

คู่มือสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ซีแบนด์

Duplexer for C-band Applications



โดย

นายอนุชา ธารสิทธิ์

นายกิตติศักดิ์ แพบัว

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62845  
วัน,เดือน,ปี..... 23 ส.ค. 2549

11632932

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจชั้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คู่มือสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ซีแบนด์**

**DUPLEXER FOR C-BAND APPLICATIONS**

โดย

นายอนุชา ธารสิทธิ์ 46015037

นายกิตติศักดิ์ แพบัว 46015043

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ทองทศ วานิชศรี

ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **ดูเพล็กซ์สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ซีแบนด์**

**Duplexer for C-band Applications**

ผู้จัดทำ

1. นายอนุชา ธารสิทธิ์ 45015037
2. นายกิตติศักดิ์ แพบัว 45015043

  
(ผศ.ดร.ทองตด วานิชศรี)

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ดูเพล็กซ์สำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่ซีแบนด์

### Duplexer for C-band Applications

โดย นายอนุชา ชารสิทธิ์ 46015037  
นายกิตติศักดิ์ แพบัว 46015043

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ทองทศ วานิชศรี  
ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวกรองความถี่ย่านไมโครเวฟแบบ 2 ช่วงความถี่ (ดูเพล็กซ์เซอร์) โดยใช้ย่านความถี่ขาขึ้นที่ 4.65-4.75 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่ขาลงที่ 4.35-4.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยโครงสร้างที่ออกแบบมีลักษณะเป็นโพรงมีฉากกัน เพื่อใช้สำหรับเครื่องรับและเครื่องส่งที่ใช้สายอากาศตัวเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างที่นำเสนอมีขนาดเล็กกะทัดรัดและราคาถูก เหมาะสำหรับนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐาน

#### Abstract

This project investigates the microwave bandpass filter operating at two frequency bands (DUPLExER). The used downlink frequency band is 4.35-4.45 GHz and the up-link frequency band is 4.65-4.75 GHz, respectively. The structure is made up of the cavity structure with iris applying to separate the transmitter and the receiver with a common antenna. The proposed duplexer has compact size and low cost. It is very useful for using at the base station.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน คือ อาจารย์ทองทศ วานิชศรี อาจารย์ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาศิมย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาบัตร

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่ง รวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องของทางคณะผู้จัดทำ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมั่นใจ หากเพียรทำปริญญาบัตรฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์	1
1.2 เนื้อหาของปริิญาานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 ความหมายและลักษณะการใช้งานของคูเพล็กซ์เซอร์	3
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของคูเพล็กซ์เซอร์	5
2.2.1 อัตราลดทอนการส่งผ่าน ( Insertion Loss )	5
2.2.2 อัตราการลดทอนย้อนกลับ ( Return Loss )	5
2.3 ทฤษฎีท่อนำคลื่น	7
2.3.1 โหมดเป็นใหญ่ ( Dominant Mode )	7
2.4 คูเพล็กซ์เซอร์ ( Duplexer )	8
2.4.1 สกาทเตอร์ริงเมทริกซ์ ( Scattering Matrix )	8
2.4.2 ต้นแบบตัวกรองความถี่ต่ำแบบเชบิเชฟ ( Chebyshev Lowpass Prototype )	10
2.4.3 อิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( Impedance Inverter )	16
2.4.4 การออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่น ( Waveguide Band-Pass Filter )	17
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	25
3.1 ลักษณะโครงสร้างของคูเพล็กซ์เซอร์	25
3.1.1 โครงสร้างของตัวกรองความถี่ผ่านชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายในมีผนังกัน ( Iris Waveguide Band-Pass Filter )	25
3.2 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายในมีผนังกัน ( Iris Waveguide Band-Pass Filter )	26
3.2.1 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านช่วงความถี่ 4.35 GHz – 4.45 GHz	26
3.2.2 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านช่วงความถี่ 4.65 GHz – 4.75 GHz	30
3.3 การสร้าง	36
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	38
4.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า	38
4.1.1 โครงสร้างในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.35-4.45 GHz	38
4.1.2 โครงสร้างในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.65 - 4.75 GHz	40
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของ คูเพล็กซ์เซอร์ โดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 5 ( Microwave studio version 5 ) หรือ CST	42
4.2.1 การจำลองโครงสร้างลงในโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ CST	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

เรื่อง	หน้า
4.3 ผลการจากโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.35-4.45 GHz	46
4.3.1 เปลี่ยนค่าวัสดุที่กำหนดในการวิเคราะห์ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4.35-4.45 GHz	50
4.4 ผลการจากโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.65-4.75 GHz	55
4.4.1 เปลี่ยนค่าวัสดุที่กำหนดในการวิเคราะห์ของตัวกรองความถี่ผ่าน 4.65-4.75 GHz	59
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์	63
บทที่ 5 ผลการทดสอบและผลการทดลอง	64
5.1 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	64
5.2 การทดสอบอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน อัตราการสูญเสียย้อนกลับและ ค่าอิมพีแดนซ์ (Insertion Loss, Return Loss, Impedance)	64
5.2.1 การทดสอบแบนด์พาสฟิลเตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	65
5.2.2 การทดสอบแบนด์พาสฟิลเตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	68
5.3 การทดสอบอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน อัตราการสูญเสียย้อนกลับและค่าอิมพีแดนซ์ (Insertion Loss, Return Loss, Impedance) ของคูเพิลเลอร์	70
5.3.1 การทดสอบคูเพิลเลอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	71
5.3.2 การทดสอบคูเพิลเลอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	74
5.4 สรุปผลการทดลอง	76
บทที่ 6 สรุปวิจารณ์และแนวทางการพัฒนา	77
6.1 สรุปผลการทดสอบ	77
6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้าง	79
6.3 แนวทางแก้ไข	79
กิตติกรรมประกาศ	80
หนังสืออ้างอิง	81

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 รูปแบบการใช้งานของ Duplexer	1
2.1 ลักษณะของคูเพล็กซ์เซอร์	3
2.2 การใช้งานในการสื่อสารผ่านดาวเทียม	3
2.3 การใช้งานในการสื่อสารภาคพื้นดิน(Microwave Link )	4
2.4 ตัวอย่างอัตราการลดทอนการส่งผ่าน (Insertion Loss) $L_A$	5
2.5 ตัวอย่างอัตราการลดทอนย้อนกลับ (Return loss) $L_R$	6
2.6 ตัวอย่างผลตอบสนองทางความถี่ $S_{11}(j\omega)$ , $S_{12}(j\omega)$	6
2.7 ขนาดท่อนำคลื่น	7
2.8 เน็ตเวิร์กแบบสองพอร์ต ( Two- Port Network)	8
2.9 คุณลักษณะของตัวกรองความถี่ต่ำแบบเซพทิเซพ	10
2.10 การสังเคราะห์โครงข่ายตัวกรองความถี่ต่ำแบบแลทเทอร์	15
2.11 รูปแบบทูพอร์ทอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์	16
2.12 วงจรเทียบเคียงของฉากกั้นในท่อนำคลื่น	17
2.13 วงจรสมมูลของฉากกั้นที่วางในท่อนำคลื่น	19
3.1 แสดงการนำพาสแบนด์สองตัวมาเชื่อมต่อกันเป็นคูเพล็กซ์เซอร์	25
3.2 โครงสร้างภายในของท่อนำคลื่น	25
3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีพเซพแค้นซ์กับสแน็กกัน	29
3.4 ขนาดความกว้างยาวของท่อทองเหลือง	34
3.5 แสดง โครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ	34
3.6 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.35-4.45 GHz หน่วยวัดเป็น cm.	35
3.7 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.65-4.75 GHz หน่วยวัดเป็น cm.	35
3.8 ท่อทองเหลืองที่ทำการ wire cut และ เจาะรูเรียบร้อยแล้ว	36
3.9 ท่อที่ทำการเลียบแผ่นทองเหลืองแล้ว	36
3.10 ท่อทองเหลืองที่เสร็จสมบูรณ์	37
4.1 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.35-4.45 GHz หน่วยเป็น cm.	38
4.2 แสดง โครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ	38
4.3 ขนาดของโครงสร้างค้ำบนบนย่าน 4.35-4.45 GHz	39
4.4 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.65-4.75 GHz หน่วยเป็น cm.	40
4.5 แสดง โครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ	40
4.6 ขนาดของ โครงสร้างค้ำบนบนของท่อ 4.65-4.75 GHz	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การกำหนดโครงสร้างของเวฟไกด์ฟิลต์เตอร์	42
4.8 การกำหนดหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร	42
4.9 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์	43
4.10 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับตัวกรองความถี่	43
4.11 กำหนดช่องทางการป้อนคลื่น	44
4.12 กำหนดช่องทางที่ 1 และ 2	44
4.13 กำหนดความถี่ที่เราต้องการดูลักษณะสนามไฟฟ้า	45
4.14 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเวฟไกด์ฟิลต์เตอร์	45
4.15 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ ของวัสดุ PEC	46
4.16 ลักษณะของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง ที่ความถี่ที่ 4.4 GHz	47
4.17 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่าน	48
4.18 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่าน	49
4.19 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นเงิน ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	50
4.20 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองแดง ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	51
4.21 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นอลูมิเนียม ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	52
4.22 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองเหลือง ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz	53
4.23 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ ของวัสดุ PEC	55
4.24 ลักษณะของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง ที่ความถี่ 4.7 GHz	56
4.25 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่านที่ความถี่ 4.6 GHz	57
4.26 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่านที่ความถี่ 4.8 GHz	58
4.27 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นเงิน ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	59
4.28 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองแดง ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	60
4.29 กราฟคุณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นอลูมิเนียม ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟพหุคูณลักษณะ $S_{11}$ และ $S_{12}$ เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองเหลือง ของฟิลต์เคอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz	62
5.1 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Insertion Loss, Return Loss, Impedance ของฟิลต์เคอร์	64
5.2 แสดงการทดสอบการวัดค่า Insertion Loss , Return Loss , Impedance ของฟิลต์เคอร์	65
5.3 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.35-4.45 GHz	65
5.4 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ความถี่ 4.35-4.45	66
5.5 อิมพีแดนซ์ของฟิลต์เคอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz	66
5.6 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.35 – 4.45 GHz เมื่อ SPAN ความถี่	67
5.7 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz	68
5.8 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz	68
5.9 อิมพีแดนซ์ของฟิลต์เคอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz	69
5.10 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz เมื่อ SPAN	70
5.11 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Insertion Loss, Return Loss, Impedance ของคูเพิลลิ่งเซอร์	70
5.12 แสดงการทดสอบการวัดค่า Insertion Loss , Return Loss , Impedance ของคูเพิลลิ่งเซอร์	71
5.13 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz	71
5.14 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ความถี่ 4.35-4.45 GHz	72
5.15 อิมพีแดนซ์ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz	72
5.16 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ความถี่ 4.35-4.45 GHz เมื่อ SPAN ความถี่	73
5.17 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz	74
5.18 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ความถี่ 4.65-4.75 GHz	74
5.19 อิมพีแดนซ์ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz	75
5.20 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ความถี่ 4.65-4.75 GHz เมื่อ SPAN ความถี่	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 สรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวนำที่ความถี่กลาง 4.4 GHz	54
4.2 สรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวนำที่ความถี่กลาง 4.7 GHz	63
5.1 คุณสมบัติต่างๆ ในย่าน 4.25-4.55 GHz	67
5.2 คุณสมบัติต่างๆ ในย่าน 4.55-4.85 GHz	69
5.3 คุณสมบัติต่างๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์ ในย่าน 4.25-4.55 GHz	73
5.4 คุณสมบัติต่างๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์ ในย่าน 4.55-4.85 GHz	75
6.1 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบที่สแควร์ความถี่ 4.25-4.55 GHz	77
6.2 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบที่สแควร์ความถี่ 4.55-4.85 GHz	78
6.3 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบของคูเพล็กซ์เซอร์	78



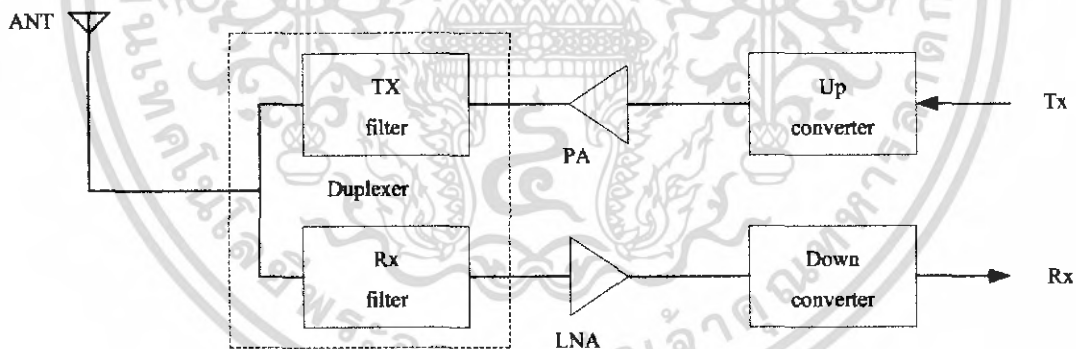
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

คลื่นวิทยุในช่วงความถี่สูงมาก (SHF, 3-30GHz) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่งที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านสื่อสารที่ระยะไกล ทั้งยังสามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศได้ดี และการลดทอนต่อสภาพอากาศไม่มากนัก จึงในทุกวันนี้มีการใช้งานในย่านความถี่นี้อย่างมากมาย เช่น สถานีภาคพื้นดินของการสื่อสาร, เรดาร์ทางการทหาร, การสื่อสารแบบเคลื่อนที่, การสื่อสารผ่านดาวเทียม และการสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งต้องการความถูกต้องแม่นยำของสัญญาณอย่างมาก จึงต้องใช้อุปกรณ์ชนิดหนึ่งเข้ามาช่วย ซึ่งอุปกรณ์ที่กล่าวมานี้ก็คือ ดูเพล็กซ์เซอร์ (Duplexer) อย่างไรก็ตามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสื่อสารเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด จึงต้องมีการจัดสรรให้คุ้มค่าที่สุด ด้วยการใช้งานที่มีมากขึ้นทั้งสถานีภาคพื้นดิน การสื่อสารแบบเคลื่อนที่ อากาศยานไร้คนขับจึงมีความถี่ในการใช้งานมากมาย ดังนั้นสถานีภาคพื้นดินจึงต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถแยกแยะระหว่างความถี่ที่ต้องการ และความถี่ที่ไม่ต้องการได้ ซึ่ง ดูเพล็กซ์เซอร์ ก็คือแบนด์พาสฟิลเตอร์ (Band Pass Filter) ทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่ผ่านของระบบสื่อสาร 2 ทิศทาง (Full Duplex) ที่ใช้สายอากาศร่วมกันภายในตัวเดียวที่มีทั้งตัวกรองภาคส่งสัญญาณ (Tx) และ ตัวกรองภาครับสัญญาณ (Rx) อยู่ในตัวเดียวกัน



รูปที่ 1.1 รูปแบบการใช้งานของ Duplexer

เมื่อพิจารณาลักษณะการใช้งานของ ดูเพล็กซ์เซอร์ ที่ใช้ในสถานีฐานแล้ว ดูเพล็กซ์เซอร์ จะต้องติดตั้งใกล้กับจานสายอากาศ ดังนั้นจึงต้องมีคุณสมบัติที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ให้ประสิทธิภาพสูง ขนาดกะทัดรัด และ ทนกำลังงานส่งที่สูงของภาคส่งได้ และง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน เพราะฉะนั้นดูเพล็กซ์เซอร์แบบ พาสซีฟ (Passive) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานอย่างยิ่ง

ซึ่งไมโครเวฟคูเพล็กซ์เซอร์ (Microwave Filter) แบบพาสซีฟมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งแบบไมโครสตริปคูเพล็กซ์เซอร์, ไดอิเล็กทริกคูเพล็กซ์เซอร์ เป็นต้น คูเพล็กซ์เซอร์แบบไมโครสตริปนั้นจะทนต่อกำลังส่งที่ต่ำกว่าส่วนไดอิเล็กทริกคูเพล็กซ์เซอร์ มีราคาค่อนข้างสูงการออกแบบซับซ้อน จากคุณสมบัติต่างๆที่กล่าวมาคูเพล็กซ์เซอร์หรือไมโครเวฟแบนด์พาสฟิลต์เตอร์แบบท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นโพรง(Cavity)จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานมากที่สุด

โครงการนี้ จะทำการวิเคราะห์และออกแบบคูเพล็กซ์เซอร์ชนิดเวฟไกด์ฟิลต์เตอร์(Waveguide Filter) แบบโพรงมีผนังกัน ที่ใช้งานในช่วงความถี่ย่าน C-BAND โดยมีพาสแบนด์ที่ 4.35 – 4.45 GHz ใช้งานในภาครับ (Rx) และ พาสแบนด์ที่ 4.65 – 4.75 GHz ใช้งานในภาคส่ง (Tx) ออกแบบให้มีการส่งผ่านคลื่นในโหมดเป็นใหญ่(Dominant Mode) โครงสร้างมีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยม ภายในมีฉากกัน สามารถนำไปติดตั้งกับตัวงานสายอากาศได้ง่าย การวิเคราะห์โครงสร้างของ คูเพล็กซ์เซอร์ มักจะพิจารณาถึงขนาดของโพรงและขนาดของช่องว่างผนังกันในแต่ละชั้น ที่นำมาต่อกันเป็นคูเพล็กซ์เซอร์ตามออเดอร์ (Order) ที่ได้กำหนด โดยคุณลักษณะที่จะนำมาพิจารณาคือ คุณสมบัติของตัวแปรที่ตอบสนองความถี่ (Insertion Loss) , (Return Loss) และ ค่าอิมพีแดนซ์ จากนั้นทำการสร้างคูเพล็กซ์เซอร์ต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบขั้นผลที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อจะได้คุณสมบัติต่างๆของ คูเพล็กซ์เซอร์ ที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในสถานีฐานทางการสื่อสาร ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของคูเพล็กซ์เซอร์ และท่อนำคลื่น วิธีการคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆของคูเพล็กซ์เซอร์ และท่อนำคลื่น เช่นลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่น ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของคูเพล็กซ์เซอร์ ค่าซิมเพนแดนซ์ (B) ของผนังกันในแต่ละชั้น แสดงสูตรการคำนวณโครงสร้างต่างๆ เป็นต้น

บทที่ 3 เป็นการออกแบบคำนวณ โครงสร้างคูเพล็กซ์เซอร์ ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จาก บทที่ 2 ออกแบบโครงสร้างต่างๆเช่น ความยาว ความกว้าง ขนาดช่องของผนังกัน เป็นต้น และอธิบายถึงวิธีการสร้างคูเพล็กซ์เซอร์

บทที่ 4 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของคูเพล็กซ์เซอร์โดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็ก ไฟฟ้า (CST MICROWAVE STUDIO 5) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ และ ออกแบบ คูเพล็กซ์เซอร์ ให้ได้ตามต้องการ

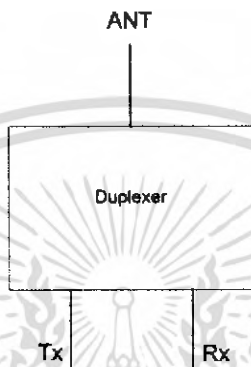
บทที่ 5 เป็นขั้นตอนการทดสอบ แสดงผลที่ได้จากการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 6 สรุปผลคุณลักษณะทั้งหมดของคูเพล็กซ์เซอร์ตลอดจนวิจารณ์และเสนอแนวทางการพัฒนา คูเพล็กซ์เซอร์ต่อไป

## บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ

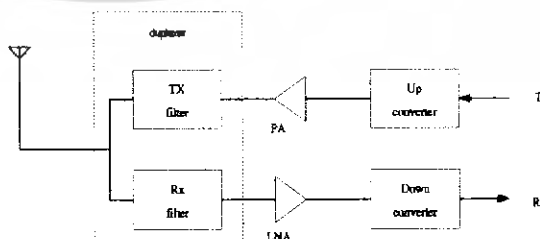
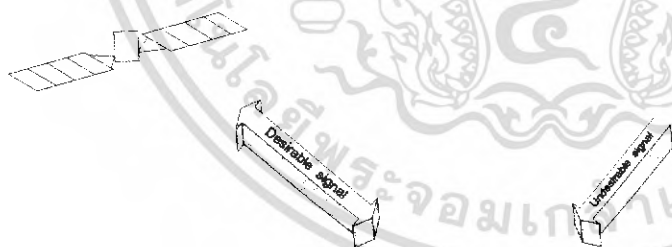
### 2.1 ความหมายและ ลักษณะการใช้งานของคูเพล็กซ์เซอร์

คูเพล็กซ์เซอร์คือตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) เป็นอุปกรณ์ที่มี 3 ขั้วต่อ (3 port) ที่มีทั้งตัวกรองย่านความถี่ผ่านทางด้านส่ง (Tx) และตัวกรองย่านความถี่ผ่านทางด้านรับ (Rx) อยู่ในตัวเดียวกัน โดยใช้สายอากาศร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของคูเพล็กซ์เซอร์

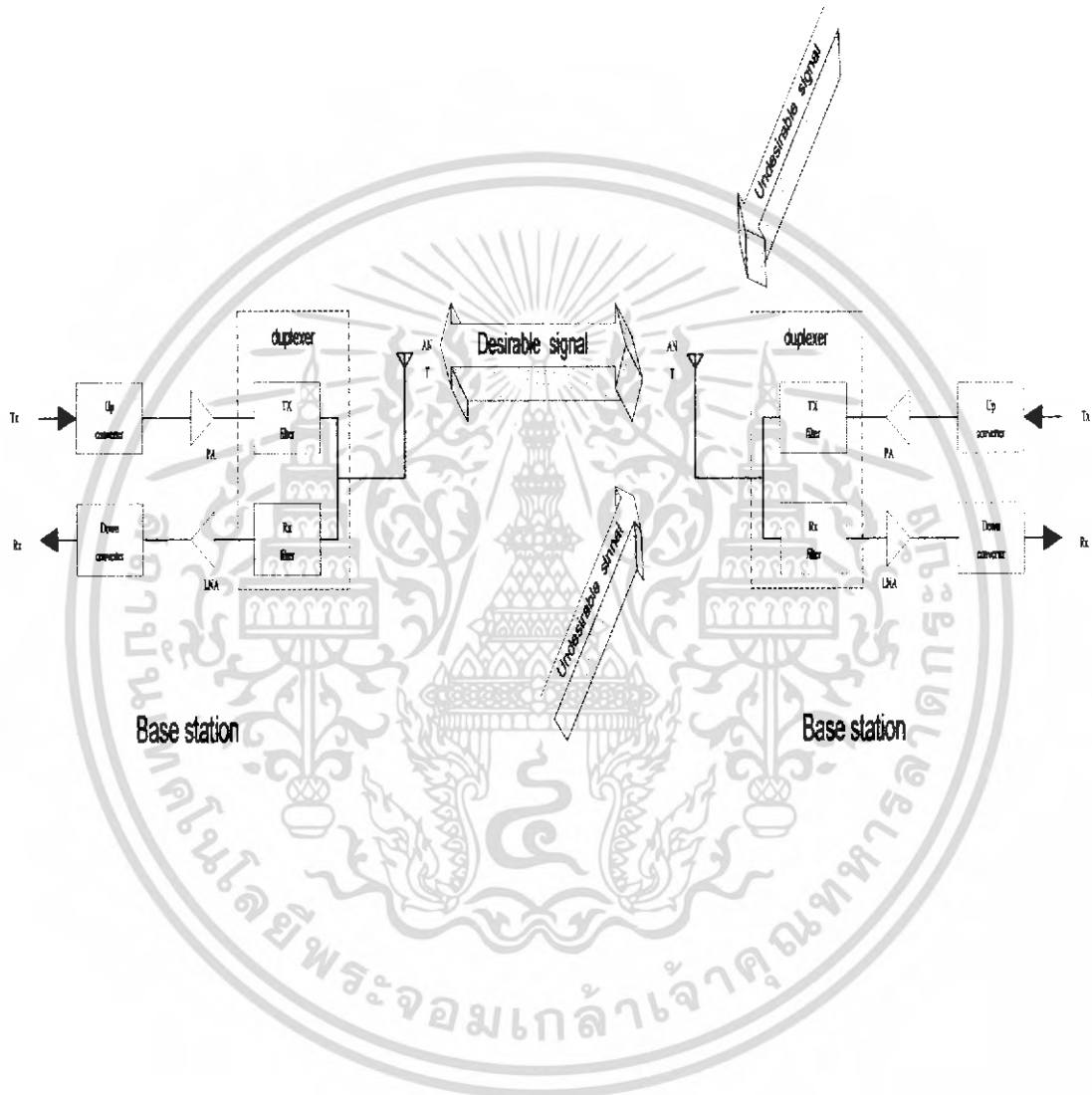
ลักษณะการใช้งานของคูเพล็กซ์เซอร์นั้นจะสามารถประยุกต์ใช้กับงานทางการสื่อสารได้หลายแบบ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียมดังรูปที่ 2.2 โดยต่อเข้ากับสายอากาศและภาค Rx,Tx ของเครื่องรับเพื่อป้องกันย่านความถี่ที่ไม่ต้องการที่เข้ามาในสายอากาศ



รูปที่ 2.2 การใช้งานในการสื่อสารผ่านดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานของคูเพิลเลอร์ ที่ใช้ในการสื่อสารภาคพื้นดินเพื่อป้องกันย่านความถี่จากสถานีข้างเคียงที่เข้ามารบกวนทางสายอากาศ โดยมีการใช้งานคูเพิลเลอร์ติดตั้งเข้ากับระบบที่เราต้องการใช้งานเพื่อลดความผิดพลาดของการสื่อสาร



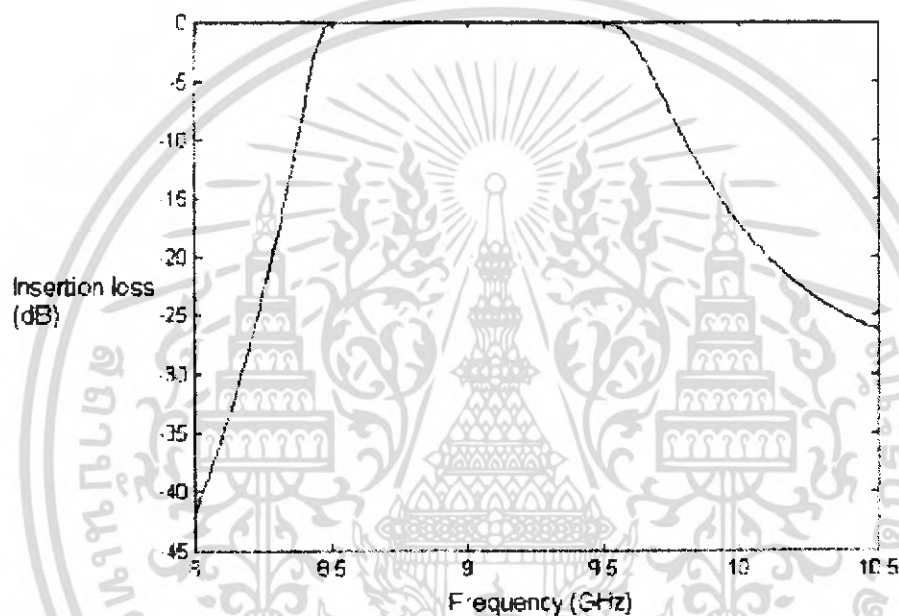
รูปที่ 2.3 การใช้งานในการสื่อสารภาคพื้นดิน(Microwave Link )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของคูเพิลเลอร์

### 2.2.1 อัตราการลดทอนการส่งผ่าน ( Insertion Loss ) $L_A$

ค่าการลดทอนการส่งผ่าน ( Insertion loss ) นี้ได้มาจากตัวแปร  $S_{12}(j\omega)$  (Transfer Function ) ของระบบ ใช้ตัวย่อว่า  $L_A = -20\text{Log}_{10} |S_{12}(j\omega)|$  dB การลดทอนการส่งผ่านนี้ จะเป็นการวัดค่าการลดทอนการส่งผ่านของระบบซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของความถี่หรือผลตอบสนองทางความถี่นั่นเอง(Frequency-Response) ดังรูปตัวอย่างที่ 2.4

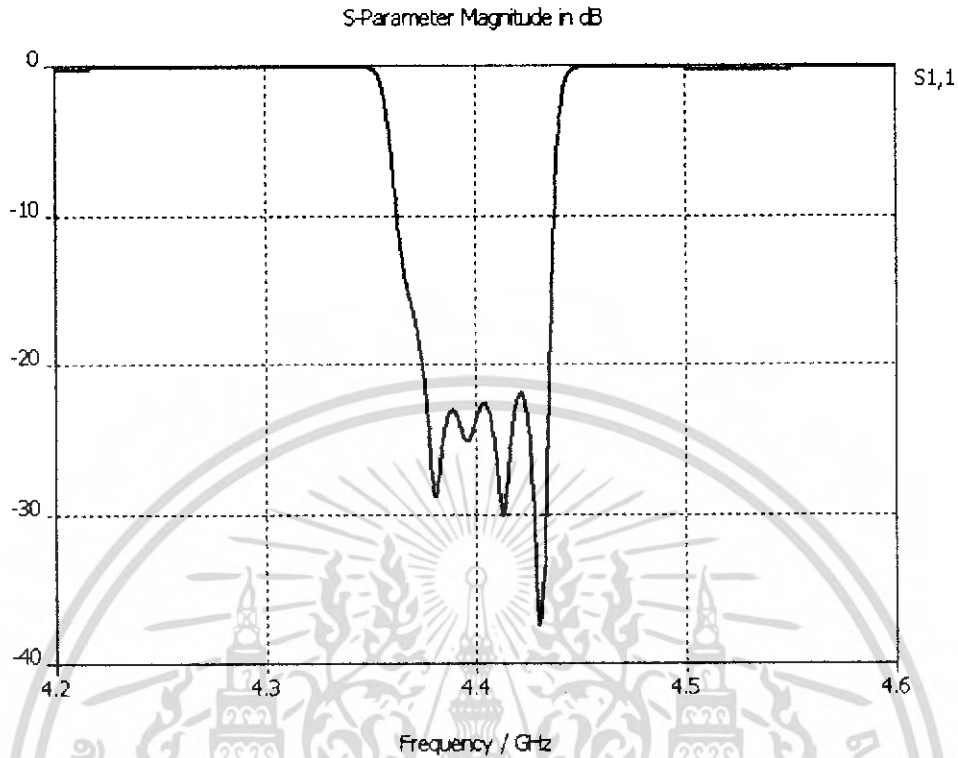


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างอัตราการลดทอนการส่งผ่าน ( Insertion Loss )  $L_A$

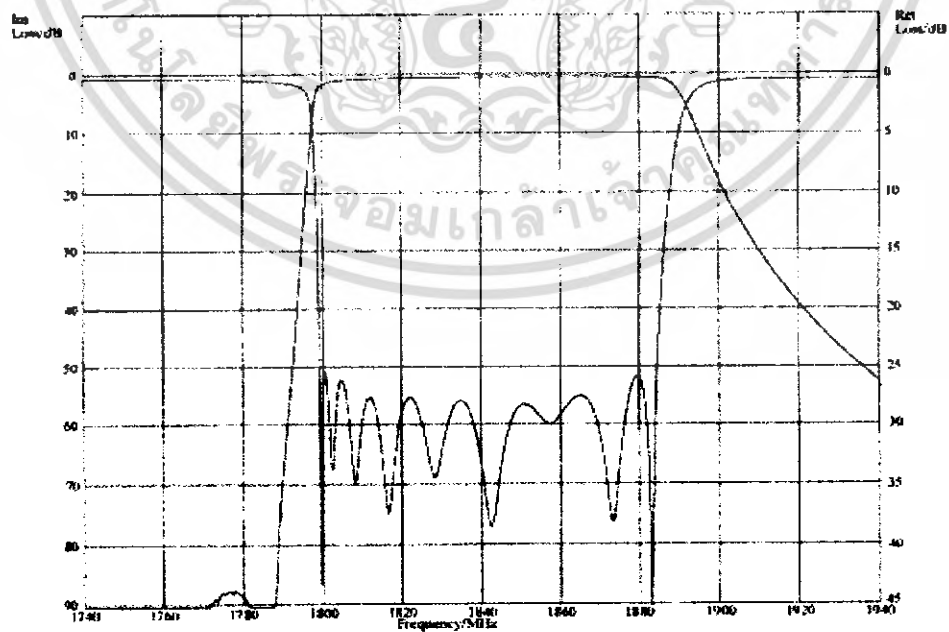
### 2.2.2 อัตราการลดทอนย้อนกลับ ( Return Loss ) $L_R$

ค่าการลดทอนย้อนกลับ ( Return Loss ) นี้ได้มาจากตัวแปร  $S_{11}(j\omega)$  จะเป็นการวัดค่าการลดทอนของสัญญาณสะท้อนใช้ตัวย่อว่า  $L_R = -20\text{Log}_{10} |S_{11}(j\omega)|$  จะบอกถึงการแมทช์ (Match) ของระบบ การแมทช์ของระบบที่สมบูรณ์แบบจะได้  $L_R = \infty$  แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถทำได้แต่ค่าที่ยอมรับได้คือ  $L_R$  ควรจะอยู่ที่ 15 หรือ 20 dB ขึ้นไปแล้วแต่การใช้งาน ดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอัตราการสะท้อนกลับ (Return loss)  $L_R$



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลตอบสนองทางความถี่  $S_{11}(j\omega)$ ,  $S_{12}(j\omega)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

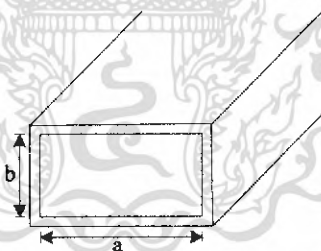
## 2.3 ท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่นคือโครงสร้างที่นำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยคลื่นสูญเสียพลังงานน้อยมาก ท่อนำคลื่นโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยโครงสร้างจากท่อโลหะที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอตลอดความยาว ข้อแตกต่างระหว่างท่อนำคลื่นกับสายนำสัญญาณ TEM สายนำสัญญาณ TEM จะประกอบไปด้วยตัวนำน้อยที่สุด 2 ชั้น และรองรับคลื่นในโหมด TEM (Transverse Electromagnetic Mode) ซึ่งความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าตัด ส่วนท่อนำคลื่นนั้นจะประกอบไปด้วยตัวนำน้อยที่สุด 1 ชั้นและรองรับคลื่นในโหมด TE หรือ TM อย่างใดอย่างหนึ่ง ความถี่ตัด จะขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัด จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) จะสามารถคำนวณหาขนาดของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นที่เทียบจากความถี่ และโหมดการแพร่กระจายคลื่นดังสมการที่ 2.1 ในที่นี้ขอแสดงแค่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมในโหมด  $TE_{10}$  เท่านั้น

$$\omega_c = \frac{1}{\mu\epsilon} \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

### 2.3.1 โหมดเป็นใหญ่ (Dominant Mode) $TE_{10}$

จากความต้องการพื้นฐานเราต้องการความถี่ตัดที่มีค่าต่ำที่สุดและมีค่าความยาวคลื่นมากที่สุดนั้น ในโหมดเป็นใหญ่ซึ่งโดยปกติแล้วเราจะใช้ท่อนำคลื่นที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ  $b$  และมีความยาวเท่ากับ  $a$  ซึ่งที่นิยมกันโดยทั่วไปจะใช้  $a = 2b$  ตามรูป



รูปที่ 2.7 ขนาดท่อนำคลื่น

สมการที่ใช้ในการคำนวณ  $TE_{10}$

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}a} \quad (2.2)$$

$$a = \frac{c}{2f_c} \quad (2.3)$$

ความยาวคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่น (Guide Wave Length)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{[1 - (\omega_c/\omega)^2]^{1/2}} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คูเพิลเลอร์ (Duplexer)

โครงสร้างของคูเพิลเลอร์ นั้นเป็นการนำเอาตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่น (Waveguide Bandpass Filter) 2 ตัวต่อเชื่อมกัน (Coupling) เพื่อเชื่อมต่อกับสายอากาศเพราะฉะนั้นการออกแบบ จึงต้องออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่น แยกกันในแต่ละย่านความถี่แล้วนำมาเชื่อมต่อเข้าหากัน

### 2.4.1 สกาทเทอริงเมตริกซ์ (Scattering matrix)

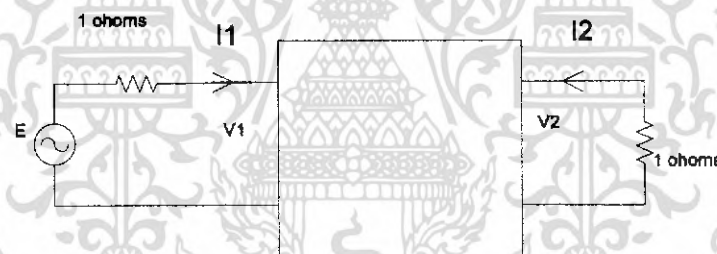
พิจารณาโครงข่าย 2 พอร์ต (Two-Port Network) เราสามารถอธิบายให้อยู่ในรูปของสกาทเทอริงเมตริกซ์ (Scattering Matrix) พิจารณาจากอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

$$[V] = [Z][I] \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$[a] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = [V] + [I] \quad (2.6)$$

$$[b] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = [V] - [I] \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.8 เน็ตเวอร์คแบบสองพอร์ต (Two-Port Network)

และให้

$$[b] = [S][a] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) จะได้

$$[V] = [a] + [b] \quad (2.9)$$

$$[I] = [a] - [b] \quad (2.10)$$

จากความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

$$[V] = [Z][I] \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$[a] + [b] = [Z][[a] + [b]] \quad (2.12)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(1+[S])[a]=[Z](1-[S])[a] \quad (2.13)$$

และ

$$Z = \frac{1+[S]}{1-[S]} \quad (2.14)$$

เมื่อต่อโหลดที่ 1 โห้้มและค่าความต้านทานที่ตัวกำเนิดที่ 1 โห้้มดังรูปที่ 2.8

$$V_1 = [a_1] + [b_1] \quad (2.15)$$

$$V_2 = [a_2] + [b_2] \quad (2.16)$$

$$I_1 = [a_1] - [b_1] \quad (2.17)$$

$$I_2 = [a_2] - [b_2] \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.8

$$V_2 = -I_2 \quad (2.19)$$

จากอัตราขยายกำลังจากการวิเคราะห์วงจรดังรูปที่ (2.8)

$$G(j\omega) = 4 \frac{|I_2|^2}{|E|^2} \quad (2.20)$$

$$E = I_1 + V_1 = 2a_1 \quad (2.21)$$

$$I_2 = -b_2 \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้น

$$G(j\omega) = \frac{|b_2|^2}{|a_1|^2} \quad (2.23)$$

จากสมการเตอร์ริงเมตริกซ์  $S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$  และเป็นรีซีโปรคอลเน็ตเวอร์ก ( Reciprocal-Network ) เราจะได้

$$S_{21}(j\omega) = S_{12}(j\omega)$$

$$G(j\omega) = [S_{21}(j\omega)]^2 \quad (2.24)$$

$$G(j\omega) = [S_{12}(j\omega)]^2 \quad (2.25)$$

จากสมการที่ได้จะเห็นว่าค่าอัตราขยายกำลังจะขึ้นอยู่กับค่า  $S_{12}(j\omega)$  ซึ่งก็คือฟังก์ชันการส่งผ่านของระบบ ( Transfer Function ) ในโครงข่ายที่ไม่มีมีการขยายเม็กนิจูดจะสูงสุดที่ 0 dB ส่วนมากจะเขียนอยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_A = -20 \text{Log}_{10} |S_{12}(j\omega)| \text{ dB} \quad (2.26)$$

$L_A$  การลดทอนการส่งผ่าน ( Insertion Loss)

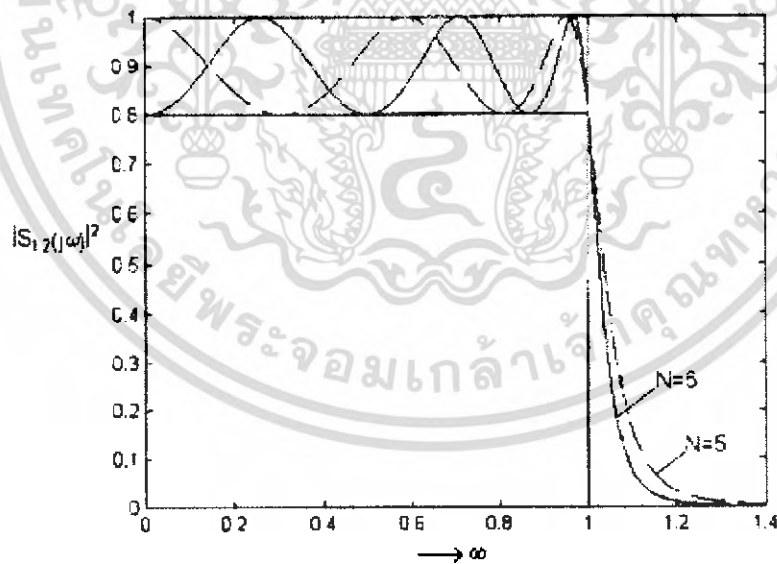
ส่วนค่า  $S_{11}(j\omega)$  คือค่าการลดทอนย้อนกลับ (Return Loss) นี้ได้มาจากตัวแปร  $S_{11}(j\omega)$  จะเป็นการวัดค่าการลดทอนของสัญญาณสะท้อนใช้ตัวย่อว่า

$$L_R = -20 \text{Log}_{10} |S_{11}(j\omega)| \text{ dB} \quad (2.27)$$

จะบอกถึงการแมทช์ (Match) ของระบบ การแมทช์ของระบบที่สมบูรณ์เราจะได้  $L_R = \infty$  แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถทำได้แต่ค่าที่ยอมรับได้คือ  $L_R$  ควรจะอยู่ที่ 15 หรือ 20 dB ขึ้นไปแล้วแต่การใช้งาน

#### 2.4.2 ต้นแบบตัวกรองความถี่ต่ำแบบเชฟบีเชฟ ( Chebyshev Lowpass Prototype )

คุณสมบัติของตัวกรองแบบเชฟบีเชฟมีรูปแบบที่เป็นมาตรฐาน คือมีความถี่ตัดที่ 3 dB และ  $\omega = \pm 1$  ในช่วงพาสแบนด์ จะมีริบเปิล (Ripple) เขียนแทนด้วยฟังก์ชัน  $T_N(\omega)$  และ ริบเปิลในช่วงพาสแบนด์จะถูกควบคุมด้วยค่า  $\epsilon$



รูปที่ 2.9 คุณลักษณะของตัวกรองความถี่ต่ำแบบเชฟบีเชฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ต่ำแบบเชฟพีเชฟ

$$|S_{12}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2(\omega)} \quad (2.28)$$

และ

$$T_N(\omega) = \cos[N \cos^{-1}(\omega)] \quad |\omega| \leq 1 \quad (2.29)$$

$$T_N(\omega) = \cosh[N \cosh^{-1}(\omega)] \quad |\omega| > 1 \quad (2.30)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเชฟพีเชฟในการประมาณค่าฟังก์ชัน

$$T_N(\omega) = 2\omega T_{N-1}(\omega) - T_{N-2}(\omega) \quad N \geq 2 \quad (2.31)$$

ค่าเริ่มต้น

$$T_0(\omega) = 1 \quad T_1(\omega) = \omega \quad (2.32)$$

ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเชฟพีเชฟในการประมาณค่าฟังก์ชัน

$$T_2(\omega) = 2\omega^2 - 1$$

$$T_3(\omega) = 4\omega^3 - 3\omega$$

$$T_4(\omega) = 8\omega^4 - 8\omega^2 + 1$$

$$T_5(\omega) = 16\omega^5 - 20\omega^3 + 5\omega$$

$$T_6(\omega) = 32\omega^6 - 48\omega^4 + 18\omega^2 - 1$$

$$T_7(\omega) = 64\omega^7 - 112\omega^5 + 56\omega^3 - 7\omega$$

หรือใช้สูตรการประมาณ อันดับ N ของเชฟพีเชฟ

$$N \geq \frac{L_A + L_R + 6}{20 \log_{10} \left[ S + (S^2 - 1)^{1/2} \right]} \quad (2.33)$$

เพราะฉะนั้นค่าการลดทอนของการส่งผ่านคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_A = 10 \log \left[ \frac{1}{|S_{12}(j\omega)|^2} \right] \quad (\text{dB}) \quad (2.34)$$

เพราะฉะนั้นอัตราการลดทอนของการส่งผ่านหาได้จากค่า  $T_N(\omega)$  และค่า  $\varepsilon$

$$L_A = 10 \log [1 + \varepsilon^2 T_N^2(\omega)] \quad (\text{dB}) \quad (2.35)$$

อัตราการลดทอนย้อนกลับ

กำหนดค่าอัตราการลดทอนย้อนกลับ แล้วสามารถหาค่า  $\varepsilon$  ได้

$$L_R = 10 \log \left( \frac{1}{|S_{11}|^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.36)$$

จากที่  $T_N^2(\omega) = 1$

$$|S_{12}|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2} \quad (2.37)$$

$$|S_{12}|^2 = 1 - |S_{11}|^2 \quad (2.38)$$

$$|S_{11}|^2 = \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} \quad (2.39)$$

$$L_R = 10 \log \left( 1 + \frac{1}{\varepsilon^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.40)$$

$$\varepsilon = \left( 10^{\frac{L_R}{10}} - 1 \right)^{-1/2} \quad (2.41)$$

$\varepsilon$  คือค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าการกระเพื่อมที่พาสแบนด์ประมาณเป็นค่าการกระเพื่อมที่พาสแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ต่ำแบบเซฟพีเซฟ

$$|S_{12}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2(\omega)} \quad (2.42)$$

จะเกิดโพลขึ้นที่  $T_N^2(\omega) = -1/\varepsilon^2$  (2.43)

และฟังก์ชันการกระเพื่อมในช่วงความถี่ผ่าน

$$T_N(\omega) = \cos[N \cos^{-1}(\omega)] \quad (2.44)$$

$$\cos^2[N \cos^{-1}(\omega)] = -1/\varepsilon^2 \quad (2.45)$$

กำหนดตัวแปรใหม่เพื่อใช้แก้สมการ

$$\eta = \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right] \quad (2.46)$$

หรือ

$$\frac{1}{\varepsilon} = \sinh [N \sinh^{-1}(\eta)] \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.45) และ สมการที่ (2.47)

$$\cos^2 [N \cos^{-1}(\omega)] = -\sinh^2 [N \sinh^{-1}(\eta)] = \sin^2 [N \sin^{-1}(j\eta)] \quad (2.48)$$

พิจารณา

$$\cos^{-1}(\omega) = \sin^{-1}(j\eta) + \theta_r \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$\theta_r = \frac{(2r-1)\pi}{2N} \quad (2.50)$$

$$P_r = -j \cos[\sin^{-1}(j\omega) + \theta_r] = -\eta \sin(\theta_r) - j(1 - \eta^2)^{1/2} \cos(\theta_r) \quad (2.51)$$

โพลทางคานซ้ายมือจะเกิดขึ้นเมื่อ  $\sin(\theta_r)$  เป็นบวกเพราะฉะนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{12}(p) = \prod_{r=1}^N \left\{ \frac{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]^{1/2}}{p + j[\sin^{-1}(j\omega) + \theta_r]} \right\} \quad (2.52)$$

จาก  $|S_{11}(j\omega)|^2 = 1 - |S_{12}(j\omega)|^2$  (2.53)

$$|S_{11}(j\omega)|^2 = \frac{\varepsilon^2 T_N^2(\omega)}{1 + \varepsilon^2 T_N^2(\omega)} \quad (2.54)$$

เพราะฉะนั้นซีโรจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\cos[N \cos^{-1}(\omega)] = 0 \quad (2.55)$$

จะได้

$$P_r = -j \cos(\theta_r) \quad (2.56)$$

$$S_{11}(p) = \prod_{r=1}^N \left\{ \frac{p + j \cos(\theta_r)}{p + j \cos[\sin^{-1}(j\eta) + \theta_r]} \right\} \quad (2.57)$$

เราสามารถนำไปสังเคราะห์โครงข่ายตัวกรองความถี่ต่ำแบบเลทเทอร์โดยอาศัยสูตร  $Z_{in}(p)$  ตัวอย่าง  $N=3$  ตัวกรองความถี่แบบเชพทีเซฟ

$$Z_{in}(p) = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (2.58)$$

$$r = 1 \quad \theta_1 = \pi/6 \quad \cos(\theta_1) = \sqrt{3}/2$$

$$r = 2 \quad \theta_1 = \pi/2 \quad \cos(\theta_1) = 0$$

$$r = 3 \quad \theta_1 = 5\pi/6 \quad \cos(\theta_1) = -\sqrt{3}/2$$

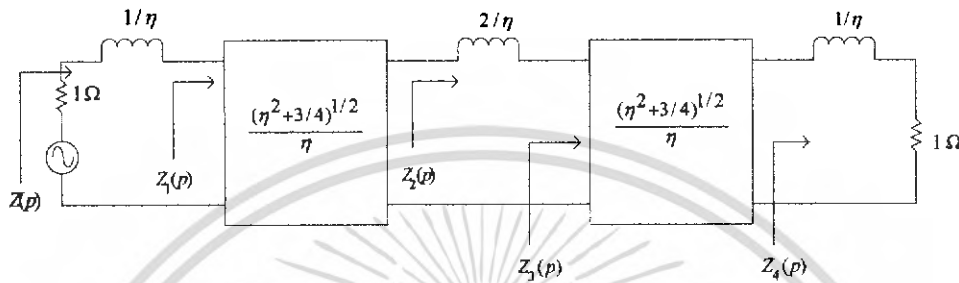
ดังนั้น

$$S_{11}(p) = \frac{p^3 + 3p/4}{p^3 + 2\eta p^2 + (2\eta^2 + 3/4)p + \eta(\eta^2 + 3/4)} \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in}(p) = \frac{2p^3 + 2\eta p^2 + 2(\eta^2 + 3/4)p + \eta(\eta^2 + 3/4)}{2\eta p^2 + 2\eta^2 p + \eta(\eta^2 + 3/4)} \quad (2.60)$$

ลบออกด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้วยค่า  $1/\eta$  ทางด้านซ้ายตามรูปที่ (2.10)



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์โครงข่ายตัวกรองความถี่ต่ำแบบแลทเทอร์

$$Z_1(p) = Z_{in}(p) - p/\eta \quad (2.61)$$

$$Z_1(p) = \frac{(\eta^2 + 3/4)(p + \eta)}{2\eta p^2 + 2\eta^2 p + \eta(\eta^2 + 3/4)} \quad (2.62)$$

จากสมการเราแยกสมการของแอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์

$$K_{12} = \frac{(\eta^2 + 3/4)^{1/2}}{\eta} \quad (2.63)$$

ค่าที่เหลือ

$$Z_2(p) = \frac{2p^2 + 2\eta p + (\eta^2 + 3/4)}{\eta(p + \eta)} \quad (2.64)$$

ลบออกด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้วยค่า  $2/\eta$  ทางด้านซ้ายตามรูปที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_3(p) = Z_2(p) - 2p/\eta \quad (2.65)$$

$$Z_3(p) = \frac{\eta^2 + 3/4}{\eta(p + \eta)} \quad (2.66)$$

เพราะฉะนั้นจะได้แอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์ลำดับที่สองคือ

$$K_{23} = \frac{(\eta^2 + 3/4)^{1/2}}{\eta} \quad (2.67)$$

อิมพีแดนซ์ที่เหลือคือ

$$Z_4(p) = 1 + p/\eta \quad (2.68)$$

เพราะฉะนั้นเราจะประมาณค่าแอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์ได้เป็น

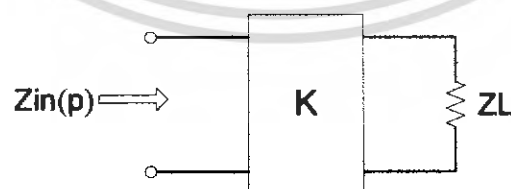
$$K_{r,r+1} = \frac{(\eta^2 + \sin^2(r\pi/N))^{1/2}}{\eta} \quad (2.69)$$

### 2.4.3 อิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( Impedance Inverters )

ในการคำนวณโครงข่ายที่เป็นแลตเตอร์ (Ladder Network) เรามักจะใช้ค่าที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์หรือแอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์ในการคำนวณ โครงข่ายที่เป็นอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์จะเขียนแทนด้วย เมตริกซ์การส่งผ่านคือ

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & jK \\ j/K & 0 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

K คือ ค่าอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.11 รูปแบบทูพอร์ตอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์

จากวงจรรูปที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \tag{2.71}$$

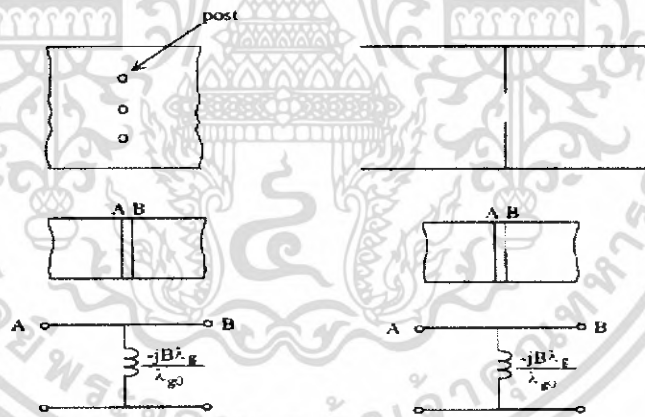
$$Z_{in} = \frac{K^2}{Z_L} \tag{2.72}$$

เมื่อพิจารณาในการต่อแบบแลทเตอร์

$$K' = \frac{K^2}{Z_R} \tag{2.73}$$

### 2.4.4 การออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่น ( Waveguide Bandpass Filter )

ตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่นนี้มีโครงสร้างที่ทำมาจากท่อโลหะที่มีความ สม่ำเสมอภายใน ประกอบด้วยชั้นของตัวกั้นคลื่น (Shunt Discontinuities) ตัวกั้นคลื่นนี้อาจจะเป็นเสาคลื่นหรือฉากกั้นแบบต่างๆซึ่งจะทำให้ตัวเหมือนกับค่าอินดักทีฟ (Inductive) หรือคาปาซิทีฟ (Capacitive) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงดังรูป



รูปที่ 2.12 วงจรเทียบเคียงของฉากกั้นในท่อนำคลื่น

ในแต่ละช่วงของท่อนำคลื่นจะสามารถอธิบายโดยใช้ เมตริกซ์การส่งผ่านและค่าคุณลักษณะดังนี้

$Z_o$  = คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์

$$Z_o = \frac{\eta}{[1 - (\omega_c / \omega)^2]^{1/2}} \tag{2.74}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแ 62845 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าคงที่เฟส

$$\beta = \frac{\omega}{v} \left[ 1 - \left( \frac{\omega_c}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.75)$$

ดังนั้นความยาวของคลื่นที่เดินทางในท่อคือ

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega_c}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.76)$$

$\lambda_0$  = ความยาวของคลื่นที่เดินทางในอากาศ

เมทริกซ์การส่งผ่าน ( Transfer Matrix ) ของสายนำสัญญาณหรือท่อนำคลื่นที่ไม่มีการสูญเสีย

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j \sin(\theta) \\ j \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

และเมื่อ

$$\theta = \beta \ell = \frac{2\pi \ell}{\lambda_g} \quad (2.78)$$

$$\theta = \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_g} \quad (2.79)$$

$\lambda_{g0}$  คือความยาวของคลื่นที่ได้สัดส่วนกับความยาว  $\ell$  ของท่อนำคลื่น

$$\ell = \frac{\lambda_{g0}}{2} \quad (2.80)$$

จากรูปที่ (2.12) เราสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์การส่งผ่าน วงจรสมมูลของของฉากกั้นที่แทนด้วยค่าอินดักทีฟ (Shunt Inductive Iris) ได้คือ

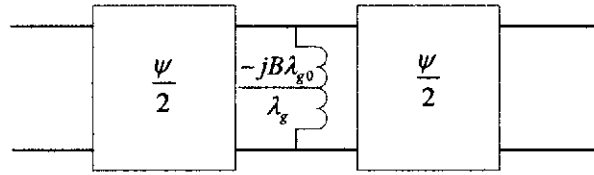
$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jB\lambda_{g0} & 1 \\ \lambda_{g0} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

$B$  = ค่าชัพเพตแดนซ์ของฉากกั้นที่ได้จากการทดลองซึ่งหาจากกราฟการทดลอง

เมื่อนำเอาวงจรสมมูลของฉากกั้นที่แทนด้วยค่าอินดักทีฟนำมาวางไว้ในท่อนำคลื่นที่มีความยาวทางไฟฟ้าเป็น  $\mathcal{W}$  ดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi = \frac{\psi_0 \lambda_{g0}}{\lambda_g} \quad (2.82)$$



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของฉากรัดที่วางในท่อนำคลื่น

เขียนเมตริกซ์การส่งผ่าน ของช่วงของท่อนำคลื่นใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi/2) & j\sin(\psi/2) \\ j\sin(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jB\lambda_{g0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) & j\sin(\psi/2) \\ j\sin(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi/2) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin(\psi/2) & j\sin(\psi/2) \\ j\sin(\psi/2) - \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \cos(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) & j\sin(\psi/2) \\ j\sin(\psi/2) & \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2(\psi/2) - \sin^2(\psi/2) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin(\psi/2) \cos(\psi/2) & j[2\cos(\psi/2)\sin(\psi/2) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin^2(\psi/2)] \\ j[2\cos(\psi/2)\sin(\psi/2) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \cos^2(\psi/2)] & \cos^2(\psi/2) - \sin^2(\psi/2) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin(\psi/2) \cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin(\psi) & j \left[ \sin(\psi) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin^2(\psi/2) \right] \\ j \left[ \sin(\psi) - \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \cos^2(\psi/2) \right] & \cos(\psi) + \frac{B\lambda_g}{2\lambda_{g0}} \sin(\psi) \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

พิจารณาจากอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์จะเขียนแทนด้วยเมตริกซ์การส่งผ่านของแอดมิแดนซ์อินเวอร์เตอร์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-j\lambda_{g0}}{k\lambda_g} \\ \frac{-jk\lambda_g}{\lambda_{g0}} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

$k$  = คุณสมบัติเชิงแอดมิแตนซ์

เมื่อ  $\lambda_{g0} = \lambda_g$  นำสมการที่ (2.86) เท่ากับสมการที่ (2.87) จะได้ว่า

$$\cos(\psi) + \frac{B\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin(\psi) = 0 \quad (2.88)$$

เพราะฉะนั้น

$$\psi_0 = -\tan^{-1}\left(\frac{2}{B}\right) \quad (2.89)$$

จากการเท่ากันของเมตริกซ์การส่งผ่านของแอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์ และเมตริกซ์การส่งผ่านของค่าอินดักทีฟของผนังกันนำมาวางไว้ในท่อนำคลื่นที่มีความยาวทางไฟฟ้าเป็น  $\psi$  เราจะได้ค่า

$$k - \frac{1}{k} = B \left[ \sin^2(\psi/2) + \cos^2(\psi/2) \right] = B \quad (2.90)$$

ซึ่งเท่ากับ

$$\frac{1}{K'} - K' = B \quad (2.91)$$

$B$  = ซัพเซพแตนซ์ (Susceptance) ของค่าผนังกันที่ทำตัวเป็นอินดักทีฟ

จากสมการในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ต่ำแบบเซพทีเรียฟ

$$|S_{12}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2(\omega)} \quad (2.92)$$

จากการประมาณค่าผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ผ่าน  $\omega = \pm 1$  ที่  $f_1$  และ  $f_2$  จะเป็นช่วงพาสแบนด์ ของคลื่นนอกเหนือจากนั้น  $|S_{12}(j\omega)|^2$  จะมีค่าลดลงตามค่าของฟังก์ชันของ  $T_N^2(\omega)$

ประมาณค่าให้

$$\omega = \alpha \frac{\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi\lambda_{g0}}{\lambda_g}\right) \quad (2.93)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นเมตริกซ์การส่งผ่าน ของตัวกรองความถี่ผ่านคือ

$$|S_{12}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2[\alpha(\lambda_g / \lambda_{g0}) \sin(\pi(\lambda_{g0} / \lambda_g))]} \quad (2.94)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเชฟฟีเชฟในการประมาณค่าฟังก์ชัน

$$T_N(\omega) = 2\omega T_{N-1}(\omega) - T_{N-2}(\omega) \quad N \geq 2 \quad (2.95)$$

ค่าเริ่มต้น

$$T_0(\omega) = 1 \quad T_1(\omega) = \omega \quad (2.96)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนช่วงของท่อนำคลื่นหรือประมารเป็นออเคอร์ของตัวกรองความถี่ จากต้นแบบตัวกรองความถี่ค่าช่วงความถี่ผ่านที่  $\omega = \pm 1$  ค่าเมกนิจูดจะสูงสุดเพราะฉะนั้น

$$\alpha \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) = 1 \quad (2.97)$$

$$\alpha \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g2}}\right) = -1 \quad (2.98)$$

ดังนั้น

$$\alpha \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) + \alpha \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g2}}\right) = 0 \quad (2.99)$$

เราแก้สมการด้วยเทคนิคของ Newton-Raphson Technique

$$F(\lambda_{g0}) = \lambda_{g1} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) + \lambda_{g2} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g2}}\right) \quad (2.100)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์

$$F'(\lambda_{g0}) = \pi \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) + \pi \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g2}}\right) \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการรวมกับการประมาณค่าเริ่มต้นของ  $\lambda_{g0}$  จะได้

$$\lambda_{g0} \approx \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} \quad (2.102)$$

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} + \frac{F(\lambda_{g0})}{F'(\lambda_{g0})} \quad (2.103)$$

จะได้  $\lambda_{g0}$

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\lambda_{g1} \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g2}}{2 \lambda_{g1}}\right) + \lambda_{g2} \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g1}}{2 \lambda_{g2}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \lambda_{g2}}{2 \lambda_{g1}}\right) + \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g1}}{2 \lambda_{g2}}\right)} \right] \quad (2.104)$$

จากสมการที่ (2.68) จะได้ค่า  $\alpha$

$$\alpha \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) = 1 \quad (2.105)$$

$$\alpha = \left[ \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}}\right) \right]^{-1} \quad (2.106)$$

ตัวกรองความถี่ผ่านนั้นสร้างมาจากท่อนำคลื่นที่มีความยาวเป็นช่วงๆ เพราะฉะนั้นเราสามารถแสดงให้อยู่ในรูปอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วง ได้เป็น

$$K'_{r,r+1} = \frac{k_{r,r+1}}{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}} \quad (2.107)$$

$$k_{r,r+1} = \frac{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]^{1/2}}{\eta} \quad (2.108)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right] \quad (2.109)$$

เมื่อ  $K'_{r,r+1}$  คืออิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วง

เมื่อ  $k_{r,r+1}$  คือแอดมิแตนซ์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วง

เมื่อ  $Z_r$  คืออิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปภายในของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วง

ประมาณค่า  $Z_r$  ได้เป็น

$$Z_r = \frac{2\alpha \sin \left[ \frac{(2r-1)\pi}{2N} \right]}{\eta} - \frac{1}{4\eta\alpha} \left\{ \frac{\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)}{\sin[(2r-1)\pi/2N]} + \frac{\eta^2 + \sin^2[(r-1)\pi/N]}{\sin[(2r-3)\pi/2N]} \right\} \quad (2.110)$$

เมื่อให้  $Z_0 = Z_{N+1} = 1$

จากค่าความถี่ตัดอยู่ที่  $f_1, f_2$  ค่า  $\varepsilon$  ได้จากการกำหนดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่เราต้องการเมื่อ  $N$  คือจำนวนช่วงของท่อนำคลื่นหรือประมาณเป็นออร์เดอร์ของตัวกรองความถี่ที่เราหาได้จากสมการการสูญเสียย้อนกลับ

$$L_A = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \varepsilon^2 T_N^2 \left[ \alpha \frac{\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin \left( \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \right] \right\} \quad (2.111)$$

เมื่อเราได้ค่า  $N$  ตามค่าที่เราต้องการแล้วจึงหาค่า  $K_{r,r+1}$  และ  $Z_r$  ได้จากสมการที่ (2.69) และ (2.110) จากสมการที่ (2.90) และ (2.91) ค่าซีพเซฟแดนซ์ในแต่ละฉากกั้นของแต่ละช่วงคือ

$$B_{r,r+1} = \frac{(Z_r Z_{r+1})^{1/2} K_{r,r+1}}{K_{r,r+1} (Z_r Z_{r+1})^{1/2}} \quad (2.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยาวเฟสของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วงในหน่วยเรเดียนคือ

$$\psi_r = \pi \frac{1}{2} \left[ \cot^{-1} \left( \frac{B_{r-1,r}}{2} \right) + \cot^{-1} \left( \frac{B_{r,r+1}}{2} \right) \right] \quad (2.113)$$

ค่าความยาวในทางกายภาพ

$$l_r = \frac{\psi_r \lambda g_0}{2\pi} \quad (2.114)$$



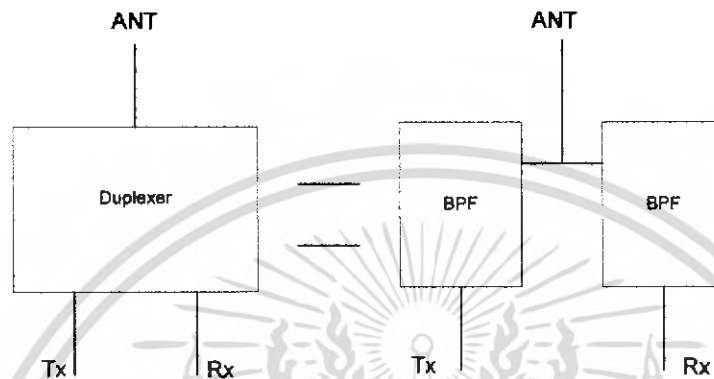
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและการสร้าง

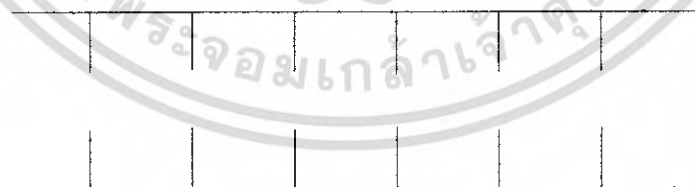
##### 3.1 ลักษณะโครงสร้างของคูเพิลเลอร์

ในการออกแบบคูเพิลเลอร์นั้นจะทำการออกแบบตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแยกกัน จากนั้นนำมาต่อเชื่อมกันให้เป็นคูเพิลเลอร์



รูปที่ 3.1 แสดงการนำพาสแบนด์สองตัวมาเชื่อมต่อกันเป็นคูเพิลเลอร์

##### 3.1.1 โครงสร้างของตัวกรองความถี่ผ่านชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายในมีผนังกัน ( Iris Wave - Guide Band-Pass Filter )



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภายในของท่อนำคลื่น

วัสดุที่นำมาใช้นั้นจะใช้ท่อทองเหลืองขนาดมาตรฐาน สูง 1 นิ้ว กว้าง 2 นิ้ว เนื่องจากท่อทองเหลืองไม่  
เป็นสนิมสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายกว่าท่อที่เป็นอะลูมิเนียม และให้การสูญเสียน้อยกว่าท่อที่เป็นเหล็ก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านชนิดที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมภายในมีผนังกัน ( Iris Waveguide Band-Pass Filter)

ในการคำนวณเราต้องกำหนดค่าต่างๆ ของตัวกรองความถี่ผ่านคือ ค่าการลดทอนการส่งผ่าน  $L_A$  ค่าการลดทอนการสะท้อน  $L_R$  ค่าความถี่ตัดที่ช่วงความถี่ผ่าน  $f_{p1}, f_{p2}$  และค่าความถี่ตัดในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการ  $f_{s1}, f_{s2}$  ค่านี้จะสัมพันธ์กับค่า  $L_a$

#### 3.2.1 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านช่วงความถี่ 4.35 GHz – 4.45 GHz

กำหนดค่าความถี่ตัดที่ช่วงความถี่ผ่าน  $f_{p1}, f_{p2} = 4.35 \text{ GHz}, 4.45 \text{ GHz}$  ค่าความถี่กลาง = 4.44 GHz กำหนดค่าการลดทอนการส่งผ่าน  $L_a \geq 80 \text{ dB}$  ที่ 4.25 GHz, 4.55 GHz กำหนดค่าการลดทอนการสะท้อน  $L_R \geq 20 \text{ dB}$  โดยใช้โปรแกรม Mathcad ในการคำนวณจากสมการที่(2.47) คำนวณหา

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\left[1 - \left(\frac{f_c}{f_o}\right)^2\right]^{0.5}}$$

$$\lambda_{o1} = \frac{c}{f_1} \quad \lambda_{o2} = \frac{c}{f_2}$$

$$\lambda_{g1} = \frac{\lambda_{o1}}{\left[1 - \left(\frac{f_c}{f_1}\right)^2\right]^{0.5}}$$

$$\lambda_{g2} = \frac{\lambda_{o2}}{\left[1 - \left(\frac{f_c}{f_2}\right)^2\right]^{0.5}}$$

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2} + 1}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\lambda_{g1} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g1}}\right) + \lambda_{g2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g2}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g1}}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g2}}\right)} \right]$$

จะได้ค่าต่างๆ คือ

$$\lambda_{o1} = 0.06897 \quad \lambda_{o2} = 0.06742 \quad \lambda_{g0} = 0.09798 \quad \lambda_{g1} = 0.10028 \quad \lambda_{g2} = 0.09568$$

กำหนดค่าการลดทอนการสะท้อน  $L_R = 20 \text{ dB}$  คำนวณหาค่าการกระเพื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = \left[ 10 \left( \frac{L_R}{10} \right) - 1 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon = 0.1005$$

คำนวณหาจำนวนอันดับ  $N$  จากสมการที่ (2.33)

$$T_N(\omega) = 2\omega T_{N-1}(\omega) - T_{N-2}(\omega) \quad N \geq 2$$

ค่าเริ่มต้น

$$T_0(\omega) = 1 \quad T_1(\omega) = \omega$$

ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเชพพิเชฟในการประมาณค่าฟังก์ชัน

$$T_2(\omega) = 2\omega^2 - 1$$

$$T_3(\omega) = 4\omega^3 - 3\omega$$

$$T_4(\omega) = 8\omega^4 - 8\omega^2 + 1$$

$$T_5(\omega) = 16\omega^5 - 20\omega^3 + 5\omega$$

$$T_6(\omega) = 32\omega^6 - 48\omega^4 + 18\omega^2 - 1$$

$$T_7(\omega) = 64\omega^7 - 112\omega^5 + 56\omega^3 - 7\omega$$

จากสมการการสูญเสียย้อนกลับ

$$L_A = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \varepsilon^2 T_N^2 \left[ \alpha \frac{\lambda g}{\lambda g_0} \sin\left( \frac{\pi \lambda g_0}{\lambda g} \right) \right] \right\}$$

หรือใช้สูตรการประมาณ อันดับ  $N$  ของเชพพิเชฟ

กำหนด  $L_A \geq 80$  dB  $L_R \geq 20$  dB

$$N \geq \frac{L_A + L_R + 6}{20 \log_{10} \left[ S + (s^2 - 1)^{1/2} \right]}$$

ประมาณค่า

$N=7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S คือ ช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการหาค่าความถี่ผ่าน ( Stop Band / Pass Band ), S=3  
จากในบทที่ 2 จำนวนหาค่าต่างๆ

$$Z_r = \frac{2\alpha \sin \left[ \frac{(2r-1)\pi}{2N} \right]}{\eta} - \frac{1}{4\eta\alpha} \left\{ \frac{\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)}{\sin[(2r-1)\pi/2N]} + \frac{\eta^2 + \sin^2[(r-1)\pi/N]}{\sin[(2r-3)\pi/2N]} \right\}$$

กำหนดให้  $Z_0=Z_8=1$

$$Z_1=11.37703 \quad Z_7=11.37703$$

$$Z_2=31.72009 \quad Z_6=31.72009$$

$$Z_3=45.90007 \quad Z_4=50.95294$$

$$Z_5=45.90007$$

$$k_{r,r+1} = \frac{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]^{1/2}}{\eta}$$

$$k_{0,1} = 1$$

$$k_{7,8} = 1$$

$$k_{1,2} = 1.28993$$

$$k_{6,7} = 1.28993$$

$$k_{2,3} = 1.77644$$

$$k_{5,6} = 1.77644$$

$$k_{3,4} = 2.08617$$

$$k_{4,5} = 2.08617$$

ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละฉากกันของแต่ละช่วงคือ

$$B_{r,r+1} = \frac{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}{k_{r,r+1}} = \frac{k_{r,r+1}}{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}$$

$$B_{0,1} = 3.07651 \quad B_{7,8} = 3.07651$$

$$B_{1,2} = 14.65911 \quad B_{6,7} = 14.65911$$

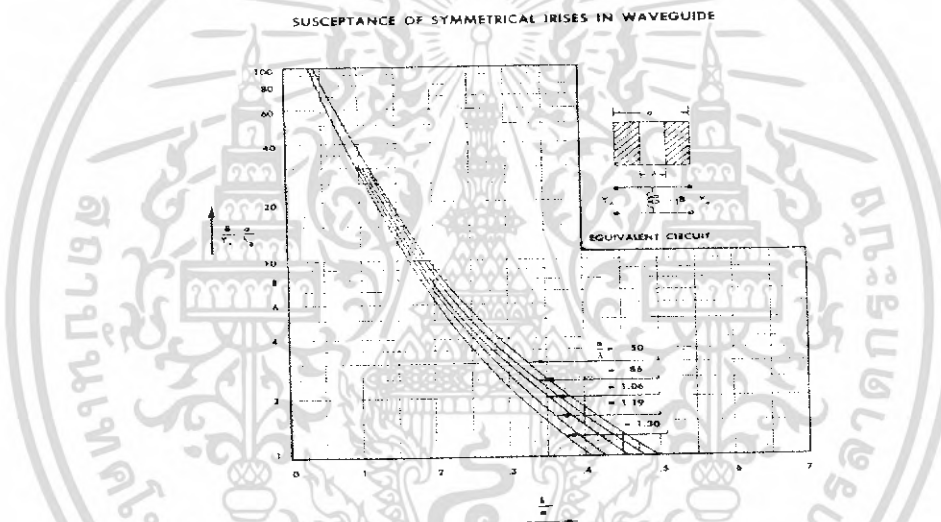
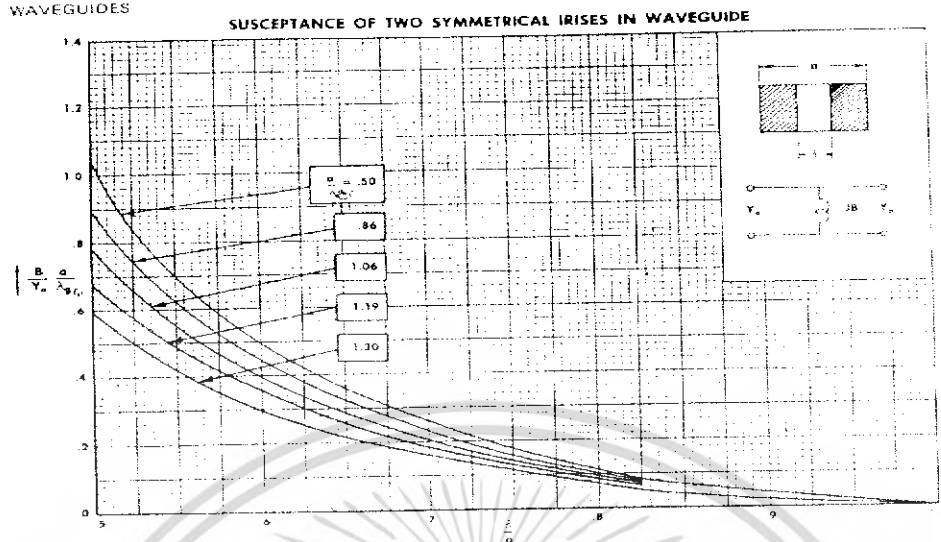
$$B_{2,3} = 21.43286 \quad B_{5,6} = 21.43286$$

$$B_{3,4} = 23.13837 \quad B_{4,5} = 23.13837$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละฉากกันนำมาหาขนาดของช่องว่างจากกราฟการทดลองตามรูปที่ (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## WAVEGUIDES



Reprinted from Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory Report No. 43, Feb. 1944. Prepared under contract with the Office of Scientific Research and Development.

รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีพแตนซ์กับผนังกัน

จากรูปกราฟ จะได้ความกว้างของผนังกัน

ช่องที่ 1 = ช่องที่ 8 = 2.042 เซนติเมตร

ช่องที่ 2 = ช่องที่ 7 = 1.068 เซนติเมตร

ช่องที่ 3 = ช่องที่ 6 = 0.902 เซนติเมตร

ช่องที่ 4 = ช่องที่ 5 = 0.855 เซนติเมตร

ค่าความยาวเฟสของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วงในหน่วย เรเดียน คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi_r = \pi - \frac{1}{2} \left[ \cot^{-1} \left( \frac{B_{r-1,r}}{2} \right) + \cot^{-1} \left( \frac{B_{r,r+1}}{2} \right) \right]$$

$$\psi_1 = 2.78558 \quad \psi_7 = 2.78558$$

$$\psi_2 = 3.02727 \quad \psi_6 = 3.02727$$

$$\psi_5 = 3.05196 \quad \psi_5 = 3.05196$$

$$\psi_4 = 3.05537$$

ค่าความยาวในทางกายภาพของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วง

$$l_r = \frac{\psi_r \lambda_{g0}}{2\pi}$$

$$L_1 = 0.04344 \quad L_7 = 0.04344$$

$$L_2 = 0.04721 \quad L_6 = 0.04721$$

$$L_3 = 0.04759 \quad L_5 = 0.04759$$

$$L_4 = 0.04765$$

### 3.2.2 การคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านช่วงความถี่ 4.65 GHz – 4.75 GHz

กำหนดค่าความถี่ตัดที่ช่วงความถี่ผ่าน  $f_{p1}, f_{p2} = 4.65 \text{ GHz}, 4.75 \text{ GHz}$  ค่าความถี่กลาง = 4.7 GHz กำหนดค่าการลดการส่งผ่าน  $L_d = 80 \text{ dB}$  ที่ 4.55 GHz, 4.85 GHz กำหนดค่าการลดทอนการสะท้อน  $L_R \geq 20 \text{ dB}$  ใช้โปรแกรม MATHCAD ในการคำนวณ จากสมการที่ (2.47) คำนวณหา

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\left[ 1 - \left( \frac{f_c}{f_o} \right)^2 \right]^{0.5}}$$

$$\lambda_{o1} = \frac{c}{f_1} \quad \lambda_{o2} = \frac{c}{f_2}$$

$$\lambda_{g1} = \frac{\lambda_{o1}}{\left[ 1 - \left( \frac{f_c}{f_1} \right)^2 \right]^{0.5}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{g2} = \frac{\lambda_{02}}{\left[1 - \left(\frac{f_c}{f_2}\right)^2\right]^{0.5}}$$

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\lambda_{g1} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g1}}\right) + \lambda_{g2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g2}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g2}}{\lambda_{g1}}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g2}}\right)} \right]$$

จะได้ค่าต่างๆ คือ

$$\lambda_{01} = 0.06452 \quad \lambda_{02} = 0.06316 \quad \lambda_{g0} = 0.08622 \quad \lambda_{g1} = 0.08789 \quad \lambda_{g2} = 0.08455$$

กำหนดค่าการลดทอนการสะท้อน  $L_R = 20$  dB กำหนดค่าการกระเพื่อม

$$\epsilon = \left[ 10^{\left(\frac{L_R}{10}\right)} - 1 \right]^{-0.5}$$

$$\epsilon = 0.1005$$

กำหนดหาจำนวนอันดับ  $N$  จากสมการที่ (2.33)

$$T_N(\omega) = 2\omega T_{N-1}(\omega) - T_{N-2}(\omega) \quad N \geq 2$$

ค่าเริ่มต้น

$$T_0(\omega) = 1 \quad T_1(\omega) = \omega$$

ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเรขาคณิตในการประมาณค่าฟังก์ชัน

$$T_2(\omega) = 2\omega^2 - 1$$

$$T_3(\omega) = 4\omega^3 - 3\omega$$

$$T_4(\omega) = 8\omega^4 - 8\omega^2 + 1$$

$$T_5(\omega) = 16\omega^5 - 20\omega^3 + 5\omega$$

$$T_6(\omega) = 32\omega^6 - 48\omega^4 + 18\omega^2 - 1$$

$$T_7(\omega) = 64\omega^7 - 112\omega^5 + 56\omega^3 - 7\omega$$

จากสมการการสูญเสียของการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_A = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \varepsilon^2 T_N^2 \left[ \alpha \frac{\lambda_g}{\lambda_{g0}} \sin\left(\frac{\pi \lambda_g}{\lambda_{g0}}\right) \right] \right\}$$

หรือใช้สูตรการประมาณ อันดับ  $N$  ของเรทวิเชฟ

กำหนด  $L_A \geq 80$  dB  $L_R \geq 20$  dB

$$N \geq \frac{L_A + L_R + 6}{20 \log_{10} \left[ S + (S^2 - 1)^{1/2} \right]}$$

ประมาณค่า

$N=7$

$S$  คือ ช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการหาค่าด้วยความถี่ผ่าน (Stop Band / Pass Band),  $S=3$

จากในบทที่ 2 คำนวณหาค่าต่างๆ

$$Z_r = \frac{2\alpha \sin \left[ \frac{(2r-1)\pi}{2N} \right]}{\eta} - \frac{1}{4\eta\alpha} \left\{ \frac{\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)}{\sin[(2r-1)\pi/2N]} + \frac{\eta^2 + \sin^2[(r-1)\pi/N]}{\sin[(2r-3)\pi/2N]} \right\}$$

$$\eta = \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right]$$

$$\eta = 0.53249$$

ให้  $Z_0 = Z_8 = 1$

$$Z_1 = 13.73897 \quad Z_7 = 13.73897$$

$$Z_2 = 38.36527 \quad Z_6 = 38.36527$$

$$Z_3 = 55.49173 \quad Z_5 = 55.49173$$

$$Z_4 = 61.59756$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{r,r+1} = \frac{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]^{1/2}}{\eta}$$

$$\begin{aligned} k_{0,1} &= 1 & k_{7,8} &= 1 \\ k_{1,2} &= 1.28993 & k_{6,7} &= 1.28993 \\ k_{2,3} &= 1.77644 & k_{5,6} &= 1.77644 \\ k_{3,4} &= 2.08617 & k_{4,5} &= 2.08617 \end{aligned}$$

ค่าซัพเซฟแดนซ์ในแต่ละฉากกั้นของแต่ละช่วงคือ

$$B_{r,r+1} = \frac{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}{k_{r,r+1}} - \frac{k_{r,r+1}}{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}$$

$$\begin{aligned} B_{0,1} &= 3.43682 & B_{7,8} &= 3.43682 \\ B_{1,2} &= 17.74215 & B_{6,7} &= 17.74215 \\ B_{2,3} &= 25.93508 & B_{5,6} &= 25.93508 \\ B_{3,4} &= 27.98936 & B_{4,5} &= 27.98936 \end{aligned}$$

จากค่าซัพเซฟแดนซ์ในแต่ละฉากกั้นนำมาหาขนาดจากกราฟการทดลองตามรูปที่ (3.3)

$$\begin{aligned} \text{ช่องที่ 1} &= \text{ช่องที่ 8} = 1.86 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{ช่องที่ 2} &= \text{ช่องที่ 7} = 0.93 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{ช่องที่ 3} &= \text{ช่องที่ 6} = 0.7916 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{ช่องที่ 4} &= \text{ช่องที่ 5} = 0.7718 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ค่าความยาวเฟสของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วงในหน่วย เรเดียนคือ

$$\psi_r = \pi - \frac{1}{2} \left[ \cot^{-1} \left( \frac{B_{r-1,r}}{2} \right) + \cot^{-1} \left( \frac{B_{r,r+1}}{2} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 2.82195 & \psi_7 &= 2.82195 \\ \psi_2 &= 3.04698 & \psi_6 &= 3.04698 \\ \psi_3 &= 3.06744 & \psi_5 &= 3.06744 \\ \psi_4 &= 3.07026 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยาวในทางกายภาพของท่อนำคลื่นในแต่ละช่วง

$$l_r = \frac{\psi_r \lambda_g 0}{2\pi}$$

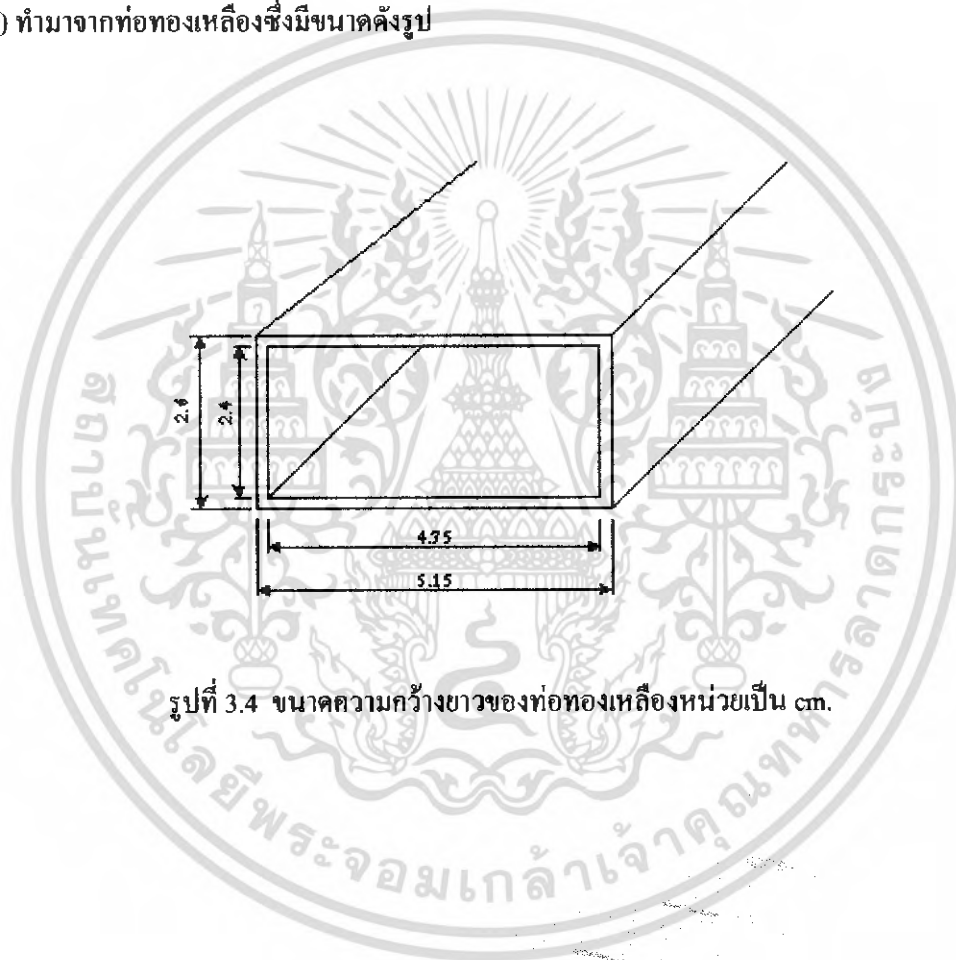
$$L_1 = 0.03872 \quad L_7 = 0.03872$$

$$L_2 = 0.04181 \quad L_6 = 0.04181$$

$$L_3 = 0.04209 \quad L_5 = 0.04209$$

$$L_4 = 0.04213$$

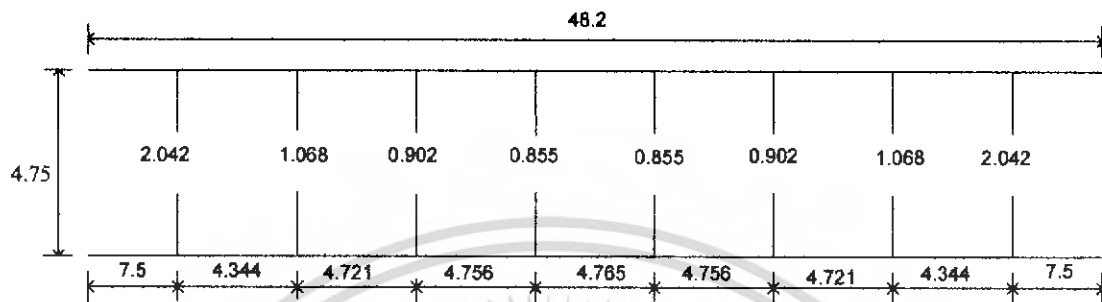
โครงสร้างของตัวกรองความถี่ผ่าน ชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายในมีผนังกัน ( Iris Waveguide Band -Pass Filter) ทำมาจากท่อทองเหลืองซึ่งมีขนาดดังรูป



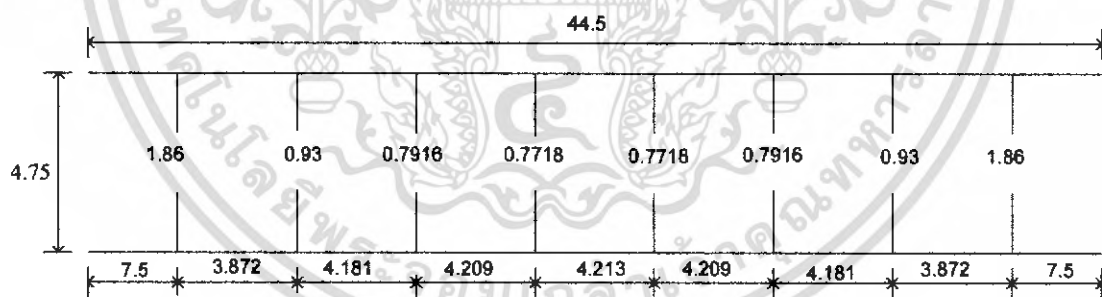
รูปที่ 3.4 ขนาดความกว้างยาวของท่อทองเหลืองหน่วยเป็น cm.

### รูปที่ 3.5 แสดง โครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.35-4.45 GHz  
หน่วยวัดเป็น cm.

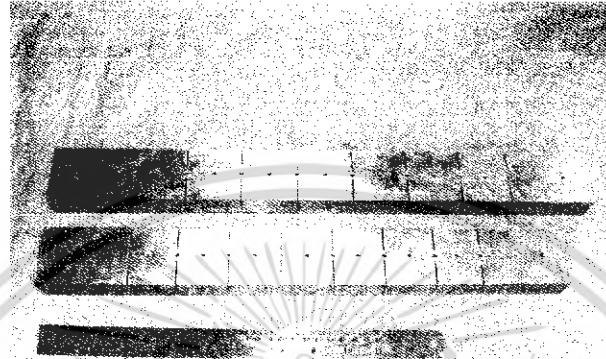


รูปที่ 3.7 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.65-4.75 GHz  
หน่วยวัดเป็น cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การสร้าง

ในการดำเนินงานในการสร้างนั้นเราจะนำค่าที่ได้จากการออกแบบนั้นมาทำการกำหนดค่าต่างๆ เพื่อทำการ wire cut ท่อทองเหลืองให้ได้ขนาดตามที่กำหนด จากนั้นก็นำท่อทองเหลืองที่ได้นี้มาทำการเจาะรูที่ตำแหน่งระหว่าง cavity และตรงช่องที่มีการส่งผ่าน เพื่อทำการใส่ screw และตำแหน่งในการที่จะใส่โพลบ ดังรูปที่ 3.8



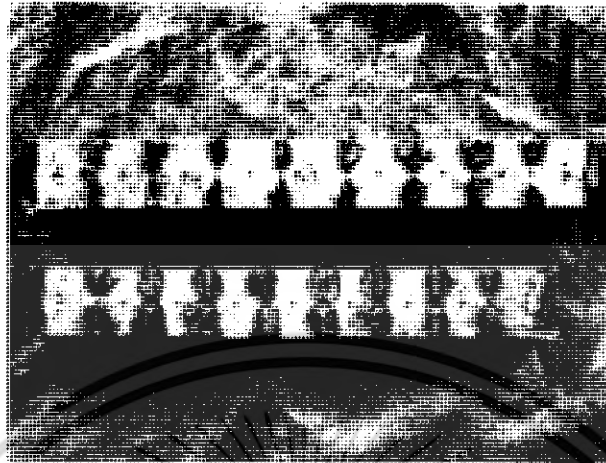
รูปที่ 3.8 ท่อทองเหลืองที่ทำการ wire cut และ เจาะรูเรียบร้อยแล้ว

จากนั้นจะนำแผ่นทองเหลืองที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร มาทำการตัดให้เป็นแผ่นเล็กๆ ขนาดกว้าง 2.5 เซนติเมตร และยาว 3 เซนติเมตร เพื่อจะเสียบเข้าไปตรงที่ทำการ wire cut ไว้จนครบทุกช่อง

รูปที่ 3.9 ท่อที่ทำการเสียบแผ่นทองเหลืองแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นก็ทำการเชื่อมปิดรอยให้สนิทด้วยตะกั่วพร้อมทั้งทำการปิดปากท่อทั้งสองด้านให้สนิทด้วยเช่นกัน เมื่อเสร็จจากขั้นตอนนี้ก็จะเป็นกระบวนการที่สำคัญมากนั่นก็คือการฉนวนให้ได้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ตามที่เราต้องการ และยอมรับได้ต่อไป



รูปที่ 3.10 ท่อทองเหลืองที่เสร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์

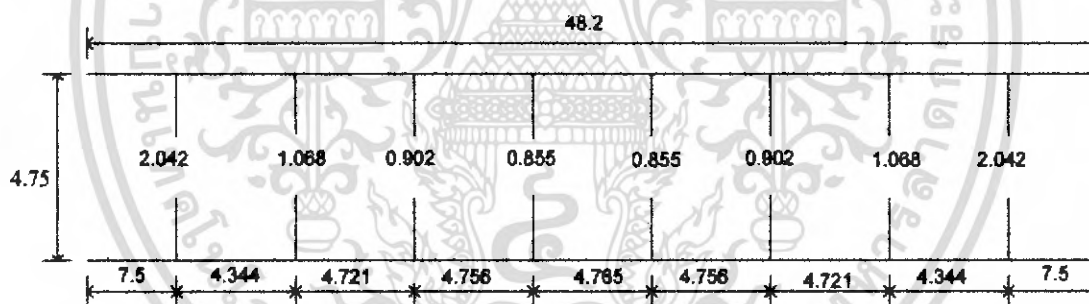
### 4.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์ จะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า รุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST ช่วยในการวิเคราะห์ หาโครงสร้างของคูเพล็กซ์เซอร์ ที่ทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์ ที่ดีที่สุด เช่น คุณลักษณะของฟังก์ชันการลดทอนส่งผ่านคือค่า  $S_{12}$  (Insertion Loss) และค่าของฟังก์ชันการลดทอนการสะท้อน  $S_{11}$  (Return Loss) การใช้วิธีวิเคราะห์ หาโครงสร้างที่ดีที่สุดนี้เพื่อประมาณค่าโครงสร้างให้ได้ตามค่าที่เรากำหนด

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์ อาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จะแยกกันคำนวณตัวกรองความถี่ผ่านแบบท่อนำคลื่นในแต่ละย่านความถี่เมื่อได้คุณสมบัติตามต้องการ แล้วจึงนำมาเชื่อมต่อกันในทางปฏิบัติ

#### 4.1.1 โครงสร้างในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.35-4.45 GHz

วัสดุที่นำมาใช้นั้นเป็นท่อทองเหลืองขนาดภายนอกกว้าง 5.15 เซนติเมตร สูง 2.6 เซนติเมตร ยาวประมาณ 48.2 เซนติเมตรความถี่คัตที่ 2.9126 GHz

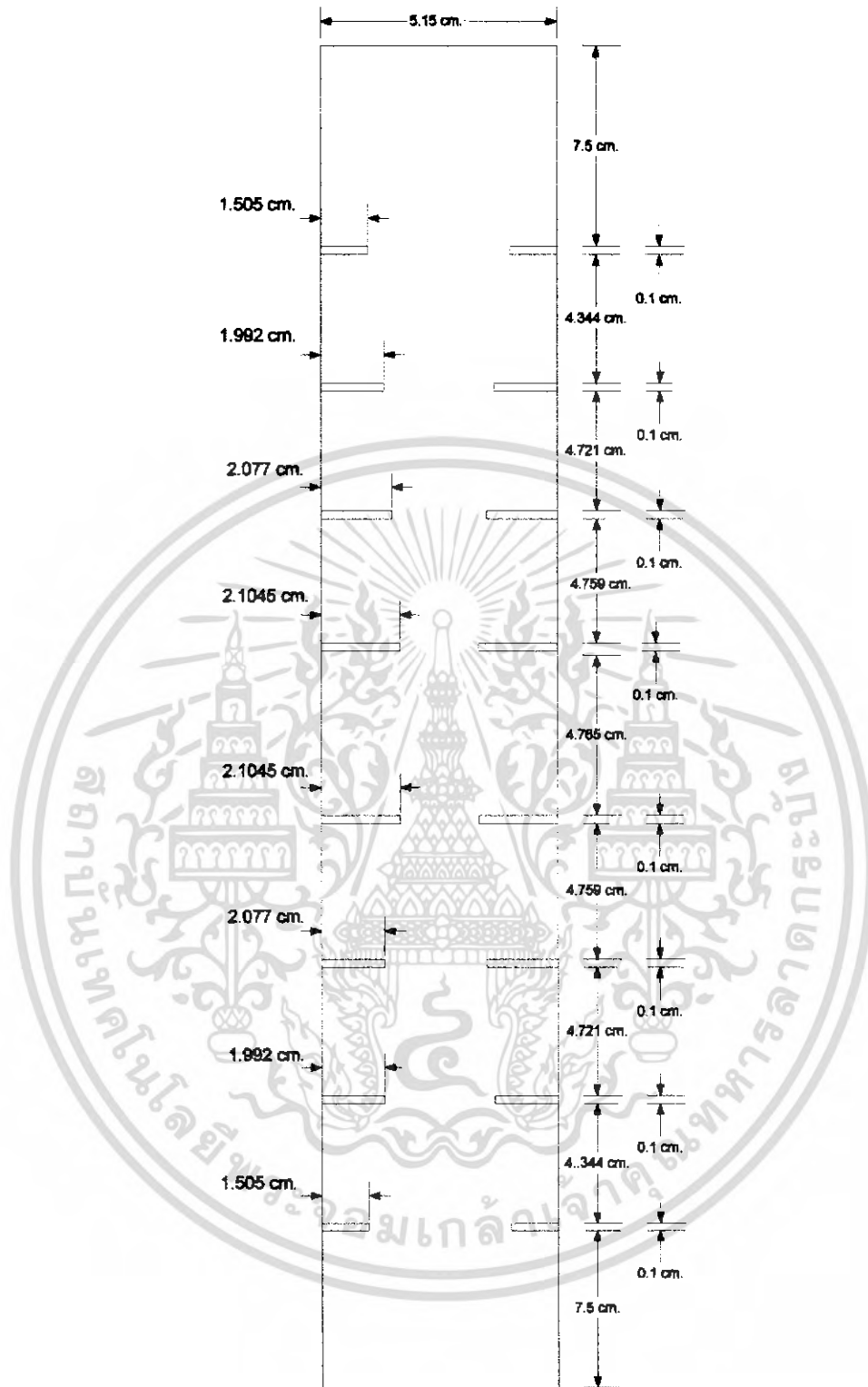


รูปที่ 4.1 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่คัตที่ 4.35-4.45 GHz หน่วยเป็น cm.



#### รูปที่ 4.2 แสดง โครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

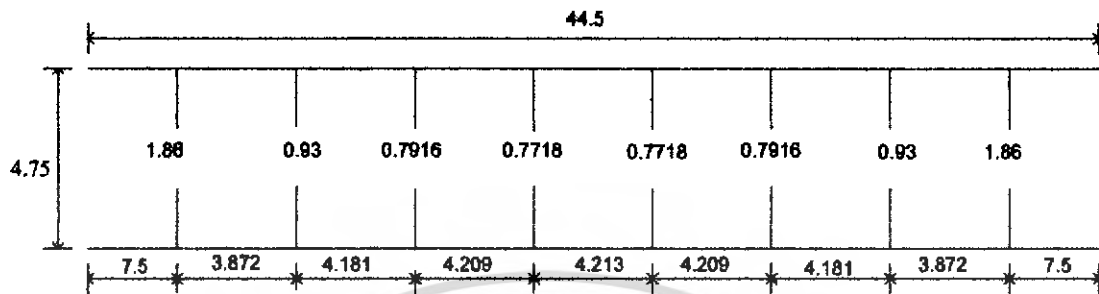


รูปที่ 4.3 ขนาดของโครงสร้างด้านบนย่าน 4.35-4.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 โครงสร้างในการวิเคราะห์ตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.65 - 4.75 GHz

วัสดุที่นำมาใช้นั้นเป็นท่อทองเหลืองขนาดภายนอกกว้าง 5.15 เซนติเมตร สูง 2.6 เซนติเมตร ยาวประมาณ 44.5 เซนติเมตรความถี่ตัดที่ 2.9126 GHz

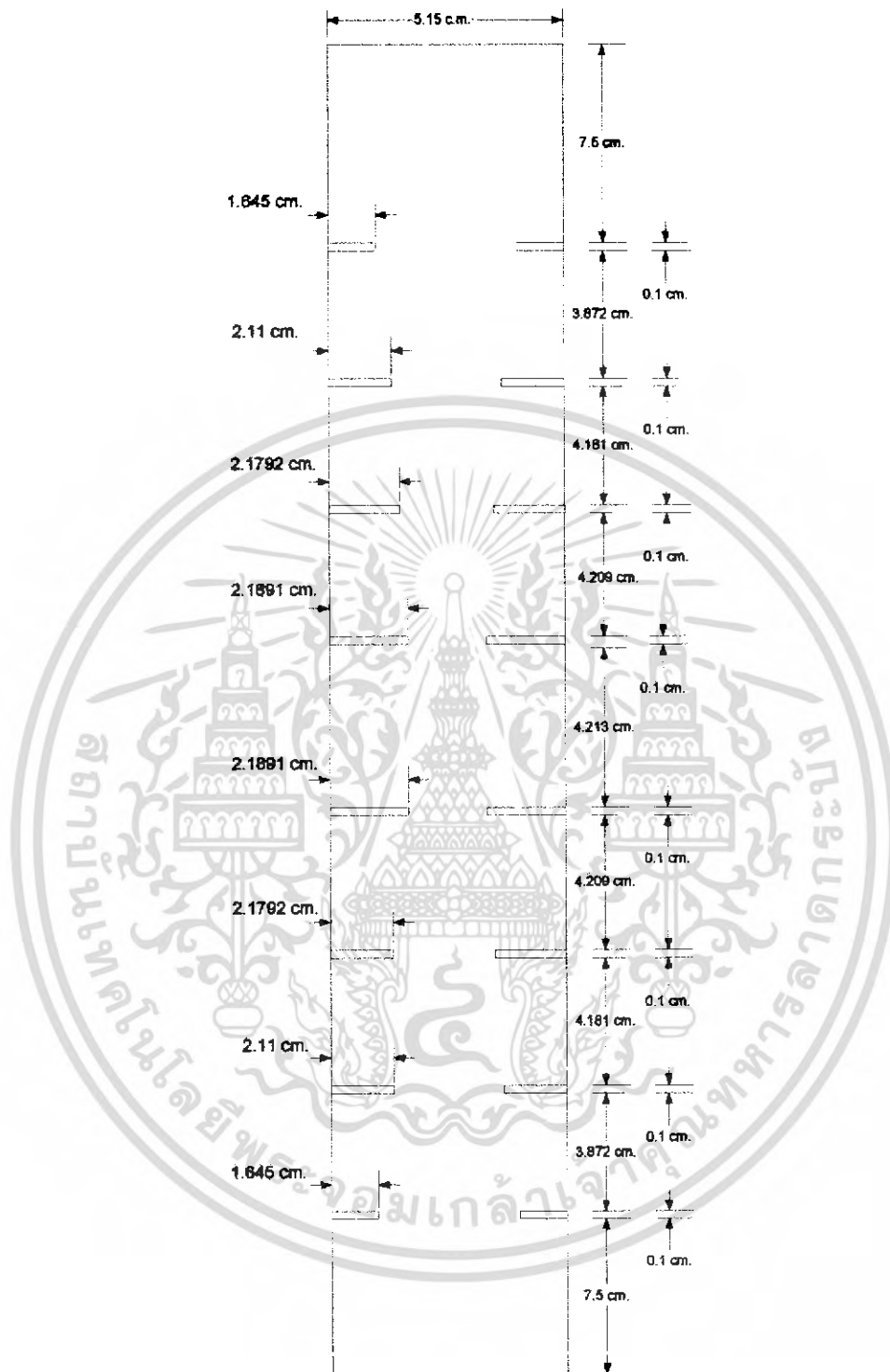


รูปที่ 4.4 ขนาดระยะห่างต่างๆ ภายในท่อทองเหลืองที่มีความถี่ตัดที่ 4.65-4.75 GHz หน่วยเป็น cm.



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างภายในของท่อทองเหลืองแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



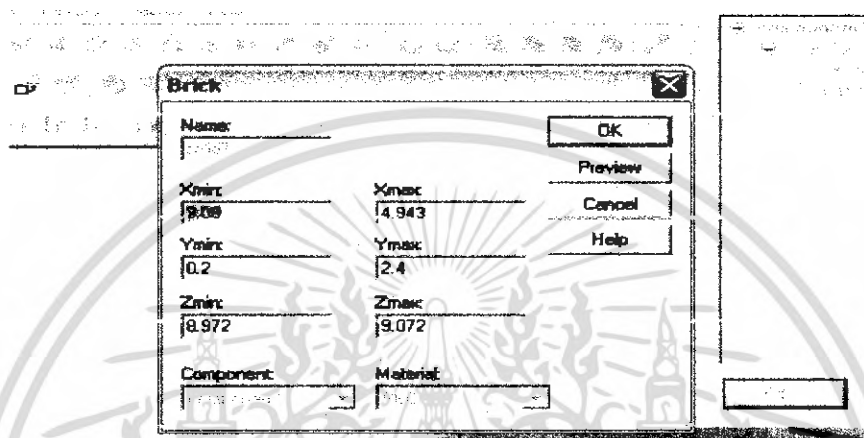
รูปที่ 4.6 ขนาดของโครงสร้างด้านบนของท่อ 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวิเคราะห์ห้วงลักษณะต่าง ๆ ของคูพลิกเซอร์ โดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave studio version 5) หรือ CST

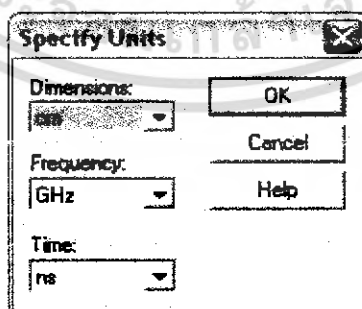
### 4.2.1 การจำลองโครงสร้างของโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ CST

ทำการกำหนดพิกัดต่างๆของแบบจำลองโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานที่เป็นสี่เหลี่ยมแบบต่างๆ มาต่อเชื่อมกันตามรูปให้ได้โครงสร้างที่เป็นรูปแบบตามต้องการ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การกำหนดโครงสร้างของวงฟโคคัลเตอร์

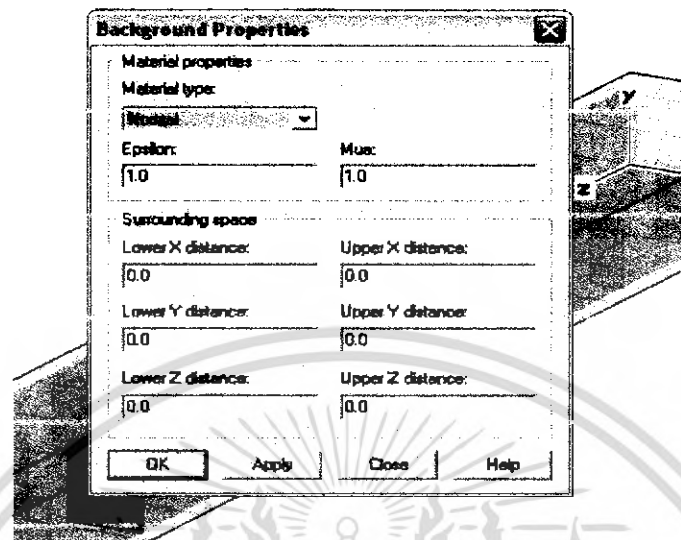
ทำการกำหนดหน่วยการวัดเป็นเซนติเมตรดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การกำหนดหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร

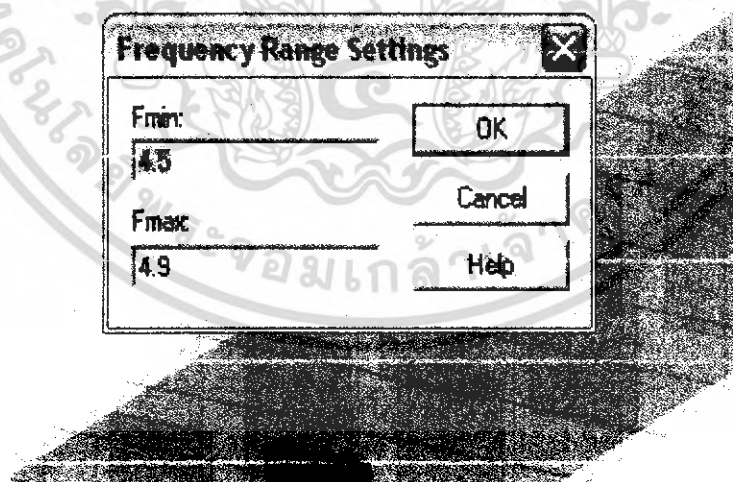
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคุณสมบัติของพื้นหลังดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์

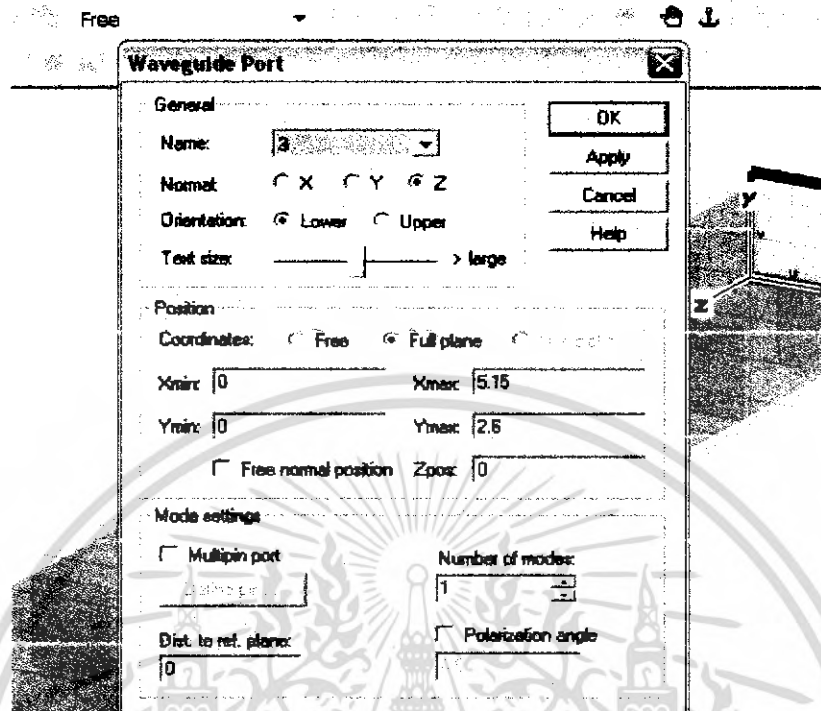
กำหนดช่วงความถี่ที่ทำการป้อนให้แบบจำลองดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับตัวกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดช่องทางการป้อนสัญญาณดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



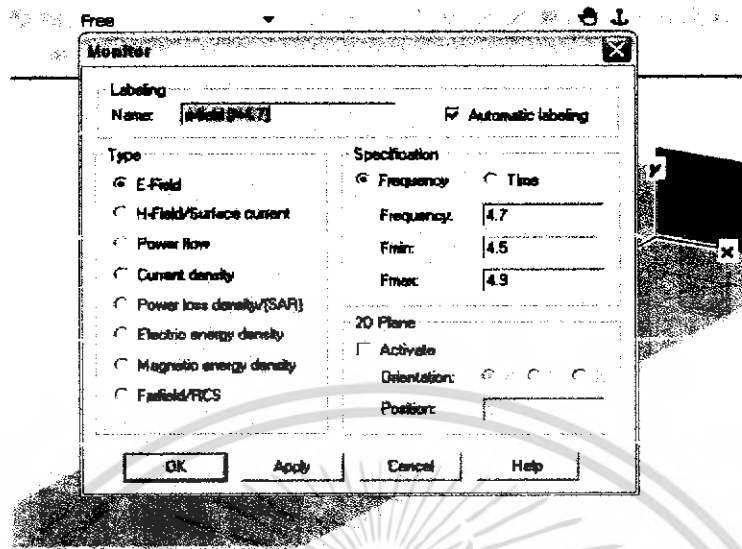
รูปที่ 4.11 กำหนดช่องทางการป้อนคลื่น



รูปที่ 4.12 กำหนดช่องทางที่ 1 และ 2

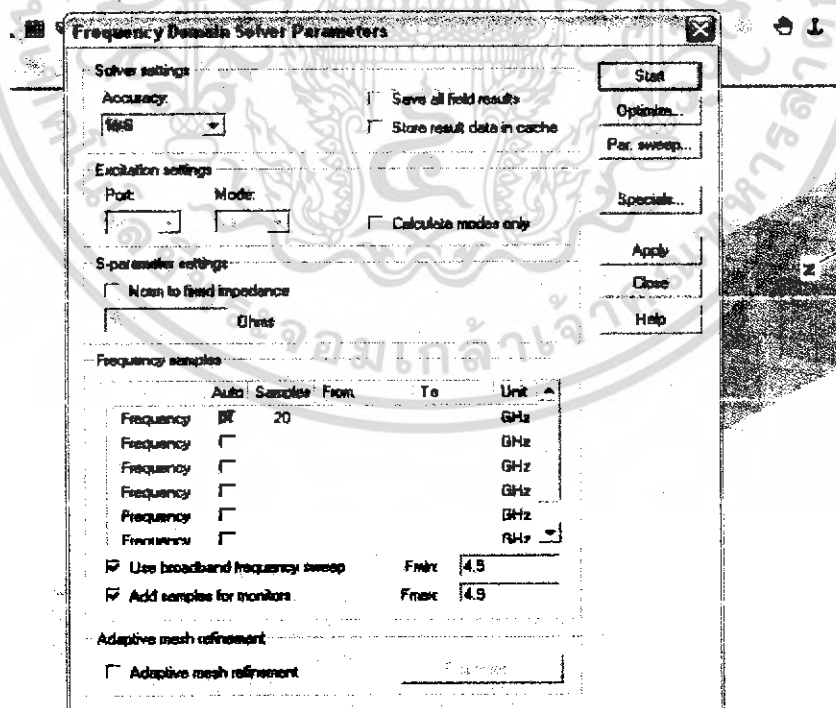
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดความถี่ที่เราต้องการดูลักษณะของสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กำหนดความถี่ที่เราต้องการดูลักษณะของสนามไฟฟ้า

ทำการวิเคราะห์โดยใช้ค่าถึง Frequency Domain Solver Parameter ดังรูปที่ 4.14

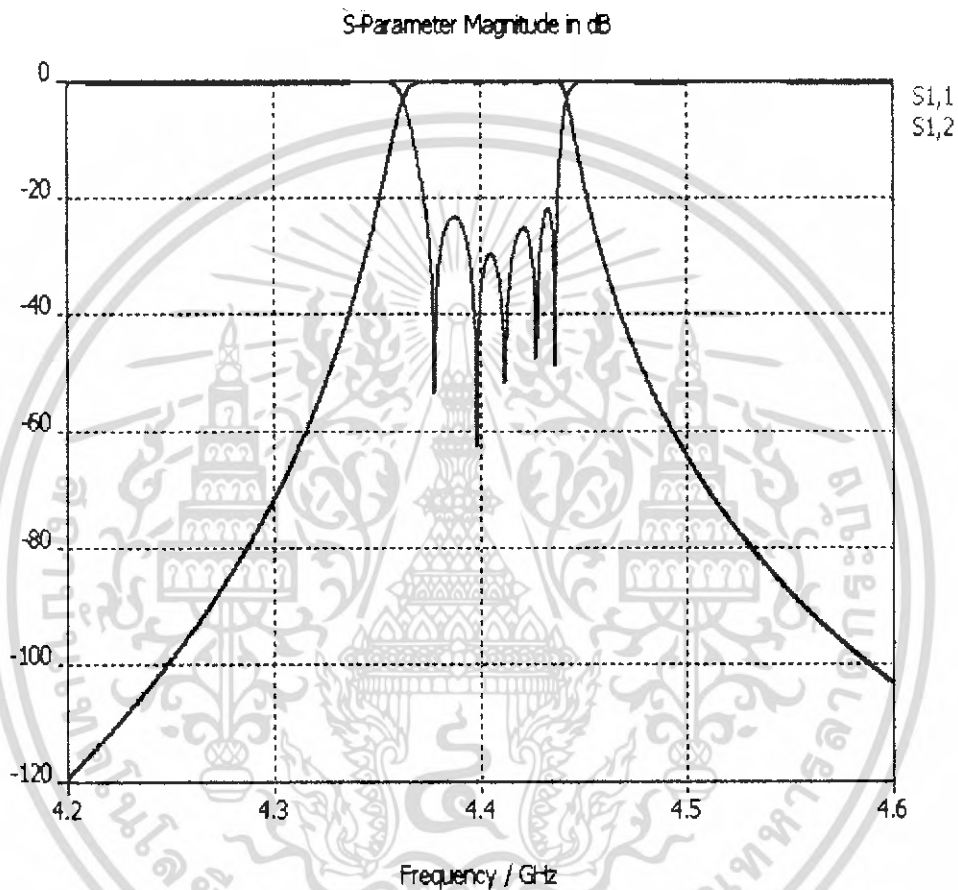


รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเวฟไกด์ฟิลด์เคอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.35-4.45 GHz

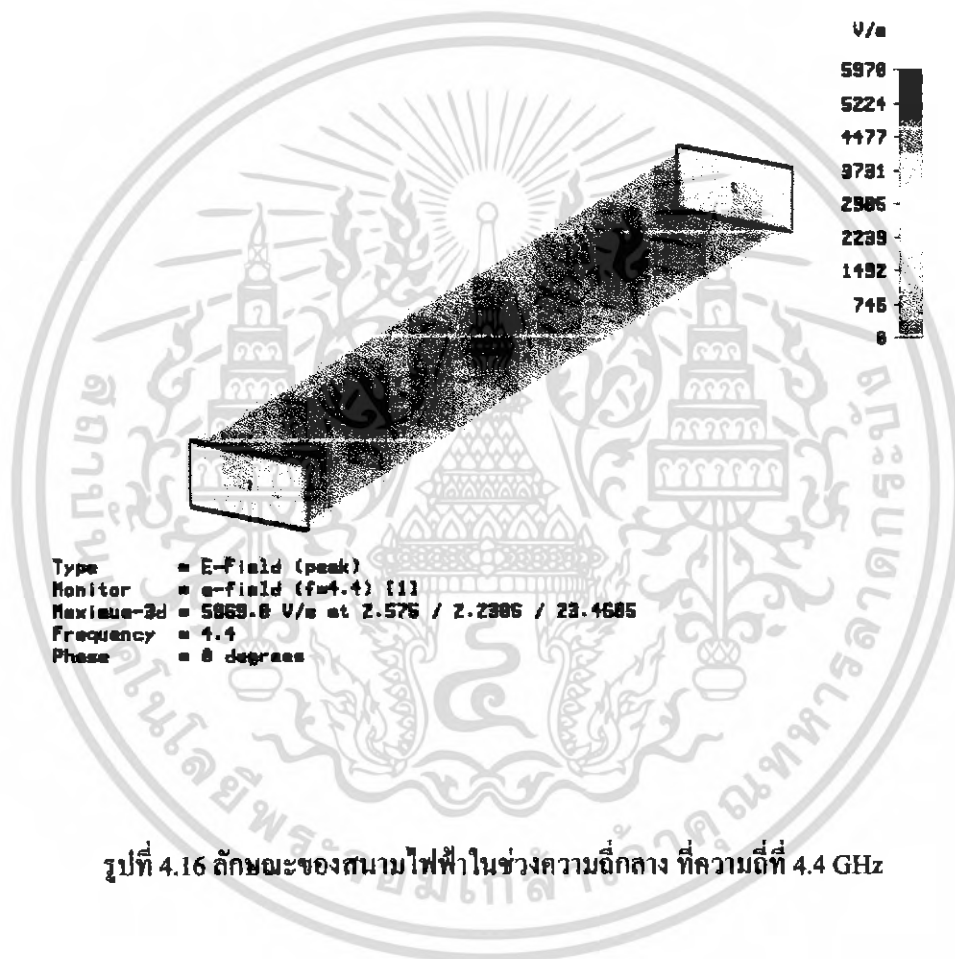
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของเวฟไกด์ฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz ของวัสดุ PEC นั้น จะอยู่ในรูปของกราฟคุณลักษณะ โดยจะดูกราฟคุณลักษณะของค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ( Return Loss ) และ  $S_{12}$  ( Insertion Loss ) หน่วยเป็น dB เพื่อให้ได้คุณสมบัติของฟิลต์เตอร์ตามต้องการดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  ของวัสดุ PEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

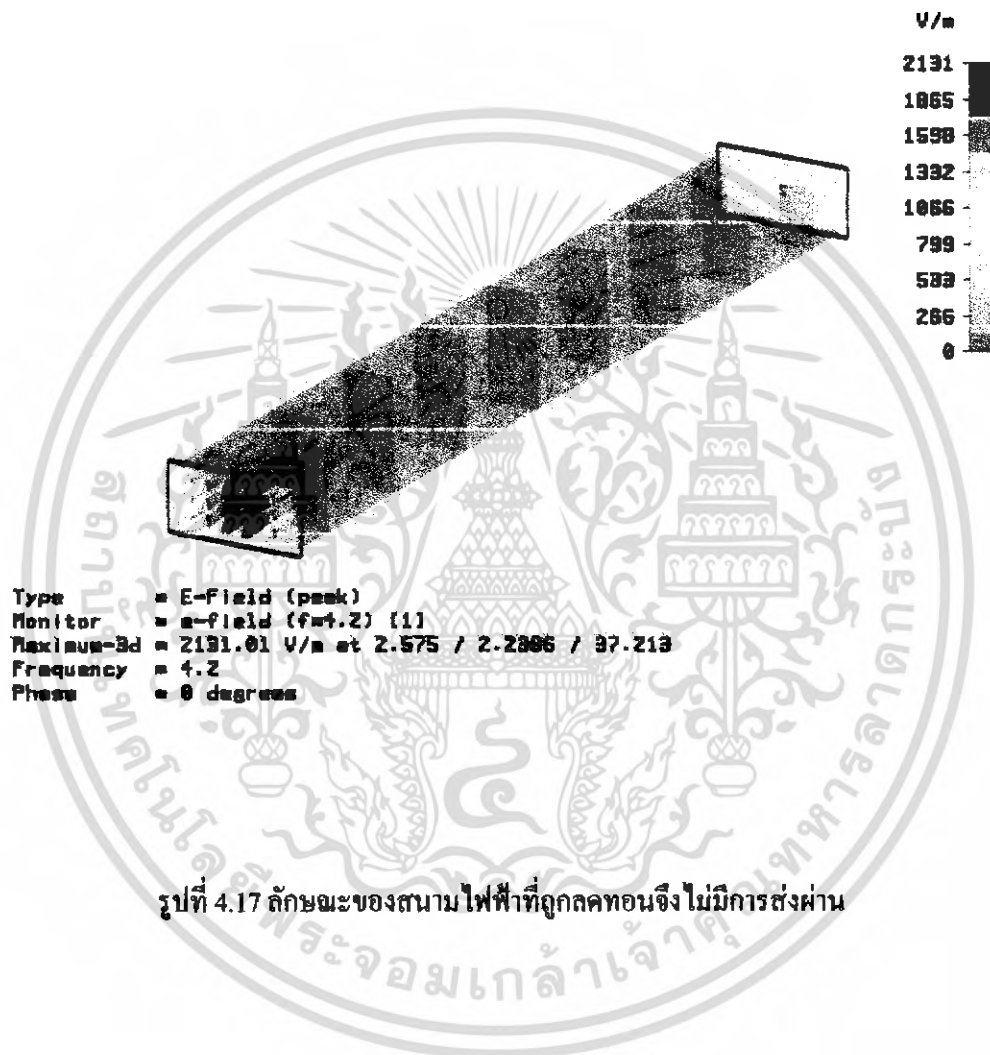
จากรูปที่ 4.15 เป็นผลที่ได้จากการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปซึ่งทำให้ได้กราฟคุณลักษณะของการลดทอนย้อนกลับ และการส่งผ่านของสัญญาณ ซึ่งต่อมาเราจะทำการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เราใช้ในการทดสอบ ในตอนแรกเมื่อเราทำการป้อนความถี่ที่เป็นความถี่ตัด ที่เราได้ทำการออกแบบ พาสแบนด์ ที่ค่าความถี่ 4.4 GHz ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้ามีการส่งผ่านไปโดยที่มีการลดทอนน้อยมาก



รูปที่ 4.16 ลักษณะของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง ที่ความถี่ที่ 4.4 GHz

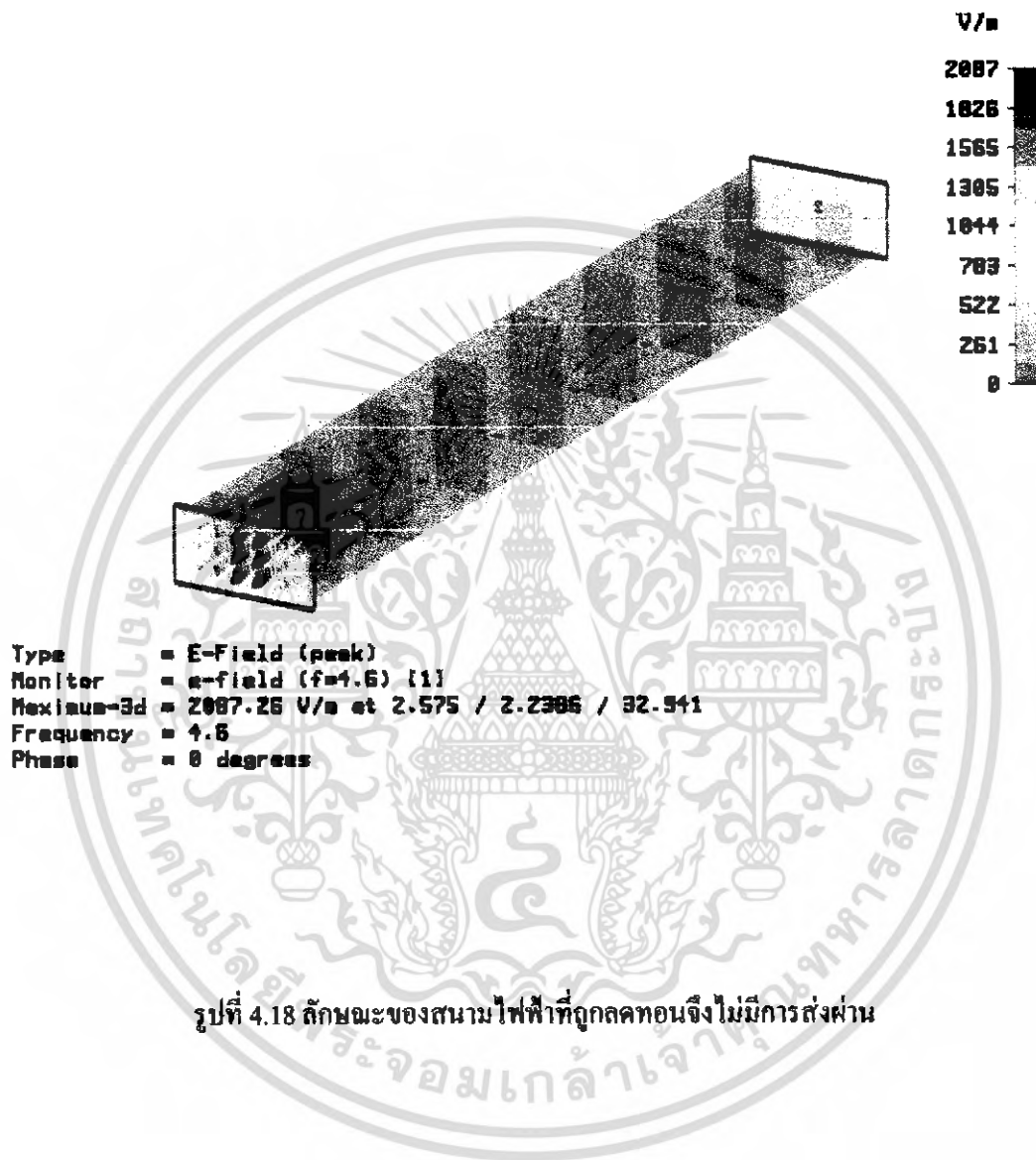
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าของความถี่เป็น 4.2 GHz ซึ่งน้อยกว่าค่าความถี่กลางที่เราได้ทำการออกแบบจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้านั้นถูกกักตุนไปหมดจึงไม่มีการส่งผ่านเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าของความถี่เป็น 4.6 GHz ซึ่งมากกว่าค่าความถี่กลางที่เราได้ทำการออกแบบ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่นั่นถูกลดทอนไปหมดเช่นกันจึงไม่มีการส่งผ่านของสัญญาณเกิดขึ้นเหมือนกับที่เราเปลี่ยนความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่กลาง



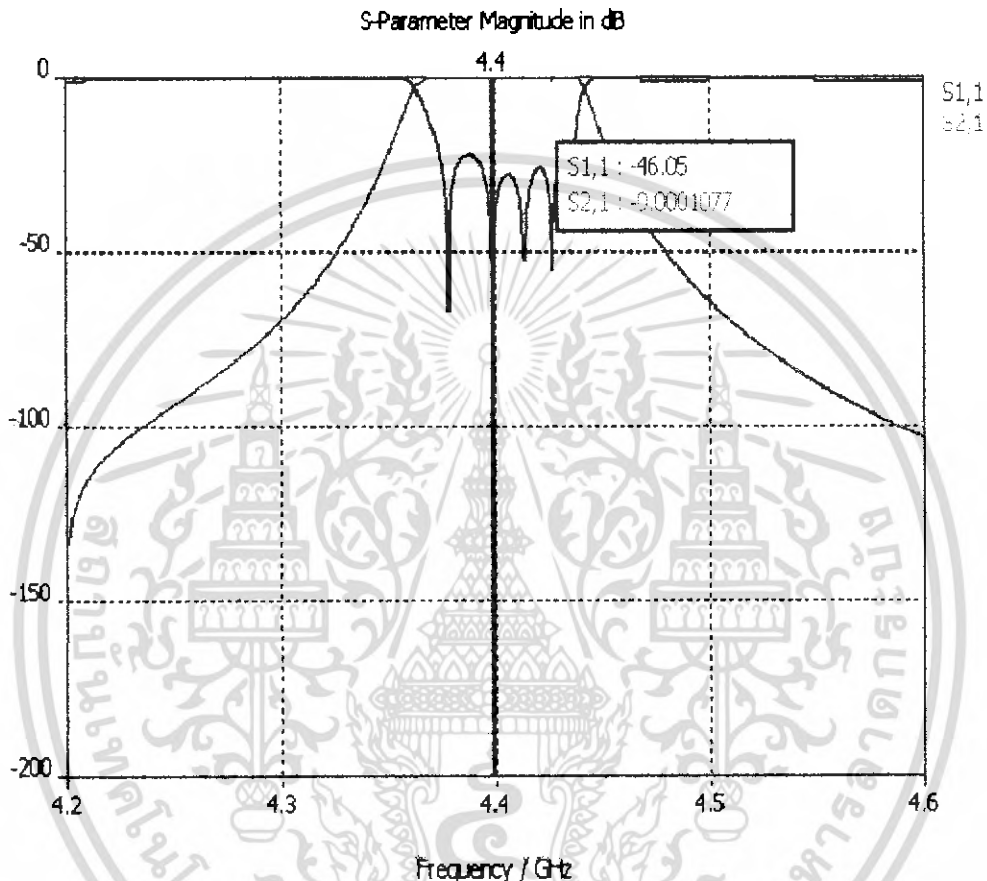
รูปที่ 4.18 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 เปลี่ยนค่าวัสดุที่กำหนดในการวิเคราะห์ของตัวกรองความถี่ย่าน 4.35-4.45 GHz

ทำการกำหนดค่าคุณสมบัติของตัวนำชนิดต่างๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อดูผลของอัตราลดทอนการส่งผ่าน

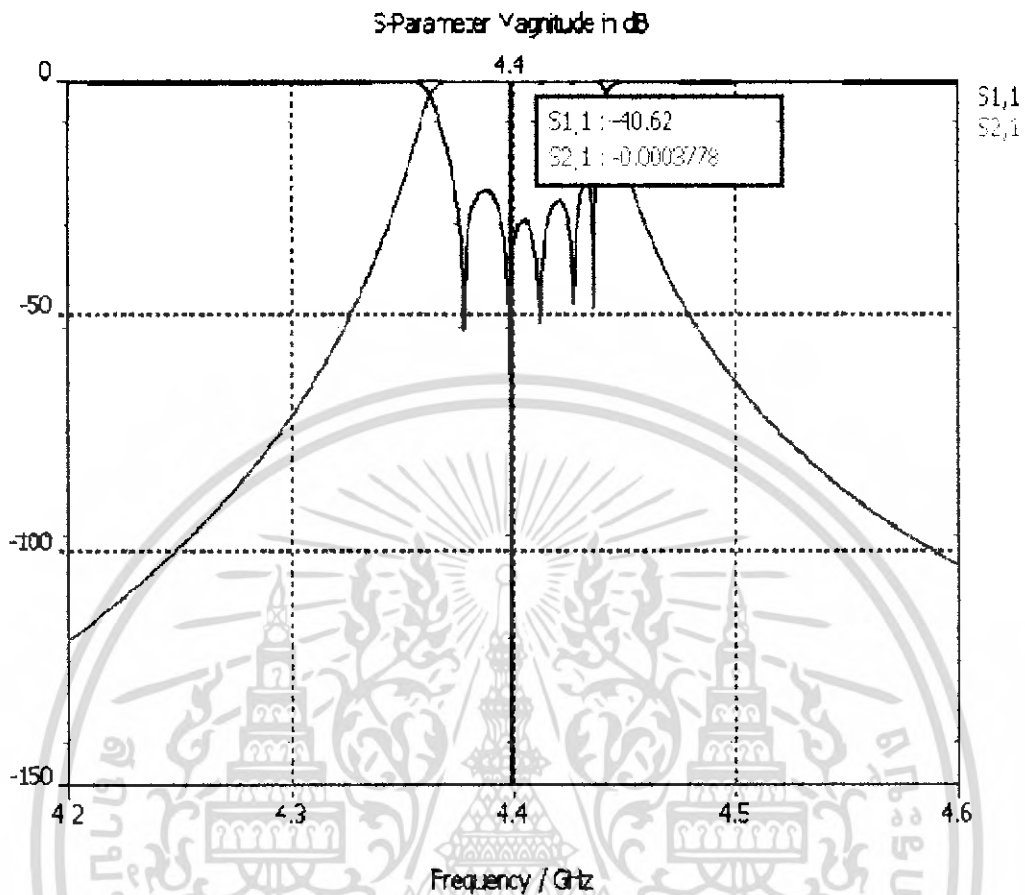
เมื่อกำหนดค่าความนำ (Conductivity) เป็นเงิน (Silver) ซึ่งมีค่า  $6.17 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.19 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{21}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นเงินของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

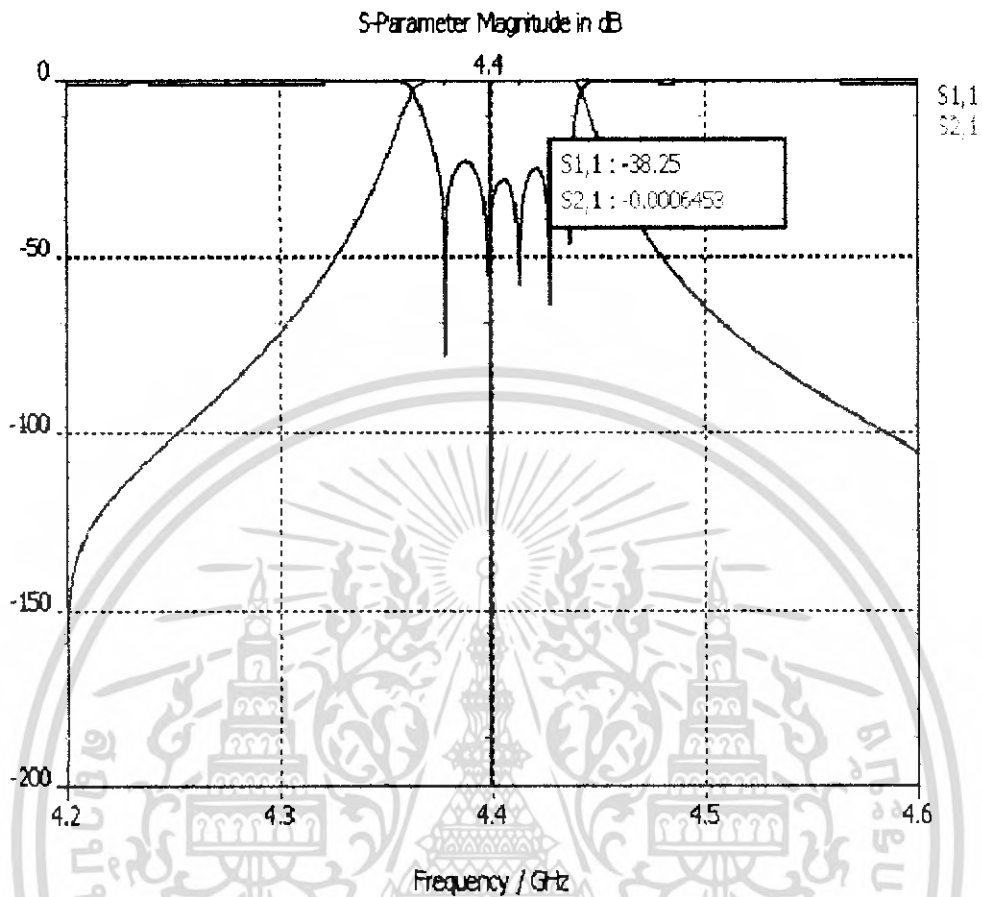
เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นทองแดง (Copper) ซึ่งมีค่า  $5.80 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.20 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองแดง  
ของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

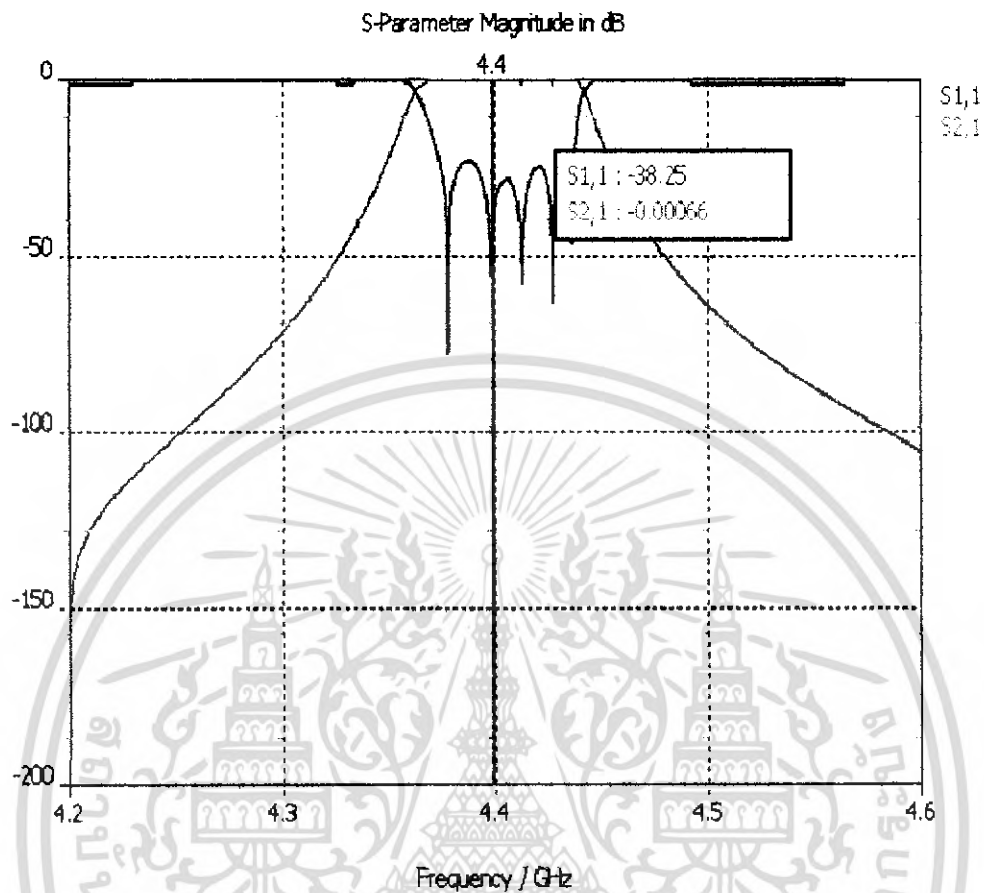
เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นอลูมิเนียม (Aluminum) ซึ่งมีค่า  $3.72 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.21 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นอลูมิเนียม  
ของฟิลต์เตอร์บ้าน 4.35-4.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นทองเหลือง (Brass) ซึ่งมีค่า  $1.57 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.22 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองเหลือง  
ของฟิลต์เดออร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางสรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวนำในการวิเคราะห์

ชนิดของตัวนำ	ค่าความนำ (S/m)	Insertion Loss (dB)	Return Loss (dB)
เงิน	$6.17 \times 10^7$	-0.0001077	-46.05
ทองแดง	$5.80 \times 10^7$	-0.0003778	-40.62
อลูมิเนียม	$3.72 \times 10^7$	-0.0006453	-38.25
ทองเหลือง	$1.57 \times 10^7$	-0.00066	-38.25

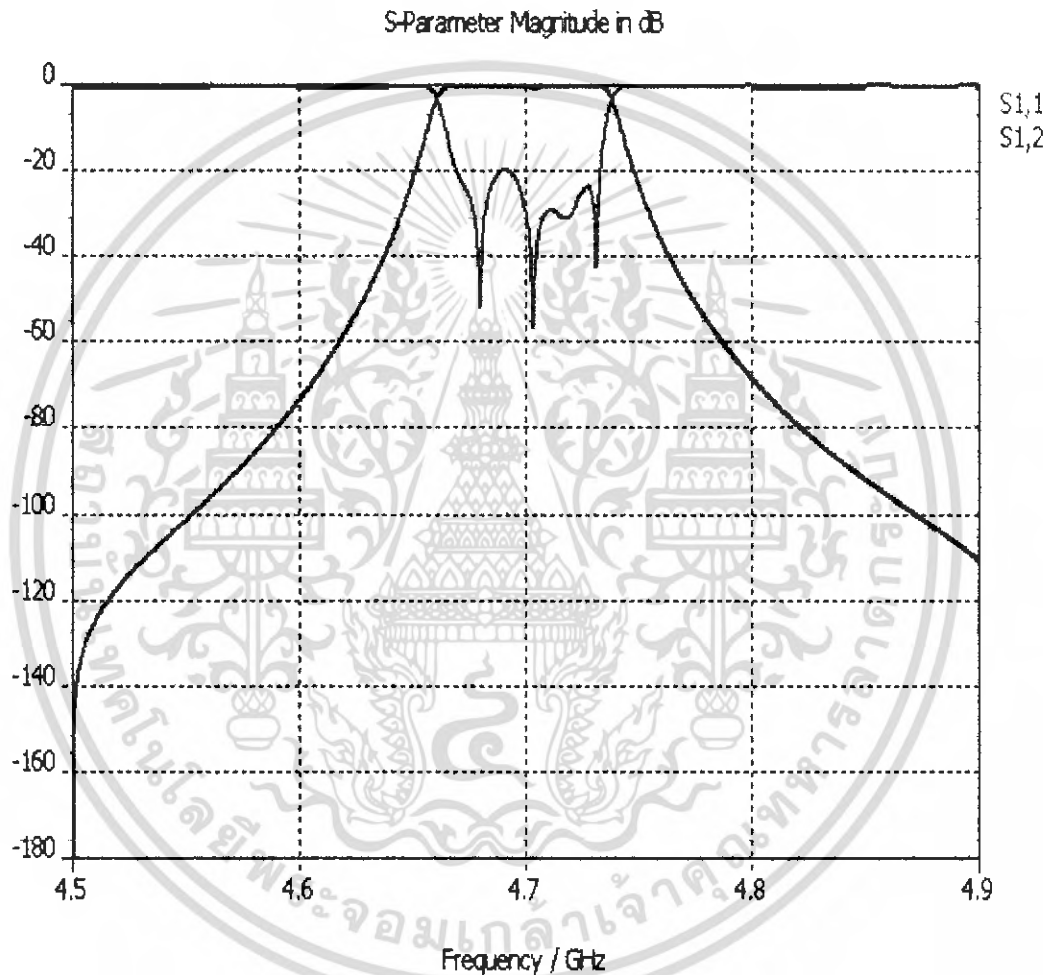
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวนำที่ความถี่กลาง 4.4 GHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์สถานะไฟฟ้าของตัวกรองความถี่ผ่านย่าน 4.65-4.75 GHz

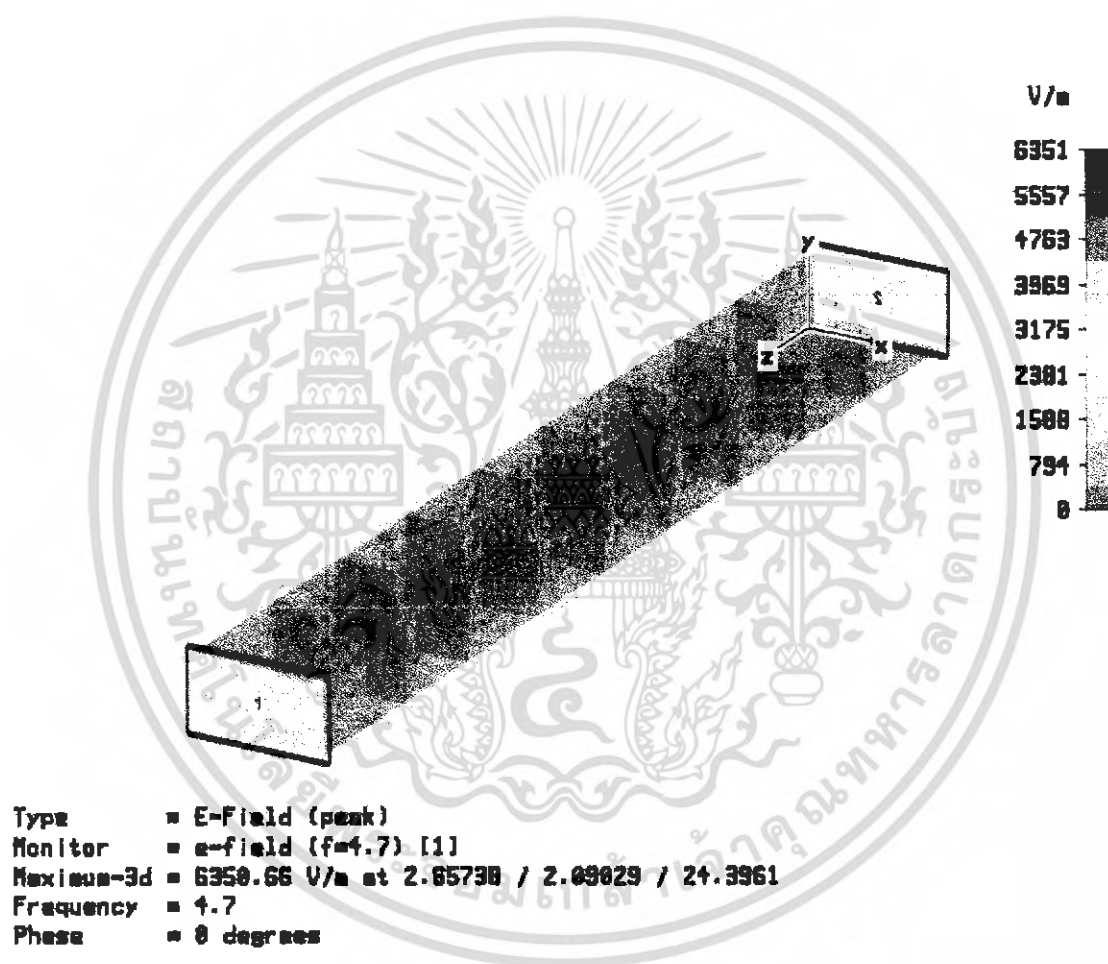
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของเวฟไกด์ฟิลต์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz ของวัสดุ PEC นั้น จะอยู่ในรูปของกราฟคุณลักษณะ โดยจะดูกราฟคุณลักษณะของค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ( Return Loss ) และ  $S_{12}$  ( Insertion Loss ) หน่วยเป็น dB เพื่อให้ได้คุณสมบัติของฟิลต์เตอร์ตามต้องการดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  ของวัสดุ PEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

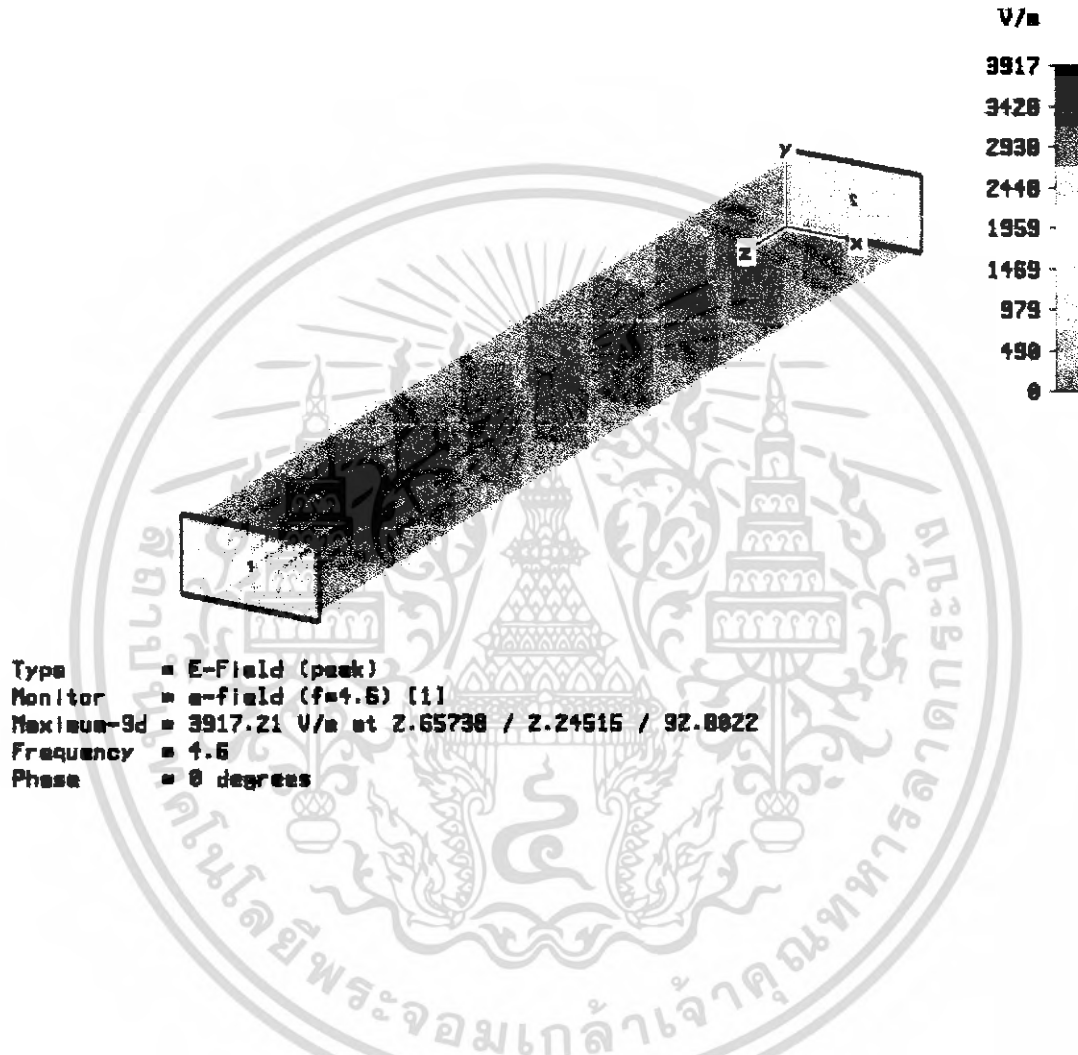
จากรูปที่ 4.23 เป็นผลที่ได้จากการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปซึ่งทำให้ได้กราฟคุณลักษณะของการลดทอนย้อนกลับซึ่งกำหนด  $L_R \geq 20dB$  การส่งผ่านของสัญญาณ  $L_A \geq 80dB$  ซึ่งต่อมาเราจะทำการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เราใช้ในการทดสอบที่ความถี่ 4.65-4.75 GHz ได้  $L_A$  ประมาณ 100 dB และ  $L_R$  ประมาณ 20 dB ในตอนแรกเมื่อเราทำการป้อนความถี่ที่เป็นความถี่ตัด ที่เราได้ทำการออกแบบ พาสแบนด์ ที่ค่าความถี่ 4.7 GHz ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้ามีการส่งผ่านไปโดยที่มีการลดทอนน้อยมาก



รูปที่ 4.24 ลักษณะของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง ที่ความถี่ 4.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

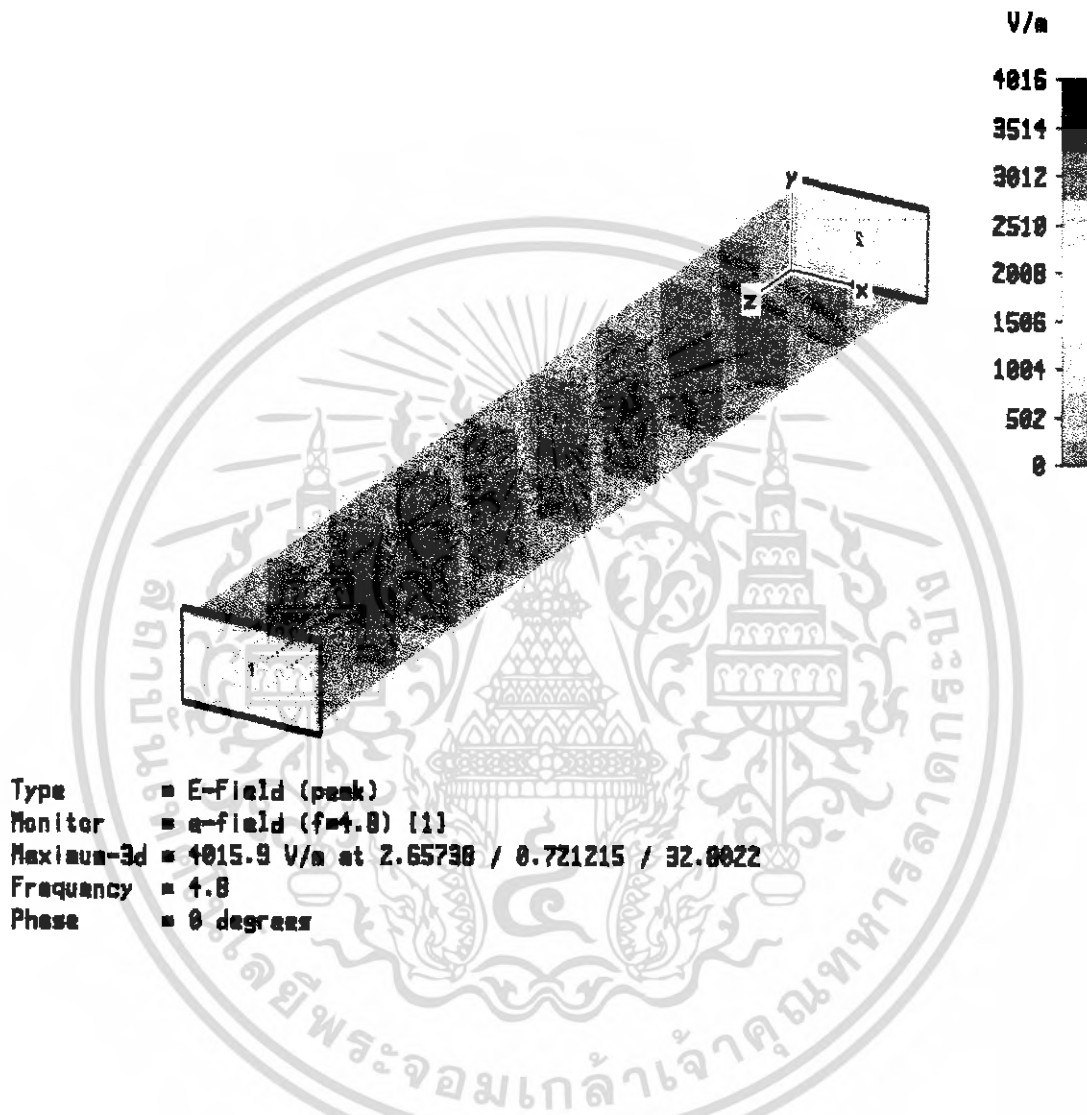
เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าของความถี่เป็น 4.6 GHz ซึ่งน้อยกว่าค่าความถี่กลางที่เราได้ทำการออกแบบจะแสดงให้เห็นคังรูปที่ 4.25 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่นั้นถูกกลทอนไปหมดจึงไม่มีการส่งผ่านเกิดขึ้น



รูปที่ 4.25 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกกลทอนจึงไม่มีการส่งผ่านที่ความถี่ 4.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าของความถี่เป็น 4.8 GHz ซึ่งมากกว่าค่าความถี่กลางที่เราได้ทำการออกแบบจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ถูกลดทอนไปหมดเช่นกันจึงไม่มีการส่งผ่านของสัญญาณเกิดขึ้นเหมือนกับที่เราป้อนความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่กลาง



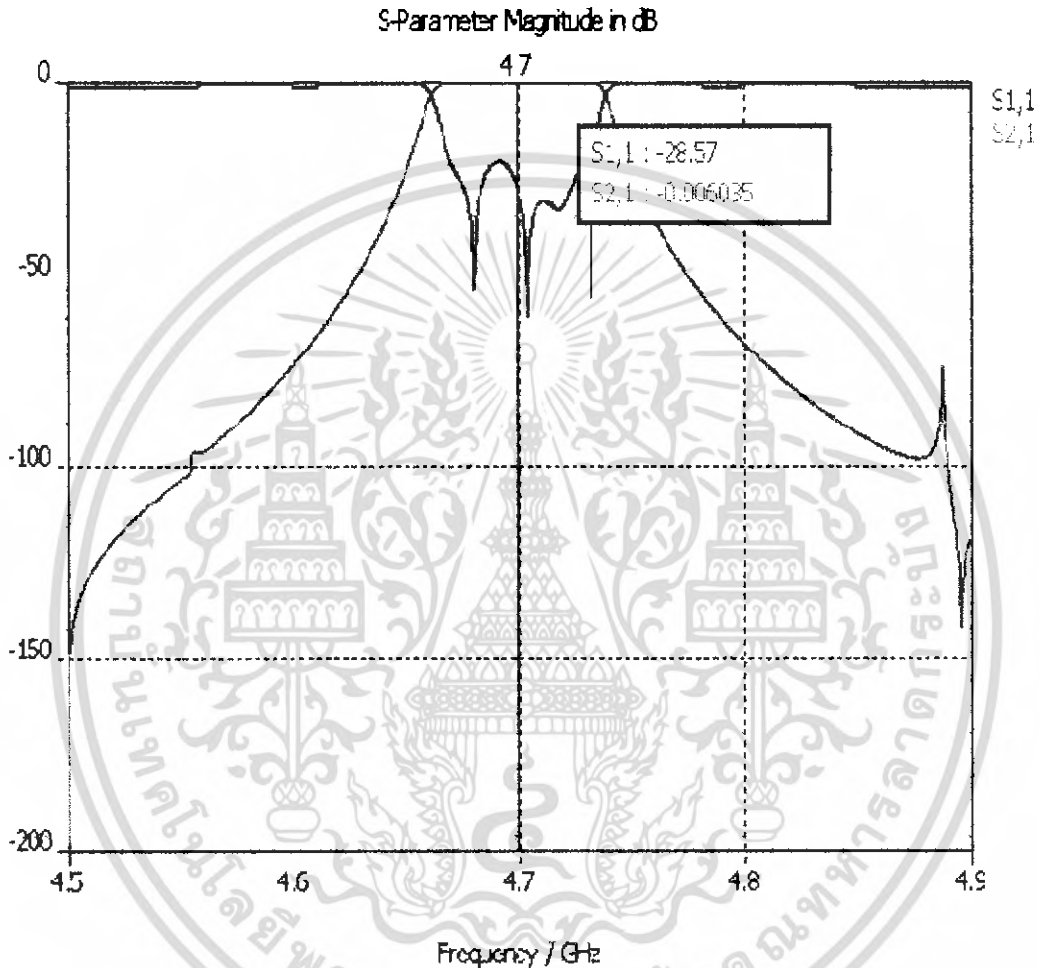
รูปที่ 4.26 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ถูกลดทอนจึงไม่มีการส่งผ่านที่ความถี่ 4.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 เปลี่ยนค่าวัสดุที่กำหนดในการวิเคราะห์ของตัวกรองความถี่ย่าน 4.65-4.75 GHz

ทำการกำหนดค่าคุณสมบัติของตัวนำชนิดต่างๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อผลลัพธ์ของอัตราคทอนการส่งผ่าน

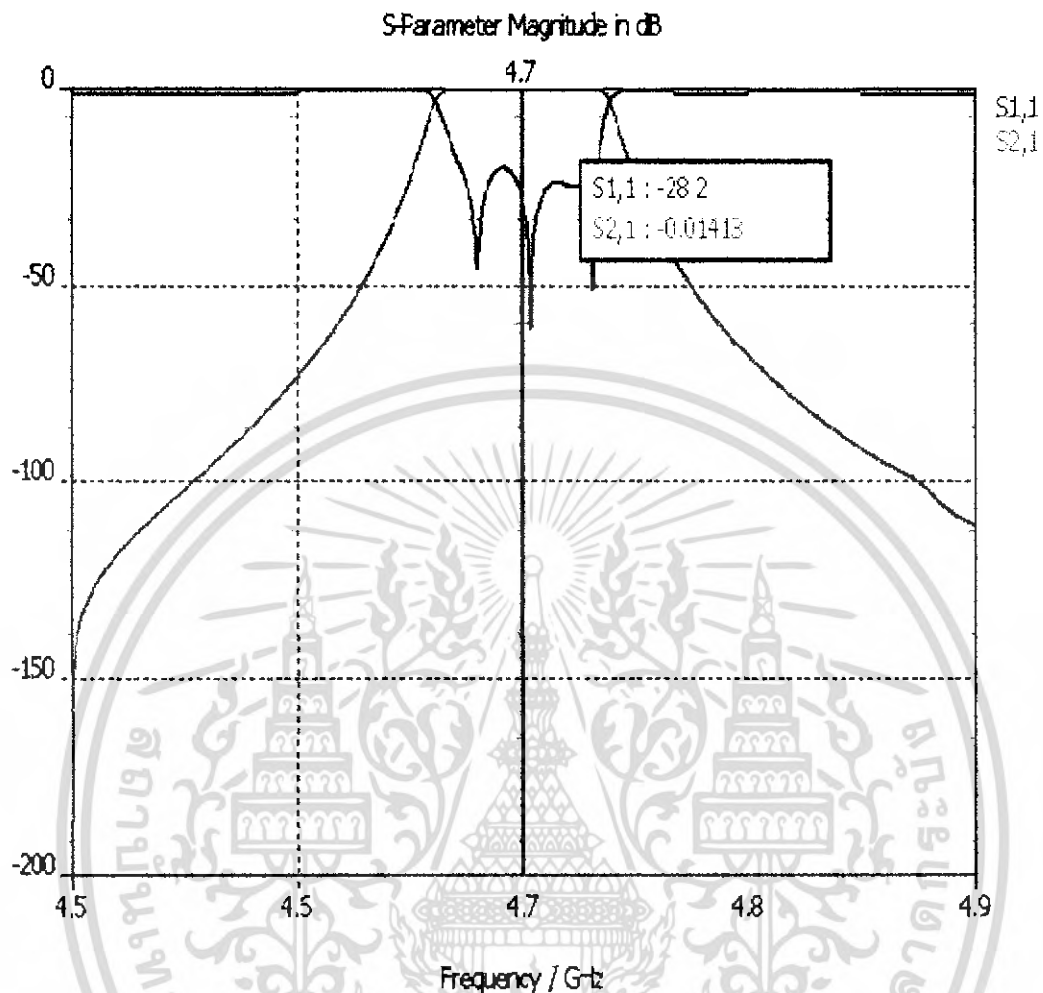
เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นเงินซึ่งมีค่า  $6.17 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.27 กราฟคุณสมบัติ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นเงินของฟิลต์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

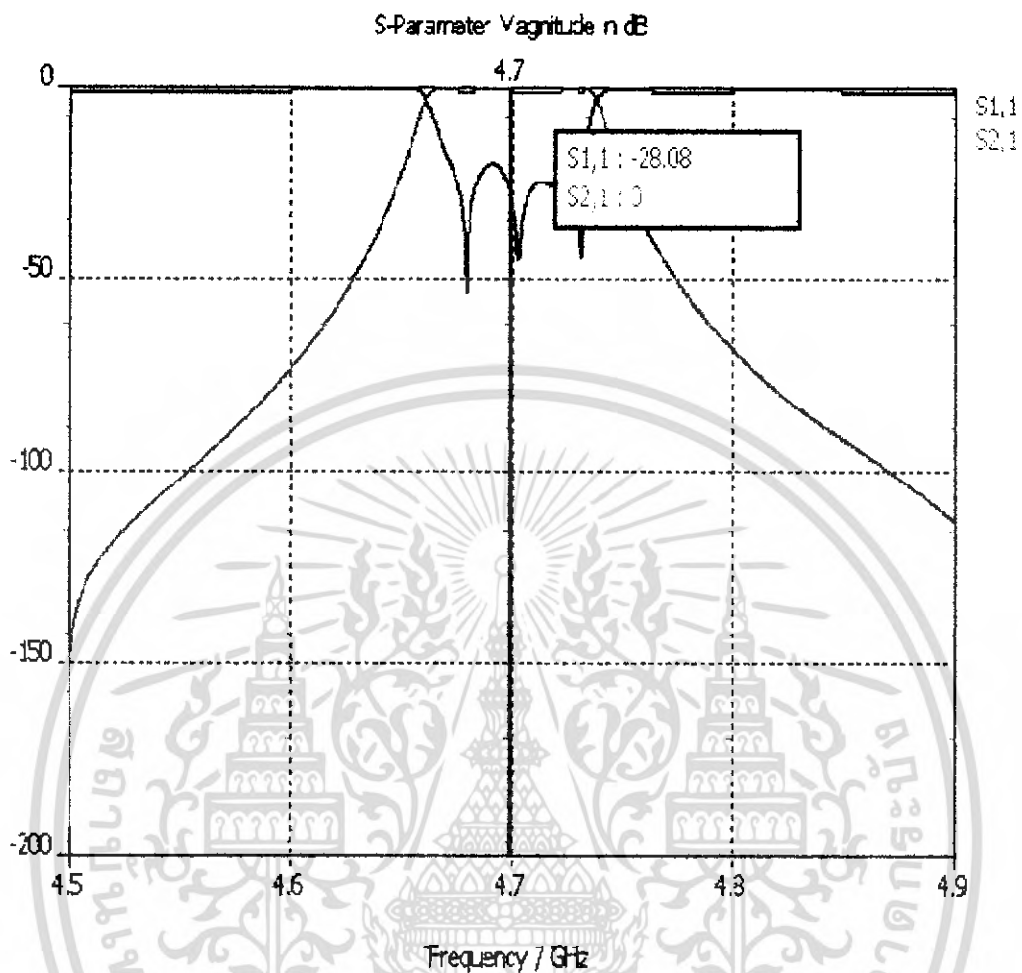
เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นทองแดงซึ่งมีค่า  $5.80 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.28 กราฟคุณลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองแดง  
ของฟิลต์เคอร์รียน 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

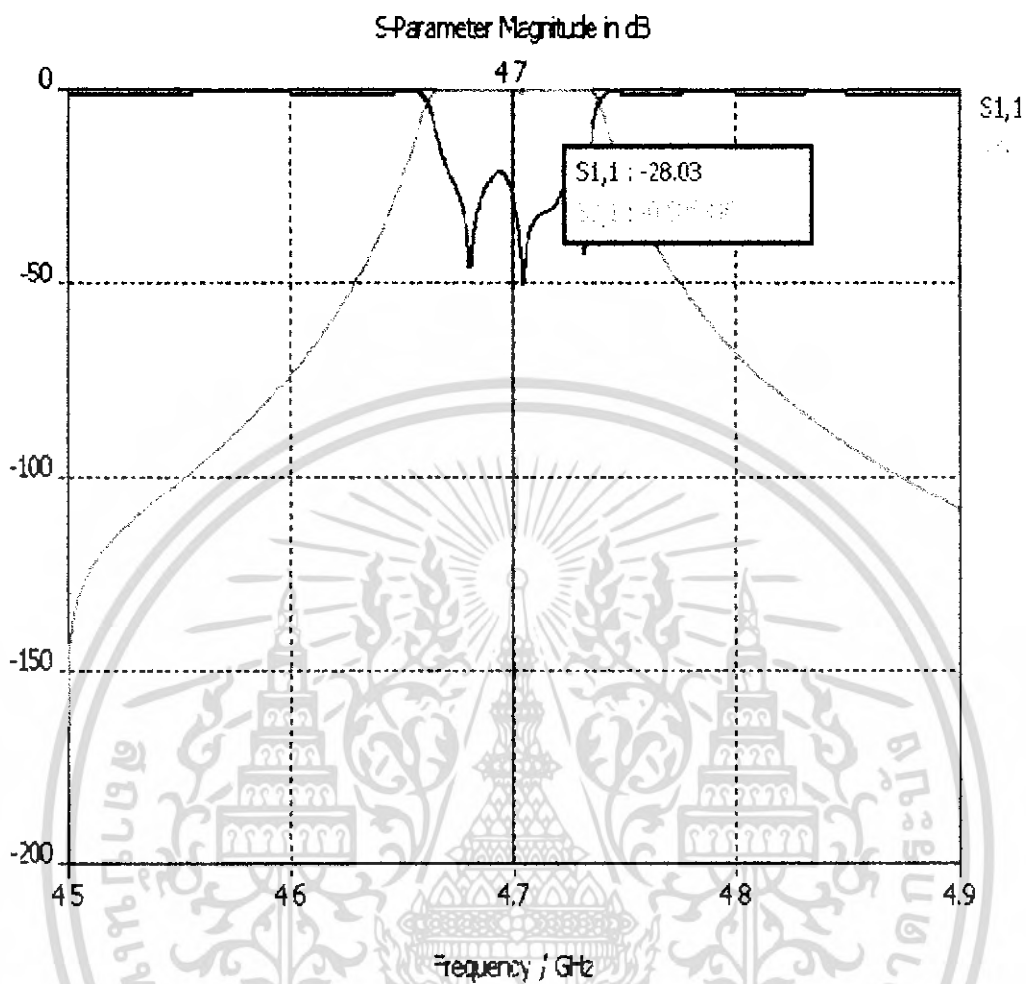
เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นอสมิเนียนซึ่งมีค่า  $3.72 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.29 กราฟพหุลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นอสมิเนียน  
ของฟิลด์เตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าความนำเป็นทองเหลืองซึ่งมีค่า  $1.57 \times 10^7$  S/m



รูปที่ 4.30 กราฟพิกัดลักษณะ  $S_{11}$  และ  $S_{12}$  เมื่อกำหนดวัสดุเป็นทองเหลือง  
ของฟิลต์เคอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางสรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวนำในการวิเคราะห์

ชนิดของตัวนำ	ค่าความนำ (S/m)	Insertion Loss (dB)	Return Loss (dB)
เงิน	$6.17 \times 10^7$	-0.006035	-28.57
ทองแดง	$5.80 \times 10^7$	-0.01413	-28.2
อลูมิเนียม	$3.72 \times 10^7$	0	-28.08
ทองเหลือง	$1.57 \times 10^7$	-0.006846	-28.03

### ตารางที่ 4.2 สรุปผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวนำที่ความถี่กลาง 4.7 GHz

#### 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี โปรแกรม CST และ โปรแกรม MATHCAD จึงทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สอดคล้องกันทั้งขนาดโครงสร้าง และคุณสมบัติ ซึ่งสรุปในขั้นตอนสุดท้ายได้ดังต่อไปนี้

#### ความถี่พาธแบนด์ที่ 4.35-4.45 GHz วัสดุ PEC

อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน (Insertion Loss) ที่ความถี่กลาง 4.4 GHz = 0 dB

อัตราการสูญเสียการสะท้อนกลับ (Return Loss) ที่ความถี่กลาง 4.4 GHz = -21 dB

ความกว้างของช่วงความถี่พาธแบนด์ประมาณ 75 MHz

#### ความถี่พาธแบนด์ที่ 4.65-4.75 GHz วัสดุ PEC

อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน (Insertion Loss) ที่ความถี่กลาง 4.7 GHz = 0 dB

อัตราการสูญเสียการสะท้อนกลับ (Return Loss) ที่ความถี่กลาง 4.7 GHz = -20 dB

ความกว้างของช่วงความถี่พาธแบนด์ประมาณ 80 MHz

จะเห็นได้ว่าเมื่อเราทำการเปลี่ยนวัสดุที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็น เงิน ทองแดง อลูมิเนียม และทองเหลือง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน อัตราการสูญเสียย้อนกลับ นั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงอ้างอิงกับวัสดุ PEC แต่ในการสร้างเราใช้ท่อทองเหลืองในการสร้าง

## บทที่ 5

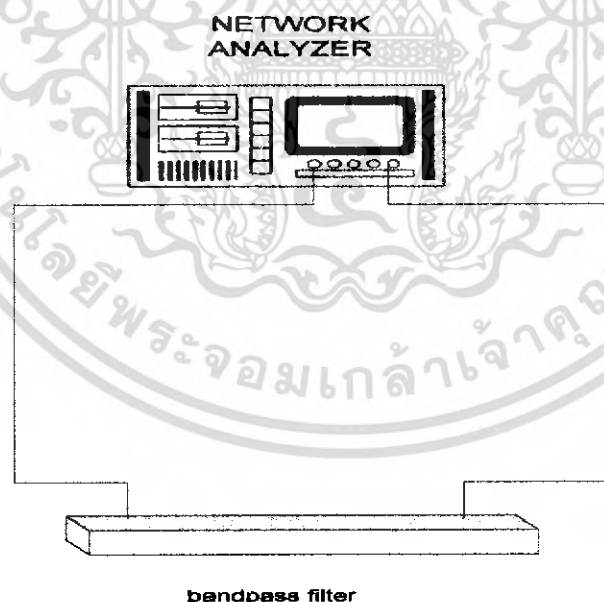
### ผลการทดสอบและผลการทดลอง

#### 5.1 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีหลักการทำงานคือ ภายในตัวเครื่องนั้นจะประกอบด้วยเครื่องรับและเครื่องส่ง เราจึงสามารถที่จะกำหนดได้ว่าต้องการที่จะใช้พอร์ตใดเป็นเครื่องส่งและเครื่องรับโดยที่หน่วยในการวัดนั้นนิยมวัดเป็น dB ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของคูเพล็กซ์เซอร์นั้น คุณสมบัติที่สำคัญนั้นก็คือ  $S_{21}$  ( Insertion - Loss ) และ  $S_{11}$  ( Return Loss ) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่เราให้ความสนใจในการที่จะใช้เป็นตัวตัดสินใจว่าอุปกรณ์ชนิดนั้นๆ มีคุณสมบัติที่ติดตามข้อกำหนดที่เราต้องการหรือไม่ โดยที่ทั้งสองคุณลักษณะนี้นั้นล้วนแต่เป็นสิ่งที่จำเป็น แต่เราต้องคำนึงถึงคุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งก็คืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งค่าที่เหมาะสมและยอมรับได้ก็ควรจะมีความใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุดเพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานจากการส่งผ่านให้มากที่สุด

#### 5.2 การทดสอบอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน อัตราการสูญเสียย้อนกลับและค่าอิมพีแดนซ์ (Insertion Loss Return Loss , Impedance)

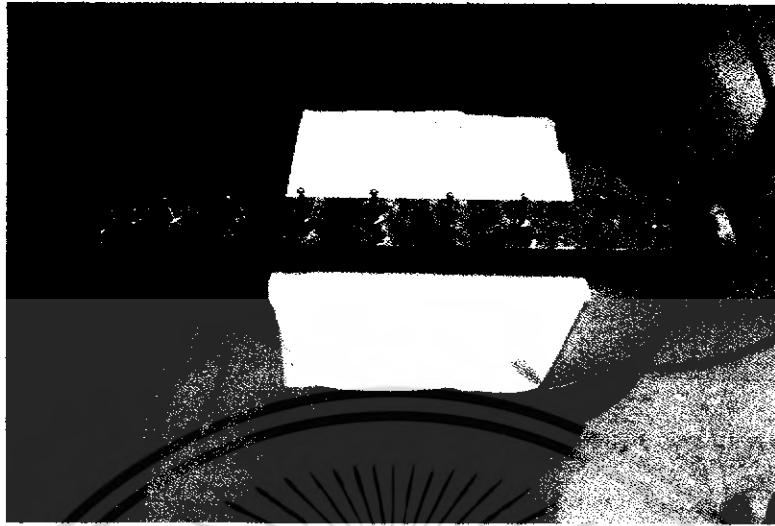
กำลังงานที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นนั้น จะมีอัตราการสูญเสียย้อนกลับและอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน ซึ่งในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเวฟไกด์แบนด์พาสฟิลต์เตอร์เพียงตัวเดียวซึ่งมีแบนด์ 4.35-4.45 GHz และ 4.65-4.75 GHz จะแสดงการต่ออุปกรณ์ทดสอบดังรูป



รูปที่ 5.1 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Insertion Loss, Return Loss, Impedance ของฟิลต์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแบนด์พาสฟิลต์เตอร์ 4.35-4.45 GHz และ 4.65-4.75 GHz



รูปที่ 5.2 แสดงการทดสอบการวัดค่า Insertion Loss , Return Loss , Impedance ของฟิลต์เตอร์

### 5.2.1 การทดสอบแบนด์พาสฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

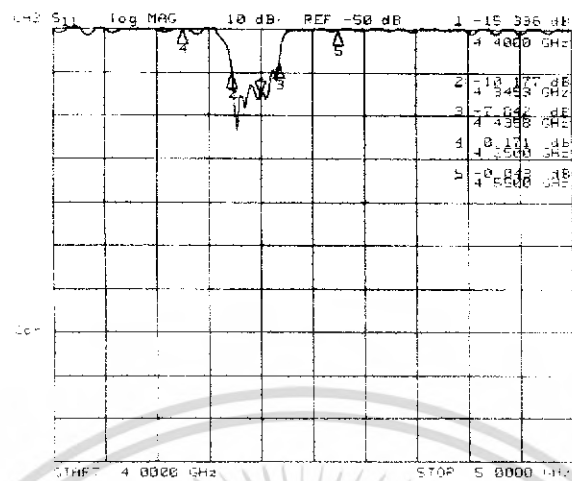
เมื่อทำการทดสอบโดยต่ออุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 5.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฟิลต์เตอร์เราจะได้กราฟคุณสมบัติต่างๆดังนี้  
กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss



รูปที่ 5.3 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.35-4.45 GHz

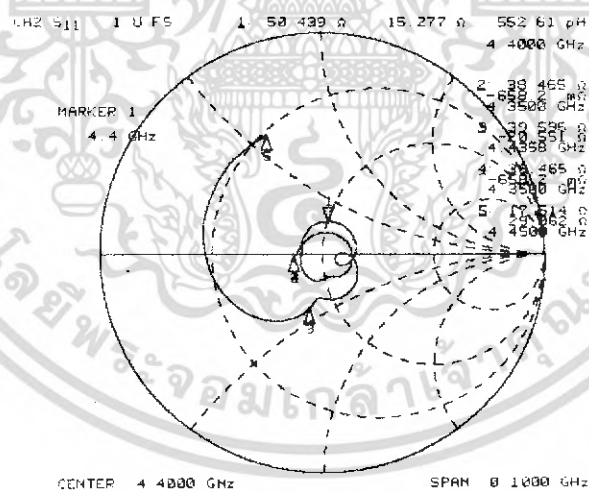
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss



รูปที่ 5.4 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ความถี่ 4.35-4.45 GHz

### กราฟคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของฟิลต์เตอร์



รูปที่ 5.5 อิมพีแดนซ์ของฟิลต์เตอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz

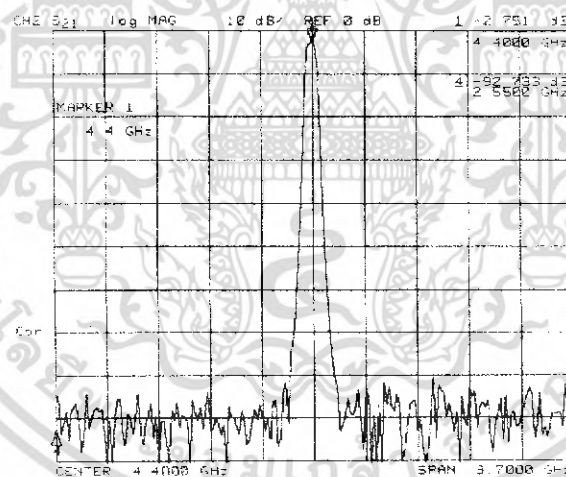
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ความถี่ (GHz)	อัตราการใช้สูญเสีย ย้อนกลับ (dB)	อัตราการใช้สูญเสีย การส่งผ่าน (dB)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
4.25	0	-68.909	12.012 - j12.104
4.3453	-10.177	-3.325	38.465 - j658.2 x10 <sup>-3</sup>
4.40	-15.336	-0.883	50.439 + j15.277
4.4358	-7.842	-3.014	17.514 + j29.062
4.55	-0.043	-80.996	129.710 + j121.57

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติต่างๆ ในย่าน 4.25-4.55 GHz

ทดลอง SPAN ความถี่ไป 3.7 GHz จากความถี่กลาง 4.4 GHz ทั้งซ้ายและขวา



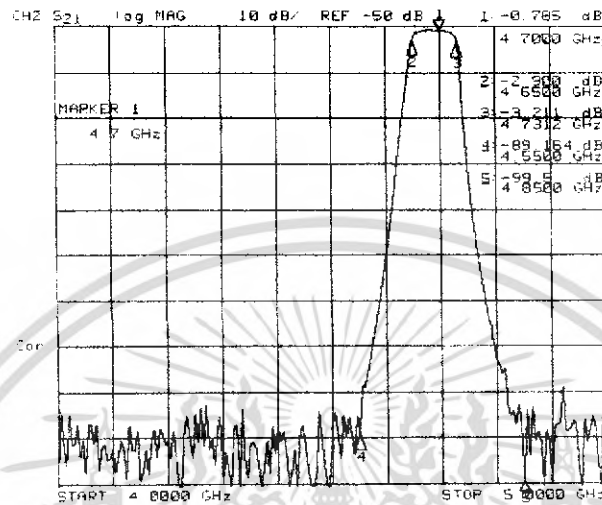
รูปที่ 5.6 อัตราการใช้สูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.35 – 4.45 GHz  
เมื่อ SPAN ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การทดสอบแบนด์พาสฟิลต์เคอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz

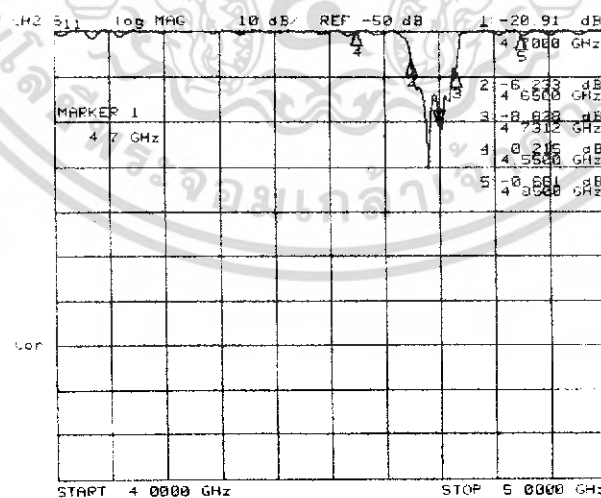
เมื่อทำการทดสอบโดยต่ออุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 5.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิลต์เคอร์เราจะได้กราฟคุณสมบัติต่างๆดังนี้

กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss



รูปที่ 5.7 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz

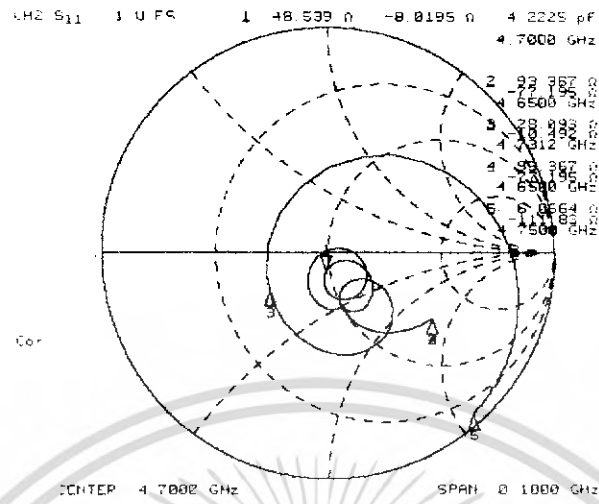
กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss



รูปที่ 5.8 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กราฟคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของฟิลต์เตอร์



รูปที่ 5.9 อิมพีแดนซ์ของฟิลต์เตอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz

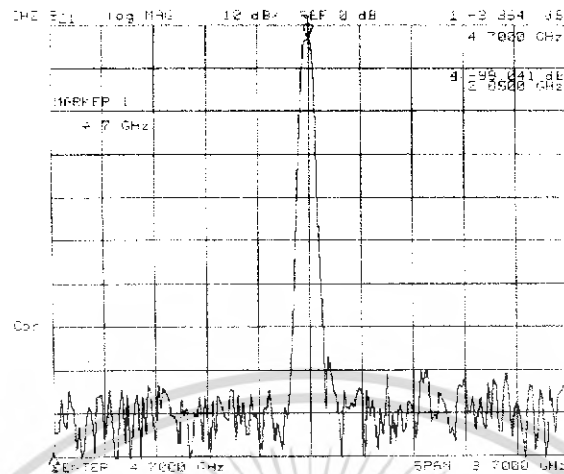
สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ความถี่ (GHz)	อัตราการสูญเสีย ย้อนกลับ (dB)	อัตราการสูญเสีย การส่งผ่าน (dB)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
4.55	0	-89.164	0.215+ j80.812
4.65	-6.233	-2.9	93.367 - j77.195
4.70	-20.91	-0.785	48.539 - j8.019
4.7312	-8.828	-3.211	6.066 - j111.183
4.85	-0.681	-99.5	17.551- j27.018

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติต่างๆในย่าน 4.55-4.85 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

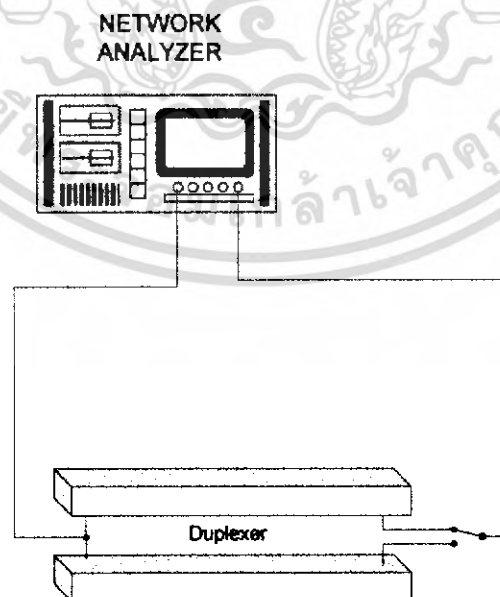
ทดลอง SPAN ความถี่ไป 3.7 GHz จากความถี่กลาง 4.4 GHz ทั้งซ้ายและขวา



รูปที่ 5.10 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ความถี่ 4.65-4.75 GHz  
เมื่อ SPAN ความถี่

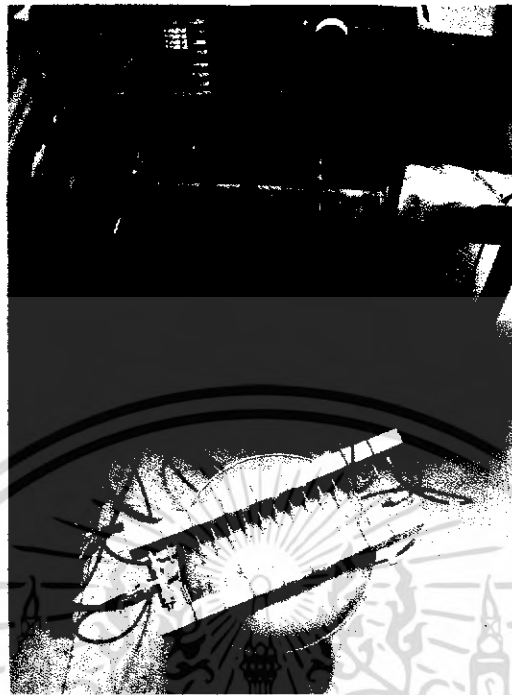
### 5.3 การทดสอบอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน อัตราการสูญเสียย้อนกลับและค่าอิมพีแดนซ์ (Insertion Loss Return Loss, Impedance) ของคูเพิลเลอร์

กำลังงานที่ส่งผ่านไปในพื้นที่ใดก็ตาม จะมีอัตราการสูญเสียย้อนกลับและอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน ซึ่งในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเมื่อนำแบนด์พาสฟิลเตอร์ทั้งสองตัวมาต่อร่วมกันเป็นคูเพิลเลอร์ ซึ่งแสดงการต่อดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.11 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Insertion Loss, Return Loss, Impedance ของคูเพิลเลอร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคูเพิลลิ่งเซอร์ที่มีพาสแบนด์ 4.35-4.45 GHz และ 4.65-4.75 GHz



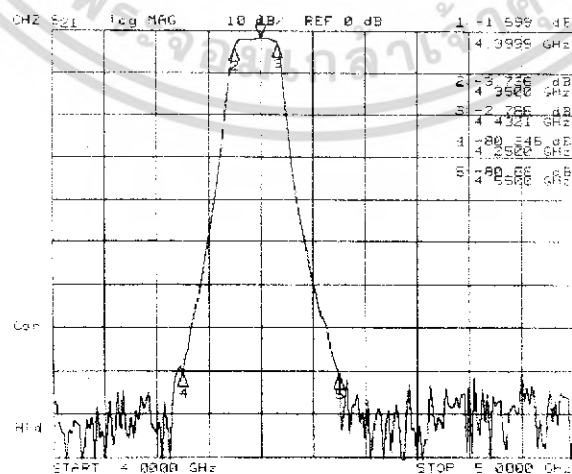
รูปที่ 5.12 แสดงการทดสอบการวัดค่า Insertion Loss , Return Loss , Impedance ของคูเพิลลิ่งเซอร์

### 5.3.1 การทดสอบคูเพิลลิ่งเซอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

ทำการทดสอบคูเพิลลิ่งเซอร์ในย่าน 4.35-4.45 GHz โดยทำการต่ออุปกรณ์ทดลองดังรูปที่

5.11 ซึ่งจะได้คุณสมบัติต่างๆดังนี้

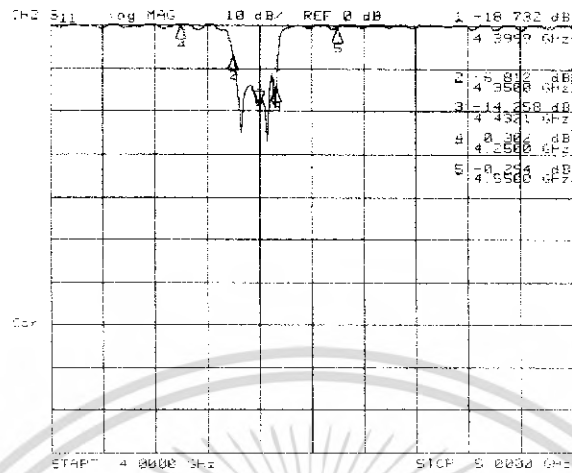
กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss



รูปที่ 5.13 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz

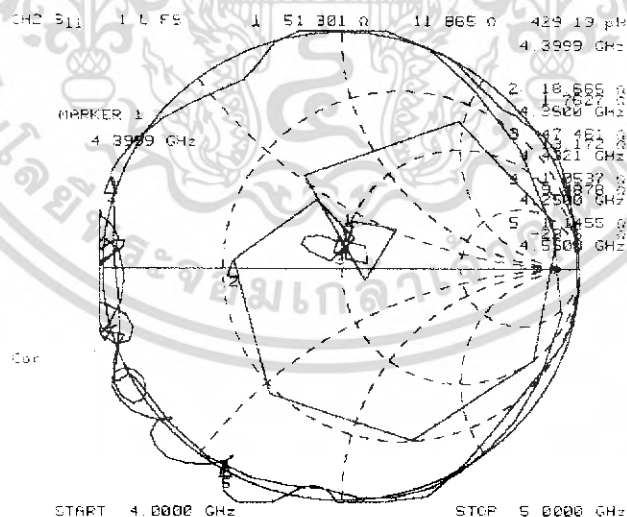
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss



รูปที่ 5.14 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของคูเพิลเลอร์ความถี่ 4.35-4.45 GHz

### กราฟคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของคูเพิลเลอร์



รูปที่ 5.15 อิมพีแดนซ์ของคูเพิลเลอร์ ความถี่ 4.35-4.45 GHz

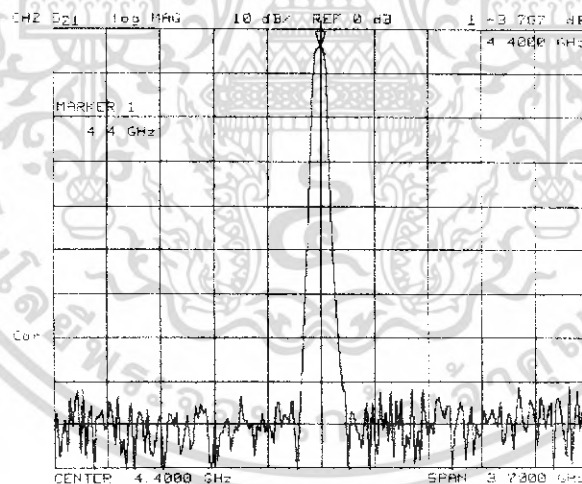
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ความถี่ (GHz)	อัตราการใช้สูญเสีย ย้อนกลับ (dB)	อัตราการใช้สูญเสียการ ส่งผ่าน (dB)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
4.25	0	-80.346	-1.054 + j9.487
4.35	-6.812	-3.736	18.665 + j1.763
4.40	-18.732	-1.599	51.301 + j11.865
4.432	-14.258	-2.786	47.461 + j13.172
4.55	-0.294	-80.68	1.146 - j28.6

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติต่างๆของคูเพิลเลอร์ในย่าน 4.25-4.55 GHz

ทดลอง SPAN ความถี่ไป 3.7 GHz จากความถี่กลาง 4.4 GHz ทั้งซ้ายและขวา

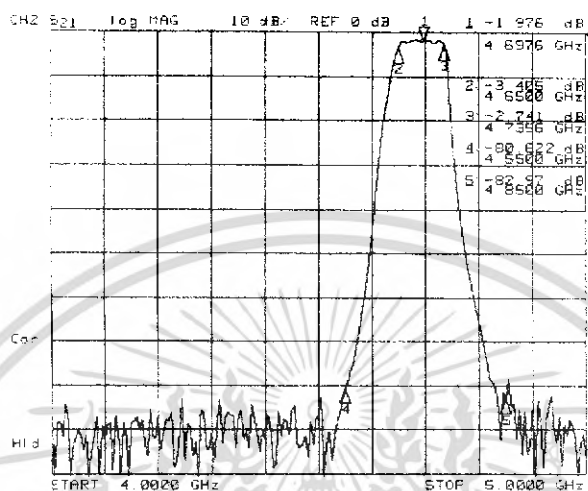


รูปที่ 5.16 อัตราการใช้สูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลเลอร์ความถี่ 4.35-4.45 GHz เมื่อ SPAN ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

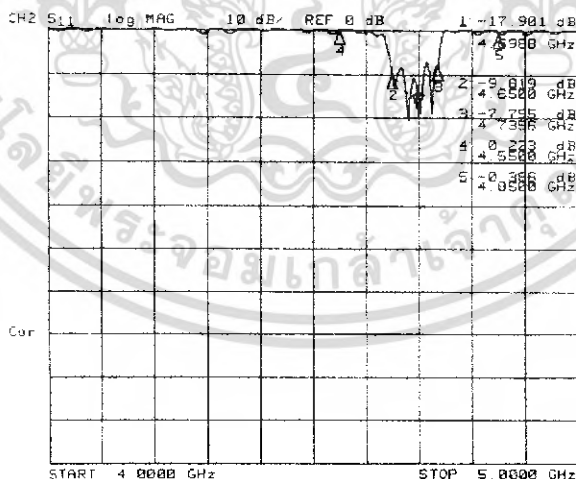
5.3.2 การทดสอบคูเพิลลิ่งเซอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz

ทำการทดสอบคูเพิลลิ่งเซอร์ในย่าน 4.65-4.75 GHz โดยทำการต่ออุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 5.10 ซึ่งจะได้คุณสมบัติต่างๆดังนี้  
 กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss



รูปที่ 5.17 อัตราการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz

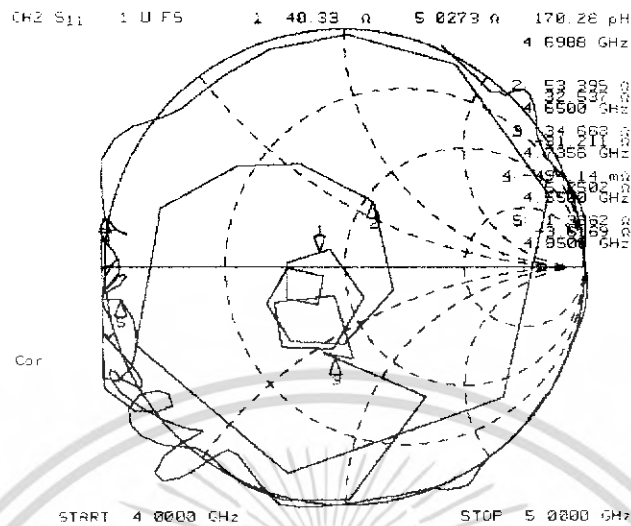
กราฟคุณสมบัติอัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss



รูปที่ 5.18 อัตราการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของคูเพิลลิ่งเซอร์ความถี่ 4.65-4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของคูเพิลเลอร์



รูปที่ 5.19 อิมพีแดนซ์ของคูเพิลเลอร์ ความถี่ 4.65-4.75 GHz

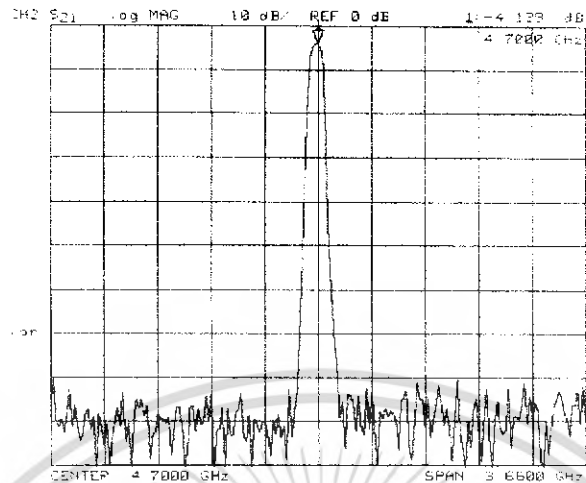
สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

ความถี่ (GHz)	อัตราการสูญเสีย ย้อนกลับ (dB)	อัตราการสูญเสีย การส่งผ่าน (dB)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
4.55	0	-80.622	$-494.14 \times 10^{-3} + j5.25$
4.65	-9.819	-3.405	$53.395 + j32.537$
4.70	-17.901	-1.976	$40.33 + j5.0273$
4.74	-7.795	-2.741	$34.668 - j31.211$
4.85	-0.386	-82.97	$1.366 - j3.6169$

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติต่างๆของคูเพิลเลอร์ในย่าน 4.55-4.85 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง SPAN ความถี่ไป 3.7 GHz จากความถี่กลาง 4.4 GHz ทั้งซ้ายและขวา



รูปที่ 5.20 อัตรการสูญเสียการส่งผ่าน Insertion Loss ของคูเพิลเลอร์ความถี่ 4.65-4.75 GHz เมื่อ SPAN ความถี่

#### 5.4 สรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนแรกนั้นทำการทดสอบโดยที่ยังไม่มีการปรับแต่ง ผลที่ได้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ นั้นมีความผิดพลาดจากทฤษฎี และผลจากการวิเคราะห์มาก เมื่อทำการปรับแต่งโดยขั้นแรกทำการตัดความยาวของโพลบให้สั้นลงนั้น ผลที่ได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆนั้นค่อยๆดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นจึงทำการปรับแต่งอีกครั้งด้วยการงูนันโดยหมุน Screw เพื่อเป็นการปรับแต่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆที่เราต้องการให้ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ให้มากที่สุด เมื่อได้ค่าตามที่ต้องการแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมา ก็คือการนำเอาฟิลด์เตอร์ทั้งสองตัวนั้นมาทำการต่อเชื่อมกัน แล้วทำการปรับแต่ง โดยการงูนันอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตามที่กำหนด หรือค่าที่เราขอรับได้มากที่สุด

## บทที่ 6

## สรุปวิจารณ์และแนวทางการพัฒนา

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบ คูเพล็กซ์เซอร์เพื่อการประยุกต์ใช้งาน สำหรับย่าน C – Band เช่น สถานีสื่อสารไมโครเวฟ อากาศยานไร้คนขับและอื่นๆอีกมากมาย และเมื่อพิจารณาเมื่อนำเอาคูเพล็กซ์เซอร์ไปใช้งานกับอากาศยานไร้คนขับแล้วจึงต้องให้ความสนใจกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีผลต่อการส่งผ่านสัญญาณโดยที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งก็คือค่าของอัตราค่าการส่งผ่าน Insertion Loss และ ค่าอัตราค่าการสะท้อนกลับ Return Loss รวมถึงค่าของอิมพีแดนซ์ ซึ่งควรมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุดโดยที่วัสดุที่ใช้จะเป็นทองเหลืองซึ่งมีค่าความนำที่ยอมรับได้ และสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายกว่าลูมิเนียมมาก และใช้โปรแกรม Mathcad โปรแกรม CST ในการคำนวณโครงสร้างและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างของคูเพล็กซ์เซอร์ดังกล่าว

## 6.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทั้งตอนที่ยังไม่ได้นำฟิลต์เตอร์มาทำการต่อเชื่อมกัน และตอนที่นำฟิลต์เตอร์ทั้งสองมาต่อเชื่อมกันเป็นคูเพล็กซ์เซอร์ ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากทฤษฎีและผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST เล็กน้อย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆสามารถสรุปได้ดังตาราง

## แบบคัททอปฟิลต์เตอร์ย่าน 4.35-4.45 GHz

ความถี่ (GHz)	อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่าน (dB)		อัตราค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)	
	วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST	ผลจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST	ผลจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
4.25	-97	-68.909	0	0
4.3453	-7	-3.325	-3	-10.177
4.40	0	-0.883	-30	-15.336
4.4358	-5	-3.014	-3	-7.842
4.55	-85	-80.996	0	-0.043

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบฟิลเตอร์ความถี่ 4.25-4.55 GHz

ช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST ประมาณ 80 MHz

ช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ประมาณ 90 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**แบนด์พาสฟิลเตอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz**

ความถี่ (GHz)	อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่าน (dB)		อัตราค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)	
	วิเคราะห์ด้วย โปรแกรม CST	ผลจากเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย	วิเคราะห์ด้วย โปรแกรม CST	ผลจากเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย
	4.55	-98	-89.164	0
4.65	-15	-2.9	-1	-6.233
4.70	0	-0.785	-22	-20.91
4.7312	-10	-3.211	-1	-8.828
4.85	-95	-99.5	0	-0.681

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบฟิลเตอร์ความถี่ 4.55-4.85 GHz

ช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST ประมาณ 75 MHz

ช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ประมาณ 82.2 MHz

**คูเพิลเลอร์ย่าน 4.65-4.75 GHz(Tx) และ ย่าน 4.35-4.45 GHz(Rx)**

ความถี่ (GHz)	อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่าน (dB)		อัตราค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)	
	วิเคราะห์ด้วย โปรแกรม CST	ผลจากเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย	วิเคราะห์ด้วย โปรแกรม CST	ผลจากเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย
	4.25	-97	-80.346	0
4.35	-7	-3.736	-3	-6.812
4.40	0	-1.599	-30	-18.732
4.432	-5	- 2.786	-3	-14.258
4.55	-85	-80.68	0	-0.294
4.55	-98	-80.622	0	0
4.65	-15	-3.405	-1	-9.819
4.70	0	-1.976	-22	-17.901
4.74	-10	-2.741	-1	-7.795

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.85	-95	-82.97	0	-0.386
------	-----	--------	---	--------

### ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและการทดสอบของคูเพิลิกเซอร์

จากการวัดเมื่อทำการเชื่อมต่อตัวกรองความถี่ทั้งสองตัวเข้าด้วยกันค่าอัตราการสูญเสียในช่วงความถี่ผ่านจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายประมาณ 4.35-4.4341 MHz ( Band width ประมาณ 84.1 MHz ( Tx) ) อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่านเพิ่มขึ้นจาก -0.883 dB เป็น -1.599 dB ช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band) 4.6595-4.7245 MHz ( Band width ประมาณ 80MHz ( Rx) ) อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่านเพิ่มขึ้นจาก -0.785 dB เป็น -1.976 dB อัตราค่าการสูญเสียการส่งผ่านยังอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ช่วงความถี่กลาง 4.4 GHz ประมาณ  $51.301 + j9.487$  โอห์ม ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ช่วงความถี่กลาง 4.7 GHz ประมาณ  $40.33 + j5.0273$  โอห์ม

### 6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้าง

ในการออกแบบนั้นความละเอียดจะสูงถึงในหน่วยของไมโครเมตรจึงต้องใช้เครื่องมือตัดที่มีความละเอียดสูงนั่นก็คือเครื่อง CNC WIRECUT ความคลาดเคลื่อนจากความสกรปรกภายในคูเพิลิกเซอร์ ความคลาดเคลื่อนจากการใส่แผ่นทองเหลืองที่ทำเป็นฉากกั้นและจากการเชื่อมรอยตัดทั้ง 32 รอยตัดซึ่งจะมีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ทำให้เกิดรีปเปิลขึ้นมากในช่วงพาสแบนด์

### 6.3 แนวทางการแก้ไข

ด้วยความคลาดเคลื่อนจากการใส่แผ่นทองเหลืองที่ทำเป็นฉากกั้นและจากการเชื่อมรอยตัดทั้ง 32 รอยตัดซึ่งจะมีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ทำให้เกิดรีปเปิลขึ้นมากในช่วงพาสแบนด์นั้นทางผู้จัดทำจึงขอเสนอแนวทางการแก้ไขคือให้ทำการเชื่อมอย่างระมัดระวังทำการปรับจูนด้วย screw ทองเหลือง และทำความสะอาดภายในคูเพิลิกเซอร์ให้สะอาดก่อนการปรับจูนทำให้รีปเปิลที่เคยมีหายไปถ้าเป็นไปได้ควรทำการชุบเงินภายในจะทำให้ค่าอัตราการสูญเสียในช่วงความถี่ผ่านนั้นลดลงใกล้ 0 dB

## หนังสืออ้างอิง

- [ 1 ] Ian Hunter, "Theory and Design of Microwave Filters," The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom., 1988.
- [ 2 ] Theodore S. Saad, "Microwave Engineer'Handbook Volume 1 ," Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts, 1971.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้