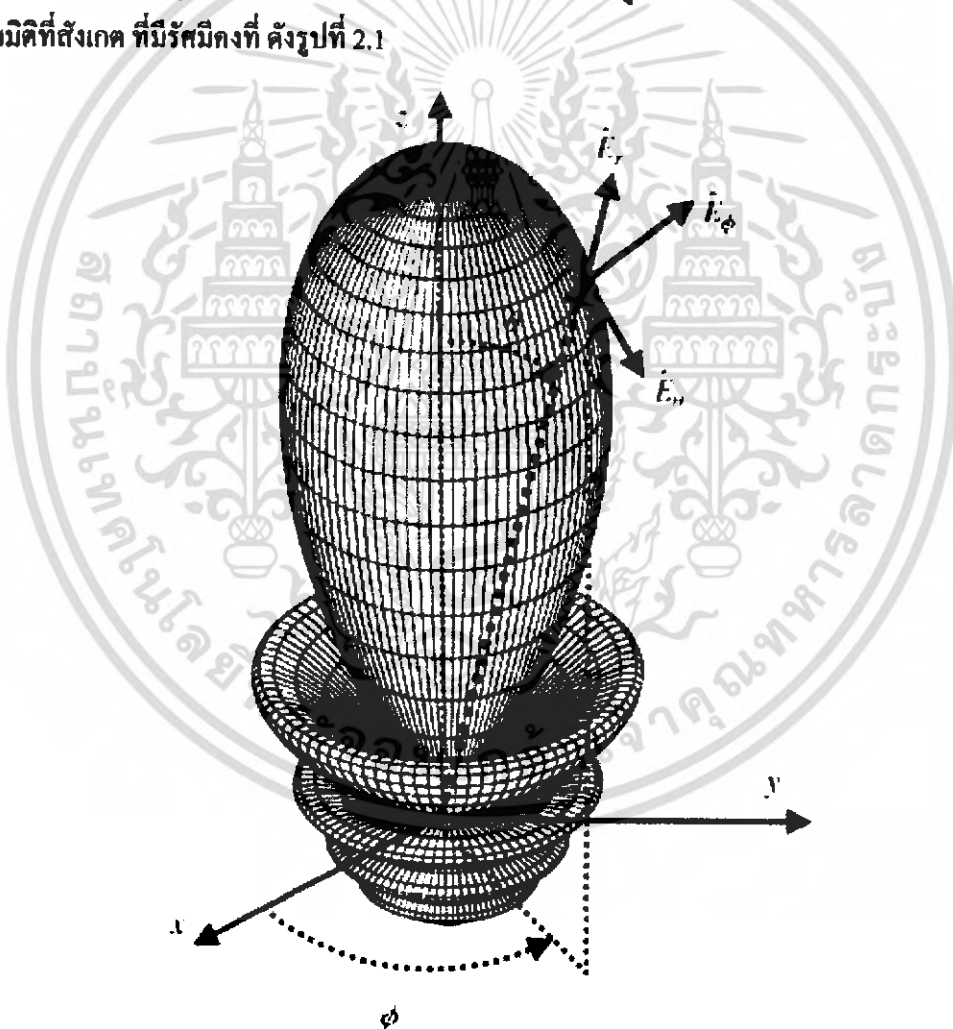
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

#### 2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้แสดงแทนคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปตโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมักจะคิดในสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกต ที่มีรัศมีคงที่ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงระบบพิกัดโคออดิเนต (Coordinate) ที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้ เส้นแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Power Pattern) และกราฟที่แสดง การเปลี่ยนแปลงของ สนามแม่เหล็ก หรือ สนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

ตัวแพร่คลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง เกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติของการแสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศแบบชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการส่ง หรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะ ทิศทางที่กำหนดได้เท่านั้น และอีก ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือ สายอากาศที่ให้แบบรูปการกระจายออกรอบตัว (Omni Directional Antenna)

### 2.1.2 รูปคลื่นหลัก (Main Pattern)

โดยส่วนใหญ่ มักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของรูปหลัก(Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  และสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  สำหรับสายอากาศโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบเชิงเส้น (Linearly Polarization) แบบรูปในระนาบ  $\vec{E}$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์ (Vector) สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบในรูประนาบ  $\vec{H}$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

### 2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น คือ ส่วนที่เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณ โดยแวกลุ่มของส่วนที่มีความเข้มข้นของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปเชิงขั้ว(Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นลำคลื่นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

ลำคลื่นหลัก(Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งอยู่ในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.2 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง z สายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split Beam Antenna)

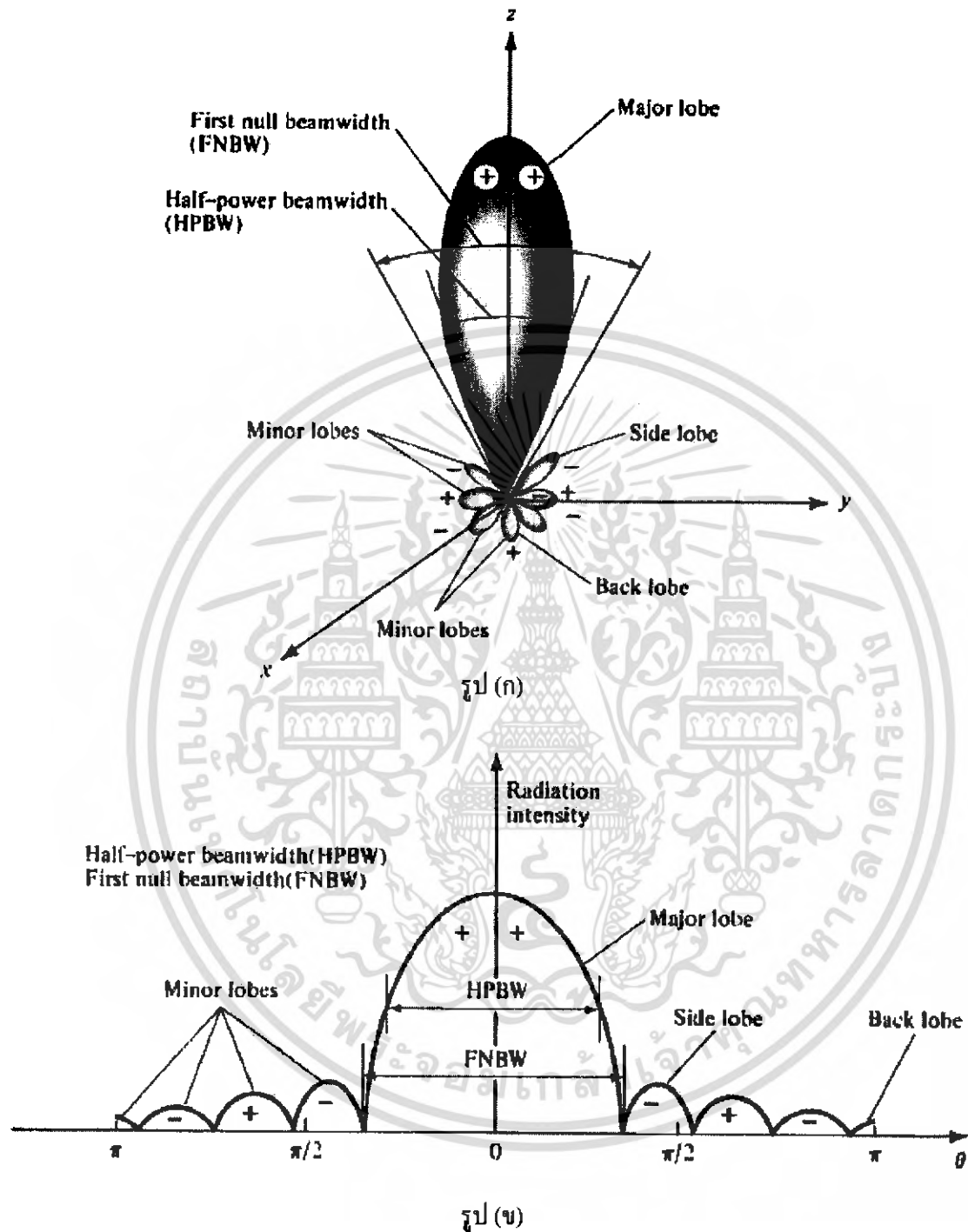
ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ ลำคลื่นอื่นๆ นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยอยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่บนทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง(Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยอยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้าม กับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราความหนาแน่นของพลังงาน ในลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่กำลังติดต่อกับความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนลำคลื่นข้าง (Side Lobe Level): SLL ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะให้ระดับของลำคลื่นน้อยกว่า  $-20\text{dB}$

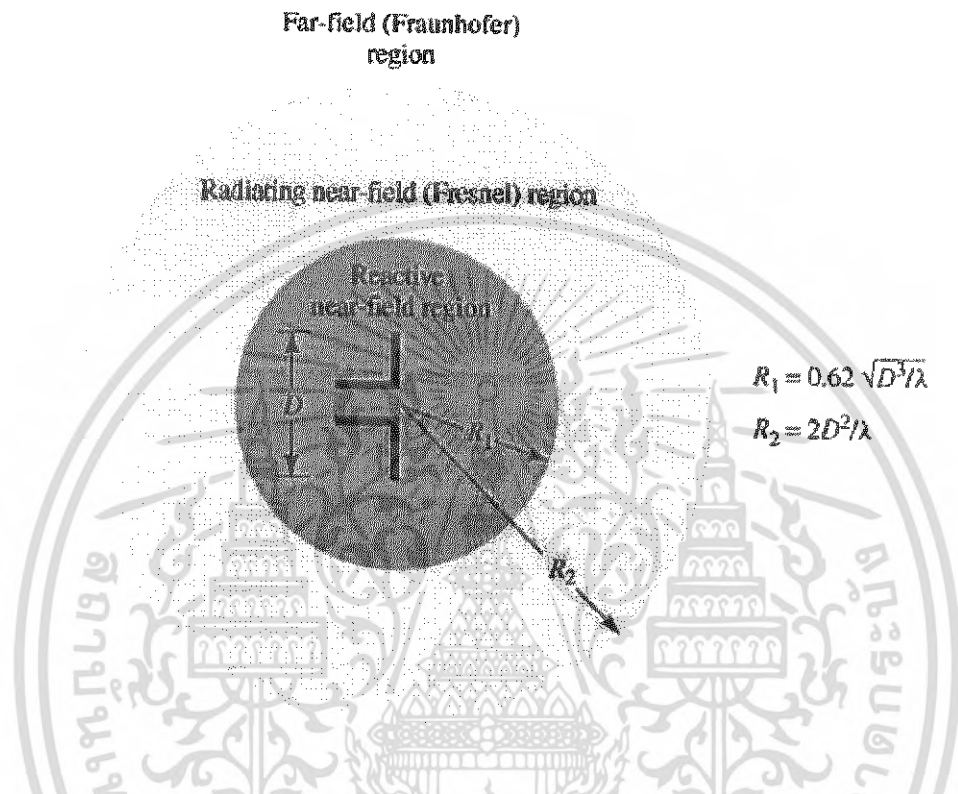


รูปที่ 2.2 รูป (ก) ลำคลื่นต่างๆ และความกว้างของลำคลื่นแบบรูปสายอากาศ และรูป (ข) แบบรูปในแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 ระยะของสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอคทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอคทีฟระยะใกล้เป็นบริเวณสนามล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามรีแอคทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  จากผิวของสายอากาศ เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอคทีฟระยะใกล้ กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามกระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $2D^2/\lambda \geq R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

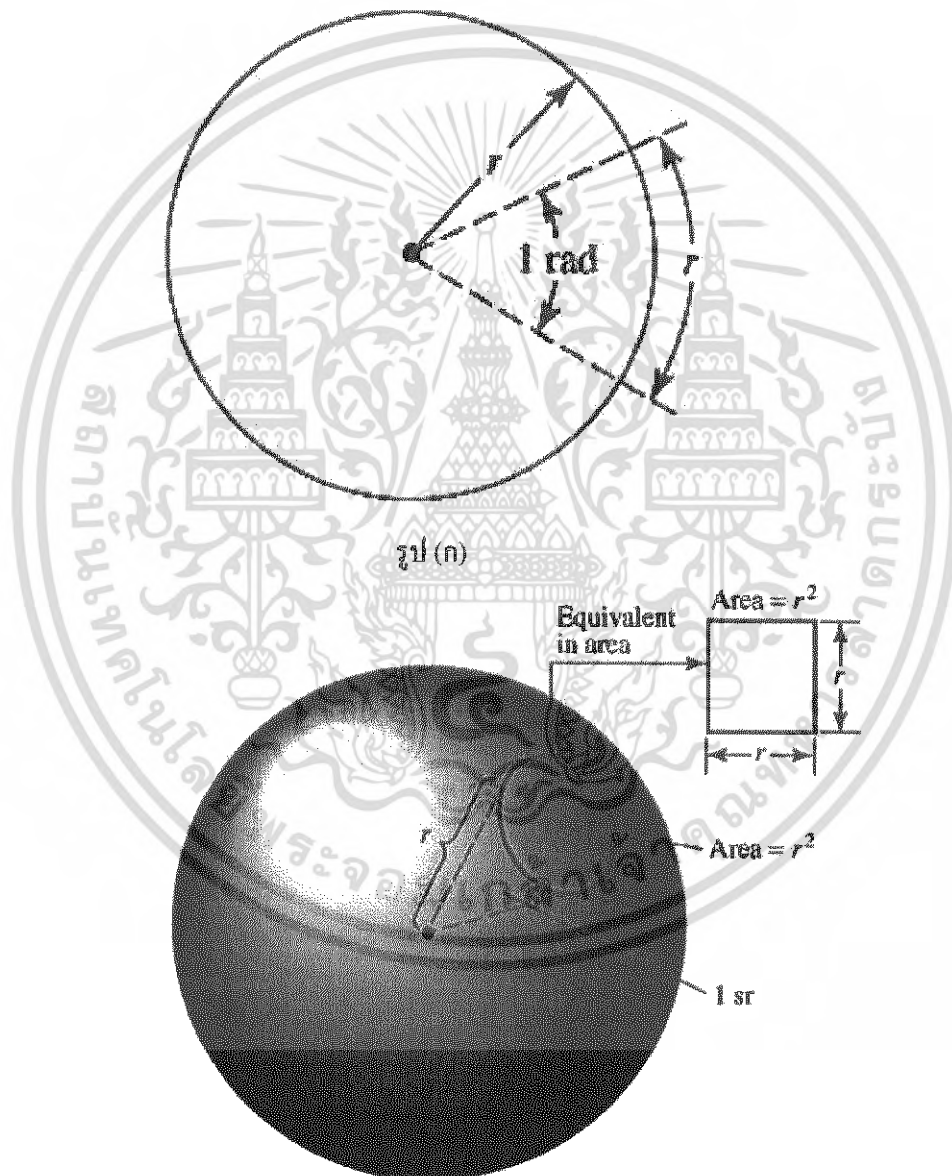
บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่กระจายของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่เท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $2D^2/\lambda$  จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง(Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $2D^2/\lambda$  และขอบนอกเป็นอนันต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 เรเดียน และ สเตอเรเดียน (Radian and Steradian)

การวัดมุมบนระนาบที่มีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมระนาบซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี  $r$  และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวงกลม ซึ่งยาว  $r$  เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี  $r$  มีความยาว  $c = 2\pi r$  ดังนั้นบนหนึ่งรอบวงกลม จะมี  $2\pi$  เรเดียน

การวัดมุมหน่วยเป็นสเตอเรเดียน ( $sr$ ) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่ยอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี  $r$  เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี  $r$  มีค่าเท่ากับ  $4\pi r^2$  ดังนั้นตลอดทรงกลมจะมี  $4\pi sr$



รูป (ข)

รูปที่ 2.4 รูป (ก) มุมบนระนาบ ที่มีหน่วยเป็นเรเดียน และรูป (ข) การวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คือ กำลังที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ ต่อหน่วยมุมตัน มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นและผลจากกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $W$ / หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น ( $W/m^2$ )

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= (r^2/2\eta) E(r, \theta, \phi)^2 \\ &= (r^2/2\eta) [E_\theta(r, \theta, \phi)^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

$\eta$  = อิมพีแดนซ์ลักษณะ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลางเท่ากับ  $120\pi$  โอห์ม

ดังนั้นรูปแบบของกำลังงานใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดหาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ตลอดมุมตันทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.3)$$

### 2.1.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

โคเรคทีฟเฟนในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับอ้างอิงนี้จะใช้ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ค่าสภาพที่เจาะจงทิศทาง คือค่าของโคเรคทีฟเฟนในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือ คือค่าสภาพเจาะจงทิศทางของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซทรอปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส เขียนสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

$D_g$  = ไดรเรคทีฟเนส(ไม่มีหน่วย)

$D_0$  = ค่าสภาพเจาะงทศทาง(ไม่มีหน่วย)

$U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น( $W$ / หน่วยเป็นมม<sup>2</sup>)

$U_{max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น( $W$ / หน่วยเป็นมม<sup>2</sup>)

$U_0$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส

$P_{rad}$  = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด( $W$ )

จากสมการที่ (2.4) และ(2.5) จะทราบไดเรคทีฟเนสและค่าสภาพเจาะงทศทางของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่ง เพราะว่ามันมีการแพร่กระจายกำลังงาน ออกไปทุกทิศทางด้วยค่าคงที่เท่ากัน คือ  $U$ ,  $U_{max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากัน แต่ต้นกำเนิด(สายอากาศ)แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะงทศทางมีมากกว่าหนึ่งเสมอ

สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักแคบๆเพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถตัดทิ้งได้มุมตันของลำคลื่นจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ  $HPBW$  ในระนาบซึ่งตั้งฉากกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.6)$$

มุมตันของลำคลื่น  $\Omega_A$  ประมาณได้จาก

$$\Omega_A = \Theta_{1r} = \Theta_{2r} \quad (2.7)$$

$\Theta_{1r}$  =  $HPBW$  ระนาบใดๆ (เรเดียน)

$\Theta_{2r}$  =  $HPBW$  ซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก(เรเดียน)

### 2.1.8 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่ง โดยตรงได้เป็น

$$D_0 = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Theta_{1d} = \text{HPBW}$  ระบายใดๆ (เรเดียน)

$\Theta_{2d} = \text{HPBW}$  ซึ่งตั้งฉากกับระบายแรก(เรเดียน)

### 2.1.9 อัตราการขยาย (Gain)

เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยาย (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ มีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุดคั้งนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการขยาย} &= 4\pi \times (\text{ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น}) / (\text{กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ}) \\ &= \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดยทั่วไปแล้วจะพูดถึงอัตราการขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังของสายอากาศ ซึ่งใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.10)$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด ( $P_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ ( $P_{in}$ ) ดังนี้

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $e_r$  เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย)ทำให้จะ ได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[ \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.12)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทีฟเนตดังนี้

$$G_g = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$$G_0 = G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_t D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \quad (2.14)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

$$G_g \cong \frac{30,000}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.15)$$

### 2.1.10 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ จะใช้เมื่อคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมดจะคำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.16)$$

- เมื่อ
- $e_r$  = ประสิทธิภาพทั้งหมด(ไม่หน่วย)
  - $e_r$  = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับของคลื่น (ไม่หน่วย)
  - $e_c$  = ประสิทธิภาพของตัวนำ(ไม่หน่วย)
  - $e_d$  = ประสิทธิภาพการของฉนวน(ไม่มีหน่วย)
  - $\Gamma$  = ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (2.17)$$

- เมื่อ
- $Z_m$  = อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ
  - $Z_0$  = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ(Characteristic Impedance)

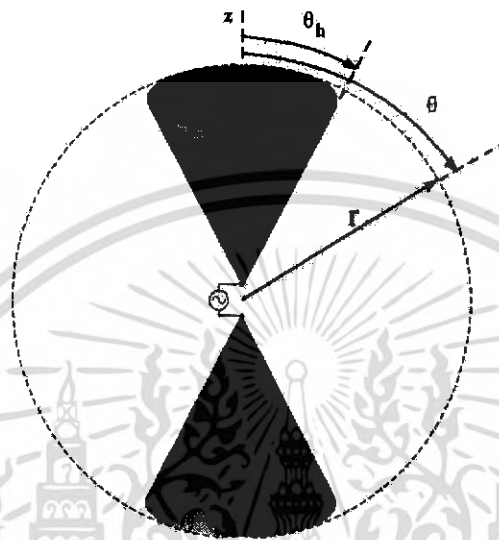
ปกติ  $e_c$  และ  $e_d$  คำนวณหาได้ลำบากมากมักจะได้รับการทดลอง ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงมักเขียนได้เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $e_{cd} = e_c e_d$  ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายของคลื่น

## 2.2 ทฤษฎีสายอากาศกรวยคู่

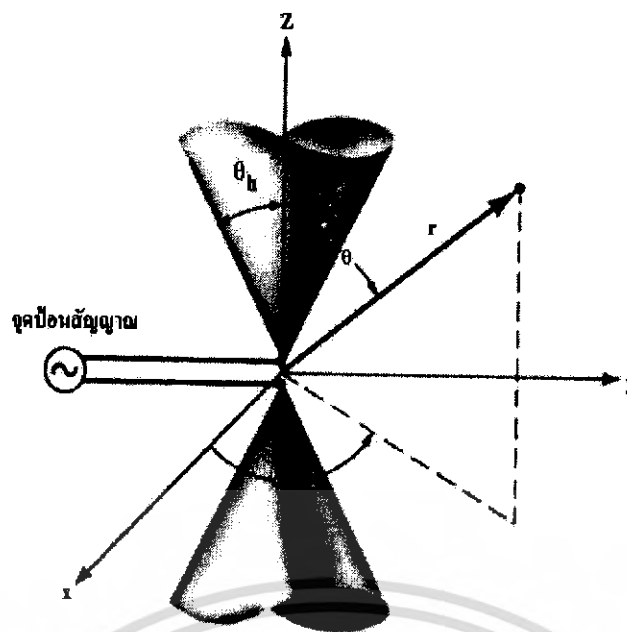
สายอากาศกรวยคู่ได้มีการคิดค้นมาตั้งแต่ ค.ศ 1897 โดย เซอร์ โอลีเวอร์ ลอด (Sir Oliver Lodge) แต่ในขณะเดียวกันในตอนนั้นก็ได้มีการใช้งานสายอากาศแบบกรวยเดี่ยวอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในการติดต่อสื่อสารกัน ผู้คิดค้นสายอากาศกรวยเดี่ยวก็คือ มาโคนิ (Maconi) และเขายังได้คิดค้นสายอากาศรูปพัดขึ้นมาอีกด้วย



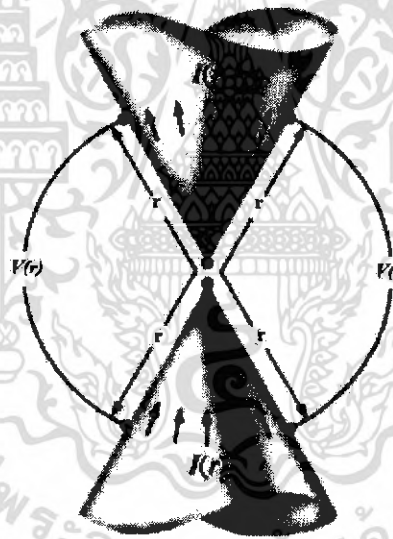
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของสายอากาศกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่และสายอากาศแบบกรวยเดี่ยว นี้มีคุณสมบัติของบรอดแบนด์อยู่ด้วยคือสามารถประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้หลายอย่าง และมีรูปร่างลักษณะที่ไม่ซับซ้อน สร้างได้ง่าย สายอากาศกรวยคู่ นั้นถือได้ว่าเป็นสายอากาศที่มีย่านความถี่ที่ใช้ที่กว้างมาก สำหรับความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ของสายอากาศกรวยคู่ นั้น เกิดขึ้นจากการแปรค่าของรัศมีตามแนวแกนหรือการเพิ่มค่าของมุม  $\theta$  ด้วยโครงสร้างของสายอากาศกรวยคู่จะประกอบไปด้วยกรวยสองอันจัดวางอยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยที่จุดยอดของกรวยทั้งสอง (จุดกึ่งกลางของสายอากาศ) จะเป็นจุดป้อนสัญญาณ (feed point) และเรียกจุดนี้ว่า จุดพีค การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบกรวยคู่ นั้นจะคล้ายคลึงกับ สายอากาศไดโพลโดยที่บริเวณ จุดพีค นี้จะมีกระแสไหลมากที่สุดและมีแรงดันต่ำสุด บริเวณปลายทั้งสองของสายอากาศเสมือนเปิดวงจร จึงมีแรงดันมากที่สุด และมีกระแสไหลน้อยสุด และบริเวณที่มีค่าแรงดันสูงจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ปลายของสายอากาศ และจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นบริเวณที่มีกระแสไหลมากที่สุด(จุดพีค) เช่นเดียวกัน สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่จะมี แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลักษณะเป็นแบบรอบตัว(Omni directional Pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



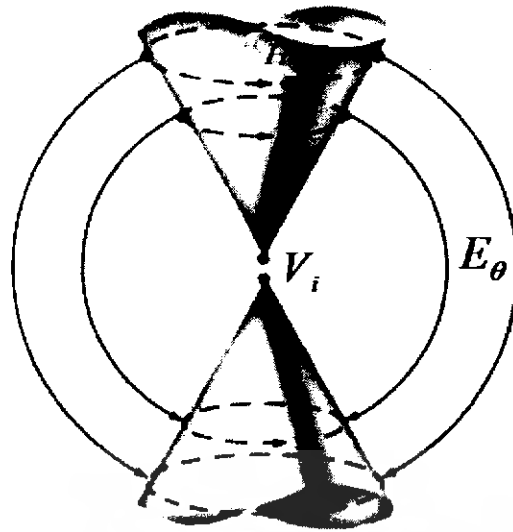
รูปที่ 2.6 จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศกรวยคู่



รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของกระแสตามแนวพื้นผิวของสายอากาศและทิศทางของแรงดัน

การวิเคราะห์สายอากาศกรวยคู่ นั้น จะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ โดย เซอร์คีนอฟ (Schelkunoff's) เป็นผู้ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นกับสายอากาศกรวยคู่ได้ โดยเริ่มจากสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด และต่อด้วยสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก

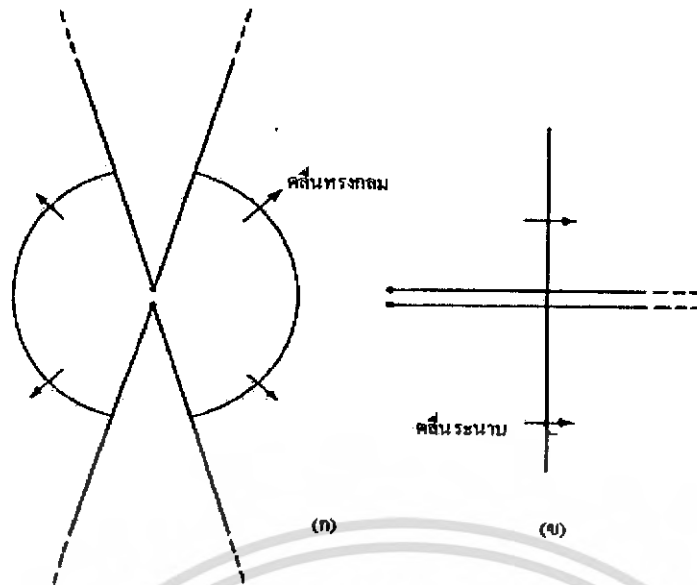


รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวยคู่จะมีลักษณะเป็นคลื่นทรงกลม

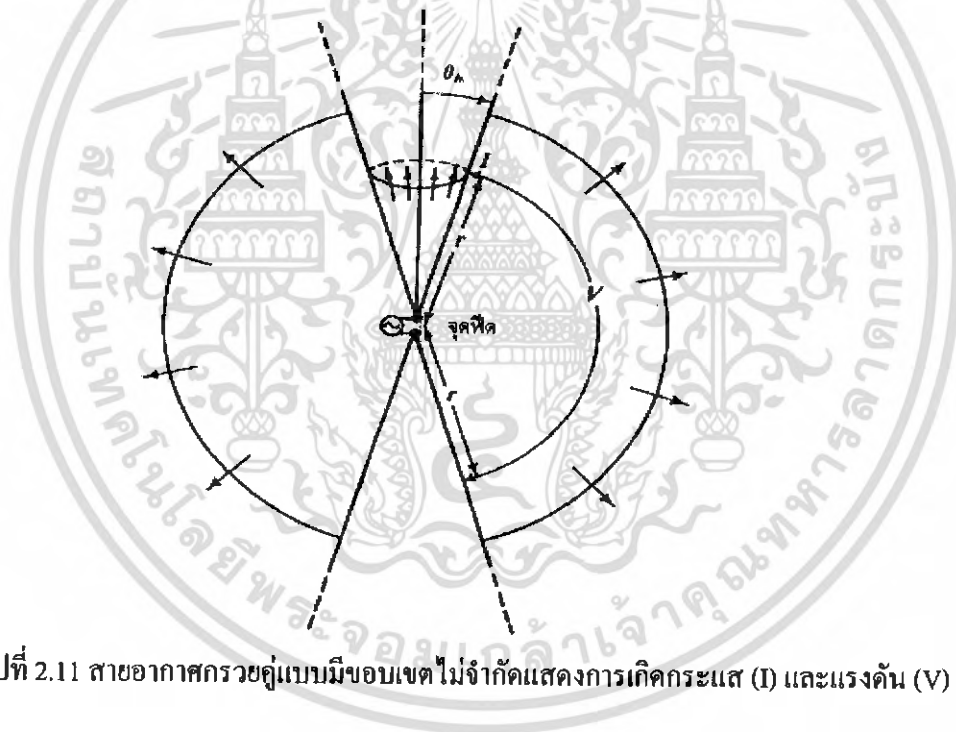
### 2.2.1 คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด

สายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด จะเหมือนกับสายนำสัญญาณที่มีความยาวไม่จำกัด คือ สายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัดจะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นคลื่นทรงกลมออกไป ส่วนสายนำสัญญาณที่มีความยาวไม่จำกัดจะมีการแพร่คลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ ดังรูปที่ 2.10

คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด โดยให้เครื่องกำเนิดสัญญาณเชื่อมต่อกับสายอากาศที่จุดพีคดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 รูป (ก) สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตไม่จำกัด (ข) สายนำสัญญาณที่มีความยาวไม่จำกัด



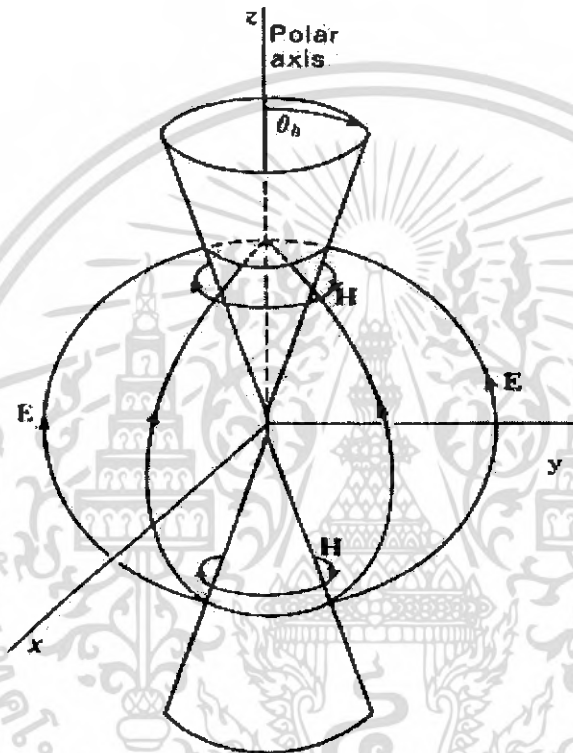
รูปที่ 2.11 สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตไม่จำกัดแสดงการเกิดกระแส (I) และแรงดัน (V)

บริเวณจุดพีคเมื่อได้รับกำลังงานเข้าไปในรูปของสัญญาณจะทำให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นออกมา สำหรับคลื่นที่แพร่กระจายออกมานั้นจะทำให้เกิดกระแส (I) และแรงดัน (V) โดยกระแสที่เกิดขึ้นจะเกิดในบริเวณพื้นผิวของกรวย และค่าแรงดันจะเกิดขึ้นในส่วนจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของกรวยในระยะทาง  $r$  โดยในระยะทาง  $r$  นั้นจะเริ่มจากจุดพีค ของสายอากาศตั้ง เมื่อได้ค่ากระแส (I) และแรงดัน (V) มาแล้ว เราก็จะสามารถหาค่าของ คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ โดยค่าอิมพีแดนซ์จะเกิดจากค่าของอัตราส่วนระหว่าง  $V/I$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 สนามการแพร่กระจายคลื่น

ก่อนที่จะหาค่าของกระแส (I) และแรงดัน (V) เราจะต้องมาหาธรรมชาติของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (H) ที่มีอยู่ในอากาศ และการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะเริ่มต้นโดยการวิเคราะห์ หากการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะประกอบด้วย การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า (E) และการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก (H) ที่อยู่ระหว่างทรงกรวยซึ่งอยู่ในสภาวะกระตุ้นแบบโหมด TEM (สนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) มีการแพร่แบบเส้นตรงโดยทิศทางตัดขวางกัน) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (H) ซึ่ง อยู่ในสภาวะกระตุ้นแบบโหมด TEM

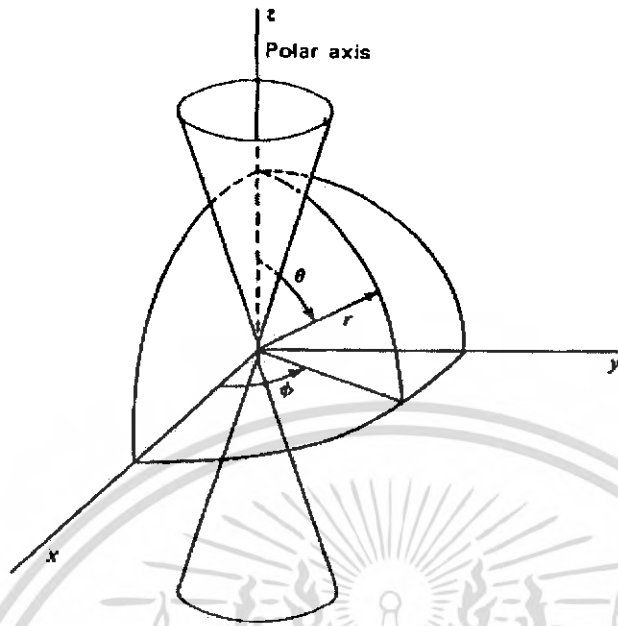
เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นทรงกลมและเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (H) จะมีทิศทางการเคลื่อนที่วนรอบทรงกรวย เราสามารถหาค่าของกระแส (I) และแรงดัน (V) ที่อยู่ในจุดต่างๆ บนพื้นผิวของกรวยในระนาบพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) ของสายอากาศ จากสมการของแมกซ์เวลล์ จากกฎของฟาราเดย์ และกฎของแอมแปร์ สามารถเขียนได้ดังนี้

กฎของฟาราเดย์

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \bar{B} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศกรวยคู่ขนานเราจะพิจารณาในระนาบพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของสายอากาศกรวยคู่กับระนาบพิกัดทรงกลม

จากสมการที่ (2.19) นำมาเขียนให้อยู่ในระนาบพิกัดทรงกลมจะได้

$$\nabla \times \bar{E} = \frac{\hat{r}}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial(r \sin \theta E_\phi)}{\partial \theta} - \frac{\partial(r E_\theta)}{\partial \phi} \right] + \frac{\hat{\theta}}{r \sin \theta} \left[ \frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{\partial(r \sin \theta E_\phi)}{\partial r} \right] + \frac{\hat{\phi}}{r} \left[ \frac{\partial(r E_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \right]$$

ซึ่งถ้าหากแสดงให้อยู่ในระนาบพิกัดทรงกลมและสำหรับสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนของมุม  $\theta$  เท่านั้น

$$\nabla \times \bar{E} = \frac{\hat{\phi}}{r} \frac{\partial(r E_\theta)}{\partial r} \quad (2.20)$$

เราสามารถเขียนส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กให้อยู่ในระนาบพิกัดทรงกลมจะได้

$$-j\omega\mu\bar{H} = -j\omega\mu(\hat{r}H_r + \hat{\theta}H_\theta + \hat{\phi}H_\phi) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) สนามแม่เหล็ก จะมีเวกเตอร์อยู่ในแนวมุม  $\phi$  เท่านั้น

$$-j\omega\mu\bar{H} = -\hat{\phi}j\omega\mu H_\phi \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.20) และ (2.22) นำมาเขียนใหม่จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rE_\theta)}{\partial r} = -j\omega\mu H_\phi \quad (2.23)$$

สำหรับกฎของแอมแปร์มีดังนี้

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega\epsilon \bar{E} \quad (2.24)$$

หากแสดงให้อยู่ในระนาบพิกัดทรงกลมแล้วสำหรับสนามแม่เหล็กจะประกอบด้วยส่วนของมุม  $\theta$  เท่านั้น

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\hat{r} \partial (r \sin \theta H_\phi)}{r^2 \sin \theta \partial \theta} - \frac{\hat{\theta} \partial (r \sin \theta H_\phi)}{r \sin \theta \partial r} \quad (2.25)$$

จะเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rH_\phi)}{\partial r} = -j\omega\epsilon E_\theta \quad (2.26)$$

เมื่อ  $E_r = 0$ ;

$$\frac{\partial (r \sin \theta H_\phi)}{\partial \theta} = 0 \quad (2.27)$$

หรือ เมื่อนำสมการ (2.26) มาทำการอนุพันธ์จะได้

$$\frac{\partial^2 (rH_\phi)}{\partial r^2} = -\omega^2 \mu \epsilon (rH_\phi) \quad (2.28)$$

เมื่อค่าของมุม  $\theta$  แปรผันกับค่าของสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $H_\phi$  จะได้รูปสมการดังนี้

$$H_\phi \propto \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.29)$$

ดังนั้น ผลจากสมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29) สามารถหาความสัมพันธ์ได้

$$H_\phi = \frac{1}{r \sin \theta} H_0 e^{-j\beta r} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi/\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
71940  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.30) จะแสดงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่ เหมือนการแผ่กระจายของคลื่นที่ไม่เหมาะกับโครงสร้างที่ยาวมากเมื่อสนามอยู่ในโหมด TEM ดูจากสนามไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็กที่เป็นอิสระกันและเขียนได้ดังนี้

$$E_\theta = Z_0 H_\phi = \frac{Z_0}{r \sin \theta} H_0 e^{-j\beta r} \quad (2.31)$$

สำหรับสมการที่ (2.30) และ (2.31) เราสามารถเห็นเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสนามแม่เหล็กในโหมด TEM ที่แผ่กระจายไปในอากาศ (free space) ในฟังก์ชันของ  $\theta$  และ  $r$  ส่วนสนามของฟังก์ชัน  $\phi$  จะเป็นอิสระ ในระหว่างโครงสร้างกรวยทั้งสองเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้สายอากาศ ค่าของแรงดัน  $V(r)$  ระหว่างจุดที่ หนึ่งและสอง บนกรวยในระยะทาง  $r$  จากจุดพีค ดังรูปที่ 2.14 หาค่าแรงดันได้ดังนี้

$$V(r) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} E_\theta r d\theta = Z_0 H_0 e^{-j\beta r} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sin \theta} \quad (2.32)$$

หรือ

$$V(r) = 2Z_0 H_0 e^{-j\beta r} \ln \cot \frac{\theta_h}{2} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.14 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระยะทาง  $r$  จากจุดพีค

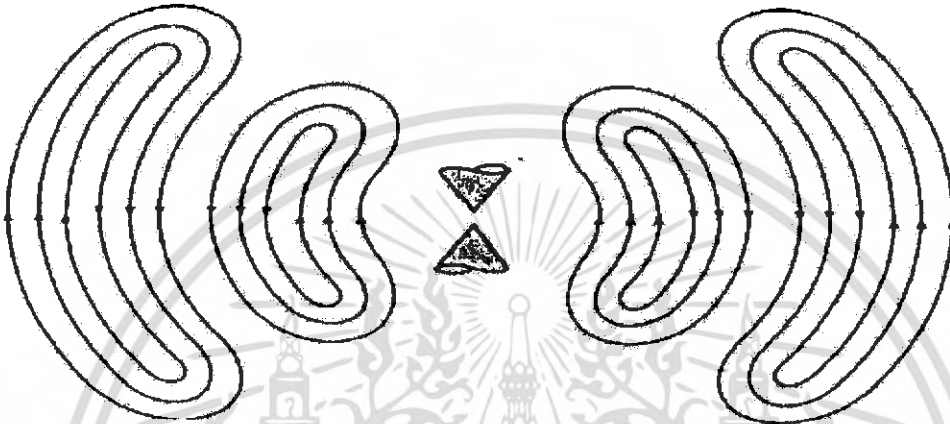
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวของทรงกรวยที่มีระยะทาง  $r$  จากจุดพีค สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_\phi r \sin \theta d\phi = 2\pi r H_\phi \sin \theta \quad (2.34)$$

หรือ

$$I(r) = 2\pi H_0 e^{-jDr} \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.15 การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า

สำหรับการหาค่าของคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ ( $Z_k$ ) ของสายอากาศกรวยคู่ ก็คือค่าอัตราส่วนของค่าแรง  $V(r)$  และของกระแส  $I(r)$  จากสมการที่ (2.33) และ (2.35)

$$Z_k = \frac{V(r)}{I(r)} = \frac{Z_0}{\pi} \ln \left( \cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.36)$$

ในอากาศจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $Z_0 = 120\pi\Omega$  เขียนใหม่ได้เป็น

$$Z_k = 120 \ln \cot \frac{\theta_h}{2} \quad (2.37)$$

และเมื่อมุม  $\theta_h$  มีขนาดเล็ก ( $\theta_h < 20^\circ$ ),  $\cot(\theta_h / 2) \cong 2/\theta_h$  จะได้

$$Z_k = 120 \ln \frac{2}{\theta_h} \quad (2.38)$$

จากสมการที่(2.37) และ (2.38) เป็นคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ซึ่งอยู่ในโหมด TEM ก็คืออัตราส่วนของแรงดันและกระแส  $V(r)/I(r)$  กับระยะทาง  $r$  แต่สำหรับ สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด นั้นค่าของอิมพีแดนซ์ จะเป็นอิสระกับระยะทาง  $r$  ดังนั้น ค่าของอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด จะเท่ากับค่าของคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ ที่อยู่ในโหมด TEM จะไม่มีผลกระทบกับคลื่นที่อยู่ในลำดับสูง

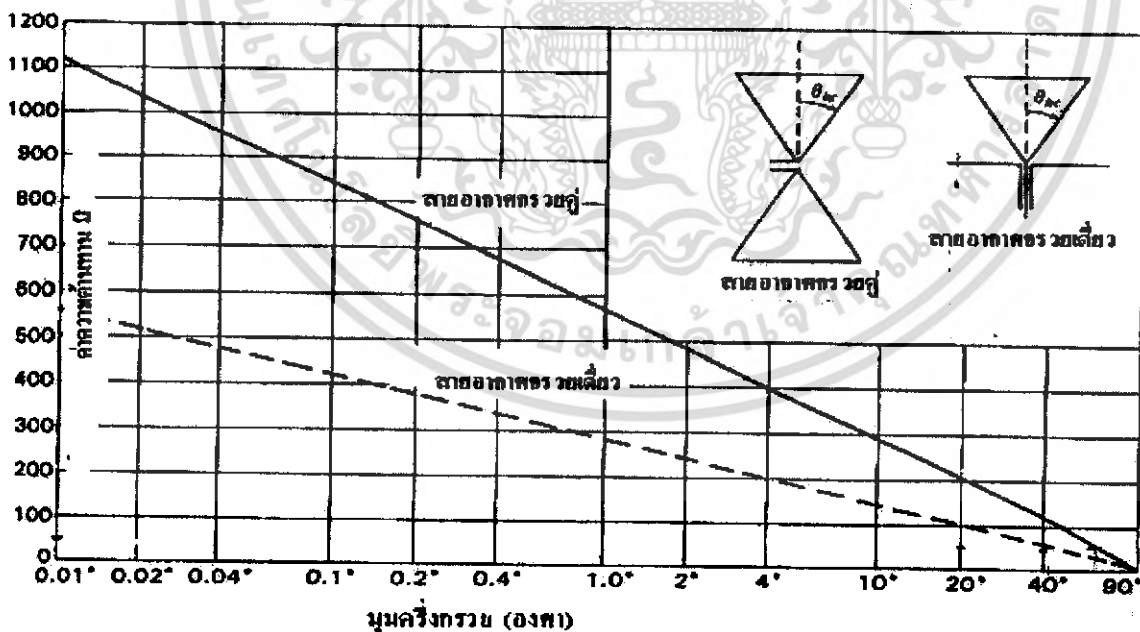
$$Z_i = Z_k \quad (2.40)$$

เมื่อ  $Z_i$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ และ  $Z_k$  คือ ค่าของคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ซึ่งแสดงในสมการที่ (2.37) หรือถ้าค่ามุมมีค่าน้อยจะต้องใช้สมการที่ (2.38)

ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ จะเป็นค่าความต้านทาน โดยไม่มีส่วนประกอบของค่าเชิงซ้อนมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจะได้ว่า ค่าคุณลักษณะความต้านทานคือ  $R_k$  และค่าความต้านทานของสายอากาศคือ  $R_i$  เขียนใหม่ได้

$$R_k = R_i = 120 \ln \frac{\theta_h}{2} \quad (2.41)$$

การเปลี่ยนแปลงค่ามุมของ สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัดจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรูป



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของสายอากาศกรวยคู่และกรวยเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัด

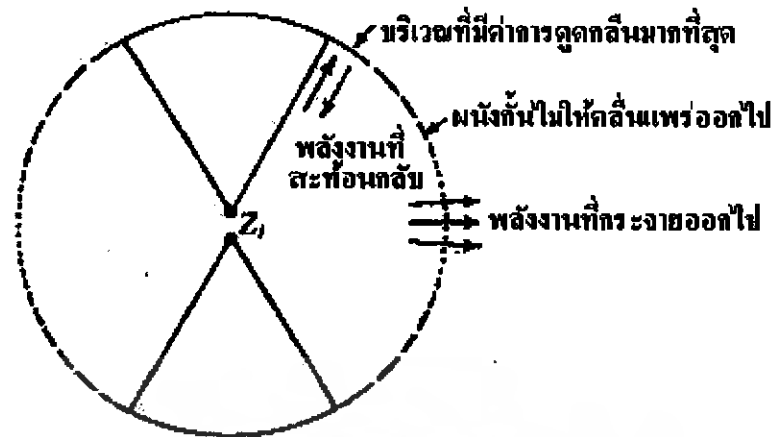
ในส่วนนี้เราจะมาพิจารณาถึง สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัด ซึ่งจะมีสิ่งที่แตกต่างจาก สายอากาศกรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวไม่จำกัด คือคลื่นในโหมด TEM จะมีอยู่ใน เฉพาะตัวนำที่เป็นกรวย แต่ถัดจากกรวยออกไปในอากาศ ระยะเวลาหนึ่งจะมีเฉพาะคลื่นที่อยู่ในโหมดอันดับสูงๆเท่านั้น และได้มีผู้กำหนดนิยามของขอบเขตนี้ขึ้นมา คือ เซอร์คินอฟ (Schelkunoff's) เป็นผู้ที่กำหนดพื้นที่ทรงกลมขึ้นมารอบกรวยเป็นขอบเขตของคลื่นในโหมด TEM ดังรูปที่ 2.17



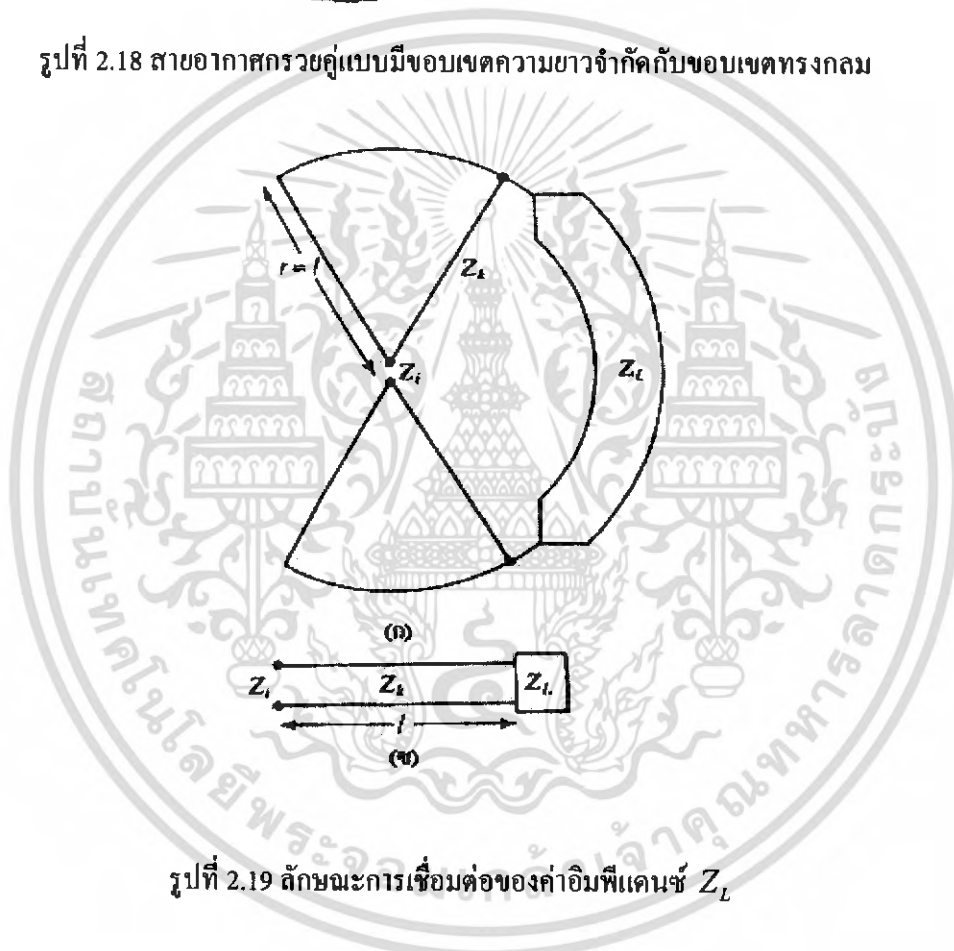
รูปที่ 2.17 บริเวณพื้นที่ทรงกลมที่กำหนดโดย เซอร์คินอฟ (Schelkunoff's)

ค่ารัศมีของทรงกลมนี้จะยาวเท่ากับ  $l$  และจะเท่ากับความยาวของกรวย ( $r=l$ ) ในพื้นที่ทรงกลมนี้ก็จะมีส่วนของคลื่นโหมด TEM อยู่และมีส่วนของคลื่นโหมดอันดับสูงอยู่ด้วย แต่ด้านนอกทรงกลมก็จะมีเฉพาะส่วนของคลื่นโหมดอันดับสูงเท่านั้น และเมื่อคลื่นโหมด TEM มีการแพร่กระจายออกไปสัมผัสกับบริเวณขอบเขตของรอยต่อ ซึ่งในส่วนของพลังงานของคลื่นโหมด TEM ก็จะมีการสะท้อนเกิดขึ้น การสะท้อนนี้จะเกิดขึ้นกับคลื่นโหมด TEM เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามมันก็ไม่ได้เป็นอย่างนั้นเสมอไป โดยจะมีค่าพลังงานบางค่า ที่เป็นค่าพลังงานการสะท้อนที่เกิดจาก คลื่นโหมดอันดับสูง โดยมันจะผ่านบริเวณรอยต่อของทรงกลม ที่คล้ายกับมีวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก ที่มีลักษณะการดูดซึมพลังงานที่จะผ่านออกไป กั้นอยู่ และที่บริเวณกรวยจะมีการสะท้อนของ คลื่นโหมด TEM มากที่สุด แต่ถ้าใกล้กับเส้นศูนย์สูตร จะมีการแพร่กระจายพลังงานออกไปนอก บริเวณทรงกลมมากที่สุด ดังรูปที่ 2.18

ในส่วนของวัสดุที่คล้ายกับเป็นแม่เหล็ก จะทำตัวเหมือนกับตัวต้านทานตัวหนึ่ง ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็น ค่าความต้านทานและส่วนที่เป็นค่าเชิงซ้อน โดยจะกำหนดค่านี้ให้เป็นค่าโหนดอิมพีแดนซ์  $Z_L$  โดยลักษณะการเชื่อมต่อของ  $Z_L$  จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19(ก)



รูปที่ 2.18 สายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัดกับขอบเขตทรงกลม



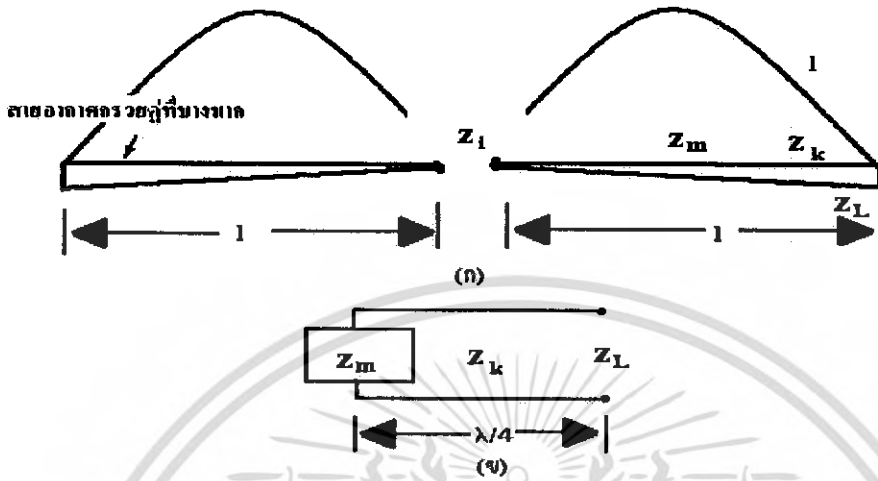
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเชื่อมต่อของค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$

สายอากาศรวยคู่แบบมีขอบเขตความยาวจำกัด สามารถจัดการกับ ระบบสายนำสัญญาณได้โดยจะให้ ระบบสายนำสัญญาณที่มีค่าความยาว  $l$  นี้ มีค่าเท่ากับค่าของคุณลักษณะอิมพีแดนซ์  $Z_k$  ไปเชื่อมต่อกับ  $Z_L$  ที่จุดปลายสุดดังรูปที่ 2.19(ข) ถ้าค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์  $Z_i$  ได้ที่จุดปลายของสายอากาศรวยคู่ เราสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_i = Z_k \frac{Z_L + jZ_k \tan \beta l}{Z_L + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแก้ปัญหาหาค่า  $Z_L$  นั้นจะหาได้จากวิธีการของ เชอร์คินอฟ (Schelkunoff's) ซึ่งเป็นผู้คิด โดยการลดทอนของ  $Z_L$  ซึ่งจะประกอบด้วย  $Z_m$  และจะเกิดขึ้นเมื่อที่จุดที่มีกระแสสูงสุดของสายอากาศรวมคู่ที่มีความบางมาก ๆ ดังรูปที่ 2.20 (ก) โดยที่กระแสจะมีลักษณะเป็นรูปไซน์



รูปที่ 2.20 สายอากาศรวมคู่ที่มีความบางมาก

สายอากาศรวมคู่ที่มีความบางและมีความยาว  $l$  ที่แสดงอยู่จะมี  $Z_m$  ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง ที่ปรากฏอยู่บริเวณที่มีค่ากระแสสูงสุดของกรวย เมื่อค่าอิมพีแดนซ์  $Z_m$  นี้เกิดขึ้นที่  $\lambda/4$  จากจุดที่เปิดวงจรจนถึงที่ปิดวงจร ตามรูปที่ 2.20 (ข) ดังนั้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  เท่ากับการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของ  $Z_m$  สุดท้ายแล้วค่าอิมพีแดนซ์  $Z_i$  จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ  $Z_L$  กับค่าของคุณลักษณะอิมพีแดนซ์  $Z_k$  ที่มีความยาวเท่ากับ  $l$  ดังรูปที่ 2.19 (ข) ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  จะได้จากค่าอิมพีแดนซ์  $Z_m$  โดยความสัมพันธ์กับระบบสายนำสัญญาณ

$$Z_L = Z_k \frac{Z_m + jZ_k \tan \beta x}{Z_L + jZ_m \tan \beta x} \quad (2.43)$$

เมื่อมีค่าความยาวเท่ากับ  $\lambda/4$  ดังนั้นจะได้ว่า  $\beta x = \pi/2$  จากสมการที่ (2.43)

$$Z_L = \frac{Z_k^2}{Z_m} \quad (2.44)$$

ในขณะที่  $Z_k$  จะมีเฉพาะส่วนที่เป็นค่าจริงทั้งหมด แต่สำหรับค่าอิมพีแดนซ์  $Z_m$  นั้นจะมีทั้งสองส่วน

$$Z_m = R_m + jX_m \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในส่วนที่เป็นค่าจริงจะเหมือนกับค่าความต้านทานที่แพร่กระจายออกไป ที่จุดที่มีค่ากระแสสูงสุดในสายอากาศยาวคู่ที่บางมาก สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการของ เซอร์คินอฟ (Schelkunoff's)

$$R_m = 60 \text{Ci} 2 \beta l + 30(0.577 + \ln \beta l - 2 \text{Ci} 2 \beta l + \text{Ci} 4 \beta l) \cos 2 \beta l + 30(\text{Si} 4 \beta l - 2 \text{Si} 2 \beta l) \sin \beta l \quad (2.46)$$

ค่าของ  $R_m$  นี้จะเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามค่าการแพร่กระจายของค่ารีแอกแตนซ์ นั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของสายอากาศ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$X_m = 60 \text{Si} 2 \beta l + 30(\text{Ci} 4 \beta l - \ln \beta l - 0.577) 2 \sin \beta l - 30(\text{Si} 4 \beta l) \cos 2 \beta l \quad (2.47)$$

เราจะนำสมการที่ (2.44) ที่มีค่า  $Z_L$  เข้าไปแทนในสมการที่ (2.42) จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_i = Z_k \frac{Z_k + jZ_m \tan \beta l}{Z_m + jZ_k \tan \beta l} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวของกรวย 1 อัน

$Z_k$  = หาได้จากสมการที่ (2.37) และ (2.38)

$Z_m = R_m + jX_m$  หาได้จากสมการที่ (2.46) และ (2.47)

ค่าของ  $Z_m$  จะเป็นอิสระกับค่าของมุมกรวย ที่เป็นกรวยบาง ดังนั้นค่าจริงและค่าเชิงซ้อนของ  $Z_m$  ก็จะขึ้นอยู่กับค่าของความยาวกรวย  $l$  เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าของ คุณลักษณะอิมพีแดนซ์  $Z_k$  จะเป็นฟังก์ชันของมุมของกรวยเท่านั้น ดังนั้นการหาค่าของ อิมพีแดนซ์  $Z_i$  สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (2.48) ซึ่งสมการนี้จะเป็นฟังก์ชันของมุมและความยาวด้วย

### บทที่ 3

#### การคำนวณและการออกแบบ

ในการคำนวณและการออกแบบ สายอากาศกรวยคู่ นั้น จะต้องมีกำหนดค่าหรือคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบก่อน เช่น ขนาดความหนาของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ, ช่วงความถี่ที่ใช้งาน, ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เป็นต้น จากนั้นจึงทำการออกแบบสายอากาศกรวยคู่แล้วจึงค่อยนำไปสู่กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่ต่อไป

#### 3.1 การคำนวณและการออกแบบสายอากาศกรวยคู่

ในการคำนวณหาขนาดของสายอากาศกรวยคู่ จะยึดหลักตามทฤษฎีของสายอากาศกรวยคู่ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เมื่อได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นก็จะนำไปออกแบบสายอากาศ โดยจะใช้โปรแกรม CST (Computer Simulation Technology) ในการออกแบบและจำลอง (Simulate) สายอากาศซึ่งเราจะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

##### 3.1.1 การกำหนดขนาดความหนาของสายอากาศกรวยคู่

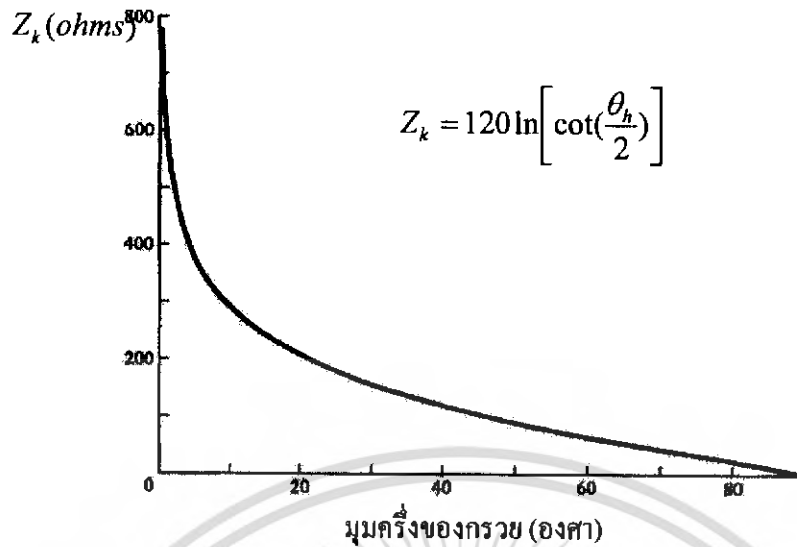
ในการกำหนดขนาดความหนาของสายอากาศกรวยคู่ นั้น จะต้องเลือกวัสดุที่มีขนาดความหนาที่เหมาะสม คือจะต้องไม่หนาหรือบางจนเกินไปเพื่อง่ายต่อการสร้าง สำหรับกระบวนการสร้างสายอากาศนั้น วัสดุที่ใช้จะต้องง่ายต่อการม้วนงอ และง่ายต่อการเชื่อมต่อโดยในโครงงานนี้จะใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนาเท่ากับ 0.363 มิลลิเมตร ในการสร้างสายอากาศ

##### 3.1.2 การกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน

เนื่องจากสายอากาศกรวยคู่ เป็นสายอากาศ ที่มีแถบความถี่ที่ใช้งานกว้าง จึงต้องกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งานให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ โดยในโครงงานนี้ต้องการสร้างสายอากาศ ที่ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 2-8 GHz

##### 3.1.3 การกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่

ในการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ นั้นเพื่อให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ที่ต่อกับสายอากาศ และยังเป็นตัวกำหนดค่าของ มุมครึ่ง กรวยของสายอากาศกรวยคู่ ด้วย ซึ่งโครงงานนี้จะใช้สายส่งที่มี ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้น เราจึงต้องทำให้สายอากาศเราให้ มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเท่ากับ 50 โอห์ม ด้วยเพื่อให้เหมาะสมกัน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงค่าของ อิมพีแดนซ์ เมื่อเปลี่ยนค่ามุม

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าความต้านทานเท่ากับ 50 โอห์ม จะทำสายอากาศมีค่ามุมเท่ากับ  
จากสมการ

$$Z_k = 120 \ln \left[ \cot\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \right] \quad (3.1)$$

เมื่อค่า  $Z_k$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม  
จะได้มุม

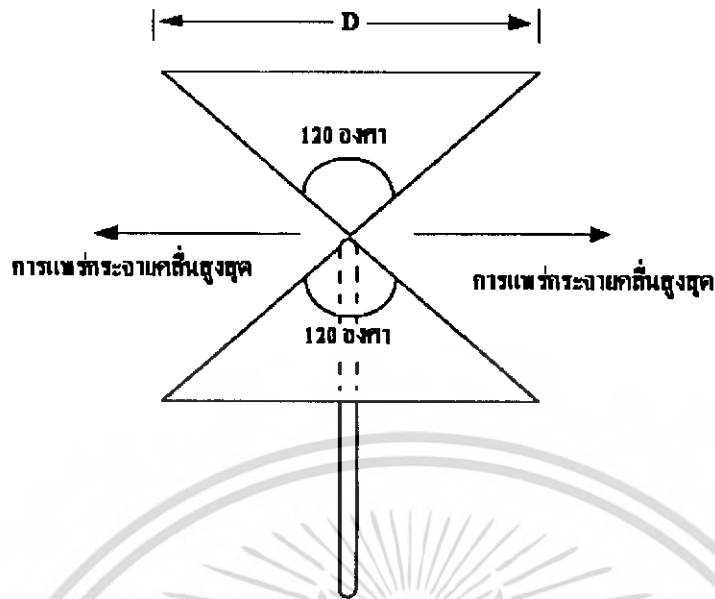
$$\theta_h = 66.788 \text{ องศา}$$

### 3.1.4 คำนวณหาค่าความยาวคลื่น

ในการคำนวณหาค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) นั้นเพื่อนำมาหาความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง ของกรวย (D) ของสายอากาศกรวยคู่ เพราะจากทฤษฎีของสายอากาศกรวยคู่ ได้กล่าวไว้ว่า สายอากาศกรวยคู่ จะมีค่าการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดเมื่อ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวย (D) ยาวเท่ากับ ค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ดังรูปที่ 3.2

ค่าการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด เมื่อ

$$D = \lambda \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2 สายอากาศกรวยคู่ที่มีคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นสูงสุด

จากรูปที่ 3.2 เมื่อค่ามุมกรวยมีค่าประมาณ 120 องศา จะให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ เข้าใกล้ 50 โอห์ม มากที่สุด โดยที่ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวย ( $D$ ) จะมีค่าเท่ากับค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) สูงสุดที่ใช้งาน ดังนั้นจะหาค่าความยาวคลื่นได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $c$  คือ ค่าความเร็วของคลื่นมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$f$  คือ ค่าความถี่ ซึ่งจะกำหนดค่าความถี่ต่ำสุดที่จะใช้งานเท่ากับ 2GHz ดังนั้นจะได้

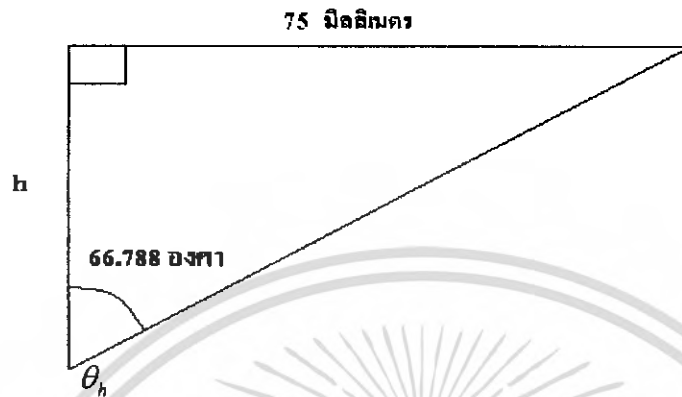
$$\lambda = D = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^9} = 0.15 \text{ เมตร}$$

ซึ่งคือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศกรวยคู่ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 คำนวณหาความสูงของสายอากาศกรวยคู่

จากค่ามุมและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้เราจะนำค่าพวกนี้มาคำนวณหาค่าความสูงของโคน โดยใช้สูตรเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก

จากหัวข้อที่ 3.1.4 กรวยของสายอากาศ มีความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าเท่ากับ 150 มิลลิเมตร จากรูปที่ 3.3 สามเหลี่ยมจะแทนด้วยครึ่งหนึ่งของกรวย ซึ่งค่าความสูง (h) ของกรวยสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการ

$$\tan \theta_h = \frac{r}{h} \quad (3.4)$$

แทนค่า ลงในสมการ

$$h = \frac{75}{\tan 66.788} = \frac{75}{2.331} \\ = 32.163 \text{ มิลลิเมตร}$$

ซึ่งคือค่าความสูงของสายอากาศกรวยคู่ที่นำไปใช้ในการออกแบบ

เมื่อ  $r$  คือ ค่ารัศมีของกรวยเท่ากับ 75 มิลลิเมตร

$h$  คือ ค่าความสูงของกรวย

$\theta_h$  คือ ค่าของมุมครึ่งกรวยเท่ากับ 66.788 องศา

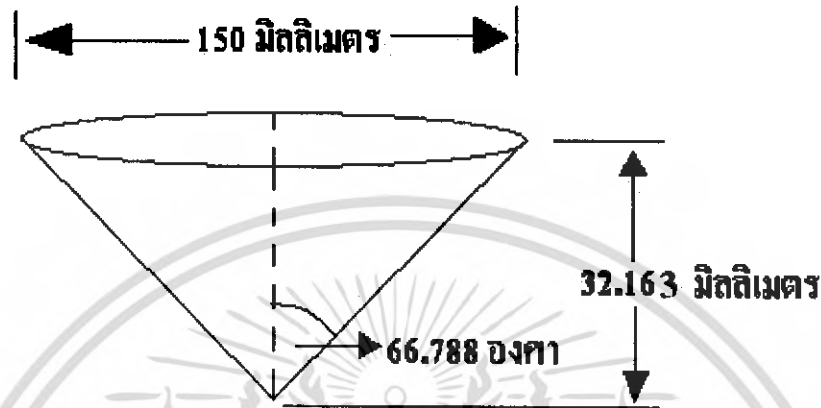
### 3.1.6 ส่วนประกอบของสายอากาศกรวยคู่ที่ได้จากการคำนวณ

ค่ามุม  $\theta_h$  ที่ครึ่งกรวย ซึ่งคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z_k$ ) ที่ 50 โอห์ม = 66.788 องศา

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศกรวยคู่ = 150 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ารัศมีของกรวย	= 75 มิลลิเมตร
ค่าความสูงของกรวย	= 32.163 มิลลิเมตร
ค่าความหนาของแผ่นทองแดง	= 0.363 มิลลิเมตร

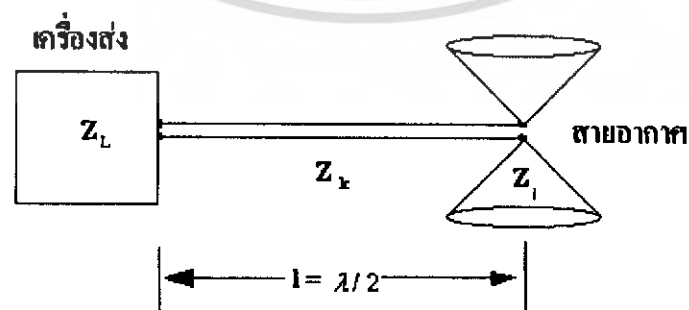


รูปที่ 3.4 ลักษณะของสายอากาศกรวยคู่ที่ได้จากการคำนวณ

เมื่อได้ค่าต่างๆจากการคำนวณมาแล้ว จากนั้นก็จะนำค่าเหล่านี้ มาคำนวณด้วยโปรแกรม CST เพื่อทำการจำลองการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ กรวยคู่ เพื่อดูว่าค่าที่ได้ออกมานั้น ตรงตามที่ต้องการหรือไม่

### 3.2 การคำนวณหาความยาวสายส่งของสายอากาศกรวยคู่

จากทฤษฎีของสายอากาศไดโพล ได้กำหนดไว้ว่า ค่าความยาวของสายส่ง จากเครื่องส่งจนถึงสายอากาศ ค่าความยาวของสายส่งจะต้องมีค่าเท่ากับ  $\lambda/2$  เพื่อที่จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เหมาะสมกัน



รูปที่ 3.5 ลักษณะความยาวของสายส่งของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.42)

$$Z_i = Z_k \frac{Z_L + jZ_k \tan \beta l}{Z_k + jZ_L \tan \beta l}$$

เมื่อ  $\beta = 2\pi/\lambda$  และ  $l = \lambda/2$   
 ดังนั้น

$$\tan \beta l = \tan \pi$$

โดยที่  $\tan \pi = 0$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.42) แทนค่า  $\tan \pi = 0$  ลงไปจะได้

$$Z_k = Z_i$$

นั่นก็หมายความว่าสายส่งที่ใช้  $l = \lambda/2$  จะไม่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณ เสมือนกับว่าเครื่องส่งต่ออยู่กับสายอากาศ

ในการคำนวณหาความยาวสายส่งของสายอากาศกรวยคู่ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

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

หรือ

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศ

$\mu_0$  คือ ค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น

$f$  คือ ค่าความถี่

โดยจะกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ( $f$ ) เท่ากับ 5 GHz เพราะว่าค่าความถี่ที่ใช้งานนี้ เป็นค่าความถี่กลางของช่วงความถี่ที่ใช้งาน คือ ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz และ  $c$  มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที  
 ดังนั้นจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^9} = 0.06 \text{ เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็มาคำนวณหาค่าความยาวคลื่น ( $\lambda_d$ ) ของสาย รีจิดโคแอกเซียล ที่ใช้เป็นสายส่ง เมื่อ  $v$  คือค่าความเร็วในสาย รีจิดโคแอกเซียล ดังสมการ

$$\lambda_d = \frac{v}{f} \quad (3.5)$$

หรือ

$$\lambda_d = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon \mu}} \quad (3.6)$$

โดยที่

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ และ } \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.7)$$

หรือ

$$\mu = \mu_r \mu_0 \text{ และ } \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของตัวกลาง (สายรีจิดโคแอกเซียล)

$\mu_r$  คือ ค่าซึมซาบแม่เหล็กของตัวกลาง (สายรีจิดโคแอกเซียล)

ดังนั้นจะได้

$$\lambda_d = \frac{1}{f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \times \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3.8)$$

หรือ

$$\lambda_d = \lambda \times \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

โดยที่ค่า  $\mu_r$  มีค่าเท่ากับ 1 และค่า  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 2.5

ดังนั้นจะได้

$$\lambda_d = 0.06 \times \frac{1}{\sqrt{2.5}} = 0.038 \text{ เมตร}$$

จาก  $l = \lambda/2$  ดังนั้น ค่าความยาวของสายรีจิดโคแอกเซียล จะได้

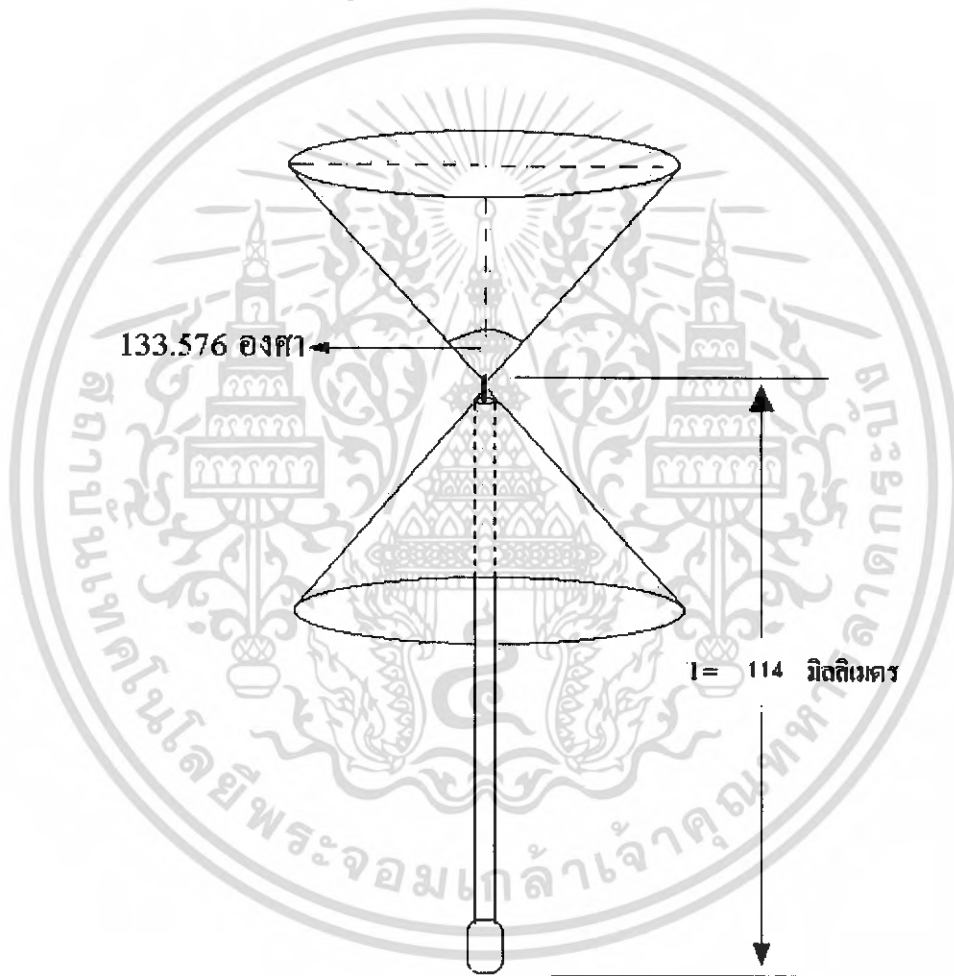
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l = \frac{n\lambda_d}{2}; n=1, 2, 3, \dots \quad (3.9)$$

กำหนดให้  $n$  คือค่าจำนวนเท่าของ  $\lambda/2$  เมื่อต้องการความยาวของสายส่งมีค่ามากขึ้น โดยในโครงการนี้ กำหนดให้  $n$  เท่ากับ 6 ดังนั้นจะได้

$$l = 6 \times \frac{38}{2} = 114 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นความยาวสายส่งของสายอากาศรัวคู่มีค่าเท่ากับ 114 มิลลิเมตร



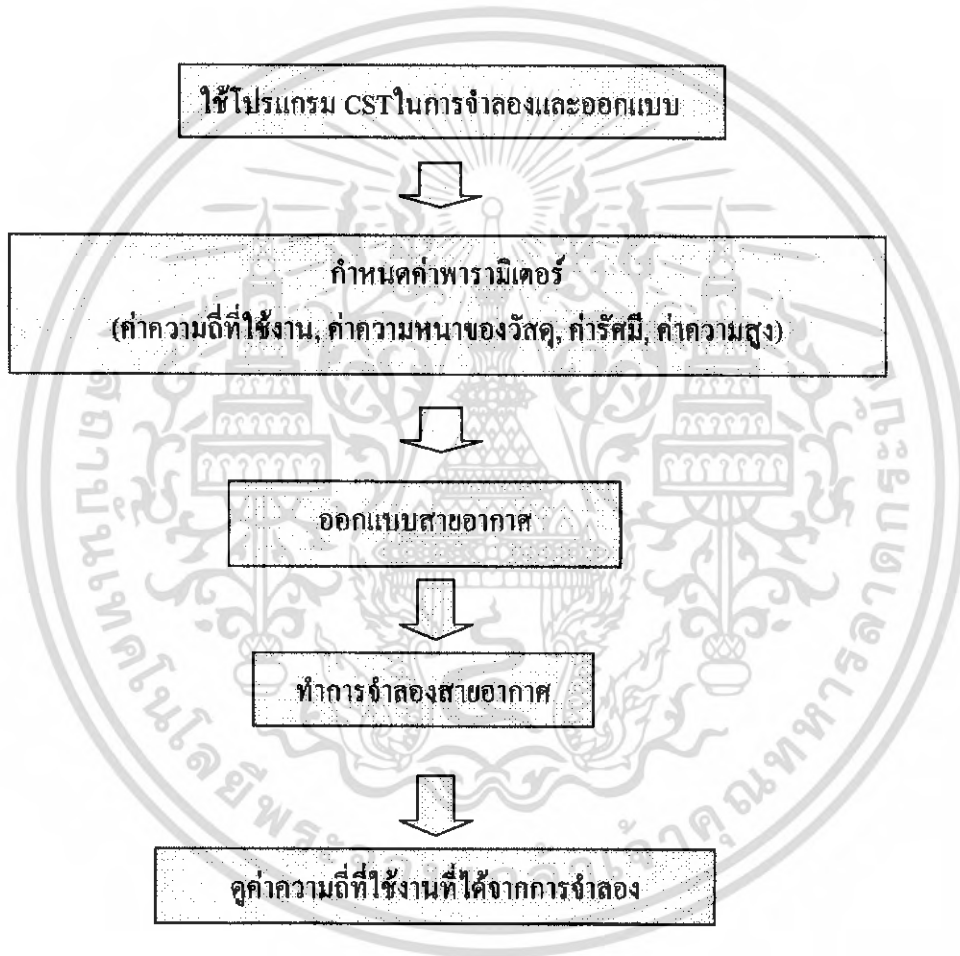
รูปที่ 3.6 ความยาวของสายรีดิกโคเอกเซียลของสายอากาศรัวคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การจำลองสายอากาศกรวยคู่

ในการจำลองรูปแบบของสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ

โดยในการวิเคราะห์จะนำขนาดของสายอากาศกรวยคู่ ที่ได้จากการคำนวณมาแล้ว มาทำการจำลอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม CST แล้วทำการปรับแต่งขนาดเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimize) แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST มาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างและพัฒนาสายอากาศต่อไป

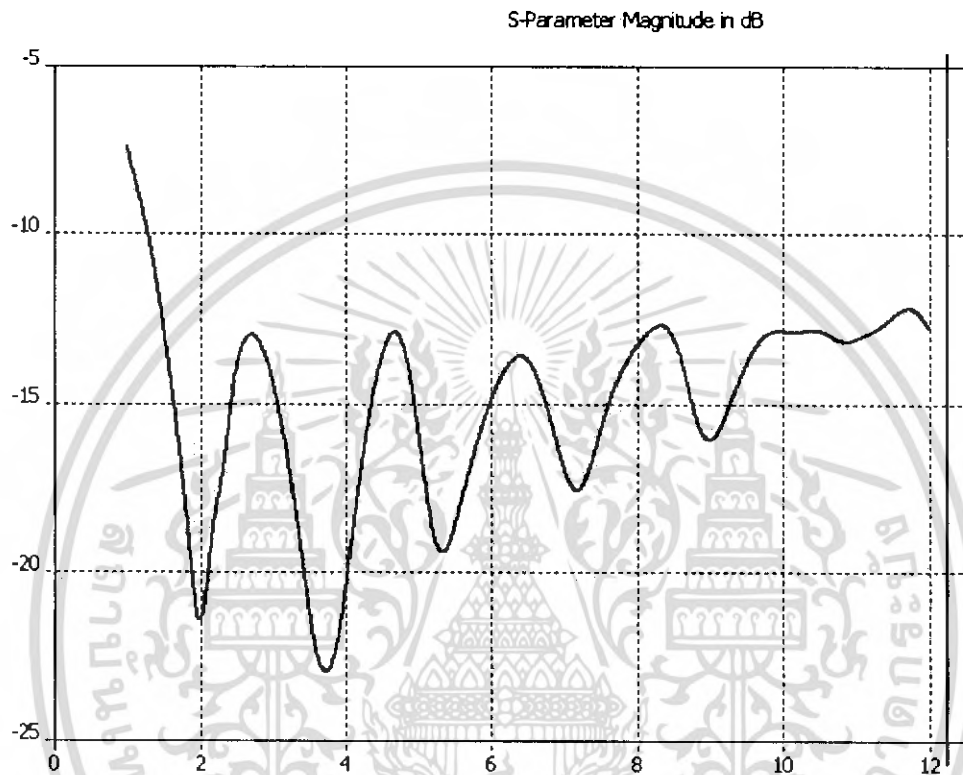


รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการจำลองและออกแบบสายอากาศ

### 3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองสายอากาศรวยคู่

#### 3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวก็ต้องพิจารณาที่ความถี่ใช้งานตั้งแต่ ความถี่ 2 GHz ถึง 8 GHz ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถยอมรับได้ จะต้องมีย่านน้อยกว่า -10 dB ลงไป



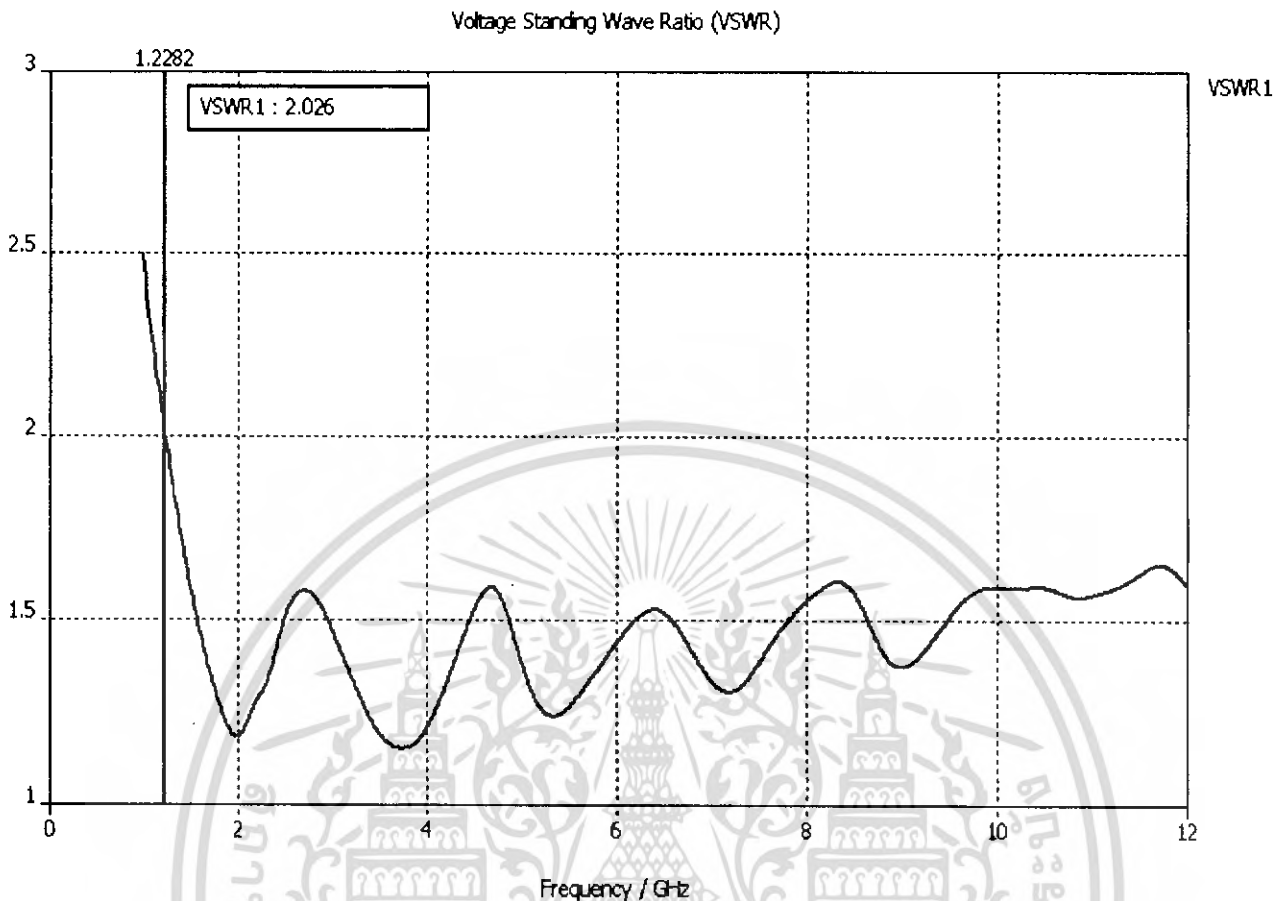
รูปที่ 3.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST จะทำให้ได้กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศรวยคู่ ซึ่งจากกราฟจะพบว่าที่ความถี่ ที่ใช้งานตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -10 dB ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดข้างต้นที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้

#### 3.4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio) คือค่าแรงดัน  $V_{\max}$  ของคลื่นนิ่ง และแรงดัน  $V_{\min}$  ของคลื่นนิ่งที่ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกัน และตรงกันข้ามกันตามลำดับ โดยการนำอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด ก็จะเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน โดยในการพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 2 หรือต้องต่ำกว่า 2 นั้นเองที่สามารถยอมรับนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าจะให้ดีก็ควรจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จะดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



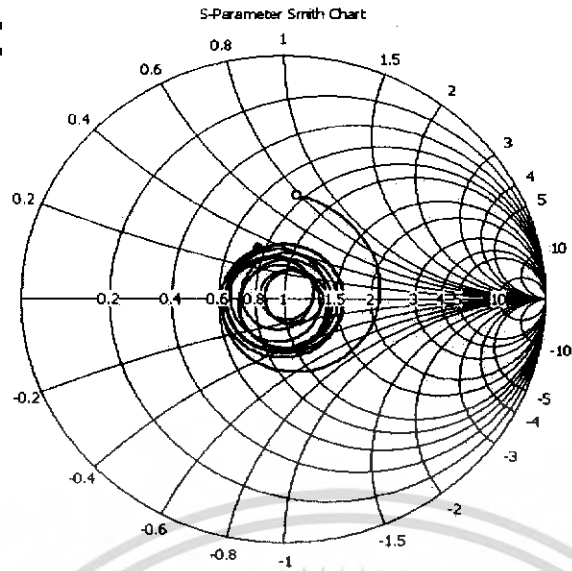
รูปที่ 3.9 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST นั้น จะพบว่าค่า VSWR ที่ความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz มีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ทั้งหมดตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณากับหลักการเบื้องต้นที่ว่าค่า VSWR ต้องมีค่าต่ำกว่า 2 ก็ถือว่าค่า VSWR ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปสร้างได้

### 3.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance)

สายอากาศกรวยกุ่มนั้น จะมีมุมที่กรวยของสายอากาศ จะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ โดยอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST นั้นต้องพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ใช้งานตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz

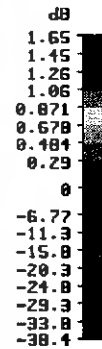
- 1.000 ( 46.42, 48.49) Ohm
- 12.00 ( 46.43, 20.34) Ohm



รูปที่ 3.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากโปรแกรม CST

จากรูป 3.10 จะเห็นว่า ค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศครวยกู่ ที่ใช้ค่าความถี่ ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz จะมีค่าอิมพีแดนซ์เฉลี่ยใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม เป็นไปตามที่เราต้องการ

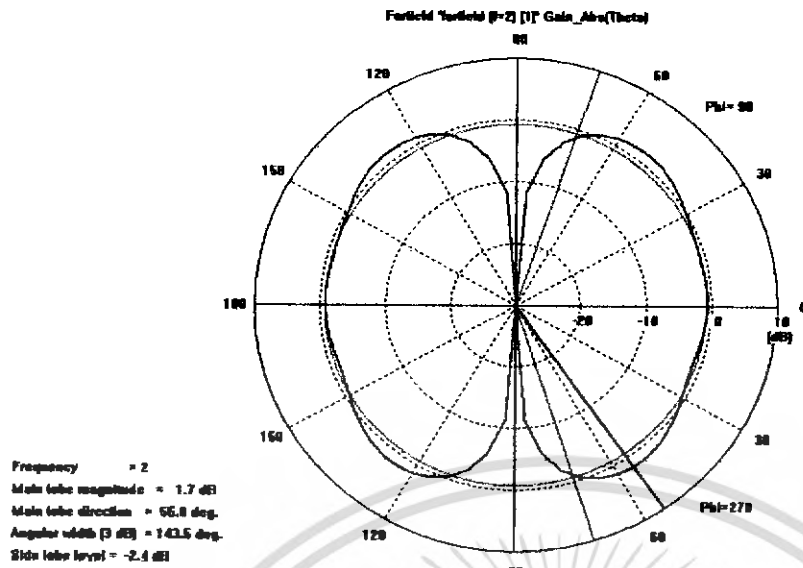
3.4.4 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศครวยกู่ ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz - ที่ความถี่ 2 GHz



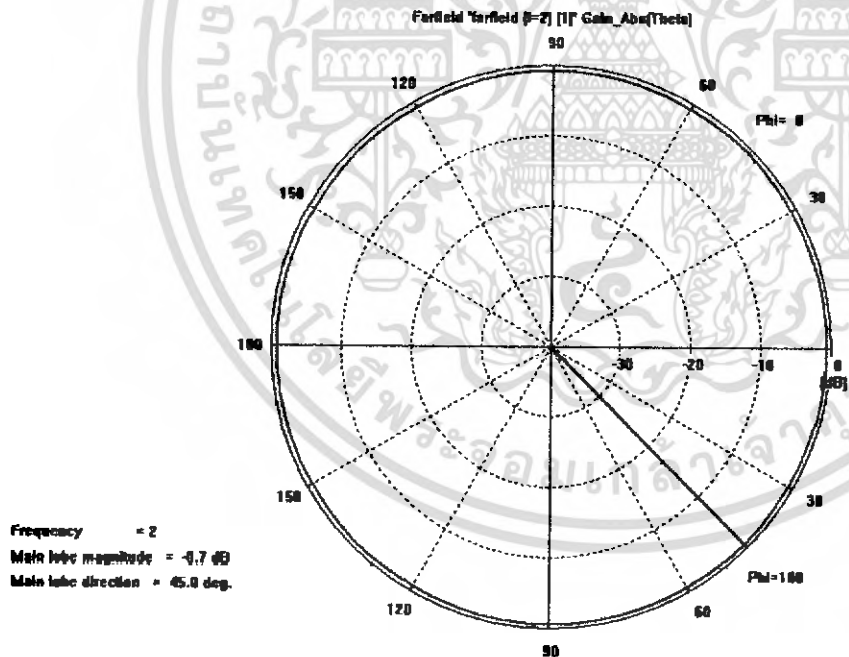
- Type = Farfield
- Approximation = enabled (kR >> 1)
- Monitor = farfield (f=2) [1]
- Component = Abs
- Output = Gain
- Frequency = 2
- Rad. effic. = 1.002
- Tot. effic. = 0.9952
- Gain = 1.646 dB

(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า



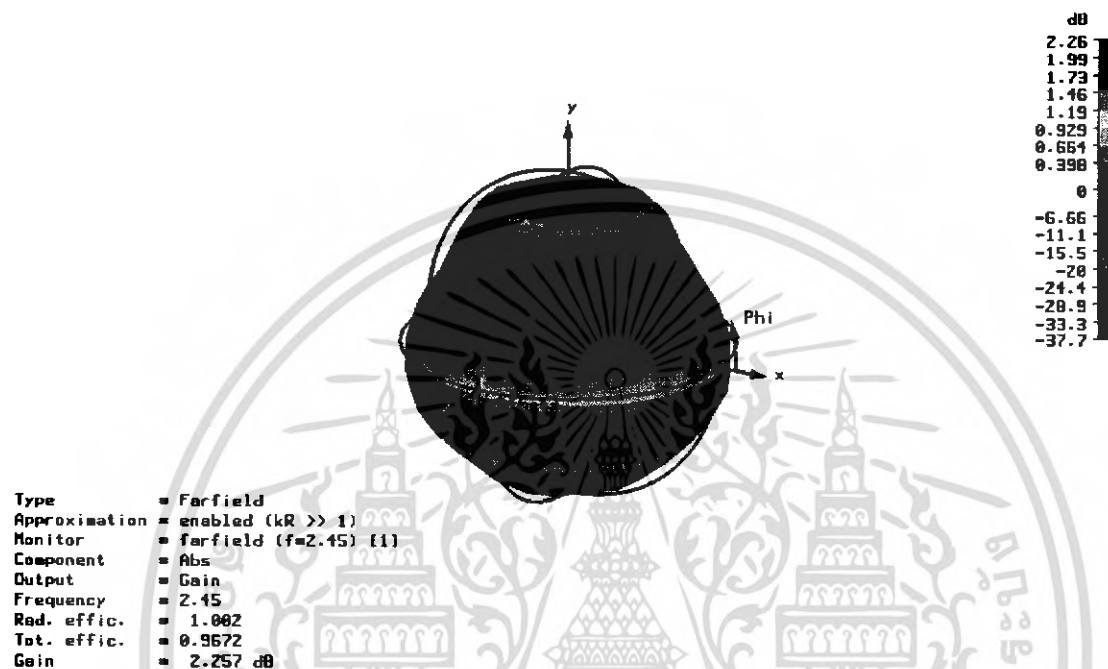
(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2 GHz

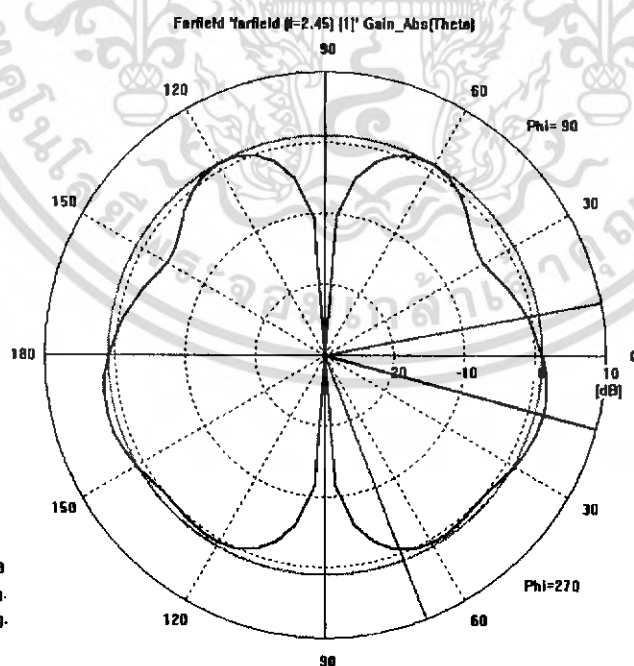
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่ ที่ความถี่ 2 GHz ในรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีลักษณะของสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และสำหรับที่ความถี่ 2 GHz นี้จะมีมุมของลำคลื่นหลักใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่งกว้างมาก จึงทำให้มีอัตราการขยายของสายอากาศน้อย จึงได้ระยะทางใกล้

- ที่ความถี่ 2.45 GHz

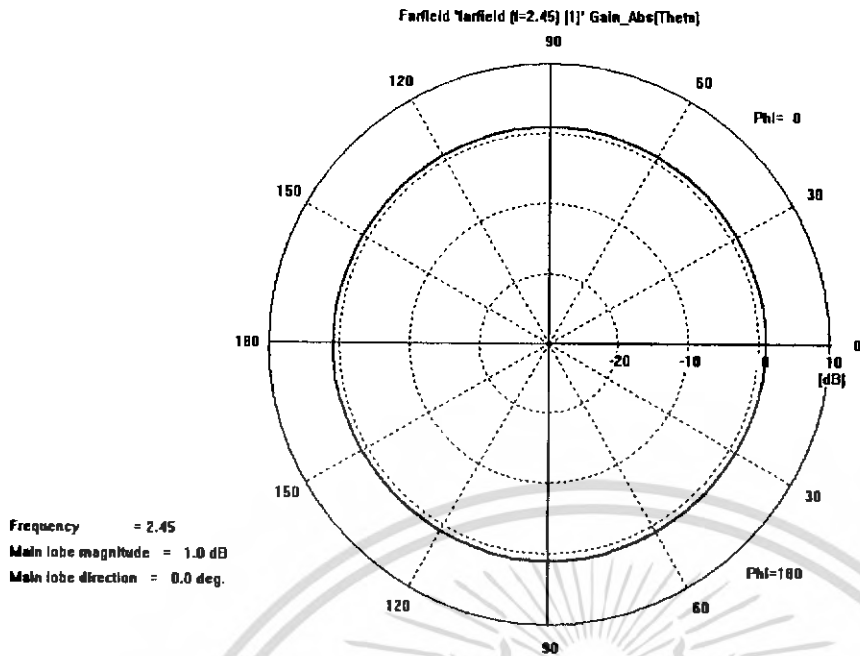


(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

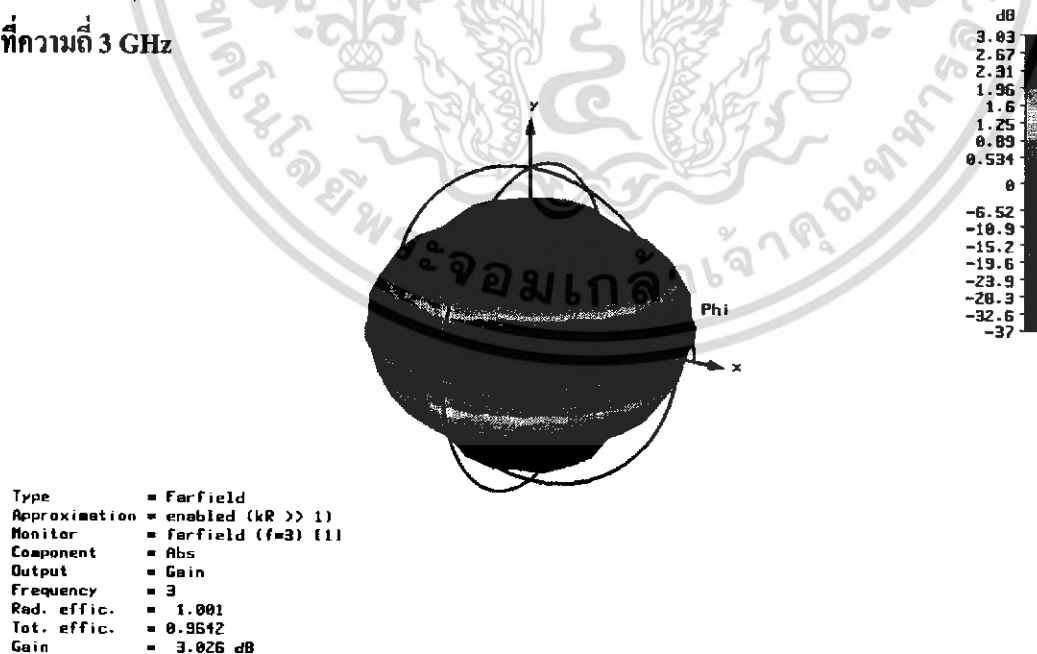


(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

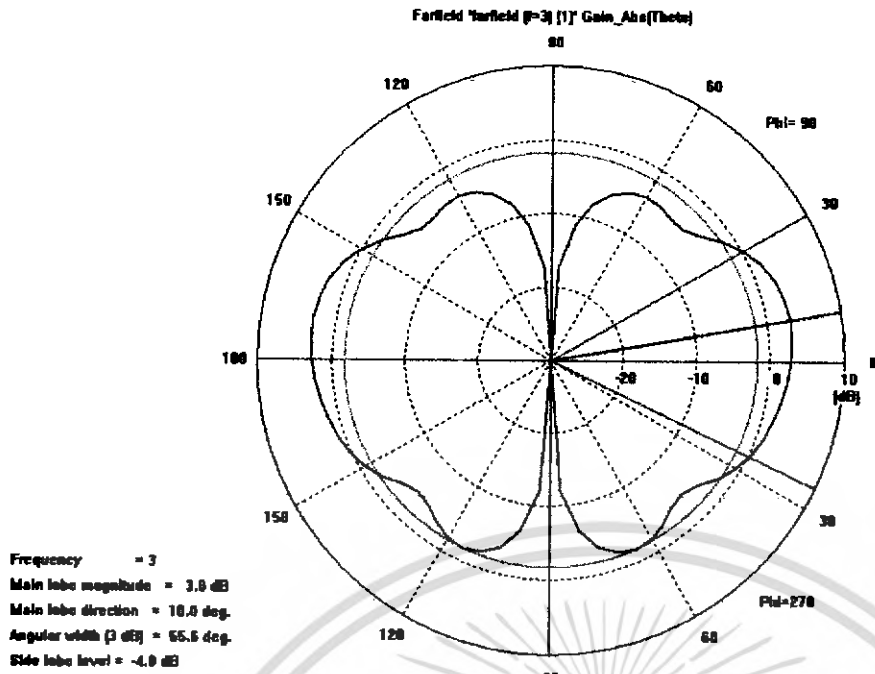
สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศรัวคู่ที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 2 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น

- ที่ความถี่ 3 GHz

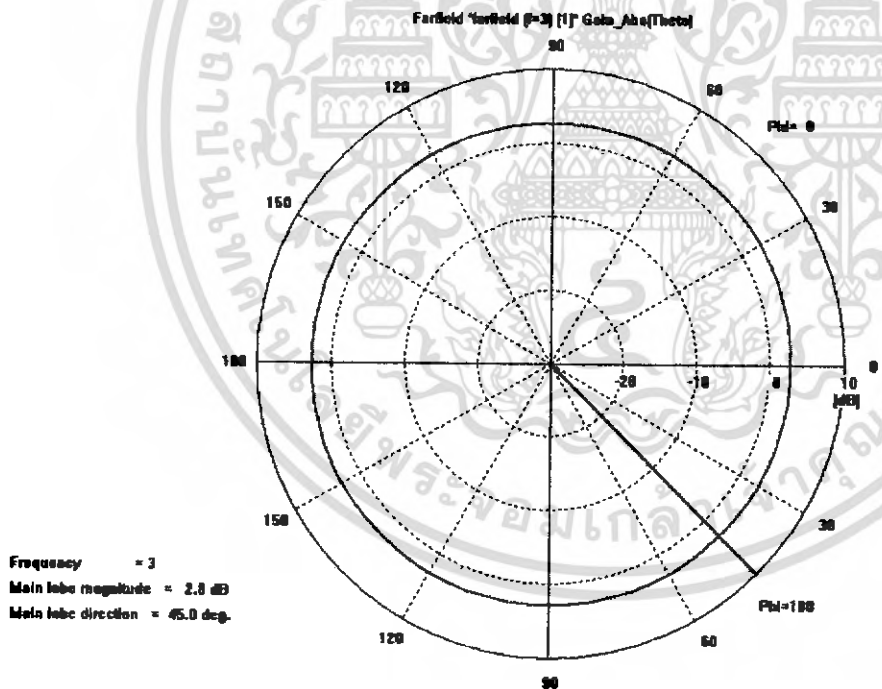


(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า



(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3 GHz

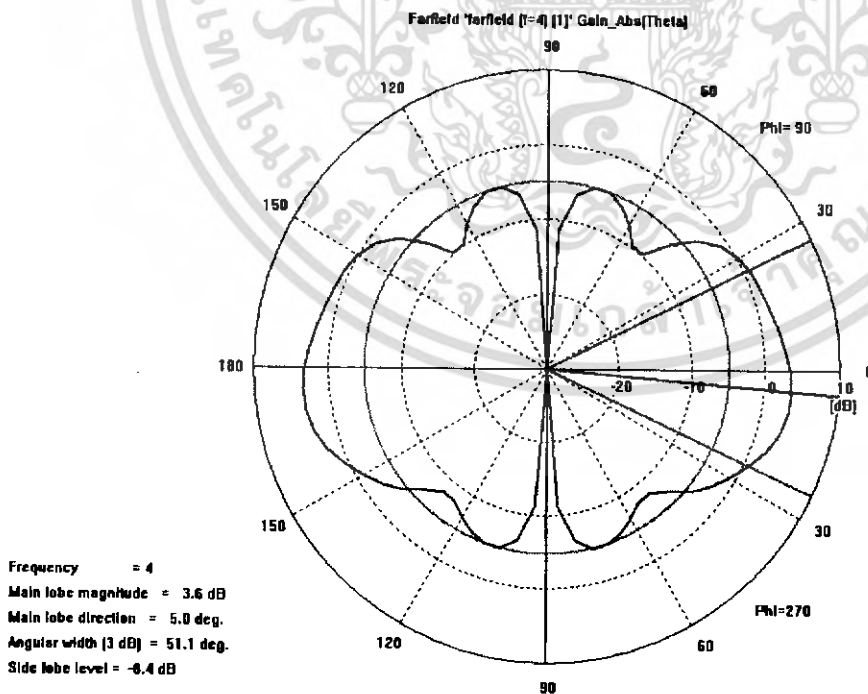
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 3 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่กำลังงานเครื่องหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 2.45 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น และเริ่มจะมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาบ้างเล็กน้อย

- ที่ความถี่ 4 GHz

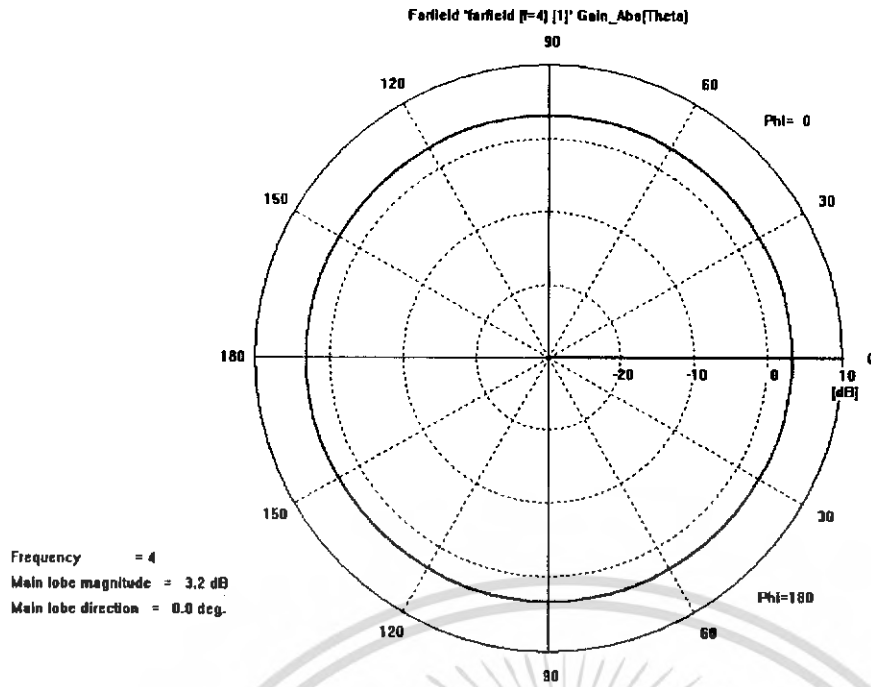


(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 4 GHz

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 4 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 3 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น และเริ่มจะมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาเห็นชัดเจน

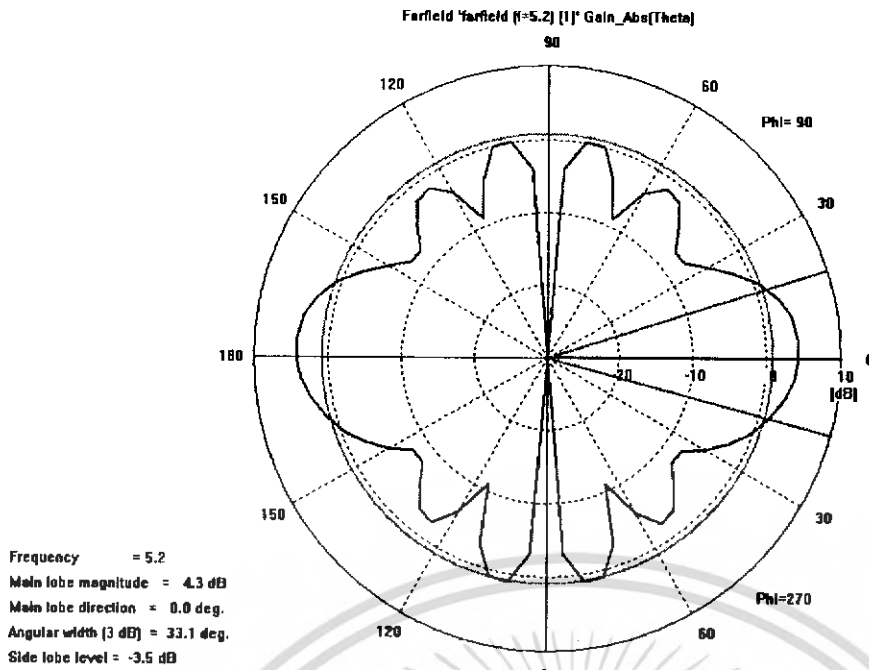
- ที่ความถี่ 5.2 GHz



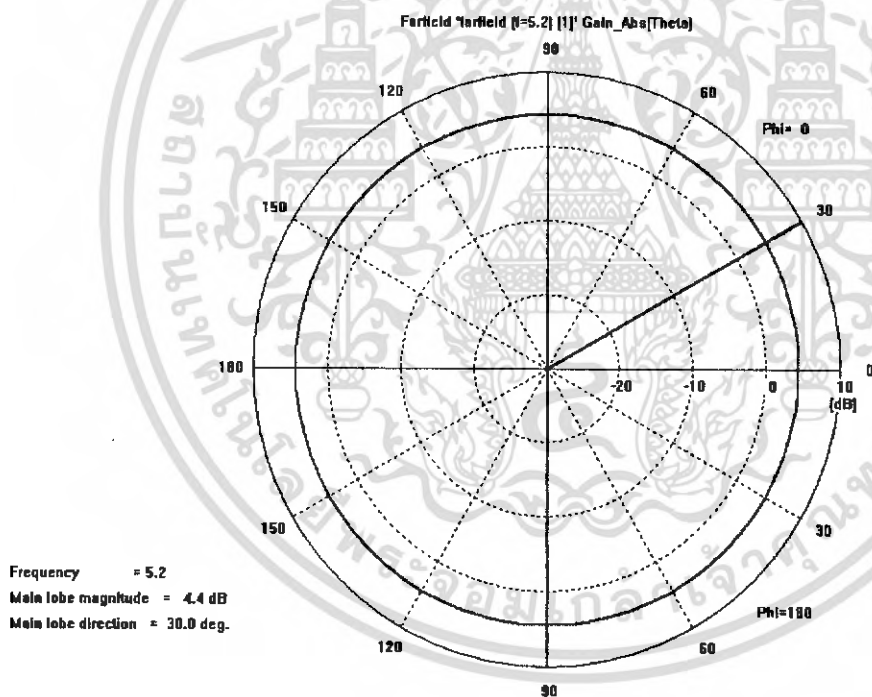
Type = Farfield  
 Approximation = enabled (kR >> 1)  
 Monitor = farfield (f=5.2) (1)  
 Component = Abs  
 Output = Gain  
 Frequency = 5.2  
 Rad. effic. = 0.9971  
 Tot. effic. = 0.9836  
 Gain = 4.373 dB

(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## (ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า



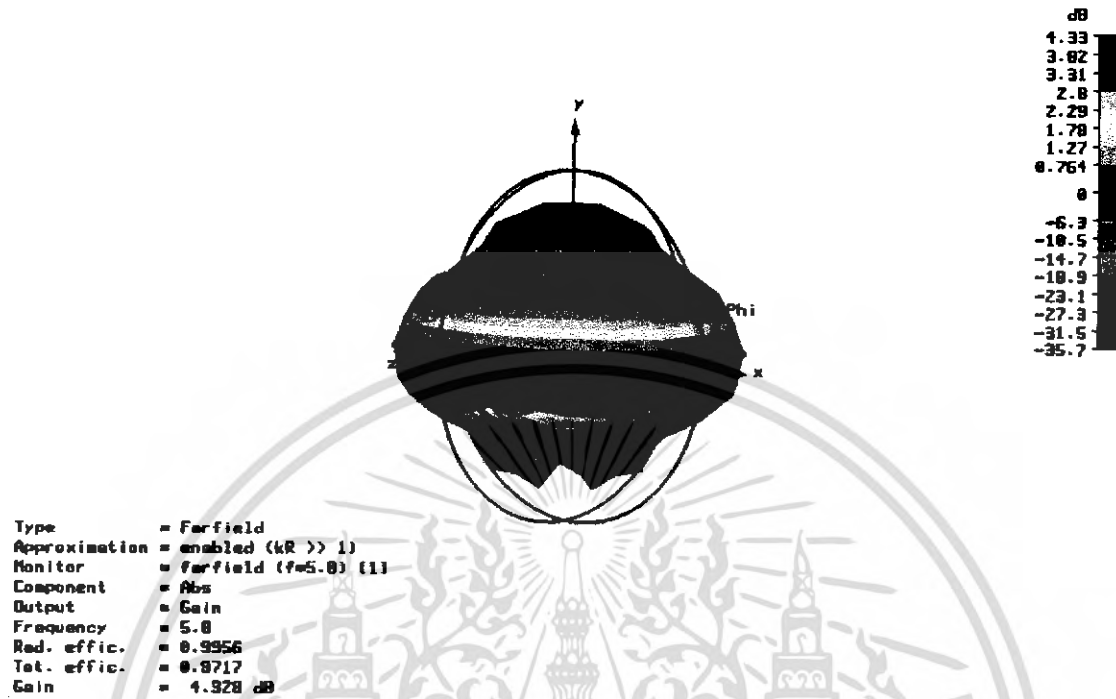
## (ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.2 GHz

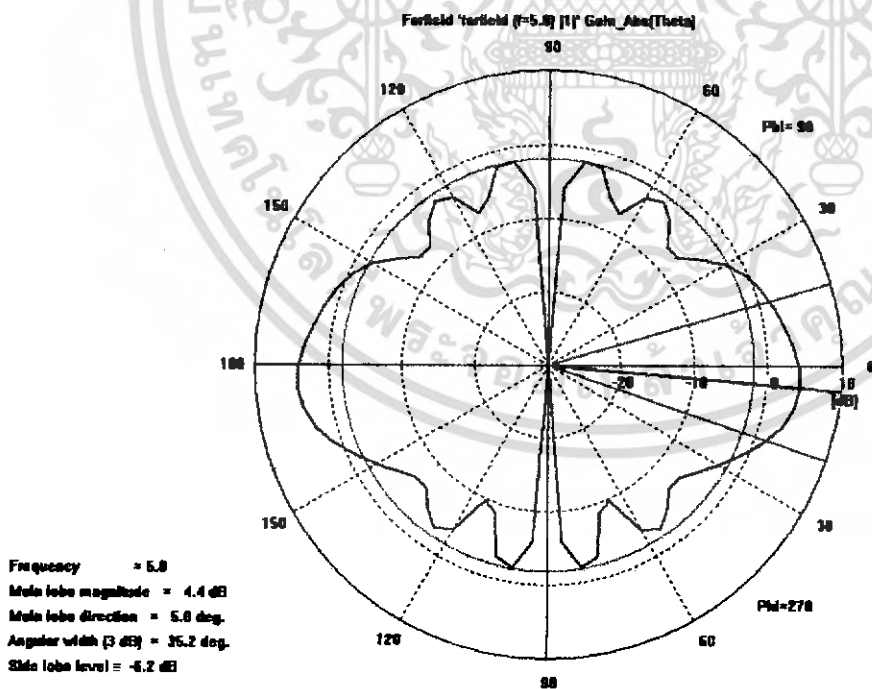
สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 5.2 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 4 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น และเริ่มจะมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาอีกหนึ่งลูกเห็นชัดขึ้น ทำให้เราเสียกำลังงานไปในทิศทางที่เราไม่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 5.8 GHz

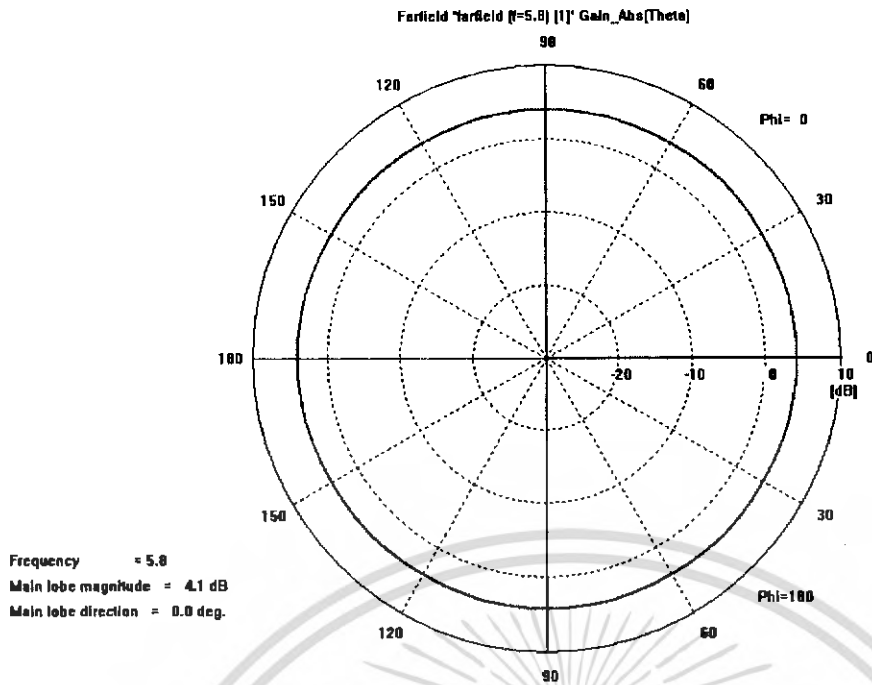


(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก  
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 5.8 GHz

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 5.8 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่น  
ลูกใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ใกล้เคียงกับความถี่ 5.2 GHz ซึ่งทำให้ค่าของอัตราขยายของ  
สายอากาศใกล้เคียงกันด้วย และมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาสองลูกแต่จะค่อยๆลดลง ต่างจากที่ความถี่ 5.2  
GHz

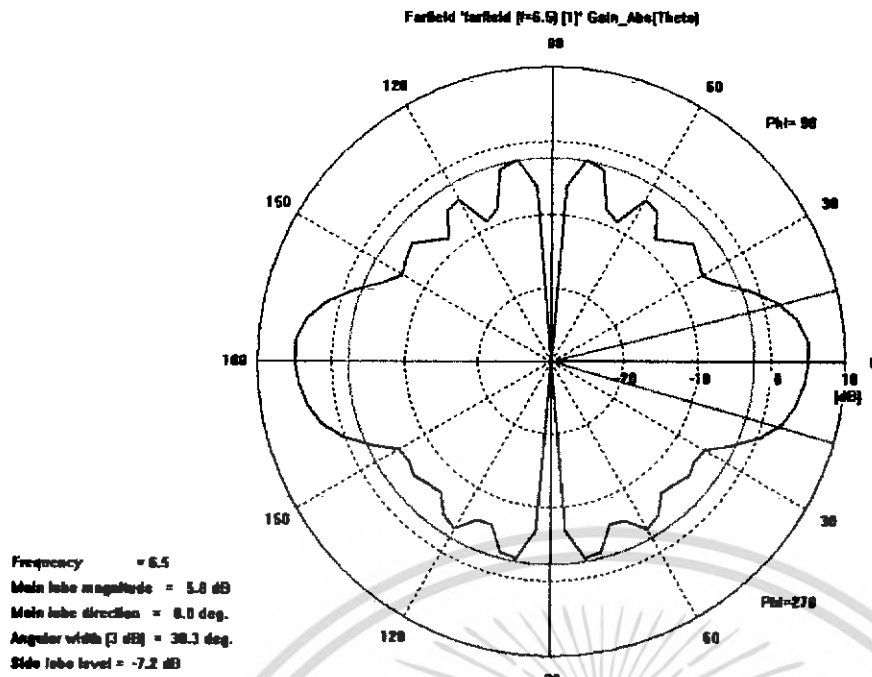
- ที่ความถี่ 6.5 GHz



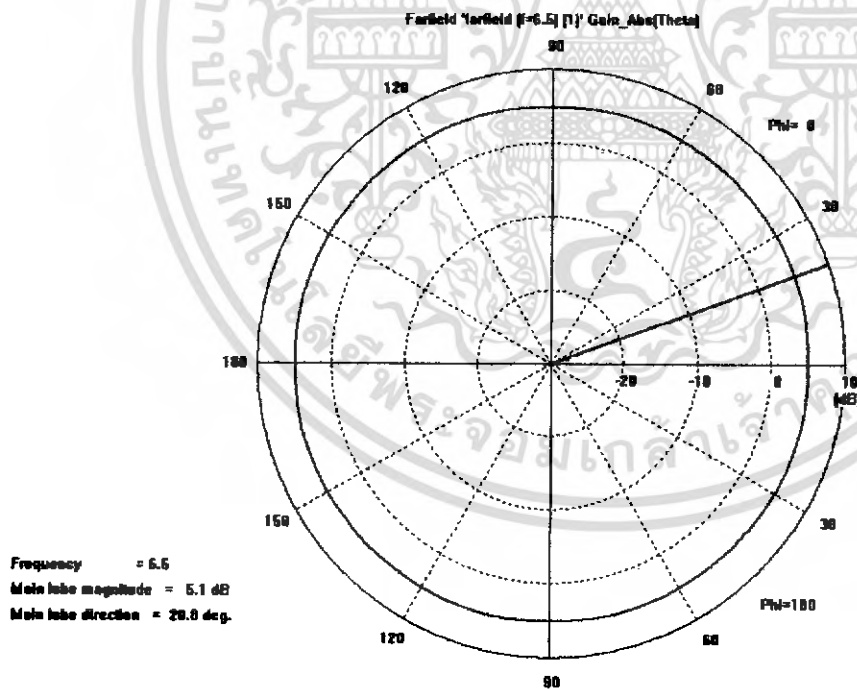
Type = Farfield  
Approximation = enabled (kR >> 1)  
Monitor = farfield (f=6.5) [1]  
Component = Abs  
Output = Gain  
Frequency = 6.5  
Rad. effic. = 0.9936  
Tot. effic. = 0.9511  
Gain = 5.088 dB

(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า



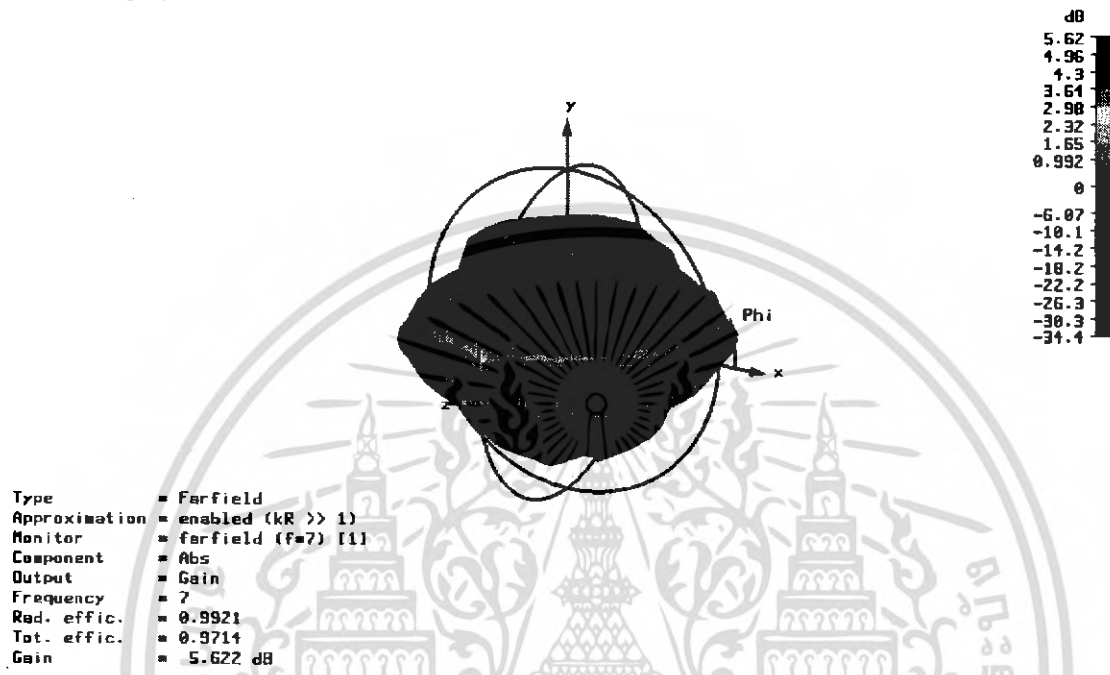
(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 6.5 GHz

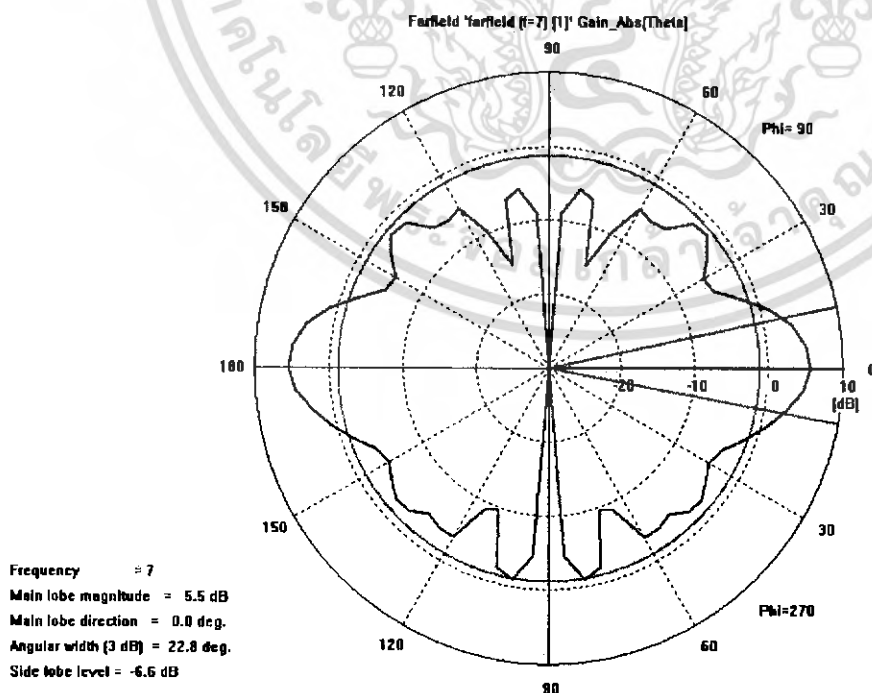
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 6.5 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่ กำลังงานครึ่งหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 5.8 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราขยายของ สายอากาศเพิ่มขึ้นมาก และจะมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาเป็น 3 ลูกเห็นชัดขึ้น ทำให้เราเสียดำพลังงานไปใน ทิศทางที่เราไม่ต้องการ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นก็เป็นแบบรอบตัวเหมือนเดิม

- ที่ความถี่ 7 GHz

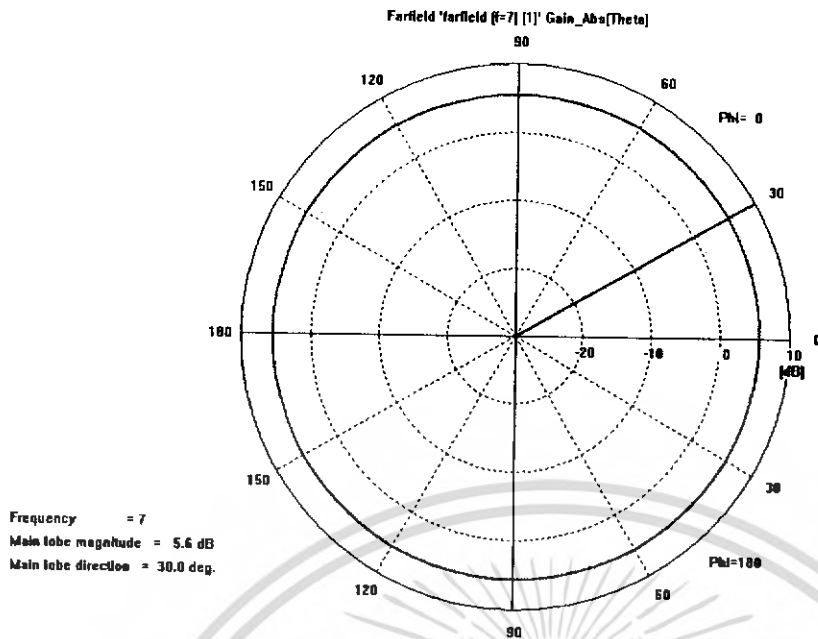


(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

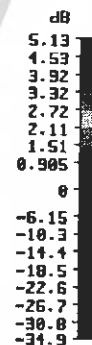
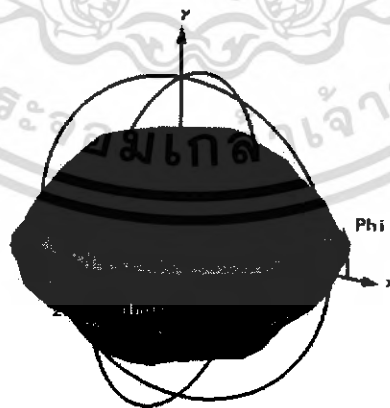


(ก) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.18 แบบรูปแพร์กระจายคลื่นที่ความถี่ 7 GHz

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 7 GHz นั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของมุมของลำคลื่นลูกใหญ่ที่กำลังงานครึ่งหนึ่ง นั้นมีค่ามุมที่ลดลงจากที่ความถี่ 6.5 GHz เล็กน้อยจึงทำให้ค่าของอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นมาก และจะมี ลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมามาก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นก็เป็นแบบรอบตัวเหมือนเดิม

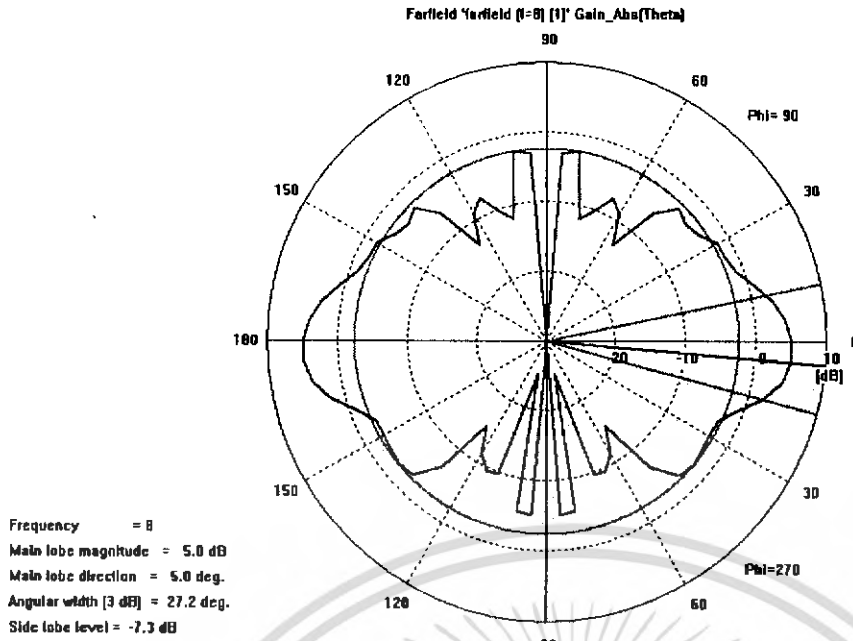
- ที่ความถี่ 8 GHz



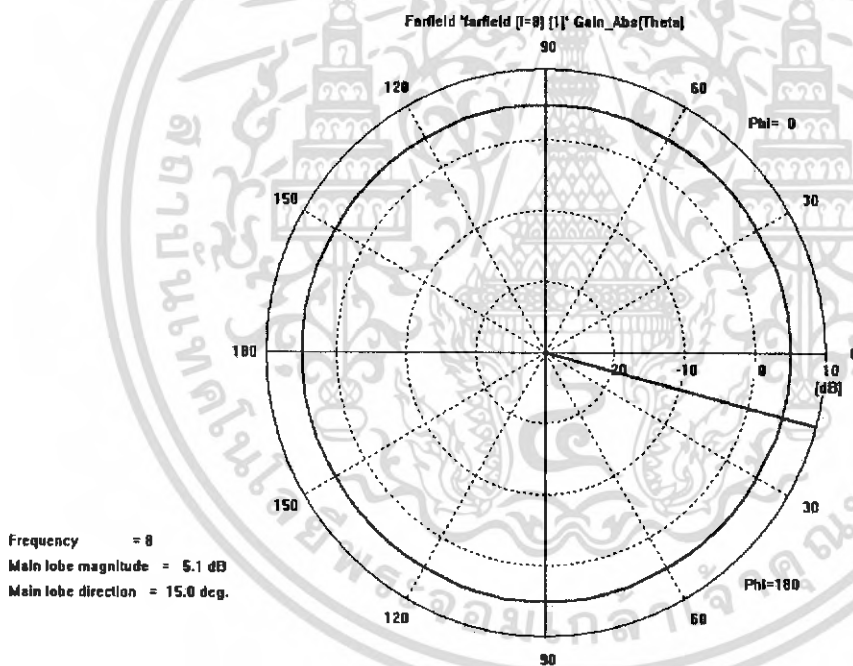
Type = Farfield  
Approximation = enabled (kR >> 1)  
Monitor = farfield (f=8) [1]  
Component = Abs  
Output = Gain  
Frequency = 8  
Rad. effic. = 0.9887  
Tot. effic. = 0.9423  
Gain = 5.129 dB

(ก) การแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า



(ค) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 8 GHz

สำหรับผลของการจำลองที่ความถี่ 8 GHz นั้นจะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการขยายลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากว่ามีลำคลื่นลูกเล็กเกิดขึ้นมาสูงมากจึง เอากำลังงานส่วนหนึ่งออกไป

สรุป ผลของการจำลองยังความถี่สูงขึ้นค่าของอัตราการขยายก็จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่ก็จะมีลำคลื่นลูกเล็กมากขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การสร้าง และการทดสอบ

#### 4.1 กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ และออกแบบ จากค่าพารามิเตอร์ ที่ได้จากคำนวณในบทที่ 3 แล้ว การสร้างสายอากาศกรวยคู่ นั้นจะใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบรูปร่าง และขนาดแล้วทำการจำลองสายอากาศ เพื่อให้ได้ความถี่ที่เราต้องการ คือ มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8GHz ซึ่งเราจะต้องปรับแต่งรูปร่างและ ขนาดให้มีค่าที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงมากที่สุด จากนั้นเราก็นำไปทำชิ้นงาน

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศกรวยคู่

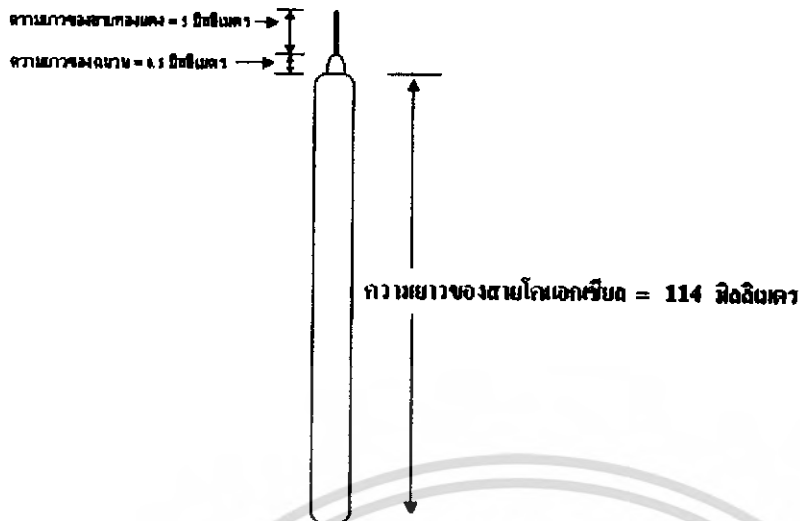
การสร้างสายอากาศกรวยคู่ นั้นในแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้วัสดุและอุปกรณ์หลายชนิด ซึ่งได้แก่

1. แผ่นทองแดง ขนาด 0.363 มิลลิเมตร ใช้ทำเป็นตัวสายอากาศ
2. สายริจิด โคแอกเซียล
3. ขั้วต่อ Connectors SMA
4. ตะกั่ว และหัวแร้ง สำหรับบัดกรี
5. ตะไบ
6. กระดาษทราย

##### 4.1.2 การสร้างสายอากาศกรวยคู่

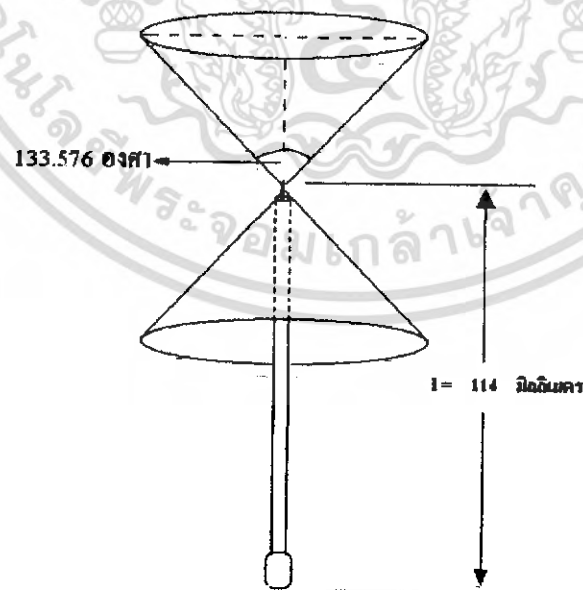
การสร้างสายอากาศกรวยคู่ โดยจะทำการเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำแผ่นทองแดงมาตัดให้มีขนาดความสูง 32.163 มิลลิเมตรและความยาวประมาณ 75.3 มิลลิเมตร จากความยาวที่ใช้จริง 75 มิลลิเมตรเพื่อเผื่อพื้นที่สำหรับเชื่อมต่อแผ่นทองแดงเป็นรูปกรวย
  2. นำแผ่นทองแดงที่ตัดมาแล้วนำมาขึ้นรูปโดยการม้วนแผ่นทองแดงเป็นรูปกรวย ตัดส่วนที่เกินออกให้เรียบร้อย แล้วบัดกรีให้แผ่นทองแดงติดกัน
  3. นำแผ่นทองแดงทรงกรวยที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาทำการแต่งขอบให้เรียบร้อยโดยการใช้ตะไบและกระดาษทรายขัด
  4. ตัดสาย ริจิด โคแอกเซียล ให้มีขนาดยาว 114 มิลลิเมตร
  5. นำสายริจิด โคแอกเซียล ไปต่อกับ Connectors SMA ส่วนอีกด้านหนึ่งปลอกสาย ริจิด โคแอกเซียล ออกให้เหลือแต่ตัวนำทองแดงยาว 5 มิลลิเมตร และเหลือฉนวนไว้ 0.5 มิลลิเมตร
- ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายรีจิด โกลเดิล ด้านที่นำไปต่อเข้ากับสายอากาศ

6. นำแผ่นทองแดงทรงกรวยมาทำการเจาะรูที่ยอดของกรวย โดยกรวยแรกเจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 มิลลิเมตรและกรวยที่สองเจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร
7. นำแผ่นทองแดงทรงกรวยทั้งสองมาประกอบเข้าสาย สายรีจิด โกลเดิล ด้วยการบัดกรีจะได้สายอากาศดังรูป



รูปที่ 4.2 สายอากาศกรวยคู่ที่นำชิ้นส่วนต่างๆมาประกอบกัน

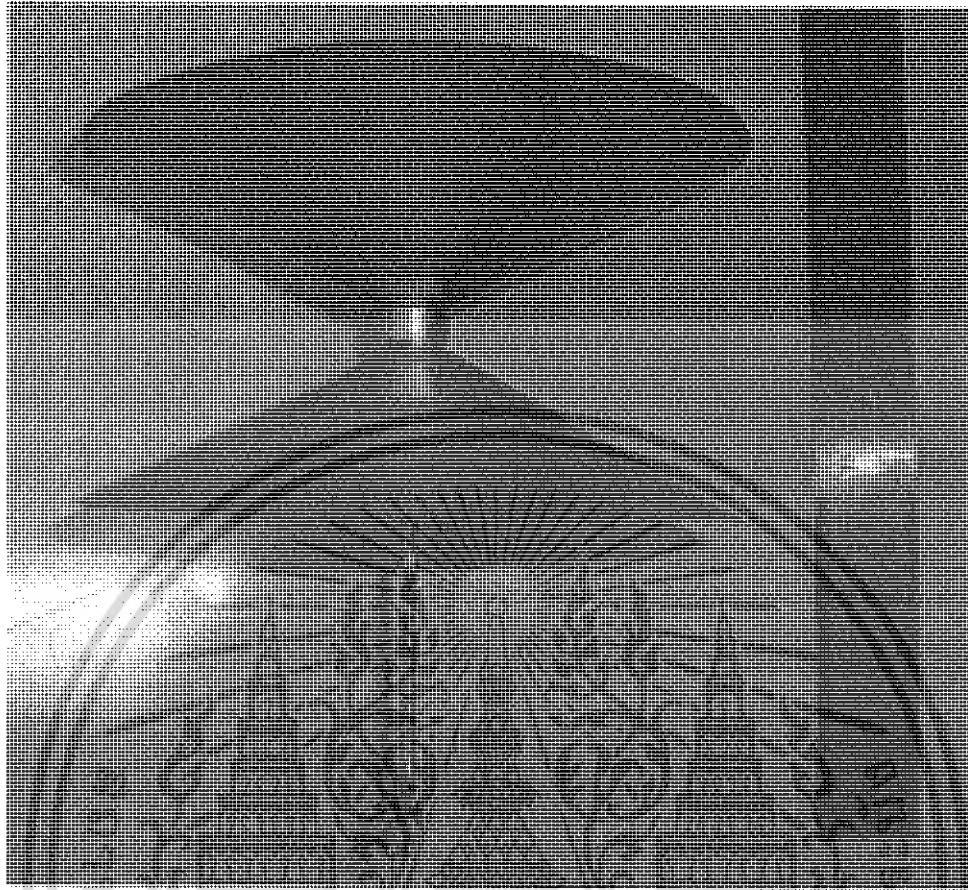
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ การออกแบบ และการสร้าง ทำให้เราทราบถึงขนาดและส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศ ที่ใช้งานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz ซึ่งเมื่อนำมาสร้างก็จะได้ชิ้นงานออกมามีรูปที่ 4.3



(ก) ความกว้างของสายอากาศวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ความสูงของสายอากาศกรวยคู่

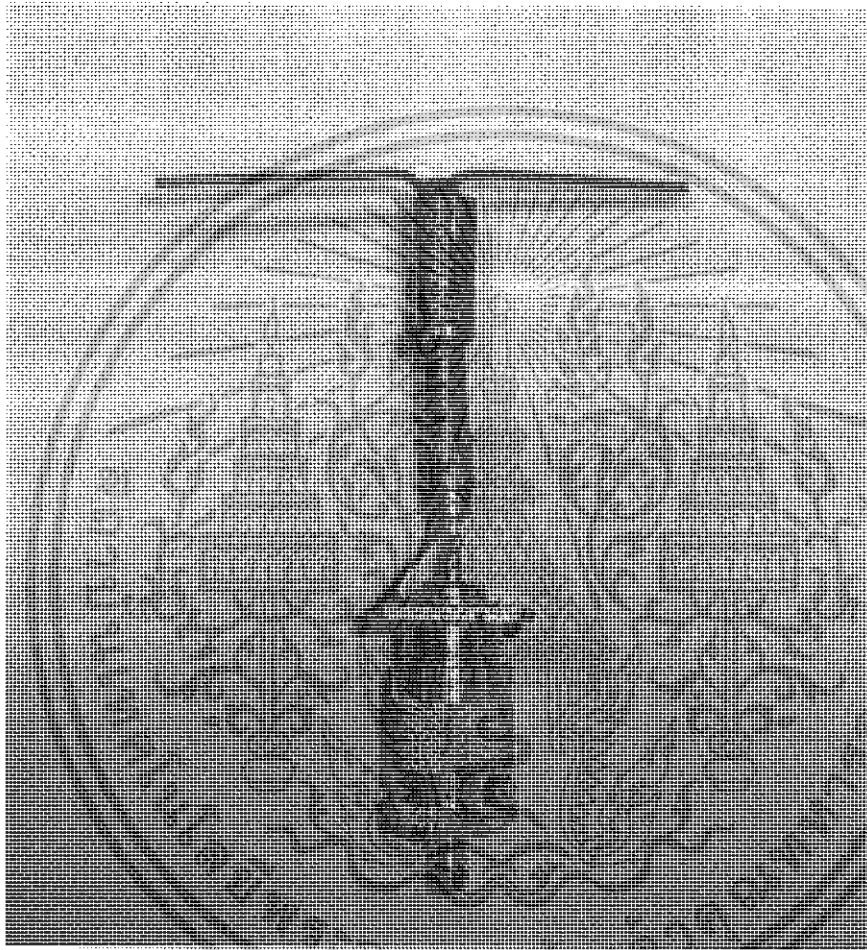
รูปที่ 4.3 สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการวัดและการทดสอบค่าต่างๆ ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุ (Network Analyzer: รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz) การวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุนี้สามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมทั้งค่าต่างๆ ออกมาโดยละเอียด

การทดลองจะประกอบไปด้วย การวัดและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นี้จะนำมาวิเคราะห์หาความผิดพลาดของการคำนวณว่าได้ใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่อย่างไร เพื่อนำมาปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

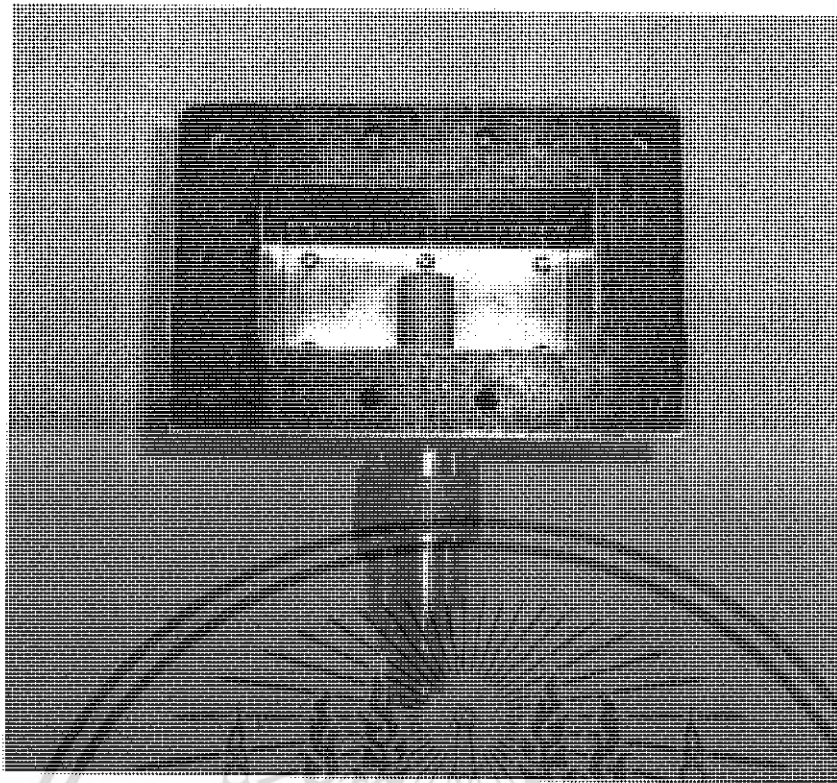
#### 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง Network Analyzer: รุ่น HP 8720C 50 MHz ถึง 20 GHz
2. ชุดคาร์เบรท 85022 B. 3.5 มิลลิเมตร
3. สายอากาศกรวยคู่
4. สายอากาศโมนโพลที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณที่อยู่ในช่วง 2.45 GHz
5. สายอากาศท่อเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว ใช้สำหรับส่งในย่านความถี่ 2.8 GHz ถึง 6.5 GHz



รูปที่ 4.4 สายอากาศโมนโพลที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณที่อยู่ในช่วง 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สายอากาศทอเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว

#### 4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

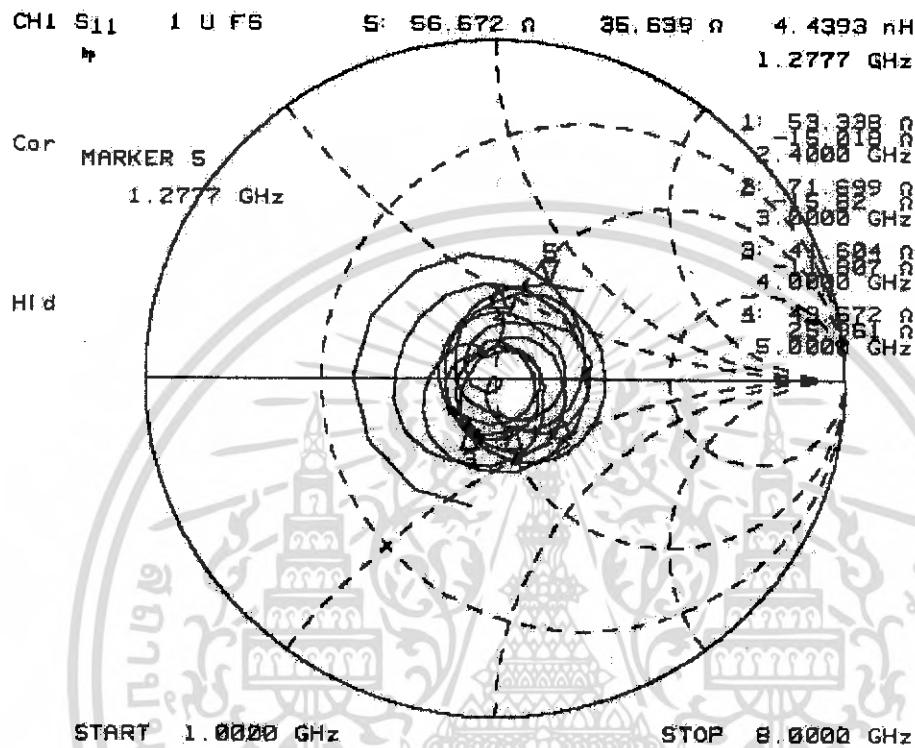
1. ทำการปรับเครื่อง Network Analyzer ด้วยชุดความถี่ 85022 B. 3.5 มิลลิเมตร
2. เลือกความถี่เริ่มต้น 1 GHz และความถี่สุดท้าย 8 GHz
3. ทำการต่อสายอากาศกรวยคู่ เข้ากับเครื่อง Network Analyzer
4. ทดสอบการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ ด้วยเครื่อง Network Analyzer
5. ทดสอบการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Return Loss)
6. ทดสอบการวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่ (VSWR)
7. ทดสอบการวัดหาค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW)
8. ทดสอบการวัดหาค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)
9. ทดสอบการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศ (Polarization)
10. ทดสอบการวัดหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)
11. ทดสอบการวัดหาค่าการส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบ

##### 4.4.1 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการทดสอบ หาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่นี้ โดยการอ่านค่า Smith chart จากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายวิทยุโดยจะใช้ Marker เป็นตัวบ่งบอกตำแหน่งในการหาค่าอิมพีแดนซ์ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz ซึ่งผลการทดสอบจะได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Impedance) ที่ได้จากผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่

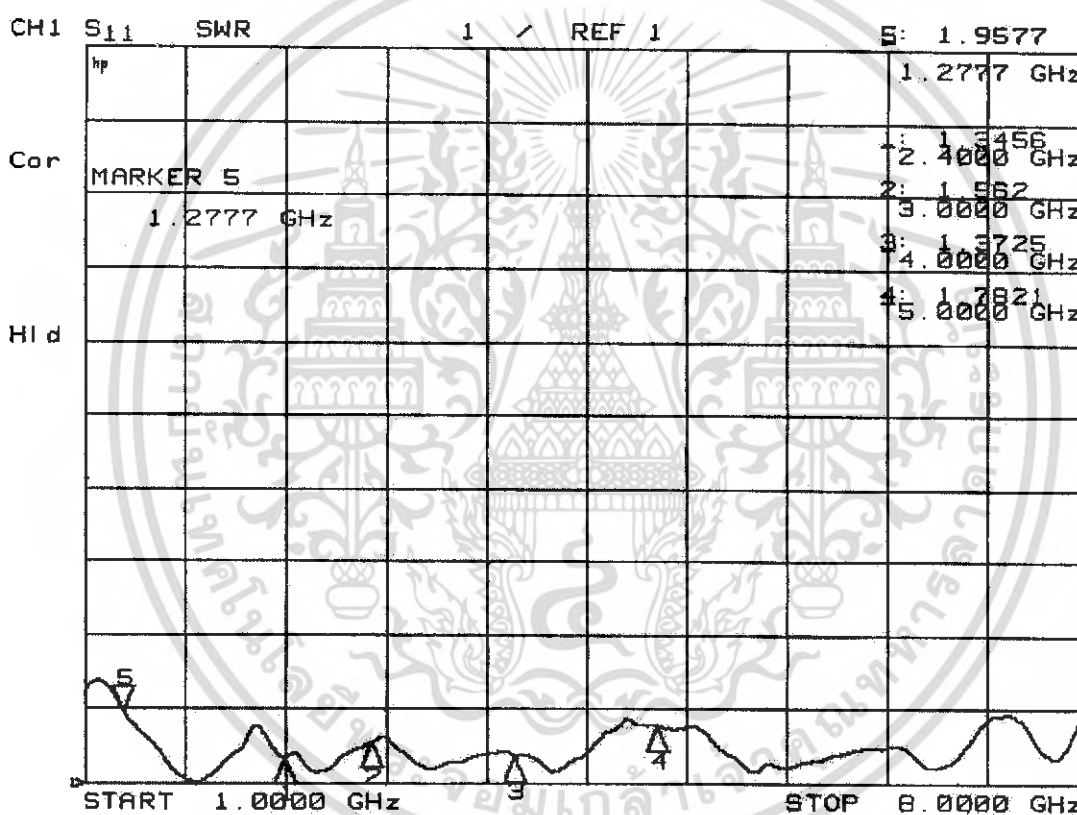
ความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	ค่าความต้านทาน	ค่าเชิงซ้อน
2	45.096	11.904
2.45	46.027	-13.34
3	71.891	-22.844
4	39.818	-11.246
5.2	59.77	-29.564
5.8	50.66	11.877
6.5	51.545	20.344
7	40.596	-1.6348
8	70.531	48.793

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการวัดค่าอิมพีแดนซ์นี้เราจะได้อ่านค่ากราฟและ ค่าความต้านทานที่เป็นค่าจริง โดยจากการทดสอบจะให้ Marker วิ่งไปตามความถี่ที่เราต้องการวัด จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ นั้น จะวิ่งวนใกล้กับเส้นตรงโดยที่เส้นตรงนี้จะมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม จะเห็นว่า แต่ละช่วงความถี่ที่ใช้งาน มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการ คือ 50 โอห์ม ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้ก็จะผลต่อค่า Return Loss และค่า VSWR ในการทดสอบต่อไป

#### 4.4.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่ นี้ ก็จะทำการทดสอบคล้ายๆ กับการหาค่าอิมพีแดนซ์คือ จะดูค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ใช้งานทั้งหมด 9 ความถี่



รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศ ที่ได้จากการทดสอบ

#### ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศกรวยคู่

ความถี่ที่ใช้งาน	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง
2 GHz	1.3175 : 1
2.45 GHz	1.3394 : 1
3 GHz	1.689 : 1

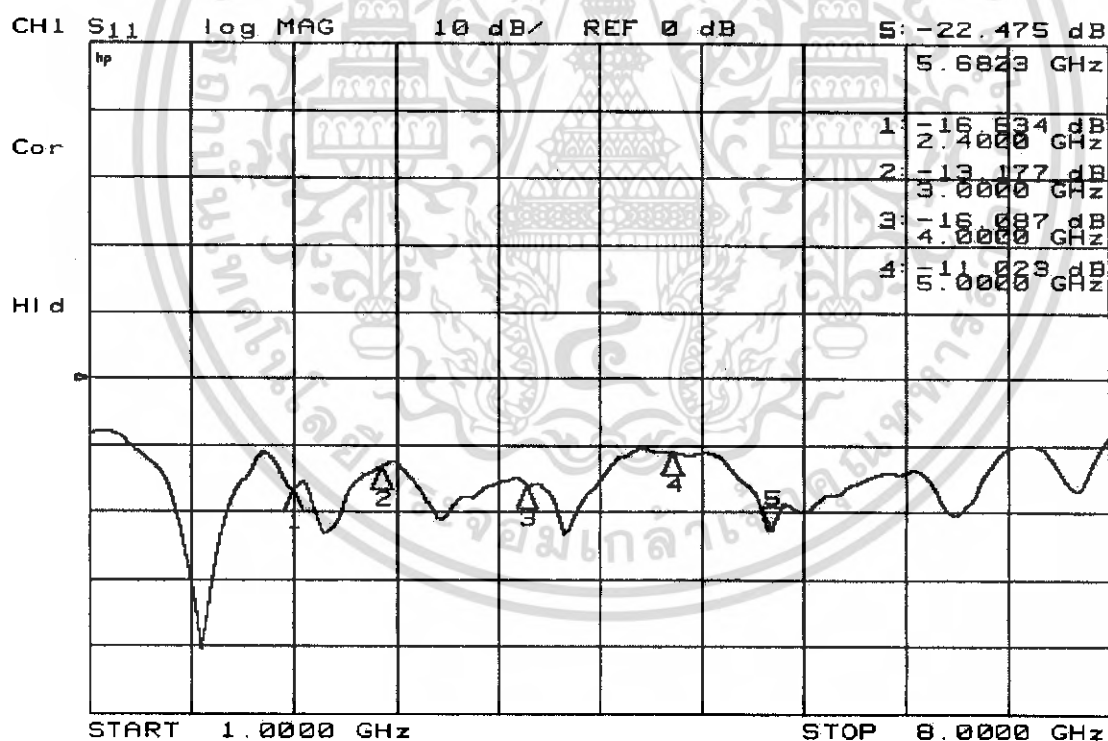
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 GHz	1.4052:1
5.2 GHz	1.7544:1
5.8 GHz	1.2672:1
6.5 GHz	1.4921:1
7 GHz	1.2424:1
8 GHz	2.132:1

จากการทดสอบค่าที่ได้จะเห็นว่าที่ความถี่ 8 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 2.132: 1 โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการนี้สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้เล็กน้อย แต่ช่วงความถี่อื่นจะ สามารถใช้งานได้ตลอด เพราะว่ามีค่าต่ำกว่า 2: 1 แต่ถ้าจะให้ใช้งานได้ดีๆ ก็ต้องให้ได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นต่ำกว่า 1.5: 1

#### 4.4.3 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

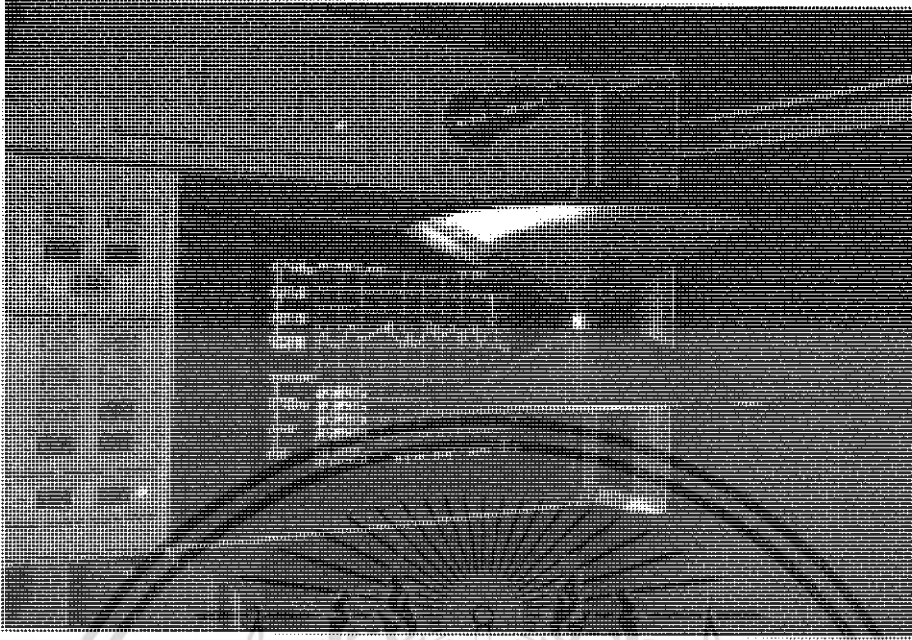
ในการทดสอบหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศรวบคู่ จะทำการวัด โดยดูที่ความถี่ใช้งานทั้งหมด คือที่ ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 8 GHz



รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 การวัดคุณสมบัติของเสาอากาศของสถานีวิทยุและทดสอบการใช้งาน



งานกว้างมาก

จากผลการทดสอบหาการสูญเสียของเสาอากาศที่ความถี่ 8 GHz มีค่าการสูญเสียของเสาอากาศที่ความถี่ 8 GHz ไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากเสาอากาศที่เรากำลังศึกษาอยู่สามารถใช้งานได้เฉพาะความถี่ในช่วง 2.45 GHz ถึง 2.77 GHz เท่านั้น การสูญเสียของเสาอากาศที่ความถี่ 8 GHz นั้นสูงกว่าการสูญเสียของเสาอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ถึง 10 dB ซึ่งจะทำให้เสาอากาศที่เรากำลังศึกษาอยู่ไม่สามารถใช้งานได้

ความถี่ใช้งาน	ค่าการสูญเสียของเสาอากาศ
2 GHz	-17.316 dB
2.45 GHz	-16.817 dB
3 GHz	-11.829 dB
4 GHz	-15.472 dB
5.2GHz	-11.249 dB
5.8 GHz	-18.574 dB
6.5 GHz	-14.089 dB
7 GHz	-19.362 dB
8 GHz	-9.354 dB

ตารางที่ 4.3 ค่าการสูญเสียของเสาอากาศของสถานีวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณี 59 ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบนั้นจะทำในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกล

$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (เมตร)

D = มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (เมตร)

ระยะที่ใช้ในการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่ D = 150 มิลลิเมตร

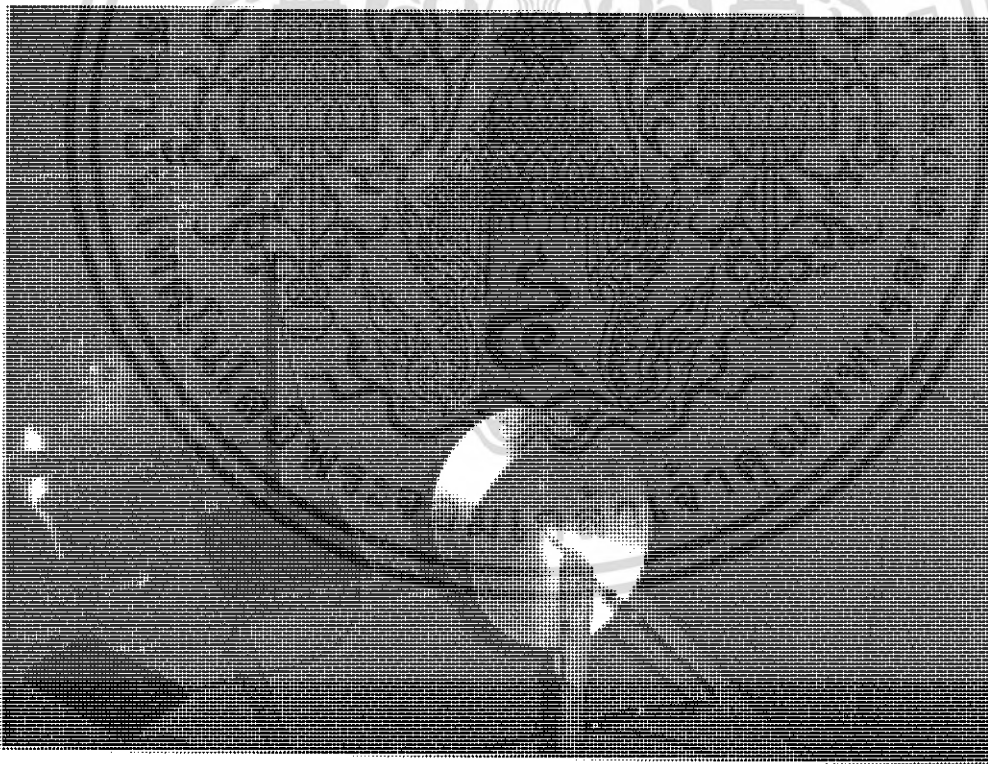
$\lambda$  = 0.15 เมตร หรือเท่ากับ 150 มิลลิเมตร

$$\text{Far Field Distance}(R) = \frac{2(0.15)^2}{0.15} = 0.3 \text{ เมตร}$$

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.3 เมตร ในการวัดระนาบสนามไฟฟ้าโดยจะติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบโดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แทนหมุนซึ่งจะหมุนด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ครั้งละ 5 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆ จนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer) เป็นตัวแสดงผลที่ได้จากการส่งและรับกันของสายอากาศ ส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบสนามแม่เหล็ก นั้น ต้องติดตั้งสายอากาศที่ใช้รับและส่ง ให้โพรบขนานกับพื้นระนาบแล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ สนามไฟฟ้าโดยในที่นี้การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมนั้นจะใช้ระยะ Far Field เท่ากับ 0.5 เมตร และจะใช้สายอากาศ 2 ชนิดในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ สายอากาศโมโน โพล ซึ่งใช้สำหรับย่านความถี่ 2.45 GHz (Wireless LAN) และสายอากาศทอเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียวซึ่งใช้ในย่านความถี่ 2.8 GHz ถึง 6.5 GHz ในการทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมนี้ด้วย โดยในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมนั้นจะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในบางย่านความถี่เท่านั้นเช่น 2.45 GHz, 2.8 GHz, 3 GHz, 3.5 GHz, 4 GHz, 5.2 GHz, 5.8 GHz, 6.5 GHz



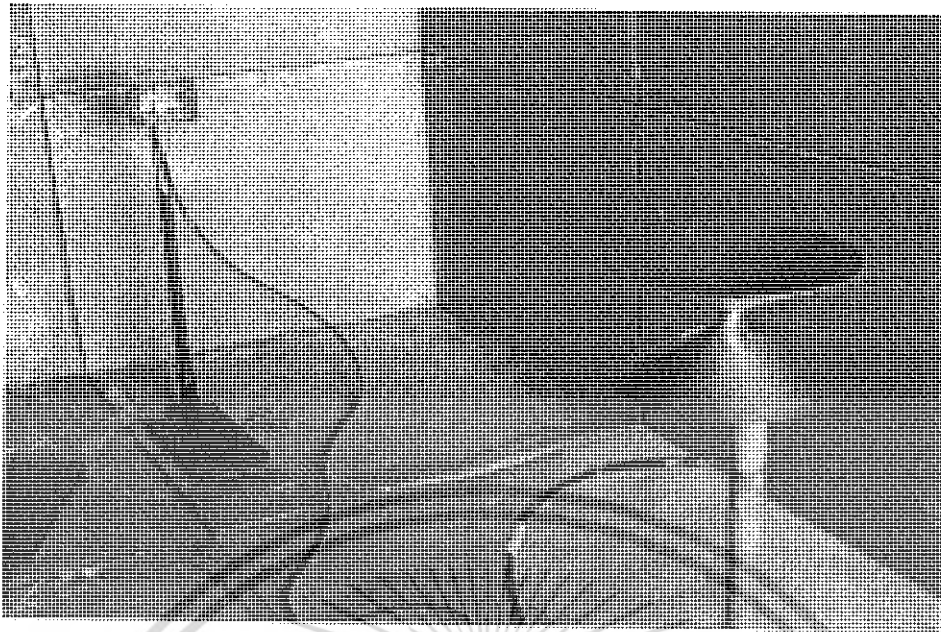
(ก) ในระนาบสนามแม่เหล็ก



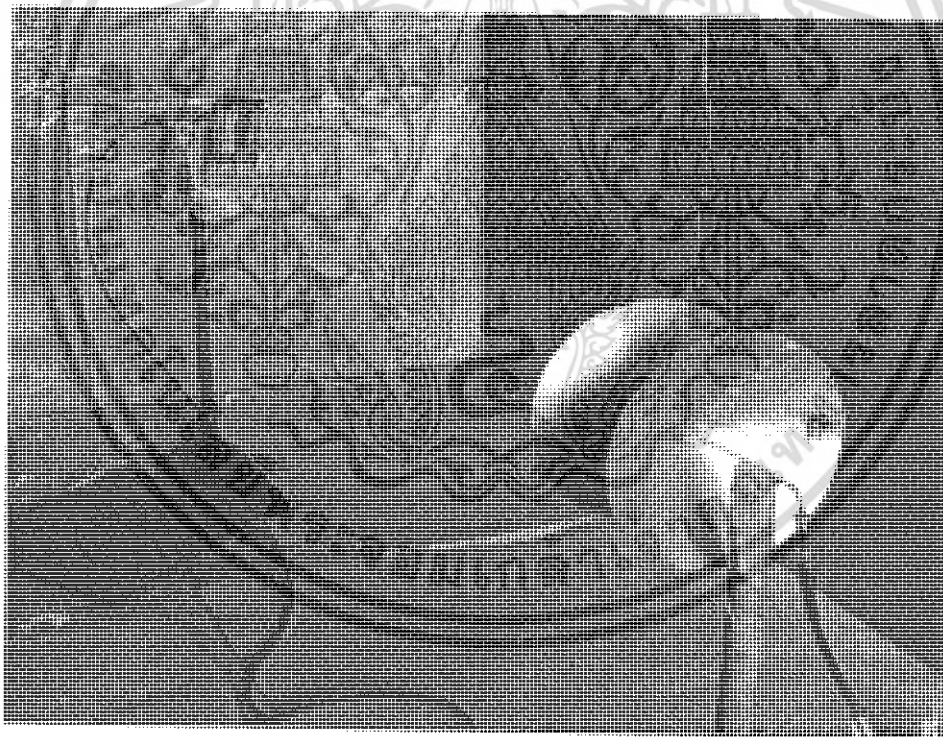
(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.10 การจัดวางสายอากาศรวยคู่เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ  
กับสายอากาศโมโนโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ในระนาบสนามแม่เหล็ก



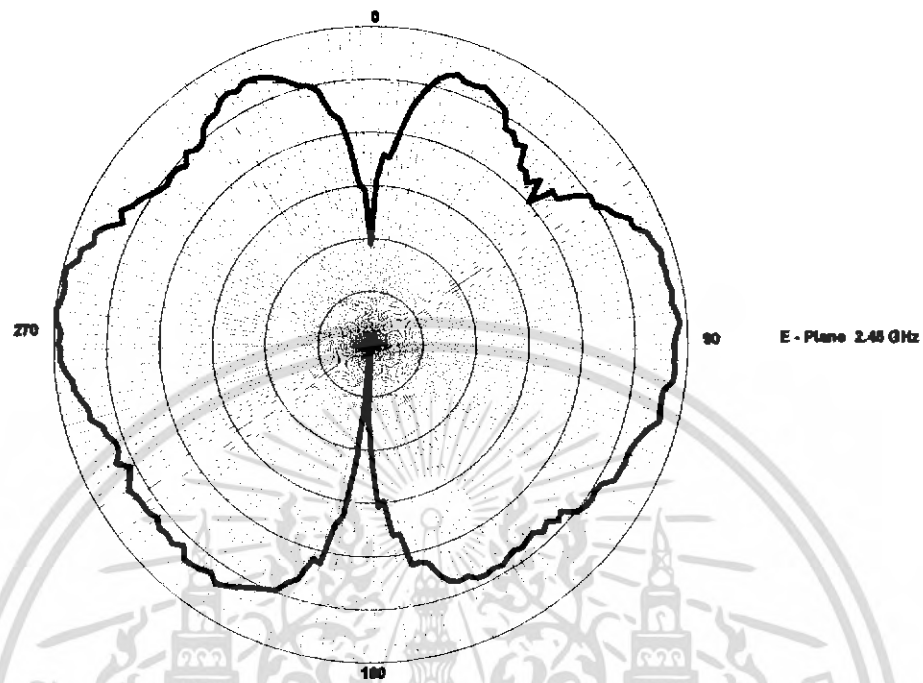
(ข) ในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.11 การจัดวางสายอากาศรวยคู่เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ  
กับสายอากาศท่อเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว

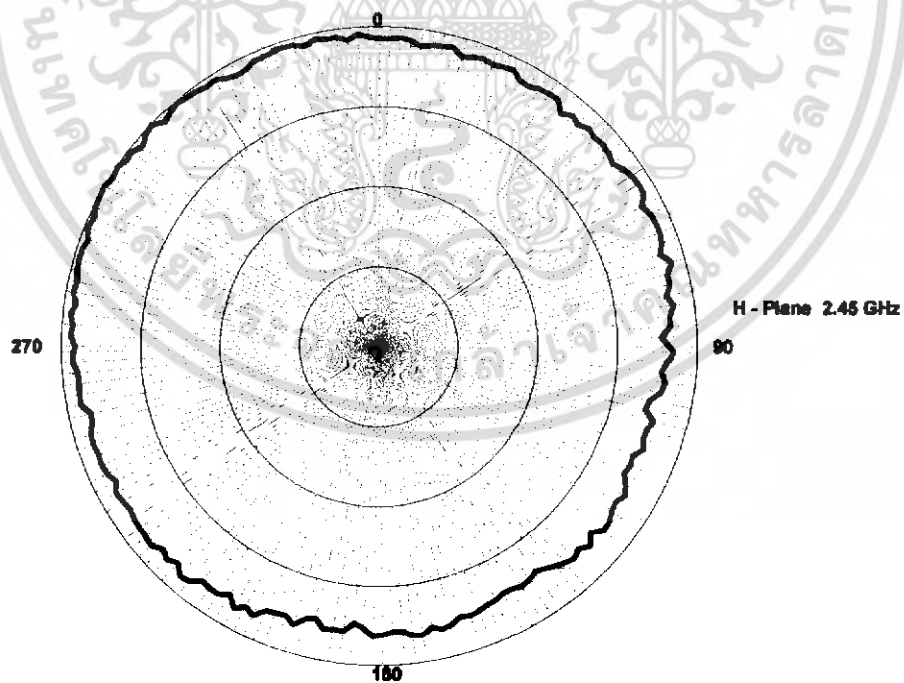
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมคู่ที่ย่านความถี่ต่างๆ

- ที่ความถี่ 2.45 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

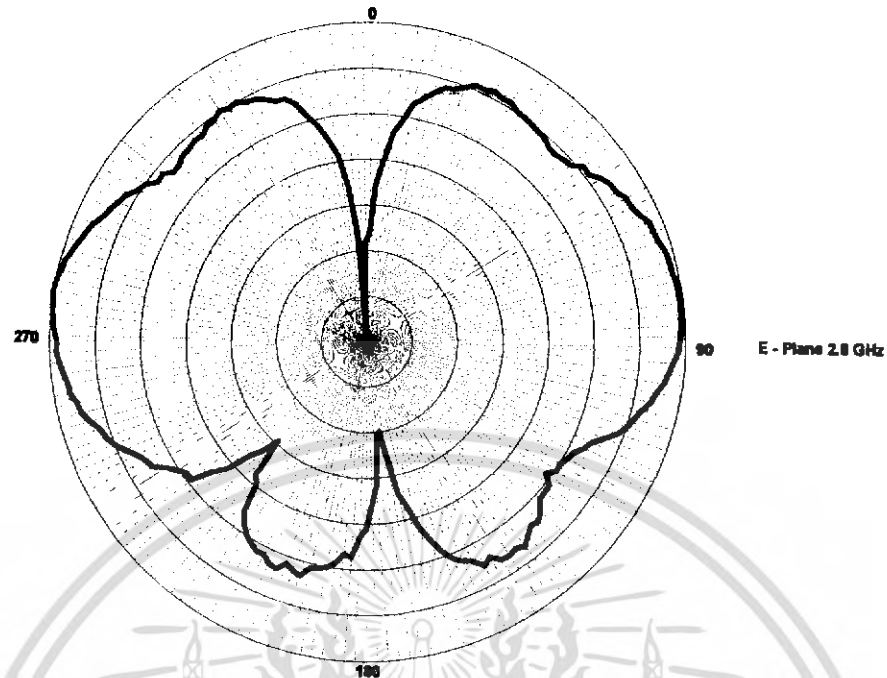


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

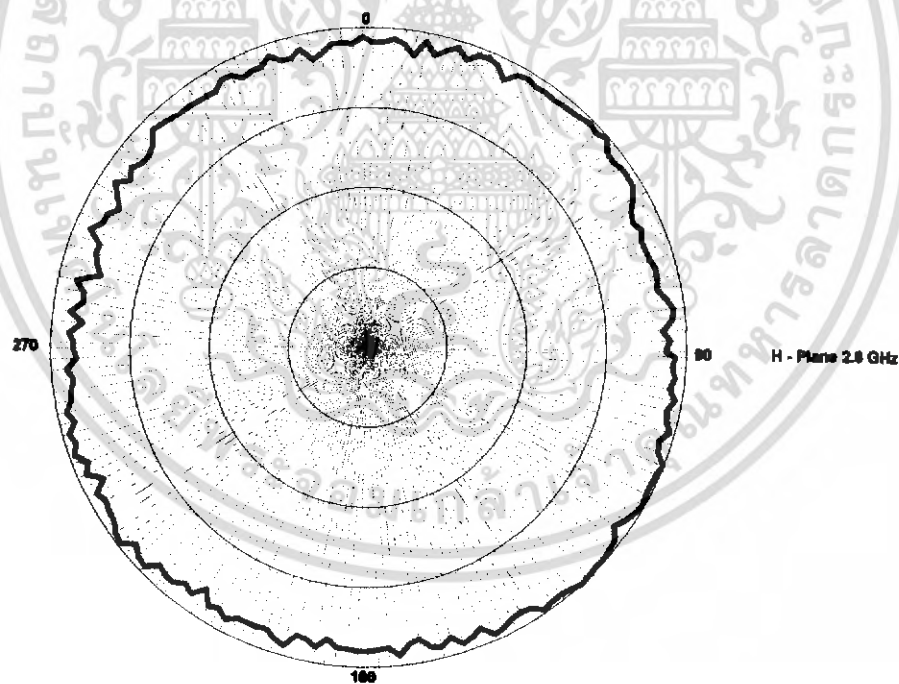
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้เห็นรายละเอียดของข้อกำหนดการดำเนินงานใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 2.8 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

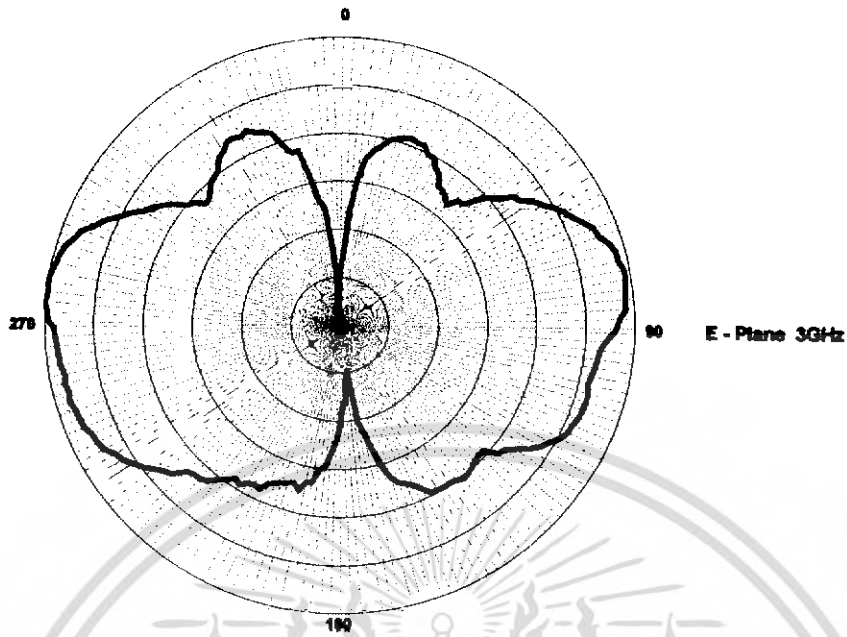


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

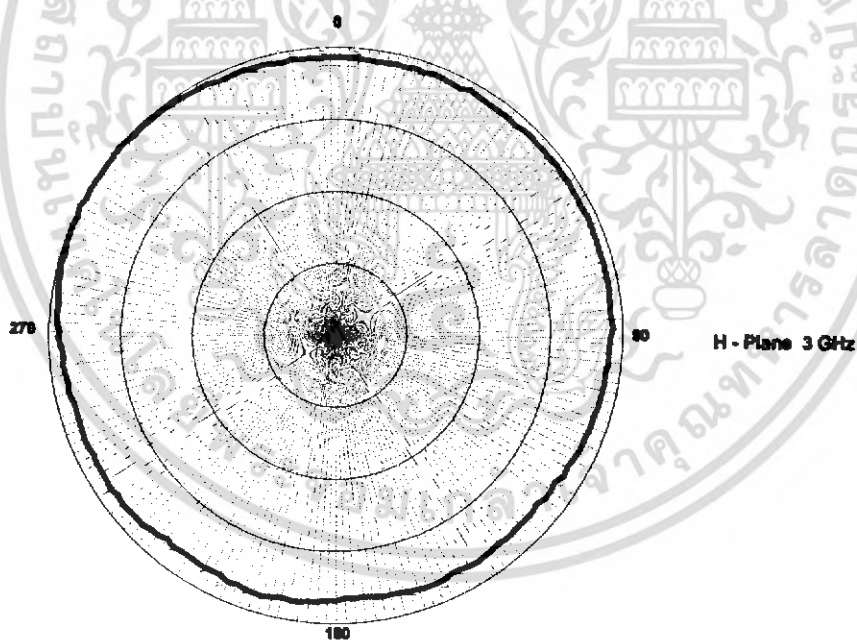
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 2.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 3 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

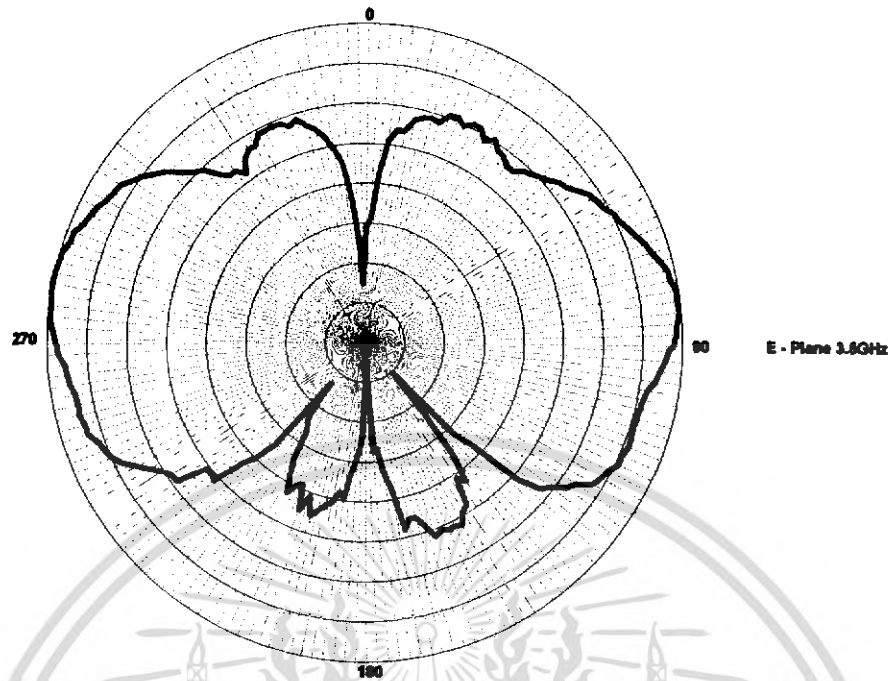


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

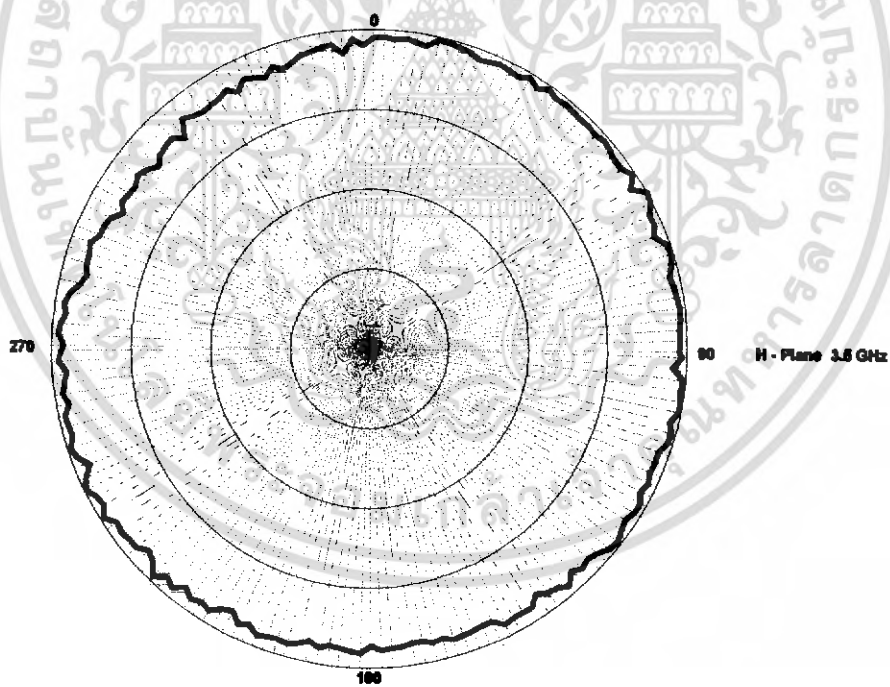
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ ที่ความถี่ 3 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 3.5 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

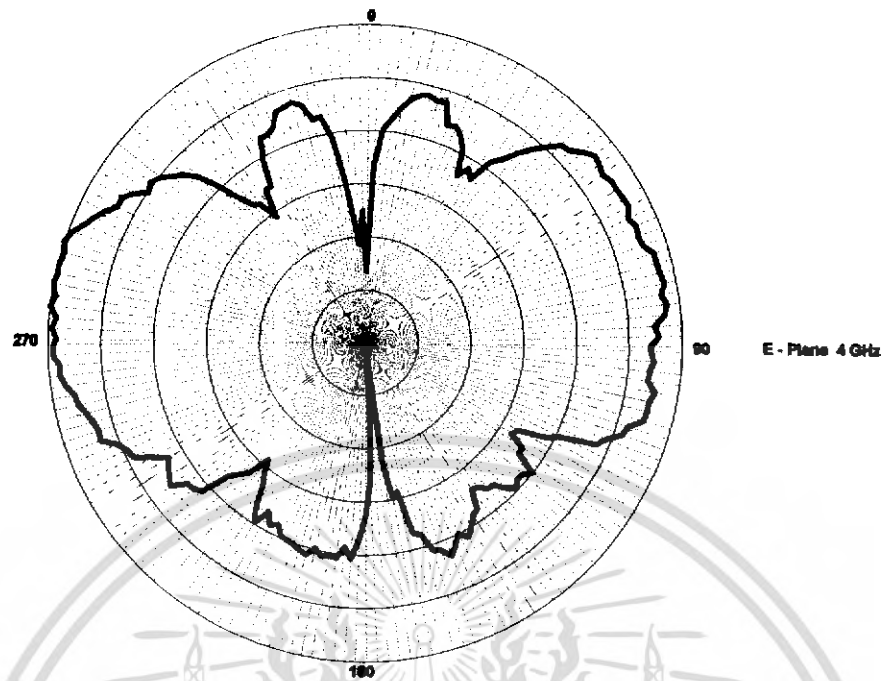


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

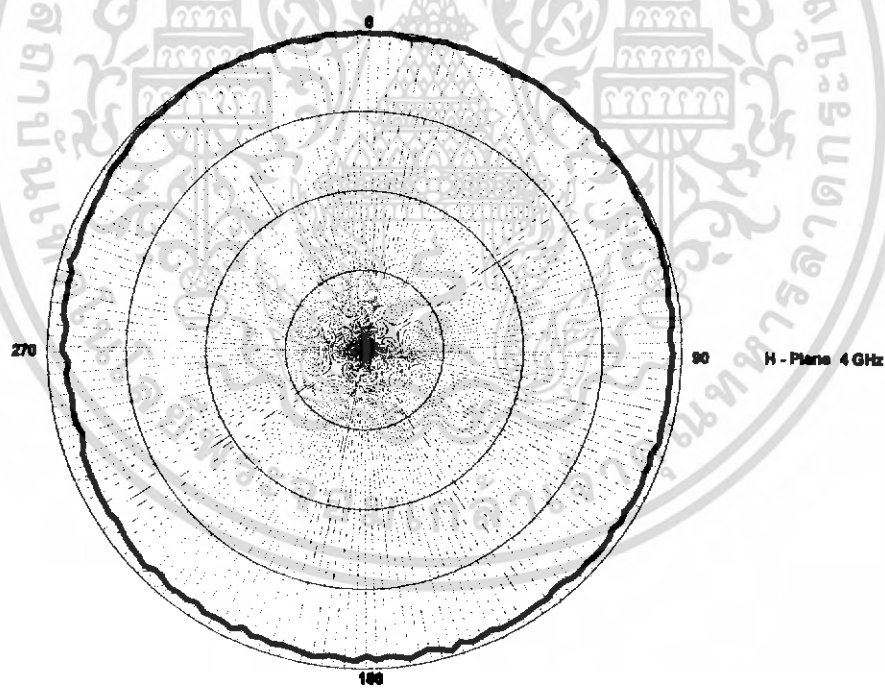
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ ที่ความถี่ 3.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 4 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

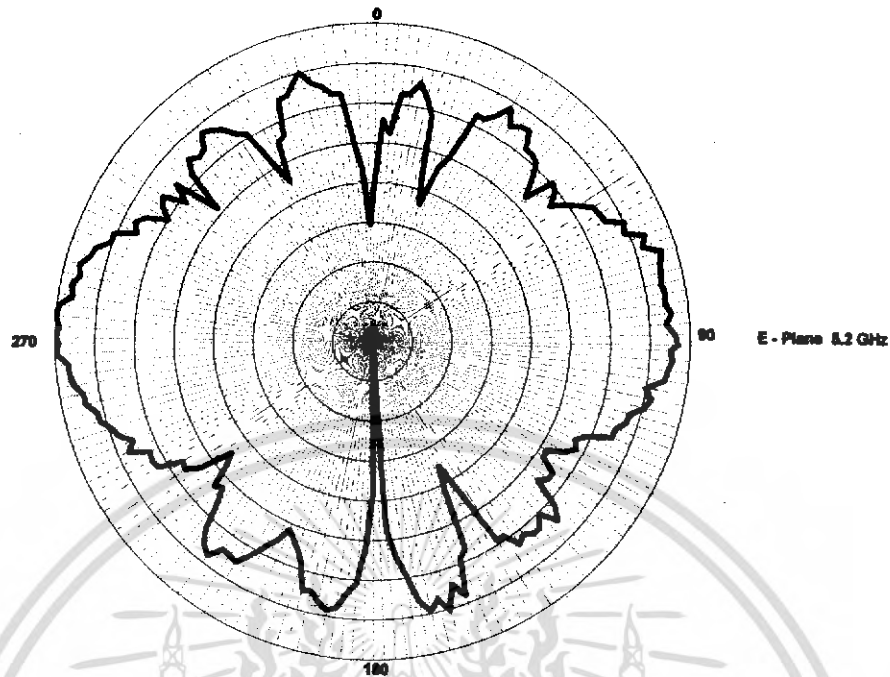


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

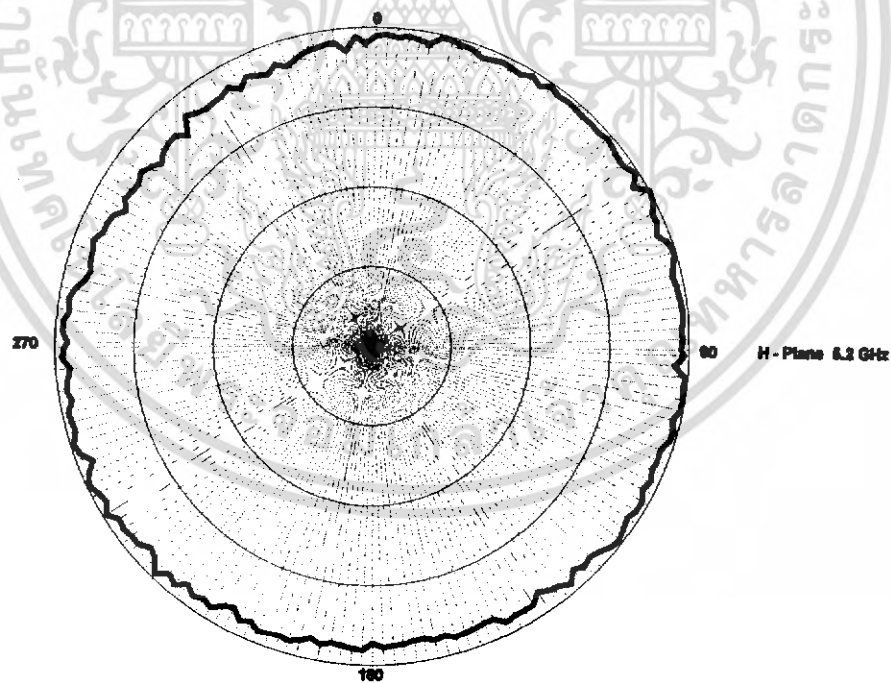
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ ที่ความถี่ 4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 5.2 GHz



(ค) ในระนาบสนามไฟฟ้า

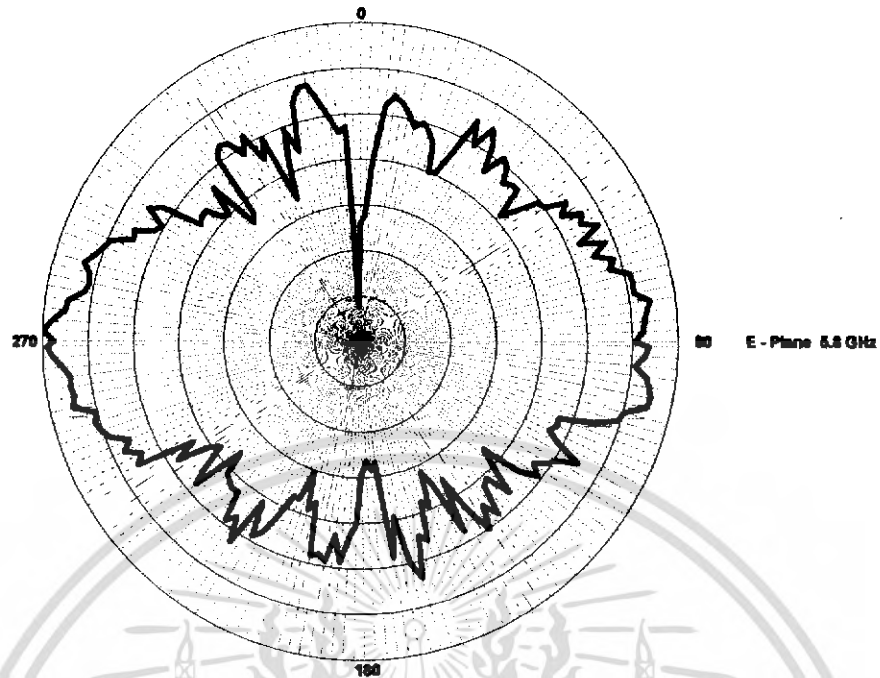


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

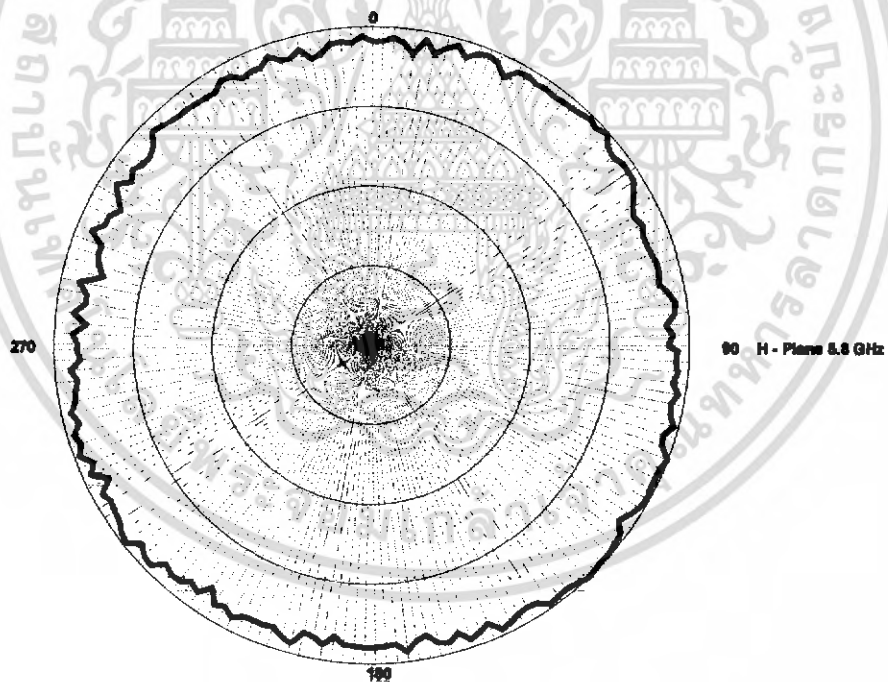
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 5.2 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 5.8 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า

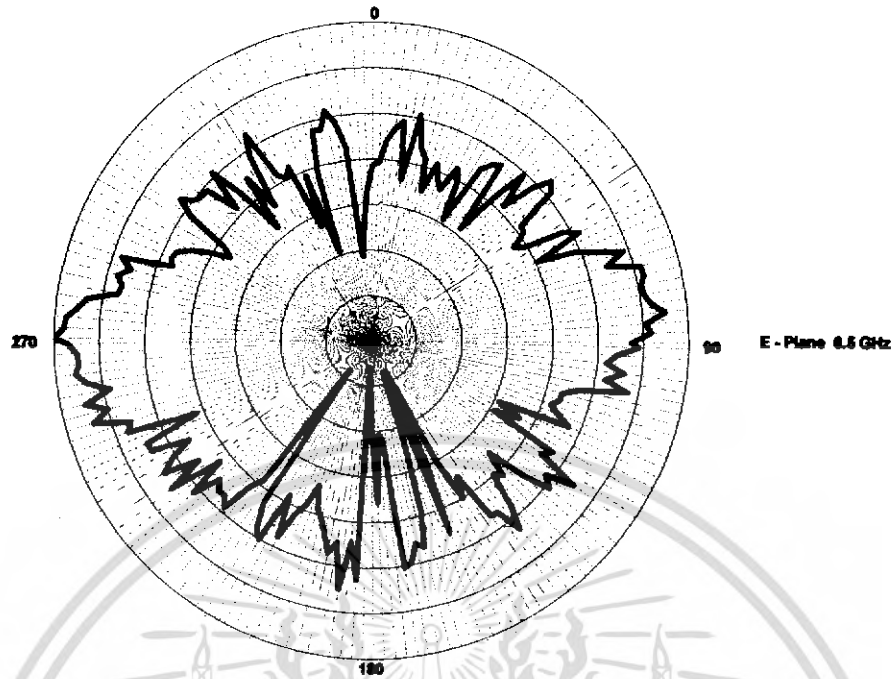


(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

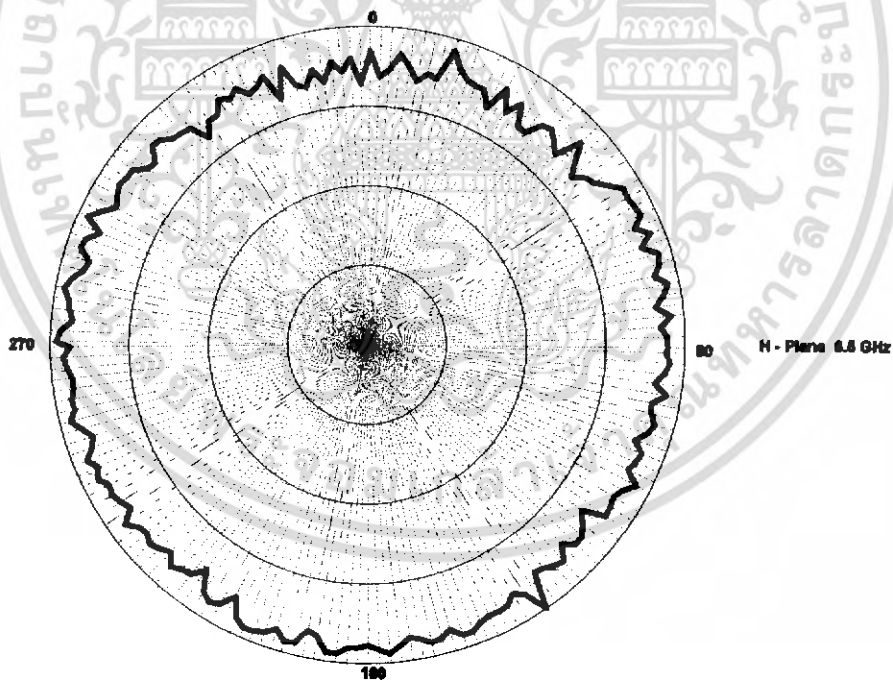
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆ ที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 6.5 GHz



(ก) ในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่ความถี่ 6.5 GHz

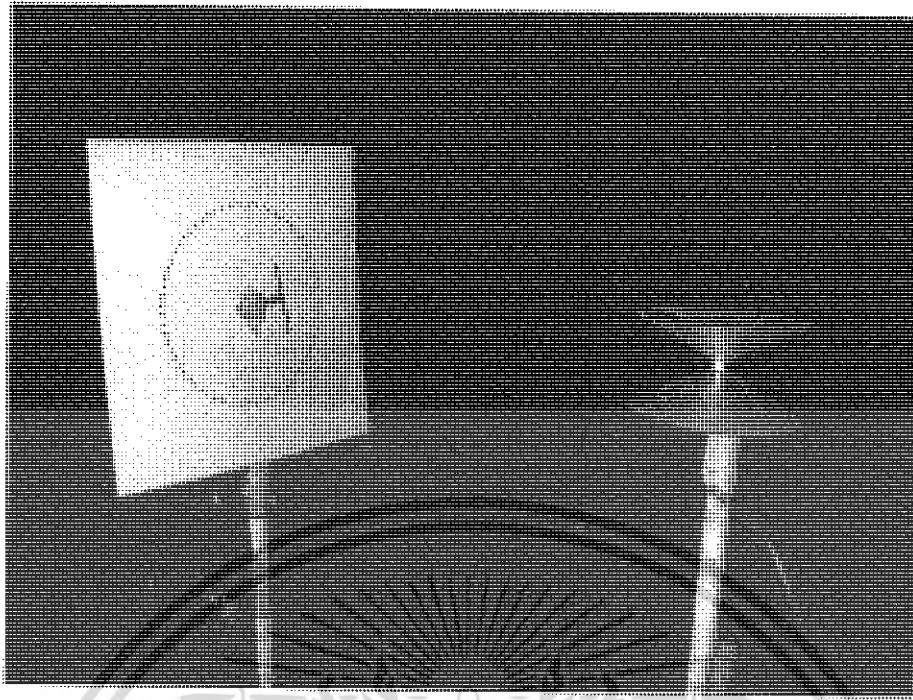
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป ผลจากการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่ในย่านความถี่ต่าง ๆ นั้นจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากกราฟจากการทดลองมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคล้ายกับที่ได้จากการจำลองไว้ในบทที่ 3 ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ โดยสายอากาศกรวยคู่ที่ใช้งานจริงมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลักษณะเป็นแบบรอบตัวทุกย่านความถี่ที่ใช้งาน และยิ่งความถี่มากขึ้นขนาดของลำคลื่นลูกเล็กที่เราไม่ต้องการก็จะมากขึ้น ทำให้สูญเสียกำลังไปในทิศทางที่เราไม่ต้องการ

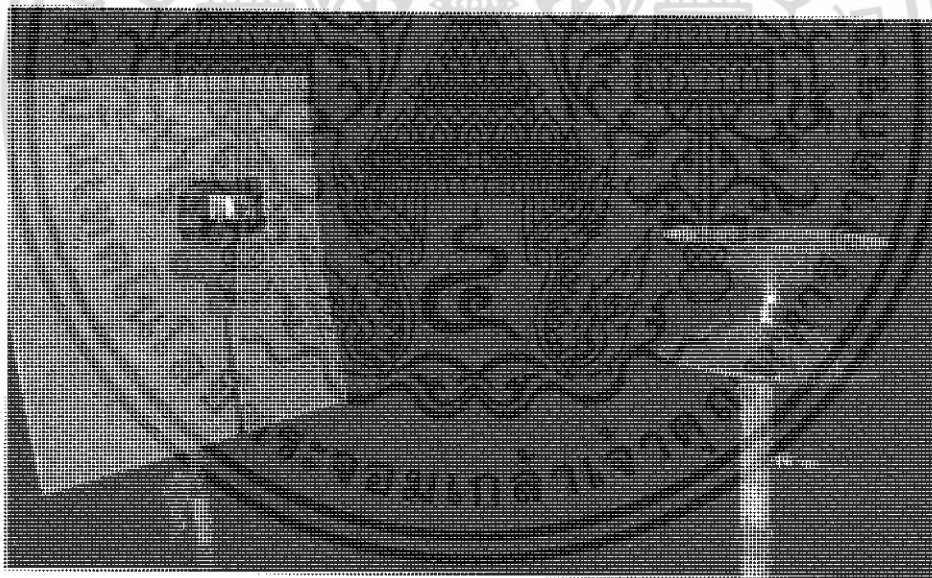
#### 4.6 ทดสอบการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ (Polarization)

ในการทดสอบการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่นั้น เราจะต้องทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีคลื่นจากภายนอกเข้ามารบกวนได้ เพราะคลื่นจากภายนอกที่เข้ามานั้นจะทำให้การวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศที่เราทดสอบมีค่าผิดพลาดขึ้น เราสามารถทำการทดสอบได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่นั้น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกล คล้ายกับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยจะใช้สมการเดียวกันคือสมการที่ (4.1)

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.3 เมตร ก็จะใช้ระยะ Far Field เท่ากับ 0.5 เมตร โดยจะติดตั้งสายอากาศที่เราจะทดสอบติดตั้งอยู่กับที่เป็นสายอากาศตัวรับและจะใช้สายอากาศอีกหนึ่งตัวเป็นตัวส่ง โดยจะทำการติดตั้งสายอากาศตัวส่งให้ตั้งฉากกับที่ระนาบ โดยนำสายอากาศ ไปติดตั้งที่แท่นหมุนซึ่งจะใช้มือหมุน ครั้งละ 5 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างๆ จนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่ายวิทยุ เป็นตัวแสดงผลที่ได้จากการส่งและรับกันของสายอากาศ ดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 โดยในที่นี้การวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่ นั้นจะใช้สายอากาศ 2 ชนิด ในการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ คือ สายอากาศโมโนโพล ซึ่งใช้สำหรับย่านความถี่ 2.45 GHz (Wireless LAN) และสายอากาศท่อเวฟไกด์สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียวซึ่งใช้ในย่านความถี่ 2.8 GHz ถึง 6.5 GHz โดยในการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่นั้นจะแสดงค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศในบางย่านความถี่เท่านั้นเช่น 2.45 GHz, 3 GHz, 3.5 GHz, 4 GHz, 5.2 GHz, 5.8 GHz, 6.5 GHz และสายอากาศทั้ง 2 แบบที่ได้นำมาทดสอบค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศกรวยคู่นั้นมีการโพลาไรซ์เซชันเป็นแบบ เชิงเส้น (Linear Polarization)



รูปที่ 4.20 การวัดหาค่าโพลาริแซชันของสายอากาศกรวยคู่โดยทดสอบกับสายอากาศโมโนโพล

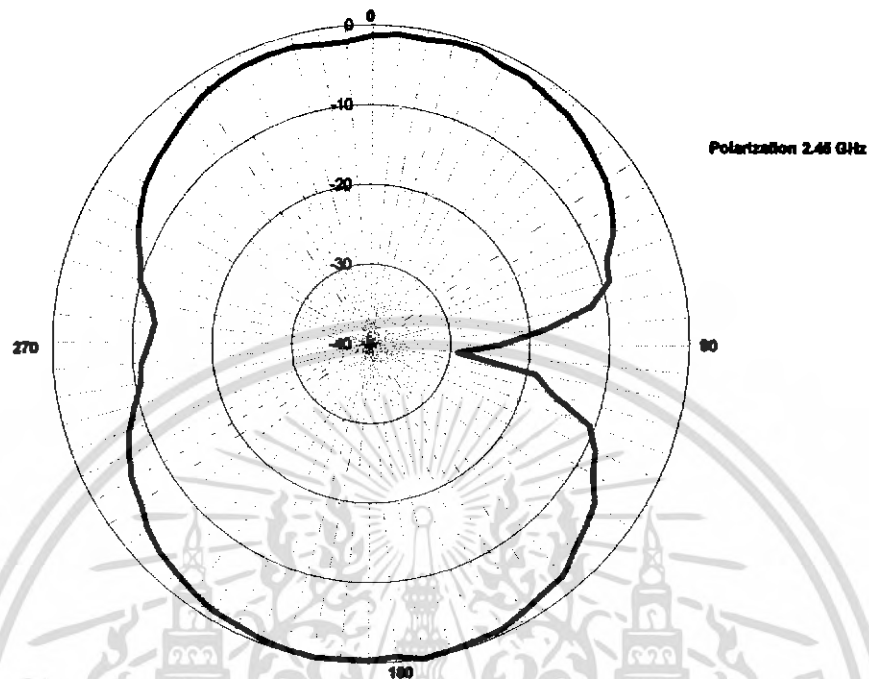


รูปที่ 4.21 การวัดหาค่าโพลาริแซชันของสายอากาศกรวยคู่โดยทดสอบกับสายอากาศท้อเวฟไกด์  
สี่เหลี่ยมปากเปิดด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

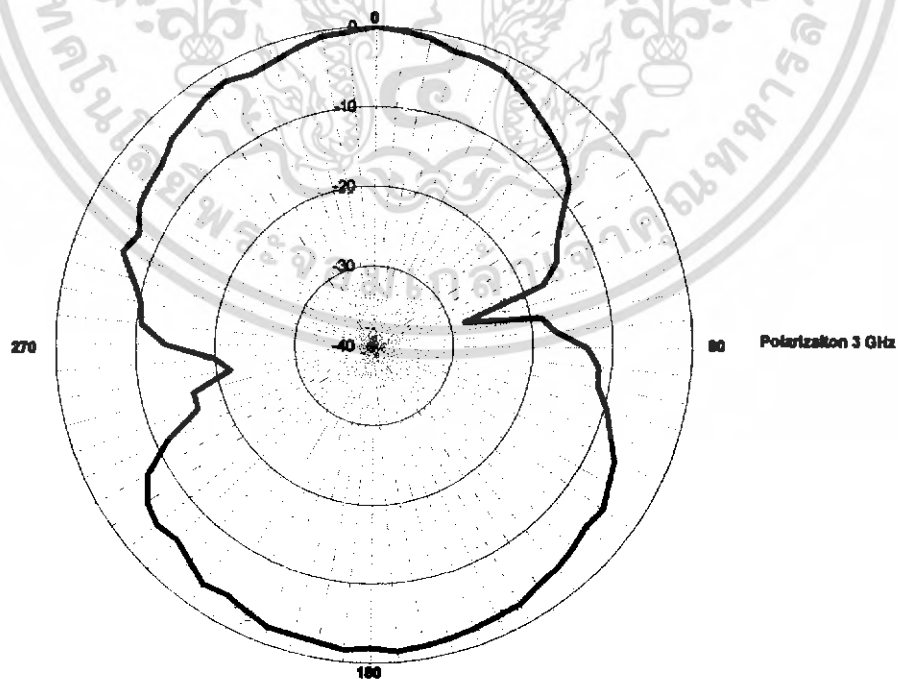
#### 4.6.1 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศรวมคู่ที่ย่านความถี่ต่างๆ

- ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.22 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศรวมคู่ที่ความถี่ 2.45 GHz

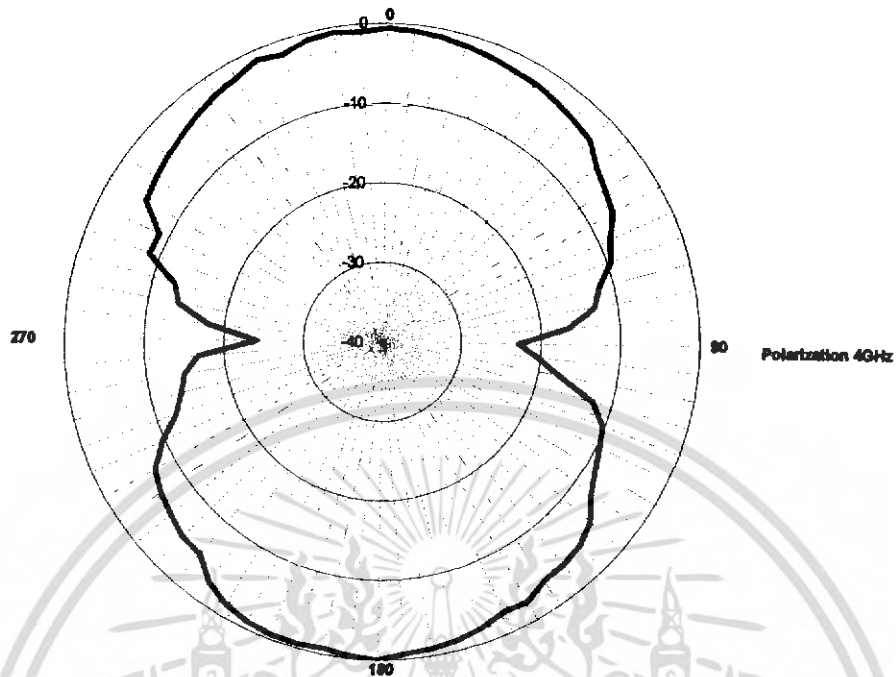
- ที่ความถี่ 3 GHz



รูปที่ 4.23 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศรวมคู่ที่ความถี่ 3 GHz

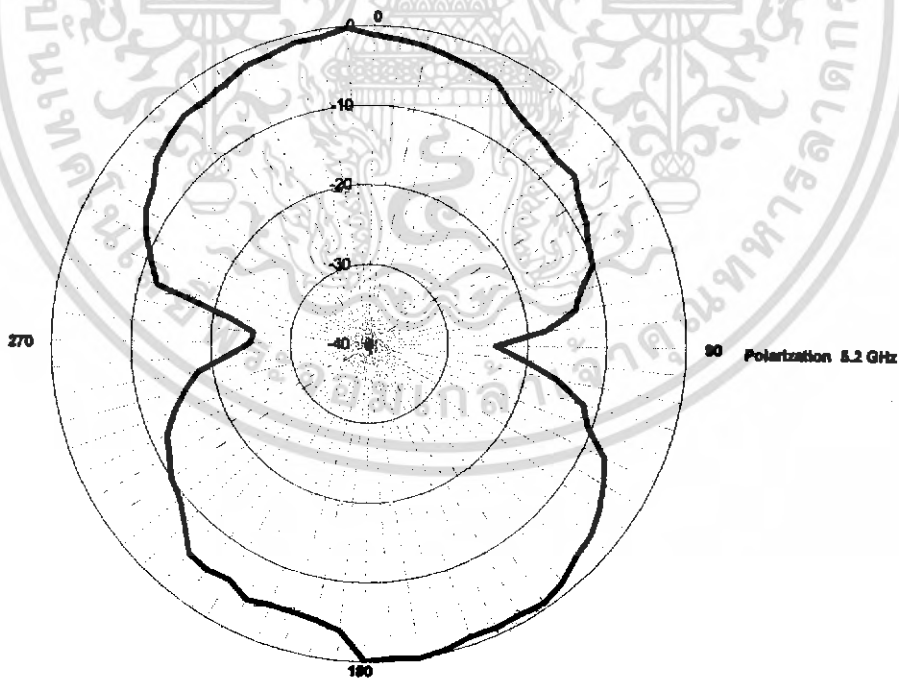
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 4 GHz



รูปที่ 4.24 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 4 GHz

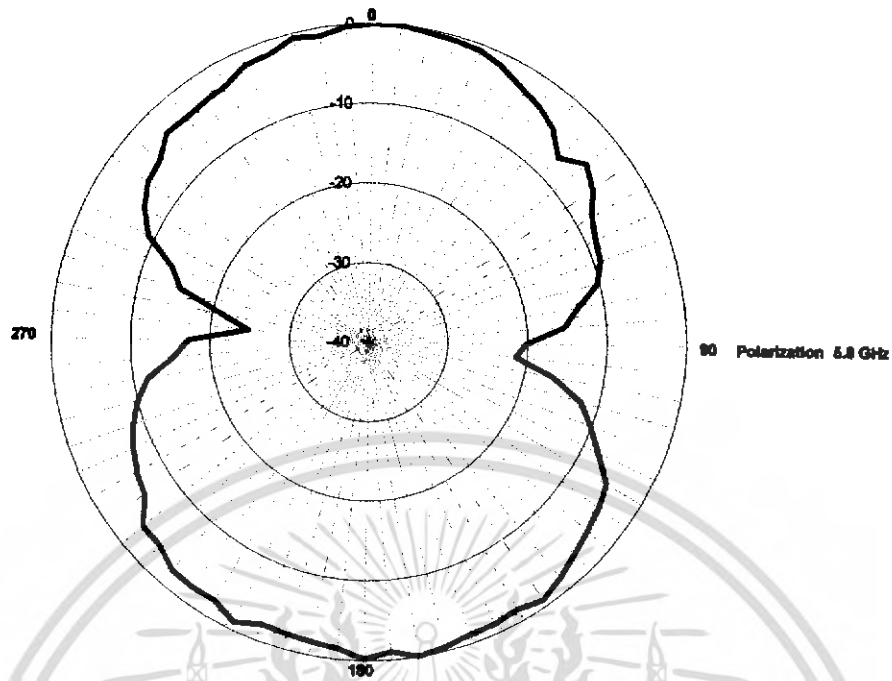
- ที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 4.25 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่ความถี่ 5.2 GHz

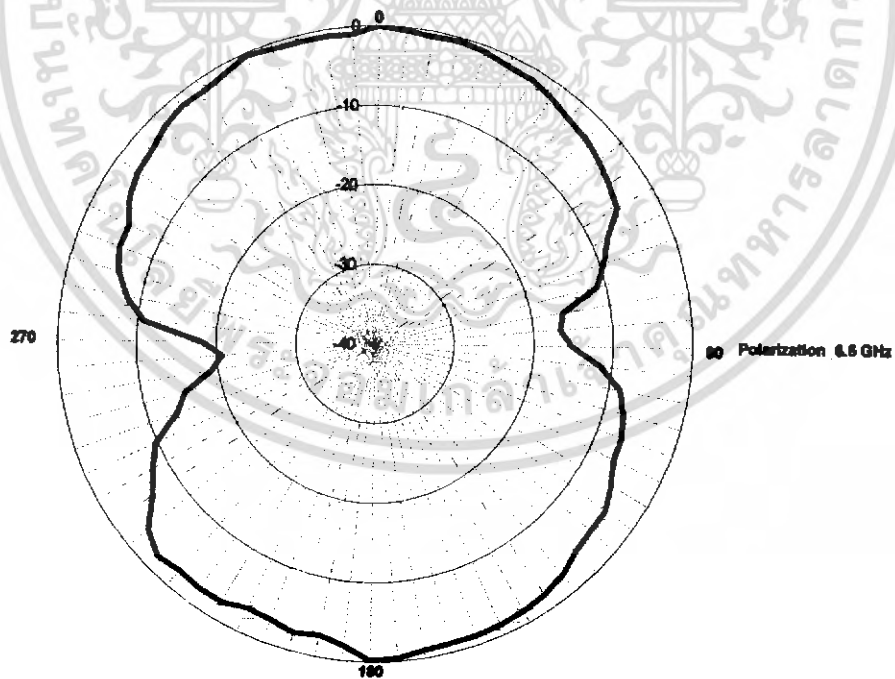
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 4.26 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศรยคู่ที่ความถี่ 5.8 GHz

- ที่ความถี่ 6.5 GHz



รูปที่ 4.27 ผลการวัดหาค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศรยคู่ที่ความถี่ 6.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวัดหาค่าโพลาริเซชันของสายอากาศกรวยคู่ที่แสดงในย่านความถี่ต่าง ๆ นั้นจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะคล้ายกับเลขแปด นั่นแสดงว่าสายอากาศกรวยคู่ที่เราได้ทำการทดสอบนั้นมีการโพลาริเซชันเป็นแบบเชิงเส้น โดยที่มุม 0 องศาเป็นการรับคลื่นจากสายอากาศตัวส่งมากที่สุดและจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนสายอากาศตัวส่งหมุนมาจนถึงมุมที่ 90 องศา และจะเพิ่มขึ้นอีกจนถึงมุมที่ 180 องศาจากนั้นจะลดลงต่ำสุดอีกครั้งที่มุม 270 องศา

#### 4.7 พิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

ในการทดสอบการหาค่าอัตราขยายของสายอากาศนั้น ก็เช่นเดียวกันกับการวัดหาค่าโพลาริเซชันของสายอากาศและการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เราจะต้องทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีคลื่นจากภายนอกเข้ามารบกวนได้ เพราะคลื่นจากภายนอกที่เข้ามานั้นจะทำให้การวัดหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่เราทดสอบมีค่าผิดพลาดไป เราสามารถทำการทดสอบได้ในห้องไร้คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับออกจากผนังทุกด้านของห้อง ส่วนของระยะที่ใช้ในการวัดหาค่าโพลาริเซชันของสายอากาศกรวยคู่นั้น จะใช้บริเวณสนามระยะไกลซึ่งเป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่การแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกล คล้ายกับการวัดหาค่าโพลาริเซชันของสายอากาศกับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยจะใช้สมการเดียวกันคือสมการที่(4.1)

ในการทดสอบนี้จะใช้ระยะ Far Field ที่มากกว่า 0.3 เมตร ก็จะใช้ระยะ Far Field เท่ากับ 0.5 เมตร โดยจะใช้สายอากาศกรวยคู่ที่สร้างขึ้นมาอีกหนึ่งตัวเพื่อที่จะทำการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ โดยจะติดตั้งสายอากาศที่เราจะทดสอบทั้ง 2 ตัวติดตั้งอยู่กับที่ กำหนดให้สายอากาศตัวใดตัวหนึ่งเป็น ตัวรับ - ตัวส่ง ก็ได้เพราะว่ามีค่าเท่ากัน จากนั้นก็จะทำการปรับ เครื่องวิเคราะห์ระบบ โครงข่ายวิทยุ ให้เป็นตัวรับและตัวส่ง และกำหนดช่วงความถี่ที่เราต้องการจะหาค่าของอัตราขยายของสายอากาศ ในที่นี้เรากำหนดช่วงความถี่ตั้ง 2 GHz – 8 GHz จากนั้นเราก็ใช้ maker ไปยังตำแหน่งที่เราต้องการจะวัด โดยจะใช้ความละเอียดในการเก็บผลการทดสอบเท่ากับ 100 MHz ไปเรื่อยๆ ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz จากนั้นก็นำมาพล็อตกราฟ โดยการหาค่าอัตราขยายของสายอากาศนั้น ค่าที่ได้จาก เครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่ายวิทยุ นั้นจะเป็นค่าของการสูญเสียทางอากาศ( Free Space Lost) จากสมการ

$$2G(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) \quad (4.2)$$

โดยที่  $G$  (dB) = ค่าอัตราขยายของสายอากาศ

$R$  = ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (เมตร)

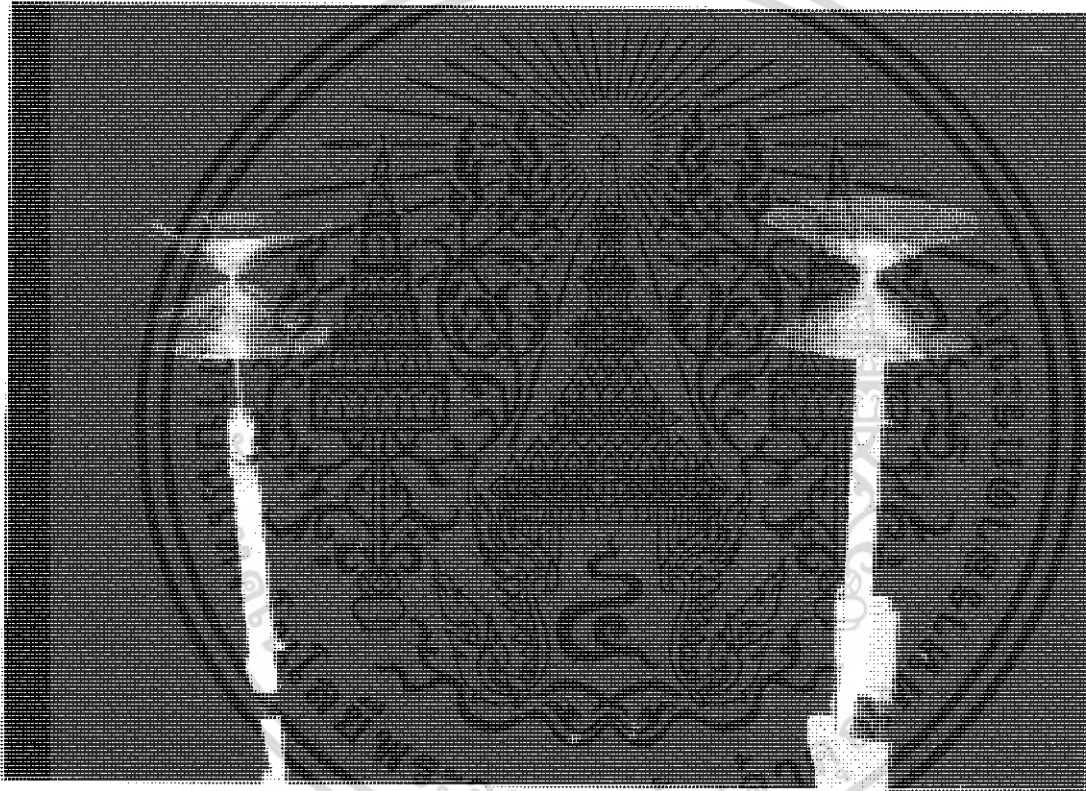
$\lambda$  = ค่าความยาวคลื่นของแต่ละความถี่ที่ใช้วัด

$10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right)$  = ค่าการสูญเสียทางอากาศ (Free Space Loss) ได้จากเครื่องวิเคราะห์

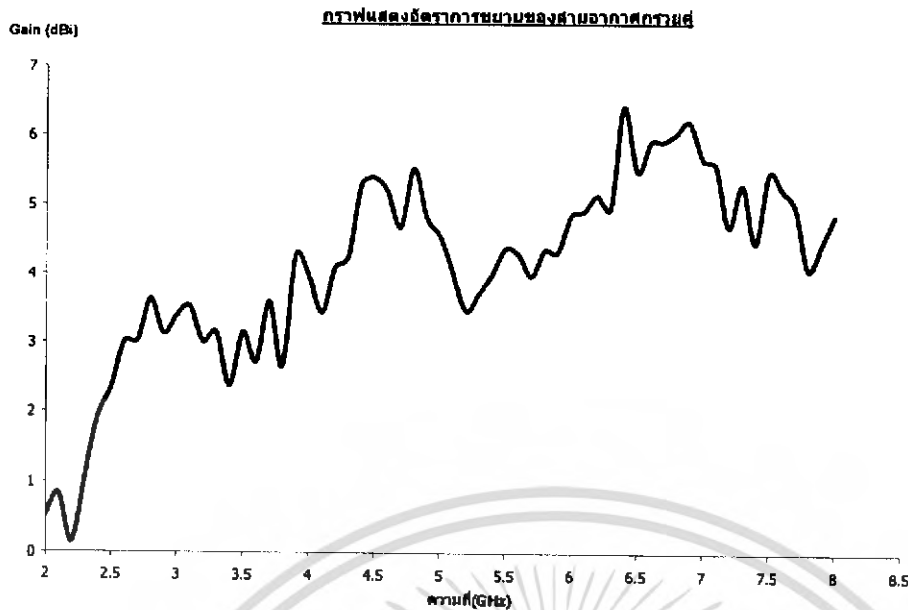
ระบบโครงข่าย (Network Analyzer)

ระยะที่ใช้ในการทดสอบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

โดยที่  $R = 0.5$  เมตร



รูปที่ 4.28 การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศกรวยคู่ 2 อัน



รูปที่ 4.29 ผลของการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศกรวยคู่ 2 อัน

#### 4.8 การวัดค่าการส่งสัญญาณของสายอากาศในการใช้งานจริง

สำหรับในบทที่ 4 นี้จะเป็นเรื่องของ การวัดและทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศกรวยคู่ ตามทฤษฎีว่าเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่ โดยยังไม่มีการใช้งานจริง เช่น ค่าการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศว่าจะต้องให้ได้ค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 50 โอห์ม มากที่สุด การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยจะต้องทำให้ช่วงความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า 2 มากที่สุดถึงจะดี การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ก็เหมือนกัน ทางทฤษฎี ก็กล่าวไว้ว่าสายอากาศ ที่จะใช้งานจะต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ ให้ต่ำกว่า -10 dB จึงจะใช้งานได้ การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยในที่นี้ใช้สายอากาศกรวยคู่ในการวัดผล ผลของการวัดจะต้องได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบรอบตัวตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน จึงจะถือว่าใช้ได้ และการวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศในการวัดอันนี้ก็จะต้องแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่เราสร้างมา มีการโพลาไรซ์เซชันเป็นแบบไหน วงกลมหรือเชิงเส้น สุดท้ายคือการวัดอัตราขยายของสายอากาศที่เราจะใช้งาน ว่าในแต่ละความถี่มีอัตราขยายเท่าไร

โดยในเรื่องนี้จะเป็นการวัดและทดสอบการใช้งานจริงของสายอากาศกรวยคู่ที่ได้สร้างขึ้น หลังจากที่ได้ทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศมาแล้ว โดยจะทดสอบการใช้งานจริงในย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ใช้ในระบบอินเตอร์เน็ตไร้สาย โดยในการทดลองนั้นจะทดลองในที่โล่งกว้าง บนถนน โดยที่ไม่มีสิ่งอื่นมารบกวน เพื่อที่จะได้ค่าในการวัดที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 การวัดผลของการส่งสัญญาณของสายอากาศรวยคู่

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 1 เครื่อง
2. Access Point 1 เครื่อง
3. สายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้ง Access Point ให้อยู่กับที่ ดังรูปที่(4.30)
2. เปลี่ยนสายอากาศไดโพลของ Access Point ให้เป็นสายอากาศรวยคู่แทน
3. ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ติดต่อกับ Access Point โดยใช้ โปรแกรม NetIQ Chariot เป็นตัวเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นโปรแกรมเช็คดูค่าความเร็วในการรับส่งข้อมูลว่าได้เท่าไรในระยะทางต่างๆ
4. เลื่อน คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ออกจาก Access Point ในระยะทางที่กำหนด โดยในการวัดครั้งนี้กำหนดให้ระยะทางแต่ละช่วงห่างกัน 30 เมตร
5. เก็บผลค่าความเร็วเฉลี่ยในการรับส่งข้อมูลในการวัดแต่ละจุด และเวลาที่ข้อมูลเดินทางจาก Access Point มาถึง คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

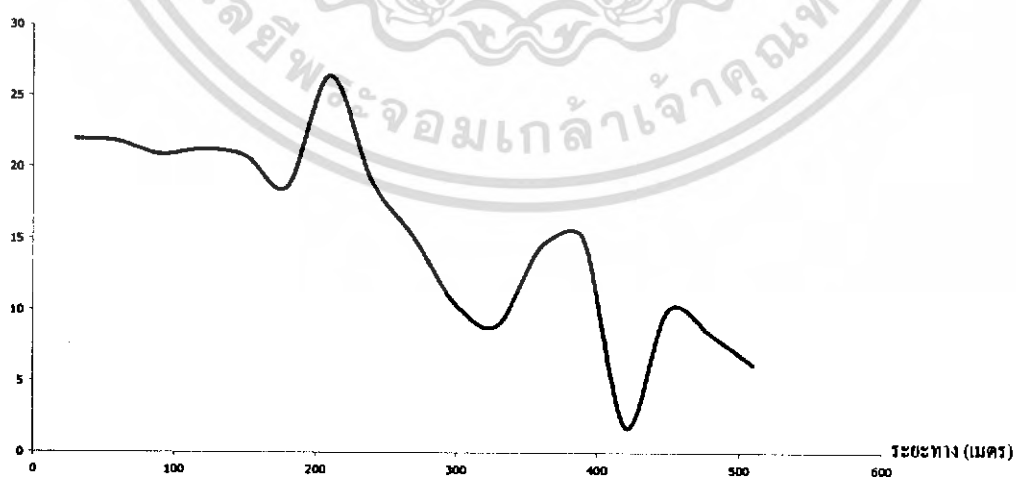
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการใช้งานจริงกับระบบ Wireless LAN

ระยะทางรับ-ส่งสัญญาณของ สายอากาศ(เมตร)	ความเร็วในการรับ-ส่งสัญญาณ (Mbps)	เวลาที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ (วินาที)
30	21.96	3.587
60	21.81	3.612
90	20.91	3.769
120	21.243	3.719
150	20.796	3.795
180	18.626	4.243
210	26.413	3.786
240	18.998	4.155
270	15.094	5.243
300	10.371	7.66
330	8.976	8.86
360	14.443	5.48
390	15.077	5.249
420	1.78	44.807
450	10.011	7.938
480	8.33	9.548
510	6.217	12.81

ความเร็วการรับ-ส่งข้อมูล (Mbps)



รูปที่ 4.31 กราฟการทดสอบหาความเร็วในการรับส่งข้อมูลของสายอากาศกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการวัดการรับส่งข้อมูลของสายอากาศกรวยคู่

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สายอากาศกรวยคู่ที่ใช้ในการทดสอบ สามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 510 เมตร ซึ่งก็ถือว่าไกล เพราะว่าสายอากาศกรวยคู่นี้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว แต่ผลในการวัดในระยะทางบางช่วงก็มีค่าขึ้นๆลงๆ ไม่ค่อยเรียบ อาจเป็นเพราะบริเวณนั้นมีการสะท้อนคลื่นสูงจึงทำให้ค่าเพิ่มมากขึ้น หรือจุดอับสัญญาณจะทำให้สัญญาณลดลงกว่าปกติ และจะลดน้อยลงเรื่อยๆ ในระยะทางที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์

### 5.1 สรุปและวิจารณ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบสายอากาศกรวยคู่ จากการทดสอบ ทั้งหมด ทำให้เรารู้ ว่าสายอากาศกรวยคู่ ที่ได้สร้างขึ้นมานั้น จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว โดยสายอากาศกรวยคู่นี้จะมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ นำไปใช้ในช่องความถี่แถบกว้างได้ดี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ได้กว้างมาก

โดยสายอากาศกรวยคู่นี้จะพิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้คือ สร้างจากวัสดุที่เป็นทองแดงหนา 0.363 มิลลิเมตร มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกรวยเท่ากับ 150 มิลลิเมตร ความสูงของกรวยเท่ากับ 32.163 มิลลิเมตร ที่ครึ่งมุมกรวย 66.788 องศา ซึ่งจะทำให้สายอากาศกรวยคู่ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม สายอากาศกรวยคู่ที่สร้างขึ้นนี้ได้แสดงทฤษฎีการออกแบบการสร้างและการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบวัดค่ากำลังงานสูญเสีย ซึ่งก็มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ก็จะได้ค่าที่ต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งผลออกมาก็คือความถี่ส่วนใหญ่ก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม การหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ก็จะได้การแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว ทุกย่านความถี่ การวัดค่าโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศผลที่ได้ก็คือการ โพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ กรวยคู่เป็นแบบเชิงเส้น หรือ ลิเนียร์ โพลาไรซ์เซชัน การทดสอบการหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศ ก็จะขึ้นอยู่กับความถี่ โดยจะเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่ใช้งาน และการทดสอบการใช้งานจริงที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย สามารถส่งได้ระยะทาง 510 เมตร

จากการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่เราได้ทำการออกแบบไว้ แสดงว่าเราสามารถนำสายอากาศกรวยคู่ที่สร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ไปใช้งานจริงในย่านความถี่ที่เราต้องการได้

### 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศกรวยคู่ โดยมีความถี่ใช้งานตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz
2. สามารถนำสายอากาศกรวยคู่ ที่สร้างขึ้น ไปทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศได้ตามทฤษฎี
3. นำทฤษฎีการสร้าง ออกแบบ ทดลอง และผลการทดลอง ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสายอากาศกรวยคู่ในย่านความถี่ต่างๆ ได้
4. สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่สร้าง ตรงกับที่ออกแบบคำนวณทางทฤษฎีได้

### 5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

#### 5.3.1 ปัญหา

ในการจัดทำโครงการชุดนี้ สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. ในการสร้างสายอากาศคู่ นั้น จะมีรอยต่อของกรวยทำให้ มีผลต่อการวัดและ ทดสอบ
2. การสร้างรูปทรงกรวย ให้มีขนาดตรงตามที่คำนวณทำได้ยาก เพราะว่ามีมวลละเอียดยมาก จึงไม่สามารถสร้างตามการคำนวณได้
3. ในการบัดกรีรูปทรงกรวยที่ได้สร้างขึ้นมานั้น จะไม่ติดกับตะกั่วที่บัดกรีเลย ทำให้ต้องใช้จำนวนตะกั่ว ที่บัดกรีเป็นจำนวนมาก บัดกรีลงไป ซึ่งทำให้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น
4. การบัดกรี เพื่อทำการเชื่อมต่อตัวเชื่อมต่อแบบ SMA กับสายริจิดโคแอกเซียล นั้นทำได้ยาก เพราะว่ามีจุดเชื่อมต่อมีขนาดเล็ก และแผ่นทองแดงสามารถหลุดจากส่วนที่เป็นฉนวนได้ถ้าการบัดกรีใช้ความร้อนสูงเกินไป
5. เกิดคราบออกไซด์ บนกรวยของสายอากาศ ทำให้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

#### 5.3.2 แนวทางแก้ไข

1. ใช้ตะไบถูบริเวณที่เชื่อมต่อกันของทรงกรวย ให้เรียบเสมี่ยมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ในส่วนของการสร้างสายอากาศกรวยคู่ ต้องสร้างให้ได้ขนาดตามที่คำนวณให้มากที่สุด คือต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดขนาดของทรงกรวย ที่มีความละเอียดสูง และให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนจากการออกแบบที่น้อยที่สุด
3. ใช้กระดาษทรายขัดบริเวณที่จะบัดกรี
4. ในการวัด และทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ต้องใช้เครื่องมือ และชุดทดสอบ ต้องมีความเที่ยงตรงและผิดพลาดน้อยที่สุด รวมทั้งห้องที่ทำการทดสอบ ต้องจัดตำแหน่งของสายอากาศเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในห้อง ไม่ให้เกิดการรบกวน
5. การบัดกรี ต้องใช้เครื่องมือบัดกรีที่ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมต่อ ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป
6. การขจัดคราบออกไซด์ทำได้โดยใช้กระดาษทรายถูบริเวณที่มีคราบออกไซด์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศ.ดร. ไมโนบ ไกรฤกษ์, “ทฤษฎีสายอากาศ,” ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537
- [2] รศ.ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา, ‘Electromagnetic Wave’, 2532
- [3] Constantine.A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” 3 ed. Wiley, 2005
- [4] Antennas: for all applications / John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, 3rd ed. McGrawHill, c2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

การคำนวณความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ (ทองแดง)

สำหรับปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างสายอากาศกรวยคู่ ที่มีช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 2 GHz ถึง 8 GHz โดยใช้จะใช้แผ่นทองแดงใช้เป็นวัสดุในการออกแบบและการสร้างสายอากาศ ซึ่งจะใช้ความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.363 มิลลิเมตร

สำหรับสาเหตุที่ต้องมาทำการคำนวณหาค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ (ทองแดง) ก็เนื่องจากว่า สายอากาศที่เราสร้างขึ้น จะมีองค์ประกอบเป็นไฟกระแสสลับ (AC) ทั้งหมด และเมื่อมีการใช้งานจริง คลื่นที่เราจะใช้งานจะออกมาจากสายอากาศ และจะมีการกระจายของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ (ทองแดง) แต่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ จะกระจายบนพื้นผิวตัวนำ (ทองแดง) มากกว่าที่จะเข้าไปอยู่ในเนื้อของวัสดุตัวนำ (ทองแดง) หรือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกกลดทอนอย่างรวดเร็วในตัวกลางที่เป็นตัวนำ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Skin effect”



รูปที่ 1

จากรูปที่ 1 จะได้สมการ

$$\begin{aligned}
 E_y &= E_0 \exp[-1(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x] \\
 &= E_0 \exp(-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x) \cdot \exp(-j\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนใหม่

$$E_y = E_0 e^{-x/\delta} e^{-j(x/\delta)}$$

ที่  $x=0$ ,

$$E_y = E_0$$

ที่  $x=\delta$ ,

$$|E_y| = E_0 e^{-1} = \frac{E_0}{e}$$

นั่นก็คือ  $E_y$  จะมีขนาดลดลงเป็น  $1/e$  เท่า ( 36.8% ) ของค่าเริ่มต้น

ค่า  $\delta$  นี้จะเรียกว่าเป็นความลึก  $1/e$  ( $1/e$  Depth of penetration) หรือเรียกกันว่า "Skin Depth" โดยที่

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f\mu_R\mu_0}} \quad (\text{เมตร})$$

$\rho$  = ค่าความต้านทานของตัวนำ (โอห์ม - เมตร)

$f$  = ค่าความถี่ที่ใช้งาน (เฮิร์ต)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (เฮนรี่/เมตร)

ดังนั้นในการออกแบบและสร้างสายอากาศจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำด้วย โดยเราจะต้องคำนวณหาค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในนำที่ลึกมากที่สุดก่อนจะเตรียมหาวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศ โดยจะคำนวณจากค่าความถี่ที่เราใช้งาน

สำหรับสายอากาศกรวยคู่ที่ได้ทำการสร้างและออกแบบนี้ ได้ใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการสร้าง โดยมีค่าความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.363 มิลลิเมตร ดังนั้นเราจะมาลองคำนวณหาค่า Skin Depth ของทองแดงที่ค่าความถี่ต่างๆที่เราใช้งานตามตาราง

ค่าความถี่ (GHz)	ค่าความต้านทาน ของทองแดง ( $\mu\Omega - cm$ )	ค่าซึมซาบ แม่เหล็ก ของ ทองแดง ( $\mu_R$ )	ค่าความนำไฟฟ้าของ ทองแดง ( $S/m$ )	Skin Depth ของ ทองแดง ( $\mu m$ )
2	1.673	1	59,772,863.12	1.46
3	1.673	1	59,772,863.12	1.19
4	1.673	1	59,772,863.12	1.03
5	1.673	1	59,772,863.12	0.92
6	1.673	1	59,772,863.12	0.84
7	1.673	1	59,772,863.12	0.78
8	1.673	1	59,772,863.12	0.73

จากตารางแสดงการคำนวณจะเห็นได้ว่ายิ่งค่าความถี่สูงก็จะทำให้ค่า Skin Depth ของทองแดงมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะมีกระจายกระแสนบนพื้นผิวของตัวนำมากกว่าในเนื้อสารของตัวนำ

สำหรับสายอากาศรอยดูที่ใช้ความหนาของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.363 มิลลิเมตร หรือ 363 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีค่ามากกว่า ค่า Skin Depth ของทองแดงทุกค่าความถี่ ดังนั้น จึงทำให้ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แต่ถ้าเราใช้แผ่นทองแดงหนาน้อยกว่านี้ (น้อยกว่าค่า Skin Depth) จะทำให้เกิด Lost ของวัสดุเกิดขึ้น และคลื่นไม่สามารถแพร่กระจายออกมาได้

สำหรับในทางปฏิบัตินั้นถ้าเราใช้ความหนาของวัสดุเท่ากับค่า Skin Depth ที่เราได้คำนวณไว้

ข้อดี ก็คือประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุทำสายอากาศ

ข้อเสีย สายอากาศบอบบางมากไม่มีความแข็งแรงจึงไม่สามารถนำไปใช้งานได้

ถ้าเราใช้ความหนาของวัสดุมากกว่าค่า Skin Depth

ข้อดี สายอากาศมีความแข็งแรงทนต่อสภาพแวดล้อม สร้างได้ง่าย

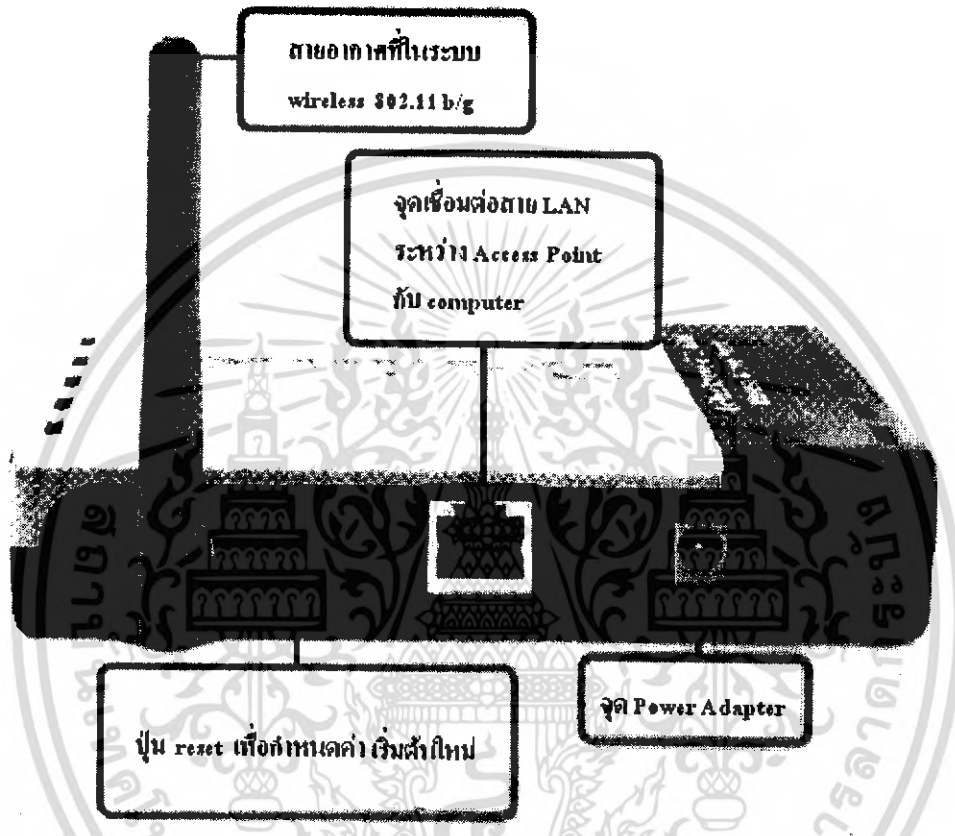
ข้อเสีย เนื้อวัสดุที่เกินมาไม่สามารถนำไปใช้งานได้

## ภาคผนวก ข

วิธีการติดตั้ง Wireless Access Point ของ D-Link DWL-2100AP+

การ Setup เพื่อการเชื่อมต่อ ระหว่างอุปกรณ์ชิ้นต่างๆ โดยการใช้ Setup Wizard ของ D-Link DWL-2100AP+ เป็นอีกทางหนึ่งที่ไม่ต้องลง software สำหรับการ Setup โดยมีขั้นตอนดังนี้

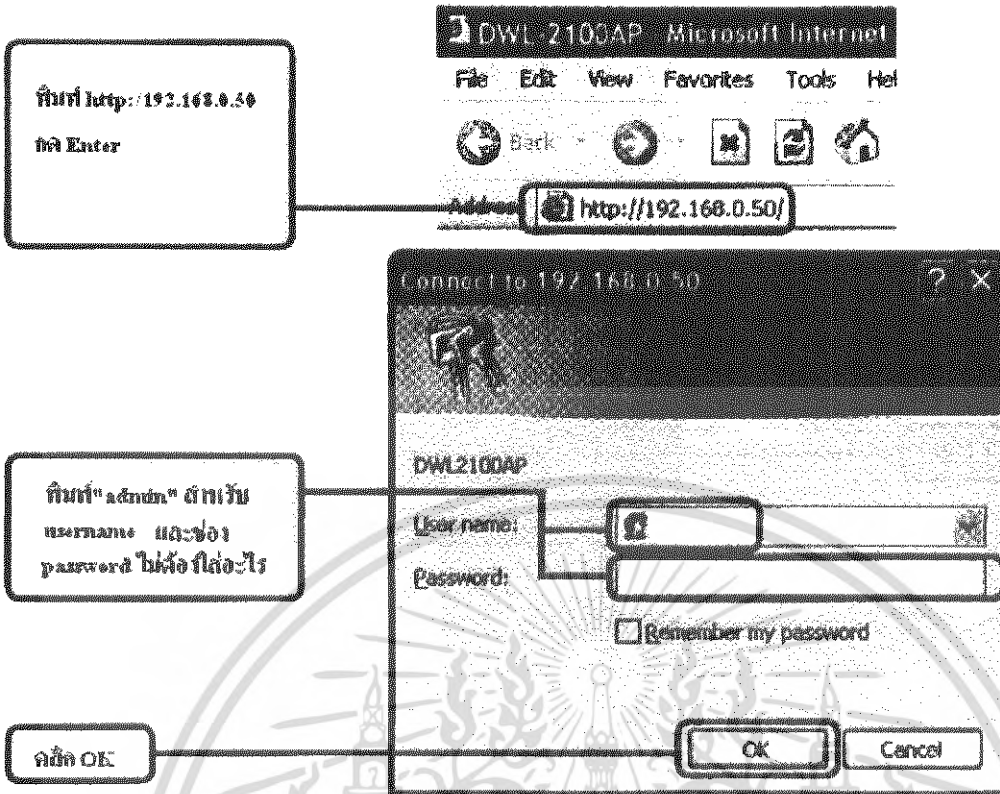
1. ทำการเสียบสาย LAN เพื่อการเชื่อมต่อระหว่าง Wireless Access Point กับเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 การติดตั้ง Hardware ของตัว Wireless Access Point

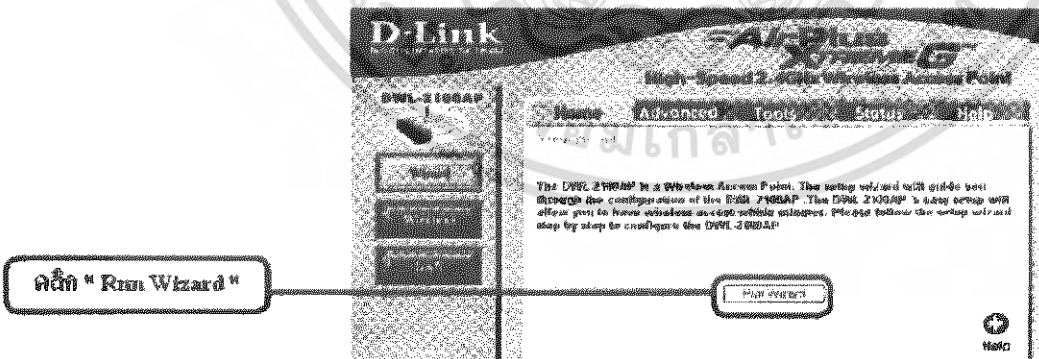
2. เมื่อติดตั้ง Hardware เรียบร้อยแล้ว จึงทำการตั้งค่าตัว Wireless Access Point ขึ้นแรกให้เปิด Web Browser ขึ้นมา ในที่นี้ขอใช้ Microsoft Internet Explorer จากนั้นก็พิมพ์ 192.168.0.50 (IP Address ของ Wireless Access Point) ไปที่ช่อง Address ตามรูปแล้วก็กด Enter หลังจากนั้นก็มี Windows เล็กๆ โผล่ขึ้นมา ถาม User name เป็น admin แต่ไม่มี password หลังจากนั้นก็ป้อน admin ไปในช่อง User name แล้วก็คลิกปุ่ม OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 การตั้งค่าตัว Wireless Access Point

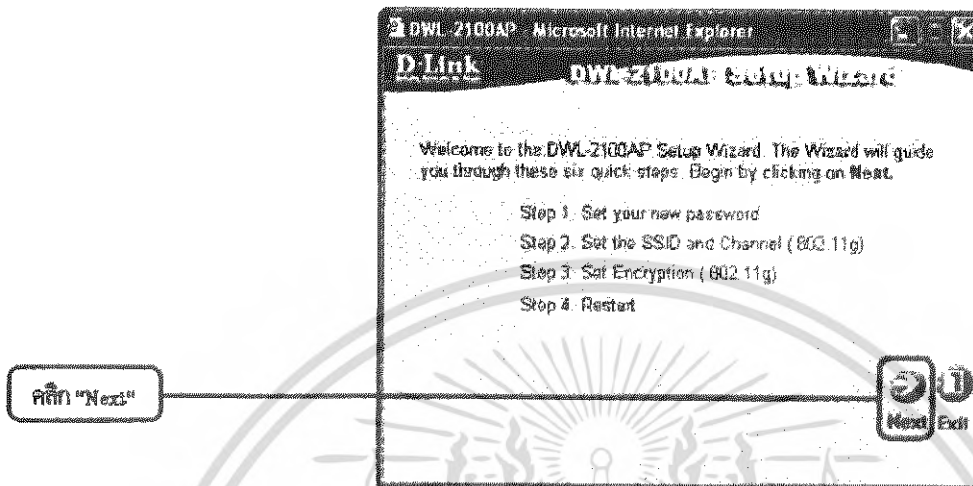
### 3. เริ่มทำการ Setup ขึ้นแรกให้คลิกที่ Setup Wizard



รูปที่ 3 การ Setup Wizard ของ Wireless Access Point

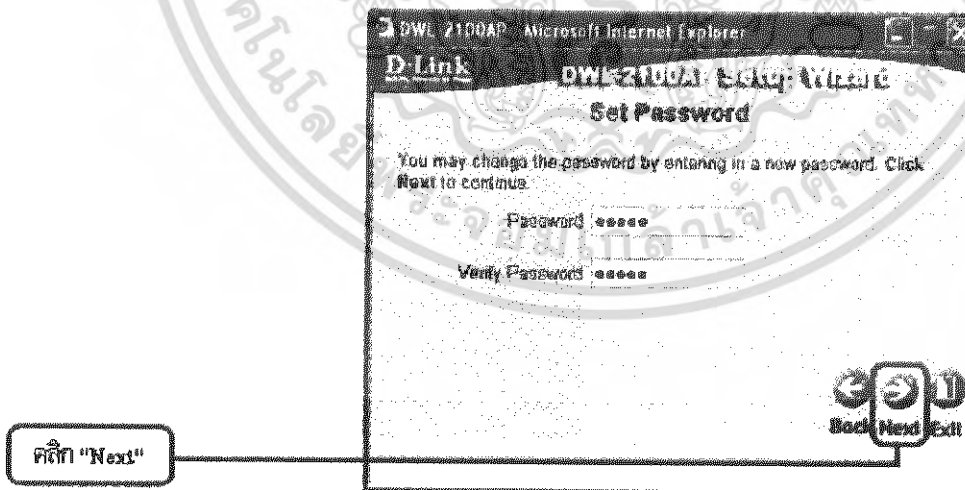
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หน้าจอ Setup Wizard จะบอกว่า อย่างน้อยควรที่จะผ่าน 4 ขั้นตอนในการ Setup คือ เปลี่ยน Password, การตั้งชื่อ SSID และ Channel, ตั้งการเข้ารหัสข้อมูล หลังจากนั้นก็ restart



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point

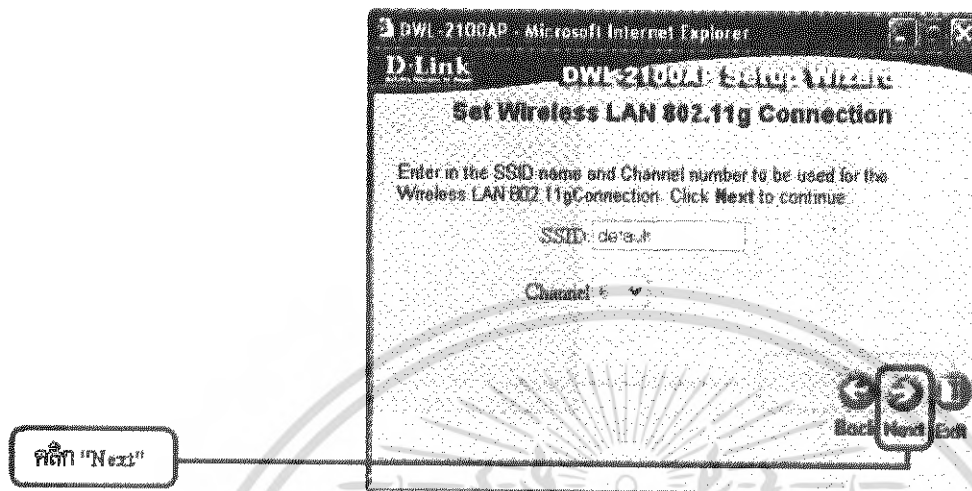
5. ขั้นแรกที่จะต้องทำคือ เปลี่ยน password โดยพยายามเลือก password ที่ไม่ง่ายในการเดาเกินไป นักใช้คำที่ไม่มีใน Dictionary ยิ่งปลอดภัย



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนในการ Set Password

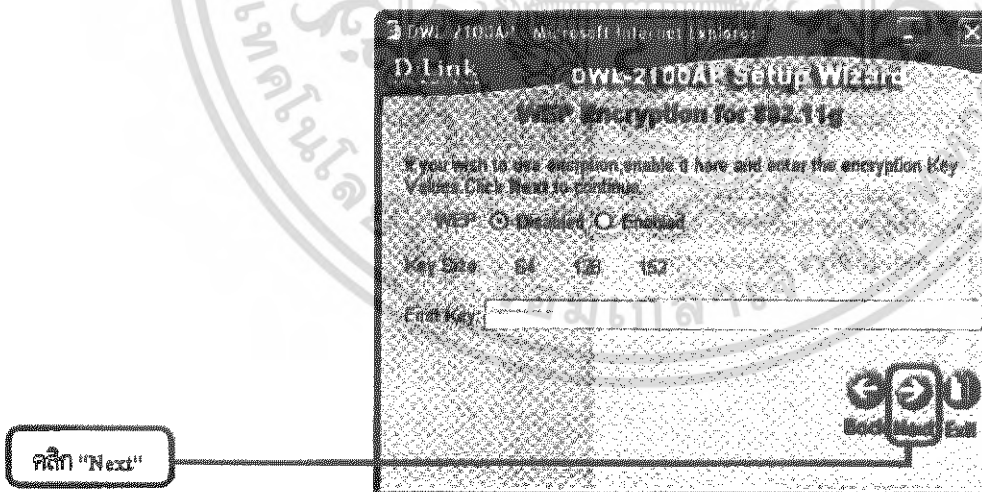
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หลังจากนั้นก็คือการเปลี่ยนชื่อ SSID ซึ่งก็คือระบบ Network ไร้สาย หรือเรียกย่อๆว่า WLAN (Wireless Local Area Network) การตั้งชื่อ SSID นี้สามารถตั้งเป็นอะไรก็ได้ แต่ต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษร



รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนชื่อ SSID

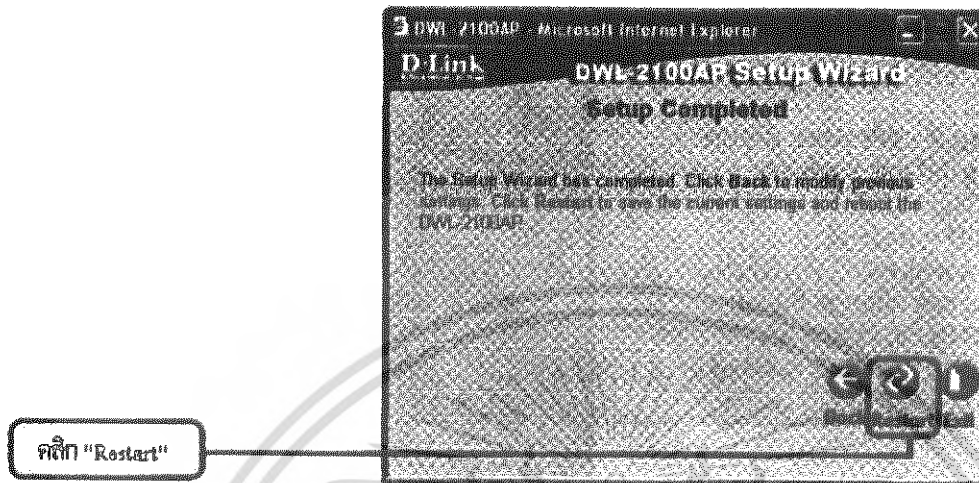
7. การ Set ค่า WEP (Wired Equivalent Privacy) คือ ความปลอดภัยหรือความเป็นส่วนตัวเหมือนระบบที่ใช้สายนั่นเอง ในขั้นตอนนี้จะปล่อยให้เป็นค่า Default ที่ตั้งมาจากโรงงาน คือ Disabled



รูปที่ 7 แสดงการ set ค่า WEP

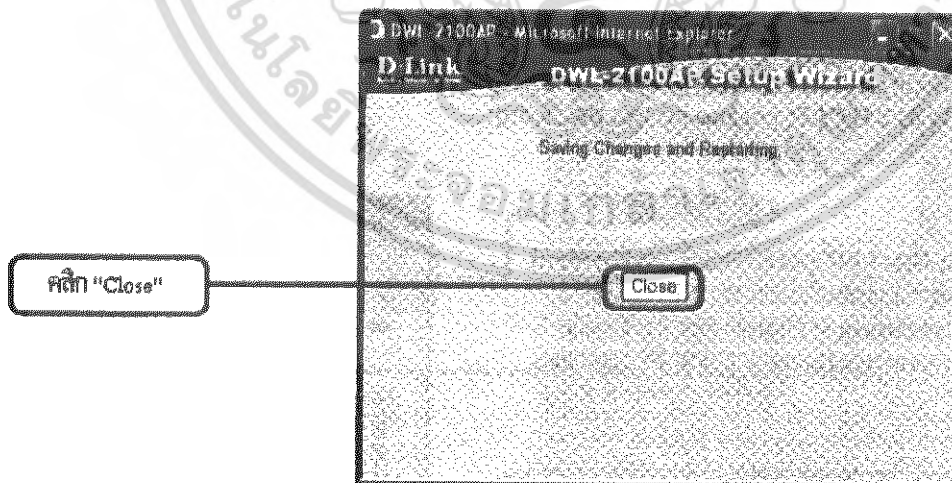
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. จากนั้นคลิก Next ก็จะมีหน้าจอขึ้นมาบอกว่า กำลัง restart Wireless Access Point อยู่



รูปที่ 8 แสดงการ restart Wireless Access Point

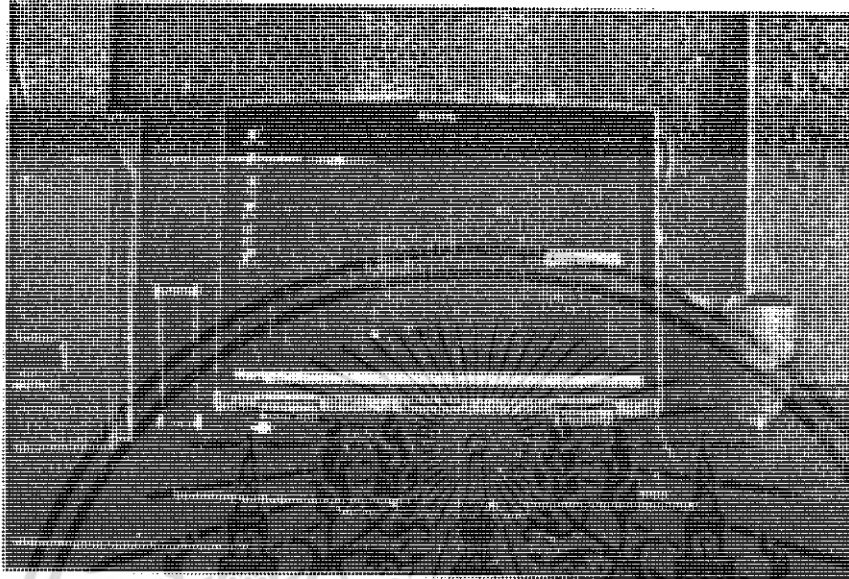
9. คลิก Continue จากนั้นก็ให้เป็น Web Browser



รูปที่ 9 แสดงการปิด Web Browser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. การ Setup ตัวเครื่องลูกข่าย โดยใช้เครื่อง Notebook เป็นตัวทดลอง โดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ Wireless LAN และของ LAN แบบมีสาย



รูปที่ 10 แสดงตัวเครื่องลูกข่าย โดยใช้เครื่อง Notebook

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้