ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90 องศา บนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz

โดย

1. นายอภินันธ์ แก้วสนั่น รหัสประจำตัว B5027378
2. นางสาวบงกช แสงโชกุน รหัสประจำตัว B5131969
3. นางสาวปิยาภรณ์ นิลริยา รหัสประจำตัว B5133550

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2554

ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปอร์ไฮบริด 90 องศา

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก)
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงาน ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา บนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz

โดย 1. นาย ยอภินันธ์ แก้วสนั่น รหัสประจำตัว B5027378

2. นางสาว บงกช แสงโชกุน รหัสประจำตัว B5131969

3. นางสาว ปิยาภรณ์ นิลริยา รหัสประจำตัว B5133550

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาคการศึกษาที่ 1/2554

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการออกแบบ ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา บนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 ตัวไขว้สัญญาณนี้ จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สร้างง่าย และใช้วัสดุที่หาได้ง่ายตามร้านขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานเพื่อการศึกษาการ สร้างตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา นี้ส่งผลให้คณะผู้จัดทำได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆมากมาย โครงงานชิ้นนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่คอยช่วยเหลือและคอยให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งบุคคลเหล่านั้นประกอบด้วย

ผู้ช่วยศาสตรา จารย์ ดร .มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำในทุกๆ ด้าน รวมถึงการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงานและแนะแนวทางในการเขียนรายงาน ให้แก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด

พี่นักศึกษา บัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ทุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์

เพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกๆ ด้าน ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและคอยสนับสนุน รวมทั้งกำลังใจที่คอยมอบให้ตลอดมาอย่างหาที่เปรียบมิได้

ผู้จัดทำ
นายอภินันธ์ แก้วสนั่น
นางสาวบงกช แสงโชกุน
นางสาวปิยาภรณ์ นิลริยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ ข	
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ขั้นตอนการทำงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix	3
2.2.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	6
2.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ	7
2.2.3 ตัวเลื่อนเฟส	9
2.3 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	10
2.4 พารามิเตอร์เอส	13
2.4.1 นิยามและความหมายสเกตเตอริงเมตริกซ์	13
2.4.2 ความหมายของพารามิเตอร์เอส	15
2.4.3 คุณสมบัติของพารามิเตอร์เอส	17
2.5 กล่าวสรุป	19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง หน้า

บทที่ 3 การใช้งานโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น

3.1 กล่าวนำ 20

3.2 CST MICROWAVE STUDIO 20

3.2.1 การเริ่มสร้างแบบจำลอง 20

3.2.2 การสร้างวัสดุ Material 21

3.2.3 Load from Material Library 22

3.2.4 การสร้างองค์ประกอบ Components 22

3.2.5 การกำหนดหน่วย Units 23

3.2.6 การกำหนดความถี่ Frequency 23

3.2.7 การกำหนดขอบเขต Boundary Conditions 24

3.2.8 การป้อนพลังงานโดยการกำหนดพอร์ต 25

ก. Waveguide Port 25

ข. Discrete Port 26

3.2.9 การกำหนด Field Monitors 27

3.2.10 การประมวลผล 28

3.2.11 การสร้างรูปทรงพื้นฐาน (Basic Shape Creation) 28

ก. การสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม (Brick) 29

ข. การสร้างรูปทรงกลม (Sphere) 32

ค. การสร้างรูปทรงกระบอก (Cylinder) 33

ง. การสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี(Elliptical Cylinder) 36

จ. การสร้างรูปทรงกรวย (Cone) 38

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

ฉ. การสร้างรูปทรงขนมโดนัท (Torus) 39

3.2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ (pick tool) 39

3.2.13 การลบคมและการเฉือนขอบ (Blend and Chamfer Edges) 40

ก. การลบคม (Blend Edge) 40

ข. การเฉือนคม (Chamfer Edges) 40

3.2.14 วิธีการทำงานของบูลีน (Boolean Operations) 42

ก. วิธีการรวมวัสดุ (Add Mode) 42

ข. วิธีการลบวัสดุออก (Subtract Mode) 42

ค. วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัสดุ (Intersect Mode) 43

ง. วิธีการแทรกวัสดุ (Insert Mode) 43

3.3 กล่าวสรุป 44

บทที่ 4 การออกแบบโดยการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ 45

4.2 การออกแบบและการสร้าง 45

4.2.1 การออกแบบ โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO 46

4.2.2 การสร้างตัวไขว้สัญญาณที่ได้จากการออกแบบ 52

4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ 61

4.3.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ S 61

4.4 กล่าวสรุป 62

บทที่ 5 บทสรุปของโครงงาน

5.1 กล่าวนำ 63

5.2 ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข 63

5.3 ข้อเสนอแนะ 64

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป 64

5.5 กล่าวสรุป 65

ประวัติผู้เขียน 66

เอกสารอ้างอิง 67

ภาคผนวก 68

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 2.1วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix 3
รูปที่ 2.2 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix (1) 5
รูปที่ 2.3 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix (2) 5
รูปที่ 2.4 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา 6
รูปที่ 2.5ตัวไขว้สัญญาณ 7
รูปที่ 2.6ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา 9
รูปที่ 2.7การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป 11
รูปที่ 2.8การวัดพารามิเตอร์เอสโดยการป้อนกำลังคลื่น เข้าที่พอร์ตที่ *i* และต่อแมตชิ่งโหลดในพอร์ตที่เหลือ 16
รูปที่ 2.9 การเลื่อนระนาบอ้างอิงออกจากตำแหน่งเดิม 17
รูปที่ 3.1 หน้าต่างของ Create a New Project 20
รูปที่ 3.2 หน้าต่างของ New Material Parameters 21
รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Load from Material Library 22
รูปที่ 3.4 หน้าต่างของ Specify Units 23
รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Frequency Range Settings 23
รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Boundary Conditions 24
รูปที่ 3.6 ก Electric 24
รูปที่ 3.6 ข Magnetic 24
รูปที่ 3.6 ค Open (PML) 24
รูปที่ 3.6 ง Open (add space) 25
รูปที่ 3.6 จ Periodic 25
รูปที่ 3.6 ช Conducting Wall 25
รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Waveguide Port 25
รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Discrete Port 26
รูปที่ 3.9 รูปแบบ ของ Discrete Port 27

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 3.10 รูปของหน้าต่าง Monitor 27
รูปที่ 3.11 หน้าต่างของ Solver Parameters 28
รูปที่3.12 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม 29
รูปที่ 3.13 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยทางลัด 29
รูปที่3.14 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม 30
รูปที่3.15 รูปสีเหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 1 30
รูปที่ 3.16 รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2 31
รูปที่ 3.17 แสดงรูปกล่องสี่เหลี่ยมและหน้าต่างที่ชื่อ Brick ซึ่งได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 3 31
รูปที่ 3.18 กล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด 32
รูปที่ 3.19 รูปร่างของทรงกลมและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทรงกลม 32
รูปที่ 3.20 รูปทรงกลมที่ได้หลังจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เสร็จแล้ว 33
รูปที่ 3.21 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงกระบอก 33
รูปที่ 3.22 รูปวงกลมที่ได้จากการสร้างรูปทรงกระบอกในขั้นตอนที่ 34
รูปที่ 3.23 รูปร่างทรงกระบอกที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2 34
รูปที่ 3.24 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง 35
รูปที่ 3.25 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง และหน้าต่างของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 35
รูปที่ 3.26 รูปทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง มีขนาดตามที่ได้กำหนด 36
รูปที่ 3.27 วงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของการสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี 36
รูปที่ 3.28 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นี้ 37
รูปที่3.29 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 37
รูปที่ 3.30 รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี 38
รูปที่ 3.31รูปทรงกรวยที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด 38
รูปที่ 3.32 รูปทรงขนมโดนัทที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด 39
รูปที่ 3.33 แถบเครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ 39
รูปที่ 3.34 หน้าต่างในการกำหนดค่ารัศมีของการลบคม 40
รูปที่ 3.35 ขั้นตอนการลบคม 40
รูปที่ 3.36 หน้าต่างการกำหนดค่าของการเฉือนคม 41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 3.37 ขั้นตอนการเฉือนคม 41
รูปที่ 3.38 วิธีการรวมวัสดุ 42
รูปที่ 3.39 วิธีการลบวัสดุออก 42
รูปที่ 3.40 วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัสดุ 43
รูปที่ 3.41 วิธีการแทรกวัสดุ 43
รูปที่ 4.1คัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่มีการออกแบบไว้แล้ว 45
รูปที่ 4.2สร้างกราวด์ของคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา 46
รูปที่ 4.3สร้างคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา 46
รูปที่4.4 ค่าพารามิเตอร์ของคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่มีการออกแบบไว้แล้ว 47
รูปที่ 4.5ตัวไขว้สัญญาณที่เกิดจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกัน 47
รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณที่เกิดจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกัน 48
รูปที่ 4.7 ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกันที่มีการปรับปรุงลาย 48
รูปที่ 4.8 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S11, S22, S33, S44 49
รูปที่ 4.9 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S31, S42 49
รูปที่ 4.10 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S21, S43 50
รูปที่ 4.11ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S41, S23 51
รูปที่ 4.12 ค่าเฟสพารามิเตอร์ S41,S23 51
รูปที่ 4.13 ตัวไขว้สัญญาณแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz
(a.) ด้านหน้าตัวไขว้สัญญาณ 52
(b.) ด้านหลังตัวไขว้สัญญาณ 52
รูปที่ 4.14 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S11 53
รูปที่ 4.15 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S22 54
รูปที่ 4.16แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S33 54
รูปที่ 4.17 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S44 55
รูปที่ 4.18 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S31 56

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 4.19 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S42 56

รูปที่ 4.20 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S21 57

รูปที่ 4.21 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S43 58

รูปที่ 4.22 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S41 58

รูปที่ 4.23 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S23 59

รูปที่4.24 แสดงผลค่าเฟสพารามิเตอร์ S41 60

รูปที่ 4.25 แสดงผลค่าเฟสพารามิเตอร์ S23 60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

เรื่อง **หน้า**

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ, ทิศทางของลำคลื่น และเฟสที่มาจาก Butler Matrix ในรูปที่ 2.1 4

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ S ต่างๆ 61

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฟสของพารามิเตอร์ S41,S23 62

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข 64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการติดต่อสื่อสารไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารระหว่างบุคคล ระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และการติดต่อระหว่างโทรศัพท์กับคอมพิวเตอร์ อีกทั้งยังใช้ในการส่งข้อมูลข่าวสาร ซึ่งถือได้ว่ามีบทบาทสำคัญต่อผู้คนในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก เนื่องจากผู้คนมีความต้องการส่งสัญญาณหรือข้อมูลให้ได้มากยิ่งขึ้นในเวลาที่น้อยลง จึงทำให้การสื่อสารแบบไร้สายได้รับความนิยม อย่างไรก็ตามผู้คนก็ยังมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลให้ได้ในปริมาณที่มากกว่าเดิม ซึ่งในการส่งข้อมูลให้ได้ในปริมาณที่มากกว่าเดิมนั้น ต้องใช้อัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง และการที่อัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงก็ต้องใช้ช่วงแถบความถี่ที่กว้าง โดยอุปกรณ์ทางด้านโทรคมนาคมที่มีใช้ในปัจจุบันนั้นมีการรองรับการใช้งานช่วงแถบความถี่ที่กว้างและในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้แถบความถี่ที่กว้างขึ้นไปอีก ซึ่งในอุปกรณ์ทางโทรคมนาคมหลายตัวมีตัวไขว้สัญญาณเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับทิศทางของสัญญาณตามที่ต้องการ เพื่อตอบสนองการใช้งานบนแถบความถี่กว้างตัวไขว้สัญญาณนั้นก็ต้องใช้ทำงานได้ดีบนแถบความถี่ที่กว้างด้วยเช่นกัน เพื่อจะทำให้อุปกรณ์นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณได้ดี ดังนั้นโครงงานนี้จึงสนใจที่จะออกแบบตัวไขว้สัญญาณให้สามารถใช้งานได้ดีและเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่อุปกรณ์ทางโทรคมนาคมในช่วงแถบกว้างที่ความถี่ 1.92-2.69 GHz ซึ่งเป็นความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 3 (3G)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อสร้างตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่ทำงานบนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานไมโครสตริปเพื่อใช้ในการออกแบบตัวไขว้สัญญาณ

1.3.2 ออกแบบตัวไขว้สัญญาณให้อยู่ในช่วงแถบความถี่กว้างตั้งแต่ 1.92-2.69 GHz

1.3.3 สร้างและทดสอบตัวไขว้สัญญาณที่สร้างขึ้น

1.3.4 แก้ไขอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานไมโครสตริป เพื่อใช้ในการออกแบบตัวไขว้สัญญาณในช่วงแถบความถี่กว้าง 1.92 – 2.69 GHz ในโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

1.4.2 ศึกษาวงจรก่อรูปลำคลื่นและออกแบบตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

1.4.3 ทดสอบตัวไขว้สัญญาณ ที่ได้ทำการออกแบบในโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

1.4.4 สร้างตัวไขว้สัญญาณที่ทำการออกแบบและทดสอบผลเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4.5 สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

1.4. นำเสนอโครงงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

2. สามารถทำงานเป็นทีมได้

บทที่ 2

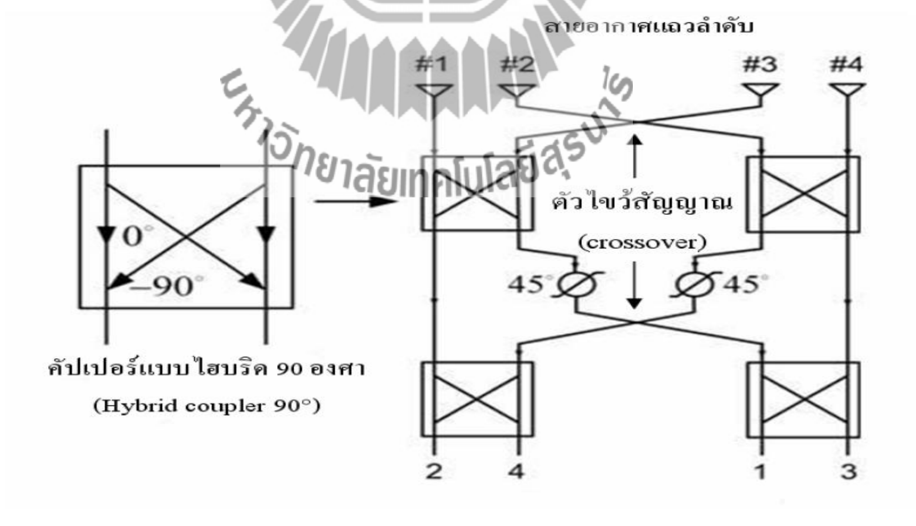
ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การสื่อสารระหว่างบุคคล หรือระหว่างอุปกรณ์ทางระบบโทรคมนาคมนั้น การรับส่งข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับจะมีตัวกลางเป็นสื่อเพื่อนำข่าวสารที่ทำให้ต้นทางและปลายทางสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความรู้เบื้องต้นของ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ตัวไขว้สัญญาณ ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป พารามิเตอร์เอส

2.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งชนิดสวิทช์ลำคลื่น (switched beam systems) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับวงจร Butler matrix ในการเลือกใช้ลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณมากที่สุด



จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงเมตริกซ์ 4× 4 อย่างง่ายๆในการก่อรูปลำคลื่น ประกอบไปด้วยตัวไขว้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

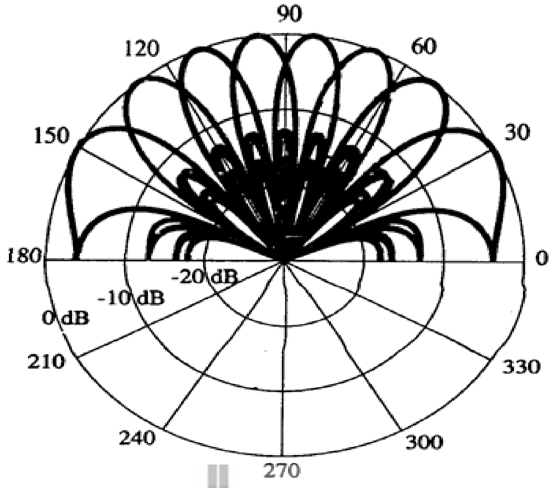
สัญญาณ 2 ตัว ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา 4 ตัว และสายอากาศโมโนโพลอีก 4 ต้น เมตริกซ์ที่ยึดลำคลื่นนี้จะมีสองทิศทาง นั่นคือแต่ละพอร์ตที่เหมือนกันจะรับรูปแบบลำคลื่นเฉพาะที่สามารถใช้ส่งต่อได้ ซึ่งจะใช้รูปแบบเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ, ทิศทางของลำคลื่น และเฟสที่มาจาก Butler Matrix ในรูปที่ 2.1

	Element #1	**Element #2**	**Element #3**	**Element #4**	**Beam Direction**	**Inter-Element Phasing**
Port 1	-45°	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
Port 2	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
Port 3	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°
Port 4	-90°	45°	-180°	-45°	41.4°	135°

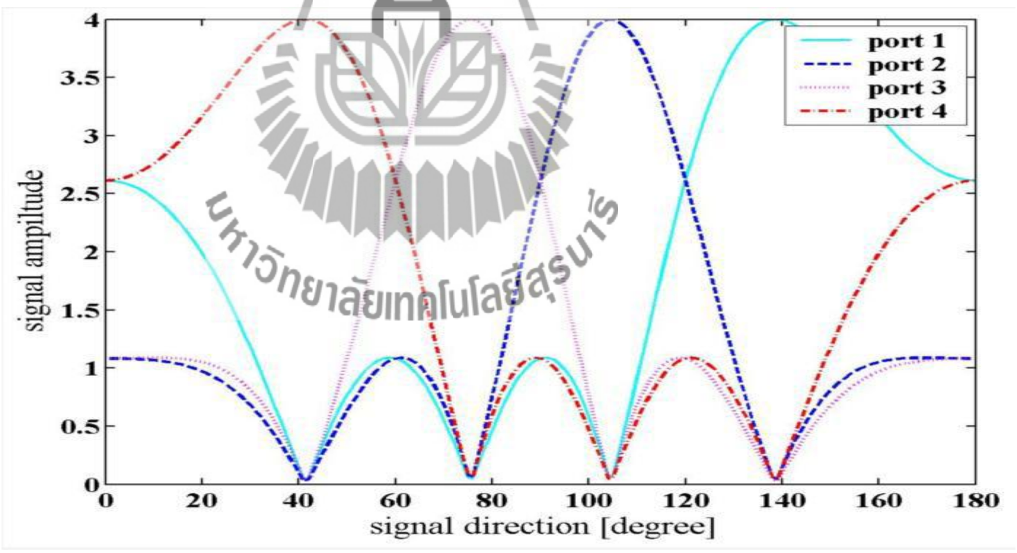
ตารางที่ 2.1 จะแสดงถึงเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler matrix ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเฟส -45°, 0°, -135 °, -90° จากพอร์ตที่ 1,2,3 และ 4 ตามลำดับ จะมีค่าทิศทางของลำคลื่นเป็น 138.6°, 104.5°, 75.5°, 41.4° จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และมีเฟสที่มาจากแต่ละต้นเป็น -135° , -45°, 45°, 135° จากพอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับเช่นกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.2 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix (1)

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงการสร้างรูปแบบลำคลื่นโดยใช้วิธีโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสำหรับการใช้วิธีการโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ใช้ไฮบริดจ์แบบคาดเคส 90 องศา ในวงจรก่อรูปลำคลื่น



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.3 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix (2)

จากรูปที่ 2.3 ลักษณะการก่อรูปลำคลื่นของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ได้จากการรวมกันทั้งวงจรตามทฤษฎีทำให้ได้ค่าดังตารางที่ 2.1 แล้วนำมาพล็อตกราฟจะได้กราฟได้ดังรูป

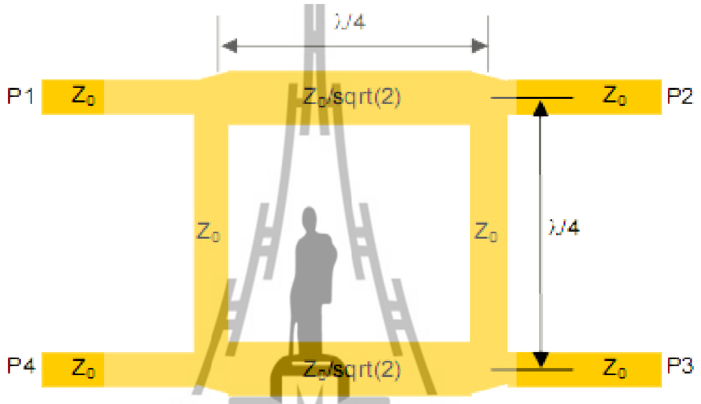
จากรูปวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix แบ่งลักษณะการออกแบบของวงจรได้ดังนี้ 2.2.1 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) 4 ตัว

2.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว

2.2.3 ตัวเลื่อนเฟส (phase shifters 45°) 2 ตัว

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

2.2.1 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°)



รูปที่ 2.4 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

จากการอ้างอิง รูปที่ 2.4 โดยการดำเนินการขั้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมระหว่าง พอร์ต P2 และ พอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และ พอร์ต P3 จะล้าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่ พอร์ตที่ P4 (พอร์ต โดดเดี่ยว) ดังนั้น เราสามารถเขียนสมกา [S] เมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$[S] = \frac{-1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & o \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

จากวงจรและสมการค่า [S] เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

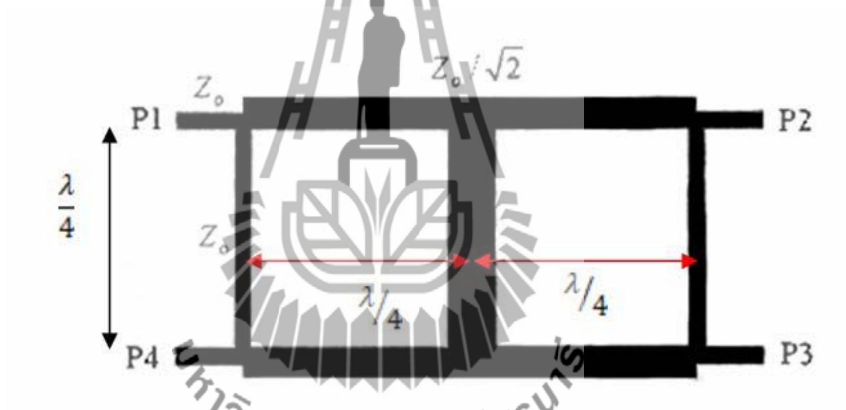
$P_1 = 0$ (พอร์ตเข้าของพลังงาน)

$P_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}}$ (พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1และมีเฟสหล้าหลังอยู่ -90 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P2)

$P_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ (พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1และมีเฟสล้า หลังอยู่ -180 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P3)

$P_4 = 0$ (ไม่มีพลังงานออกจาก พอร์ต P4)

2.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)



รูปที่ 2.5 ตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 2.5 ตัวไขว้สัญญาณเป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล้าหลังระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P3 และ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2 ดังนั้น ค่า [S] เมตริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

จากวงจรและสมการค่า [S] เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

$P_1 = 0$ (พอร์ตเข้าของพลังงาน)

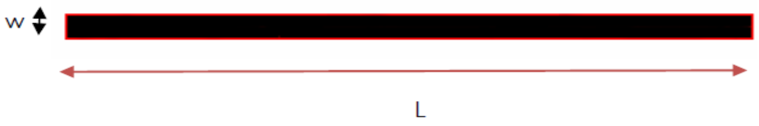
$P_2 = -j$ (พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P4 และมีเฟสล้าหลังอยู่ 0 องศาจาก พอร์ต P4 ถึงพอร์ต P2)

$P_3 = -j$ (พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 และมีเฟสล้าหลังอยู่ 0 องศาจาก พอร์ต P1 ถึงพอร์ต P3)

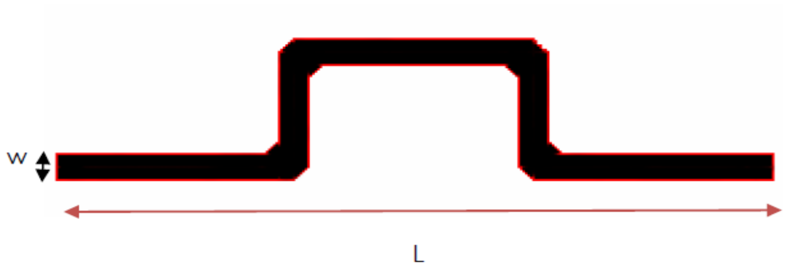
$P_4 = 0$ (พอร์ตเข้าของพลังงาน)

2.3.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

จากรูปที่ 2.6 วงจรระยะห่าง 45 องศา สร้างมาจากการออกแบบสายส่ง โดยที่มี W คือความกว้างตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป และมีความยาวเท่ากับ L ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \tag{2.3}$$

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} \tag{2.4}$$

โดยที่ $$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{2.5}$$

เมื่อ L คือ ความยาว

θ คือ มุม

λ คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของสายส่ง

λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของอากาศ

W คือ ความกว้างตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป

d คือ ความหนาของฐาน

จากรูป (ก.) เป็นตัวเลื่อนเฟสที่เป็นเส้นตรงซึ่งมีการเลื่อนเฟส 45 องศาโดยการสร้างรวมในวงจรนั้น จะเป็นการสร้างโดยการนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 ในการสร้างเฟสด้านล่างและนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ในการสร้างเฟสด้านบนเพื่อให้มีการเพิ่มเฟสโดยเส้นทางของตัวไขว้สัญญาณ

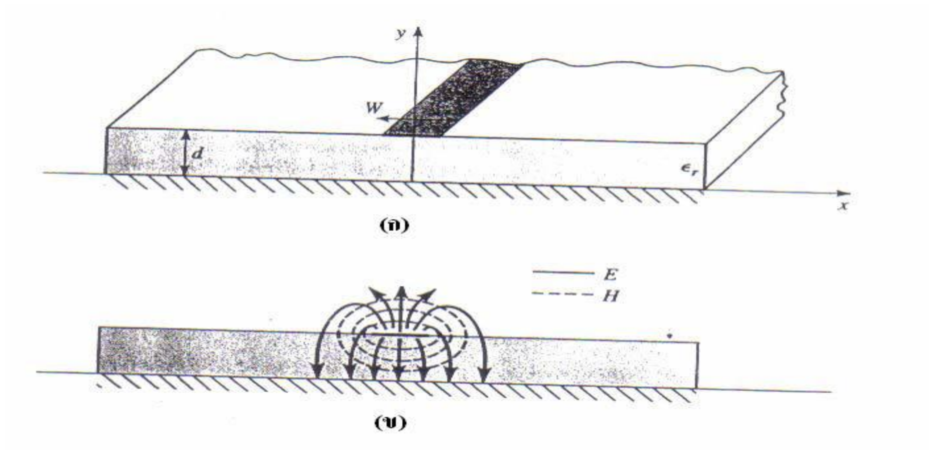
จากรูป (ข.) ความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายมีความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคดงอขึ้นโดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45องศาภายในโครงข่ายลบออกจากค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้เชื่อมต่อได้แล้วค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงามโดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้

ซึ่งวิธีเลื่อนเฟสนี้เป็นการทำให้ก่อรูปลำคลื่นได้ตามทิศทางที่ต้องการภายในโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ซึ่งจากรูปที่ 2.1 นั้นมีการนำตัวเลื่อนเฟส 45 องศา อยู่ระหว่างพอร์ต 1 กับพอร์ต #3 และอยู่ระหว่างพอร์ต 4 กับ พอร์ต #2 เพื่อทำให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นเลื่อนเฟสไป 45 องศา และเมื่อรวมทั้งวงจรแล้วจะทำให้ได้ค่าดังตารางที่ 2.1 จะได้การก่อรูปลำคลื่นดังรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 เพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎี

2.3 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณไมโครสตริปประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และระนาบกราวด์โดยมีไดอิเล็คตริกอยู่ตรงกลาง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 (ก) โดยค่าไดอิเล็คตริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่าง ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ ในการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (d) และค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ε_r) เป็นต้น

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่ออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



รูปที่ 2.7 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

ความเร็วเฟสและค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}}$$

$$\beta = k_0\sqrt{\varepsilon_e} \qquad (2.6)$$

เมื่อ V_p คือ ความเร็วเฟส

β คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่น

c คือ ความเร็วแสง

ε_e คือ ค่าคงตัวของสารไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\frac{1}{\sqrt{(1+12d/W)}} \qquad (2.7)$$

เมื่อ ε_r คือ ค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

W คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น

d คือ ความสูงของฐานรองรับ

ขนาดของไมโครสตริปและค่าความต้านทานภายในสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

เมื่อ Z_0 คือ ค่าความต้านทานภายใน

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \ln\left(\dfrac{8d}{W} + \dfrac{W}{4d}\right) \\ \dfrac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e}\left[W/d + 1.393 + 0.667\ln\left(W/d + 1.444\right)\right]} & \text{เมื่อ } W/d \geq 1 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \dfrac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} & \text{เมื่อ } W/d\langle 2 \\ \dfrac{2}{\pi}\left[B - 1 - \ln\left(2B - 1\right) + \dfrac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln\left(B - 1\right) + 0.39 - \dfrac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] & \text{เมื่อ } W/d\rangle 2 \end{cases} \quad (2.9)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อ $A = \dfrac{Z_0}{60}\sqrt{\dfrac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \dfrac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \dfrac{0.11}{\varepsilon_r}\right)$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_{0\sqrt{\varepsilon_r}}}$$

2.4 พารามิเตอร์เอส

พารามิเตอร์เอส (scattering parameter or s-parameter) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่น่าสนใจเหมาะสำหรับการแสดงคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณและสายอากาศ รวมถึงการวิเคราะห์โครงข่ายหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานในย่านความถี่สูงมาก

2.4.1 นิยามและความหมายสเกตเตอริงเมตริกซ์ (scattering matrix)

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณานิยาม และคุณสมบัติของสเกตเตอริงเมตริกซ์ ซึ่งนิยมใช้มากที่สุดในวงจรไมโครเวฟและวงจรความถี่สูง

ก่อนที่จะกล่าวถึงนิยามของสเกตเตอริงเมตริกซ์จะขอสรุปข้อดี และข้อเสียของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ข้อดีของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ คือ การนิยามแรงดันไฟฟ้าสมมูล และกระแสไฟฟ้าสมมูลขึ้นในวงจรท่อนำคลื่นทำให้ได้วงจรสมมูล และสามารถใช้ทฤษฎีของสายนำสัญญาณกับวงจรสมมูลได้นั้น อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านั้นเป็นเพียงค่าสมมูลซึ่งจะไม่เชื่อมโยงกับค่าที่ได้จารการวัด จึงทำให้เป็นข้องเสียที่ทำให้อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ไม่มีใช้มากนักในวงจรไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาทางปฏิบัติแล้วเราจะวัดค่าที่ได้คือ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง(SWR) ซึ่งให้ข้อมูลของสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ และการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน ดังนั้นเรานิยามพารามิเตอร์ที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามากับคลื่นที่สะท้อนและคลื่นที่ส่งผ่านออกไปทางพอร์ตต่างๆ อาจเรียกรวมว่าคลื่นที่กระจัดกระจาย (scattering) ออกไป พารามิเตอร์ชุดดังกล่าวนี้จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับค่าที่วัดได้ และพารามิเตอร์นี้ก็คือสเกตเตอริงเมตริกซ์นั่นเอง

เมื่อพิจารณาวงจรไมโครเวฟที่มี N พอร์ตตามรูป ถ้ามีคลื่นส่งเข้ามาจากพอร์ตใดพอร์ตหนึ่งเช่นพอร์ตที่ 1 ก็จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็น $V_1^- = S_{11}V_1^+$ และเกิดคลื่นออกไปพอร์ตอื่นๆเป็น $V_n^- = S_{n1}V_1^+$ และจากคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นของสมการแมกซ์เวลล์เมื่อมีคลื่นส่งผ่านเข้ามาจากทุกๆ พอร์ต คลื่นที่ส่งออกไปจากพอร์ตต่างๆจะเป็นผลรวมเชิงเส้นของคลื่นกระจัดกระจายที่เกิดจากการส่งผ่านคลื่นเข้าทางแต่ละพอร์ต ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}S_{12}....S_{1N} \\ S_{21}S_{22}....S_{2N} \\ .... \\ S_{N1}S_{N2}....S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

หรือ

$$\left[V^-\right] = \left[S\right]\left[V^+\right] \tag{2.11}$$

ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เอสนี้โดยทั่วไปเราจะใช้ค่า V_n^+ และ V_n^- ที่นอร์มาไลซ์ไว้ด้วยอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของท่อนำคลื่นเพื่อให้กำลังคลื่นขาเข้า และกำลังงานคลื่นขาออกเขียนได้ในรูป $\left|V_n^+\right|^2$ และ $\left|V_n^-\right|^2$ ตามลำดับ ในที่นี้เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนที่อาจจะเกิดขึ้นจะให้ค่า V_n^+ และ V_n^- ที่นอร์มาไลซ์แล้วเป็น a_n และ b_n ตามลำดับ เมื่อให้อิมพิแดนซ์ลักษณะสมบัติของพอร์ตที่ n เป็น Z_n ความสัมพันธ์ระหว่าง a_n , b_n กับ V_n^+ , V_n^- ก็จะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} a_n &= V_n^+ / \sqrt{Z_n} = I_n^+ \sqrt{Z_n} \\ b_n &= V_n^- / \sqrt{Z_n} = I_n^- \sqrt{Z_n} \end{aligned} \tag{2.12}$$

ซึ่งทำให้กำลังคลื่นขาเข้าและกำลังคลื่นขาออกที่พอร์ต n เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left|a_n\right|^2 &= \left|V_n^+\right|^2 / \sqrt{Z_n} = \left|I_n^+\right|^2 \sqrt{Z_n} \\ \left|b_n\right|^2 &= \left|V_n^-\right|^2 / \sqrt{Z_n} = \left|I_n^-\right|^2 \sqrt{Z_n} \end{aligned} \tag{2.13}$$

เมื่อเราใช้ค่า a_n ,b_n ดังกล่าวนี้ เมตริกซ์เอสที่ได้จะเป็นการผูกความสัมพันธ์ระหว่าง a_n และ b_n ดังนี้

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ bn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}S_{12}....S_{1N} \\ S_{21}S_{22}....S_{2N} \\ .... \\ S_{N1}S_{N2}....S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

หรือ

$$[b] = [S][a] \tag{2.15}$$

2.4.2 ความหมายของพารามิเตอร์เอส

พารามิเตอร์เอสจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับค่าที่ทำการวัดได้ในทางปฏิบัติ ในหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาความหมายของพารามิเตอร์ ซึ่งจะให้ผลในการยืนยันคำกล่าวนี้ ก่อนอื่นพิจารณากรณีที่เราส่งคลื่นเข้าทางพอร์ตที่ i แล้วทำการต่อปลายสายของพอร์ตที่เหลือด้วยแมตชิงโหลดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ในสภาพเช่นนี้ a_n จะเป็นศูนย์หมด ยกเว้น a_i และจากสมการเราจะได้

$$b_i = S_{ii}a_i \tag{2.16}$$

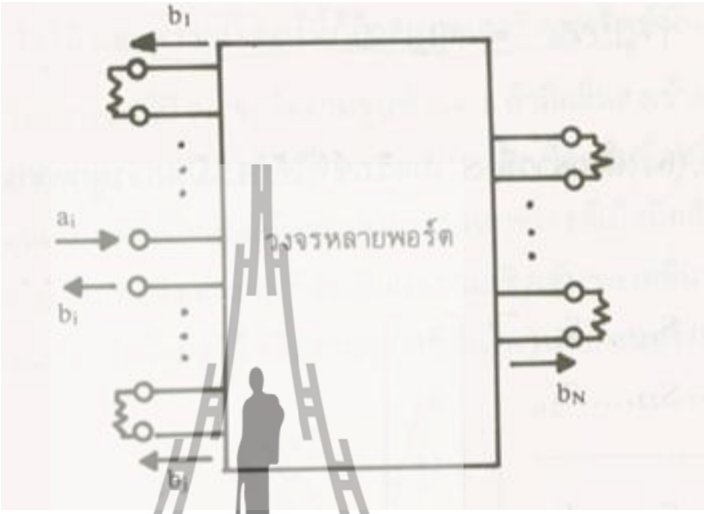
หรือ

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} = \frac{V_{i^-}}{V_{i^+}} = \Gamma_i \tag{2.17}$$

ผลที่ได้นี้ก็เป็นการบ่งบอกว่าภายใต้เงื่อนไขวงจรดังกล่าว เราสามารถหาค่า S_{ii} ได้โดยการวัดคลื่นที่สะท้อนกลับมาในพอร์ตที่ i และ S_{ii} ก็คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับนั่นเอง และภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้ b_i จะเขียนได้ดังนี้

$$b_j = S_{ji} a_i \tag{2.18}$$

หรือ $$S_{ji} = \frac{b_j}{a_i} \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.8 การวัดพารามิเตอร์เอส โดยการป้อนกำลังคลื่น เข้าที่พอร์ตที่ i และต่อแมตชิ่งโหลดในพอร์ตที่เหลือ

ผลที่ได้นี้ก็เป็นการแสดงว่า S_{ji} จะเท่ากับสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านจากพอร์ตที่ i ไปพอร์ตที่ j ค่า S_{ji} นี้ก็จะทำการวัดได้โดยทำการวัดขนาดและเฟสของ b_j ภายใต้เงื่อนไขวงจรดังกล่าว

จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการวัดค่าพารามิเตอร์เอสนี้จะทำได้โดยการต่อแมตชิ่งโหลดเข้าที่ปลายสายของพอร์ตต่างๆซึ่งจัดว่าทำได้ง่ายในภาคปฏิบัติ ในกรณีของการวัด Zหรือ Y พารามิเตอร์นั้นเราจะต้องทำการเปิดวงจรในเชิงไฟฟ้า เพราะจะมีกำลังคลื่นบางส่วนแพร่กระจายออกไปจากปลายเปิดวงจรดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นเมื่อกล่าวโดยสรุปแล้วในวงจรย่านความถี่สูงมากโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟขึ้นไปนั้น เรามักจะใช้ พารามิเตอร์เอสมากกว่า Z พารามิเตอร์ หรือ Y พารามิเตอร์ด้วยเหตุผลที่ พารามิเตอร์เอสให้ความหมายที่ชัดเจน และสามารถทำการวัดได้โดยง่าย

2.4.3 คุณสมบัติของพารามิเตอร์เอส

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาคุณสมบัติของพารามิเตอร์เอสที่สำคัญๆดังนี้ คุณสมบัติแรกที่จะพิจารณา ก็คือ การเลื่อนระนาบอ้างอิงออกจากตำแหน่งเดิม เพื่อสะดวกในการพิจารณาจะให้เป็นการเลื่อนจุดเชื่อมต่อเหมือนกันหมดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9

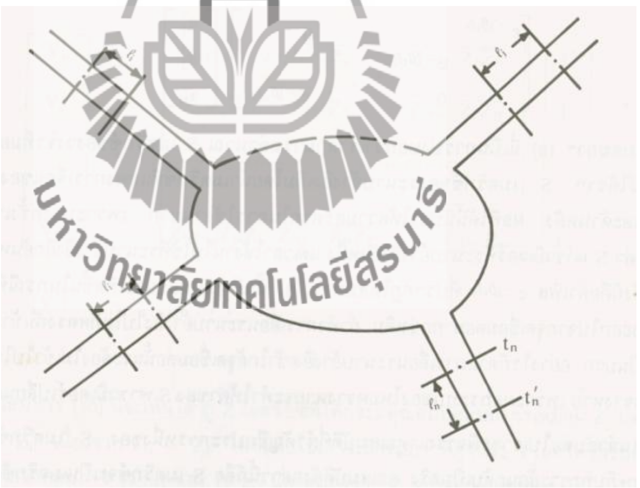
ถ้าให้ t'_n เป็นระนาบอ้างอิงใหม่

t_n เป็นระนานเดิม

l_n เป็นระยะห่างระหว่าง t'_n และ t_n

β_n เป็นค่าคงที่เฟสในท่อนำคลื่น

การเลื่อนระนาบอ้างอิงใหม่ ถอยห่างออกจากระนาบอ้างอิงเดิมจะทำให้เฟสของ อยู่ $\beta_n l_n$ ในขณะที่เฟสของ b'_n จะช้ากว่า b_n เป็น b_n ในรูปเมตริกซ์จะได้ผลดังนี้



รูปที่ 2.9 การเลื่อนระนาบอ้างอิงออกจากตำแหน่งเดิม

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a'_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\beta_1 l_1} & & & 0 \\ & e^{-j\beta_2 l_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & e^{-j\beta_N l_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \\ \vdots \\ a'_N \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b'_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\beta_1 l_1} & & & 0 \\ & e^{-j\beta_2 l_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & e^{-j\beta_N l_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} \qquad (2.21)$$

และเมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง b'_n กับ a'_n ก็จะได้ S เมตริกซ์สำหรับระนาบอ้างอิงใหม่ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ \vdots \\ b'_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\beta_1 l_1} & & & 0 \\ & e^{-j\beta_2 l_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & e^{-j\beta_N l_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11}S_{21}..........S_{1N} \\ S_{21}S_{22}..........S_{2N} \\ .... \\ S_{N1}S_{N1}..........S_{NN} \end{bmatrix} \qquad (2.22)$$

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.22 เป็นการบ่งบอกว่าเราสามารถคำนวณเมตริกซ์เอสของวงจรที่มองจากระนาบอ้างอิงใหม่ได้จากเมตริกซ์เอสของระนาบอ้างอิงเดิม โดยนำเมตริกซ์ที่แสดงการเลื่อนของเฟสคูณเข้าที่ด้านหน้าและด้านหลัง ผลที่ได้นับว่าให้ความสะดวกในการใช้งานมาก เพราะบางครั้งเราจำเป็นต้องทำการวัดค่าพารามิเตอร์เอสที่ระนาบอ้างอิงหนึ่ง แต่เวลานำไปใช้งานไปใช้ที่ระนาบอ้างอิงอีกอันหนึ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 กล่าวสรุป

โดยสรุปแล้ววงจร Butler matrix ประกอบด้วยคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ตัวไขว้สัญญาณ และตัวเลื่อนเฟส โดยออกแบบด้วยทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป เพราะว่าสามารถสร้างได้ง่าย และได้ทราบถึงพารามิเตอร์เอสซึ่งเหมาะสำหรับการแสดงคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณและสายอากาศ จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมา สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบตัวไว้สัญญาณได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3

การใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น

3.1กล่าวนำ

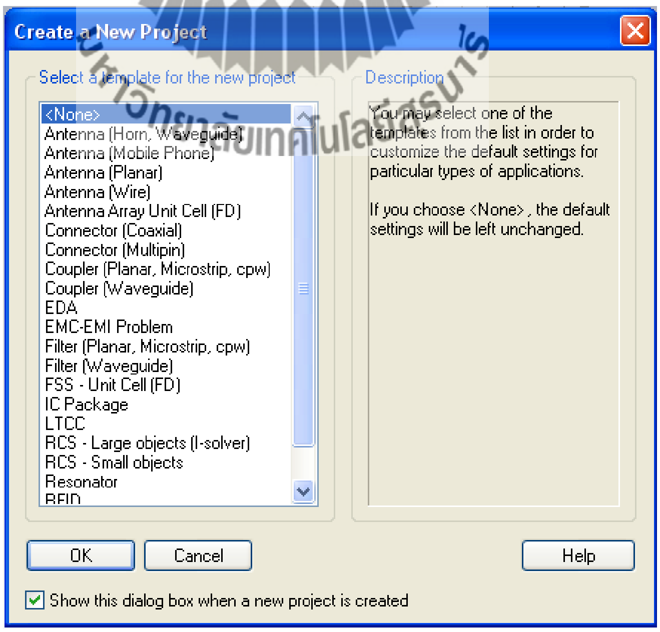
ในบทที่ 4 จะเป็นการแนะนำการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น เพื่อให้ มีความรู้ความเข้าใจในการใช้โปรแกรมอย่างถูกวิธีและให้รู้หลักการสร้างแบบจำลองรวมถึงวิธีการ ประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ค่าต่างๆ จุดประสงค์เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาและใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ได้เข้าใจในโปรแกรมมากขึ้น

3.2 CST MICROWAVE STUDIO

3.2.1 การเริ่มสร้างแบบจำลอง

1. เมื่อเปิดโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO แล้วให้เลือกที่เมนู File → New

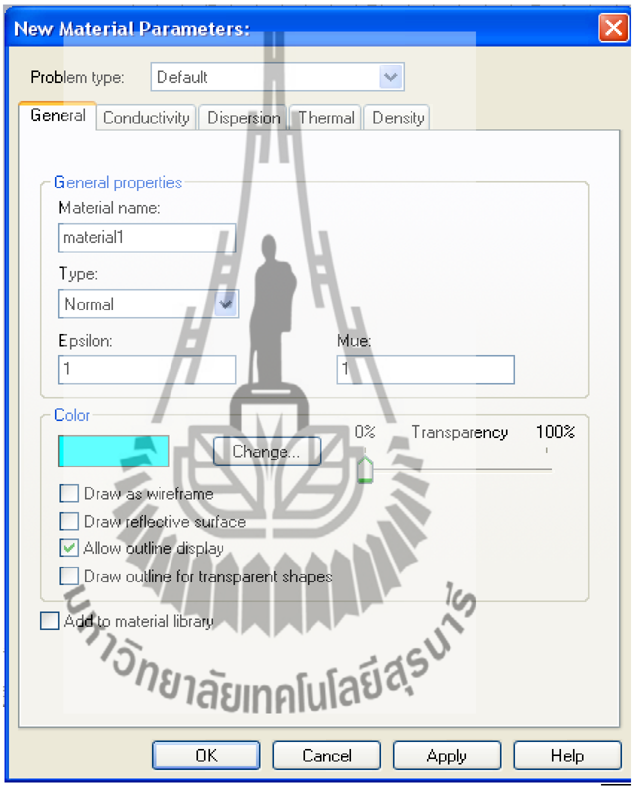
2. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 3.1 เป็นการสร้าง templates ให้กับชิ้นงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะมีแบบให้เลือกแล้วแต่ความต้องการ หากไม่ต้องกำหนดให้เลือก None แล้วเลือก OK



รูปที่ 3.1 หน้าต่างของ Create a New Project

3.2.2 การสร้างวัสดุ Material

1. เลือกเมนู Solve → Materials → New Materials จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่3.2
2. ตั้งชื่อให้กับวัสดุ
3. กำหนด ชนิดของวัสดุ (PEC ,Normal ,Anisotropic และ Lossy Metals)
4. เลือกสีให้กับวัสดุ
5. เลือก OK



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.2 หน้าต่างของ New Material Parameters

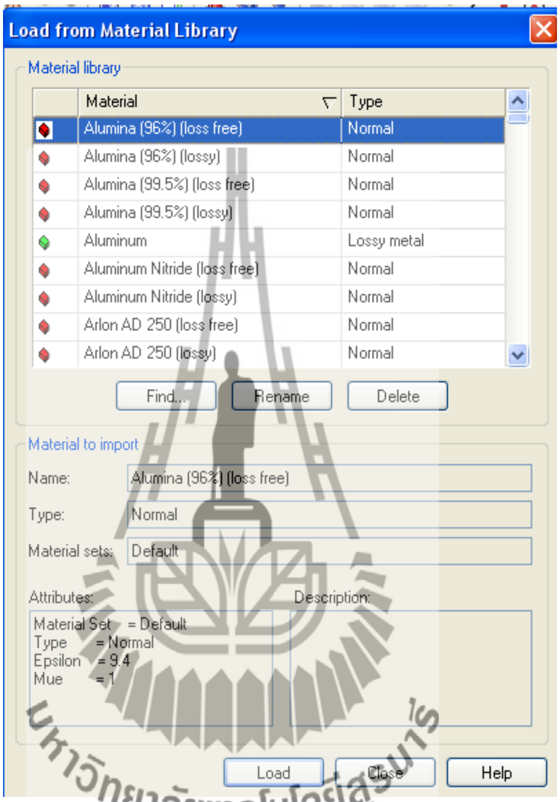
3.2.3 Load from Material Library

1. โปรแกรม CST มีข้อมูลของวัสดุบางชนิด ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้

เลือก Solve → Materials → Load from Material Library จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.3

2. เลือก วัสดุที่ต้องการ จะเห็นว่าแต่ละชนิดจะมีค่าคุณสมบัติให้อัตโนมัติ

3. เลือก OK



รูปที่ 3.3 หน้าต่างของ Load from Material Library

3.2.4 การสร้างองค์ประกอบ Components

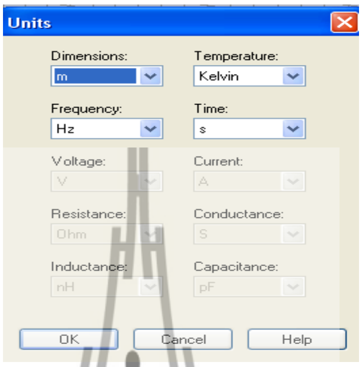
การสร้าง Components เป็นการกำหนดเลเยอร์ให้กับชิ้นงานเพื่อความสะดวกในการสร้างงาน แต่ละชิ้นโดยเลือกเมนู Objects → New Component

3.2.5 การกำหนดหน่วย Units

1. เลือกเมนู Solve → Units จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.4

2. เลือก Dimensions ความถี่และเวลาที่ต้องการ

3. เลือก OK

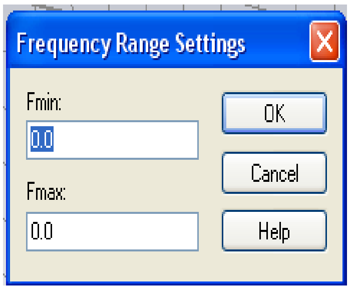


รูปที่ 3.4 หน้าต่างของ Specify Units

3.2.6 การกำหนดความถี่ Frequency

1. หลังจากสร้างชิ้นงานแล้วจะสามารถกำหนดความถี่ได้โดย เลือกเมนู Solve → Frequency จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.5

2. กำหนด ความถี่เริ่มต้น Fmin และ ความถี่สูงสุด Fmax ค่าของความถี่ที่ตั้งไว้จะตั้งค่า signal monitors โดยอัตโนมัติ

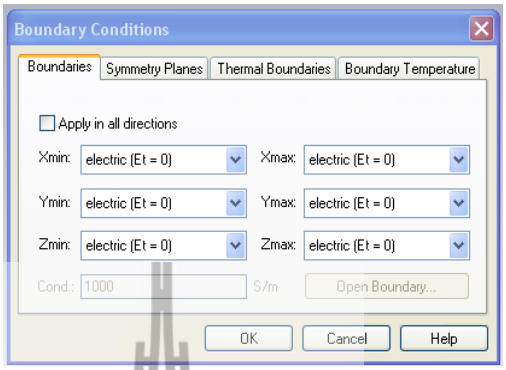


รูปที่ 3.5 หน้าต่างของ Frequency Range Settings

3.2.7 การกำหนดขอบเขต Boundary Conditions

1. เลือกเมนู Solve → Boundary Conditionsจะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.6

2. เลือกขอบเขตตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.6 หน้าต่างของ Boundary Conditions

Electric: ค่าสนามไฟฟ้าของด้านที่เลือก ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ มีสัญลักษณ์ดังรูปที่3.6 ก

รูปที่ 3.6 ก Electric

Magnetic: ค่าสนามแม่เหล็กของด้านที่เลือก ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ ดังรูปที่3.6 ข

รูปที่ 3.6 ข Magnetic

Open (PML): เสมือนเป็นอากาศว่าง Free Space คลื่นสามารถผ่านไปได้ ดังรูปที่3.6 ค

รูปที่ 3.6 ค Open (PML)

Open (add space): เหมือน Open (PML) แต่จะเพิ่มระยะสำหรับการคำนวณ farfield การกำหนดแบบนี้ส่วนมากใช้ในการสร้างสายอากาศ ดังรูปที่3.6 ง

รูปที่ 3.6 ง Open (add space)

Periodic: เป็นการเชื่อมขอบเขตด้านตรงข้ามเข้าด้วยกัน ดังรูปที่3.6 จ

รูปที่ 3.6 จ Periodic

Conducting Wall: เสมือนเป็นผนังของวัสดุโลหะแบบ lossy ดังรูปที่3.6 ช

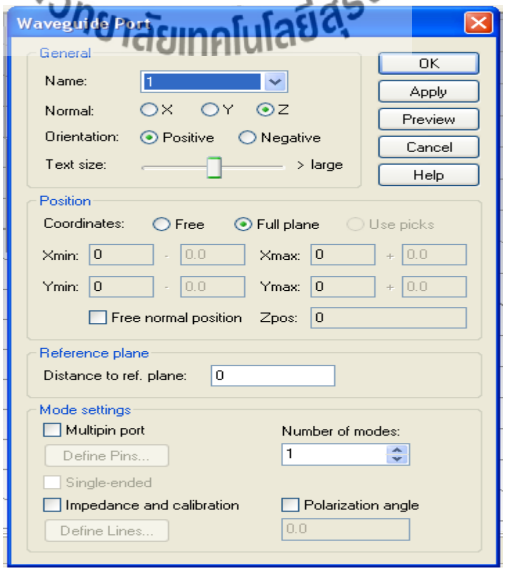
รูปที่ 3.6 ช Conducting Wall

3.2.8 การป้อนพลังงานโดยการกำหนดพอร์ต

การกำหนด ทำได้ 2 วิธี คือ Waveguide Port และ Discrete Port

ก) Waveguide Port

1. เลือกเมนู Solve → Waveguide Port จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หน้าต่างของ Waveguide Port

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร

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

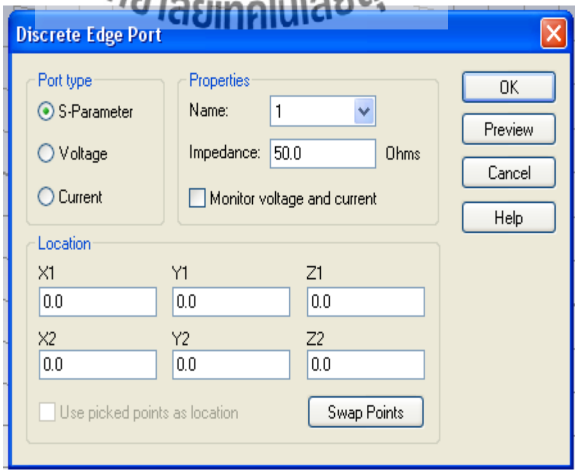
5. เลือก OK

ข) Discrete Port

การสร้างพอร์ตแบบนี้ใช้หลักการสร้างจากจุดหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่ง โดยระหว่างพอร์ตนั้นต้องไม่มีเนื้อของชิ้นงานแรกอยู่

1. เลือกเมนู Solve → Discrete Port จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่3.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.8 หน้าต่างของ Discrete Port

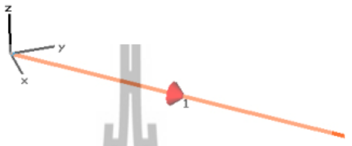
2. ส่วนของ Port type เป็นการกำหนดลักษณะเพื่อการประมวลผล

S-Parameter – อ้างอิงโดยให้พอร์ตที่ป้อนเป็น 50 โอมห์

Voltage – อ้างอิงโดยป้อนแรงดันให้กับพอร์ตตามที่กำหนด

Current – อ้างอิงโดยป้อนกระแสให้กับพอร์ตตามที่กำหนด

3. ส่วนของ Location เป็นการกำหนดจุดที่ต้องการในการป้อนพลังงาน โดยรูปแบบของ discrete port จะเป็นดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบ ของ Discrete Port

3.2.9 การกำหนด Field Monitors

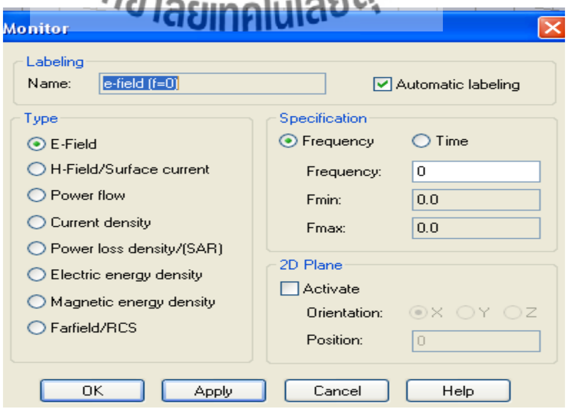
ก่อนที่จะทำการประมวลผลจะต้อง เลือกว่าจะดูผลแบบใดบ้าง

1. เลือกเมนู Solve → Field Monitors จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.10

2. เลือก Type ที่ต้องการจะดูการประมวลผล

3. เลือก OK

ในการตั้งค่า Field Monitors สามารถกำหนด type ได้หลายตัว



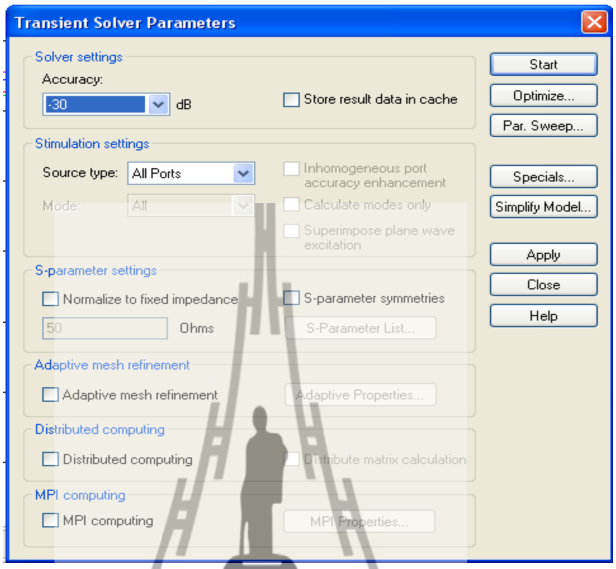
รูปที่ 3.10 รูปของหน้าต่าง Monitor

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

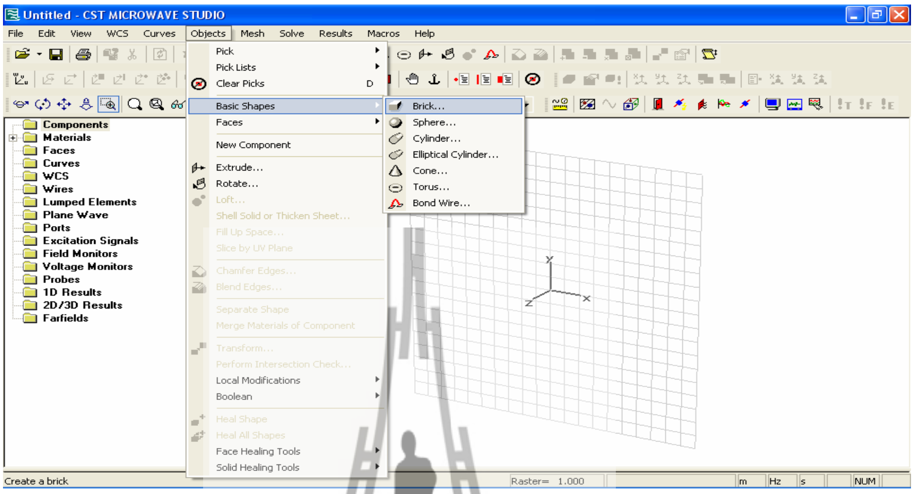
3.2.11 การสร้างรูปทรงพื้นฐาน (Basic Shape Creation)

การสร้างรูปทรงพื้นฐานต่างๆในโปรแกรม CST มีดังนี้

ก) การสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม (Brick)

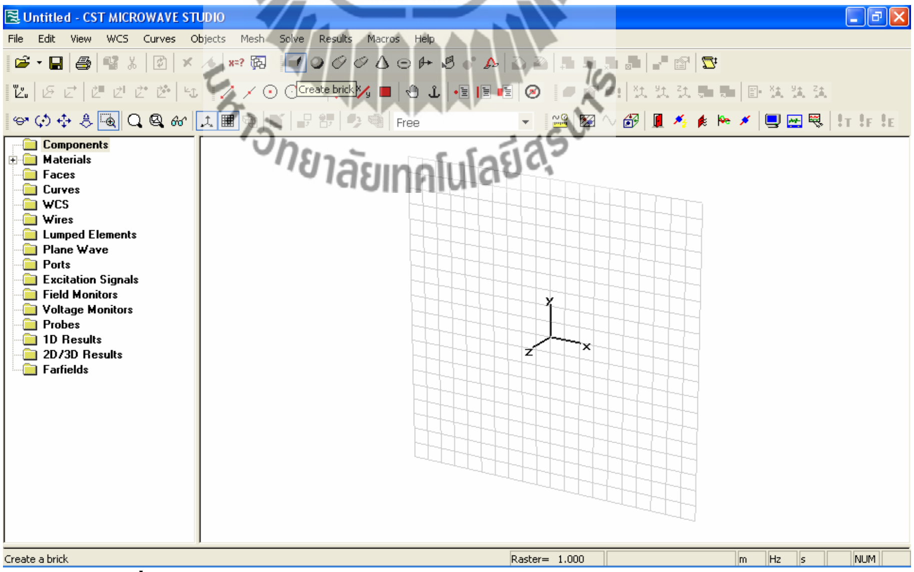
วิธีที่ 1 ไปที่ main menu แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้ ตามรูปที่ 3.12

Objects* ⇨ *Basic Shapes* ⇨ *Brick



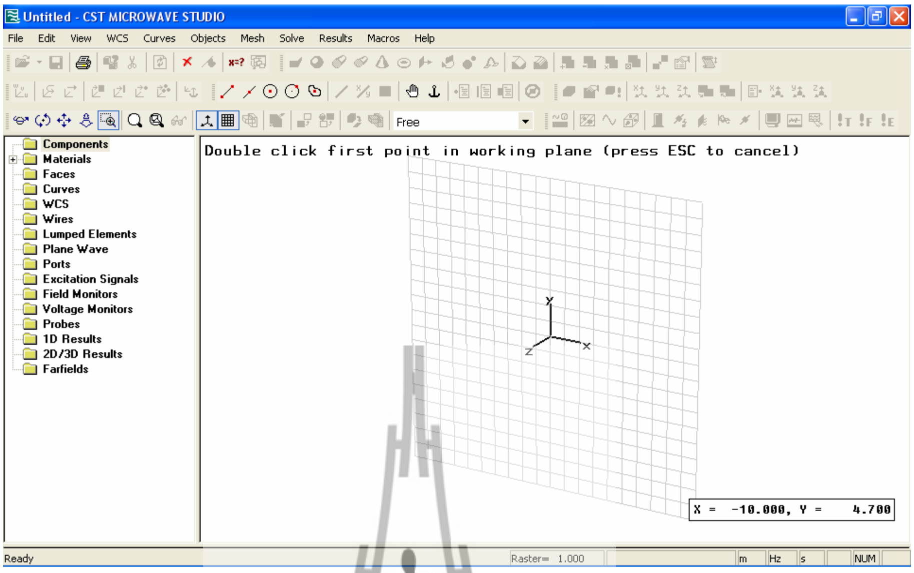
รูปที่3.12 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม

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



รูปที่ 3.13 การใช้คำสั่งในการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยทางลัด

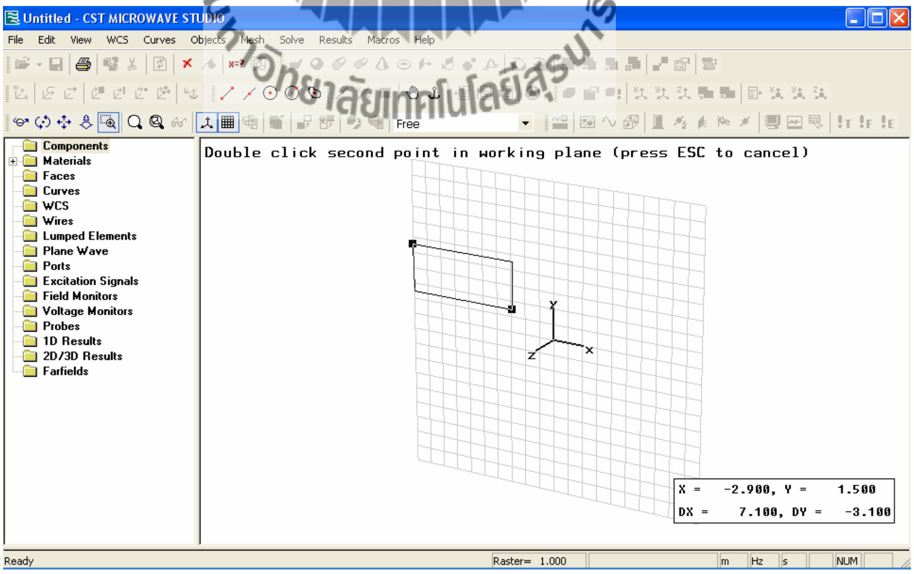
จากทั้ง 2 วิธี จะได้หน้าต่าง ดังรูปที่ 3.14



รูปที่3.14 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม

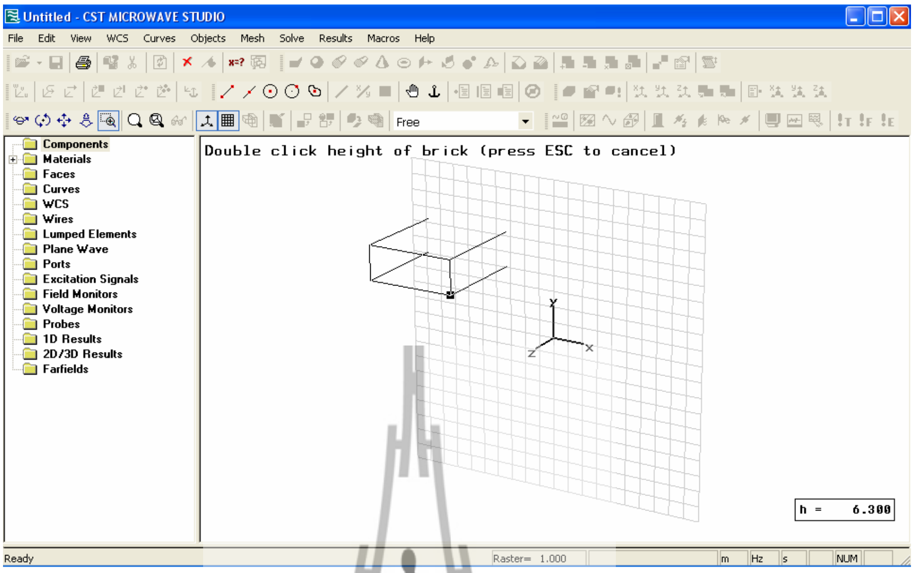
จากนั้นทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ดับเบิ้ลคลิกหนึ่งครั้งบนพื้นที่ว่างแล้วลากเม้าออกไปจะได้รูปสี่เหลียม ดังรูปที่ 3.15



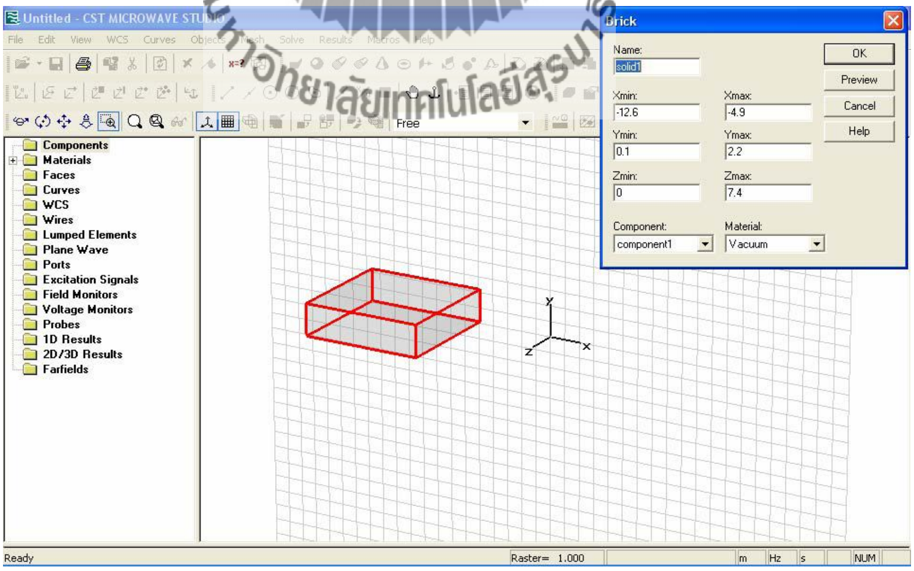
รูปที่3.15 รูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 1

2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเม้าออกไปจะได้รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปทรงของกล่องสี่เหลี่ยมที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2

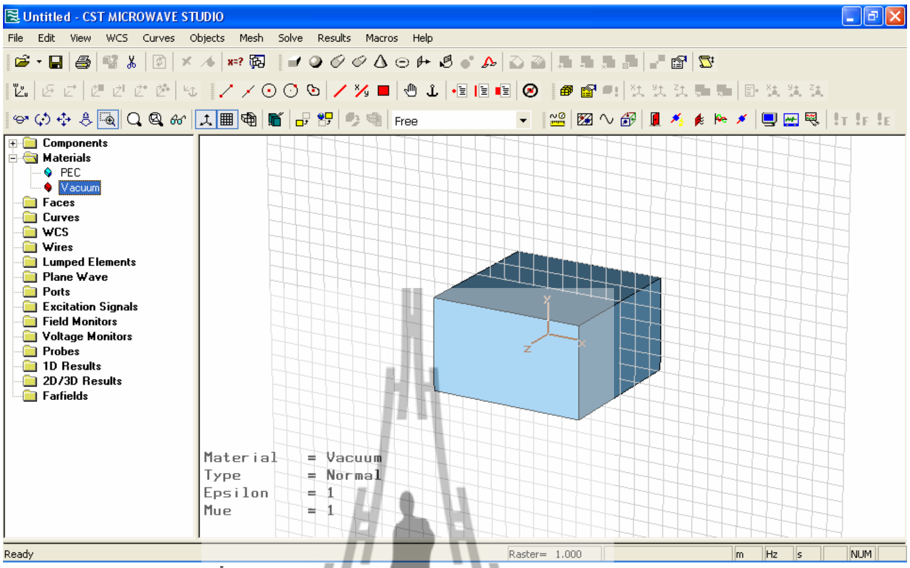
2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปกล่องสี่เหลี่ยมและมีหน้าต่างที่ชื่อ Brick ขึ้นมาดังรูปที่34.17



รูปที่ 3.17 แสดงรูปกล่องสี่เหลี่ยมและหน้าต่างที่ชื่อ Brick ซึ่งได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 3

4. ตั้งชื่อในช่อง Name กำหนดค่าต่างๆให้ครบ ส่วนตรงช่อง Component กับ Material ให้เลือกว่าจะเอาอะไรตามที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนต้น

5. คลิกที่ OK ก็จะได้รูปกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนดดังรูปที่ 3.18



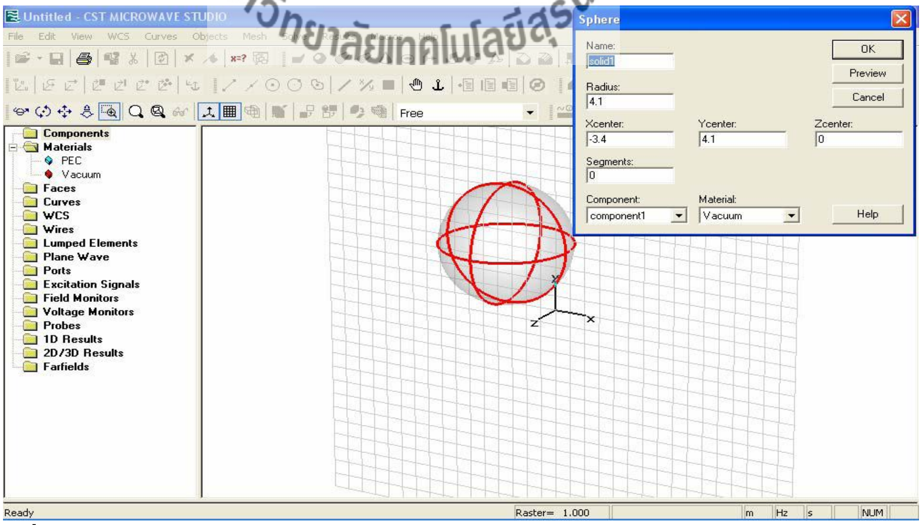
รูปที่ 3.18 กล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

ข) การสร้างรูปทรงกลม (Sphere)

การสร้างรูปทรงกลมมี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

Objects ➪ Basic Shapes ➪ Sphere

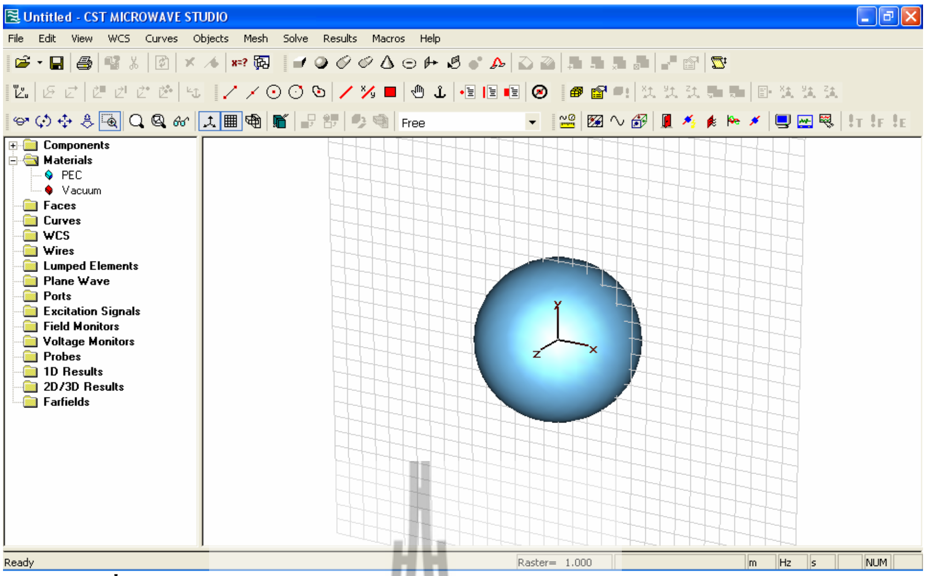
แล้วทำการกำหนดค่าในหน้าต่างที่ชื่อ Sphere ดังรูปที่3.19



รูปที่ 3.19 รูปร่างของทรงกลมและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทรงกลม

จากนั้นก็ทำเช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม จะได้รูปทรงกลมออกมาดังนี้ ตามรูปที่3.20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



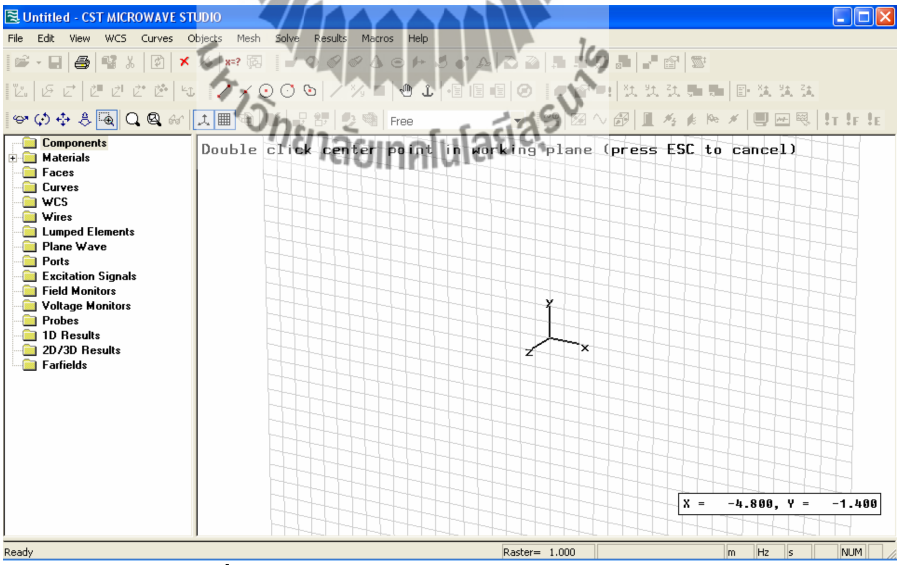
รูปที่ 3.20 รูปทรงกลมที่ได้หลังจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เสร็จแล้ว

ค) การสร้างรูปทรงกระบอก (Cylinder)

การสร้างรูปทรงกระบอก มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

Objects ⇨ Basic Shapes ⇨ Cylinder

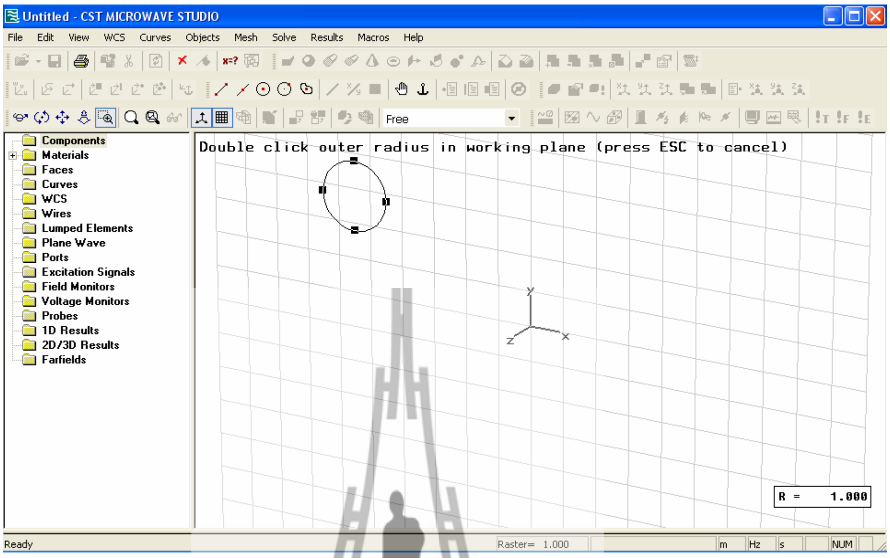
เมื่อเข้าไปตามคำสั่งนี้แล้วจะได้หน้าต่างดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หน้าต่างของการสร้างรูปทรงกระบอก

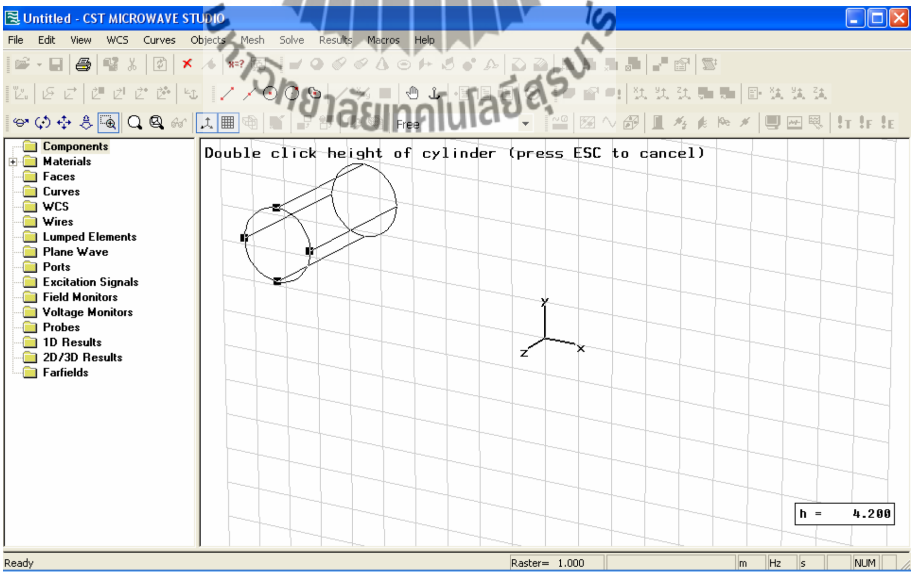
จากนั้นให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ดับเบิ้ลคลิกที่พื้นที่ว่างหนึ่งครั้งแล้วลากเม้าออกไปจะได้รูปวงกลมดังรูปที่ 4.22



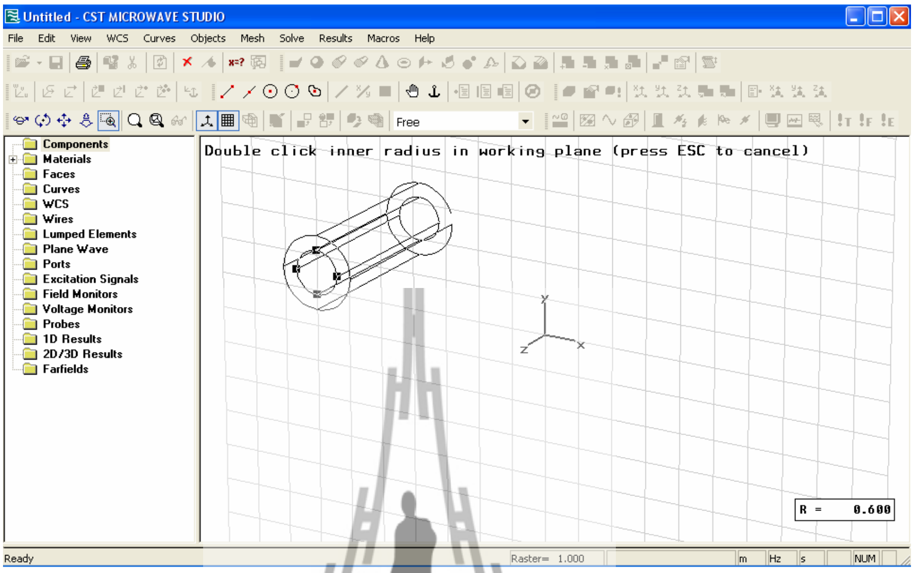
รูปที่ 3.22 รูปวงกลมที่ได้จากการสร้างรูปทรงกระบอกในขั้นตอนที่ 1

2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเม้าออกไปจะได้รูปร่างทรงกระบอกดังรูปที่ 3.23



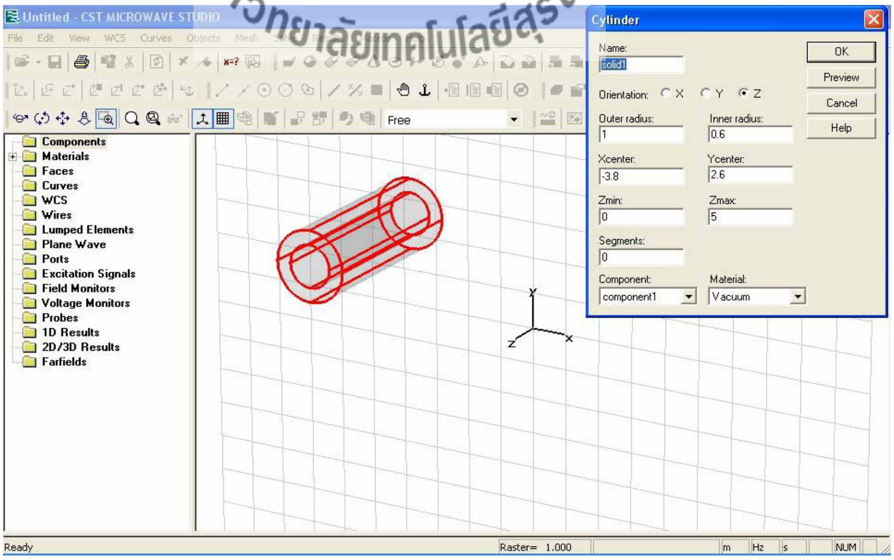
รูปที่ 3.23 รูปร่างทรงกระบอกที่ได้จากการสร้างในขั้นตอนที่ 2

3. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งแล้วลากเม้าเข้าไปด้านในของทรงกระบอกจากรูปที่3.23 จะได้รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง

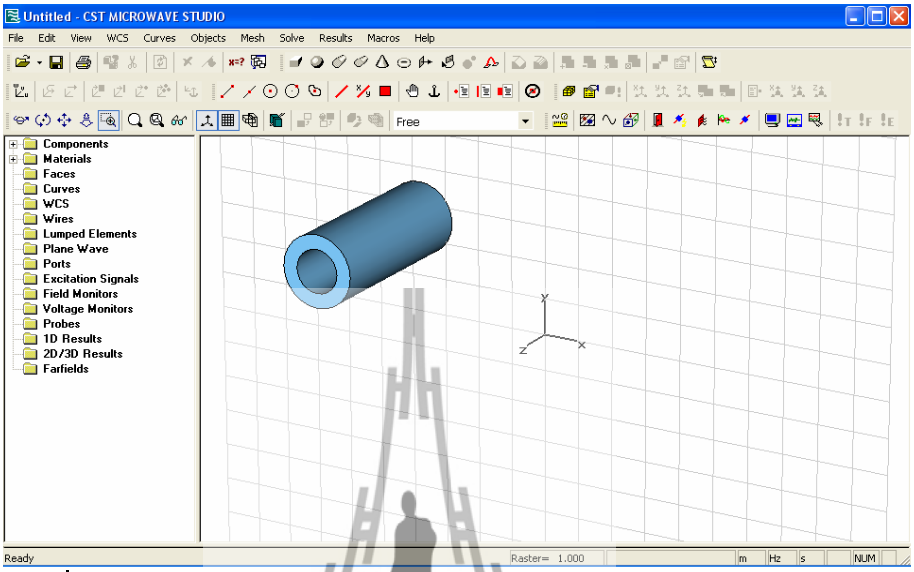
4 . ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปร่างของทรงกระบอก (จากขั้นตอนที่ 2 สามารถกด Esc ออกไปเลยก็ได้แล้วค่อยไปกำหนดค่ารัศมีเอาก็จะได้เช่นกัน) และจะปรากฏหน้าต่างที่ชื่อ Cylinder ขึ้นมาเพื่อให้กำหนดค่า ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง และหน้าต่างของการกำหนดค่าพารามิเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. เมื่อกำหนดค่าเสร็จแล้ว คลิกที่ปุ่ม OK จะได้รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะกลวงและมีความหนาตามรัศมีของวงกลม 2 วง ที่ได้กำหนด และมีจุดศูนย์กลางกับความยาวตามแนวแกนที่กำหนด ดังรูปที่ 3.26



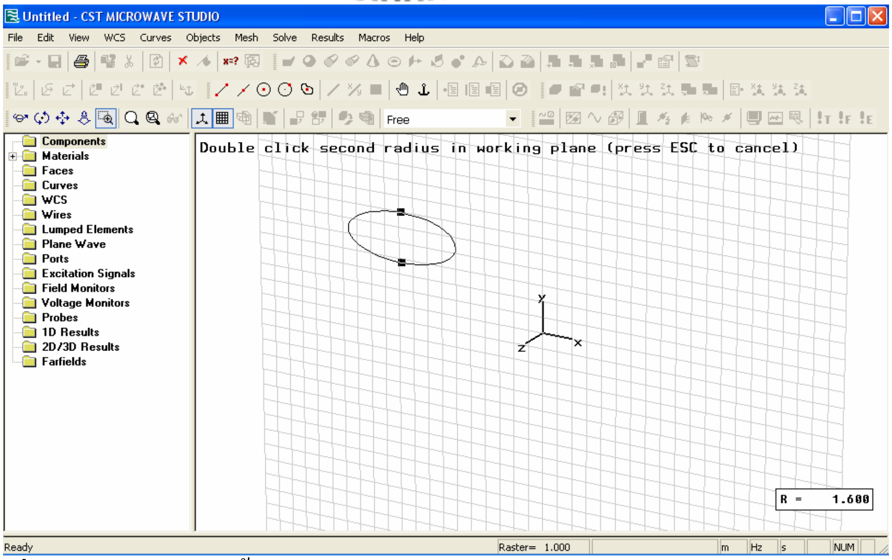
รูปที่ 3.26 รูปทรงกระบอกที่มีวงกลมรัศมีต่างกัน 2 วง มีขนาดตามที่ได้กำหนด

ง) การสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี (Elliptical Cylinder)

การสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

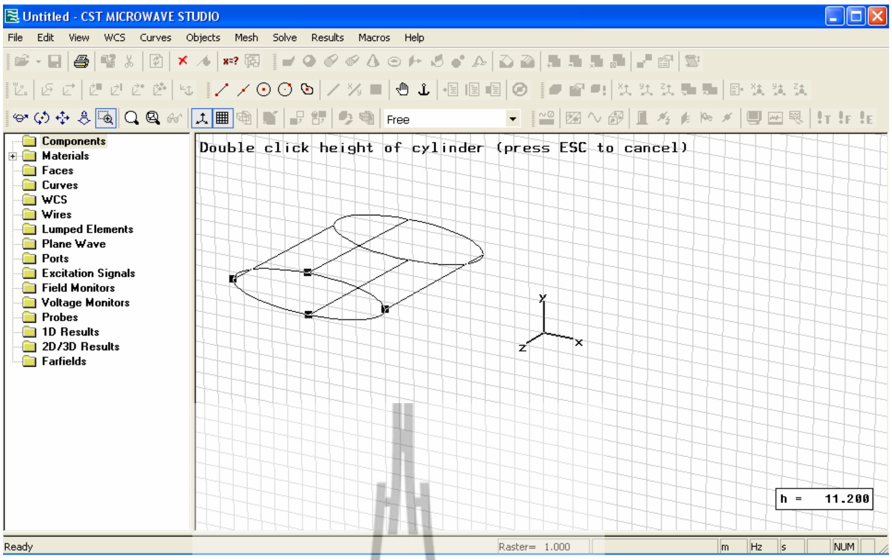
Objects ⇨ ***Basic Shapes*** ⇨ ***Elliptical Cylinder***

1. ดับเบิ้ลคลิกบนพื้นที่ว่างหนึ่งครั้งแล้วลากเม้าออกไปจะได้เส้นตรงจากนั้นดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปวงรีดังรูปที่ 3.27



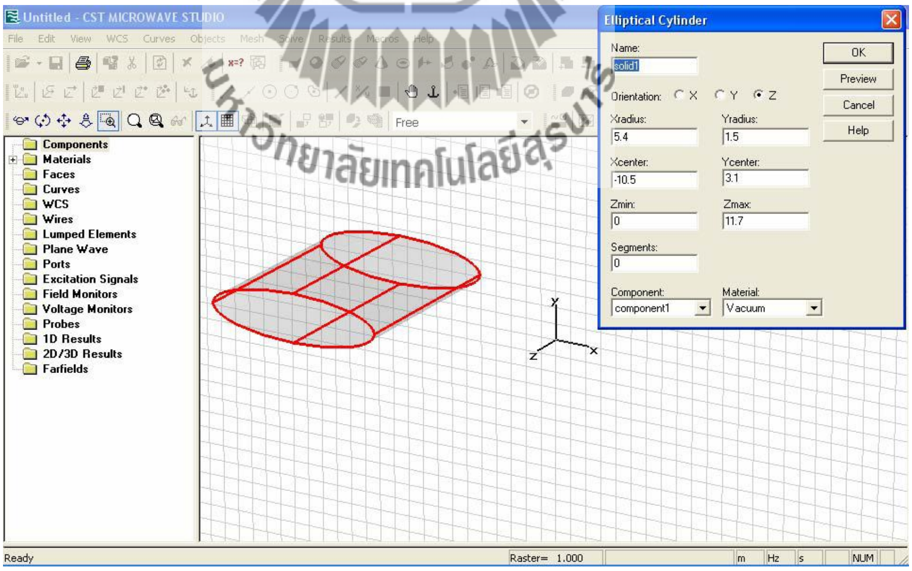
รูปที่ 3.27 วงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ของการสร้างรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี

2. ดับเบิ้ลคลิกอีกหนึ่งครั้งจะได้รูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นี้

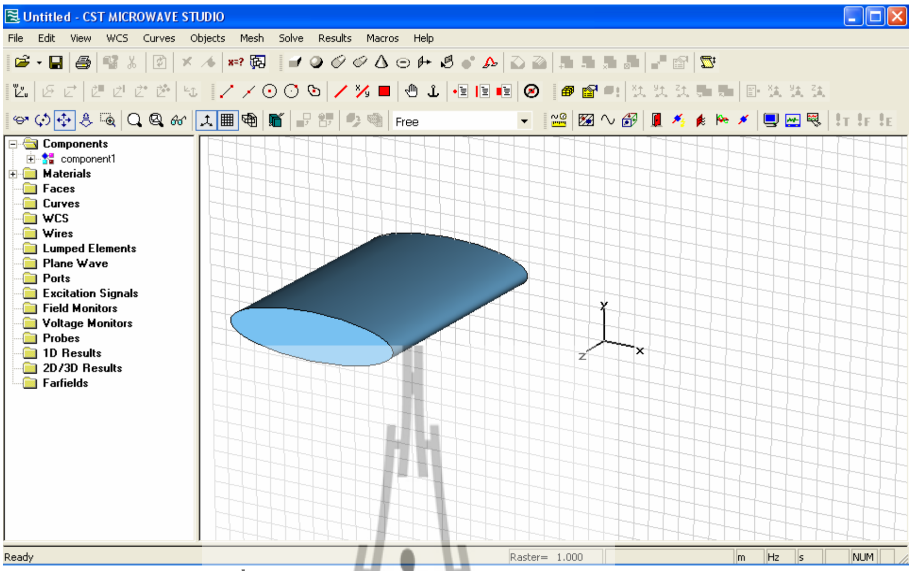
3. ดับเบิ้ลคลิกหนึ่งครั้งจะมีหน้าต่าง Elliptical Cylinder ขึ้นมาเพื่อให้กำหนดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.29



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนา

รูปที่3.29 รูปร่างของทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นวงรีและหน้าต่างในการกำหนดค่าพารามิเตอร์

4. กำหนดค่าต่างๆ ให้ครบแล้วกดปุ่ม OK ก็จะได้รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นวงรี ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 รูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็น วงรี

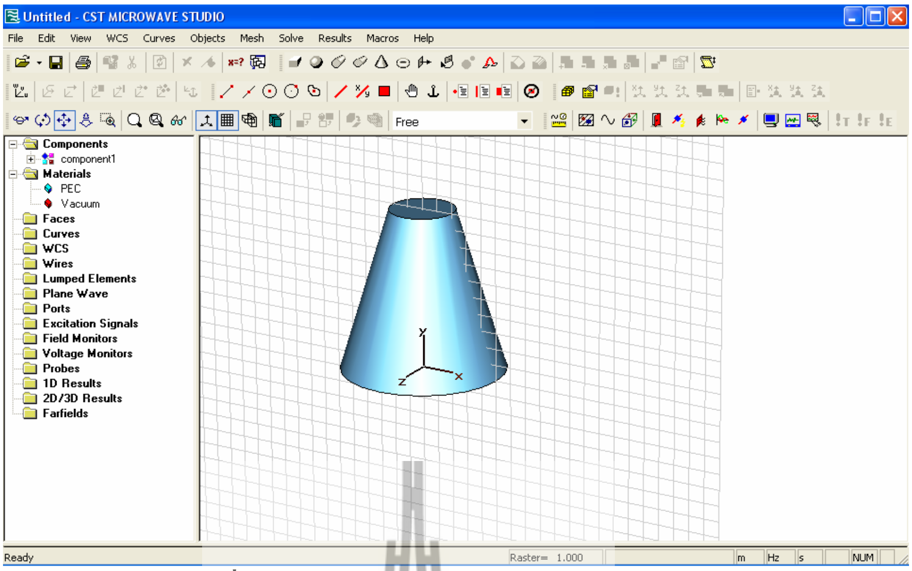
จ) การสร้างรูปทรงกรวย (Cone)

การสร้างรูปทรงกรวย มี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปอื่นๆ แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

Objects ⇨ Basic Shapes ⇨ Cone

ส่วนขั้นตอนการทำและการกำหนดค่านั้นเหมือนกับการสร้างรูปที่ผ่านมา จะได้รูปออกมาเป็นรูปทรงกรวย ดังรูปที่ 3.31

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



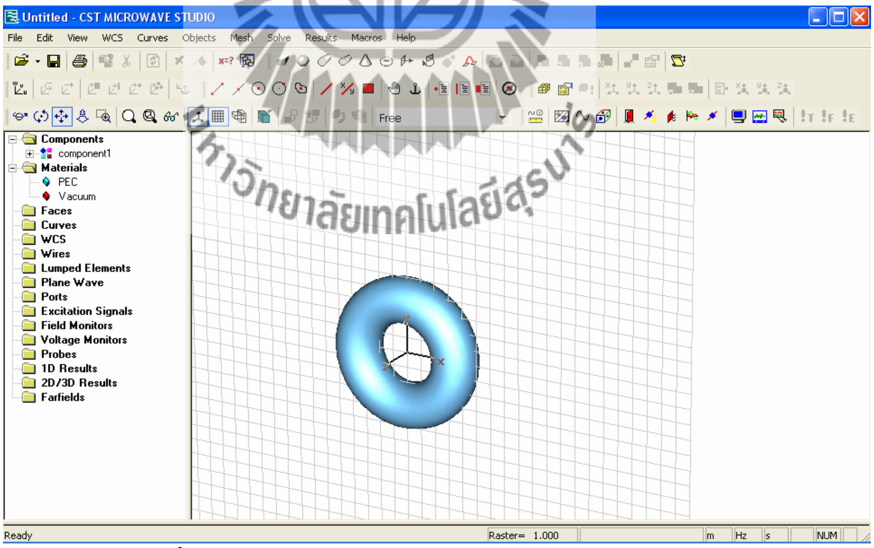
รูปที่ 3.31รูปทรงกรวยที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

ฉ) การสร้างรูปทรงขนมโดนัท (Torus)

การสร้างรูปทรงขนมโดนัทมี 2 วิธี เช่นเดียวกันกับการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปอื่นๆ แต่เลือกคำสั่งจาก main menu ดังนี้

Objects ➪ ***Basic Shapes*** ➪ ***Torus***

ส่วนขั้นตอนการทำและการกำหนดค่านั้นเหมือนที่ผ่านมา จะได้รูปทรงขนมโดนัท ดังรูปที่ 3.32

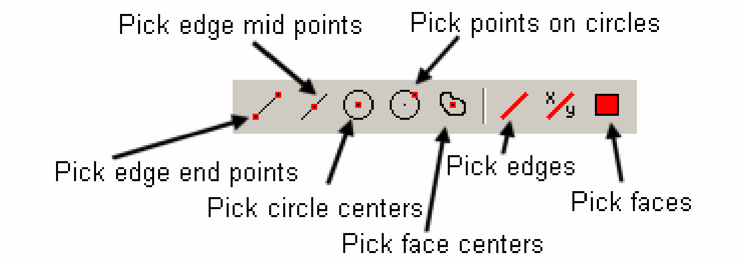


รูปที่ 3.32 รูปทรงขนมโดนัทที่มีขนาดตามที่ได้กำหนด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1.12เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ

เครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ (pick tool)ลักษณะของแถบเครื่องมือเป็นดังรูปที่ 3.33



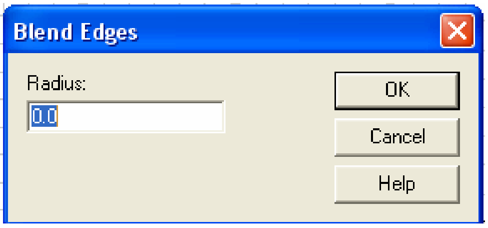
รูปที่ 3.33 แถบเครื่องมือที่ใช้ในการเลือกขอบหรือผิววัสดุ

3.2.13 การลบคมและการเฉือนขอบ

ก) การลบคม

การลบคม (Blend Edge) ขั้นตอนการทำมีดังนี้

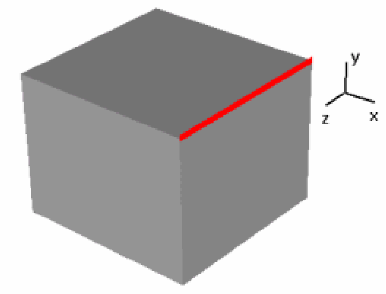
1. เลือกคำสั่ง Pick edges จาก Pick tool
2. ใช้เม้าไปดับเบิ้ลคลิกที่ขอบวัสดุที่จะทำการลบคม
3. เลือกใช้คำสั่งจาก main menu ดังนี้ *Objects ⇨ Blend Edges* ( )
4. จากนั้นจะมีหน้าต่างเล็กๆขึ้นมาเพื่อให้ใส่ค่ารัศมีว่าจะลบคมเป็นรัศมีเท่าไหร่ก็ใส่ไป ดังรูปที่3.34

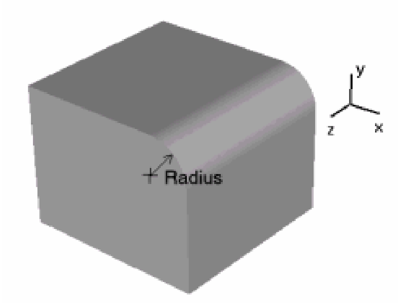


รูปที่ 3.34 หน้าต่างในการกำหนดค่ารัศมีของการลบคม

จะได้ออกมาดังรูปที่ 3.35ก และ 3.35ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





ก. การเลือกขอบวัสดุที่จะทำการลบคม ข. วัสดุที่ถูกลบคมแล้ว

รูปที่ 3.35 ขั้นตอนการลบคม

ข) การเฉือนคม

การเฉือนคม (Chamfer Edges)ขั้นตอนการทำมีดังนี้

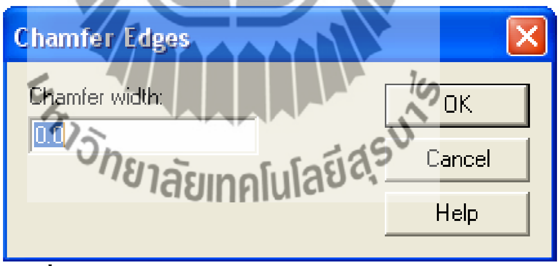
1. เลือกคำสั่ง Chamfer Edges จาก Pick tool

2. ใช้เม้าไปดับเบิ้ลคลิกที่ขอบวัสดุที่จะทำการเฉือนคม

3. เลือกใช้คำสั่งจาก main menu ดังนี้

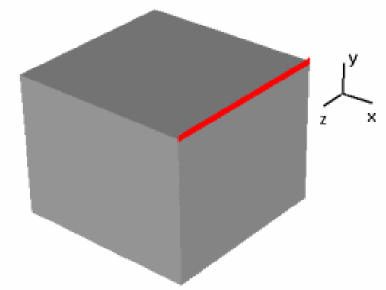
Objects ⇨ Chamfer Edges ( ).

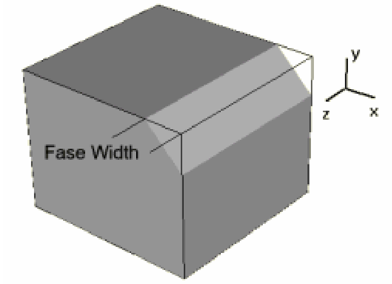
4. จากนั้นจะมีหน้าต่างเล็กๆขึ้นมา ดังรูปที่ 3.36 เพื่อให้ใส่ค่ารัศมีว่าจะเฉือนคมเป็นความกว้าง เท่าไหร่ก็ใส่ไป



รูปที่ 3.36 หน้าต่างการกำหนดค่าของการเฉือนคม

จะได้ออกมาดังรูปที่ 3.37ก และ 3.37ข





ก. การเลือกขอบวัสดุที่จะทำการเฉือนคม ข.วัสดุที่ถูกเฉือนคมแล้ว

รูปที่ 3.37 ขั้นตอนการเฉือนคม

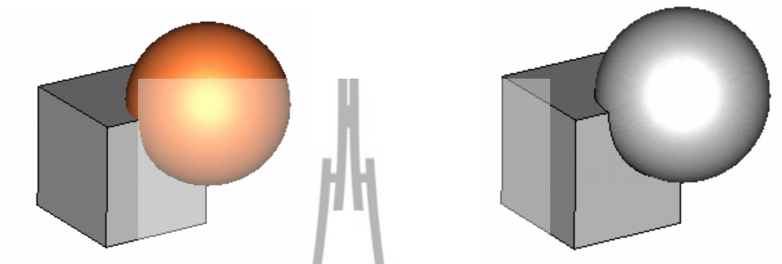
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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 ดังรูปที่4.38ก เมื่อทำการ Add เสร็จจะได้วัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.38ข



ก.วัสดุที่ยังไม่ทำการ Add ข. วัสดุที่ Add แล้ว

รูปที่ 3.38 วิธีการรวมวัสดุ

ข) วิธีการลบวัสดุออก (Subtract Mode)

ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัสดุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ ***Boolean Subtract*** ( ) หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือกดังนี้ ***Objects ⇨ Boolean ⇨ Subtract*** จะได้วัสดุที่เป็น ดังรูปที่ 3.39ก และ 3.39ข

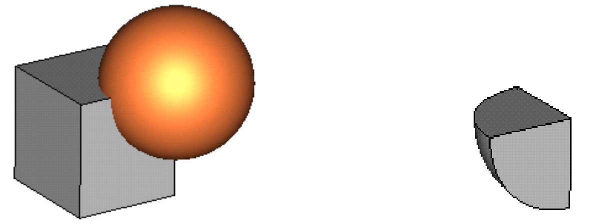
ก วัสดุที่ยังไม่ทำการ Subtract ข วัสดุที่ทำการ Subtract แล้ว

รูปที่ 3.39 วิธีการลบวัสดุออก

ค) วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัสดุ (Intersect Mode)

ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัสดุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ ***Boolean Intersect*** ( ) หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือกดังนี้ ***Objects ⇨Boolean ⇨Intersect*** จะได้วัสดุที่เป็น ดังรูปที่ 3.40ก และ 3.40ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก วัสดุที่ยังไม่ทำ Intersect ข วัสดุที่ทำ Intersect แล้ว

รูปที่ 3.40 วิธีการตัดเอาส่วนที่อยู่ร่วมกันของวัสดุ

ง) วิธีการแทรกวัสดุ (Insert Mode)

ทำเช่นเดียวกันกับการรวมวัสดุ (Add Mode) แต่เลือกคลิกรูปที่อยู่บน Objects toolbar ดังนี้ ***Boolean Insert*** หรือ คลิกที่ main menu แล้วเลือกดังนี้ ***Objects ⇨ Boolean ⇨ Insert*** จะได้วัสดุที่เป็น ดังรูปที่ 3.41ก และ 3.41ข

ก วัสดุที่ยังไม่ทำ Insert ข วัสดุที่ทำ Insert แล้ว

รูปที่ 3.41 วิธีการแทรกวัสดุ

3.3 กล่าวสรุป

จากการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้น ทำให้ทราบถึงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับแบบจำลอง วิธีการประมวลผลพร้อมกับวิเคราะห์ ผล โดยการใช้โปรแกรมนี้เพื่อให้เห็นถึง ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปอร์ 90 องศาแบบไฮบริดจ์ที่ออกแบบมานี้มีผลตรงกับความถี่ที่ต้องการหรือไม่ซึ่งจะได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

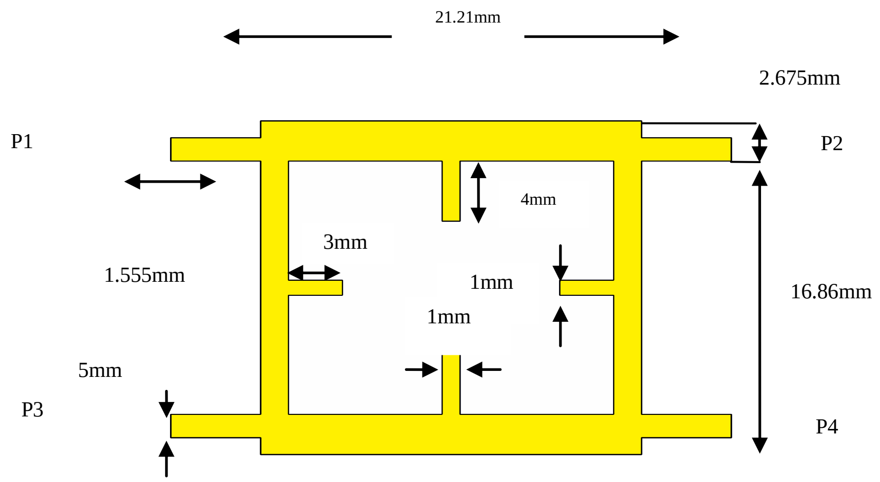
การออกแบบโดยการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 4 จะเป็นการนำหลักการการใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เบื้องต้นที่กล่าวมาแล้วจากบทที่ 3 ใช้ในการออกแบบตัวไขว้สัญญาณ รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม ซึ่งได้นำทฤษฎีที่ กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาช่วยในการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของ ตัวไขว้สัญญาณ โดยจะอธิบายถึงวิธีการสร้าง ตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นทำการสร้างตัวไขว้สัญญาณต้นแบบ และนำมาวัดทดสอบ ค่า พารามิเตอร์ และนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

4.2 การออกแบบและการสร้าง

ในการออกแบบตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา เป็นการนำเอาคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่มีการออกแบบไว้แล้วสองตัวมาต่อกัน เพื่อให้สามารถใช้งานได้บนแถบความถี่กว้างที่เราต้องการ คืออยู่ในช่วง 1.92-2.69 GHz ซึ่งทำบนแผ่น FR-4 แบบสองหน้า มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท (Dielectric constant : ε_r) เท่ากับ 4.5 ความสูงของไดอิเล็กตริกซับสเตรท (h) สำหรับในการออกแบบนี้ให้มีความสูง h เท่ากับ 1.6 mm และความสูงของโลหะเท่ากับ 0.03 ซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 4.1

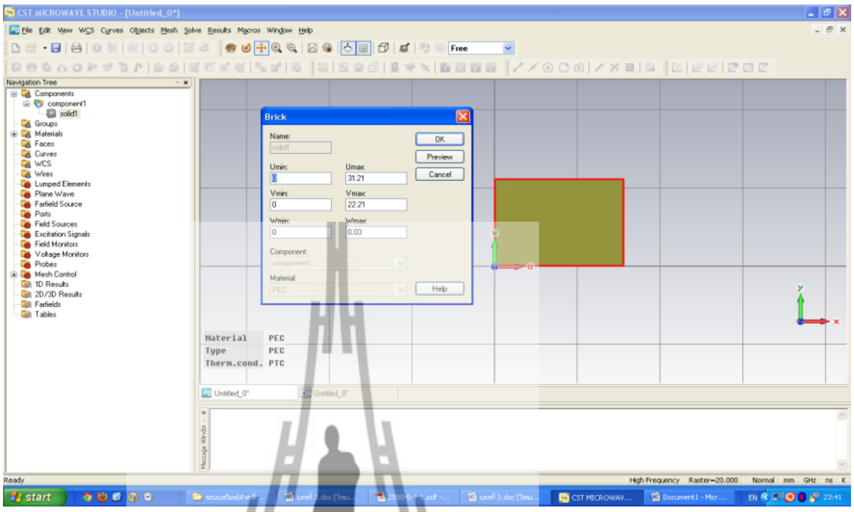


รูปที่ 4.1 คัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่มีการออกแบบไว้แล้ว

4.2.1 การออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

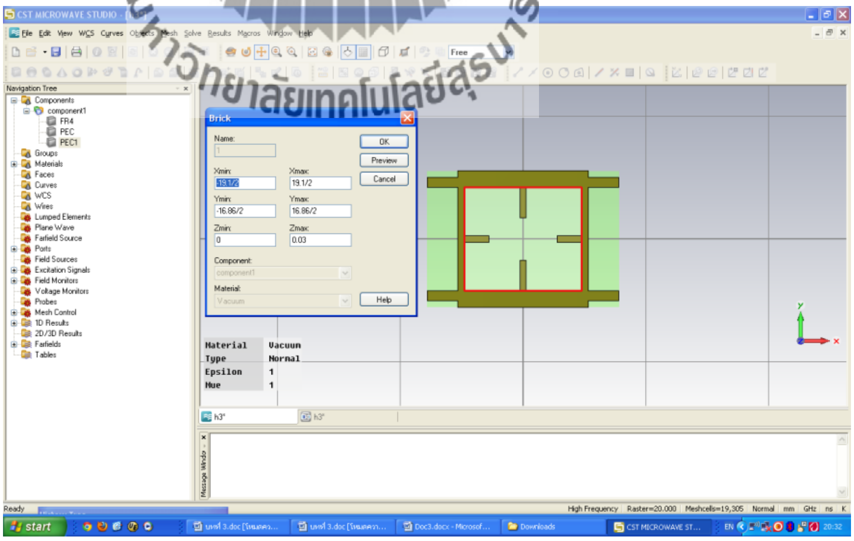
จากการกำหนดขนาดค่าต่างๆตามรูปที่ 4.1 มีการออกแบบดังนี้

1.เริ่มทำการออกแบบกราวด์ของคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ดังรูปที่ 4.2



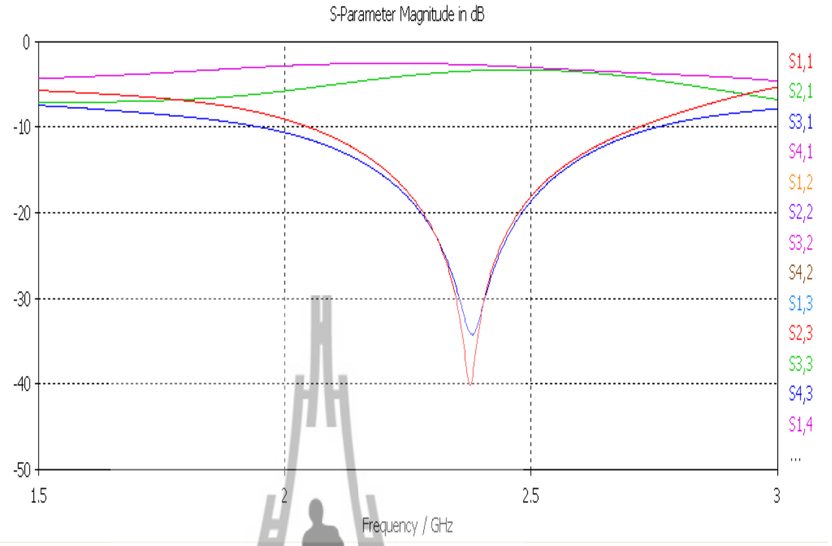
รูปที่ 4.2 สร้างกราวด์ของคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

2.จากนั้นทำการสร้างคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ตามรูปร่างที่มีการออกแบบไว้อยู่แล้วจะได้ดังรูปที่ 4.3



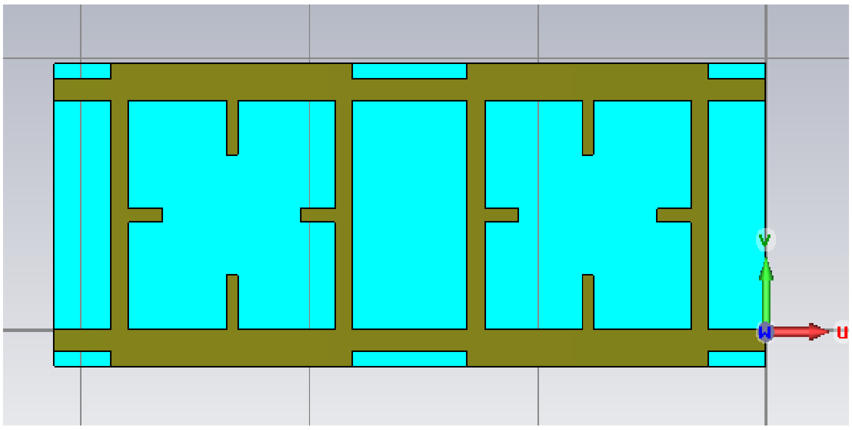
รูปที่ 4.3 สร้างคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

เมื่อทำการออกแบบได้ดังรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

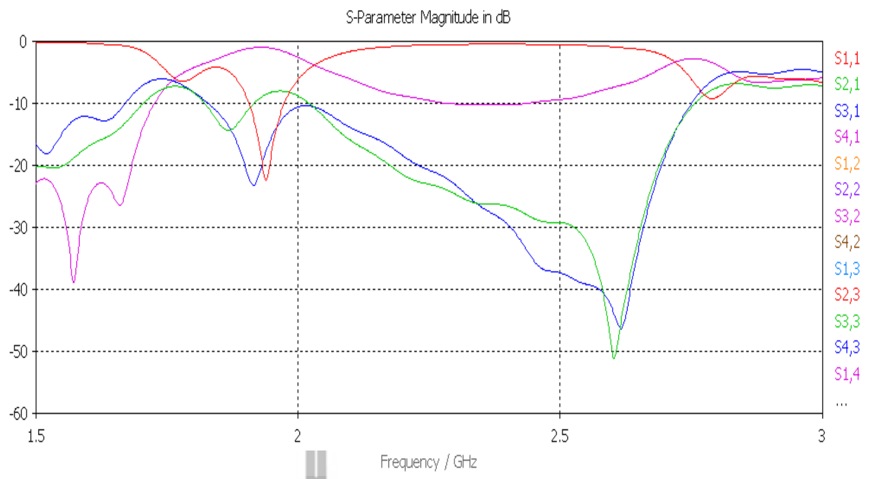


รูปที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ที่มีการออกแบบไว้แล้ว

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S22, S33 และ S44 ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นยังไม่สามารถยอมรับได้บนแถบความถี่กว้างตั้งแต่ 1.92 - 2.69 GHz และเมื่อได้มีการนำคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวมาต่อกันจะได้เป็นตัวไขว้สัญญาณดังรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.6

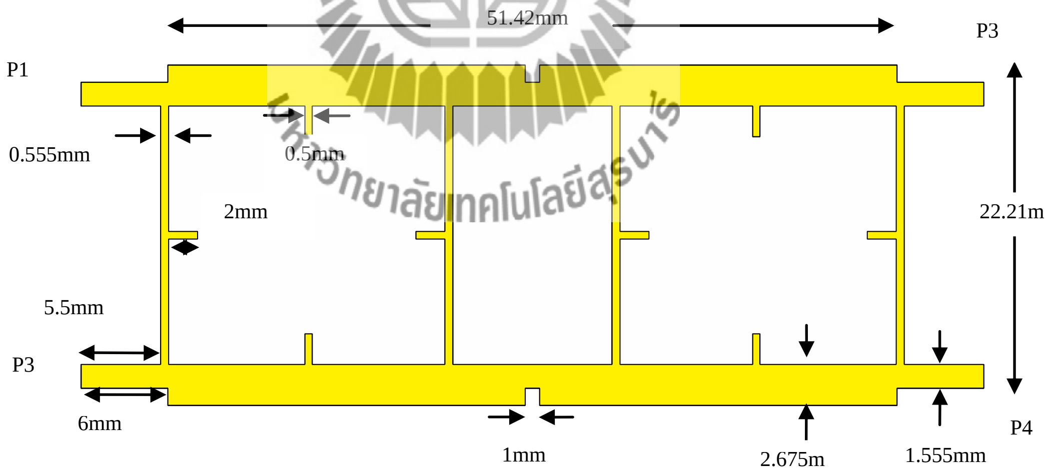


รูปที่ 4.5 ตัวไขว้สัญญาณที่เกิดจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกัน



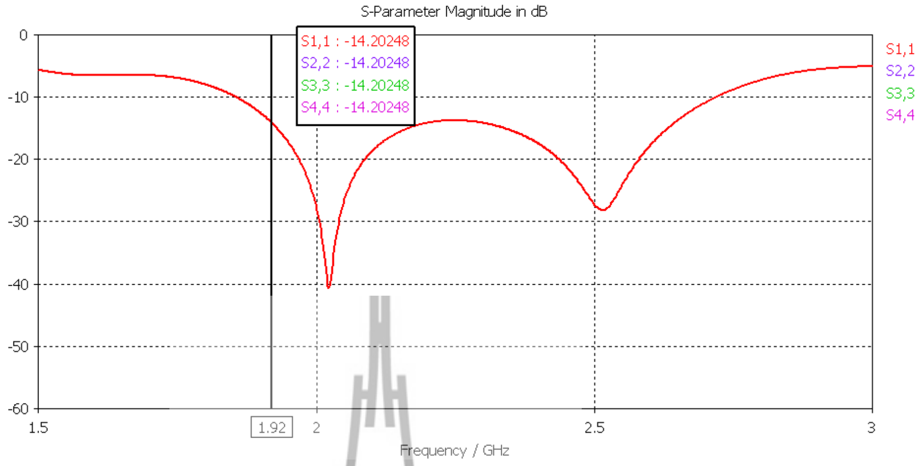
รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณที่เกิดจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกัน

จากกราฟแสดงผลรูปที่ 4.6 ค่า พารามิเตอร์แต่ละค่านั้นแทบไม่สามารถยอมรับได้บนช่วงแถบความถี่กว้าง 1.92 – 2.69 GHz เราจึงได้มีการนำตัวไขว้สัญญาณนี้มาปรับปรุงลายใหม่ ดังรูป 4.7



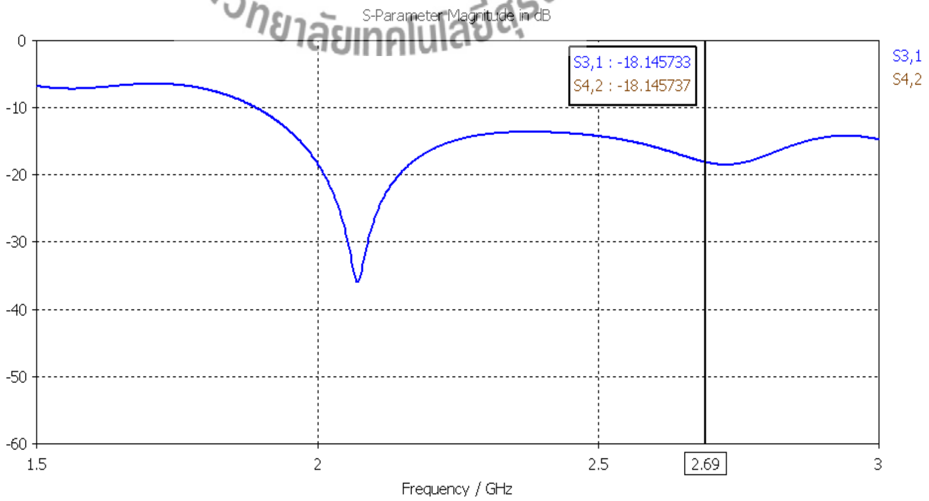
รูปที่ 4.7 ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สองตัวต่อกันที่มีการปรับปรุงลาย

เมื่อทำการออกแบบได้ดังรูปที่ 4.7 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.8



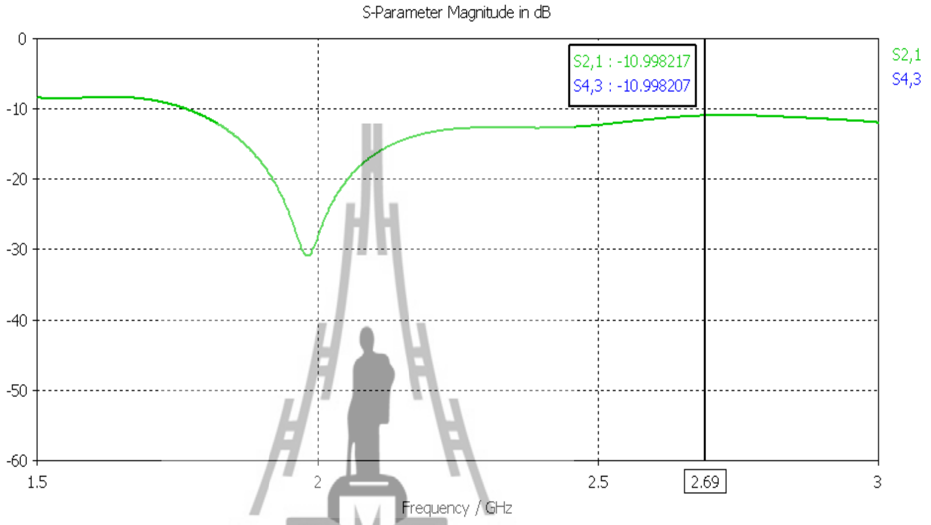
รูปที่ 4.8 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S11, S22, S33, S44

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S22, S33 และ S44 ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1,2,3 และ4 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -14.2048 dB และที่ความถี่ 2.69GHz มีค่า -11.3074 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



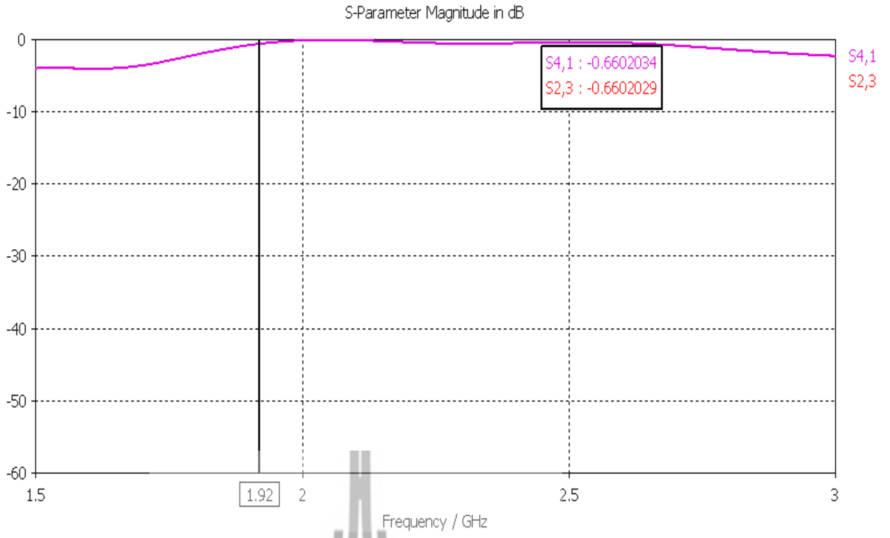
รูปที่ 4.9 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S31, S42

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S31, S42 ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (isolation loss) ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกที่พอร์ตที่สัญญาณออกอีกพอร์ตหนึ่ง ค่าที่ได้นั้นควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB หรือต่ำกว่า ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -11.55927 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –18.14573 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



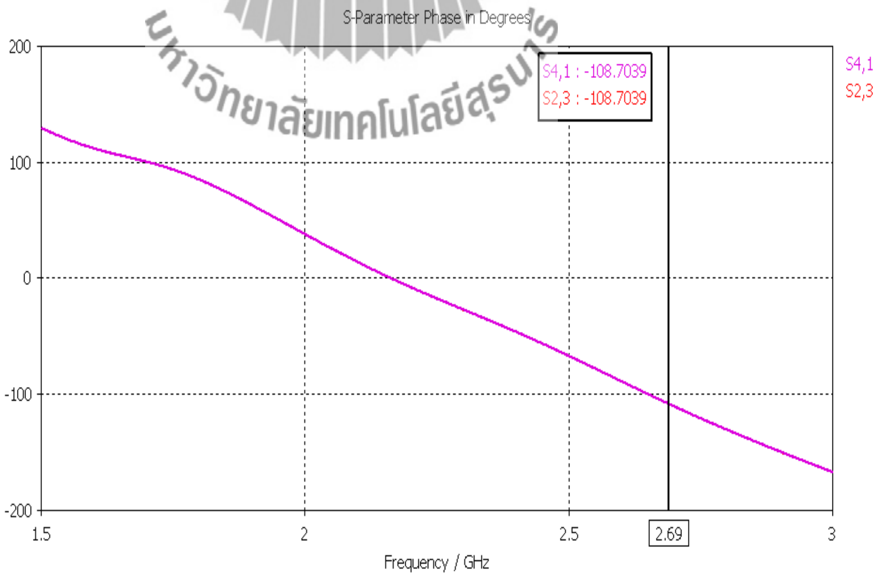
รูปที่ 4.10 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S21, S43

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S21, S43 ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการ เชื่อมต่อ (coupling loss) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตสัญญาณเข้าไปพอร์ตสัญญาณออก แต่ค่าที่ได้ควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB เพราะไม่ได้เป็นเส้นทางการไหลของสัญญาณจากทฤษฎีตัวไขว้สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -20.0602 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –10.998 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.11 ค่าพลังงานพารามิเตอร์ S41, S23

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S41, S23 ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณควรจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -0.66020 dB ที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า – 0.866527 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.12 ค่าเฟสพารามิเตอร์ S41,S23

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S41, S23 ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล้าหลังระหว่างกันซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณค่าเฟสที่ได้ต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า 57.76646 องศา และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –108.7039องศา จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

4.2.2 การสร้างตัวไขว้สัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

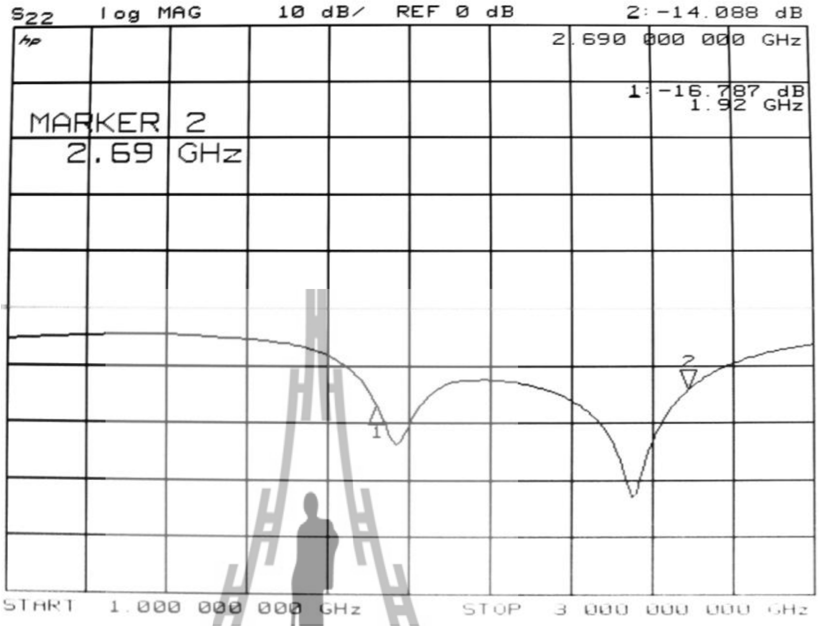
จากการออกแบบตัวไขว้สัญญาณจากโปรแกรม CST เมื่อได้ตัวไขว้สัญญาณที่ต้องการแล้ว จากนั้นทำการสร้างตัวไขว้สัญญาณจริงขึ้นมาได้ดังรูปที่ 4.13

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ก) (ข)

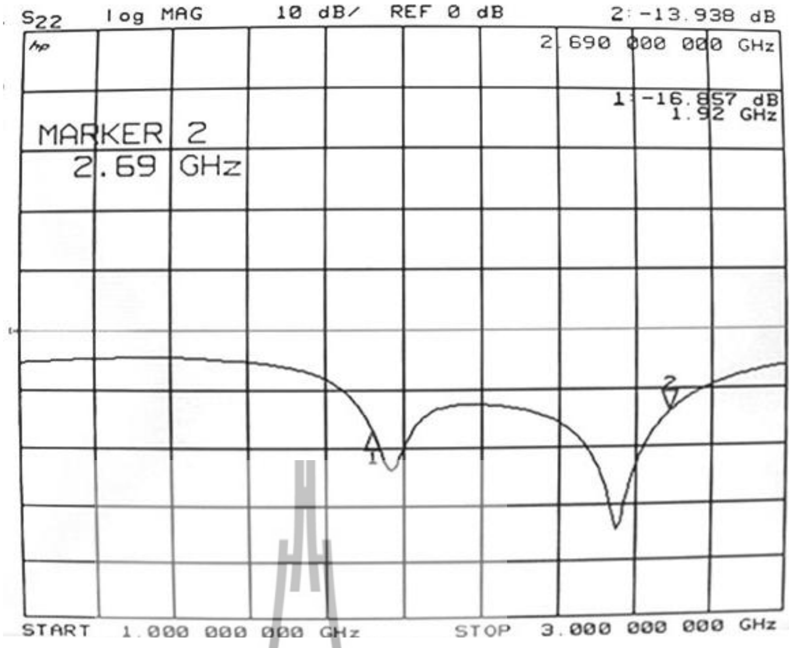
รูปที่ 4.13 ตัวไขว้สัญญาณแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz (ก) ด้านหน้าตัวไขว้สัญญาณ (ข) ด้านหลังตัวไขว้สัญญาณ

นำรูปที่ 4.13 ไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายได้ผลการวัดดังนี้



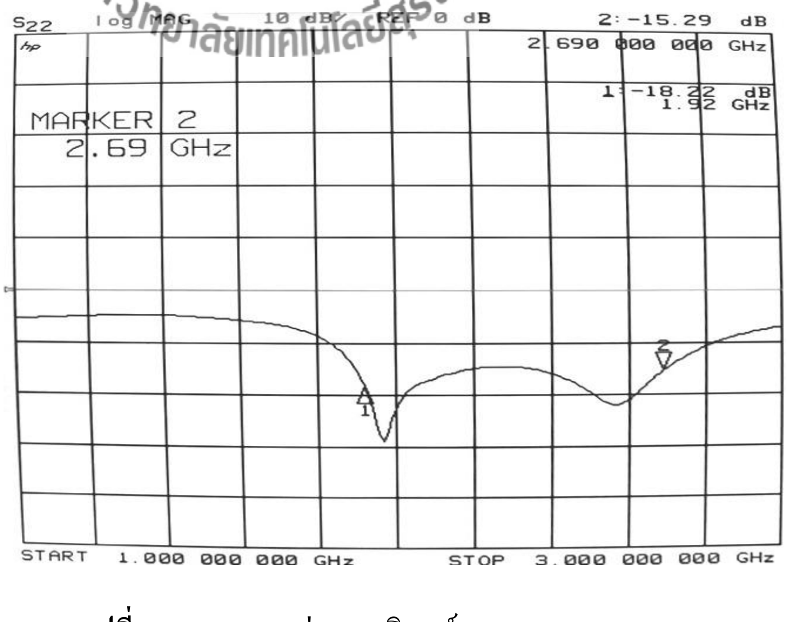
รูปที่ 4.14 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S11

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า - 10 dB ในทางทฤษฎีนั้น ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่า ไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -16.787 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า -14.088 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



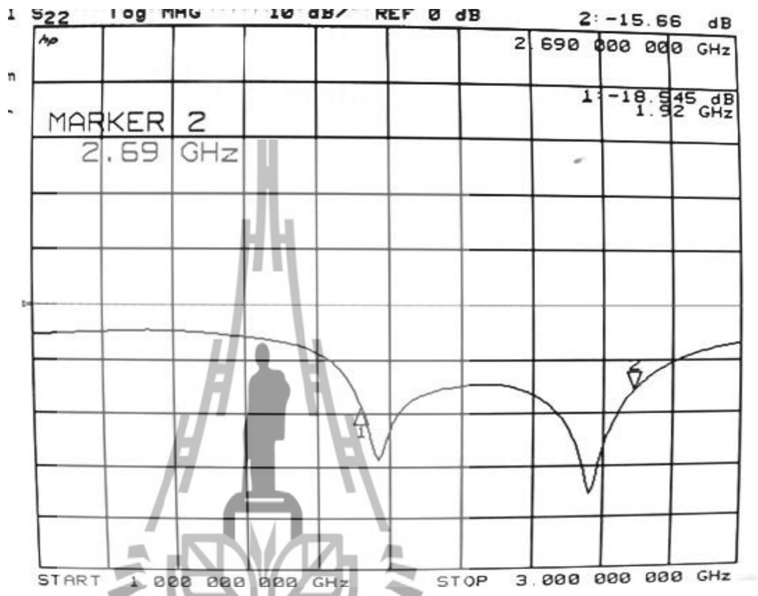
รูปที่ 4.15 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S22

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S22 ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า - 10 dB ในทางทฤษฎีนั้น ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่า ไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 2 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -16.857 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า -13.938 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



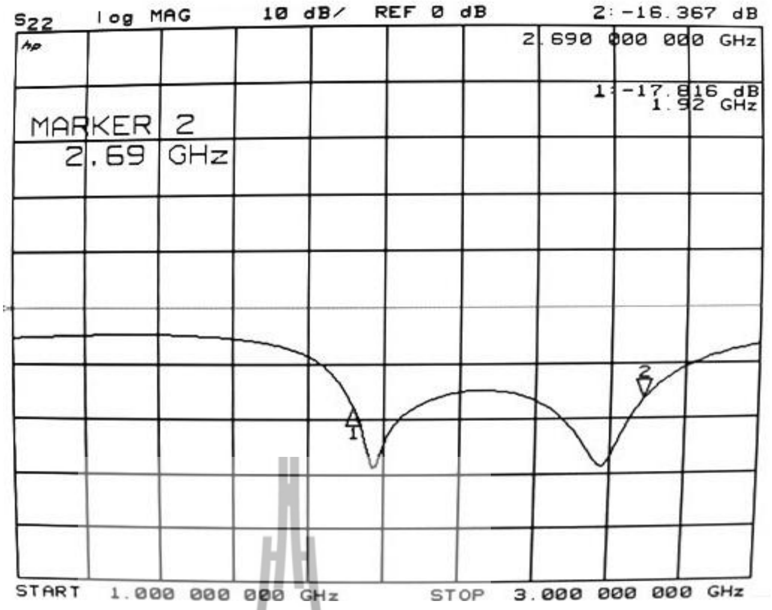
รูปที่ 4.16 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S33

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S33 ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า - 10 dB ในทางทฤษฎีนั้น ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่า ไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 3 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -18.22 dB ที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า -15.29 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



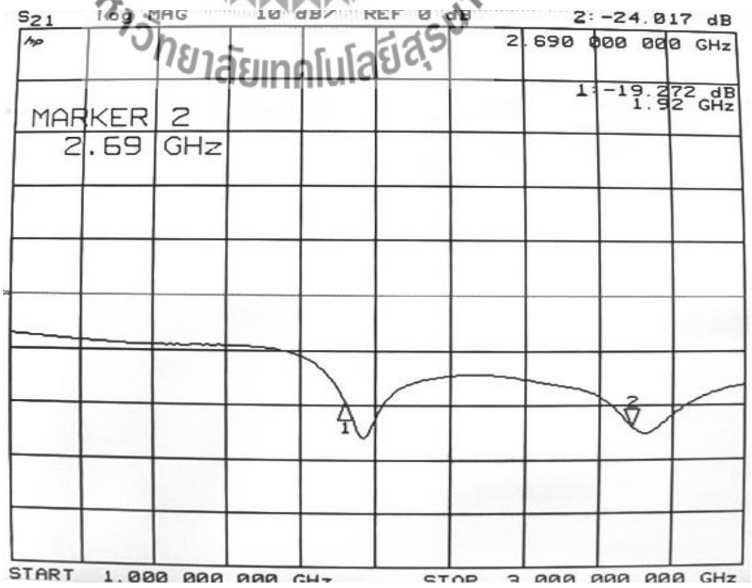
รูปที่ 4.17 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S44

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S44 ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า - 10 dB ในทางทฤษฎีนั้น ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่า ไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 4 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -18.22dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า -15.29 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



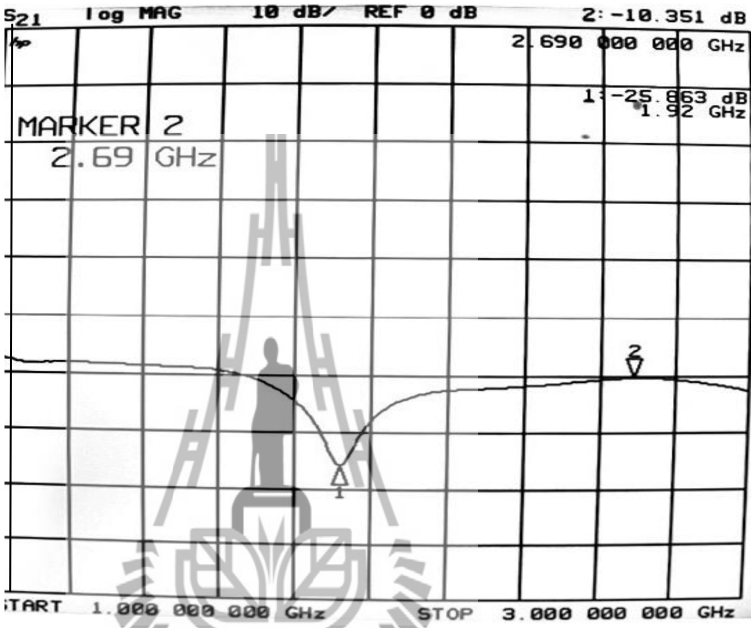
รูปที่ 4.18 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S31

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S31 ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (isolation loss) ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกที่พอร์ตที่สัญญาณออกอีกพอร์ตหนึ่ง ค่าที่ได้นั้นควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB หรือต่ำกว่า ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -17.816 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –16.367 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



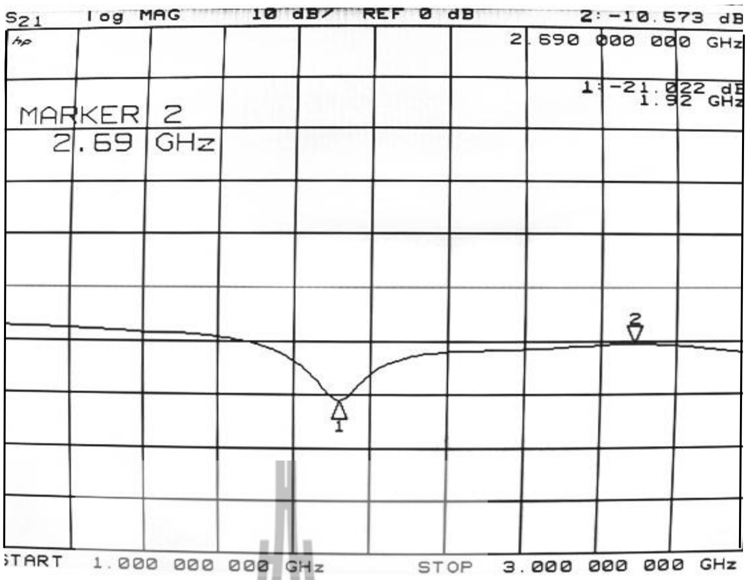
รูปที่ 4.19 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S42

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S42 ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (isolation loss) ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกที่พอร์ตที่สัญญาณออกอีกพอร์ตหนึ่ง ค่าที่ได้นั้นควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB หรือต่ำกว่า ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -19.272 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –24.017 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.20 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S21

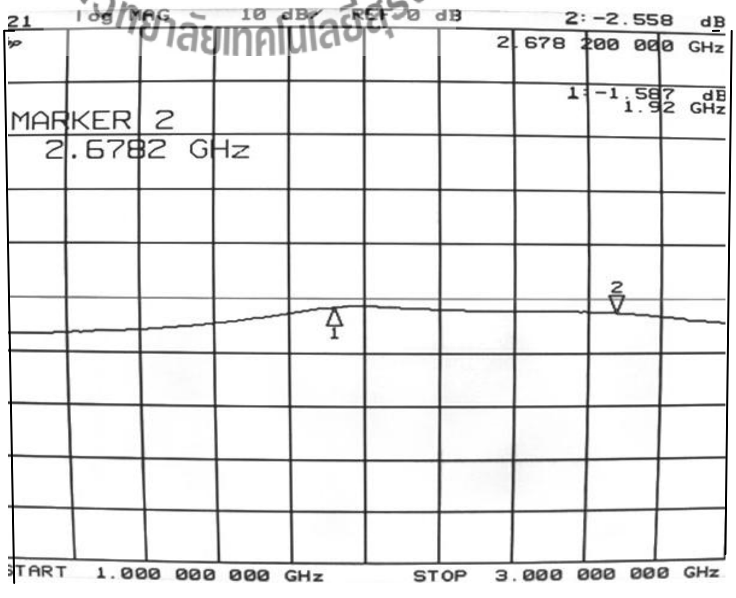
จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S21 ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ (coupling loss) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตสัญญาณเข้าไปพอร์ตสัญญาณออก แต่ค่าที่ได้ควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB เพราะไม่ได้เป็นเส้นทางการไหลของสัญญาณจากทฤษฎีตัวไขว้สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -25.863 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –10.351 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.21 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S43

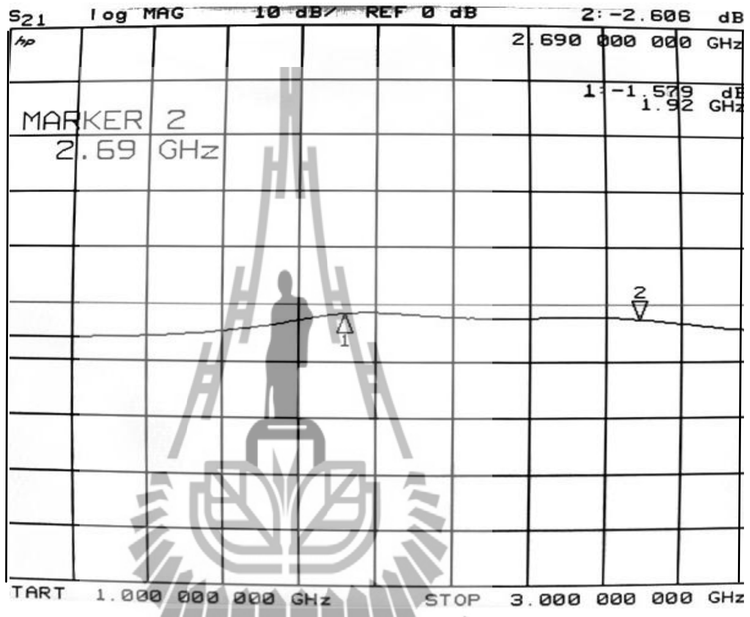
จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S43 ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ (coupling loss) ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตสัญญาณเข้าไปพอร์ตสัญญาณออก แต่ค่าที่ได้ควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB เพราะไม่ได้เป็นเส้นทางการไหลของสัญญาณจากทฤษฎีตัวไขว้สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -21.022 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –10.573 dB จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



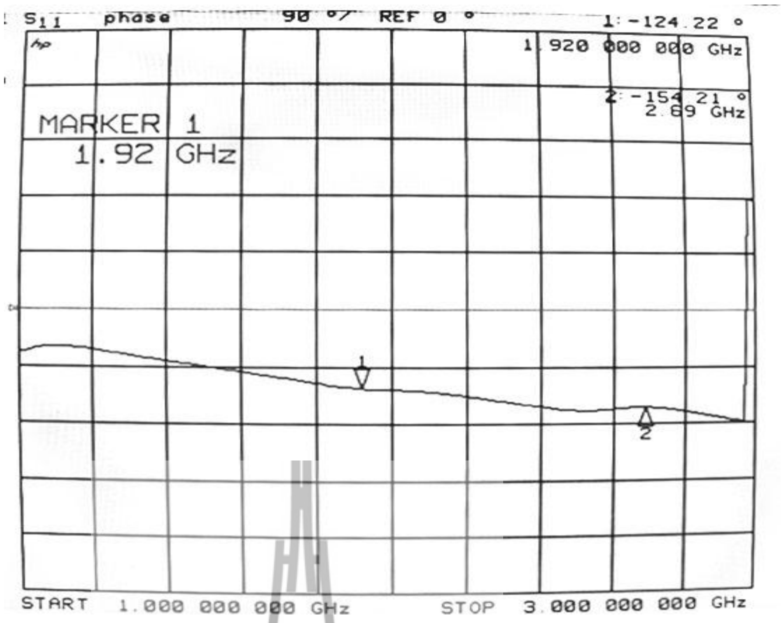
รูปที่ 4.22 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S41

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S41 ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณควรจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -1.587 dB และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –2.558 dB จะเห็นว่า ค่าที่ได้ไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบเนื่องมาจากค่าสูญเสียที่เกิดจากการสร้างจริง แต่ค่าของการวัดก็อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้



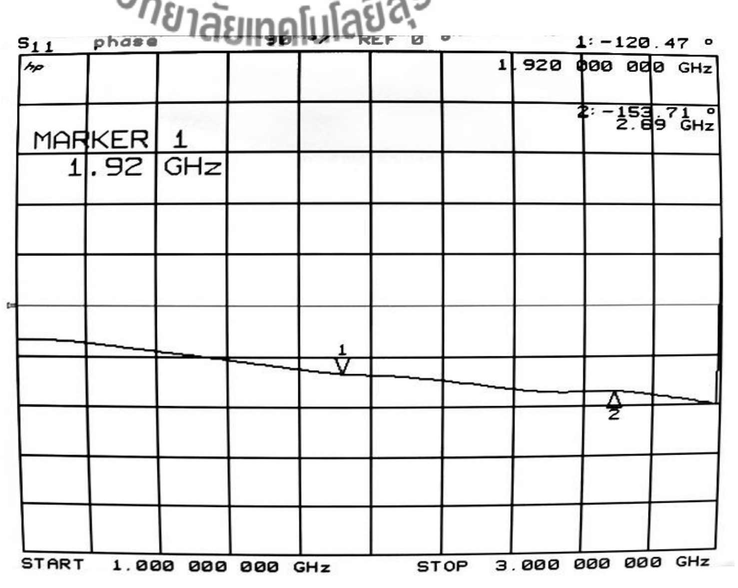
รูปที่ 4.23 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ S23

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S23 ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณควรจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์สัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -1.579 dB ที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า –2.608 dB จะเห็นว่าค่าที่ได้ไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบเนื่องมาจากค่าสูญเสียที่เกิดจากการสร้างจริง แต่ค่าของการวัดก็อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.24 แสดงผลค่าเฟสพารามิเตอร์ S41

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S41 ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล้าหลังระหว่างกันซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณค่าเฟสที่ได้ต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -124.22 องศา และที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า – 154.21 องศา จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 4.25 แสดงผลค่าเฟสพารามิเตอร์ S23

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S23 ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการไหลของสัญญาณมีหลักการทำงานคือ สัญญาณที่เข้ามานั้นจะมีการเดินทางในลักษณะไขว้เพียงเส้นทางเดียวโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล้าหลังระหว่างกันซึ่งตามทฤษฎีพอร์ตที่มีการไหลของสัญญาณค่าเฟสที่ได้ต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 1.92 GHz มีค่า -120.47 องศา ที่ความถี่ 2.69 GHz มีค่า – 153.71 องศา จากการทดสอบตัวไขว้สัญญาณนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.3.1 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ S

จากการสร้างตัวไขว้สัญญาณนำค่าพารามิเตอร์Sที่ได้ต่างๆมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ S จากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO จะได้ว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลตามตารางต่อไปนี้ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ S ต่างๆ

ตาราง 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ S ต่างๆ

พารามิเตอร์ S	แสดงค่าพารามิเตอร์ S จากโปรแกรม CSTMICROWAVE STUDIO (dB)		แสดงพารามิเตอร์Sจากเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย **(dB)**	
	1.92 GHz	2.69 GHz	1.92 GHz	2.69 GHz
S11	-14.20248	-11.3074	-16.787	-14.088
S22	-14.20248	-11.3074	-16.875	-13.938
S33	-14.20248	-11.3074	-18.22	-15.29
S44	-14.20248	-11.3074	-18.845	-15.66
S31	-11.55927	-18.14573	-17.816	-16.367

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ S ต่างๆ (ต่อ)

พารามิเตอร์ S	แสดงค่าพารามิเตอร์ S จากโปรแกรม CSTMICROWAVE STUDIO (dB)		แสดงพารามิเตอร์Sจากเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (dB)	
	1.92 GHz	2.69 GHz	1.92 GHz	2.69 GHz
S42	-11.55927	-18.14573	-19.272	-24.017
S21	-20.0602	-10.998	-25.863	-10.351
S43	-20.0602	-10.998	-21.022	-10.573
S41	-0.66020	-0.86652	-1.587	-2.558
S23	-0.66020	-0.86652	-1.579	-2.608

ตาราง 4.2 แสดงค่าเฟสของพารามิเตอร์ S41,S23

พารามิเตอร์ S	แสดงค่าเฟสพารามิเตอร์ S41,S23 จากโปรแกรม CSTMICROWAVE STUDIO (องศา)		แสดงค่าเฟสพารามิเตอร์ S41,S23 เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (องศา)	
	ความถี่ 1.92 GHz	ความถี่ 2.69 GHz	ความถี่ 1.92 GHz	ความถี่ 2.69 GHz
S41	57.76646	-108.7039	-124.22	-154.21
S23	57.76646	-108.7039	-120.47	-153.71

4.4 กล่าวสรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้นำเสนอการออกแบบ ตัวไขว้สัญญาณ จากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และได้ทำการวิเคราะห์ผลจากการเปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ S ต่างๆ กับตัวไขว้สัญญาณ ที่สร้างขึ้นจริงตามที่ได้ออกแบบจากโปรแกรมนี้ ในบทต่อไปจะเป็นบทสรุป ซึ่งเป็นบทสุดท้ายของโครงงาน ตัวไขว้สัญญาณจากคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาบนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

บทสรุปของโครงงาน

5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงบทสรุปของโครงงาน การสร้างตัวไขว้สัญญาณจากตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ให้สามารถใช้งานได้ ดีและเพิ่ม ประสิทธิภาพ ให้แก่อุปกรณ์ทางโทรคมนาคม ในช่วงแถบกว้างที่ความถี่ 1.92-2.69 GHz ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน สาเหตุ วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาโครงงานต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ในการทำโครงงานการสร้างตัวไขว้สัญญาณจากตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ปัญหาที่พบบ่อย ได้แสดงดังในตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวปัญหาที่พบ สาเหตุของปัญหารวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1. ค่า S พารามิเตอร์ ของตัวไขว้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนจากการคำนวณที่ได้ออกแบบไว้	**สาเหตุ** เกิดจากการออกแบบและกัดลายวงจรที่ไม่ประณีต **วิธีการแก้ไข** ควรมีความประณีตในกา ร ออกแบบและกัดลายวงจรให้มีความสวยงาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. ความล่าช้าในการสั่งอุปกรณ์	**สาเหตุ** อุปกรณ์บางรายการไม่มีในพื้นที่และอาจจะไม่ได้คุณภาพ **วิธีการแก้ไข** ควรมีการวางแผนในกา ร ดำเนินงานที่รวดเร็ว เพื่อประหยัดเวลาในการสั่งอุปกรณ์จากต่างพื้นที่
3. ผู้ดำเนินโครงการไม่มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ	**สาเหตุ** เนื่องจากผู้ดำเนินโครงการมีความรู้ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการน้อย **วิธีการแก้ไข** ผู้ดำเนินโครงการควรศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการกั บ ผู้เชี่ยวชาญทางด้านเครื่องมือนั้นๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการกัดลายวงจรนั้นควรทำด้วยความประณีต ไม่เร่งรีบ และไม่ควรส่ายภาชนะของน้ำยาที่นำลายวงจรลงไปแช่ เพราะลายวงจรมีขนาดเล็กอาจทำให้น้ำยาซึมเข้าไปกัดเซาะลายวงจรได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3.2 อุปกรณ์เครื่องมือในห้องปฏิบัติการมีราคาแพง และเสียง่าย ควรมีความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์นั้นๆ และระมัดระวังในการใช้งาน

5.3.3 เนื่องจากอุปกรณ์ที่ออกแบบมีขนาดเล็กในการบัดกรีควรทำด้วยความประณีต และระมัดระวัง

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

โครงงานการสร้างตัวไขว้สัญญาณจากตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ค่า S พารามิเตอร์ยังสามารถพัฒนาให้ได้ค่าที่ดีมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่อุปกรณ์ทางโทรคมนาคม

5.5 กล่าวสรุป

โครงงานการสร้างตัวไขว้สัญญาณจากตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา บนแถบความถี่กว้าง 1.92 – 2.69 GHz มีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. ตัวไขว้สัญญาณ

2. หัวคอนเน็คเตอร์ (sma-female)

4. ชุดอุปกรณ์ในการวัดค่าพารามิเตอร์ S ซึ่งได้แก่

4.1 เครื่อง Network Analyzer

4.2 ตัวโหลด 50 โอห์ม

จากผลการทดสอบพบว่า ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้งานได้บนแถบความถี่กว้าง 1.92-2.69 GHz ตรงตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้ และมีประสิทธิภาพตรงตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบมา

ประวัติผู้เขียน

นายสาวอภินันธ์ แก้วสนั่น เกิดวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 2765 ถนนสืบศิริ ตำบลในเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 5 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวบงกช แสงโชกุน เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ.2532 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 120 ถนนสำราญชายโขงเหนือ ตำบลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียน มุกดาหาร ปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวปิยาภรณ์ นิลริยา เกิดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2533 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 74/1 หมู่1 ตำบลเทพรักษา อำเภอ สังขะ จังหวัด สุรินทร์ จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนทับทิมสยาม 04 ในพระอุปถัมภ์ ปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

Joseph C. Liberti; Theodore S. Rappaport Smart Antennas for Wireless Communications IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Prentice Hall PTR Upper saddle River, New Jersey, 1990.

ean-S’bastien N?ron and Gilles-Y. Delisle Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization ETRI Journal, Volume 27, Number 6, December 2005

Siti Rohaini Ahmad and Fauziahanim Che Seman 4-Port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Array IEEE. 2005 0-7803-9431-3/05

David M. Pozar Microwave Engineering Second Edition, JOHN WILEY & SONS, INC., USA, 1998.

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. “วิศวกรรมไมโครเวฟ” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, 2536

เนื้อหาโครงร่างวิทยานิพนธ์การออกแบบลดขนาดตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก

การใช้เครื่อง Network Analyzer

ในการทดสอบค่าพรามิเตอร์ S ต่างๆ จะใช้เครื่อง Network Analyzer ดังรูปในการทดสอบ

เครื่อง Network Analyzer

ขั้นตอนการ Calibrate

ก. ขั้นตอนการ Calibrate 1-Port Network Analyzer

1. ตั้งช่วงความถี่ที่ต้องการวัด (เช่น ตั้งแต่ 2GHz-6GHz)

- กดปุ่ม Start แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น (เช่น กด 2 แล้วตามด้วยกด G/n)
- กดปุ่ม Stop แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น (เช่น กด 6 แล้วตามด้วยกด G/n)

2. กดปุ่ม Cal จากนั้น

- เลือก “CALIBRATE MANU”
- เลือก “S11 1-PORT” จากนั้นให้ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐานทั้ง 3 ตัว โดยเริ่มจาก

- ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1(2.4 mm) แล้วเลือก “OPEN” รอจนคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)
- ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน SHORT (2.4 mm)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1(2.4 mm) แล้วเลือก “SHORT” รอจนคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)
- ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1(2.4 mm) แล้วเลือก “LOAD” จากนั้นเลือก “BROADBRAND” รอจนคำว่า BROADBRAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBRAND)

- จากนั้นเลือก “DONE: LOADS” แล้วเลือก “DONE 1-PORT CAL”

3. ให้รอจนคำว่า “COMPUTING CAL COEFICIENTS” ที่กระพริบอยู่หายไป ถือเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการCALIBRATION สำหรับ l-PORT

4. การบันทึก

- กดปุ่ม Save/Recall
- เลือก “SAVE STATE” (จะปรากฏไฟล์ใหม่อยู่ที่ด้านล่างสุดของไฟล์ทั้งหมด ซึ่งจะขึ้นต้นด้วย REG_)

- ถ้าต้องการเปลี่ยนชื่อไฟล์ ให้หมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังไฟล์ที่ต้องการ

(**Note:** ไฟล์ที่ถูกเลือกจะเป็นสีเขียว)

- เลือก “FILE UTILITIES”
- เลือก “RENAME FILE”

- กดปุ่ม ⟵เพื่อลบตัวอักษรหรือย้อนกลับ
- แล้วหมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังตัวอักษรที่ต้องการ
- แล้วเลือก “SELECT LETTER”

- กดปุ่ม “DONE” เมื่อทำการตั้งชื่อไฟล์เสร็จสิ้น

(**Note**: การตั้งชื่อต้องขึ้นต้นด้วยตัวอักษรเท่านั้น และไม่สามารถตั้งชื่อโดยใช้ตัวอักษร “.” ได้)

5. การเรียกใช้ไฟล์ที่บันทึกไว้

- กดปุ่ม Save/Recall
- หมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังไฟล์ที่ต้องการ

(Note: ไฟล์ที่ถูกเลือกจะเป็นสีเขียว)

- เลือก “RECALL STATE”

ข. ขั้นตอนการ Calibrate 2 - Port Network Analyzer

1. ตั้งช่วงความถี่ที่ต้องการวัด (เช่น ตั้งแต่ 2GHz-6GHz)

- กดปุ่ม Start แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น (เช่น กด 2 แล้วตามด้วยกด G/n)
- กดปุ่ม Stop แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น (เช่น กด 6 แล้วตามด้วยกด G/n)

2. กดปุ่ม Cal จากนั้น

- เลือก “CALIBRATE MANU”
- เลือก “FULL 2-PORT” จากนั้น จะปรากฏเมนูให้เลือก 3 ตัว ดังนี้

1) REFECTION 2) TRANSMISSION 3) ISOLATION

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.1 REFECTION

- เลือก "REFECTION" จากนั้นให้ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐานทั้ง 3 ตัว โดยเริ่มจาก

- - ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm, Female)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4mm) แล้วเลือก "OPEN" รอจนคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)

  (**Note:** Female = จุกสีแดง, Male = จุกสีส้ม)

  - ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm, Male)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2(2.4 mm) แล้วเลือก "OPEN" รอจนคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)

  (**Note**: Female = จุกสีแดง, Male = จุกสีส้ม)

- - ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน SHORT (2.4 mm, Female)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm) แล้วเลือก "SHORT" รอจนคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)

  - ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน SHORT (2.4 mm, Female)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm) แล้วเลือก "SHORT" รอจนคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)

- - ต่อ **อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm, Female)** เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1(2.4 mm) แล้วเลือก "LOAD" จากนั้นเลือก "BROADBRAND" รอจนคำว่า BROADBRAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBRAND) จากนั้นเลือก " DONE: LOADS"

  - เลือกคำว่า "STANDARDS DONE"

  - ให้รอจนคำว่า "COMPUTING CAL COEFICIENTS" ที่กระพริบอยู่หายไป

  - จากนั้นให้ข้ามมาทำเมนูที่ 3 ก่อน คือ "ISOLATION" โดย**ยังไม่ต้องถอดตัวอุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก**

2.2 ISOLATION

- เลือก "ISOLATION" (**Note:** ตัวอุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ต ยังคงต่ออยู่ที่สายนำสัญญาณ)
- เลือก "OMIT ISOLATION" แล้วรอจนคำว่า ISOLATION ถูกขีดเส้นใต้ (ISOLATION)
- ถอดอุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก
- ต่อสายนำสัญญาณพอร์ต 1 กับพอร์ต 2 เข้าด้วยกัน
- จากนั้นให้ทำเมนูที่สอง คือ "TRANSMISSION"

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 TRANSMISSION

- เลือก “TRANSMISSION”
- เลือก “DO BOTH FWD+REV”
- รอจนคำว่า TRANSMISSION ถูกขีดเส้นใต้ (TRANSMISSION)
- ถอดสายนำสัญญาณทั้งสองแยกออกจากกัน

- ต่อ อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm, Female) เข้ากับ สายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm)
- ต่อ อุปกรณ์โหลดมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm, Male) เข้ากับ สายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm)
- เลือก “DONE 2-PORT CAL”

3. ให้รอจนคำว่า “COMPUTING CAL COEFFICIENTS” ที่กระพริบอยู่หายไป ถือเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ CALIBRATION สำหรับ 2-PORT

4. การบันทึก

- กดปุ่ม Save/Recall
- เลือก “SAVE STATE” (จะปรากฏไฟล์ใหม่อยู่ที่ด้านล่างสุดของไฟล์ทั้งหมด ซึ่งจะขึ้นต้นด้วย REG_)
- ถ้าต้องการเปลี่ยนชื่อไฟล์ ให้หมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังไฟล์ที่ต้องการ

(**Note:** ไฟล์ที่ถูกเลือกจะเป็นสีเขียว)

- เลือก “FILE UTILITIES”
- เลือก “RENAME FILE”
  - กดปุ่ม ← เพื่อลบตัวอักษรหรือย้อนกลับ
  - แล้วหมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังตัวอักษรที่ต้องการ
  - แล้วเลือก “SELECT LETTER”

- กดปุ่ม “DONE” เมื่อทำการตั้งชื่อไฟล์เสร็จสิ้น

(**Note:** การตั้งชื่อต้องขึ้นต้นด้วยตัวอักษรเท่านั้น และไม่สามารถตั้งชื่อโดยใช้ตัวอักษร “.” ได้)

5. การเรียกใช้ไฟล์ที่บันทึกไว้

- กดปุ่ม Save/Recall
- หมุนเคอร์เซอร์ หรือกดปุ่มลูกศรขึ้น-ลง ไปยังไฟล์ที่ต้องการ

(**Note:** ไฟล์ที่ถูกเลือกจะเป็นสีเขียว)

- เลือก “RECALL STATE”