

การเปลี่ยนเฟสของไฮบริดจังก์ชันเพลอร์โดยใช้ชอกกี้ไดโอด

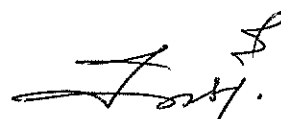
โดย

1. นางสาวจิตติมา ดีสวน รหัสประจำตัว B5115112
2. นางสาวศิริพร จ้อยหมื่นไวย รหัสประจำตัว B5119691
3. นางสาวกรรณิกา ขามโนนวัต รหัสประจำตัว B5123025

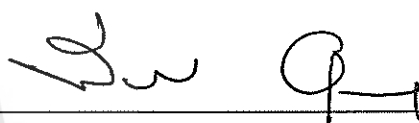
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2546
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2554

การเปลี่ยนเฟสของคัปเปเลอร์ไฮบริดจ์โดยใช้ชอกกีไดโอด

คณะกรรมการสอบโครงการงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ



(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2554

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อูทวารสกุล ผู้ที่เป็นเจ้าของความคิดริเริ่มการออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย ที่ต่อเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้ได้เฟสตามที่เราต้องการ โดยใช้ไดโอดเป็นตัวสลับสาย ท่านได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิดการออกแบบผลงาน และดูแลเอาใจใส่ติดตามผลงานอย่างใกล้ชิด ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนช่วยเหลือฝึกฝนและการสนับสนุนคณะผู้จัดทำโครงการ ให้มีความสามารถในการทำโครงการจนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำโครงการมาโดยตลอด พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอกวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่คอยแนะนำและให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงการสอนใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยเฉพาะนางสาวปาลิรัตน์ วงษ์จำปา และนางสาวอริญญา แก้วกรัด นักศึกษาปริญญาโทวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจมาให้โดยตลอด

คณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้มาให้แก่คณะผู้จัดทำโครงการทำให้การทำโครงการชิ้นนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ

นางสาวจิตติมา ดีสวน

นางสาวศิริพร จุ้ยหมื่นไว

นางสาวกรรณิกา ขามโนนวัด

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบการดำเนินงานเขตงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	3
2.1.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ	4
2.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง	4
2.1.3 ระนาบกราวด์ (ground plane)	5
2.1.4 สายนำสัญญาณ (transmission line)	5
2.1.5 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ของสายนำสัญญาณแบบ ไมโครสตริป	5
2.1.6 ค่าความยาวคลื่นบนสตริป ค่าคงที่การแพร่กระจาย และค่าความเร็วเฟส	7
2.1.7 การสังเคราะห์หาความกว้างต่อความหนา W/h	8
2.1.8 ผลกระทบจากความหนาของสตริป	9
2.1.9 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายออกของคลื่น	10
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	11
2.3 การออกแบบไมโครสตริปไลน์	12
2.4 วงจรบนชิปไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์	13
2.5 พารามิเตอร์การส่งผ่าน	17

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6 ไดโอด	20
2.6.1 ไดโอดในทางอุดมคติ (ideal diode)	20
2.6.2 คุณลักษณะของทกไดโอด	21
บทที่ 3 การจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	
3.1 บทนำ	22
3.2 CST MICROWAVE STUDIO	22
3.2.1 การเริ่มสร้างแบบจำลอง	22
3.2.2 การสร้างวัสดุ Material	23
3.2.3 Load from Material Library	23
3.2.4 การสร้างองค์ประกอบ Components	24
3.2.5 การกำหนดหน่วย Units	25
3.2.6 การกำหนดความถี่ Frequency	25
3.2.7 การกำหนดขอบเขต Boundary Conditions	26
3.2.8 การป้อนพลังงาน โดยการกำหนดพอร์ต	28
3.2.9 การกำหนด Field Monitors	30
3.2.10 การประมวลผล	30
3.2.11 การสร้างรูปทรงพื้นฐาน (Basic Shape Creation)	31
3.2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ	43
3.2.13 การลบคมและการเชื่อมขอบ	43
3.2.14 วิธีการทำงานของบูลีน (Boolean Operations)	45
3.3 หลักการออกแบบ	47
3.3.1 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบ	48
3.3.2 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาที่ต่อเข้ากับวงจรสลับสาย	55
3.4 ข้อสรุปท้ายบท	60

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ	
4.1 บทนำ	61
4.2 การสร้างตัวไฮบริดจัมป์เพลอร์แบบ 90 องศาที่สามารถเลือกมุมเฟสของเอาต์พุต ได้หลายมุมโดยใช้ไดโอดเป็นตัวสวิตช์เลือกความยาวของเส้นไมโครสตริป	61
4.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	63
4.3.1 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน	63
4.3.2 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน	69
4.3.3 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน	76
4.3.4 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน	83
4.4 ข้อเสนอแนะ	90
บทที่ 5 ข้อเสนอของโครงการ	
5.1 บทนำ	91
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	91
5.3 ข้อเสนอแนะ	92
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	92
5.5 บทสรุปของโครงการ	92

สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา (hybrid coupler 90°)	1
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของบรานช์ไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์	13
รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของสัญญาณในบรานช์ไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์	13
รูปที่ 2.5 ลักษณะการวิเคราะห์บรานช์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ในโหมดคู่และโหมดคี่	14
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์การแบ่งกำลังงานของบรานช์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์	16
รูปที่ 2.7 โครงข่ายแบบสองพอร์ตและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	17
รูปที่ 2.8 แสดงหัวของไดโอด 2 หัว ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำ	20
รูปที่ 2.9 การทำงานของไดโอดเมื่อต่อหัวแบคเตอร์รี่	21
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของชอทที่ไดโอด	21
รูปที่ 3.1 หน้าต่างของ Create a New Project	22
รูปที่ 3.2 หน้าต่างของ New Material Parameters	23
รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Load from Material Library	24
รูปที่ 3.4 การสร้าง Components	24
รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Specify Units	25
รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Frequency Range Settings	25
รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Boundary Conditions	26
รูปที่ 3.7 ก Electric	26
รูปที่ 3.7 ข Magnetic	26
รูปที่ 3.7 ค Open (PML)	27
รูปที่ 3.7 ง Open (add space)	27
รูปที่ 3.7 จ Periodic	27

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.7 ข Conducting Wall	27
รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Waveguide Port	28
รูปที่ 3.9 หน้าต่างของ Discrete Port	29
รูปที่ 3.10 รูปแบบ ของ Discrete Port	30
รูปที่ 3.10 รูปของหน้าต่าง Monitor	30
รูปที่ 3.11 หน้าต่างของ Solver Parameters	31
รูปที่ 3.12 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม	32
รูปที่ 3.13 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยทางลัด	32
รูปที่ 3.14 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม	33
รูปที่ 3.15 รูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 1	33
รูปที่ 3.16 รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2	34
รูปที่ 3.17 แสดงรูปกล่องสี่เหลี่ยมและหน้าต่างที่ชื่อ Brick ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 3	34
รูปที่ 3.18 กล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด	35
รูปที่ 3.19 รูปร่างของทรงกลมและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทรงกลม	35
รูปที่ 3.20 รูปทรงกลมที่ได้หลังจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เสร็จแล้ว	36
รูปที่ 3.21 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงกระบอก	36
รูปที่ 3.22 รูปวงกลมที่ได้จากการสร้างรูปทรงกระบอกในขั้นตอนที่ 1	37
รูปที่ 3.23 รูปร่างทรงกระบอกที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2	37
รูปที่ 3.24 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง	38
รูปที่ 3.25 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง และหน้าต่างของการกำหนดค่าพารามิเตอร์	38
รูปที่ 3.26 รูปทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง มีขนาดตามที่ได้กำหนด	39

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.27 วงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของการสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี	40
รูปที่ 3.28 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นี้	40
รูปที่ 3.29 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีและหน้าต่าง	41
ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์	
รูปที่ 3.30 รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี	41
รูปที่ 3.31 รูปทรงกรวยที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด	42
รูปที่ 3.32 รูปทรงขนม โค้นท์ที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด	43
รูปที่ 3.33 แฉบเครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ	43
รูปที่ 3.34 หน้าต่างในการกำหนดค่ารัศมีของการลบคม	44
รูปที่ 3.35 ขั้นตอนการลบคม	44
รูปที่ 3.36 หน้าต่างการกำหนดค่าของการเชื่อมคม	45
รูปที่ 3.37 ขั้นตอนการเชื่อมคม	45
รูปที่ 3.38 วิธีการรวมวัสดุ	46
รูปที่ 3.39 วิธีการลบวัสดุออก	46
รูปที่ 3.40 วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัสดุ	47
รูปที่ 3.41 วิธีการแทรกวัสดุ	47
รูปที่ 3.42 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศา	48
รูปที่ 3.43 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบที่ออกแบบเสร็จแล้ว	52
รูปที่ 3.44 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับของ	52
พารามิเตอร์ S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44}	
รูปที่ 3.45 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านพลังงานของพารามิเตอร์ S_{21} , S_{31} , S_{24} , S_{34}	53
รูปที่ 3.46 กราฟแสดงเฟสของพารามิเตอร์	54

สารบัญรูป(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S41	67
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S26	68
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S46	68
รูปที่ 4.12 ภาพตัวคัปเปิลเตอร์แบบไฮบริดจ์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน	69
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S21	70
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S51	71
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S26	72
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S56	73
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S21	74
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S51	74
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S26	75
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S56	75
รูปที่ 4.21 ภาพตัวคัปเปิลเตอร์แบบไฮบริดจ์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน	76
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S31	77
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S41	78
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S36	79
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S46	80
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S31	81
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S41	81
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S36	82
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่ามูมเฟสของพารามิเตอร์ S46	82
รูปที่ 4.30 ภาพตัวคัปเปิลเตอร์แบบไฮบริดจ์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน	83

สารบัญรูป(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S31	84
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S51	85
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S36	86
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S56	87
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S31	88
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S51	88
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S36	89
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S56	89



สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของคัปเปิลอร์ไฮบริคจ์ 90 องศาแบบ ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	54
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายไฟ ให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน	57
ตารางที่ 3.3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายไฟ ให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน	58
ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายไฟ ให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน	59
ตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายไฟ ให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน	60
ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน	69
ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน	76
ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน	83
ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริคจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน	90
ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะที่ดำเนินงานและวิธีการแก้ไข	92

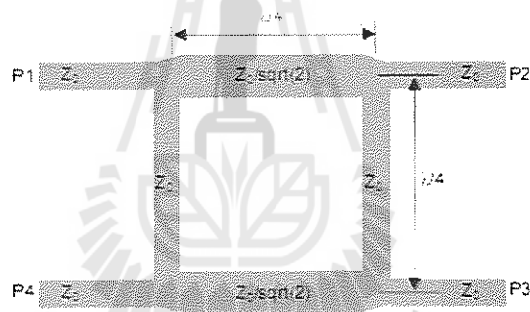
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้ได้เฟสตามที่เราต้องการ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้แก้ไขปัญหของบัตเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) จากเดิมที่ให้เฟสเป็นค่าที่ตายตัว โดยใช้ไดโอดเป็นตัวสลับสาย ซึ่งผลจากการสลับสายนี้จะทำให้สามารถเลือกสายนำสัญญาณที่มีความยาวตามที่ต้องการได้ ซึ่งจะทำให้เราได้เฟสตามที่เราต้องการ

โดยปกติแล้ว ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อป้อนสัญญาณเข้าไปแล้วจะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมา 2 พอร์ต ซึ่งแต่ละพอร์ตมีสัญญาณต่างกัน 90 องศา ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา (hybrid coupler 90°)

จากการอ้างอิง รูปที่ 1 โดยการดำเนินการขั้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมระหว่าง พอร์ต P2 และ พอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และ พอร์ต P3 จะล้าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่ พอร์ตที่ P4 โดยที่ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา จะใช้เป็นส่วนประกอบในการสร้างวงจรบัตเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งวงจรบัตเลอร์เมทริกซ์จะให้ทิศทางของลำคลื่นและเฟสแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเฟส $-45^\circ, 0^\circ, -135^\circ, -90^\circ$ จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จะมีค่าทิศทางของลำคลื่นเป็น $138.6^\circ, 104.5^\circ, 75.5^\circ, 41.4^\circ$ จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และมีเฟสที่มาจากแต่ละต้นเป็น $-135^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับเช่นกัน แต่วงจรบัตเลอร์เมทริกซ์ มีข้อจำกัดก็คือเฟสที่ออกมาเป็นค่าที่ตายตัว แต่ถ้า

หากว่าเราอยากได้เฟสที่มีค่าที่เราต้องการ โดยส่วนใหญ่แล้วเราก็จะใช้วิธีการปรับเปลี่ยนวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา แต่วิธีดังกล่าวทำได้ยากและใช้เวลานาน ดังนั้น เราจึงต้องการนำเสนอความคิดที่จะใช้วงจรสลับสายต่อเข้ากับตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้ได้เฟสตามที่เราต้องการ ซึ่งในการใช้วงจรสลับสายนี้ สามารถออกแบบและสร้างได้ง่ายกว่าการออกแบบวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์

สร้างวงจรสลับสาย (switch line) ซึ่งต่อเข้ากับไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนมุมเฟสได้

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio 5 เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรสลับสาย (switch line) เพื่อต่อเข้ากับตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา
2. ศึกษาทฤษฎีไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา และศึกษาการเลื่อนเฟสโดยใช้การสลับสาย
3. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทำการทดสอบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

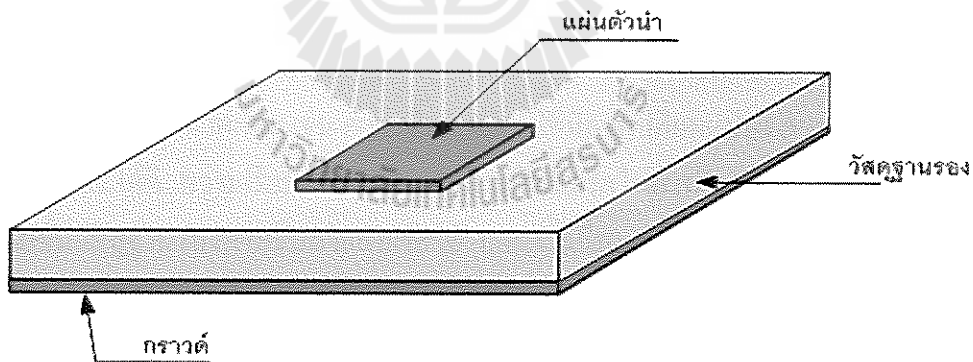
1. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio และทฤษฎีของวงจรสลับสายในช่วงความถี่ 2.4 GHz
2. ออกแบบวงจรสลับสายที่ทำงานในช่วงความถี่ 2.4 GHz และนำไปทดสอบโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อให้อยู่ในช่วงที่มีความถี่ 2.4 GHz
3. สร้างวงจรสลับสายความถี่ 2.4 GHz และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม CST Microwave Studio ให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สอดคล้องกัน
4. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้ได้เฟสตามที่เราต้องการ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้แก้ไขปัญหาของบัตเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) จากเดิมที่ให้เฟสเป็นค่าที่ตายตัวโดยใช้ไดโอดเป็นตัวสลับสาย ซึ่งผลจากการสลับสายนี้จะทำให้สามารถเลือกสายนำสัญญาณที่มีความยาวตามที่ต้องการได้ ซึ่งจะทำให้เราได้เฟสตามที่เราต้องการ

2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป คือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถผลิตด้วยเทคโนโลยีวงจรรพิมพ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ได้และสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟได้ดี ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน คือ แผ่นตัวนำสายอากาศ ชั้นวัสดุฐานรอง ระบายกราวด์ และสายนำสัญญาณ โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย

2.1.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ

เป็นแผ่นโลหะแบบบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน และมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดีโดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำหรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศและความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำสายอากาศยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

2.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น และการแผ่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลง เมื่อความหนาคู่ความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05

การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะและสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

- ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (dielectric constants: ϵ_r) วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับอากาศว่าง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดี และทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย
- ค่า loss tangent ($\tan \delta$) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสสแตติสเพลซเมนต์ โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสีย เนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อย

เพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

- ค่าคงตัวของการนำความร้อน (thermal conductivity) แสดงให้รู้ว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

2.1.3 ระนาบกราวด์ (ground plane)

เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศโดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเนื่องจากคลื่นเดี่ยวบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วยเนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมุติว่าแผ่นกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (main lobe) น้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

2.1.4 สายนำสัญญาณ (transmission line)

สายนำสัญญาณจะเป็นส่วนสำคัญในการนำสัญญาณเข้าสู่สายอากาศ สายนำสัญญาณที่ใช้กับสายอากาศแบบไมโครสตริปมีหลายแบบ ที่นิยมใช้คือ แบบไมโครสตริปไลน์ (microstrip line) และแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (coplanar waveguide: CPW) สายนำสัญญาณดังกล่าวนี้สามารถจะใช้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นปะ (patch antenna) หรือแบบช่องเปิด (slot antenna) ได้แต่ต้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างการจัดวาง เช่น สายอากาศแบบแผ่นปะจะนิยมใช้ไมโครสตริปไลน์โดยจัดวางให้อยู่ในระนาบเดียวกัน ถ้าเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดจะใช้ไมโครสตริปไลน์หรือ CPW ได้ทั้งสองแบบ ถ้าใช้ไมโครสตริปไลน์ช่องเปิดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศจะถูกวางอยู่บนระนาบกราวด์ ส่วนไมโครสตริปไลน์จะอยู่ระนาบตรงกันข้าม แต่ถ้าใช้สายแบบ CPW สายอากาศช่องเปิดบนระนาบกราวด์จะอยู่ระนาบเดียวกันกับสายนำแบบ CPW [1]

2.1.5 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและ ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ของสายนำสัญญาณแบบ ไมโครสตริป

การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance, Z_0) และ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (effective dielectric constant, ϵ_{eff}) สามารถหาได้จาก

$$Z_c = \frac{1}{c\sqrt{C_a C_d}} \quad (2-1 ก)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{C_d}{C_a} \quad (2-1 ข)$$

โดยที่ค่า C_a เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อความยาวของสตริปหนึ่งหน่วย ซึ่งมีชั้นของไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ส่วนค่า C_d เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อความยาวของสตริปหนึ่งหน่วยซึ่งมีอากาศอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำสตริป นั่นคือ เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสตริปที่ด้านบนของชั้นไดอิเล็กทริกนั่นเองและค่า c เป็นค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (มีค่าประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ในที่นี้จะพิจารณาว่าความหนาของสตริปมีค่าใกล้เคียงศูนย์ (เข้าใกล้ 0) ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 1% ดังสมการที่ (2-2) สำหรับอัตราส่วน $w/h \leq 1$ ว่า

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{8h}{w} + 0.25 \frac{w}{h} \right] \quad (2-2 ก)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} + 0.04 \left[1 - \frac{w}{h} \right]^2 \right\} \quad (2-2 ข)$$

สำหรับค่าอัตราส่วน $w/h \geq 1$ จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left[\frac{w}{h} + 1.444 \right] \right\}^{-1} \quad (2-3 ก)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} \quad (2-3 ข)$$

วิธีการที่มีความเที่ยงตรงในการคำนวณที่สูงกว่า ดังสมการที่ (2-4)

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{10}{u} \right]^{-ab} \quad (2-4 ข)$$

โดย u คือ ค่าอัตราส่วนของ W/h และค่า b มีค่าเป็น

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{u^4 + (u/52)^2}{u^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln [1 + (u/18.1)^3]$$

และ

$$b = 0.564 \left[\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right]^{0.053}$$

ในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u} \right)^2} \right] \quad (2-4 \text{ ก})$$

โดย F มีค่าเป็น

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{u} \right)^{0.7528} \right]$$

จากสมการที่ (2-4) นี้ ค่า $\epsilon_r \leq 128$ และค่า u มีค่าระหว่าง 0.01 ถึง 100 ($\epsilon_r \leq 128$ และ $0.01 \leq u \leq 100$) จะทำให้ผลของการคำนวณของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.2 %

สำหรับค่า $Z_c \sqrt{\epsilon_{re}}$ จะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 % ถ้าค่า $u \leq 1$ และจะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.03 % หากว่าค่า $u \leq 1000$ [4]

2.1.6 ค่าความยาวคลื่นบนสตริป ค่าคงที่การแพร่กระจาย และค่าความเร็วเฟส

เมื่อทราบค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าความยาวคลื่นบนสตริป (λ_g) และค่าคงที่การแพร่กระจาย อันได้แก่ ค่าคงที่ของการแพร่ (propagation constant, β) และค่าความเร็วเฟส (phase velocity, v_p) ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-5 \text{ ก})$$

เมื่อ λ_0 เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศซึ่งเป็นส่วนกลับของความถี่ (f) และหากต้องการทราบค่าความยาวคลื่นบนสตริปในหน่วยของมิลลิเมตร จะได้ว่า

$$\lambda_s = \frac{300}{f(\text{GHz})\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-5 \text{ ข})$$

สำหรับค่าคงที่ของการแพร่ และค่าความเร็วเฟส สามารถหาได้จาก

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_s} \quad (2-5 \text{ ค})$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2-5 \text{ ง})$$

เมื่อ c คือค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)

2.1.7 การสังเคราะห์หาความกว้างต่อความหนา W/h

ในการคำนวณหาความกว้างต่อความหนา W/h ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_c และค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_{re} สามารถแสดงได้ดังนี้ สำหรับที่ $W/h \leq 2$ พิจารณาได้เป็น

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (2-6)$$

และสำหรับที่ $W/h \geq 2$ พิจารณาได้เป็น

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B-1) - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2-7)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (2-8)$$

และ

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-9)$$

2.1.8 ผลกระทบจากความหนาของสตริป

ความหนาของสตริป (t) โดยปกติจะมีค่าน้อยมากๆ จนอาจพิจารณาได้ว่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติค่าความหนาดังกล่าวมิใช่ศูนย์ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ซึ่งค่าความหนา ดังกล่าวจะมีผลต่อทั้งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ โดยจะเริ่มพิจารณาจากสมการที่ (2-2) และ (2-3) ได้ว่า

สำหรับที่ $w/h \leq 1$ พิจารณาได้เป็น

$$Z_c(t) = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left\{ \frac{8}{w(t)/h} + 0.25 \frac{w(t)}{h} \right\} \quad (2-10 ก)$$

และสำหรับที่ $w/h \geq 1$ พิจารณาได้เป็น

$$Z_c(t) = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left\{ \frac{w(t)}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w(t)}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2-12 ข)$$

โดยที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วน w/h ที่มีผลกระทบจากความหนาของสตริป (t) ได้ว่า

$$\frac{w(t)}{h} = \begin{cases} \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left[1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right] & ; (w/h \leq 0.5\pi) \\ \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left[1 + \ln \frac{2ht}{t} \right] & ; (w/h \geq 0.5\pi) \end{cases} \quad (2-10 ค)$$

และสำหรับค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่ได้รับผลกระทบจากความหนาของสตริป จะพิจารณาได้ว่า

$$\epsilon_{re}(t) = \epsilon_{re} - \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{w/h}} \quad (2-10 ง)$$

โดยที่ค่า ϵ_{re} เป็นค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่พิจารณาให้ความหนาของสตริปเป็นศูนย์ และจากการพิจารณาสมการที่ผ่านมาพบว่าผลกระทบของความหนาของสตริปต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะมีผลน้อยมากหากว่าอัตราส่วนของความหนาของสตริปต่อความหนาของชั้น ไดอิเล็กตริกน้อย (โดยปกติ $t \ll h$) อย่างไรก็ตามความหนาของสตริป

จะมีผลอย่างยิ่งต่อการสูญเสียของคลื่นความถี่บนแผ่นตัวนำ (conductor loss) ของสายนำสัญญาณบนไมโครสตริป [2]

2.1.9 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายออกของคลื่น

การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายออกของคลื่นจะมีค่าที่ไม่คงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่เดินทางบนสตริปซึ่งจะกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่แปรผันตามความถี่เป็น $\epsilon_{re}(f)$ ดังนั้นจึงได้ผลของการพิจารณาเป็น

$$\epsilon_{re}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{re}}{1 + (f/f_{50})^m} \quad (2-11 ก)$$

โดยที่ค่า f_{50} สามารถหาได้จาก

$$f_{50} = \frac{f_{TM0}}{0.75 + (0.75 - 0.332\epsilon_r^{-1.73})(w/h)} \quad (2-11 ข)$$

และค่า f_{TM0} หาได้โดย

$$f_{TM0} = \frac{c}{2\pi h \sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{re}}} \tan^{-1} \left[\frac{\epsilon_{re} \sqrt{\epsilon_{re} - 1}}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{re}}} \right] \quad (2-11 ค)$$

ซึ่งค่าของ $m = m_0 m_c \leq 2.32$ และสามารถหาค่า m_0 กับ m_c ได้จาก

$$m_0 = 1 + \frac{1}{1 + \sqrt{w/h}} + 0.32 \left[\frac{1}{1 + \sqrt{w/h}} \right]^3 \quad (2-11 ง)$$

$$\left\{ 1 + \frac{1.4}{1 + w/h} \left\{ 0.15 - 0.235 \exp\left(\frac{-0.45f}{f_{50}}\right) \right\} \right\} \quad (2-11 จ)$$

1

ในขณะที่ c คือ ความเร็วของคลื่นที่เดินทางในอากาศ และหากว่าผลคูณของ m_0 และ m_c มีค่ามากกว่า 2.32 จะประมาณให้ว่ามีค่าเป็น 2.32 จึงอาจกล่าวได้ว่าค่า m นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2.32 เท่านั้น ซึ่งจากสมการที่ (2-11) จะเห็นได้ว่าหากค่าความถี่ยิ่งสูงมากขึ้น เท่าใด ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่มีผลต่อความถี่หรือ $\epsilon_{re}(f)$ จะเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นไดอิเล็กตริกบนโครงสร้างไมโครสตริปนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากสมการที่กล่าวมา จะมีความผิดพลาดเพียง

0.6 % หากว่าค่าอัตราส่วน w/h มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 และ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_{re}) มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 128

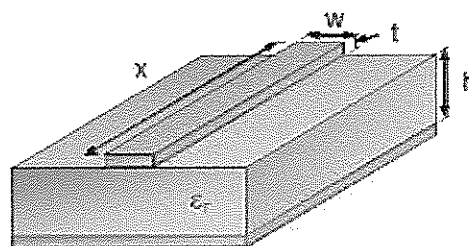
สำหรับผลกระทบที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สามารถประมาณได้จาก

$$Z_c(f) = Z_c \frac{\epsilon_{re}(f) - 1}{\epsilon_{re} - 1} \sqrt{\frac{\epsilon_{re}}{\epsilon_{re}(f)}} \quad (2-12)$$

โดย Z_c เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ [3]

2.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป หรือเรียกสั้นๆ ว่า ไมโครสตริปไลน์ ได้รับความนิยมนำมาใช้กับความถี่ในย่านไมโครเวฟ เพราะมีข้อดี คือ ง่ายต่อการเชื่อมต่อและมีขนาดเล็ก รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของไมโครสตริปไลน์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นแถบตัวนำแคบๆ วางอยู่บนชั้นวัสดุฐานรอง (substrate) ซึ่งเป็นสาร ไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นระนาบกราวด์ (ground plane) ซึ่งมีลักษณะเป็นโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองในบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบตัวนำแคบ ๆ กับผิวโลหะของระนาบกราวด์ด้านล่าง การที่แถบตัวนำของสายนำสัญญาณ ไมโครสตริปมีด้านบนสัมผัสกับอากาศ และด้านล่างสัมผัสกับสาร ไดอิเล็กตริก ทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกแยกไปในอากาศส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือผ่านไปในสาร ไดอิเล็กตริก แถบตัวนำจะมีความกว้าง W ความหนา t ถูกวางบนวัสดุฐานรอง (substrate) โดยที่ความกว้างของสตริปนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปที่นำมาใช้ออกแบบสายอากาศโดยทั่วไปนั้นมีค่าประมาณ 0.017 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางกายภาพของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป [4]

2.3 การออกแบบไมโครสตริปไลน์

ไมโครสตริปไลน์มีลักษณะเป็นแถบโลหะแคบ (พื้นโลหะขาว) โดยความกว้างของแถบโลหะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปไลน์ที่ต้องการออกแบบเพื่อให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่นำมาต่อเข้าที่ปลายสายไมโครสตริป ส่วนความยาวเป็นตัวช่วยในการปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเกิดน้อยที่สุด ถ้ากำหนดให้ W เป็นความกว้างของสายไมโครสตริป h เป็นความสูงของวัสดุฐานรอง (substrate) ที่มีความหนาของชั้นโลหะน้อยมาก และ Z_c เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบโคแอกเซียล สมการในการคำนวณหาค่าความกว้าง W มีดังนี้

$$\text{กรณี } \frac{W}{h} \leq 1$$

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) / (\epsilon_{\text{eff}})^{1/2}$$

เมื่อ

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + 0.5(\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2}$$

$$\text{กรณี } \frac{W}{h} \geq 1$$

$$Z_c = \frac{120\pi / (\epsilon_{\text{eff}})^{1/2}}{\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.44 \right)}$$

โดยธรรมชาติไมโครสตริปไลน์มีคุณสมบัติในการทำให้คลื่นกระจัดกระจาย (dispersive) นั่นคือ การที่ ϵ_{eff} แปรตามค่าความถี่ และ โครงสร้างของสายไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายไมโครสตริปไลน์ คือ

$$\lambda_g = \frac{c}{f(\epsilon_{\text{eff}})}$$

เมื่อ λ_g คือ ความยาวคลื่นสัมพันธ์

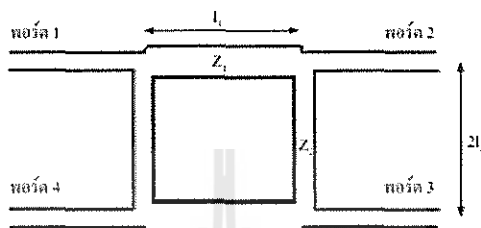
c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล (effective dielectric constant)

f คือ ความถี่หลักที่ต้องการออกแบบของสายอากาศ

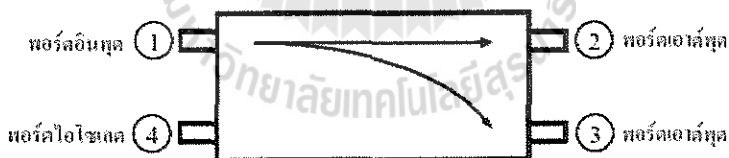
2.4 วงจรบรรณชีไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์

คุณสมบัติทั่วไปของวงจรบรรณชีไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ดังรูปที่ 2.3 คือเมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาทางพอร์ต 1 สัญญาณจะถูกแบ่งออกไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 3 ซึ่งเป็นพอร์ตเอาต์พุต และจะไม่มีสัญญาณออกมาที่พอร์ต 4 ซึ่งเรียกว่าเป็น “พอร์ตไอโซเลต”



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของบรรณชีไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์

ในทางกลับกันหากป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ต 4 สัญญาณก็จะถูกแบ่งออกไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 3 และจะไม่มีสัญญาณออกมาที่พอร์ต 1 เลย และเนื่องจากตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ชนิดนี้เป็นโครงสร้างแบบสมมาตร ดังนั้นหากกลับทางพอร์ตให้พอร์ตอินพุตเป็นพอร์ตเอาต์พุต ผลที่ได้ก็จะไม่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม การที่จะเกิดคุณสมบัติดังกล่าวได้นั้นก็ต่อเมื่อเลือกโหลดที่ถูกต้องเพื่อให้เกิดการแมทช์ทั้ง 4 พอร์ต ซึ่งจะทำให้เกิดทิศทางการไหลของสัญญาณดังรูปที่ 2.4

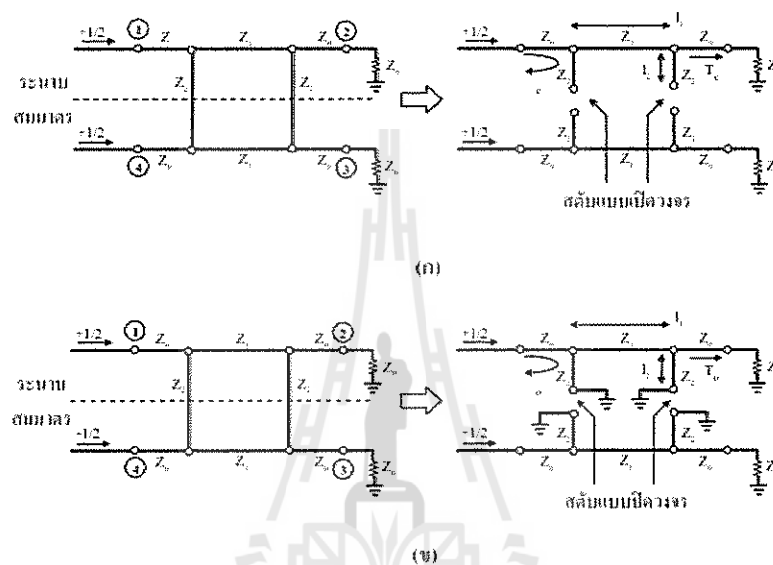


รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของสัญญาณในบรรณชีไลน์ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์

ดังนั้นในการวิเคราะห์โครงข่ายชนิดนี้ จะต้องแยกการวิเคราะห์ออกเป็นในโหมดคู่ (even mode) และในโหมดคี่ (odd mode) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงข่าย 2 พอร์ต (two port network)

ลักษณะการวิเคราะห์ในโหมดคู่คือจะมีสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีขนาดเท่ากันและมีเฟสเดียวกันป้อนเข้าไปที่พอร์ต 1 และพอร์ต 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) จากการป้อนอินพุตในลักษณะดังกล่าวจะได้ว่าที่ระนาบสมมาตรนั้นจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์และมีค่าขนาดของแรงดันสูงสุด ซึ่งจะเสมือนว่ามีการเปิดวงจร (open circuit) ระหว่างระนาบสมมาตรนี้โดยเรียกลักษณะดังกล่าวว่า “กำแพงแม่เหล็ก (magnetic wall)”

ลักษณะของการวิเคราะห์ในโหมดคือ จะมีสัญญาณที่มีขนาดเท่ากันแต่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา ป้อนเข้าไปที่พอร์ต 1 และพอร์ต 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) จากการป้อนสัญญาณอินพุตที่ลักษณะดังกล่าวจะได้ว่าที่ระนาบสมมาตรนั้นจะมีค่าการไหลของกระแสสูงสุดแต่จะมีค่าขอแรงดันต่ำสุด ซึ่งจะเสมือนว่ามีการปิดวงจร (short circuit) ระหว่างระนาบสมมาตรนี้ โดยจะเรียกลักษณะดังกล่าวว่า “กำแพงไฟฟ้า (electric wall)”



รูปที่ 2.5 ลักษณะการวิเคราะห์ห้บรานซ์ไฮบริดจังก์ชันเพลอร์ในโหมดคู่และโหมดคี่

(ก) ลักษณะ โหมดคู่

(ข) ลักษณะ โหมดคี่

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่ารูปแบบวงจรทั้งในโหมดคู่และ โหมดคี่จะมีลักษณะของวงจรซึ่งประกอบไปด้วยสตับ (stub) ความยาว l_2 ซึ่งอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_2 ต่ออยู่กับสายนำสัญญาณ ความยาว l_1 ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_1 จากนั้นก็ต่อกับสตับซึ่งมีลักษณะเหมือนกับตัวแรก โดยในลักษณะของวงจรแบบนี้เราสามารถใช้อารามิเตอร์ ABCD (ABCD parameter) มาแทนส่วนประกอบต่างๆของวงจรดังกล่าวได้โดย

กรณี โหมดคู่

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jY_2 \tan(\beta_2 l_2) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_1 l_1) & jZ_1 \sin(\beta_1 l_1) \\ jY_1 \sin(\beta_1 l_1) & \cos(\beta_1 l_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jY_2 \tan(\beta_2 l_2) & 1 \end{bmatrix}$$

ซึ่งจะได้

$$\Gamma_c = \frac{A_c + B_c Y_0 - C_c Z_0 - D_c}{A_c + B_c Y_0 + C_c Z_0 + D_c}$$

$$T_c = \frac{2}{A_c + B_c Y_0 + C_c Z_0 + D_c}$$

เมื่อ

Y_0, Y_1, Y_2	คือค่าแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ
Z_0, Z_1, Z_2	คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ
Γ_c	คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในโหมคคู่ (reflection coefficient)
T_c	คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโหมคคู่ (transmission coefficient)

กรณี โหมคคู่

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jY_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_1 l_1) & jZ_1 \sin(\beta_1 l_1) \\ jY_1 \sin(\beta_1 l_1) & \cos(\beta_1 l_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan(\beta_2 l_2) & 1 \end{bmatrix}$$

ซึ่งจะได้

$$\Gamma_o = \frac{A_o + B_o Y_0 - C_o Z_0 - D_o}{A_o + B_o Y_0 + C_o Z_0 + D_o}$$

$$T_o = \frac{2}{A_o + B_o Y_0 + C_o Z_0 + D_o}$$

เมื่อ

Y_0, Y_1, Y_2	คือค่าแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ
Z_0, Z_1, Z_2	คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ
Γ_o	คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในโหมคคู่
T_o	คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในโหมคคู่

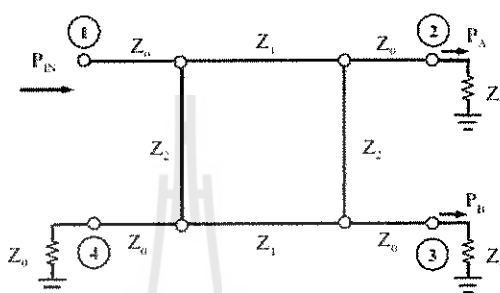
จากนั้นนำทั้งสองสมการมาทำการทับซ้อน (superposition) จะสามารถหาค่า S-Parameter ได้โดย

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{2}T_c + \frac{1}{2}T_o$$

$$S_{11} = \frac{1}{2}\Gamma_c + \frac{1}{2}\Gamma_o$$

$$S_{13} = S_{31} = \frac{1}{2}T_c + \frac{1}{2}T_o$$

$$S_{33} = S_{31} = \frac{1}{2}\Gamma_c + \frac{1}{2}\Gamma_o$$



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์การแบ่งกำลังงานของบรานช์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์

โดยปกติแล้ววงจรบรานช์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายอินพุตเข้าที่พอร์ต 1 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนมาออกที่เอาต์พุต พอร์ต 2 และพอร์ต 3 ในสัดส่วนที่เท่าๆกัน แต่หากต้องการให้กำลังงานที่เอาต์พุตออกมาไม่เท่ากันก็สามารถทำได้คือ กรณีที่ต้องการให้กำลังงานออกมากที่เอาต์พุตไม่เท่ากันสามารถออกแบบวงจรได้โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของส่วนประกอบของบรานช์ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ได้โดยพิจารณารูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.6 เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่พอร์ต 1 สัญญาณจะถูกแบ่งกำลังงานไปออกที่พอร์ตเอาต์พุต พอร์ต 2 และพอร์ต 3 โดยที่เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของแต่ละส่วนประกอบได้จาก

$$Z_1 = Z_0 \sqrt{\frac{P_A / P_B}{1 + P_A / P_B}}$$

$$Z_2 = Z_0 \sqrt{P_A / P_B}$$

เมื่อ P_A คือกำลังงานเอาต์พุตที่ปรากฏที่พอร์ต 2 มีหน่วยเป็นวัตต์

P_B คือกำลังงานเอาต์พุตที่ปรากฏที่พอร์ต 3 มีหน่วยเป็นวัตต์ [5]

2.5 พารามิเตอร์การส่งผ่าน

พารามิเตอร์การส่งผ่านที่จะพิจารณาสำหรับวงจรองความถี่สูง ซึ่งจะถูกพิจารณาเป็นโครงข่ายแบบสองพอร์ต (two-port network) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วย

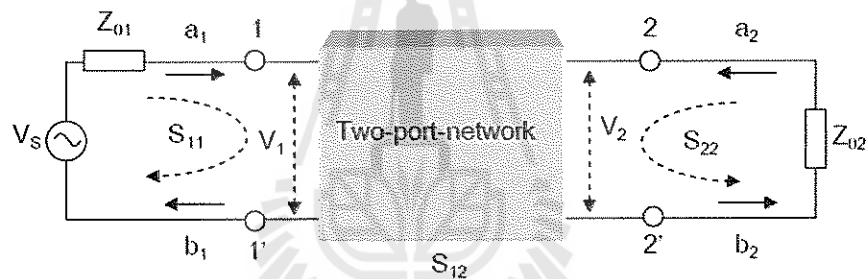
2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับทางด้านพอร์ตอินพุต หรือค่า S_{11} (return loss)

2.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ตอินพุตสู่พอร์ตเอาต์พุต หรือค่า S_{21} (insertion loss)

2.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ตเอาต์พุตสู่พอร์ตอินพุต หรือค่า S_{12}

2.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับทางด้านเอาต์พุต หรือค่า S_{22}

โดยปกติจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับทางด้านพอร์ตอินพุต หรือค่า S_{11} (return loss) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ตอินพุตสู่พอร์ตเอาต์พุต หรือค่า S_{21} (insertion loss) เป็นสำคัญ



รูปที่ 2.7 โครงข่ายแบบสองพอร์ตและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2-21 \text{ ก})$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2-21 \text{ ข})$$

เมื่อ $a_n = 0$ ในกรณีที่มีอิมพีแดนซ์สมมูลกัน และไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่น ณ ที่พอร์ต n ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปสมการของเมทริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

สำหรับพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{22} ต่างก็เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ โดยที่ S_{12} และ S_{21} เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับวงจรที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยเฉพาะ โดยจะพิจารณาในด้านของค่าขนาดและเฟส นั่นคือ $S_{mn} = |S_{mn}|e^{j\theta_{mn}}$ เมื่อ m และ n มีค่าตั้งแต่ 1,2,... ในขณะที่ค่าทางขนาดมักพิจารณาในหน่วยของเดซิเบลจาก

$$20 \log |S_{mn}| \quad (2-23)$$

โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (insertion loss) ระหว่างพอร์ต n และ m จะนิยามว่าเป็น L_A และค่าพารามิเตอร์การสะท้อนกลับ (return loss) ที่พอร์ต n จะนิยามด้วย L_R ดังสมการ

$$L_A = -20 \log |S_{mn}| \dots m = n \quad (2-24)$$

$$L_R = 20 \log |S_{nn}|$$

โดยค่าพารามิเตอร์การสะท้อนกลับมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR; voltage standing wave ratio) ดังสมการ

$$VSWR = \frac{1 + |S_{nn}|}{1 - |S_{nn}|} \quad (2-25)$$

นอกจากพารามิเตอร์การส่งผ่านที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในย่านไมโครเวฟแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งที่มีผลอย่างยิ่งต่อการพิจารณา นั่นคือ เฟสหน่วง (phase delay, τ_p) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเฟสของคลื่นทางพอร์ต อินพุตกับเฟสของคลื่นทางพอร์ตเอาต์พุต

$$\tau_p = \frac{\phi_{21}}{\omega} \quad (2-26 ก)$$

และกลุ่มหน่วง (group delay, τ_d) ซึ่งเป็นการพิจารณาความแตกต่างของเฟสเช่นเดียวกับ ในกรณีของเฟสหน่วง แต่คลื่นทางด้านอินพุตจะมีลักษณะเป็นเบสแบนด์ โดยที่พอร์ต์ 1 เป็นพอร์ต์ทางด้านอินพุตและพอร์ต์ 2 เป็นพอร์ต์ทางด้านเอาต์พุต

$$\tau_d = \frac{d\phi_{21}}{d\omega} \quad (2-26 \text{ ข})$$

ในการวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองพอร์ต์ สามารถพิจารณาพารามิเตอร์การสะท้อนกลับทางด้านอินพุต (S_{11}) ร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต (Z_{01}) หรือ แทนด้วย $Z_{in} = V_1/I_1$ เทียบกับสมการที่ (2-21 ก) ได้ว่า

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} = \frac{V_1/\sqrt{Z_{01}} - I_1\sqrt{Z_{01}}}{V_1/\sqrt{Z_{01}} + I_1\sqrt{Z_{01}}} \quad (2-27)$$

เมื่อแทนค่า V_1 ด้วย $Z_{in} I_1$ จึงได้สมการใหม่เป็น

$$S_{11} = \frac{Z_{in1} - Z_{01}}{Z_{in1} + Z_{01}} \quad (2-27 \text{ ก})$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้พารามิเตอร์การสะท้อนกลับทางด้านเอาต์พุตดังสมการที่ (2-27 ข) โดยที่ Z_{in2} มีค่าเท่ากับ V_2 / I_2 ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต หากพิจารณา ทางด้านพอร์ต์ 2 เป็นพอร์ต์ทางด้านอินพุต

$$S_{22} = \frac{Z_{in2} - Z_{02}}{Z_{in2} + Z_{02}} \quad (2-27 \text{ ข})$$

ค่าพารามิเตอร์การสะท้อนกลับ และพารามิเตอร์การส่งผ่านมีประโยชน์อย่างมากต่อ การวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งหากเป็นโครงข่ายแบบสมมาตรจะได้ว่า $S_{12} = S_{21}$ และ $S_{11} = S_{22}$ และในกรณีที่ เป็นโครงข่ายแบบพาสซีฟที่ไม่มีการสูญเสียของคลื่นจะได้ว่ากำลังในการส่งผ่านกับกำลังในกาสะท้อนกลับของคลื่นจะต้องเท่ากับกำลังส่งทั้งหมดที่ป้อนเข้าไปในโครงข่าย ดังนั้นจึงได้สมการ [6]

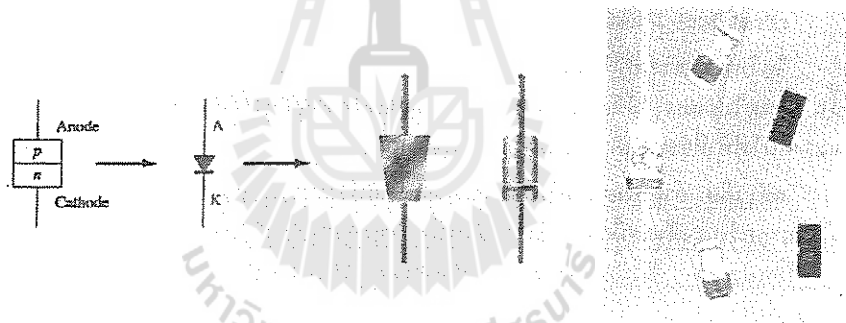
$$S_{21}S_{21}^* + S_{11}S_{11}^* = 1 \quad \text{หรือ} \quad |S_{21}|^2 + |S_{11}|^2 = 1 \quad (2-28)$$

$$S_{12}S_{12}^* + S_{22}S_{22}^* = 1 \quad \text{หรือ} \quad |S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 = 1$$

2.6 ไดโอด

ไดโอดเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปในสมัยก่อนไดโอดมักจะเป็นแบบหลอดสุญญากาศ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้สิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ ซึ่งทำด้วยสารกึ่งตัวนำได้เข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศ ไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำมีสองขั้วและมีขนาดเล็กใช้งานได้ง่าย [7]

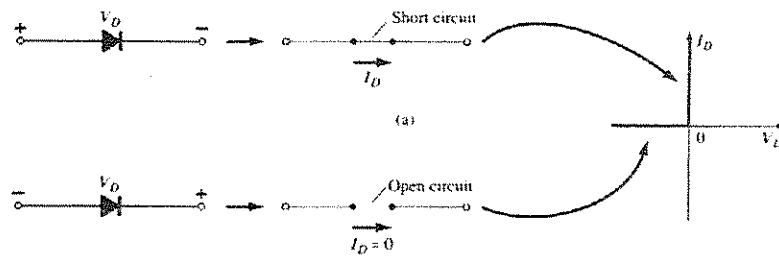
ไดโอด เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ p-n สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (anode ; A) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ แคโทด (cathode ; K) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด n ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงขั้วของ ไดโอด 2 ขั้ว ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำ

2.6.1 ไดโอดในทางอุดมคติ (ideal diode)

ไดโอดในอุดมคติมีลักษณะเหมือนสวิทช์ที่สามารถนำกระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว

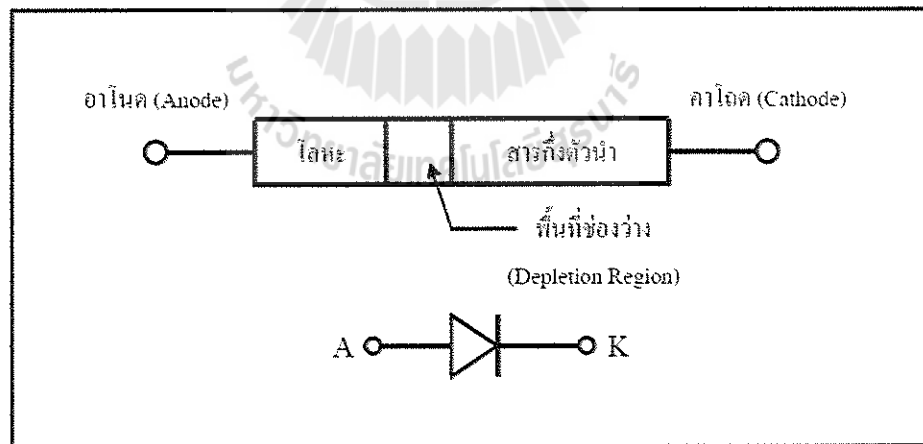


รูปที่ 2.9 การทำงานของ ไดโอดเมื่อต่อขั้วเบคเตอร์

จากรูปที่ 2.9 จากภาพถ้าต่อขั้วเบคเตอร์ให้เป็นแบบไบแอสตรง ไดโอดจะเปรียบเสมือนกับสวิตช์ที่ปิด (close switch) หรือไดโอดลัดวงจร (short circuit) I_D ไหลผ่านไดโอดได้ แต่ถ้าต่อขั้วเบคเตอร์แบบไบแอสกลับ ไดโอดจะเปรียบเสมือนสวิตช์เปิด (open switch) หรือเปิดวงจร (open switch) ทำให้ I_D เท่ากับศูนย์ [8]

2.6.2 คุณสมบัติของขอตักไดโอด

ขอตักไดโอดมีโครงสร้างเป็นหน้าสัมผัสโลหะที่ปลายข้างหนึ่ง เรียกส่วนนี้ว่าเป็น แอโนด (anode) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำ เรียกส่วนนี้ว่าเป็น แคโทด (cathode) โครงสร้างของขอตักไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.10 [9]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของขอตักไดโอด

บทที่ 3

การจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

3.1 บทนำ

ในบทที่ 3 นี้จะเป็นการแนะนำการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจในการใช้โปรแกรมอย่างถูกวิธีและให้รู้หลักการสร้างแบบจำลองรวมถึงวิธีการ ประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ค่าต่างๆ จุดประสงค์เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาและใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ได้เข้าใจในโปรแกรมมากขึ้น

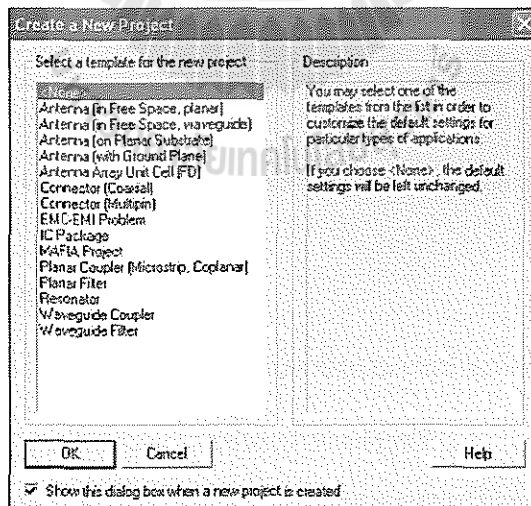
3.2 CST MICROWAVE STUDIO

3.2.1 การเริ่มสร้างแบบจำลอง

1. เมื่อเปิดโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO แล้วให้เลือกที่

เมนู File → New

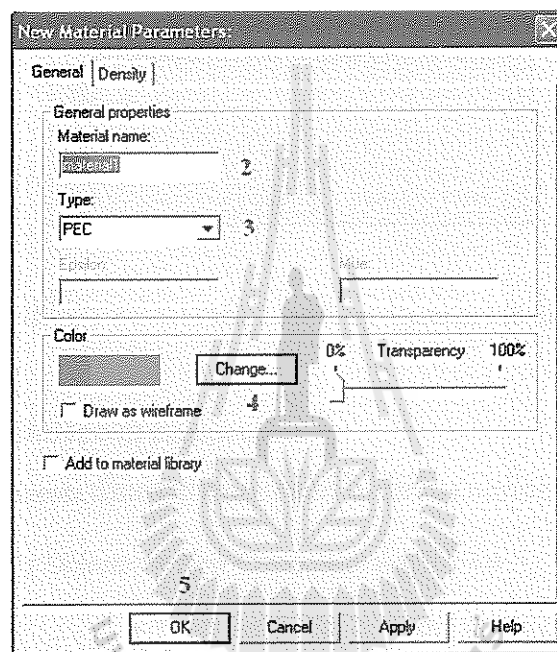
2. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.1 เป็นการสร้าง templates ให้กับชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะมีแบบให้เลือกแล้วแต่ความต้องการ หากไม่ต้องกำหนดให้เลือก None แล้วเลือก OK



รูปที่ 3.1 หน้าต่างของ Create a New Project

3.2.2 การสร้างวัสดุ Material

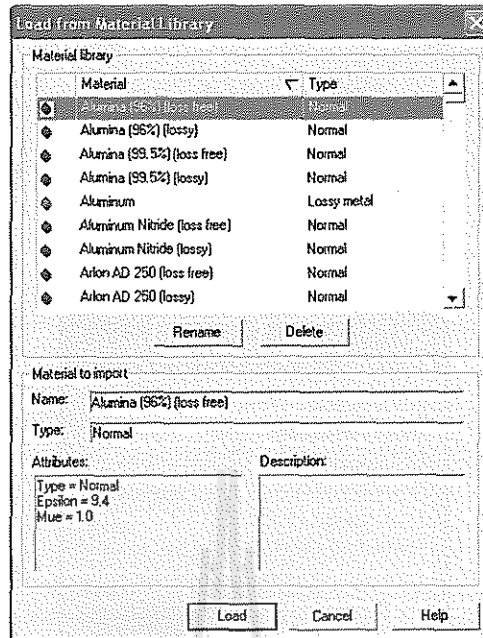
1. เลือกเมนู Solve → Materials → New Materials จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.2
2. ตั้งชื่อให้กับวัสดุ
3. กำหนด ชนิดของวัสดุ (PEC, Normal, Anisotropic และ Lossy Metals)
4. เลือกสีให้กับวัสดุ
5. เลือก OK



รูปที่ 3.2 หน้าต่างของ New Material Parameters

3.2.3 Load from Material Library

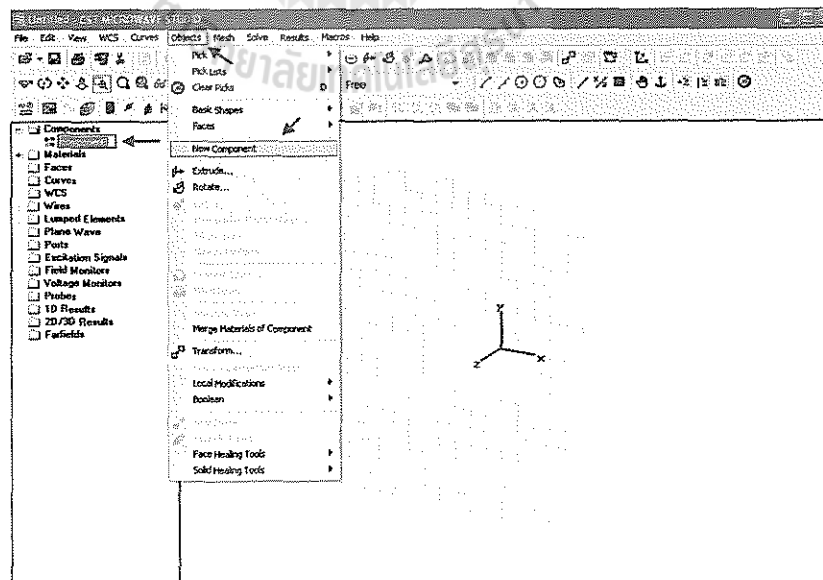
1. โปรแกรม CST มีข้อมูลของวัสดุบางชนิด ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ เลือก Solve → Materials → Load from Material Library จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.3
2. เลือก วัสดุที่ต้องการ จะเห็นว่าแต่ละชนิดจะมีค่าคุณสมบัติให้อัด โนมติ
3. เลือก OK



รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Load from Material Library


3.2.4 การสร้างองค์ประกอบ Components

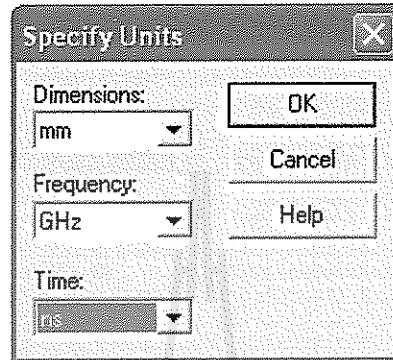
การสร้าง Components เป็นการกำหนดเลขอร์ให้กับชิ้นงานเพื่อความสะดวกในการสร้างงาน แต่ละชิ้น โดยเลือกเมนู Objects → New Component ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสร้าง Components


3.2.5 การกำหนดหน่วย Units

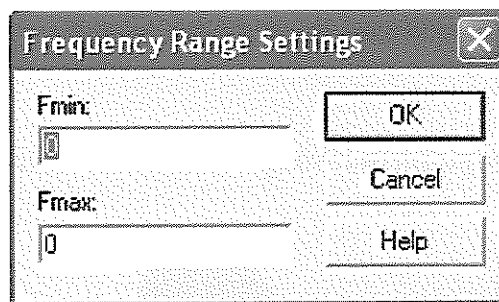
1. เลือกเมนู Solve → Units หรือกดที่เครื่องมือ  (Set units) จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.5
2. เลือก Dimensions ความถี่และเวลาที่ต้องการ
3. เลือก OK



รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Specify Units


3.2.6 การกำหนดความถี่ Frequency

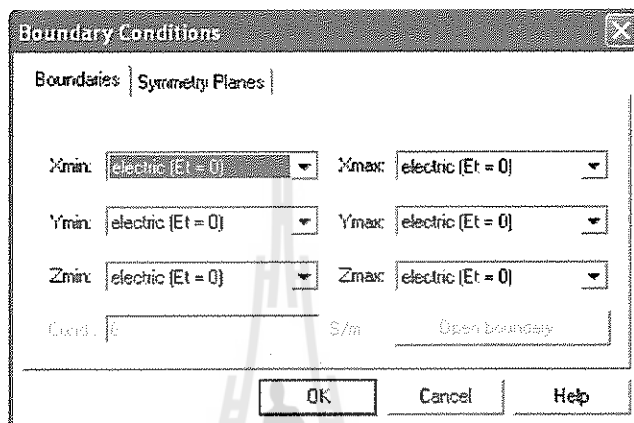
1. หลังจากสร้างชิ้นงานแล้วจะสามารถกำหนดความถี่ได้โดยเลือกเมนู Solve → Frequency หรือกดที่เครื่องมือ  (Frequency rang) จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.6
2. กำหนด ความถี่เริ่มต้น F_{min} และ ความถี่สูงสุด F_{max} ค่าของความถี่ที่ตั้งไว้จะตั้งค่า Signal Monitors โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Frequency Range Settings

3.2.7 การกำหนดขอบเขต Boundary Conditions

1. เลือกเมนู Solve → Boundary Conditions หรือ กดที่ เครื่องมือ  (Specify boundary conditions) จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.7
2. เลือกขอบเขตตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Boundary Conditions

Electric: ค่าสนามไฟฟ้าของด้านที่เลือก ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ มีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 3.7 ก



รูปที่ 3.7 ก Electric

Magnetic: ค่าสนามแม่เหล็กของด้านที่เลือก ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 3.7 ข



รูปที่ 3.7 ข Magnetic

Open (PML): เสมือนเป็นอากาศว่าง Free Space คลื่นสามารถผ่านไปได้ ดังรูปที่ 3.7 ค



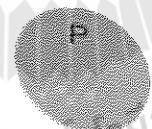
รูปที่ 3.7 ค Open (PML)

Open (add space): เหมือน Open (PML) แต่จะเพิ่มระยะสำหรับการคำนวณ far field การกำหนดแบบนี้ส่วนมากใช้ในการสร้างสายอากาศ ดังรูปที่ 3.7 ง



รูปที่ 3.7 ง Open (add space)

Periodic: เป็นการเชื่อมขอบเขตด้านตรงข้ามเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.7 จ



รูปที่ 3.7 จ Periodic

Conducting Wall: เสมือนเป็นผนังของวัสดุโลหะแบบ lossy ดังรูปที่ 3.7 ช




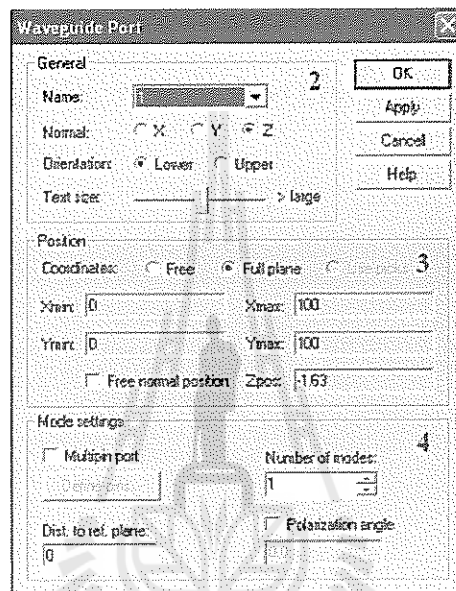
รูปที่ 3.7 ช Conducting Wall

3.2.8 การป้อนพลังงานโดยการกำหนดพอร์ต

การกำหนด ทำได้ 2 วิธี คือ Waveguide Port และ Discrete Port

ก) Waveguide Port

1. เลือกเมนู Solve → Waveguide Port หรือเลือกเครื่องมือ  (Waveguide port) จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Waveguide Port

2. ส่วนของ General – Normal สามารถเลือกระนาบ X, Y และ Z ที่ต้องการป้อนพอร์ตได้ Orientation เป็นการกำหนดระนาบให้อยู่ด้านใดของระนาบนั้น

3. ส่วนของ Position – Coordinates

Free: หากเลือก Normal ระนาบใด เราจะกำหนดความกว้างยาวของพอร์ตอีก 2 ระนาบดังนี้

Normal Edit fields

X Ymin, Ymax, Zmin, Zmax

Y Xmin, Xmax, Zmin, Zmax

Z Xmin, Xmax, Ymin, Ymax

Full plane : หากเลือกคำสั่งนี้ ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า เพราะจะสั่งให้ทั้งระนาบนั้นเป็นการป้อนพอร์ตทั้งหมด


Free normal position: กำหนดระยะการวางพอร์ต

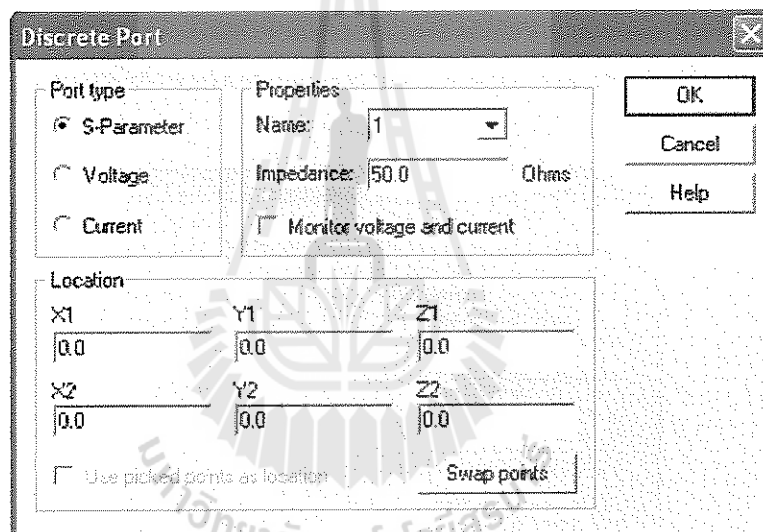
4. ส่วนของ Mode Setting เป็นการสร้างจุดอ้างอิงของพอร์ต

5. เลือก OK

ข) Discrete Port

การสร้างพอร์ตแบบนี้ใช้หลักการสร้างจากจุดหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่ง โดยระหว่างพอร์ตนั้นต้องไม่มีเนื้อของชิ้นงานแรกอยู่

1. เลือกเมนู Solve → Discrete Port หรือเลือกเครื่องมือ  (Discrete port) จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 หน้าต่างของ Discrete Port

1. ส่วนของ Port type เป็นการกำหนดลักษณะเพื่อการประมวลผล

S - Parameter – อ้างอิง โดยให้พอร์ตที่ป้อนเป็น 50 โอห์ม

Voltage – อ้างอิง โดยป้อนแรงดันให้กับพอร์ตตามที่กำหนด

Current – อ้างอิง โดยป้อนกระแสให้กับพอร์ตตามที่กำหนด

2. ส่วนของ location เป็นการกำหนดจุดที่ต้องการในการป้อนพลังงาน โดยรูปแบบของ discrete port จะเป็นดังรูปที่ 3.10



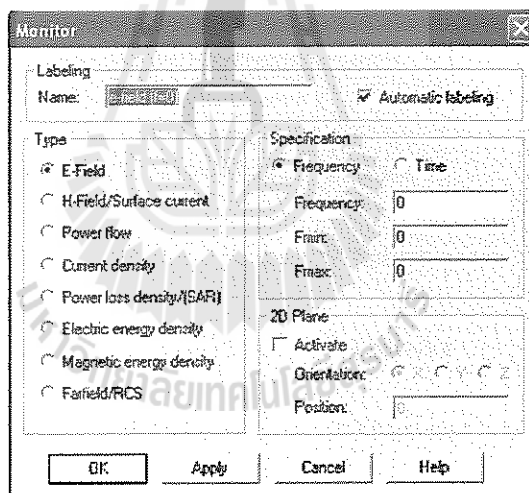
รูปที่ 3.10 รูปแบบ ของ Discrete Port

3.2.9 การกำหนด Field Monitors

ก่อนที่จะทำการประมวลผลจะต้อง เลือกว่าจะดูผลแบบใดบ้าง

1. เลือกเมนู Solve → Field Monitors จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.10
2. เลือก Type ที่ต้องการจะดูการประมวลผล
3. เลือก OK

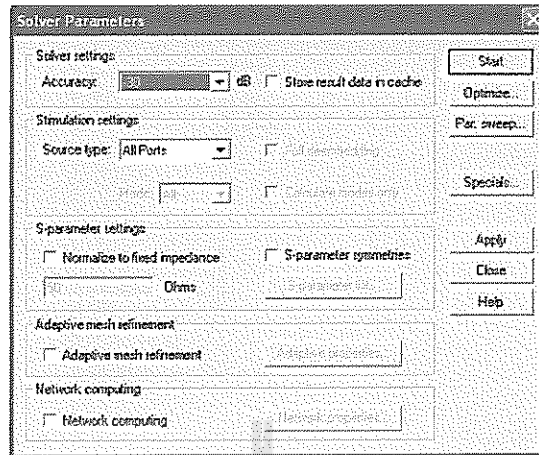
ในการตั้งค่า Field Monitors สามารถกำหนด type ได้หลายตัว



รูปที่ 3.10 รูปของหน้าต่าง Monitor

3.2.10 การประมวลผล







1. เลือกเมนู Solve → transient Solver จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.11
2. กำหนด Accuracy ขึ้นอยู่กับสายอากาศที่ออกแบบมา
3. เลือก Start



รูปที่ 3.11 หน้าต่างของ Solver Parameters


3.2.11 การสร้างรูปทรงพื้นฐาน (Basic Shape Creation)

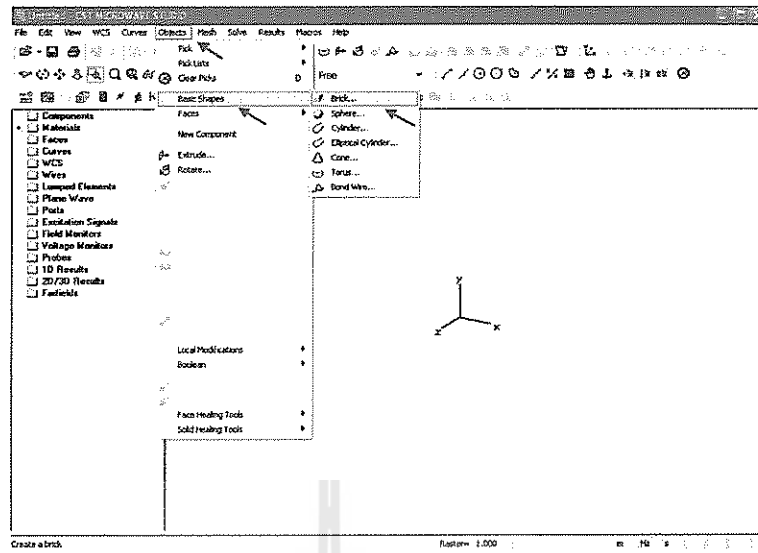
การสร้างรูปทรงพื้นฐานต่างๆในโปรแกรม CST มีดังนี้

-  Object → Basic Shapes → Brick
-  Object → Basic Shapes → Sphere
-  Object → Basic Shapes → Cylinder
-  Object → Basic Shapes → Elliptical Cylinder
-  Object → Basic Shapes → Cone
-  Object → Basic Shapes → Torus

ก) การสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม (Brick)

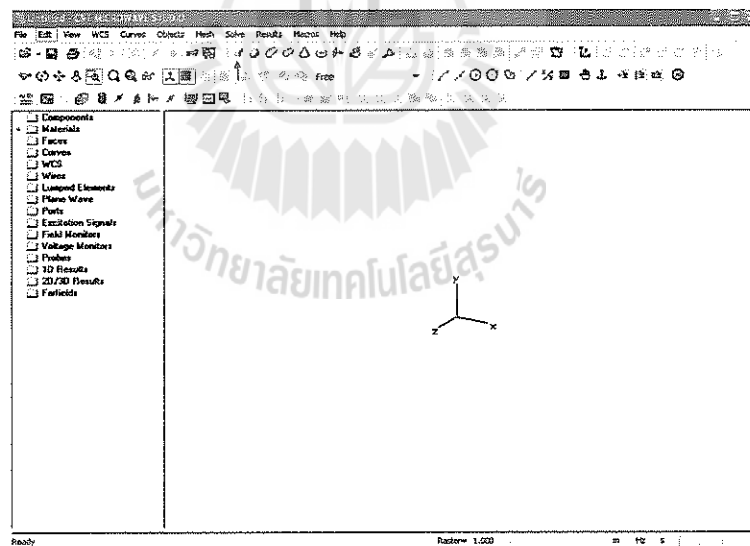
วิธีที่ 1 ไปที่ main menu แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้ ตามรูปที่ 3.12

-  Object → Basic Shapes → Brick



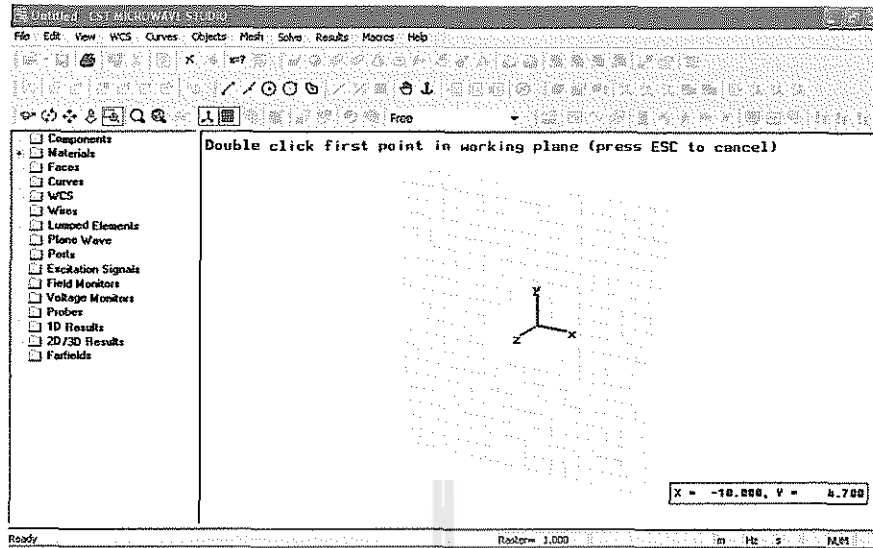
รูปที่ 3.12 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม

วิธีที่ 2 ไปที่ Objects toolbar คลิกที่รูปสี่เหลี่ยม (Create brick) ตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยทางลัด

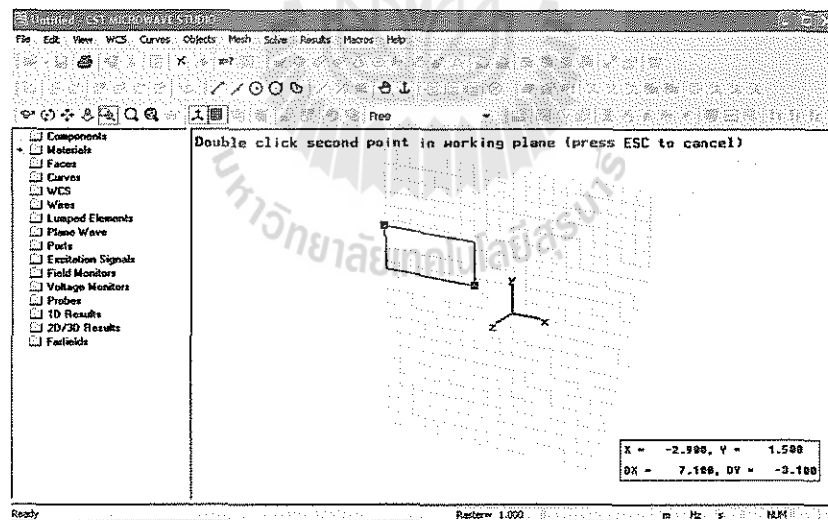
จากทั้ง 2 วิธี จะได้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม

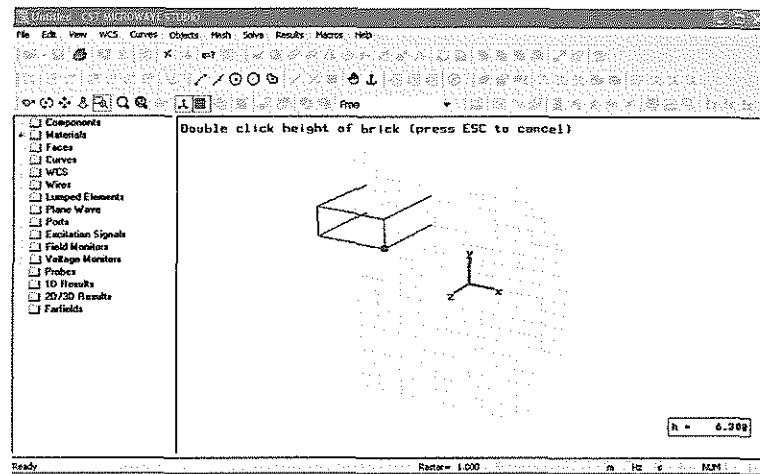
จากนั้นทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ดับเบิ้ลคลิกหนึ่งครั้งบนพื้นที่ว่างแล้วลากเมาส์ออกไปจะได้รูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.15



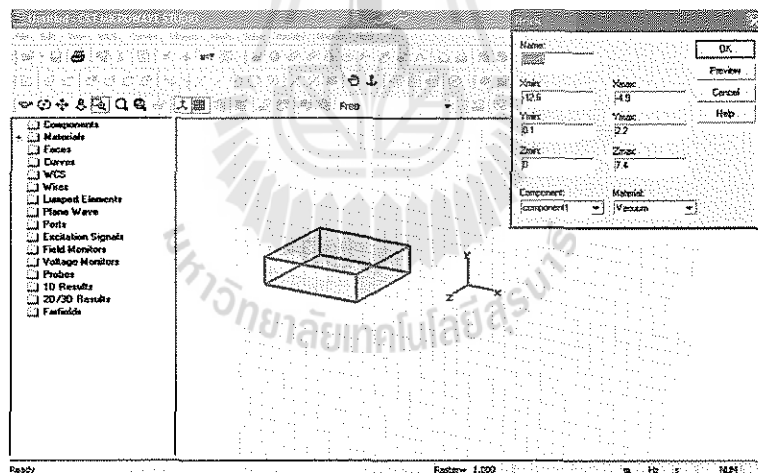
รูปที่ 3.15 รูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 1

2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเมาส์ออกไปจะได้รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2

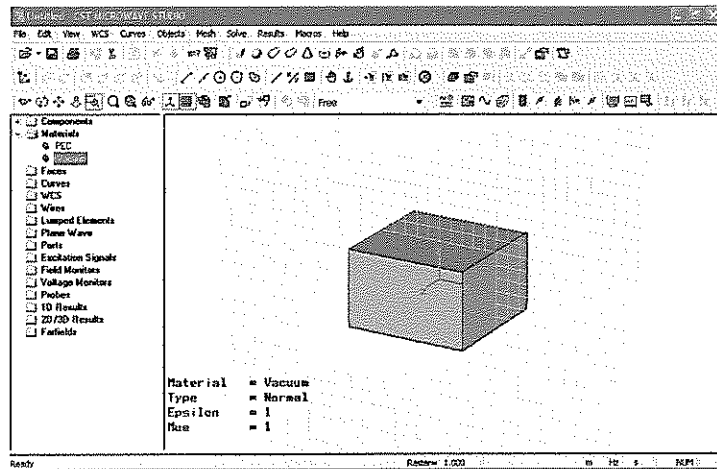
3. คัดเบิ้ลคลิกอีกครั้งจะได้รูปกล่องสี่เหลี่ยมและมีหน้าต่างที่ชื่อ Brick ขึ้นมาดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงรูปกล่องสี่เหลี่ยมและหน้าต่างที่ชื่อ Brick ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 3

4. ตั้งชื่อในช่อง Name กำหนดค่าต่างๆให้ครบ ส่วนตรงช่อง Component กับ Material ให้เลือกอะไรก็ตามที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนต้น

5. คลิกที่ OK ก็จะได้รูปกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

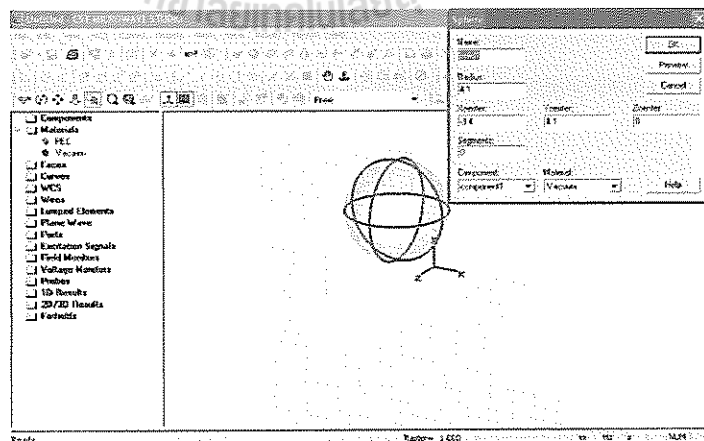
ข) การสร้างรูปทรงกลม (Sphere)

การสร้างรูปทรงกลมมี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก Main menu ดังนี้



Object → Basic Shapes → Sphere

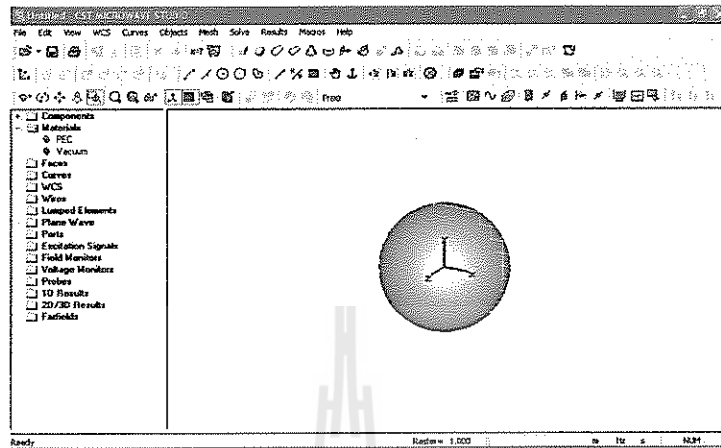
แล้วทำการกำหนดค่าในหน้าต่างที่ชื่อ Sphere ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รูปร่างของทรงกลมและหน้าต่างในการกำหนด

ค่าพารามิเตอร์ของทรงกลม

จากนั้นก็ทำเช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม จะได้รูปทรงกลมออกมาดังนี้
ตามรูปที่ 3.20



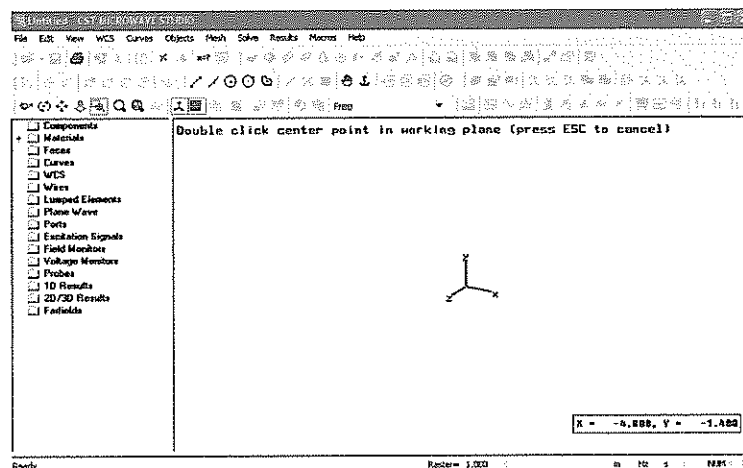
รูปที่ 3.20 รูปทรงกลมที่ได้หลังจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เสร็จแล้ว

ค) การสร้างรูปทรงกระบอก (Cylinder)

การสร้างรูปทรงกระบอก มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

Object → Basic Shapes → Cylinder

เมื่อเข้าไปตามคำสั่งนี้แล้วจะได้หน้าต่างดังรูปที่ 3.21

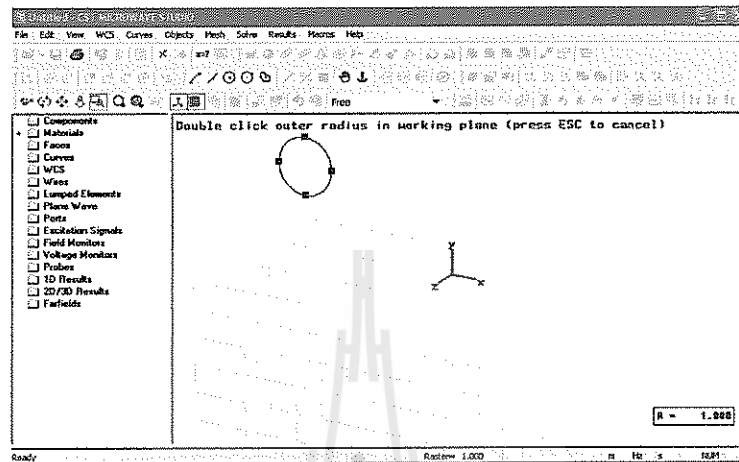


รูปที่ 3.21 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงกระบอก

จากนั้นให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ดับเบิ้ลคลิกที่พื้นที่ว่างหนึ่งครั้งแล้วลากเมาส์ออกไปจะได้รูปวงกลม ดังรูปที่

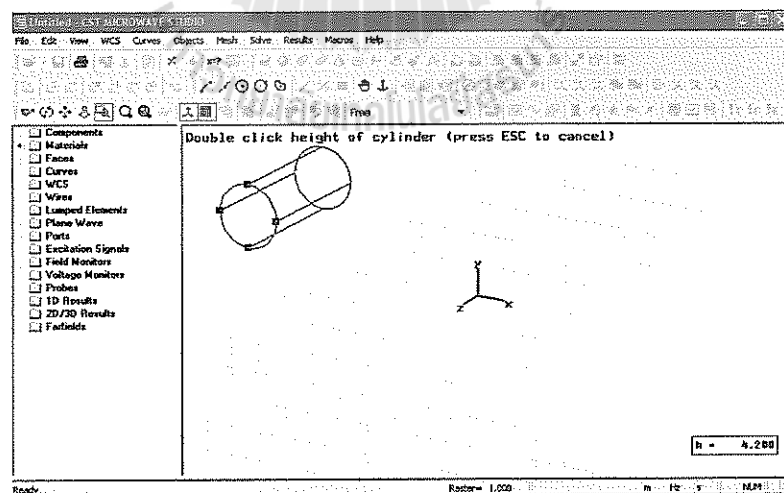
3.22



รูปที่ 3.22 รูปวงกลมที่ได้จากการสร้างรูปทรงกระบอกในขั้นตอนที่ 1

2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเมาส์ออกไปจะได้รูปร่างทรงกระบอก ดังรูป

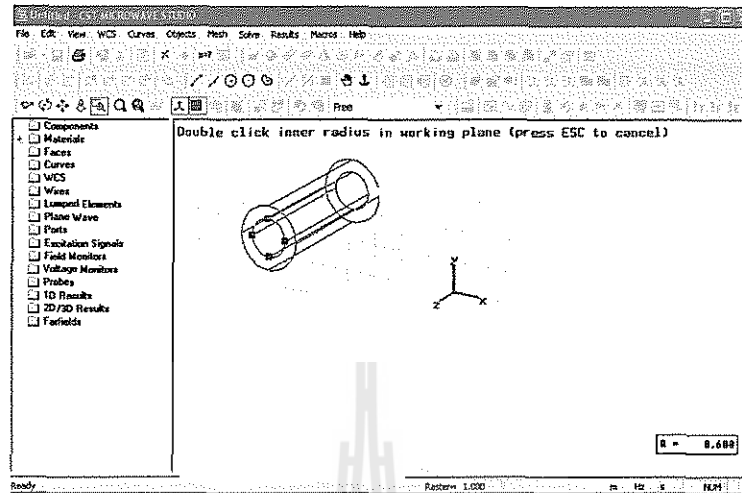
ที่ 3.23



รูปที่ 3.23 รูปร่างทรงกระบอกที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2

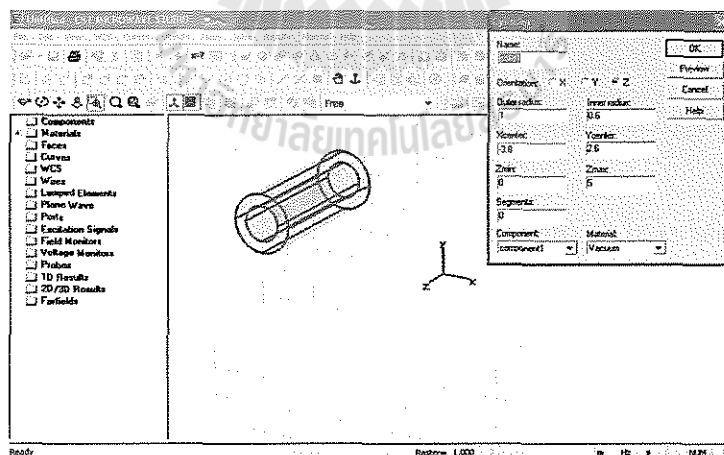
3. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเมาส์เข้าไปด้านในของทรงกระบอก

จากรูปที่ 3.23 จะได้รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง

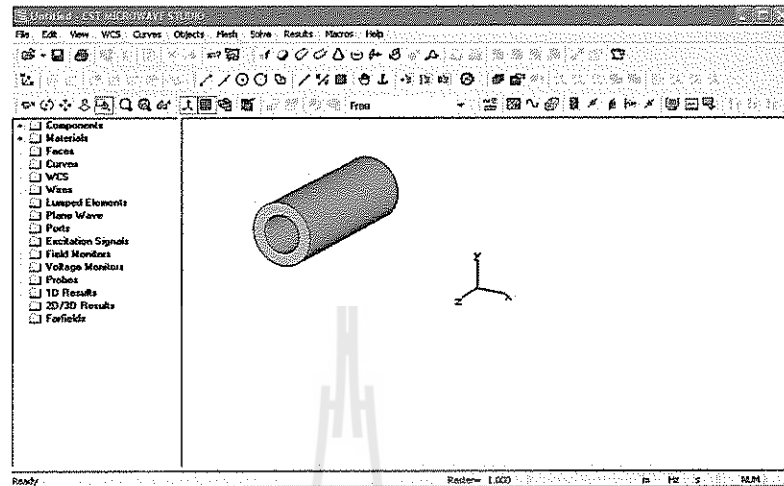
4. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปร่างของทรงกระบอก (จากขั้นตอนที่ 2 สามารถกด Esc ออกไปเลยก็ได้แล้วค่อยไปกำหนดค่ารัศมีเขาก็จะได้เช่นกัน) และจะปรากฏหน้าต่างที่ชื่อ Cylinder ขึ้นมาเพื่อให้กำหนดค่า ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง
และหน้าต่างของการกำหนดค่าพารามิเตอร์

5. เมื่อกำหนดค่าเสร็จแล้ว คลิกที่ปุ่ม OK จะได้รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะกลวง

และมีความหนาตามรัศมีของวงกลม 2 วง ที่ได้กำหนด และมีจุดศูนย์กลางกับความยาวตามแนวแกนที่กำหนด ดังรูปที่ 3.26



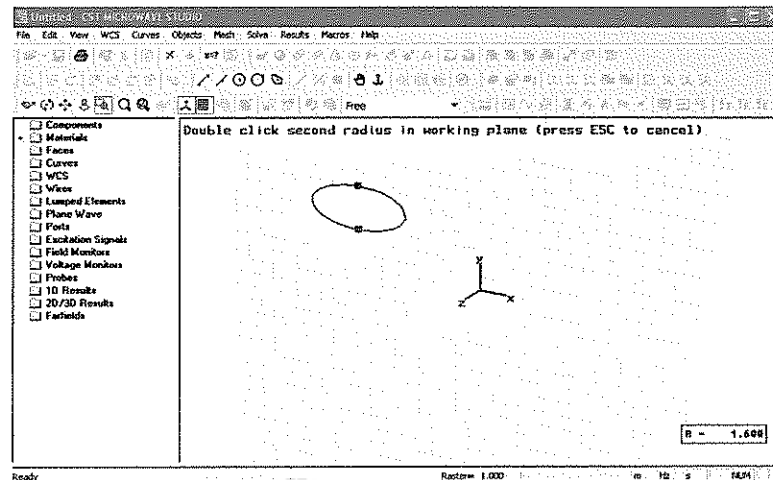
รูปที่ 3.26 รูปทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง มีขนาดตามที่ได้กำหนด

ง) การสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี (Elliptical Cylinder)

การสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

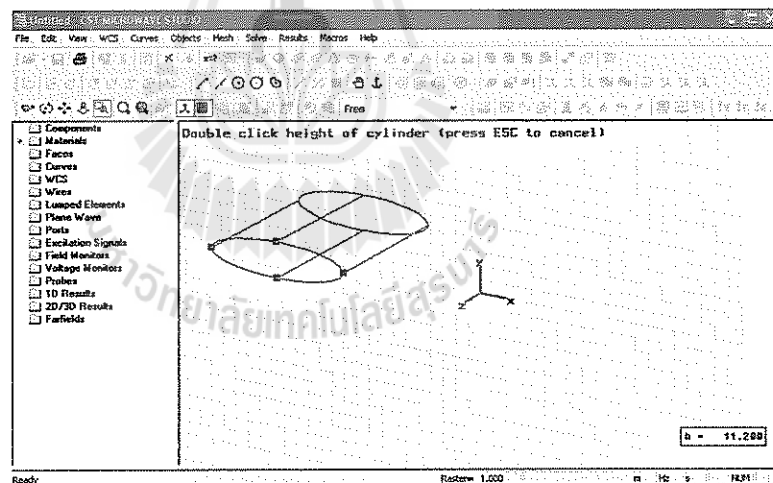
Object → Basic Shapes → Elliptical Cylinder

1. ดับเบิ้ลคลิกบนพื้นที่ว่างหนึ่งครั้งแล้วลากเมาส์ออกไปจะได้เส้นตรงจากนั้นดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปวงรีดังรูปที่ 3.27



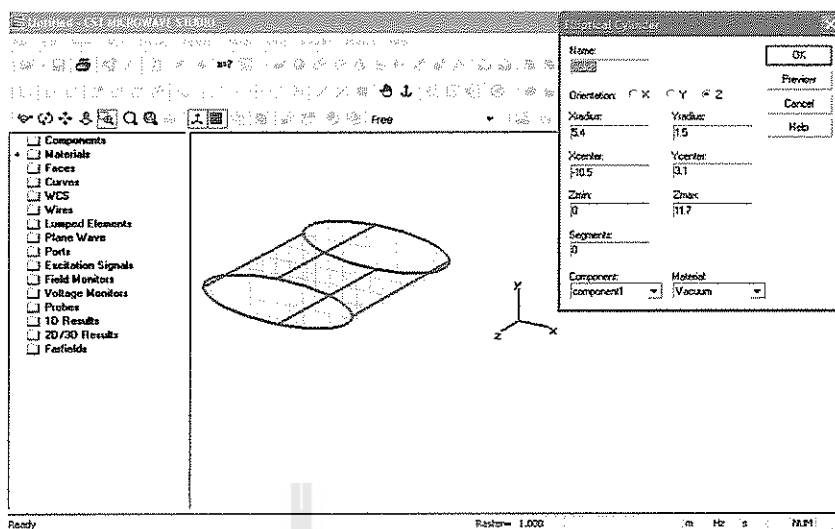
รูปที่ 3.27 วงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของการสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี

2. คับเบิลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีดังรูปที่ 3.28



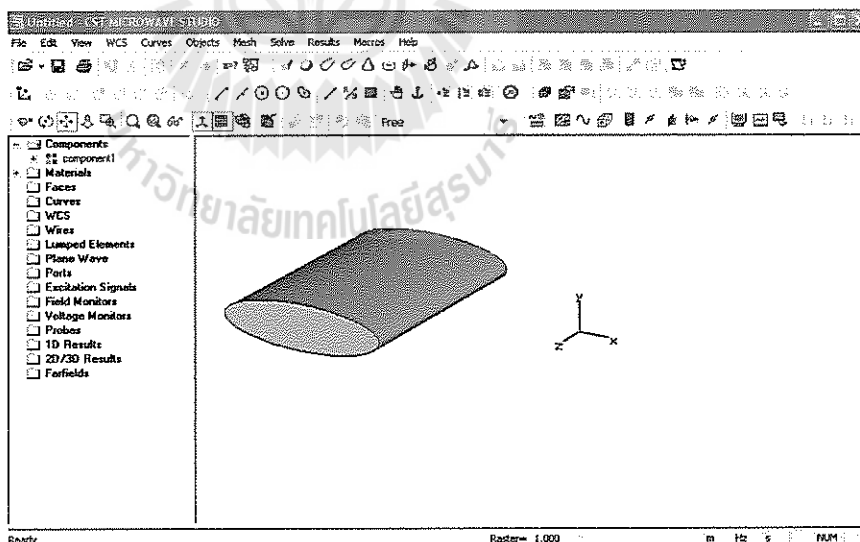
รูปที่ 3.28 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นี้

3. คับเบิลคลิกหนึ่งครั้งจะมีหน้าต่าง Elliptical Cylinder ขึ้นมาเพื่อให้กำหนดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์

4. กำหนดค่าต่างๆ ให้ครบแล้วกดปุ่ม OK ก็จะได้รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี ดังรูปที่ 3.30



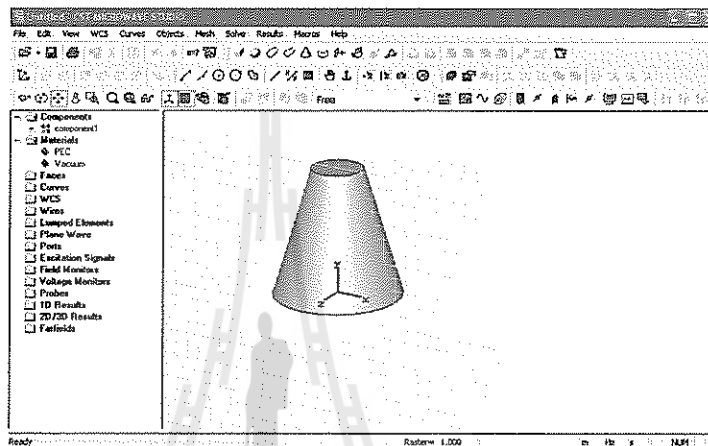
รูปที่ 3.30 รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็น วงรี

จ) การสร้างรูปทรงกรวย (Cone)

การสร้างรูปทรงกรวย มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปอื่นๆ แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้



ส่วนขั้นตอนการทำและการกำหนดค่านั้นเหมือนกับการสร้างรูปที่ผ่านมา จะได้รูปออกมาเป็นรูปทรงกรวย ดังรูปที่ 3.31



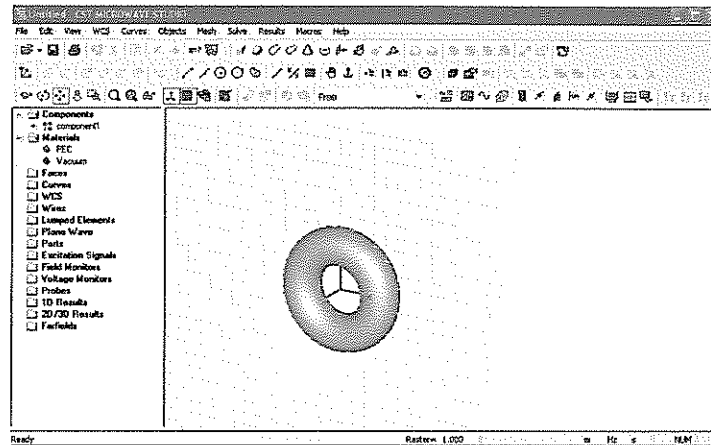
รูปที่ 3.31 รูปทรงกรวยที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

ฉ) การสร้างรูปทรงขนมโดนัท (Torus)

การสร้างรูปทรงขนมโดนัทมี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปอื่นๆ แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้



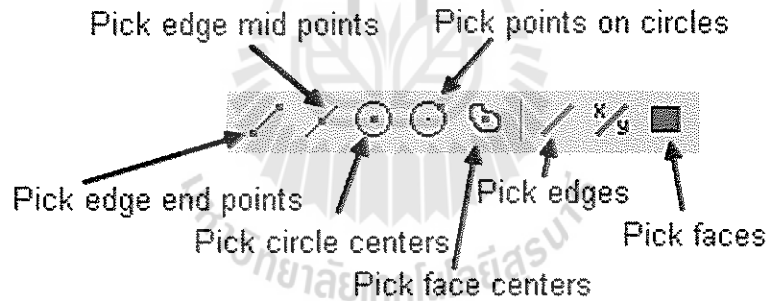
ส่วนขั้นตอนการทำและการกำหนดค่านั้นเหมือนที่ผ่านมา จะได้รูปทรงขนมโดนัท ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 รูปทรงขนม โคนัทที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

3.2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ

เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ (Pick tool) ลักษณะของแถบเครื่องมือเป็นดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 แถบเครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ

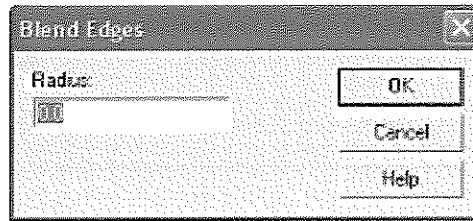
3.2.13 การลบคมและการเนียนขอบ

ก) การลบคม

การลบคม (Blend Edge) ขั้นตอนการทำมีดังนี้

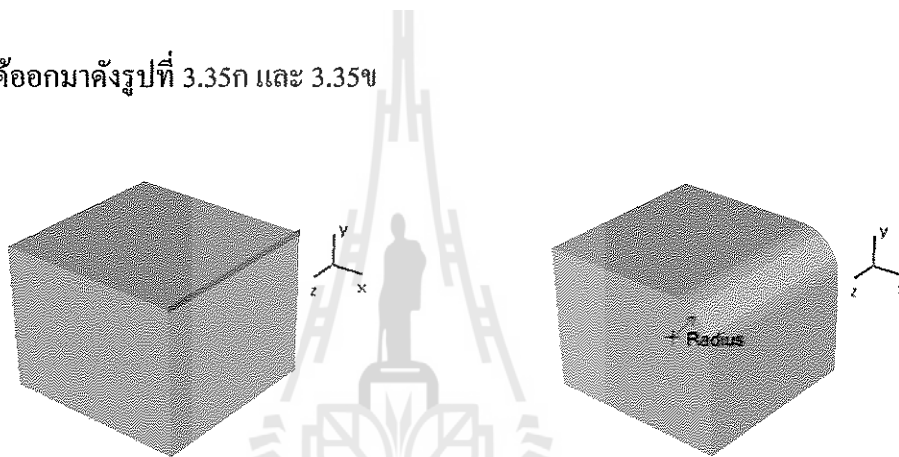
1. เลือกคำสั่ง Pick edges จาก Pick tool
2. ใช้เมา์ไปดับเบิ้ลคลิกที่ขอบวัสดุที่จะทำการลบคม
3. เลือกใช้คำสั่งจาก main menu ดังนี้ Objects → Blend Edges (รูป)
4. จากนั้นจะมีหน้าต่างเล็กๆขึ้นมาเพื่อให้ใส่ค่ารัศมีว่าจะลบคมเป็นรัศมีเท่าไรก็ได้

ใส่ไป ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 หน้าต่างในการกำหนดค่ารัศมีของการลบคม

จะได้ออกมาดังรูปที่ 3.35ก และ 3.35ข



ก. การเลือกขอบวัสดุที่จะทำการลบคม


ข. วัสดุที่ถูกลบคมแล้ว

รูปที่ 3.35 ขั้นตอนการลบคม

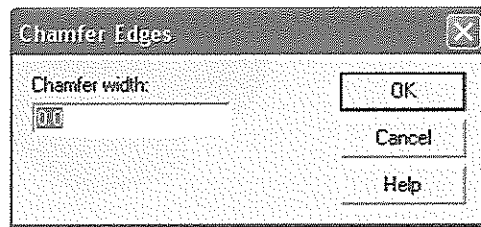
ข) การเนียนคม

การเนียนคม (Chamfer Edges) ขั้นตอนการทำมีดังนี้

1. เลือกคำสั่ง Chamfer Edges จาก Pick tool
2. ใช้เมา์ไปดับเบิ้ลคลิกที่ขอบวัสดุที่จะทำการเนียนคม
3. เลือกใช้คำสั่งจาก main menu ดังนี้

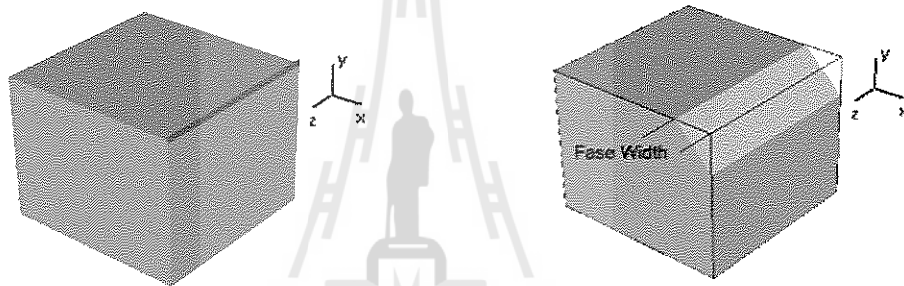
Objects → Chamfer Edges ().

4. จากนั้นจะมีหน้าต่างเล็กๆขึ้นมา ดังรูปที่ 3.36 เพื่อให้ใส่ค่ารัศมีว่าจะเนียนคมเป็นความกว้าง เท่าไหร่ก็ใส่ไป



รูปที่ 3.36 หน้าต่างการกำหนดค่าของการเฉือนคม

จะได้ออกมาดังรูปที่ 3.37 ก และ 3.37 ข



ก. การเลือกขอบวัสดุที่จะทำการเฉือนคม


ข. วัสดุที่ถูกเฉือนคมแล้ว

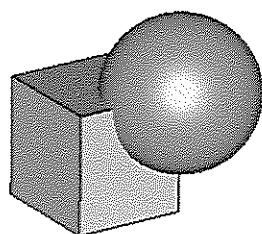
รูปที่ 3.37 ขั้นตอนการเฉือนคม

3.2.14 วิธีการทำงานของบูลีน (Boolean Operations)

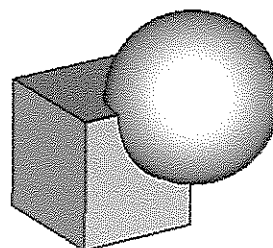
ก) วิธีการรวมวัสดุ(Add Mode)

เลือกวัสดุที่จะทำการ Add จาก component จากนั้น คลิกที่ Boolean Add

() ที่อยู่บน Objects toolbar หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือก Objects → Boolean → Add เลือกวัสดุที่จะทำการ Add เข้ากับวัสดุชิ้นนี้ เช่น มีวัสดุ 2 ชิ้น ดังรูปที่ 3.38 ก เมื่อทำการ Add เสร็จจะได้วัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.38 ข



ก. วัตถุที่ยังไม่ทำการ Add

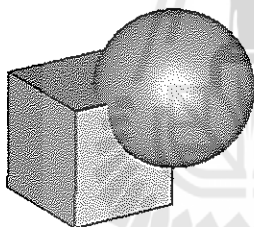


ข. วัตถุที่ Add แล้ว

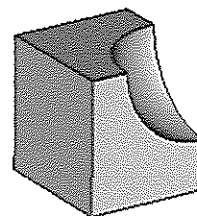
รูปที่ 3.38 วิธีการรวมวัตถุ

ข) วิธีการลบวัตถุออก (Subtract Mode)

ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัตถุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ Boolean Insert (☒) หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือกดังนี้ Objects → Boolean → Subtract จะได้วัตถุที่เป็น ดังรูปที่ 3.39 ก และ 3.39 ข



ก. วัตถุที่ยังไม่ทำการ Subtract

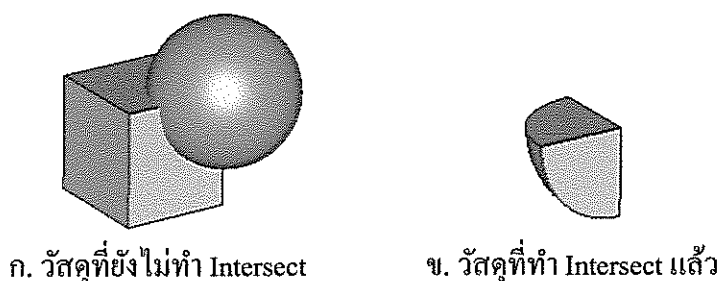


ข. วัตถุที่ทำการ Subtract แล้ว

รูปที่ 3.39 วิธีการลบวัตถุออก

ค) วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัตถุ (Intersect Mode)

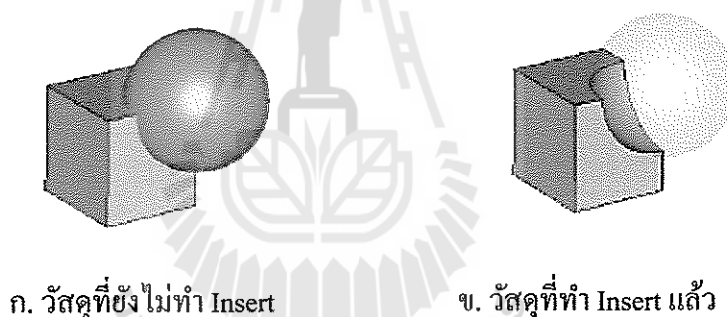
ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัตถุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ Boolean Insert (☒) หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือกดังนี้ Objects → Boolean → Intersect จะได้วัตถุที่เป็น ดังรูปที่ 3.40 ก และ 3.40 ข



รูปที่ 3.40 วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัตถุ

ง) วิธีการแทรกวัตถุ (Insert Mode)

ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัตถุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ Boolean Insert (รูป) หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือดังนี้ Objects → Boolean → Insert จะ ได้วัตถุที่เป็น ดังรูปที่ 3.41 ก และ 3.41 ข



รูปที่ 3.41 วิธีการแทรกวัตถุ

3.3 หลักการออกแบบ

ในการออกแบบตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา ซึ่งทำบนแผ่น FR-4 แบบสองหน้า มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบดังนี้

1. ความถี่ที่ใช้ปฏิบัติงานของตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน (Dielectric constant : ϵ_r)

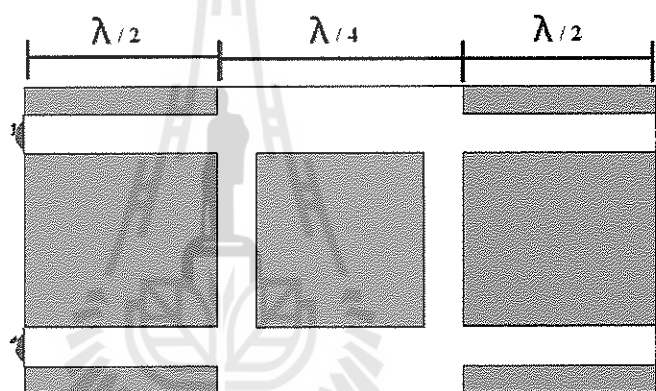
ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็น Glass Epoxy FR-4 แบบสองหน้าซึ่งมีค่า Dielectric Constant: ϵ_r เท่ากับ 4.5

3. ความสูงของไดอิเล็กตริกฉนวน (h) สำหรับในการออกแบบนี้ให้มีความสูง h เท่ากับ 1.66 mm.

4. ขนาดของแผ่นซับสเตรตสำหรับการออกแบบนี้ กว้าง 5 cm. ยาว 5 cm.

3.3.1 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาตันแบบ

ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศา จะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกเท่าเทียมระหว่างพอร์ต P2 และพอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และพอร์ต P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศาและจำไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ต P4 (พอร์ตโคคเคียวช่วงความถี่ที่ปฏิบัติการคือ 2400 MHz)



รูปที่ 3.42 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศา

ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาสามารถคำนวณได้จากรูปที่ 3.42 โดยใช้ดังต่อไปนี้

$$\text{ที่ } \epsilon_r = 4.5, d = 1.6 \text{ mm}, f = 2.4 \text{ GHz}$$

เมื่อ 1) $Z_0 = 50 \Omega$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.1)$$

แทนค่าจะได้

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2}} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right) = 1.54$$

$$A = 1.54$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (3.2)$$

เมื่อเรานำ $A = 1.54$ ไปแทนจะได้

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{1.54}}{e^{2(1.54)} - 2}$$

$$\frac{w}{d} = 1.94 \quad ; \left[\frac{w}{d} < 2 \right] \text{ แสดงว่าใช้ได้เพราะฉะนั้น}$$

$$w = d(1.94) = (1.6)(1.94) = 3.11 \text{ mm}$$

จาก

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{W}}} \quad (3.3)$$

แทนค่าจะได้

$$\epsilon_e = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{(1)}{1.94}}}$$

$$= \frac{5.5}{2} + \frac{3.5}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{7.185}} \right]$$

$$\epsilon_e = 3.40$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริง เพราะฉะนั้นจาก

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)} \quad (3.4)$$

แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.40}(2400 \text{ MHz})}$$

$$\lambda = 67.79 \text{ mm}$$

$$\text{ที่ } 90^\circ; \frac{\lambda}{4} = \frac{67.79}{4} = 16.9475$$

$$\text{เมื่อ } 2) \frac{Z_0}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} \Omega = 35.3553$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (3.5)$$

แทนค่าจะได้

$$B = \frac{377\pi}{2(35.3553)(\sqrt{4.5})}$$

$$B = 8$$

และ

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.6)$$

นำ (B = 8) ไปแทนจะได้

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left[8 - 1 - \ln(2(8) - 1) + \frac{4.5 - 1}{2(4.5)} \left\{ \ln(8 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.5} \right\} \right]$$

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} [4.29 + 0.39\{1.42\}]$$

$$\frac{w}{d} = 3.22 \quad ; \left[\frac{w}{d} > 2 \right] \text{ แสดงว่าใช้ได้เพราะฉะนั้น}$$

$$w = d(3.22) = (1.6)(3.22) = 5.152 \text{ mm}$$

และจากสมการที่ (3.3) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned}\epsilon_e &= \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+12\frac{(1)}{3.22}}} \\ &= \frac{5.5}{2} + \frac{3.5}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{4.73}} \right]\end{aligned}$$

$$\epsilon_e = 3.55$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริง เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)} \\ \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.55}(2400 \text{ MHz})} \\ \lambda &= 66.34 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\text{ที่ } 90^\circ; \frac{\lambda}{4} = \frac{66.34}{4} = 16.585$$

กำหนดค่า $Z_0 = 50 \Omega$, $Z_0/\sqrt{2} = 35.355 \Omega$, $\epsilon_r = 4.5$, $f = 2.4 \text{ GHz}$
 $d = 1.6 \text{ mm.}$, $C = 3 \times 10^8$

เมื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการดังกล่าวจะได้ผลดังนี้

ที่ Z_0	$A = 1.54$
	$\epsilon_e = 3.394$
	$\frac{W}{d} = 1.94 \text{ mm.}$
	$W = 3.11 \text{ mm.}$
	$\frac{\lambda}{4} = 16.9475 \text{ mm.}$

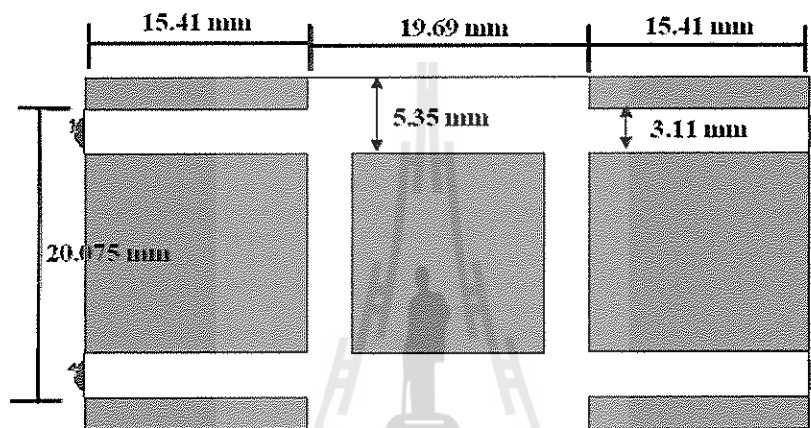
$$\frac{j}{\sqrt{2}} Z_0$$

$$B = 8$$

$$W = 5.152 \text{ mm.}$$

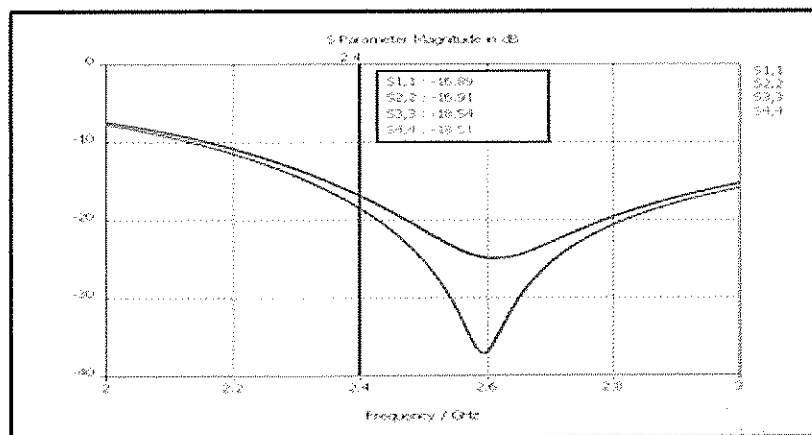
$$\epsilon_e = 3.55$$

$$\frac{\lambda}{4} = 16.585 \text{ mm.}$$



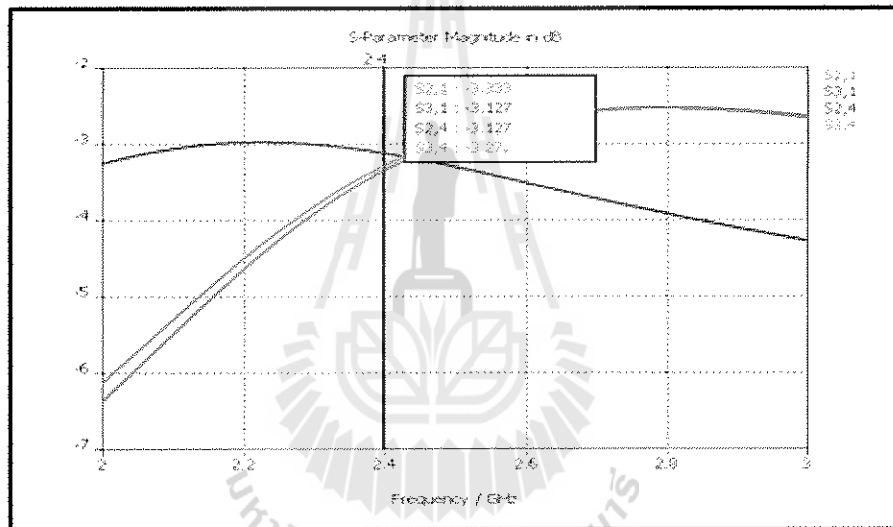
รูปที่ 3.43 ไสบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบที่ออกแบบเสร็จแล้ว

ผลการทดสอบไสบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ค่าของพลังงานได้ดังรูป



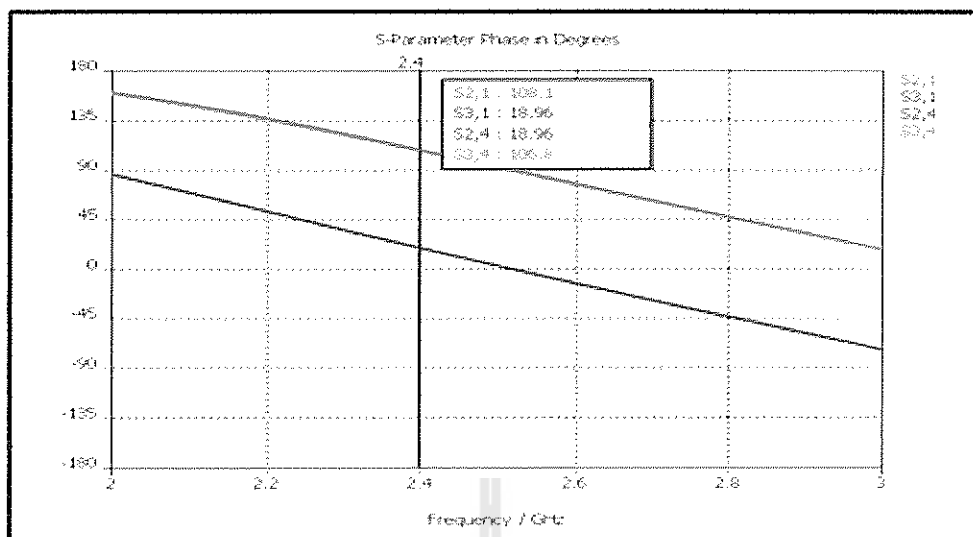
รูปที่ 3.44 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับของพารามิเตอร์ S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44}

จะพบว่ากราฟที่ได้ นั้นพารามิเตอร์ S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44} ที่ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าต่ำกว่า -10dB เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดการสะท้อนกลับอันมาจากเนื่องจากพลังงานของคลื่นที่ส่งผ่านไป ถ้าจะกล่าวได้ว่าค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับ (return loss) ที่ต่ำกว่า -10 dB เป็นค่าที่ยอมรับได้ในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยเราอ้างอิงมาจากสูตร $\text{Return Loss} = 20 \log \Gamma$ คือจะกล่าวได้ว่ายิ่งค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับมีค่าน้อยเพียงใดยิ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานมีค่าน้อยตามไปด้วยเท่านั้น [10]



รูปที่ 3.45 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านพลังงานของพารามิเตอร์ S_{21} , S_{31} , S_{24} , S_{34}

ค่าส่งผ่านพลังงานที่พารามิเตอร์ S_{21} , S_{31} , S_{24} , S_{34} ที่ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz ควรจะมีค่าน้อยกว่า -3 dB เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดการส่งผ่านของพลังงานที่เกิดจากพลังงานที่ใส่เข้าไป โดยเราอ้างอิงมาจากสูตร $\text{Coupling factor} = -10 \log \frac{P_3}{P_1}$ คือค่าพลังงานที่ใส่เข้ามาจะมีการส่งผ่านพลังงานออกไปครั้งหนึ่งของกำลังงานที่ส่งเข้ามา แต่จากกราฟการแสดงผลค่าส่งผ่านพลังงานจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ S_{21} มีค่าเท่ากับ -3.333, S_{31} มีค่าเท่ากับ -3.127, S_{24} มีค่าเท่ากับ -3.127, S_{34} มีค่าเท่ากับ -3.272 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ส่งผ่านพลังงานออกไปครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.46 กราฟแสดงเฟสของพารามิเตอร์

กราฟแสดงค่าเฟสพารามิเตอร์ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบ ซึ่งเราออกแบบมาเพื่อต้องการให้มีค่าเฟสพารามิเตอร์ต่างกัน 90° ซึ่งอ่านค่าพารามิเตอร์จากกราฟได้ดังนี้

ค่าของเฟสพารามิเตอร์ที่ $S_{21} = 108.1^\circ$ และที่ $S_{31} = 18.96^\circ$ ซึ่งมีค่าของเฟสพารามิเตอร์ต่างกันอยู่ $108.1^\circ - 18.96^\circ = 89.14^\circ$ ส่วนที่ค่าพารามิเตอร์ $S_{24} = 18.96^\circ$ และที่ $S_{34} = 106.8^\circ$ ซึ่งมีค่าของเฟสพารามิเตอร์ต่างกันอยู่ $106.8^\circ - 18.96^\circ = 87.84^\circ$ ซึ่งมีค่าเฟสพารามิเตอร์ใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ

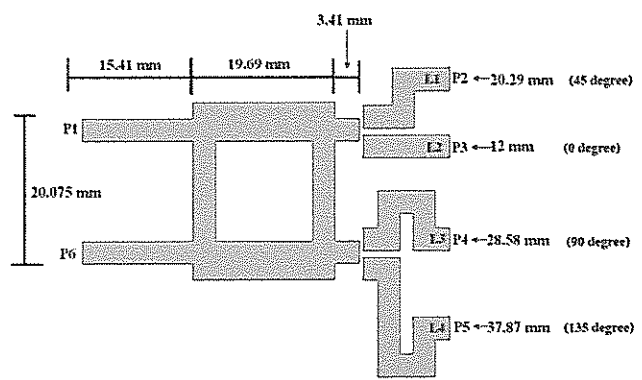
ตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาต้นแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB) ที่ความถี่ 2.4 GHz	เฟส (องศา) ที่ความถี่ 2.4 GHz
S11	-16.89	-105.3
S22	-16.91	-105.02
S33	-18.54	-77.51
S44	-18.51	-77.72
S21	-3.333	108.01
S31	-3.127	18.96

พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB) ที่ความถี่ 2.4 GHz	เฟส (องศา) ที่ความถี่ 2.4 GHz
S41	-18.04	43.24
S12	-3.333	108.1
S32	-18.01	43.37
S42	-3.127	18.96
S13	-18.01	18.96
S23	-3.272	43.38
S43	-18.04	106.8
S14	-18.04	43.24
S24	-3.127	18.96
S34	-3.272	106.8

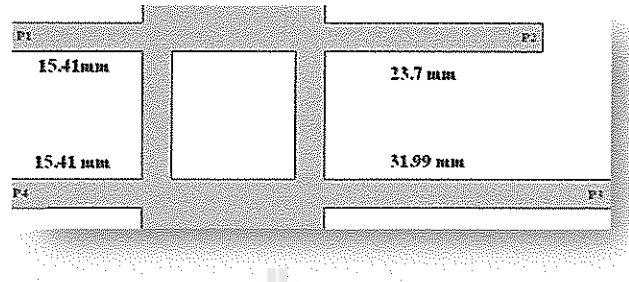
3.3.2 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาที่ต่อเข้ากับวงจรสลักรอย

ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาที่ต่อเข้ากับวงจรสลักรอยได้พัฒนามาจากไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ องศาต้นแบบ เพื่อให้สามารถเลือกเฟสได้มากขึ้นซึ่งจากเดิมสามารถเลือกเฟสได้เพียงสองเฟสเท่านั้น คือ 0 และ 90 องศา

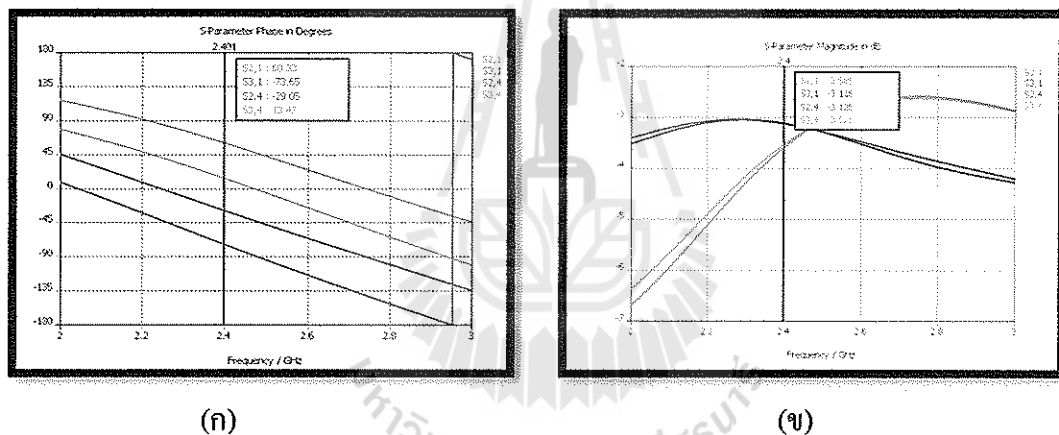


รูปที่ 3.47 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาที่ต่อเข้ากับวงจรสลักรอย

**ผลการทดสอบแบบจำลองที่แสดงค่าเฟสพารามิเตอร์เฟสที่สอดคล้องกันกับผลของกับ
ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาที่ต่อเข้ากับวงจรสลับสาย**



รูปที่ 3.48 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3



รูปที่ 3.49 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3
โดย รูป (ก) คือค่า เฟส (degree) และ รูป (ข) ขนาด (dB)

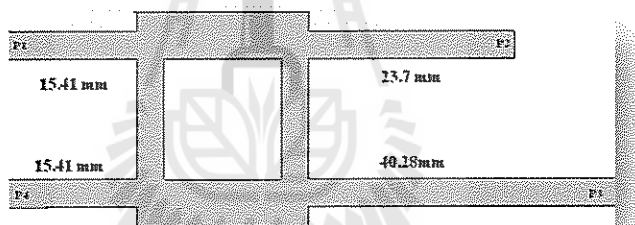
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3

- S1 คือค่าของพลังที่เข้าทางพอร์ตที่ 1
- S2 คือค่าของพลังที่ถูกส่งออกทางพอร์ตที่ 2
- S3 คือค่าของพลังที่ถูกส่งออกทางพอร์ตที่ 3
- S4 คือค่าของพลังที่เข้าทางพอร์ตที่ 4

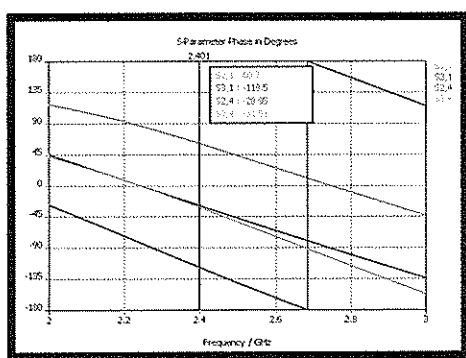
พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S3	S2	S3	
S1	-3.585	-3.126	60.33	-73.65	133.98
S4	-3.116	-3.521	-29.05	13.47	42.52

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3

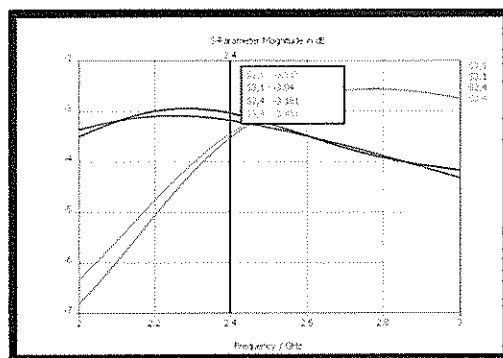
ค่าความต่างเฟสที่เราต้องการคือ 135 (degree) และ 45 (degree) แต่ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองคือ 133.98 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{21} = 60.33$) - ($S_{31} = -73.65$) และ 42.52 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{34} = 13.47$) - ($S_{24} = -29.05$) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ



รูปที่ 3.50 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 4



(ก)



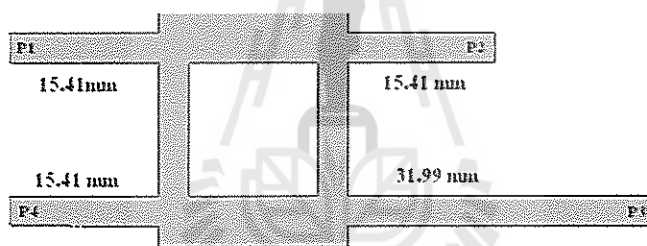
(ข)

รูปที่ 3.51 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 4 โดย รูป (ก) คือค่า เฟส (degree) และรูป (ข) ขนาด (dB)

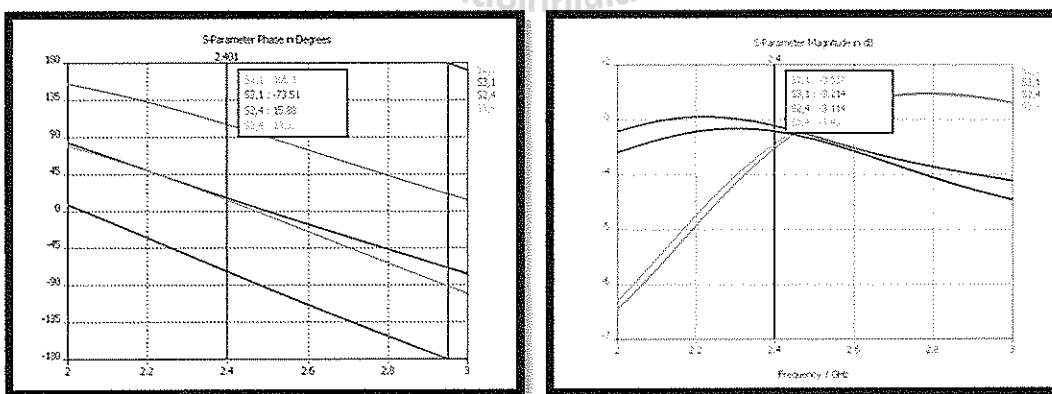
ตารางที่ 3.3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 1 และเส้นที่ 4

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S3	S2	S3	
S1	-3.517	-3.04	60.7	-118.5	179.2
S4	-3.181	-3.431	-28.95	-31.53	2.58

ค่าความต่างเฟสที่เราต้องการคือ 180 (degree) และ 0 (degree) แต่ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองคือ 179.2 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{21} = 60.7$) - ($S_{31} = -118.5$) และ 0 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{34} = -28.95$) - ($S_{24} = -31.53$) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ



รูปที่ 3.52 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 3



(ก)

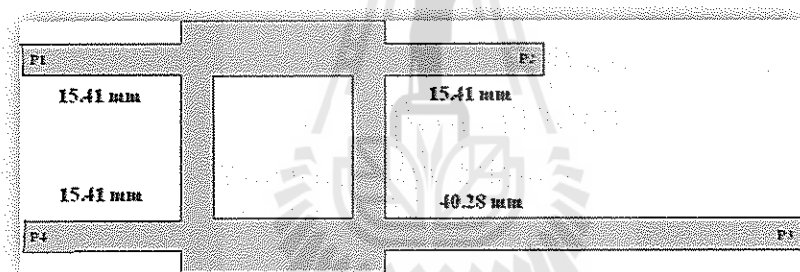
(ข)

รูปที่ 3.53 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 3 โดย รูป (ก) คือค่า เฟส (degree) และรูป (ข) ขนาด (dB)

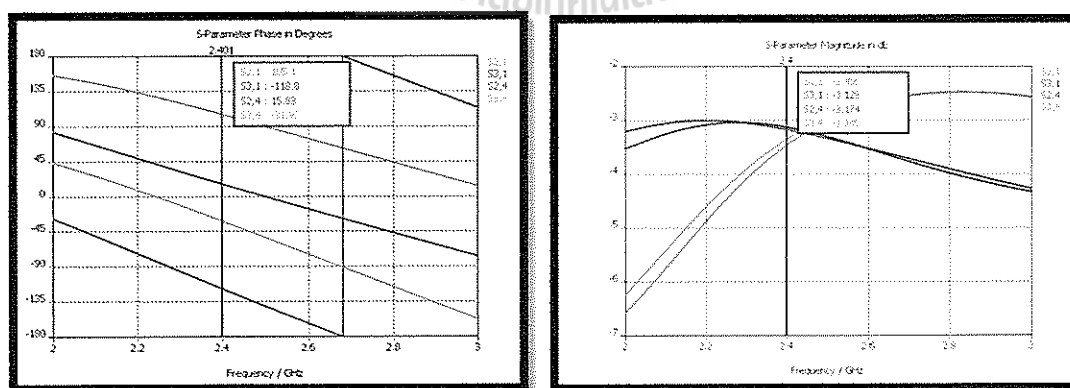
ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 3

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S3	S2	S3	
S1	-3.517	-3.214	105.1	-73.51	178.61
S4	-3.114	-3.432	-15.88	-13.33	2.55

ค่าความต่างเฟสที่เราต้องการคือ 180 (degree) และ 0 (degree) แต่ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองคือ 178.61 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{21} = 105.1$) - ($S_{31} = -73.51$) และ 2.55 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{34} = -13.33$) - ($S_{24} = -15.88$) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ



รูปที่ 3.54 ไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 4



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.55 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 4

โดย รูป (ก) คือค่า เฟส (degree) และรูป (ข) ขนาด (dB)

ตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่เลือกเปรียบเทียบเส้นที่ 2 และเส้นที่ 4

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S3	S2	S3	
S1	-3.456	-3.128	105.1	-118.8	223.9
S4	-3.174	-3.345	15.83	-31.97	47.8

ค่าความต่างเฟสที่เราต้องการคือ 225 (degree) และ 45(degree) แต่ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองคือ 223.9 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{21} = 105.1$) - ($S_{31} = -118.8$) และ 47.8 (degree) หาได้จากค่าพารามิเตอร์ ($S_{24} = 15.83$) - ($S_{34} = -31.97$) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการ

3.4 ข้อสรุปท้ายบท

ในเรื่องการออกแบบตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ได้นำเสนอการออกแบบตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาแบบและตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่ต่อเข้ากับวงจรสลับสายเพื่อให้สามารถเลือกเฟสที่ต้องการได้จากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยได้ศึกษาทฤษฎีคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ เพื่อทำการออกแบบตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ 90 องศาแบบและตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่ต่อเข้ากับวงจรสลับสายเพื่อให้สามารถปรับเลือกเฟสที่ต้องการ ได้ที่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.4 GHz

จากการออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO นั้นได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ก่อนทำการสร้างคือ แผ่นไมโครสตริปที่ใช้ให้มีขนาดความสูงเท่ากับ 1.66 mm มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท : ϵ_r เท่ากับ 4.5 ทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ป้อนเข้ามามีค่าต่ำกว่า -10 dB ทุกตัวค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการส่งผ่านของสัญญาณมีค่าประมาณ -3 dB ทุกตัวและในการสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ที่สามารถปรับเฟสได้ที่สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ 2.4 GHz ที่ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO สามารถใช้งานได้ตรงตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ และมีประสิทธิภาพตรงตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานจริง

บทที่ 4

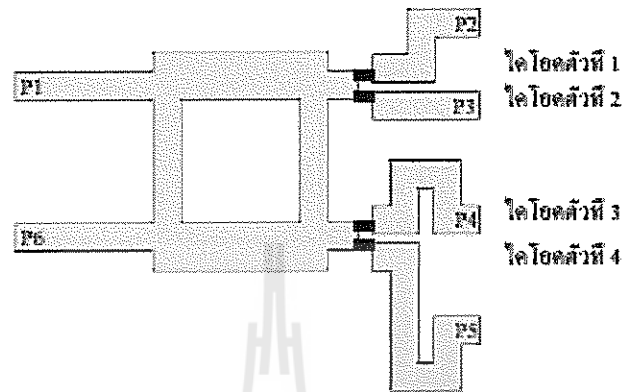
ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

4.1 บทนำ

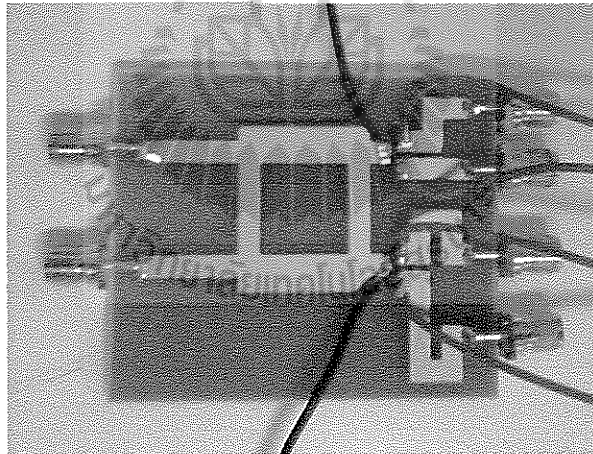
ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการวัดผลที่ได้จากตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา ที่สามารถเลือกมุมเฟสของเอาต์พุตได้หลายมุม ซึ่งจะนำตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา ที่ได้ ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3 มาต่อเข้ากับเส้นไมโครสตริปที่มีความยาวต่างๆ โดยใช้ไดโอดเป็นตัวสวิตช์เลือกความยาวของเส้นไมโครสตริปที่นำมาต่อกับตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา เพื่อให้ได้มุมเฟสที่ต่างออกไปจากตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศา แบบปกติ

4.2 การสร้างตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศาที่สามารถเลือกมุมเฟสของเอาต์พุตได้หลายมุมโดยใช้ไดโอดเป็นตัวสวิตช์เลือกความยาวของเส้นไมโครสตริป

1. นำตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แบบ 90 องศาที่ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ไปตัดสติกเกอร์เพื่อใช้ในการกัดแผ่นปริ้น
2. ตัดแผ่นปริ้นให้ได้ขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 5.5 ซม.
3. นำสติกเกอร์ที่ตัดเตรียมไว้ติดลงบนแผ่นปริ้น
4. กัดลายโดยนำแผ่นปริ้นจากขั้นตอนที่ 3 แฉลงในน้ำยากัดแผงวงจรและแช่ประมาณ 10-15 นาที เมื่อทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกหมดจึงนำแผ่นปริ้นที่กัดได้ไปล้างด้วยน้ำสะอาด
5. บัดกรีตัวไดโอดและสายไฟลงในวงจร
6. ต่อหัวต่อ SMA เข้ากับแผ่นปริ้นที่ได้จากขั้นตอนที่ 5



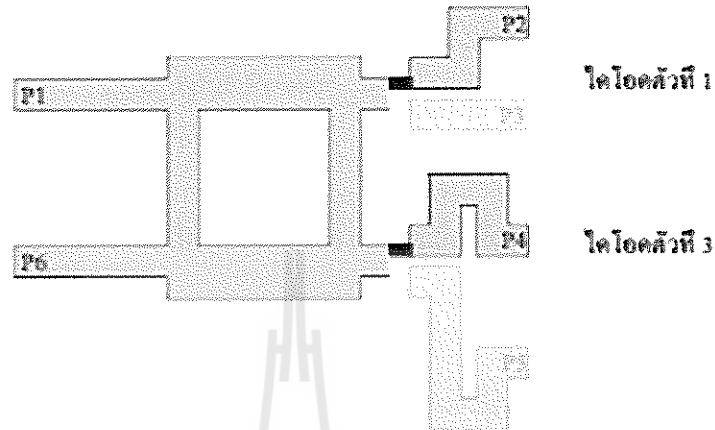
รูปที่ 4.1 ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่ใช้ไดโอดเป็นตัวสวิตซ์เลือกความยาวของเส้นไมโครสตีป



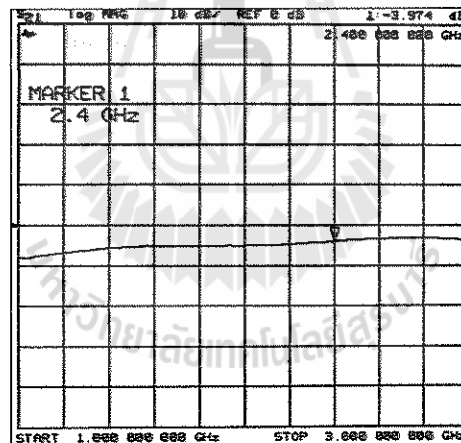
รูปที่ 4.2 ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์ที่บัดกรีตัวไดโอดและสายไฟลงวงจรแล้ว

4.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย

4.3.1 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน



รูปที่ 4.3 ตัวไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S21

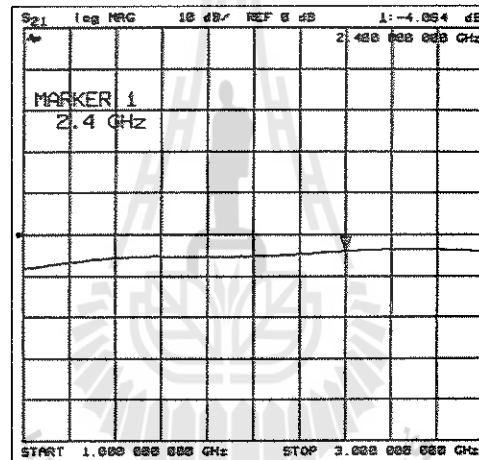
จากกราฟพารามิเตอร์ S21 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.974 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.05% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.974 \text{ dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.05 \%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.974 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S41

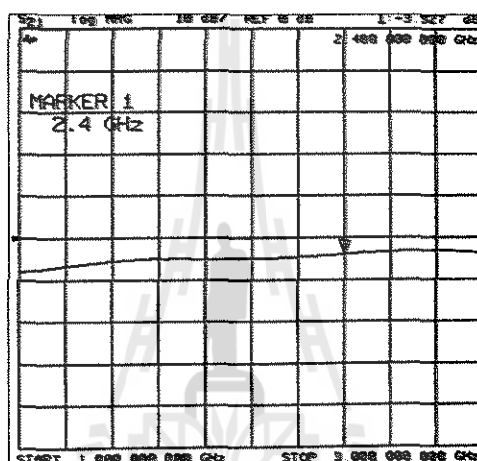
จากกราฟพารามิเตอร์ S41 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.064 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 39.22% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.064 \text{ dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 39.22 \%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.064 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S26

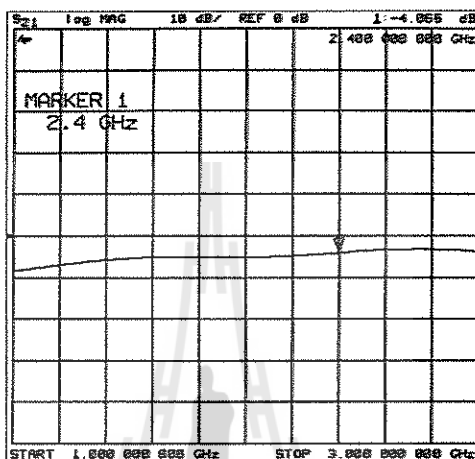
จากกราฟพารามิเตอร์ S26 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.927 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.48% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.927\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.48\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.927 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็น
ครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S46

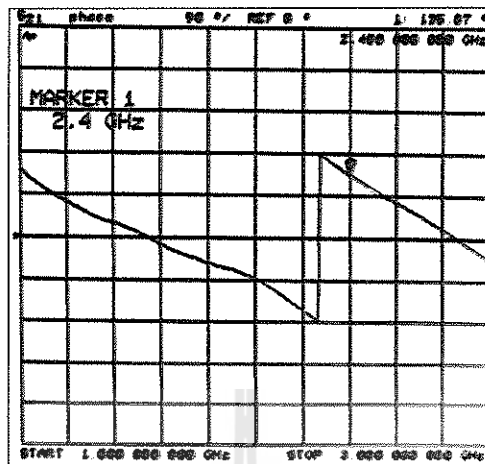
จากกราฟพารามิเตอร์ S46 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.065 dB ซึ่งจะทำให้เกิดการ
ส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 39.21% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

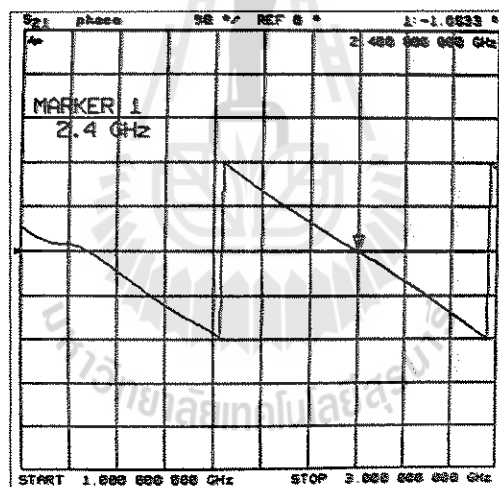
$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.065\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 39.21\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.065 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่ง
ของพลังงานขาเข้า

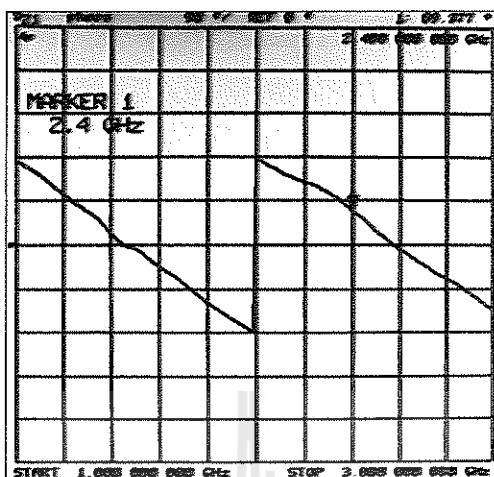


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S21

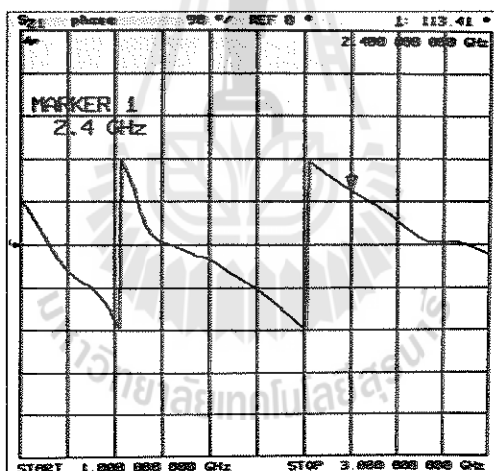


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S41

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 นั้น พารามิเตอร์ S21 มีมุมเฟสเท่ากับ -136.07 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S41 มีมุมเฟสเท่ากับ -1.0553 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 135 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ามอดเฟสของพารามิเตอร์ S26



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่ามอดเฟสของพารามิเตอร์ S46

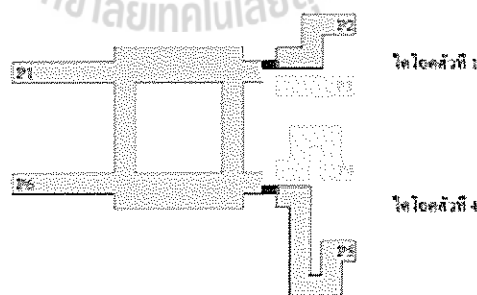
จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 นั้นพารามิเตอร์ S26 มีมอดเฟสเท่ากับ 69.377 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S46 มีมอดเฟสเท่ากับ 113.41 องศา มอดเฟสต่างกันคือ 44.03 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน

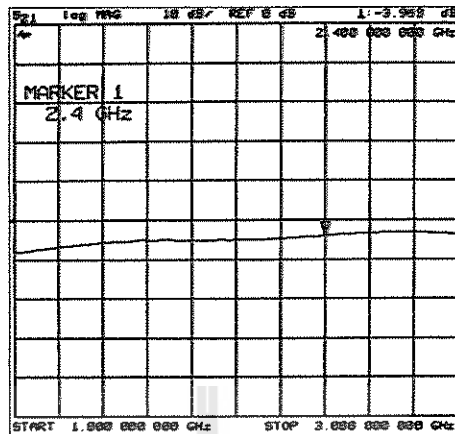
พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S4	S2	S4	
S1	-3.974	-4.064	-136.07	-1.0553	135
S6	-3.927	-4.065	69.4	113	44.03

จาก ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 3 ทำงาน จะเห็นได้ว่าขนาดของ S21, S41, S26 และ S46 มีค่าต่ำกว่า -3 dB ซึ่งแสดงว่ามีการส่งผ่านพลังงานน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S21 และ S41 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 135 องศา เมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S26 และ S46 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 44.03 องศา หรือประมาณ 45 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

4.3.2 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน



รูปที่ 4.12 ภาพตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S21

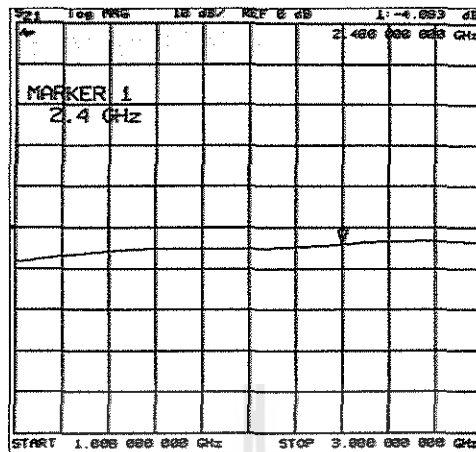
จากกราฟพารามิเตอร์ S21 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.092 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.55% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.092\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.55\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.092 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S21

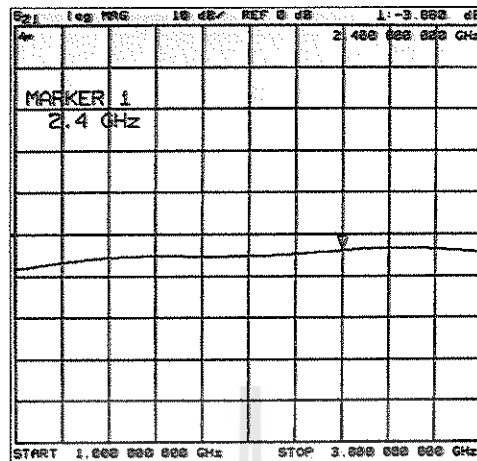
จากกราฟพารามิเตอร์ S21 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.083 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 39.06% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.083 \text{ dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 39.06\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.083 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S26

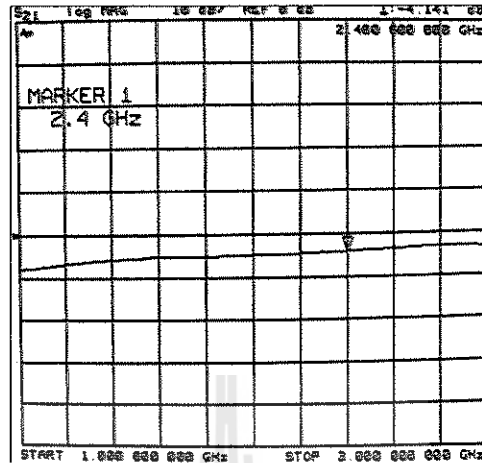
จากกราฟพารามิเตอร์ S26 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.888 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.85% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.888 \text{ dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.85\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.888 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S56

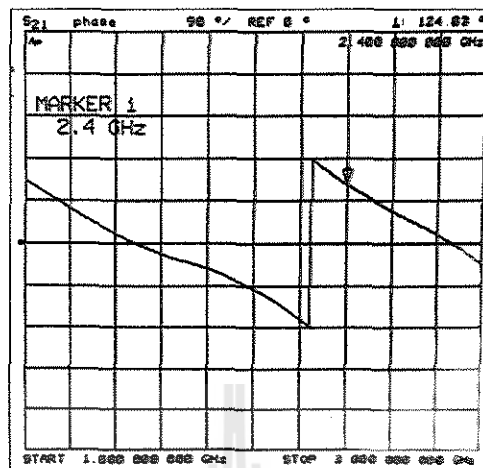
จากกราฟพารามิเตอร์ S56 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.141 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 38.54% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

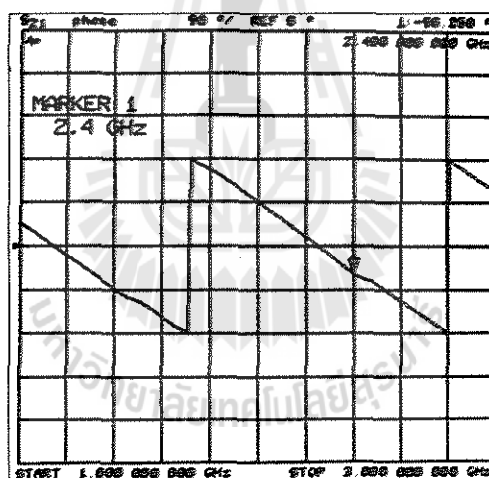
$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.141\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 38.54\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.141 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า

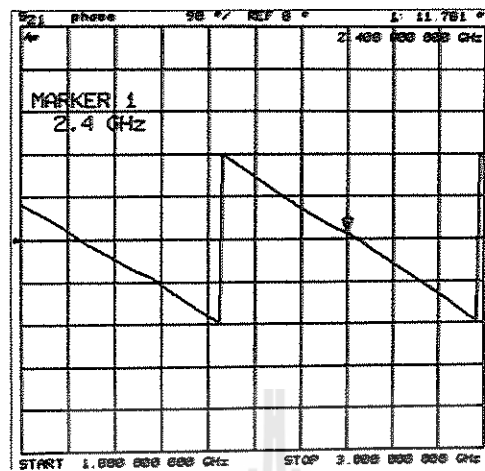


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S21

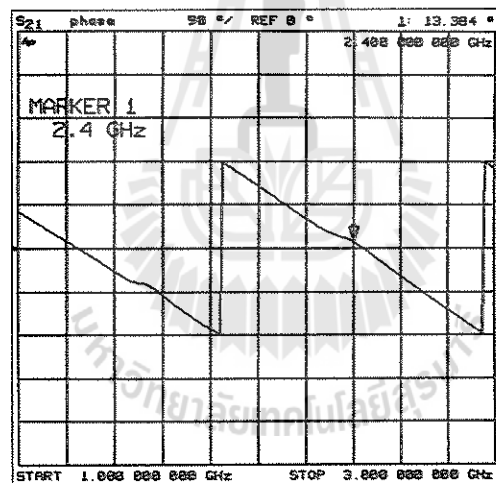


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S51

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 นั้น พารามิเตอร์ S21 มีมุมเฟสเท่ากับ 124.83 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S51 มีมุมเฟสเท่ากับ -66.25 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 181.08 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S26



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S56

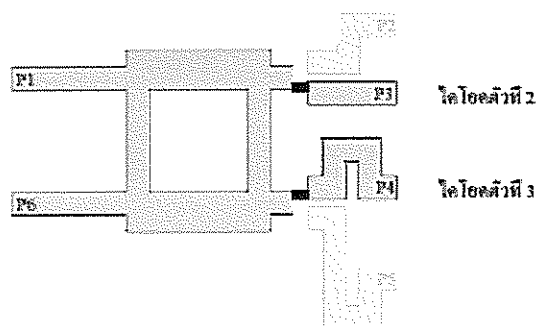
จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 นั้นพารามิเตอร์ S26 มีมุมเฟสเท่ากับ 11.78 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S56 มีมุมเฟสเท่ากับ 13.38 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 1.6 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน

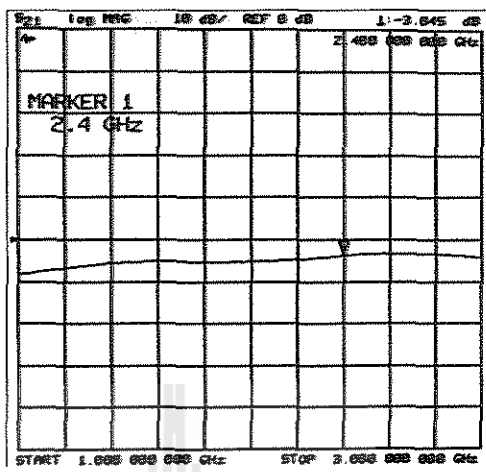
พารามิเตอร์	ขนาด(dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S2	S5	S2	S5	
S1	-3.902	-4.083	124.83	-56.25	181.08
S6	-3.888dB	-4.141	11.78	13.38	1.6

จาก ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน จะเห็นได้ว่าขนาดของ S21, S51, S26 และ S56 มีค่าต่ำกว่า -3 dB ซึ่งแสดงว่ามีการส่งผ่านพลังงานน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S21 และ S51 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 181.08 องศา หรือประมาณ 180 องศา และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S26 และ S56 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 1.6 องศา หรือประมาณ 0 องศาซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

4.3.3 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน



รูปที่ 4.21 ภาพตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S31

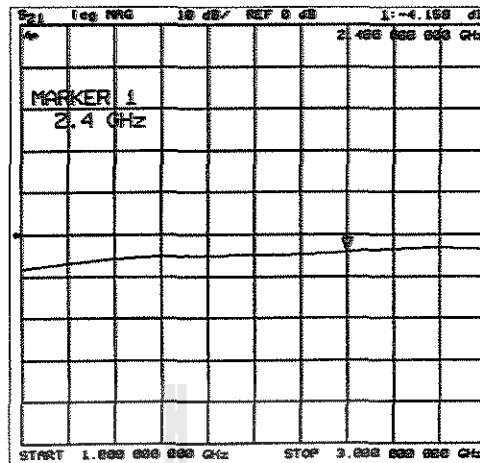
จากกราฟพารามิเตอร์ S31 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.845 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 41.25% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.845\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 41.25\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.845 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S41

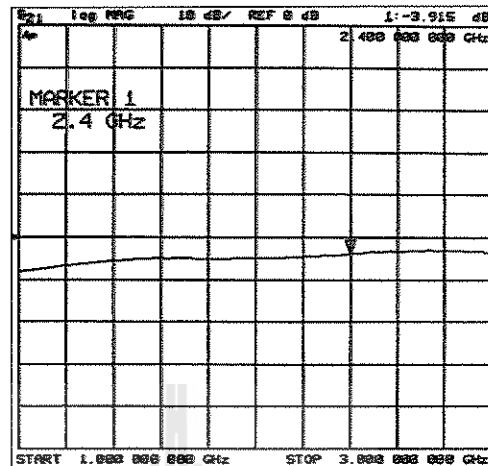
จากกราฟพารามิเตอร์ S41 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.158 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 38.84% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.158\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 38.84\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.158 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S36

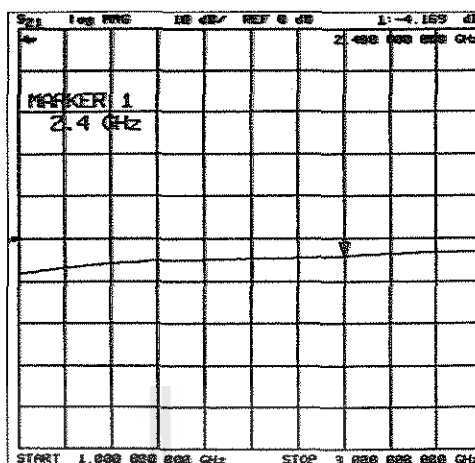
จากกราฟพารามิเตอร์ S36 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.915 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.59% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.915\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.59\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.915 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S46

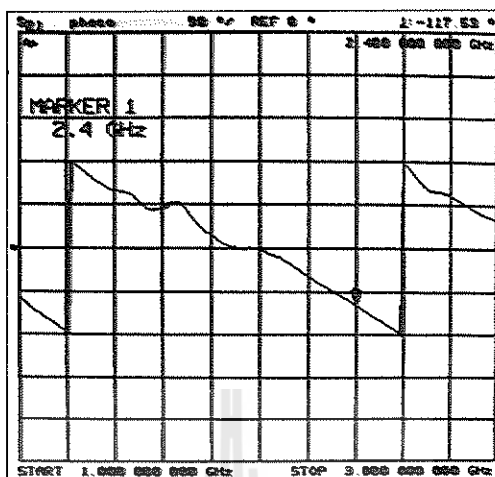
จากกราฟพารามิเตอร์ S46 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.169 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 38.29% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

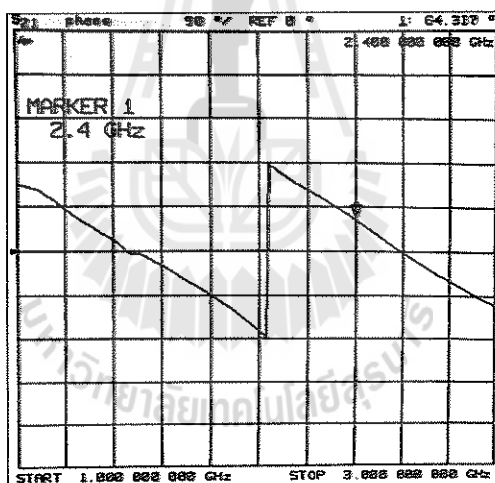
$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.169\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 38.29\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.169 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า

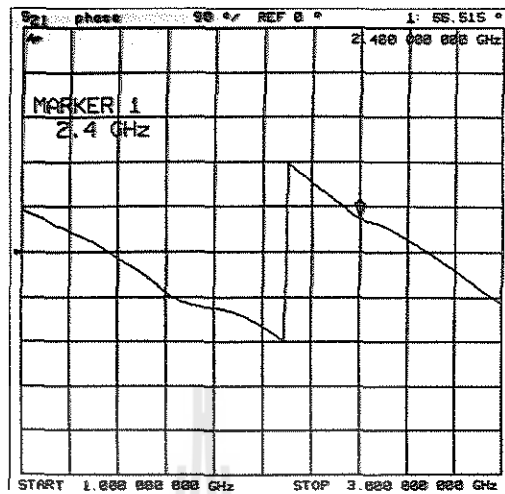


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S31

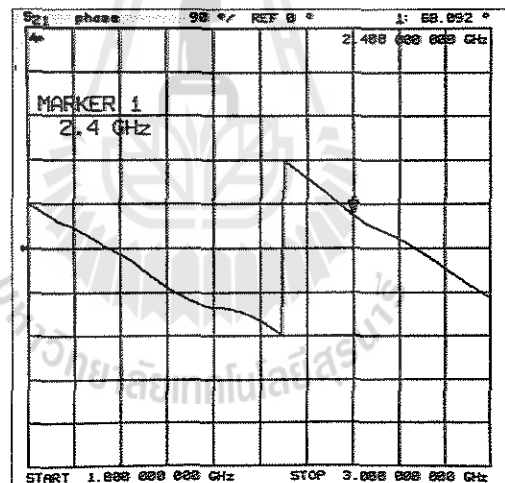


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S41

จากรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 นั้น พารามิเตอร์ S31 มีมุมเฟสเท่ากับ -117.53 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S41 มีมุมเฟสเท่ากับ 64.317 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 181.84 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S36



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S46

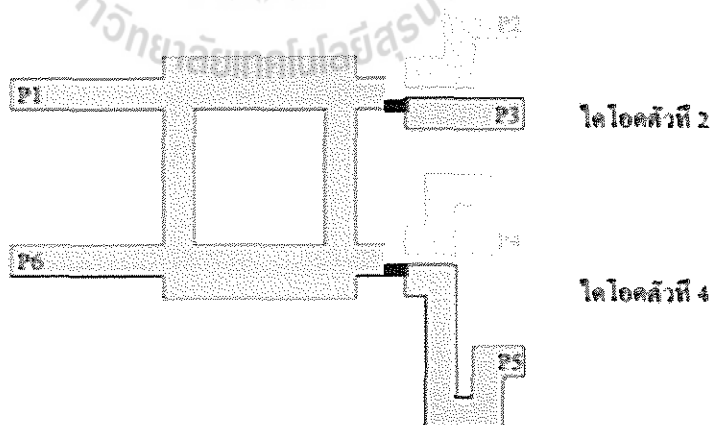
จากรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 นั้น พารามิเตอร์ S36 มีมุมเฟสเท่ากับ 66.151 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S46 มีมุมเฟสเท่ากับ 68.092 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 1.941 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน

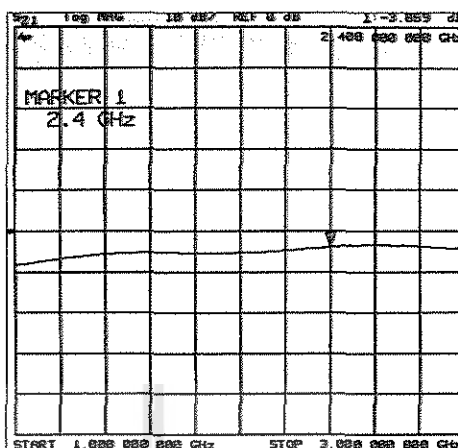
พารามิเตอร์	Magnitude (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S3	S4	S3	S4	
S1	-3.845	-4.158	-117.53	64.317	181.84
S6	-3.915	-4.169	66.151	68.092	1.941

จาก ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 3 ทำงาน จะเห็นได้ว่าขนาดของ S31, S41, S36 และ S46 มีค่าต่ำกว่า -3 dB ซึ่งแสดงว่ามีการส่งผ่านพลังงานน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S31 และ S41 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 181.84 องศา หรือประมาณ 180 องศา และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์ S36 และ S46 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 1.941 องศา หรือประมาณ 0 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

4.3.4 เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน



รูปที่ 4.30 ภาพตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์เมื่อจ่ายไฟให้ไดโอดตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S31

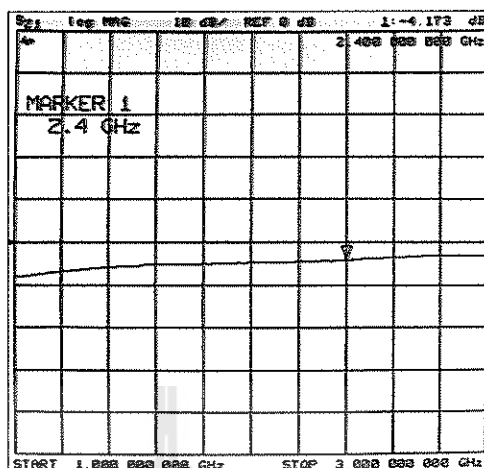
จากกราฟพารามิเตอร์ S31 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.069 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 49.33% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.069\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 49.33\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.069 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S51

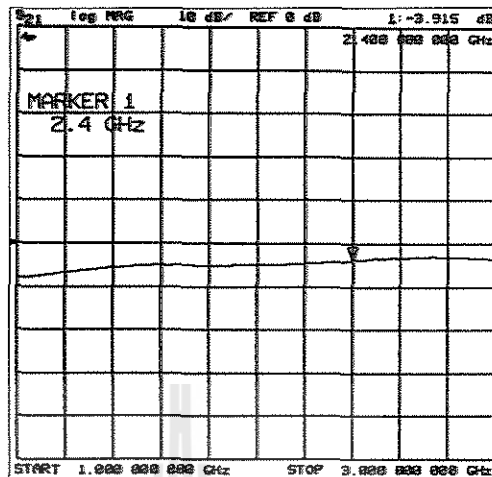
จากกราฟพารามิเตอร์ S51 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.173 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 38.25% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.173\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 38.25\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.173 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S36

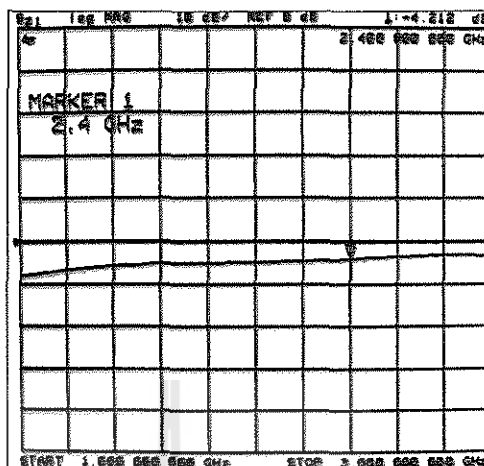
จากกราฟพารามิเตอร์ S36 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -3.915 dB ก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 40.59% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-3.915\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 40.59\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -3.915 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าการส่งผ่านของพลังงานของพารามิเตอร์ S56

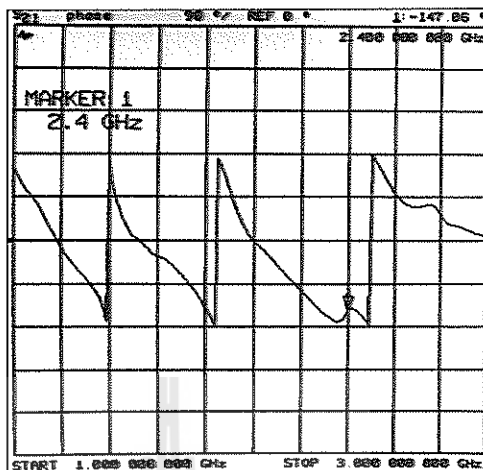
จากกราฟพารามิเตอร์ S56 มีค่าการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ -4.212 dB คือจะทำให้เกิดการส่งผ่านของพลังงานเท่ากับ 37.91% คำนวณได้จากสมการ

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{\text{gain dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

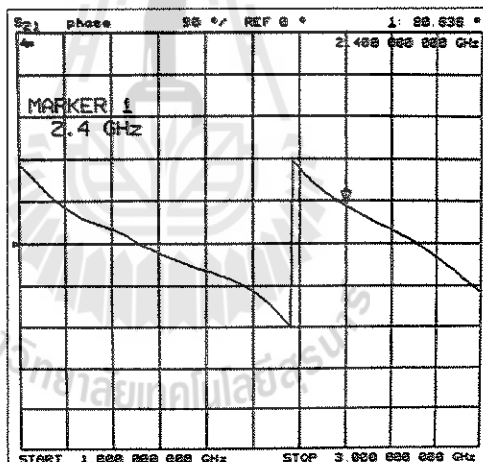
$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = \left(10^{\frac{-4.212\text{dB}}{10}} \right) \times 100\%$$

$$\% \frac{\text{output Power}}{\text{input Power}} = 37.91\%$$

ซึ่งค่าการส่งผ่านของพลังงานที่วัดได้คือ -4.212 dB นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า

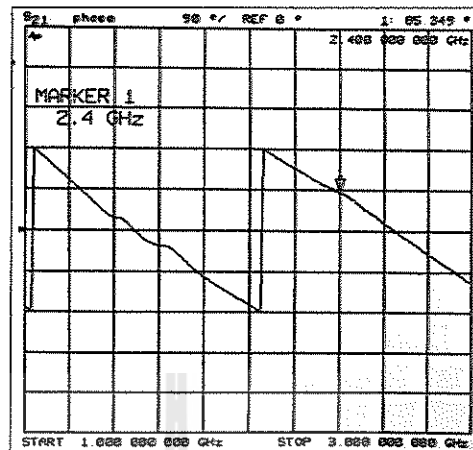


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S31

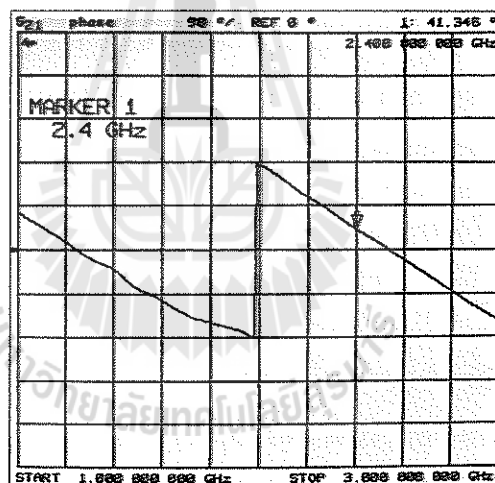


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S51

จากรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 นั้น พารามิเตอร์ S31 มีมุมเฟสเท่ากับ -147.06 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S51 มีมุมเฟสเท่ากับ 80.636 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 227.696 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้ เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S36



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่ามุมเฟสของพารามิเตอร์ S56

จากรูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38 นั้น พารามิเตอร์ S36 มีมุมเฟสเท่ากับ 85.349 องศา ส่วนพารามิเตอร์ S56 มีมุมเฟสเท่ากับ 41.346 องศา มุมเฟสต่างกันคือ 44 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้ไดโอด
ตัวที่ 2 และ 4 ทำงาน

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)		เฟส (degree)		ความต่างเฟส (degree)
	S3	S5	S3	S5	
S1	-3.069	-4.173	-147.06	80.636	227.696
S6	-3.915	-4.212	85.349	41.346	44

จาก ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาเมื่อจ่ายไฟให้
ไดโอดตัวที่3และ4ทำงาน จะเห็นได้ว่าขนาดของ S31, S51, S36 และ S56 มีค่าต่ำกว่า -3 dB ซึ่งแสดงว่า
มีการส่งผ่านพลังงานน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานขาเข้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฟสของพารามิเตอร์
S31 และ S51 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 227.696 องศา หรือประมาณ 225 องศา และเมื่อเปรียบเทียบค่า
เฟสของพารามิเตอร์ S36 และ S56 จะได้ความต่างเฟสเท่ากับ 44 องศา หรือประมาณ 45 องศาซึ่งเป็น
ค่าที่ใช้ได้เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม โปรแกรม CST MICROWAVE
STUDIO ในบทที่ 3

4.4 ข้อสรุปท้ายบท

หลังจากที่ได้นำตัวไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศาที่สามารถเลือกเลือกค่าความต่างเฟสของ
เอาต์พุตได้หลายค่าโดยใช้ไดโอดเป็นตัวสวิตช์เลือกความยาวของเส้นไมโครสตริปมาทดสอบ
ประสิทธิภาพการทำงาน โดยใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz จะพบว่าไฮบริดจ์คัปเปิลอร์แบบ 90 องศา
ดังกล่าวจะสามารถให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าความต่างเฟสที่แตกต่างกัน คือ 0, 45, 180, 135, 225 องศา

บทที่ 5

ข้อสรุปของโครงการ

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงบทสรุปของโครงการการออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินการ วิธีการแก้ปัญหา ข้อเสนอแนะ และวิธีการพัฒนาโครงการต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไข

ในการทำโครงการการออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา ปรากฏปัญหาต่างๆดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบ สาเหตุของปัญหารวมทั้งวิธีการแก้ไข

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ปัญหา
ความล่าช้าในการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ทำการออกแบบ	สาเหตุ เนื่องจากผู้ใช้โปรแกรมยังไม่มีความรู้มากมายพอที่ใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ได้อย่างเต็มที่ วิธีการแก้ไข ผู้ใช้จะต้องหาคู่มือหนังสือการใช้โปรแกรมที่ครอบคลุมมาประกอบการใช้โปรแกรมและมันฝึกฝนการใช้โปรแกรมบ่อยๆ
การใช้งานเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) และตัว matching ในการวัดพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอุปกรณ์	สาเหตุ เนื่องจากการใช้งานเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) ยังมีปัญหาการวัดเนื่องจากการกำหนดค่าการ calibrate ต่างๆบางครั้งยังวัดได้ไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้และอุปกรณ์ matching เกิดการชำรุดขึ้นหรือใช้งานไม่ได้ในขณะนั้น วิธีการแก้ไข ผู้ใช้งานจะต้องทำการ calibrate ค่าต่างๆในการวัดพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบอย่างถูกวิธีตามคำแนะนำที่มีบอกในใบแนะนำการ calibrate เพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในขณะที่ตัว matching เกิดการชำรุดจะต้องสั่งซื้ออุปกรณ์ใหม่และถ้าวัดค่าแล้วไม่ตรงตามที่เราก่อแบบในโปรแกรม ตัว matching นั้นอาจจะใช้งานไม่ได้แล้วก็ต้องลองเปลี่ยนใช้ตัวใหม่

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ตัวโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO บางครั้งผู้ใช้บางท่านอาจจะยังไม่เข้าใจ เราจึงได้ทำการเขียนการใช้พื้นฐาน โปรแกรมขึ้นต้นไว้แล้วในบทที่ 4 แต่ถ้าผู้สนใจการใช้งาน อาจจะซื้อคู่มือหนังสือการใช้โปรแกรมที่ครอบคลุมมาใช้งานเพื่อต่อยอดพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆต่อไป

5.3.2 บางครั้งการใช้งานเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) ก็อาจจะเกิดปัญหา อยู่บ้างเพราะการ calibrate ค่าต่างๆในการวัดพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบต้องทำอย่างรอบคอบ และละเอียดมองเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าไม่แน่ใจอาจจะถามอาจารย์หรือรุ่นพี่ที่ชำนาญการใช้ เครื่องมาช่วยสอนวิธีการใช้งานเครื่องอย่างละเอียดและถูกต้องให้จึงจะทำให้เกิดการวัดที่มี ประสิทธิภาพมากที่สุด

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงงานออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจร ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา อาจจะยังพัฒนาต่อไปได้อีกโดยนำไปใช้กับระบบการสื่อสารในยุค ต่อไปเรื่อยๆ และอาจจะพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมและมีขนาดกะทัดรัดมากกว่านี้เพื่อนำไปใช้ ให้เกิดการใช้งานครึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

5.5 บทสรุปของโครงงาน

โครงงานออกแบบและสร้างวงจรสลับสาย (switch line) ที่ต่อเข้ากับวงจร ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ 90 องศา มีส่วนประกอบหลักคือ ไคโอคที่ใช้ในการสลับสายซึ่งผลจากการสลับสายนี้จะทำให้สามารถเลือกสายนำสัญญาณที่มีความยาวตามที่ต้องการได้ ซึ่งจากเดิมวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ สามารถเลือกมุมในการทำงานได้แค่ 2 มุม ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการทำงานและการเลือกมุม ได้มากขึ้น จึงทำการศึกษาพบว่าไคโอคมีคุณสมบัติในการสวิตช์ปรับเปลี่ยนมุมเฟสได้ โดยนำ ไคโอคความถี่สูงมาต่อเข้ากับวงจร ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ จากเดิมที่วงจร ไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์เลือกมุมได้ 2 มุม เมื่อต่อไคโอคเข้ากับวงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์แล้ว วงจรไฮบริดจ์คัปเปิลเลอร์ก็สามารถเลือกมุมในการทำงานได้มากขึ้นตามการออกแบบ โดยทำการออกแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ในตอนแรกแล้วนำการออกแบบดังกล่าวมาสร้างตัวอุปกรณ์จริง โดยเน้นหลักการทำให้ อุปกรณ์จริงมีประสิทธิภาพในการทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการคือ 2.4 GHz

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทยานิพนธ์การศึกษารูปแบบของสายอากาศแบบช่องเปิดรูปอักษรอีสำหรับการใช้งานใน
เครือข่ายไร้สาย ของนางเตือนใจ อารีระพนิช
- [2] sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/.../1/usa_kongmuang_fulltext.pdf
- [3] kruweerajit1.blogspot.com/p/jhkhkl.html - แคช
- [4] โครงการงานการศึกษาลักษณะการค้ำค่อมของแถบไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90 องศา เพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Characterization study of a 90° Microstrip Bend for
enhancement of microwave device)
- [5] วิทยานิพนธ์วงจรผสมสัญญาณ โดยใช้ไดโอดแบบสมมูลเดี่ยวสำหรับเพิ่มและลดความถี่ย่านไอ
เอสเอ็ม ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต ของนายจักรพันธ์ ใจเย็น วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าพระนครเหนือ
- [6] www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/...of.../index.php
www.getdd.net/programming/55-functionvalue.html - แคช
- [7] web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/diode.htm
- [8] http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode_transistor/diode.htm
- [9] <http://www.geocities.ws/dononline2000/do.html>
- [10] <http://www.tce2day.com/phpbb/viewtopic.php?t=529>

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริพร ชูหมื่นไวย เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 1 ถนนเทศบาล 11 ตำบล อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสุรนารีวิทยา ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวจิตติมา ดีสวน เกิดวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 15/1 ตำบลหนองไผ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนอุดรพัฒนการ ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวกรรณิกา ขามโนนวัด เกิดวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 82 ตำบลโนนเต็ง อำเภอคง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนเมืองคง ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

