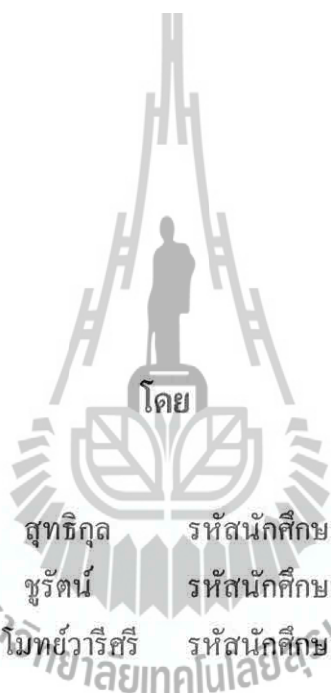




วัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz



นางสาวจิรัชยา สุทธิกุล รหัสนักศึกษา B5610006
นางสาวณิชา ชูรัตน์ รหัสนักศึกษา B5613816
นางสาวศรีสุกต์ โมทย์วารัตรี รหัสนักศึกษา B5621453

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 527499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2557
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2559

วัสดุคัดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz

คณะกรรมการสอบโครงงาน

๒๒

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ/ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี หัตถกรรม)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 527499 โครงงานวิศวกรรม
โทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2559

โครงการ	วัสดุคูณคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz		
ผู้ดำเนินงาน	1. นางสาวจิรียา	สุทธิกุล	รหัส B5610006
	2. นางสาววนิชชา	ฐรัตน์	รหัส B5613816
	3. นางสาวศรีสุภัก	โมทย์วาริศรี	รหัส B5621453

อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2559

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเราได้พัฒนานำคลื่นความถี่มาประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมหลายรูปแบบ เช่น การสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network) เรียกอีกอย่างว่า WLAN มาตรฐานที่วางข้อกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย คือมาตรฐาน IEEE 802.11 ส่งสัญญาณในย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งบางช่วงความถี่อาจไปรบกวนการทำงานของระบบปฏิบัติการอื่นที่ใช้ความถี่ใกล้เคียง จึงถือว่ามีความเสี่ยงที่อุปกรณ์ที่ดังกล่าวถูกรบกวนจะทำให้การทำงานล่าช้าหรือไม่ก็สามารถทำงานได้เลย ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำโครงการนี้ตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้ออกแบบวัสดุที่มีพื้นผิวเลือกดูดกลืนคลื่นความถี่ในช่วงความถี่ของ WLAN ซึ่งทำงานที่ 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เพื่อทดสอบการทำงานของความถี่และอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการดูดกลืนคลื่นความถี่ที่ไม่ต้องการ การวัดค่าจะวัดจากเครื่อง เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องอุปกรณ์ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้ทำโครงการตระหนักถึง ความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆทุกท่านซึ่งเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือ ขณะทำโครงการในเรื่องเครื่องมือ ให้ข้อมูลต่างๆ ที่เอื้อต่อการทำงานโครงการนี้ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อนึ่ง ผู้ทำโครงการหวังว่า โครงการฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แด่บิดา มารดา และผู้มี พระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้ทำโครงการขอน้อมรับผิด และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาโครงการต่อไป

คณะผู้จัดทำ

นางสาวจิรียา สุทธิกุล B5610006

นางสาววนิชชา ชูรัตน์ B5613816

นางสาวศรีสุภักดิ์ โมทย์วาริศรี B5621453

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการทำงาน	2
1.5 เนื้อหาที่เสนอในโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ความเป็นมาของเครือข่ายไร้สาย	3
2.3 ความหมายของระบบเครือข่ายไร้สาย	4
2.4 คุณสมบัติของคลื่น	7
2.4.1 การสะท้อนกลับ (Reflection)	8
2.4.2 การหักเห (Refraction)	8
2.4.3 การแพร่กระจายคลื่น (Diffraction)	9
2.4.4 การแทรกสอดของคลื่น (Interference)	10
2.5 คลื่นระนาบ (plane wave)	12
2.5.1 คลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย	12
2.5.2 คลื่นระนาบในตัวกลางที่มีการสูญเสีย	16
2.6 การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก	19

เรื่อง	หน้า
2.6.1 การตกกระทบตัวนำสมบรูณ์แบบตั้งฉาก	19
2.6.2 การตกกระทบไดอิเล็กทริกแบบตั้งฉาก	23
2.7 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surfaces:FSS)	26
2.7.1 องค์ประกอบของ FSS สำหรับกรองความถี่ต่าง ๆ	27
2.7.2 คุณสมบัติของ FSS	29
2.7.3 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS	30
2.7.4 ประเภทของ FSS	30
2.7.5 หลักการวิเคราะห์และออกแบบ FSS	31
2.8 กล่าวสรุป	32
บทที่ 3 การออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	33
3.1 กล่าวนำ	33
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่	33
3.3 วิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ	33
3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	36
3.5 ผลการจำลองแบบ	39
3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง	47
3.7 สรุป	48
บทที่ 4 การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล	49
4.1 กล่าวนำ	49
4.2 วัสดุดูดกลืนคลื่นโดยใช้ FSS	49
4.3 ผลการวัดทดสอบ	54
4.4 การเปรียบเทียบผล	59
4.5 สรุป	59
บทที่ 5 บทสรุปของโครงการ	60
5.1 บทสรุป	60
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข	61

เรื่อง	หน้า
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	62
ประวัติผู้เขียน	63
บรรณานุกรม	64



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 Tablet PC ซึ่งมีความสามารถเหมือน Notebook แต่มีน้ำหนักเบาและพกพาได้สะดวก	4
2.2 อุปกรณ์ Access Point	5
2.3 Wireless Adapter	6
2.4 wifi certified	7
2.5 การสะท้อนของคลื่นวิทยุ	8
2.6 การหักเหของคลื่นวิทยุ	9
2.7 การเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุ	10
2.8 การ Interference ของ direct rays และ ground - reflected rays	11
2.9 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง +z ตามสมการ (2.6)	14
2.10 ระบายตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก	20
2.11 คลื่นนิ่งของ $\vec{E}_1 = \vec{a}_x E_1$ และ $\vec{H}_1 = \vec{a}_y H_1$	22
2.12 คลื่นระบายตกกระทบไดอิเล็กตริกแบบตั้งฉาก	23
2.13 ชนิดของการตอบสนองความถี่แบบต่างๆและผลของการตอบสนองแต่ละชนิดโดยพื้นสเฟียหมายถึงพื้นผิวของโลหะ	28
2.14 ลักษณะและรูปร่างของ elements	29
2.15 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS	30
2.16 ประเภทของ FSS	31
2.17 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS	31
3.1 การสร้าง First layerแบบ unit cell	36
3.2 การสร้าง Second layer แบบ unit cell	36
3.3 การตั้งค่า Port 1	37
3.4 การตั้งค่า Port 2	37
3.5 การตั้งค่า Boundary Condition	38
3.6 การตั้งค่าความถี่ ที่ใช้ในการ Simulation	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 พารามิเตอร์ของชิ้นงานต้นแบบ	39
3.8 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ	40
3.9 ค่า S – Parameter จากการจำลองผลของชิ้นงาน	40
3.10 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 26$ mm	41
3.11 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 24$ mm	41
3.12 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 22$ mm	42
3.13 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 1.7$ mm	42
3.14 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 2.7$ mm	43
3.15 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 3.7$ mm	43
3.16 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ w_2	44
3.17 ปรับพารามิเตอร์ $w_2 = 2.7$ mm	44
3.18 ปรับพารามิเตอร์ $R = 29$ mm	45
3.19 ปรับพารามิเตอร์ $R = 28$ mm	45
3.20 ปรับพารามิเตอร์ $R = 27$ mm	46
3.21 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ R	46
3.22 การจำลองชิ้นงานแบบ 5×5	47
3.23 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5	47
4.1 วัสดุดูดคลื่นคลื่นแผ่นหน้าและแผ่นหลัง	49
4.2 ชิ้นงานต้นแบบ	50
4.3 สายอากาศไมโครสตริปภาครับและภาคส่งความถี่ 2.4 GHz	51
4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ 2.4 GHz รูปแบบของมุมกวาดและมุมเงย	51
4.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	52
4.6 Flexible test port set	53
4.7 สายโคแอกเซียล	54
4.8 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 วางสายอากาศภาครับ-ภาคส่ง	55
4.10 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของสายอากาศไมโครสตริป	55
4.11 วางวัสดุคูคกิ้นคลีนไว้ระหว่างสายอากาศภาครับ-ภาคส่ง	56
4.12 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านวัสดุคูคกิ้นคลีน	56
4.13 การติดตั้งการวัดผลวัสดุคูคกิ้นคลีน	57
4.14 ผลการวัดทดสอบ S_{21} คูการสะท้อนคลื่นของวัสดุคูคกิ้นคลีน	57
4.15 การติดตั้งการวัดผลผ่านแผ่นโลหะ	58
4.16 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านแผ่นโลหะ	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบุรายละเอียดย่อยของ IEEE 802.11	6
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคูกกลืนคลื่นแผ่นหลัง (First Layer)	50
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคูกกลืนคลื่นแผ่นหน้า (Second Layer)	50
4.3 ผลการบันทึกการส่งผ่านคลื่นผ่านวัสดุต่างๆ	59
5.1 ปัญหา สาเหตุและวิธีการแก้ไข	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารทางด้านโทรคมนาคม โดย Federal Communications Commission (FCC) สถาบันที่ควบคุมการใช้อุปกรณ์ไร้สาย และ Institute of Electricals Engineers (IEEE) ซึ่งกำหนดโดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ โดยมีมาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สายในย่านความถี่ 2.4 - 2.5 GHz เป็น ย่านความถี่ที่ถูกระบุไว้เพื่อใช้กับเครื่องมือในวงการ อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ นอกจากนั้นยังถูกนำมาใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น โทรศัพท์ไร้สาย (Cordless Phone) หูฟังไร้สาย เครื่องอ่านแถบรหัส (Bar Code) เครื่องส่งสัญญาณจากเครื่องเล่นวีดีโอ หรือ แม้แต่เตาไมโครเวฟ ดังนั้นความถี่ช่วง 2.45 GHz มักสร้างสัญญาณรบกวนที่จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องมือและอุปกรณ์เหล่านี้ลดลง

จากปัญหาที่พบดังกล่าว โครงการนี้จึงออกแบบวัสดุคูคกกลื่นความถี่ในย่าน 2.45 GHz เพื่อแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือและอุปกรณ์ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะเชิงประสิทธิภาพการสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น เมื่อตกกระทบแผ่น FR-4
2. เพื่อออกแบบวัสดุเลือกคูคกกลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาและออกแบบวัสดุคูคกกลื่นความถี่ในย่าน 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2014
2. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้ FR-4 ในการออกแบบ
3. วัดทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการการส่งผ่านคลื่น
2. เสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
3. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม CST Microwaves Studio 2014
4. นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า มาพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ
5. นำผลที่ได้จากการออกแบบมาลงมือปฏิบัติเป็นชิ้นงาน และวัดทดสอบ
6. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอโครงการ

1.5 เนื้อหาที่เสนอในโครงการ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบวัสดุเลือกดูดกลืนคลื่นความถี่ในย่าน 2.45 GHz เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ของระบบเครือข่ายไร้สาย ย่านความถี่ 2.45 GHz สำหรับการออกแบบจะใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2014 ในการจำลองผล แล้วสร้างอุปกรณ์ต้นแบบและวัดทดสอบผลต่อไปใน บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับโครงการ บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwaves Studio 2014 บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบชิ้นงานวัสดุเลือกดูดกลืนคลื่นความถี่ และบทที่ 5 เป็นการสรุปผลทั้งหมดที่ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

โครงงานวัสดุคูกคลื่นความถี่ย่าน 2.4GHz นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระนาบคลื่น (plane wave) หลักการเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลาง และการออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ หรือ FSS (Frequency Selective Surface) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วน ได้แก่ ระบบเครือข่ายไร้สาย คลื่นระนาบ การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน

2.2 ความเป็นมาของเครือข่ายไร้สาย

ความต้องการในใช้ระบบเครือข่ายไร้สายมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบเซลลูลาร์โฟนหรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่ระบบเครือข่ายไร้สายต้องการขนาดเล็กและเป็นเซลล์เฉพาะกิจ เป็นเซลล์ส่วนตัวที่เชื่อมกับเครือข่ายได้ดังนั้นจึงมีความพยายามที่พัฒนาเครือข่ายแลนแบบไร้สายเพื่อให้รองรับความต้องการของผู้ใช้ กลุ่มผู้ใช้ที่มีความต้องการใช้แลนแบบไร้สายได้แก่ ร้านค้าปลีก ที่เก็บสินค้า โรงพยาบาล ธุรกิจขนส่ง มหาวิทยาลัยตลอดจน องค์กรภาคธุรกิจต่าง ๆ ในปี ค.ศ. 1997 สถาบัน IEEE ได้กำหนดมาตรฐานเครือข่ายไร้สายแบบเดียวกับอีเธอร์เน็ต และเป็นชุดเดียวกับ 802 โดยให้ชื่อว่า IEEE 802.11 มาตรฐานที่เกิดขึ้นในปีนั้นยังมีข้อจำกัดในทางเทคโนโลยี จึงกำหนดระบบการรับส่งสัญญาณด้วยขนาดความถี่ 2 เมกะบิตต่อวินาที

ในปี ค.ศ. 1999 IEEE ได้พัฒนามาตรฐานใหม่ของแลนระบบไร้สายและให้ชื่อ มาตรฐานที่ IEEE 802.11b โดยมีการพัฒนาให้ใช้ความเร็วในการรับส่งได้ถึง 11 เมกะบิตต่อวินาทีและเป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์คือ รับและส่งแยกกันด้วยความเร็ว 11 เมกะบิตต่อวินาที จากมาตรฐาน 802.11b ที่ประกาศออกไป ทำให้มีผู้ผลิตเครือข่ายไร้สายออกมามาก โดยเฉพาะบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์เครือข่ายขนาดใหญ่ทุกบริษัทให้ความสนใจและเร่งการพัฒนาปรับปรุงกันไป การพัฒนาเครือข่ายไร้สายมิได้หยุดอยู่เพียงแค่การทำให้เชื่อมต่อถึงกันได้เท่านั้นระบบการดูแลรักษาความปลอดภัยของสัญญาณข้อมูลที่แพร่กระจายในอากาศมีการวางมาตรฐานทางด้านเอนคริปชันและการสร้างระบบดูแลรักษาความปลอดภัยการเข้าถึง มีการพัฒนาระบบการเคลื่อนย้ายเข้าสู่เครือข่ายหนึ่งไปอีกเครือข่ายหนึ่ง หรือที่เรียกว่าโรมมิ่ง (Roaming) มีการแบ่งโหลดระหว่างเซลล์โดยการตรวจสอบความแรงของสัญญาณเพื่อให้ขนาด ของพื้นที่ทับซ้อนกันได้

2.3 ความหมายของระบบเครือข่ายไร้สาย

ระบบสื่อสารเคลื่อนที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โทรศัพท์เคลื่อนที่เริ่มเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในชีวิตประจำวันเพราะช่วยอำนวยความสะดวกในการติดต่อสื่อสาร เช่น ในกรณีที่รถเกิดอุบัติเหตุผู้ขับสามารถใช้โทรศัพท์มือถือโทรขอความช่วยเหลือได้ทันที นอกจากนี้โทรศัพท์มือถือแล้วอุปกรณ์ Personal Information Management (PIM) เช่น เครื่อง Personal Digital Assistant (PDA) เริ่มมีผู้สนใจและใช้งานมากขึ้น เช่น ใช้ในการรับส่ง E-mail การจัดตารางนัดหมาย หรือ การเก็บข้อมูลการเงินส่วนตัว ปัจจุบันเครื่องคอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊กมีขนาดเล็กลง แต่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เช่น เครื่อง Tablet PC ได้มีการคิดตั้งอุปกรณ์การติดต่อสื่อสารชนิดเครือข่ายไร้สาย กับระบบเครือข่ายเป็นส่วนหนึ่งของเครื่อง โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องซื้ออุปกรณ์ติดต่อสื่อสารเพิ่มเติม



รูปที่ 2.1 Tablet PC ซึ่งมีความสามารถเหมือน Notebook

แต่มิฉะนั้นหากเราและพวกเราได้สะดวกกว่า (ที่มา: <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page1.asp>)

เมื่อกล่าวถึงคำว่า Mobile แล้ว นิยมใช้กับคำว่า Wireless แต่ทั้งสองคำมีความแตกต่างกันคือ

- Mobile หมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนย้าย
 - Mobile Device หมายถึง อุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถพกพาได้ เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่อง PDA และ Notebook
 - Wireless เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งภาพ เสียง และข้อมูล จากอีกที่หนึ่ง ไปอีกที่หนึ่งโดยไม่ใช้สายไฟ แต่ใช้คลื่นวิทยุหรืออาจใช้คลื่นอินฟราเรดเป็นตัวกลางในการสื่อสาร
 - LAN มาจากคำว่า Local Area Network คือ ระบบเครือข่ายในระยะทางใกล้ ๆ เช่น ภายในห้องทำงาน การเชื่อมต่อระหว่างห้องทำงาน ระหว่างชั้น หรือ ระหว่างตึก
- ดังนั้น Wireless LAN หมายถึง การติดต่อสื่อสารในระยะทางใกล้ ๆ โดยไม่ใช้ สายไฟและอุปกรณ์สื่อสารคือ Mobile Device หรือ Notebook

สำหรับเครือข่ายไร้สาย ที่ใช้สัญญาณวิทยุ อุปกรณ์ที่เป็นเครื่องรับข้อมูลสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้โดยอิสระภายใต้รัศมีความแรงของการใช้คลื่นวิทยุ คือ การรับส่งข้อมูลมีความผิดพลาดสูง เพราะคลื่นวิทยุถูกรบกวนได้ง่ายจากสัญญาณภายนอก เช่น การเปิดเครื่องเตาอบไมโครเวฟ อาจทำให้สัญญาณไมโครเวฟ เข้าไปรบกวนระบบเครือข่ายไร้สายได้ ทำให้การรับส่งข้อมูลผิดพลาด ส่วน

เครือข่ายไร้สาย ชนิดที่ใช้สัญญาณอินฟราเรดในการใช้งาน อุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งต้องติดตั้งไว้ในจุดที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง เพราะอินฟราเรดเป็นคลื่นแสง ไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งของได้ การทำงานของเครือข่ายไร้สาย ชนิดอินฟราเรด คล้ายการใช้รีโมท คอนโทรล ในการเปลี่ยนช่องของโทรทัศน์ ข้อดีของการใช้คลื่นอินฟราเรด คือ ป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดี

เครือข่ายไร้สายชนิดที่ใช้สัญญาณวิทยุเหมาะสำหรับใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่าง Mobile Device กับระบบเครือข่ายหลัก เช่น การใช้เครื่อง PDA ท่อง Web Site ภายในที่ทำงาน ผู้ใช้งานสามารถเดินไปห้องต่างๆในที่ทำงาน พร้อมทั้งเรียกดูข้อมูลจากอินเทอร์เน็ตได้ตลอดเวลา สำหรับเครือข่ายไร้สาย ชนิดที่ใช้อินฟราเรด เหมาะสำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างเครือข่ายหลักที่ไม่สามารถเดินสายไฟได้ เช่น การเชื่อมต่อเครือข่ายระหว่างตึกซึ่งอยู่คนละฝั่งถนน

อุปกรณ์ Access Point ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลกับ Mobile Devices แบบไร้สาย Mobile Devices สามารถเคลื่อนที่ภายใน Wireless Network ได้ ดังรูป



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ Access Point (ที่มา: <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page1.asp>)

ส่วนอุปกรณ์ในระบบที่ใช้สายไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (Wired Network) และใช้เชื่อมต่อ กับคอมพิวเตอร์บนโต๊ะทำงาน แต่เมื่อใดที่ผู้ใช้งานไม่ได้อยู่ที่โต๊ะทำงาน และต้องการทำงานโดยไม่ ขาดช่วง สามารถเปลี่ยนมาใช้ระบบ Wireless Network ได้โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook โดยทั่วไประบบที่ใช้ Wireless Network จำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบ Wired Network ก่อนเพราะ ต้องใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารกับระบบอินเทอร์เน็ต

อุปกรณ์ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 มีให้เลือกใช้ 3 ประเภทคือ

1. คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 2.4 GHz
(อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด 11 Mbps)
2. คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 5 GHz
(อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps)
3. อินฟราเรด (Infrared)
(อัตราการรับส่งข้อมูล 1 และ 2 Mbps)



รูปที่ 2.3 Wireless Adapter (ที่มา: <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page4.asp>)

โดยมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้น ยังมีมาตรฐานระบุรายละเอียดย่อยอีก โดยใช้ตัวอักษรต่อท้ายเช่น IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, และ IEEE 802.11g ซึ่งจะมีลักษณะต่าง ๆ ดังตัวอย่างตามตารางข้างล่าง

	802.11	802.11a	802.11g
อัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุด	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps
เทคโนโลยีการเข้ารหัส	CCK Complimentary Code Keying	OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing	CCK & OFDM
ความถี่	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz = 11 Mbps 5 GHz = 54 Mbps

ตารางที่ 2.1 ระบุรายละเอียดย่อยของ IEEE 802.11
(ที่มา: <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page4.asp>)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ที่สามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ตัวอื่น

(ที่มา: <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/wireless.asp>)

รองรับการรักษาความปลอดภัยหลายระดับ

- ควบคุมการเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่าย โดยการตั้งค่า NIC Card ของเครื่อง Client กับ Access Point ให้มีค่าตรงกันจึงจะสามารถ ติดต่อกัน ได้ ถือเป็นการกำหนดพื้นที่ให้บริการของ Wireless Lan (Wireless Lan Service Area: WLS) นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยในอีกระดับหนึ่ง คือการบันทึก MAC address ของ แต่ละ NIC Card ที่ได้รับอนุญาตให้ติดต่อกับ Access point นั้นๆ ได้ไว้ในตัว Access Point เอง เพียงเท่านั้นบุคคลภายนอกก็จะไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายได้
- การเข้ารหัสเพื่อป้องกันการดักสัญญาณ ระหว่าง NIC Card กับ Access Point สามารถรองรับการเข้ารหัสสัญญาณเพื่อป้องกันการดักสัญญาณที่กระจายออกไปได้ โดยมีทั้งการเข้ารหัสสัญญาณแบบ 40 บิต และ 128 บิต แบบ Wired Equivalent Privacy (WEP) ซึ่งเป็นมาตรฐานโปรโตคอลความปลอดภัยสำหรับอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย

2.4 คุณสมบัติของคลื่น

คุณสมบัติพื้นฐานของคลื่นมี 4 ประเภท ดังนี้

2.4.1 การสะท้อนกลับ (Reflection)

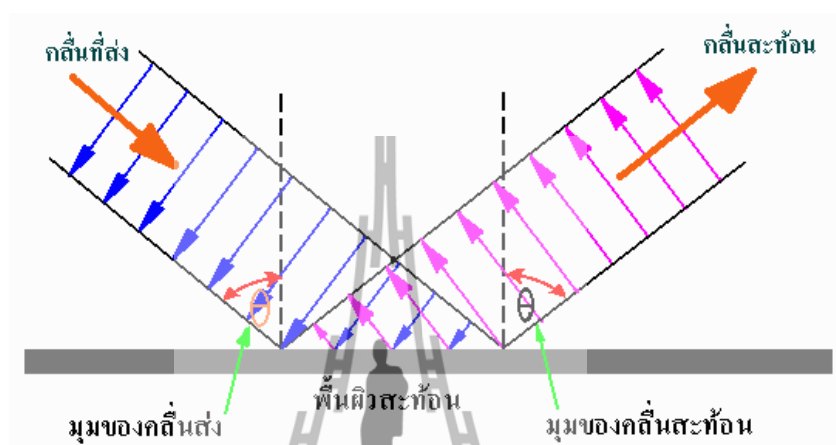
2.4.2 การหักเห (Refraction)

2.4.3 การแพร่กระจายคลื่น (Diffraction)

2.4.4 การแทรกสอดของคลื่น (Interference)

2.4.1 การสะท้อนของคลื่น

การสะท้อนของคลื่นหมายถึงการเปลี่ยนทิศทางการเดินทางของคลื่นโดยทันทีทันใดเมื่อคลื่นนั้นเดินทาง ตกกระทบบที่ผิวของตัวกลาง นั่นคือคลื่นกระดอนออกจากผิวสะท้อนของตัวกลางในลักษณะเดียวกับแสงสะท้อนจากกระจกเงา จากรูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์ของการสะท้อนของคลื่นวิทยุ สังเกตได้ว่ามุมตกกระทบบเท่ากับมุมสะท้อน

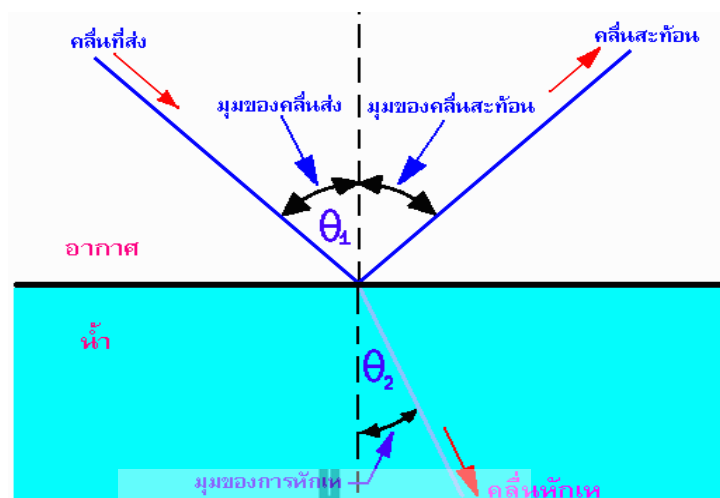


รูปที่ 2.5 การสะท้อนของคลื่นวิทยุ

(ที่มา:<http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.html>)

2.4.2 การหักเหของคลื่น

การหักเหของคลื่นวิทยุเกิดขึ้นเมื่อคลื่นวิทยุเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง ไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่เหมือนกัน โดยที่มุมตกกระทบบ ณ ตัวกลางที่สองไม่เป็นมุมฉาก พลังงานคลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับเข้าไปยังตัวกลางที่หนึ่ง โดยมีมุมตกเท่ากับมุมสะท้อน แต่ยังมีพลังงานคลื่นอีกส่วนหนึ่งเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สอง การเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สองนี้ จะไม่เป็นแนวเส้นตรงต่อไปจากแนวทางเดินในด้านตัวกลางแรก แต่จะหักเหออกไปเล็กน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวกลางทั้งสอง สาเหตุที่เกิดการหักเหของทางเดินของคลื่นวิทยุ เนื่องจาก ความเร็วของคลื่นวิทยุในตัวกลาง ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันจะไม่เท่ากัน เช่น คลื่นวิทยุจะเดินทางในน้ำบริสุทธิ์จะช้ากว่าเดินทางในอากาศถึง 9 เท่า เป็นต้น



รูปที่ 2.6 การหักเหของคลื่นวิทยุ

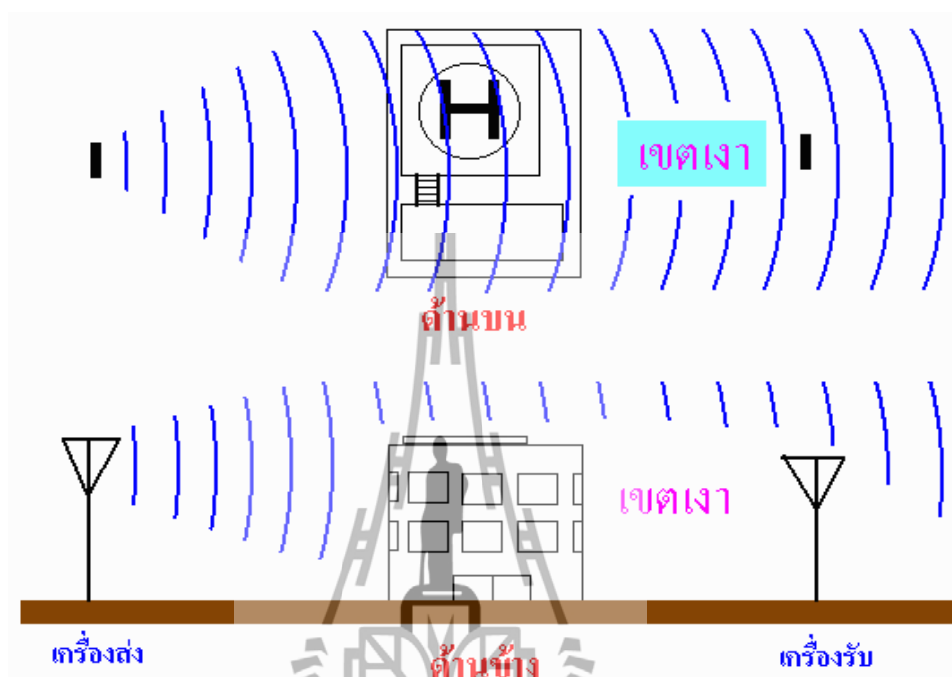
(ที่มา: <http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.html>)

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำคลื่น (wave front) ตกกระทบพื้นผิวระหว่างตัวกลางทั้งสองนั้น ส่วนของคลื่นที่สัมผัสผิวน้ำก็จะเริ่มเดินทางเข้าไปในน้ำด้วยความเร็วช้าลงในขณะที่หน้าคลื่นอีกส่วนหนึ่งยังคงอยู่ในอากาศจะเดินทางเร็วกว่าตัวอย่างคลื่นที่ใช้ติดต่อสื่อสารที่อาศัยการหักเหของคลื่น คือ การสื่อสารในย่านความถี่สูง (HF) ซึ่งอาศัยพลาสมาไฟฟ้า IONOSPHERE เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางจากพื้นโลกผ่านเข้าไปยังพลาสมาไฟฟ้าลำคลื่นจะค่อยๆ หักเหไปเรื่อยๆ จนในที่สุดคลื่นก็จะกลับออกมาจากพลาสมาไฟฟ้าและกลับมายังพื้นโลกอีก

2.4.3 การแพร่กระจายคลื่น

การแพร่กระจายคลื่นมีชื่อเรียกได้ต่างกันไป เช่น การเลี้ยวเบนของคลื่นหรือการเบี่ยงเบนของคลื่นการเบี่ยงเบนของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านมุมหรือขอบของตัวกลางที่บดบังคลื่นนั้นไม่สามารถผ่านได้ เช่น คลื่นวิทยุความถี่สูงมากเดินทางผ่านยอดเขาคลื่นนี้มีคุณสมบัติเดินทางเป็นเส้นตรงดังนั้นถ้าเราลากเส้นตรงจากสายอากาศไปยังยอดเขาส่วนที่อยู่หลังยอดเขาและต่ำกว่าเส้นนี้ลงมาไม่ควรที่จะได้รับคลื่นได้เลยแต่บางส่วนของคลื่นที่อยู่หลังยอดเขาสามารถรับคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงได้เนื่องจากความถี่สูงขึ้น การเบี่ยงเบนของคลื่นก็ยังลดลงกล่าวคือคลื่นจะเดินทางเป็นแนวเส้นตรงแต่บางส่วนของคลื่นเกิดการกระทบกับสปีดแคบๆ (ยอดเขา) ทำให้คลื่นเกิดการแตกกระจายออกไปโดยรอบเสมือนกับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่นั้นเอง

จากรูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุเมื่อเดินทางไปยังตัวกลางที่ทึบและเจียวกอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าบริเวณบางส่วนหลังตัวกลางนั้นที่เป็นเขตเบี่ยงเบนซึ่งสามารถติดต่อสื่อสารได้ และบริเวณบางส่วนที่จะติดต่อสื่อสารกันไม่ได้โดยเรียกว่า เขตเงา (SHADOW)

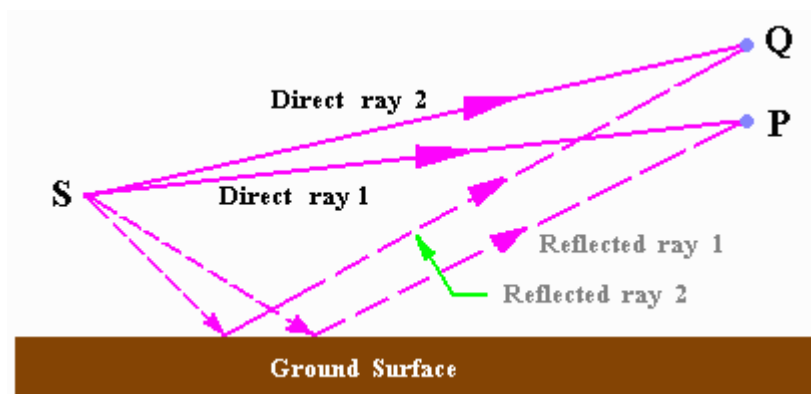


รูปที่ 2.7 การเบี่ยงเบนของคลื่นวิทยุ

(ที่มา: <http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.html>)

2.4.4 การแทรกสอดของคลื่น

การแทรกสอดของคลื่นเรื่องนี้เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทาง optical ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราพิจารณาเรื่อง Interference ต่อไปสิ่งนี้เกิดขึ้นเมื่อ 2 คลื่นที่ออกจากแหล่งจ่ายอันเดียวและเดินทางมาด้วยเส้นทางที่ต่างกันมาถึงจุดหนึ่งพร้อมกันสิ่งนี้เกิดขึ้นบ่อยมากในการเดินทางของ High - frequency Sky - Wave propagation และใน Microwave space - wave propagation(กรณีของแบบนี้จะอธิบายในหัวข้อนี้) มันเกิดขึ้นเมื่อสายอากาศของไมโครเวฟถูกตั้งอยู่ใกล้กับพื้นดินและคลื่นที่มาถึงจุดรับไม่ใช่เพียงจากทิศทางตรงแต่ เป็นคลื่นที่หลังจากสะท้อนจากพื้นดินด้วยดังแสดง ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การ Interference ของ direct rays และ ground - reflected rays

ที่มา: <http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.html>

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าเส้นทางของคลื่นตรง (Direct ray) สั้นกว่าเส้นทางจากการสะท้อน (Reflected ray) สำหรับบางครั้งการรวมกันของความถี่และความสูงของสายอากาศเหนือพื้นโลก ความแตกต่างระหว่างเส้นทาง Direct ray 1 กับ Reflected ray 1 เท่ากับ ประมาณครึ่งความยาวคลื่น สิ่งนี้จะเป็นการหักล้างอย่างสมบูรณ์ ณ จุดรับ P ถ้าพื้นโลกเป็นตัวสะท้อนที่สมบูรณ์แบบและหักล้างกัน บางส่วนสำหรับพื้นโลกที่ไม่สมบูรณ์แบบส่วนจุดรับอื่นๆ (P) ด้วยเหตุที่เส้นทางแตกต่างระหว่าง Direct ray 2 กับ Reflected ray 2 มีค่าเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นพอดีในกรณีนี้การเสริมกันของคลื่นที่รับได้ จะเกิดขึ้น ณ จุดนี้และจะเป็นเฉพาะบางส่วนหรือทั้งหมดขึ้นอยู่กับความสามารถสะท้อนของพื้นโลกการเกิดอย่างต่อเนื่องของจุดนี้มากกว่าหนึ่งอันที่จุดอื่นๆอาจพบได้อีกจะได้เป็น Interference Pattern ขึ้นซึ่งประกอบด้วยจุดหักล้างกัน (cancellation) และจุดเสริมกัน (Reinforcement) สลับกัน Pattern

คุณสมบัติอื่นๆที่เกิดขึ้นกับคลื่น

การดูดกลืน (ABSORPTION) เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางผ่านตัวกลาง พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในลักษณะที่กลายเป็นความร้อนเรียกว่า คลื่นวิทยุถูกดูดกลืนโดยตัวกลาง ตัวกลางนั้น ไม่ว่าจะเป็นตัวนำ หรือมีสภาพเป็นตัวต้านทานต่อคลื่นวิทยุ อาคารตึก และสิ่งก่อสร้างต่างๆ บนพื้นโลก อุณหภูมิของอากาศ น้ำ และฝุ่นละออง ซึ่งประกอบกันเป็นชั้นบรรยากาศ สามารถเป็นตัวดูดกลืนพลังงานได้ทั้งสิ้น

การกระจัดกระจาย (SCATTERING) เมื่อคลื่นเดินทางตกกระทบบนตัวกลางที่รวมกันเป็นกลุ่ม พลังงานส่วนหนึ่งจะสะท้อนออกมา และบางส่วนเดินทางหักเหเข้าไปใน

ตัวกลาง ส่วนหนึ่งของพลังงานที่เข้าไปในตัวกลางจะถูกดูดกลืนแปลงรูปเป็นความร้อน และมี อีก ส่วนหนึ่งถูกตัวกลางคายออกมาอีกในรูปของการกระจายพลังงานคลื่น เนื่องจากคลื่นที่กระจาย ออกมานี้ไม่ค่อยเป็นระเบียบเราจึงเรียกว่า คลื่นกระจัดกระจาย การกระจายของคลื่นนี้ บางครั้งก็นำมาใช้ประโยชน์ได้เช่น ในระบบการสื่อสารที่เรียกว่า TROPOSPHERIC SCATTER ซึ่งอาศัยการกระจายของคลื่นวิทยุจากกลุ่มอากาศที่หนาแน่นในชั้น

บรรยากาศ TROPOSPHERE ซึ่งอยู่ห่างจากผิวโลกประมาณ 10 กิโลเมตร ในบางครั้งการกระจาย กระจายของคลื่นก็มีผลเสียเช่น การสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟเมื่อคลื่นตกกระทบเมฆฝนจะทำให้ คลื่นเกิดการสูญเสียเป็นผลจากการกระจาย และการหักเหทำให้คลื่นไม่สามารถเดินทาง ไปยังปลายทางได้หมด

การลดทอนพลังงาน (ATTENUATION) ของคลื่น จะมีความหมายหรือสาเหตุคล้ายคลึงกับ การดูดกลืน คือการลดทอนพลังงานคลื่นอันเนื่องมาจากการถ่างออกของลำคลื่นวิทยุในลักษณะ ที่คล้ายคลึงกับการถ่างออกของลำแสงไฟฉายปรากฏการณ์เช่นนี้จะทำให้ ความเข้มของพลังงาน คลื่นวิทยุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อคลื่นเดินทางห่างจากจุดกำเนิดออกไปถ้า แหล่งกำเนิดคลื่นมีลักษณะที่สามารถกระจายคลื่นได้ทุกทิศทางรอบตัวหรือเรียกว่า ISOTROPIC ANTENNA นั้น คลื่นที่ถูกสร้างขึ้น จะลดความเข้มลงไปเรื่อย ๆ เมื่อคลื่นเดินทางห่างออกไป โดย ความเข้มจะแปรกลับ กับระยะทางกำลังสองนั่นเอง

2.5 คลื่นระนาบ (plane wave)

2.5.1 คลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

จากสมการของเฮล์มโฮลทซ์ในตัวกลางเอกพันธ์ดังนี้

$$\nabla^2 E + k_0^2 E = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ k_0 คือ เลขคลื่นในอากาศว่าง (free-space wavenumber) ที่มีค่าเท่ากับ

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c} \quad (2.2)$$

ในระบบพิกัดฉากสมการ (2.1) คือสมการของเฮล์มโฮลทซ์ที่มีองค์ประกอบของ E_x , E_y และ E_z เพื่อความง่ายในการพิจารณาในข้างต้น สมมติให้เหลือเพียงองค์ประกอบในแนวแกน x เท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.1) เขียนได้ว่า

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) E_x = 0 \quad (2.3)$$

ถ้าพิจารณา E_x ที่มีการเดินทางไปในแนวแกน z แล้ว

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = 0$$

ดังนั้นสมการ (2.3) จะลดรูปเหลือแค่เพียง

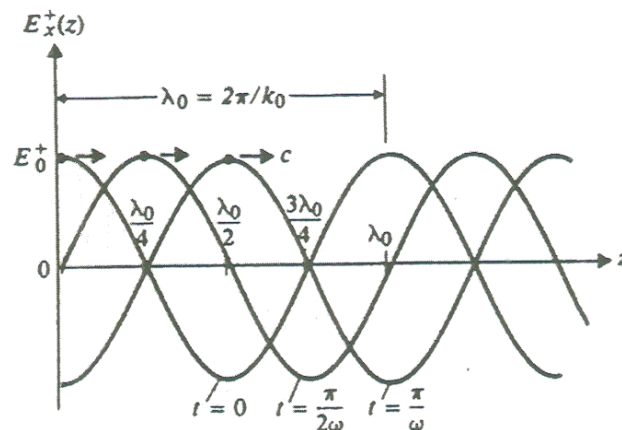
$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k_0^2 E_x = 0 \quad (2.4)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) เนื่องจาก E_x ขึ้นเป็นตัวแปร z เพียงอย่างเดียว และทำให้คำตอบของสมการคลื่นใน (2.4) มีค่าดังนี้

$$E_x(z) = E_x^+(z) + E_x^-(z) = E_0^+ e^{jk_0 z} + E_0^- e^{-jk_0 z} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_0^+ และ E_0^- คือค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะอธิบายละเอียดในภายหลังในขั้นแรกเราจะพิจารณาเฉพาะเฟสเซอร์เทอมแรกของคำตอบในสมการ (2.5) ในรูปแบบของเวลาจริง (real time) โดยใช้ $\cos \omega t$ เป็นตัวอ้างอิง เมื่อกำหนดให้ E_0^+ เป็นค่าคงที่มีค่าเป็นค่าจริง ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$E_x^+(z, t) = \text{Re}[E_x^+(z) e^{j\omega t}] = \text{Re}[E_0^+ e^{j(\omega t - k_0 z)}] = E_0^+ \cos(\omega t + k_0 z) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.9 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง +z ตามสมการ (2.6)

สมการ (2.6) สามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 1 เทียบกับเวลา จากรูปจะเห็นได้ว่าที่เวลา $t = 0$, $E_x^+(z,0) = E_0^+ \cos k_0 z$ คือ โค้งของโคไซน์ที่มีขนาดเท่ากับ E_0^+ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ คลื่นก็เดินทางไปในทิศทาง +z ซึ่งเราเรียกคลื่นในลักษณะนี้ว่า คลื่นจร (traveling wave) ถ้าเรากำหนดจุดสนใจไว้ที่ใดที่หนึ่งบนคลื่นลูกนี้และเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับคลื่น เราจะสามารถหาความเร็วของคลื่นนี้ ดังนี้

$$\omega t - k_0 z = \text{constant phase}$$

ดังนั้น
$$u_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตำแหน่งเฟสใดๆ (phase velocity) ในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับความเร็วแสงที่มีค่าประมาณ 3×10^8 (m/s)

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\pi}{\lambda_0} \text{ (rad/m)} \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } \lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0} \text{ (m)} \quad (2.9)$$

เมื่อกลับไปพิจารณาสมการ (2.5) ในเฟสทอมที่สองที่ว่า $E_0^+ e^{jk_0 z}$ โดยไม่ต้องพล็อตกราฟก็พอจะทราบได้ว่าทอมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง -z ด้วยความเร็ว c ซึ่งถ้าสนใจแต่คลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง +z เท่านั้น $E_0^- = 0$ อย่างไรก็ตามถ้าเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในตัวกลาง (หรือเกิดการสะดุด) คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับ เมื่อนั้นคลื่นที่เดินทางสวนทาง (ในทิศทาง -z) จะต้องถูกพิจารณา ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

การหา $\bar{H}$ ทำได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = \begin{vmatrix} \bar{a}_x & \bar{a}_y & \bar{a}_z \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x^+(z) & 0 & 0 \end{vmatrix} = -j\omega\mu_0(\bar{a}_x H_x^+ + \bar{a}_y H_y^+ + \bar{a}_z H_z^+)$$

ซึ่งทำให้

$$H_x^+ = 0 \quad (2.10ก)$$

$$H_y^+ = \frac{1}{-j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} \quad (2.10ข)$$

$$H_z^+ = 0 \quad (2.10ค)$$

ดังนั้น H_y^+ เป็นองค์ประกอบเดียวที่เหลืออยู่และเนื่องจาก

$$\frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (E_0^+ e^{-jk_0 z}) = -jk_0 E_x^+(z)$$

และจาก (2.10) จะได้

$$H_x^+(z) = \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_x^+(z) = \frac{1}{\eta_0} E_x^+(z) \text{ (A/m)} \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } \eta_0 \text{ นิยามจาก } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi \cong 377 \quad (\Omega) \quad (2.12)$$

ซึ่งมีชื่อว่า อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของอวกาศว่าง เนื่องจาก η_0 เป็นค่าจริง ดังนั้น H_y^+ จะมีเฟสเท่ากับ (in phase) กับ E_x^+ ดังนั้นเราสามารถเขียน $\bar{H}$ ในรูปแบบ ณ ขณะหนึ่ง (instantaneous form) ได้ดังนี้

$$\bar{H}(z, t) = \bar{a}_y H_y^+(z, t) = \bar{a}_y \text{Re}[H_y^+(z) e^{j\omega t}] = \bar{a}_y \frac{E_0^+}{\eta_0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad (2.13)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ คือ อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง และยังทราบอีกว่า $\bar{H}$ ตั้งฉากกับ $\bar{E}$ และทั้งคู่ก็ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางด้วยเช่นกัน

2.5.2 คลื่นระนาบในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เราสามารถเขียนสมการของเฮล์มโฮลตซ์ได้ดังนี้

$$\nabla^2 E = k_c^2 E = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อ $k_c = \omega\sqrt{\mu\epsilon_c}$ เป็นค่าเชิงซ้อน (complex number) จะนิยามค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (propagation constant, γ) ดังนี้

$$\gamma = jk_c = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.15)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า γ เป็นค่าเชิงซ้อน จาก $\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ เมื่อแทนลงไปในสมการ (2.15) จะได้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^{1/2} \quad (2.16)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งได้ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}\left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ α และ β เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ γ ถ้าในกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0$ ($\epsilon'' = 0, \epsilon = \epsilon'$) ซึ่งทำให้ $\alpha = 0$ และ $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ ดังนั้นสมการของเฮล์มโฮลตซ์ สมการ (2.14) จะเปลี่ยนเป็น

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (2.18)$$

คำตอบของ (2.18) ก็คือ คลื่นระนาบที่เดินทางไปในทิศทาง $+z$ ซึ่งได้แก่

$$\bar{E} = \bar{a}_x E_x = \bar{a}_x E_0 e^{-\gamma z} \quad (2.19)$$

เมื่อสมมติให้คลื่นระนาบนี้มีขั้วเป็นแบบเชิงเส้นในทิศทาง x ซึ่งพารามิเตอร์ของการแพร่กระจายคลื่น (propagation factor $e^{-\gamma z}$) ประกอบด้วยสองพารามิเตอร์ดังนี้

$$\bar{E}_x = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (2.20)$$

จะเห็นได้ว่าทั้งค่า α และ β เป็นค่าจริงที่มีค่าบวก ซึ่งพารามิเตอร์แรก ($e^{-\alpha z}$) จะมีค่าลดลงเมื่อ z เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกชื่อว่า ค่าคงที่การลดทอน (attenuation constant : α) มีหน่วยเป็น (Np/m) ส่วนพารามิเตอร์ที่สองในสมการ (2.20) คือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับเฟสของคลื่นที่เรียกว่า ค่าคงที่เฟส (phase constant) มีหน่วยเป็น (rad/m) ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสของคลื่นเมื่อเดินทางในระยะทาง 1 เมตร ต่อไปคือคุณสมบัติของตัวกลางชนิดต่างๆ มีดังนี้

1) ไดอิเล็กทริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ

ตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กทริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ (low-loss dielectric) มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (insulator) ที่ดีแต่ไม่สมบูรณ์ 100% เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในตัวกลางชนิดนี้จะมีค่า $\epsilon' \ll \epsilon''$ หรือ $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ ในสภาวะดังกล่าวค่า γ จะถูกประมาณได้ด้วยการกระจายไบนอมิยัล (binomial expansion) ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{1}{8}\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2 \right] \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) ค่าคงที่การลดทอนมีค่าเท่ากับ

$$\alpha \cong \frac{\omega\epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \quad (\text{Np/m}) \quad (2.22)$$

และมีค่าคงที่เฟสมีค่าเท่ากับ

$$\beta \cong \omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[1 + \frac{1}{8}\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2 \right] \quad (\text{rad/m}) \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่าค่าคงที่การลดทอนของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำมีค่าเป็นบวกและแปรผันตรงกับความถี่ ส่วนค่าคงที่เฟสในสมการ (2.23) มีค่าที่ต่างออกไปจาก $\omega\sqrt{\mu\epsilon}$ เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า $\omega\sqrt{\mu\epsilon}$ เป็นค่าในกรณีของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ หรือที่เรียกว่า perfect (lossless) dielectric ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำเป็นค่าเชิงซ้อนดังนี้

$$\eta_c \cong \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \left(1 + j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'} \right)^{-1/2} \quad (\Omega) \quad (2.24)$$

เนื่องจากอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์คืออัตราส่วนของ $\bar{E}_x$ และ $\bar{E}_y$ สำหรับคลื่นระนาบ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่เกิดการสูญเสียนี้จึงไม่มีเฟสที่เหมือนกันดังเช่นในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless medium) ความเร็วเฟส (phase velocity : u_p) ได้จาก $\frac{\omega}{\beta}$ ดังนั้น

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right] \quad (2.25)$$

2) ตัวนำที่ดี

ตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (good conductor) คือตัวกลางที่มีค่า $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$ ในสถานะเช่นนี้เราสามารถใส่สมการ (2.16) และสามารถตัด 1 ทิ้งไปเนื่องจากมีค่าน้อยมากเทียบกับ $\sigma/j\omega\epsilon$ ดังนั้น

$$\gamma \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}} = \sqrt{j}\sqrt{\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu\sigma}$$

หรือ

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (2.26)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\sqrt{j} = (e^{j\pi/2})^{1/2} = e^{j\pi/4} = (1+j)/\sqrt{2}$$

และ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นสมการ(2.26) แสดงให้เห็นว่า α และ β สำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีจะประมาณได้เท่ากัน และค่าทั้งสองก็ขึ้นกับ $\sqrt{f}$ และ $\sqrt{\sigma}$ ดังนี้

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.27)$$

ส่วนค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางชนิดนี้มีค่าเท่ากับ

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j)\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} = (1+j)\frac{\alpha}{\sigma} \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

ซึ่งมีเฟสเท่ากับ 45° ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กจะตามหลังความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ 45° และค่าความเร็วเฟสในตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (\text{m/s}) \quad (2.29)$$

ซึ่งมีค่าแปรผกผันตรงกับ $\sqrt{f}$ และ $\frac{1}{\sqrt{\sigma}}$ และความเร็วดังกล่าวมีค่าประมาณสองเท่าของความเร็วเสียงที่วิ่งในอากาศแต่มีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงมากๆ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{u_p}{f} = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu\sigma}} \quad (\text{m}) \quad (2.30)$$

2.6 การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก

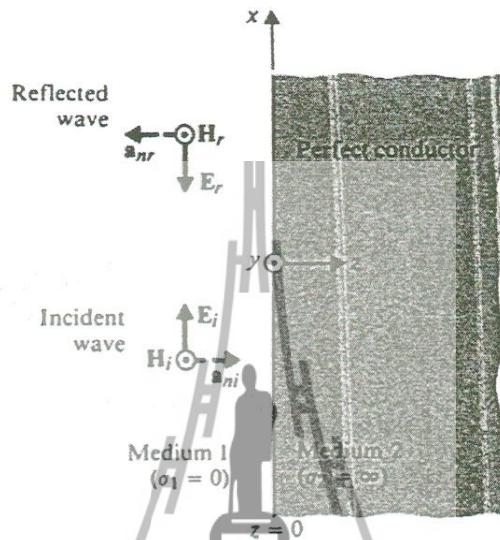
2.6.1 การตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก

จากรูปที่ 2.7 คลื่นที่กำลังจะเดินทางไปตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ในที่นี้จะเรียกว่า คลื่นตกกระทบ (incident wave, E_i และ H_i) เดินทางในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของสองตัวกลางดังกล่าวอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบในรูปแบบของเฟสเซอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_i(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.31)$$

$$H_i(z) = a_x \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.32)$$

เมื่อ E_{i0} คือขนาดของ E_i ที่ตำแหน่ง $z=0$ แต่ β_i และ η_i คือค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่งตามลำดับ ค่าเวกเตอร์ของพอยน์ติงของคลื่นตกกระทบดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $P_i(z) = E_i(z) \times H_i(z)$ และมีทิศทางไปทาง $\bar{a}_z$ ซึ่งเป็นทิศทางของการไหลของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้



รูปที่ 2.10 คลื่นระนาบตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก

ในตัวกลางที่สอง (ตัวนำสมบูรณ์) ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะไม่มีค่า หรือกล่าวคือ $\bar{E}_2 = 0$, $\bar{H}_2 = 0$ จึงทำให้ไม่มีคลื่นถูกส่งผ่านข้ามรอยต่อไปยังตัวกลางที่สอง เพราะฉะนั้นคลื่นจะสะท้อนกลับหมดในตัวกลางที่หนึ่ง ทำให้ได้คลื่นสะท้อน (reflected wave) ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วย $\bar{E}_r$, $\bar{H}_r$ และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสะท้อนในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_r(z) = \bar{a}_x E_{r0} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.33)$$

เมื่อเครื่องหมายบวกที่ปรากฏอยู่บนฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลนั้นเกิดเนื่องจากคลื่นสะท้อนเดินทางในทิศทาง $-z$ ดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่หนึ่งได้จากการรวมกันของ E_i และ E_r ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \bar{E}_i(z) + \bar{E}_r(z) = \bar{a}_x (E_{i0} e^{-j\beta_1 z} + E_{i0} e^{+j\beta_1 z}) \quad (2.34)$$

จากความต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขขอบเขตในองค์ประกอบสัมผัส (tangential component) ของความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ $z = 0$ ทำให้ได้ว่า

$$\bar{E}_1(0) = \bar{a}_x (E_{i0} + E_{r0}) = E_2(0) = 0$$

ดังนั้น $E_{r0} = -E_{i0}$ ซึ่งทำให้สมการ (2.34) กลายเป็น

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + e^{+j\beta_1 z}) = -\bar{a}_x j 2 E_{i0} \sin \beta_1 z \quad (2.35)$$

ซึ่งสามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็กสะท้อนได้จาก E_r ดังนี้

$$\bar{H}_r(z) = \frac{1}{\eta_1} \bar{a}_{nr} \times E_r(z) = \frac{1}{\eta_1} (-\bar{a}_z) \times E_r(z) = -\bar{a}_y \frac{1}{\eta_1} E_{r0} e^{+j\beta_1 z} = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{+j\beta_1 z}$$

เมื่อรวม $\bar{H}_r(z)$ เข้ากับ $\bar{H}_i(z)$ จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมในตัวกลางที่หนึ่งดังนี้

$$\bar{H}_1(z) = \bar{H}_i(z) + \bar{H}_r(z) = \bar{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \quad (2.36)$$

จากสูตรกำลังเฉลี่ยที่ว่า $P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*)$ เมื่อพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากสมการ (2.35) และ (2.36) จะเห็นได้ว่ากำลังเฉลี่ยในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถหาค่าส่วนจริงตามสมการได้เพื่อดูพฤติกรรมของคลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งเทียบกับตำแหน่งและเวลา เราจำเป็นต้องเปลี่ยนความเข้มของสนามทั้งสองให้อยู่ในรูป ณ ขณะหนึ่ง ดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \text{Re}[E_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_x 2 E_{i0} \sin \beta_1 z \sin \omega t \quad (2.37)$$

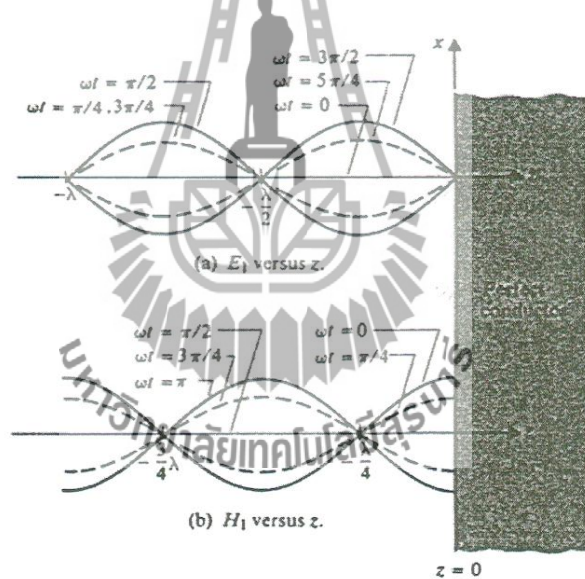
$$\bar{H}_1(z) = \text{Re}[H_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \cos \omega t \quad (2.38)$$

ทั้ง $\bar{E}_1(z,t)$ และ $\bar{H}_1(z,t)$ มีค่าเป็นศูนย์และสูงสุดที่ตำแหน่งคงที่นับจากรอยต่อไม่ว่าเวลาจะเปลี่ยนไปเท่าใดตาม ซึ่งสามารถหาดำแหน่งได้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{Zeros of } \bar{E}_1(z,t) \\ \text{Maxima of } \bar{H}_1(z,t) \end{array} \right\} \text{ Occur at } \beta_1 z = -n\pi, z = -n\frac{\lambda}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maxima of } \bar{E}_1(z,t) \\ \text{Zeros of } \bar{H}_1(z,t) \end{array} \right\} \text{ Occur at } \beta_1 z = -(2n+1)\frac{\pi}{2}, z = -(2n+1)\frac{\lambda}{4}, n = 0, 1, 2, \dots$$

คลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งจะไม่ใช่คลื่นจร (traveling wave) อีกต่อไป แต่มันคือคลื่นนิ่ง (หรือคลื่นยืน) ที่มักจะเรียกกันว่า standing wave เป็นผลลัพธ์ของการรวมกันของคลื่นสองคลื่นที่เดินทางสวนทางกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.11 คลื่นนิ่งของ $\bar{E}_1 = \bar{a}_x E_1$ และ $\bar{H}_1 = \bar{a}_y H_1$

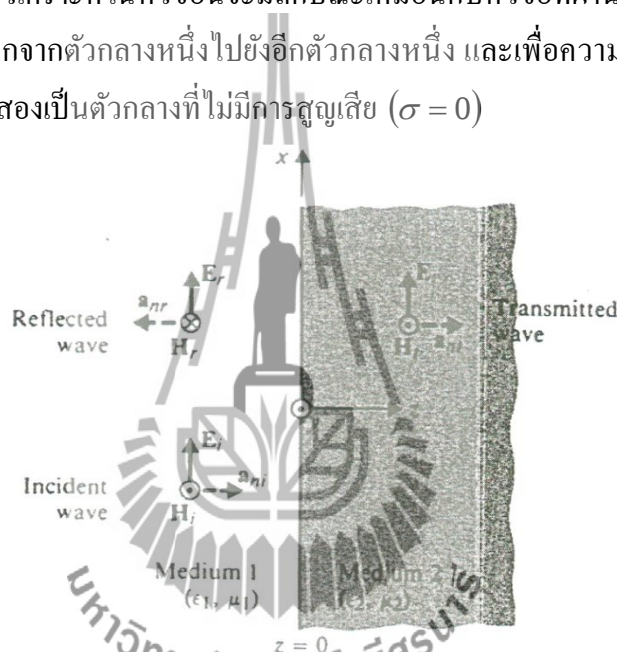
จากรูปที่ 2.6 แบ่งข้อสังเกตออกเป็น 3 ข้อดังนี้

- $\bar{E}_1$ มีค่าเป็นศูนย์ที่รอยต่อที่เป็นตัวกลาง ($E_{i0} = -E_{i0}$) และจะมีค่าเป็นศูนย์เช่นกันที่ตำแหน่งเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$ นับจากรอยต่อของตัวกลาง
- $\bar{H}_1$ จะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อตัวกลาง ($H_{r0} = H_{i0} = E_{i0}/\eta_1$)
- คลื่นนิ่งของ $\bar{E}_1$ และ $\bar{H}_1$ มีเฟสต่างกันอยู่ 90° และตำแหน่งต่างกันอยู่ $\frac{\lambda}{4}$

2.6.2 การตกกระทบไดอิเล็กตริกแบบตั้งฉาก

ในหัวข้อนี้จะเปลี่ยนตัวกลางที่สองจากที่เคยเป็นตัวนำสมบูรณ์มาเป็นไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบเข้ากับตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก ที่มีค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นกำเนิดขึ้นมา ส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับในขณะที่ส่วนที่เหลือจะส่งผ่านไปยังตัวกลางไดอิเล็กตริกที่สอง จะมองเหตุการณ์นี้ได้ว่าเป็นการไม่สมดุลของอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ผ่านมาคือ สมมติให้คลื่นตกกระทบแบบตั้งฉากจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สมมติให้ตัวกลางทั้งสองเป็นตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ($\sigma = 0$)



รูปที่ 2.12 คลื่นระนาบตกกระทบ ไดอิเล็กตริกแบบตั้งฉาก

จะเริ่มการวิเคราะห์จากรูปที่ 2.7 ที่มีคลื่นตกกระทบเดินทางไปในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของตัวกลางอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนในรูปของเฟสเซอร์ได้ ดังนี้

$$E_i(z) = \bar{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.39)$$

$$H_i(z) = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.40)$$

เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางเกิดที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

ก) คลื่นสะท้อน

$$E_r(z) = a_x E_{r0} e^{j\beta_1 z} \quad (2.41)$$

$$H_r(z) = (-a_y) \times \frac{1}{\eta_1} E_r(z) = -a_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \quad (2.42)$$

ข) คลื่นส่งผ่าน (ไปยังตัวกลางที่ 2)

$$E_t(z) = a_x E_{t0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.43)$$

$$H_t(z) = a_z \times \frac{1}{\eta_1} E_r(z) = a_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.44)$$

เมื่อ E_{t0} คือขนาดของ $\bar{E}_t$ ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ส่วน β และ η คือ ค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 2 ตามลำดับจากสมการข้างต้นค่าที่ยังไม่รู้และต้องหาต่อไปก็คือ E_{t0} และ E_{r0} ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งที่รอยต่อ $z = 0$ องค์ประกอบในแนวสัมผัส (องค์ประกอบในแกน x) ของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง ดังนั้น

$$\bar{E}_i(0) + \bar{E}_r(0) = \bar{E}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad E_{i0} + E_{r0} + E_{t0} \quad (2.45)$$

และ

$$\bar{H}_i(0) + \bar{H}_r(0) = \bar{H}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{\eta_2} (E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \quad (2.46)$$

แก้สมการ (2.45) และ (2.46) จะได้

$$\bar{E}_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.47)$$

$$\bar{E}_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.48)$$

อัตราส่วนของ E_{r0}/E_{i0} และ E_{t0}/E_{i0} ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ตามลำดับซึ่งใช้สัญลักษณ์ และมีความสัมพันธ์กับอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.49)$$

$$\text{และ} \quad \tau = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.50)$$

จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในสมการ (2.49) มีค่าเป็นไปได้ทั้งค่าลบและค่าบวก ขึ้นอยู่กับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในสมการ (2.50) นั้นมีค่าเป็นบวกเท่านั้นนิยามของ Γ และ τ ในสมการ (2.49) และ (2.50) เป็นจริงในทุกๆ ตัวกลาง ซึ่งในตัวกลางชนิดกระจายตามความถี่ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นดังนี้

$$1 + \Gamma = \tau \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.51)$$

ถ้าตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำสมบูรณ์แล้ว $\eta_2 = 0$ และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.49) และ (2.50) จะได้ว่า $\Gamma = -1$ และ $\tau = 0$ ซึ่งทำให้ $E_{r0} = E_{i0}$ และ $E_{t0} = 0$ ที่ตีความได้ว่าคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับหมดและเกิดคลื่นนิ่งขึ้นที่ด้านตัวกลางที่ 1 ถ้าตัวกลางที่ 2 ไม่ใช่ตัวนำสมบูรณ์ คลื่นตกกระทบบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 ซึ่งทำให้ค่าสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่ 1 มีสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_i(z) + E_r(z) = a_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}) \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(e^{j\beta_1 z} - e^{-j\beta_1 z})] \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \end{aligned}$$

หรือจากสมการ (2.51) จะได้ว่า

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} [\mathcal{E}^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \quad (2.52)$$

จากสมการ (54) $\bar{E}_1(z)$ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ คลื่นจร (traveling wave) ที่มีขนาดเท่ากับ $\mathcal{E}E_{i0}$ และคลื่นนิ่งที่มีขนาดเท่ากับ $2\Gamma E_{i0}$ เนื่องจากการมีอยู่ของคลื่นจร ค่าของ $\bar{E}_1(z)$ จึงไม่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเหมือนกับพฤติกรรมของคลื่นนิ่งทั่วๆ ไปที่ได้ศึกษามา

ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ $|\bar{E}_1(z)|$ หาได้ดังนี้

$$E_1(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma e^{j2\beta_1 z}) \quad (2.53)$$

อัตราส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดสำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio, SWR) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย S

$$S = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.54)$$

หรือเขียนอีกรูปหนึ่งได้

$$|\Gamma| = \frac{S-1}{S+1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.55)$$

ในขณะที่ค่า Γ มีค่าได้ตั้งแต่ -1 ไปถึง +1 ค่าของ S จะมีค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง ∞

2.7 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surfaces:FSS)

Frequency Selective Surfaces(FSS) เป็นการรวมตัวกันของพื้นผิวด้านนอกเพื่อส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในคลื่นความถี่ต่าง ๆ FSS มีส่วนประกอบสามชั้น คือ โลหะสองชั้นกั้นด้วยวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน แถวลำดับของอะเพอร์เจอร์ (apertures) จะเกิดขึ้นในสองชั้นนอกซึ่งเป็นสื่อของกระแสไฟฟ้าส่วนชั้นภายในประกอบด้วยสื่อกระแสไฟฟ้าอะเพอร์เจอร์ (apertures) และทำการปรับปรุงการวางแนวในแบบต่าง ๆ และอาจมีการปรับปรุงรูปร่างของไดโพล, วงกลม, สี่เหลี่ยม และ tripoles ในการสร้างรูปทรงที่ต้องการให้ได้รูปทรงของอะเพอร์เจอร์ (apertures) และปรับปรุงรูปทรงให้สอดคล้องกันกับทางเรขาคณิต

Dual-band FSS ของอะเพอร์เจอร์ (apertures) มีการปรับปรุงขนาดต่างๆของช่องทางที่สามารถส่งคลื่นที่มีความถี่ที่แตกต่างกันได้สองความถี่ FSS สำหรับส่งความถี่จะต้องทำให้เกิดพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจะประกอบไปด้วยสล็อตในแผ่นเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าโดยเว้นระยะชิดกันและคั่นด้วยฉนวน ช่วงที่มีการปรับให้ความถี่มีการทำงานเป็นตัวกรองความถี่สูงผ่าน และสารภายในวัสดุฉนวน ปรับไปที่ความถี่ที่ต่างจากความถี่เดิมและทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน พลังงานที่ได้รับไปหนึ่งช่วงจะเปลี่ยนเป็นช่วงอื่นๆ ด้วยวัสดุฉนวน

2.7.1 องค์ประกอบของ FSS สำหรับกรองความถี่ต่าง ๆ

- พื้นผิวชั้นแรกจะทำหน้าที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้ารวมทั้งการกำหนดขนาดและรูปร่างที่ปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้รับพลังงานที่ความถี่ต่าง ๆ และทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่
- ชั้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน
- การปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของผิวโลหะ ทำให้คลื่นความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง
- พื้นผิวชั้นที่สองมีการกำหนดขนาดและรูปร่างเพื่อเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่มีคลื่นความถี่ที่สอง ให้ความถี่เปลี่ยนไป ความถี่ที่สองเกิดจากการจัดชิดและห่างกันจากแพทช์กับชั้นฉนวนที่สองเพื่อให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความถี่ที่จะส่งผ่านพื้นผิวจากความถี่แรกที่แพทช์ไปยังความถี่ที่สอง
- มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิต

จากองค์ประกอบของ FSS สำหรับส่งและกรองสองความถี่ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยโครงสร้างหลายชั้น คือ พื้นผิวด้านนอกมีหน้าที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าและรอบ ๆ พื้นผิวของแพทช์ กลางพื้นผิวที่มีการแยกจากแพทช์และแยกจากกันด้วยวัสดุฉนวนของแข็ง มีลักษณะคล้ายกับช่องว่าง (apertures) เป็นตัวกรองความถี่สูงผ่านชิดกันกับอีกพื้นผิวหนึ่ง แต่ละพื้นผิวมีการรวมกันทั้งความถี่แรกของการกำหนดขนาดและรูปร่างปรับเปลี่ยนให้ใช้ได้กับความถี่แรกและความถี่ที่สองของขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน เป็นความถี่สองพื้นผิวมีหน้าที่ในการกรองความถี่ต่ำผ่านและรวมถึงองค์ประกอบที่ปรับเปลี่ยนก่อนการเปลี่ยนแปลงของความถี่แรกและแพทช์ที่สองเป็นการกรองเพื่อไม่ให้ความถี่ที่สองมีการผ่านไป

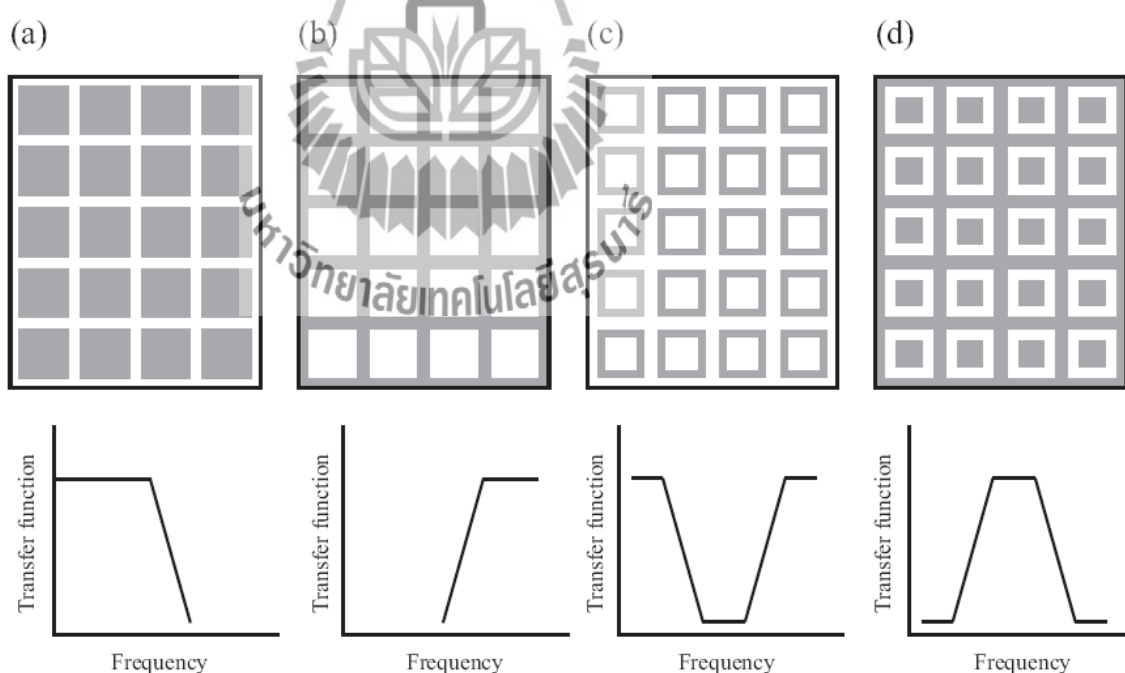
Frequency Selective Surface (FSS) มีการใช้อย่างกว้างขวางในการกรองความถี่ของคลื่นที่มีขนาดเป็นมิลลิเมตรและไมโครเมตร โดยปรับขนาดคุณลักษณะของแถวลำดับของโลหะที่สร้างขึ้นจะได้ FSS ตามความถี่ที่ต้องการ โครงสร้างเหล่านี้ยังสามารถออกแบบเพื่อใช้ที่ความถี่สูงความถี่ใกล้อินฟราเรด (IR) และความถี่ที่มองไม่เห็น แต่ FSS โลหะสามารถเกิดความสูญเสียในการดูดซับคลื่น

แบบสองความถี่ และกลับมีแบนด์วิธที่แคบมากและน้อยกว่า -20 dB ในแถบหยุด ซึ่งตรงกันข้ามกับแบบที่เป็นตาข่าย (gratings)

การสร้าง FSS ในปัจจุบันมีองค์ประกอบของ FSS ที่มีคุณสมบัติเฉพาะเป็นองค์ประกอบของ FSS คือ มีความสามารถทำเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และมีน้ำหนักเบาสามารถสร้างและขึ้นรูปได้ง่าย สามารถหาซื้อแผงวงจรมีอยู่ในปัจจุบันและเทคนิคเทคโนโลยี radome ในราคาค่าต่ำนอกจากองค์ประกอบเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นเพื่อใช้กับพื้นผิวที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและพื้นผิวที่มีความเรียบได้

FSS สามารถแบ่งออกตามการตอบสนองความถี่เป็นสี่ประเภท ดังนี้

1. ความถี่ต่ำผ่าน (low pass)
2. ความถี่สูงผ่าน (high pass)
3. แถบความถี่ผ่าน (band pass)
4. แถบความถี่หยุดผ่าน (band stop)

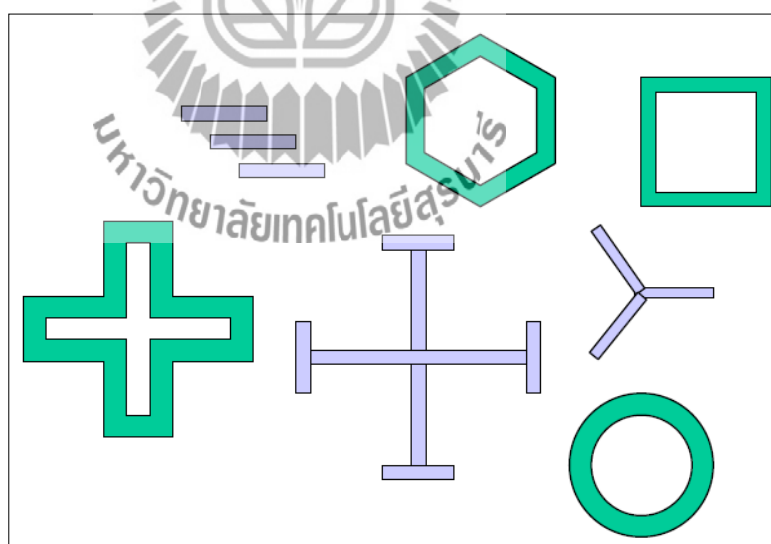


รูปที่ 2.13 ชนิดของการตอบสนองความถี่แบบต่างๆและผลของการตอบสนองแต่ละชนิดโดยพื้นสี่เหลี่ยมหมายถึงพื้นผิวของโลหะ (ที่มา : Gustafsson, Mats; Karlsson, Anders; Pontes Rebelo, António Pedro; Widenberg, Björn)

- a) แถวลำดับของชั้นโลหะและฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบความถี่ต่ำผ่าน
- b) ช่องว่างบนตัวกลางที่นำไฟฟ้า และฟังก์ชันการถ่ายโอนของการตอบสนองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน ในอุดมคติ
- c) องค์ประกอบของวงโลหะที่ทำให้เกิดลักษณะของการเรโซแนนซ์ของคลื่นและฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบแถบความถี่หยุดผ่าน
- d) องค์ประกอบของวงช่องว่างที่ทำให้เกิดลักษณะของการเรโซแนนซ์ของคลื่นฟังก์ชันการถ่ายโอนผลการตอบสนองของการส่งผ่านแบบแถบความถี่ผ่าน

2.7.2 คุณสมบัติของFSS มีดังนี้

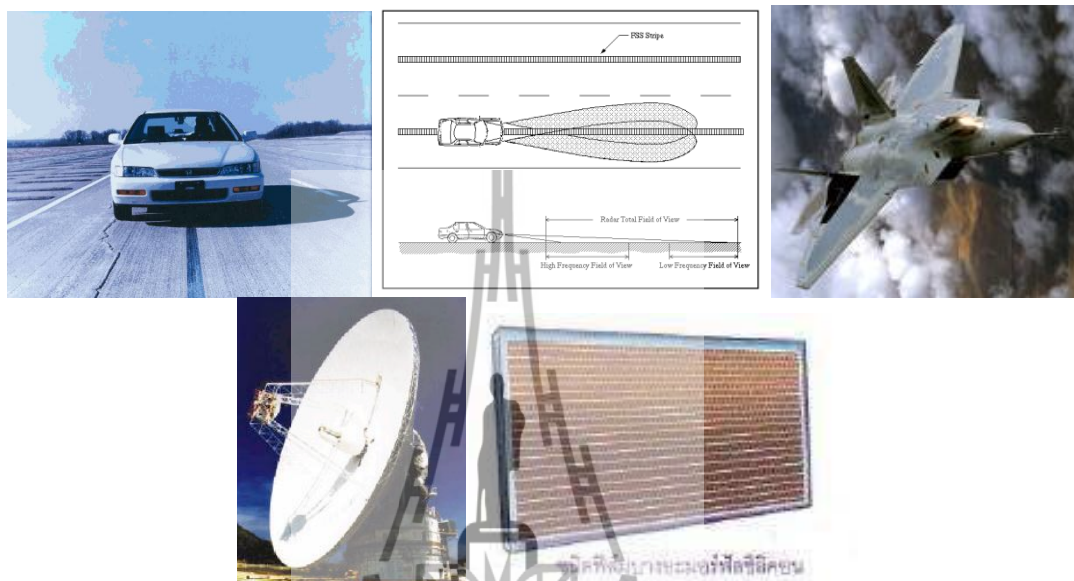
- สามารถออกแบบให้เป็นตัวกรองความถี่ใด ๆ ได้
- ใช้กับความถี่ narrow band
- มีรูปร่างลักษณะเป็นแบบสองมิติ
- สามารถออกแบบเป็นรูปร่างและขนาดต่างๆ ได้
- สามารถเลือกและออกแบบองค์ประกอบต่างๆ ได้



รูปที่ 2.14 ลักษณะและรูปร่างของ elements

2.7.3 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของFSS

- RFID tags
- ใช้บังคับการเดินทางของรถยนต์
- ใช้ในระบบป้องกันการลักลอบข้อมูล
- ใช้ในการออกแบบวัสดุเคลือบเพื่อลดการสะท้อนของแสงบนแผ่นแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS

2.7.4 ประเภทของFSS

➤ แบบผิวเรียบ (Planar FSS)

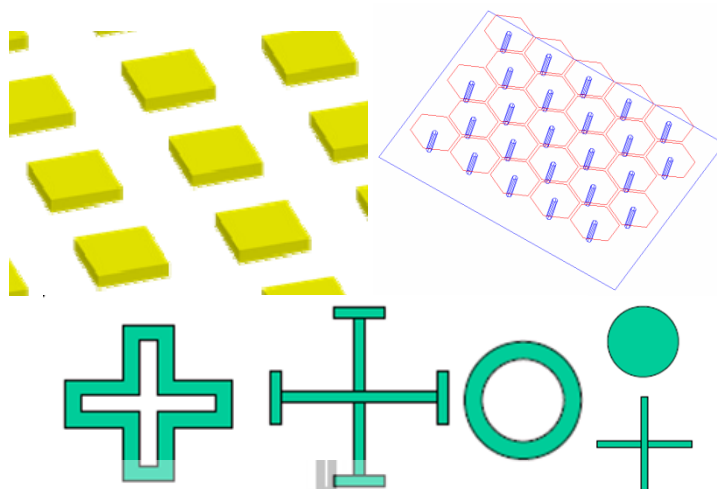
- สามารถทำวงจรลงใน substrates ได้
- สามารถทำเป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้

➤ แบบผิวไม่เรียบ (Non-Planar FSS)

- ทำให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้
- สามารถนำองค์ประกอบมารวมกันหลายๆ องค์ประกอบได้

➤ แบบวงจร

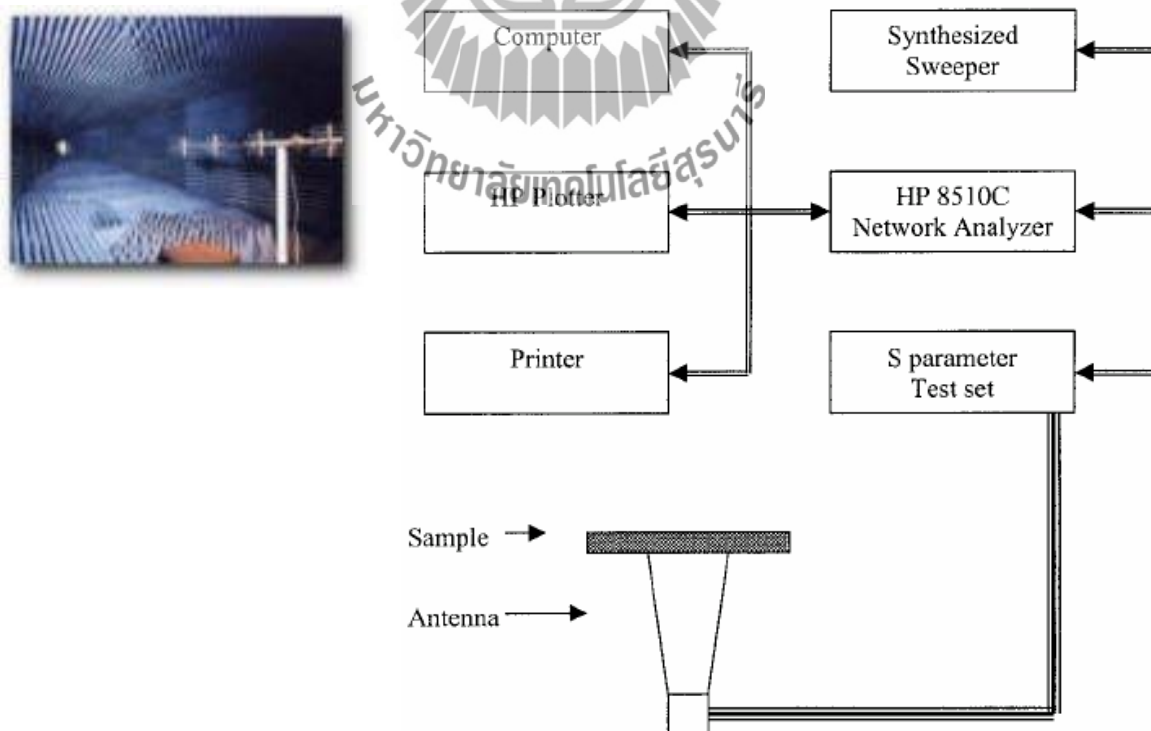
- สามารถทำเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านได้ (Band pass)
- วงจรไม่ให้ความถี่ผ่าน (Band Stop)



รูปที่ 2.16 ประเภทของ FSS

2.7.5 หลักการการวิเคราะห์และออกแบบ FSS ทำได้หลายวิธี ดังนี้

- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Periodic Moment Method (PMM)
- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Method-of-Moments (MOM)
- ออกแบบโดยปรับรูปร่างและองค์ประกอบ
- ออกแบบโดยการสร้างชิ้นงานแล้ววัดผล



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS

2.8 กล่าวสรุป

ในโครงการวัสดุเลือกดูดกลืนความถี่ย่าน 2.45 GHz จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ทฤษฎีสายอากาศ ทฤษฎีพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะใช้อ้างอิงกับชิ้นงานที่สร้างขึ้นว่ามีความสามารถในการใช้งานได้จริงมากน้อยเพียงใด และจากการศึกษาพื้นผิวเลือกความถี่ประเภทต่างๆ ได้เห็นว่าพื้นผิวเลือกความถี่ ประเภทแถบความถี่ผ่าน มีคุณสมบัติที่ตรงกับวัตถุประสงค์ของโครงการ



บทที่ 3

การออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz

โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบวัสดุเลือกดูดกลืนความถี่ ซึ่งงานที่จะนำมาใช้เป็น FR-4 ซึ่งทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาจำลองผลในโปรแกรม CST ดูแนวโน้มของการจำลองผลและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาคุณลักษณะสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบแผ่น FR-4 จากผลที่จำลองแบบได้ หลังจากนั้นจะนำโครงสร้างที่ได้จากการจำลองแบบ มาสร้างเป็นชิ้นงานจริง เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่

ในการออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นความถี่ เพื่อการใช้ในการดูดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz ในโครงงานนี้จะใช้ FR-4 ในการออกแบบ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อความชื้น และอุณหภูมิสูง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง คุณสมบัติของ FR-4 มีดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	ϵ_r	=	4.3
ความหนาของวัสดุตัวนำ	h	=	0.0347 มิลลิเมตร
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)	σ	=	5.8×10^7 s/m

3.3 วิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

1. ออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz

1.1) **แผ่นหลัง (First layer)** ทำหน้าที่สะท้อนคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ ในการออกแบบเบื้องต้น จะใช้สูตรในการคำนวณค่าต่างๆ ดังนี้

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} \quad (3.1)$$

$$l_1 = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}} = 24 \text{ mm} \quad (3.2)$$

จากนั้นหาค่า w_1 คือ ความกว้างของแถบโลหะบนแผ่น FR-4 คำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$b = \frac{377\pi}{2Z_C \sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{377\pi}{2(50)\sqrt{4.3}} \quad (3.3)$$

จะได้ $b = 5.7115$

และนำค่า b แทนลงในสมการ 2 เพื่อหา w_1

ค่า h คือ ความหนาของแผ่นทองแดงมีค่าเป็น

$$h = d = 0.035 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$w = \frac{2}{\pi} \left[b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right] \right] \times d \quad (3.4)$$

$$w = \frac{2}{\pi} \left[b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right] \right] \times 0.035 \times 10^{-3}$$

จะได้ $w_1 = 0.68 \text{ mm}$

1.2) แผ่นหน้า (Second layer) ทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz

ซึ่งความหนาของแถบทองแดงเท่ากับ $0.035 \times 10^{-3} \text{ m}$

ดังนั้นจะได้ $w_1 = w_2 = 0.68 \text{ mm}$

นำค่า $\varepsilon_r = 4.3$ และ $w_2 = 0.68 \text{ mm}$ แทนลงในสมการที่ 3.5 เพื่อหาค่า ε_{reff}

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

จะได้ $\epsilon_{\text{reff}} = 4.748$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 4 และ 5 แทนลงในสมการที่ 6

$$\frac{\Delta L}{h} = \frac{0.412(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)\left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)\left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (3.6)$$

จะได้ $\frac{\Delta L}{h} = 0.451$

นำค่า h คูณทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\Delta L = 0.371 \times 0.035 \times 10^{-3} \text{ m}$$

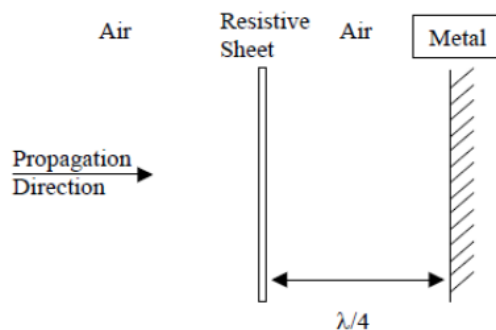
$$\Delta L = 0.158 \times 10^{-4} \text{ m}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 7 เพื่อหาค่า l_2

$$l_2 = \frac{3 \times 10^8}{2f_r(\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}})} - 2\Delta L \quad (3.7)$$

$$l_2 = 28 \text{ mm}$$

- 1.2) ระยะห่างระหว่าง แผ่นน้ำกับ แผ่นหลัง เพื่อให้คลื่นที่ส่งผ่านแผ่นน้ำ สะท้อนที่แผ่นหลัง แล้วหักล้างกัน ซึ่งจะต้องมีเฟสต่างกัน 180 องศา เท่ากับ $\lambda/2$

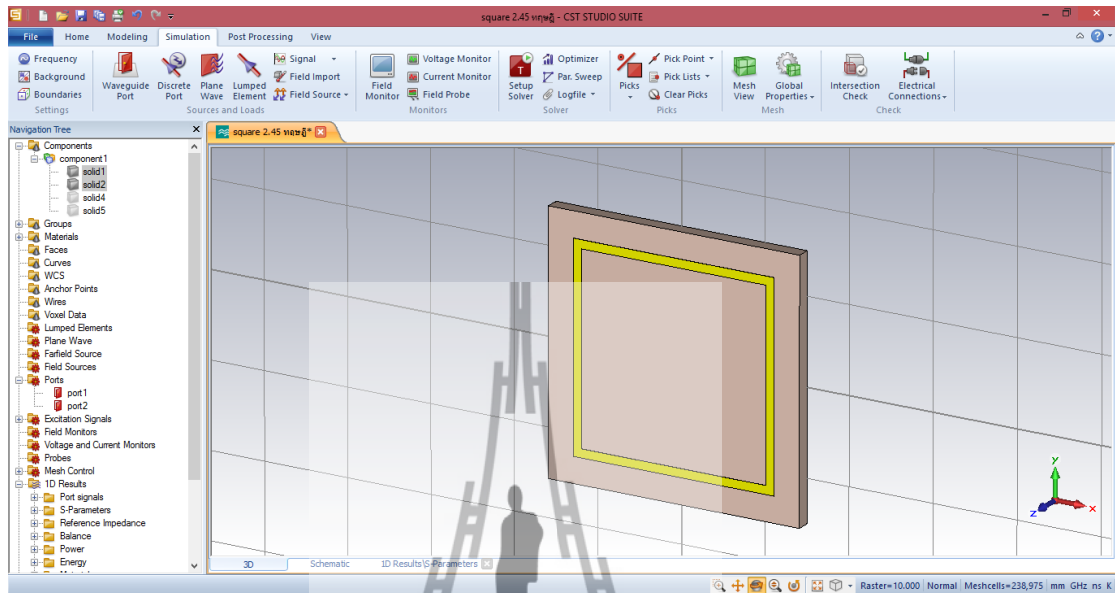


$$2R = \lambda/2 = \frac{c}{2f} = \frac{3 \times 10^8}{2(2.45 \times 10^9)} = 0.0612 \text{ m} \quad (3.8)$$

$$R = 0.0306 \text{ m}$$

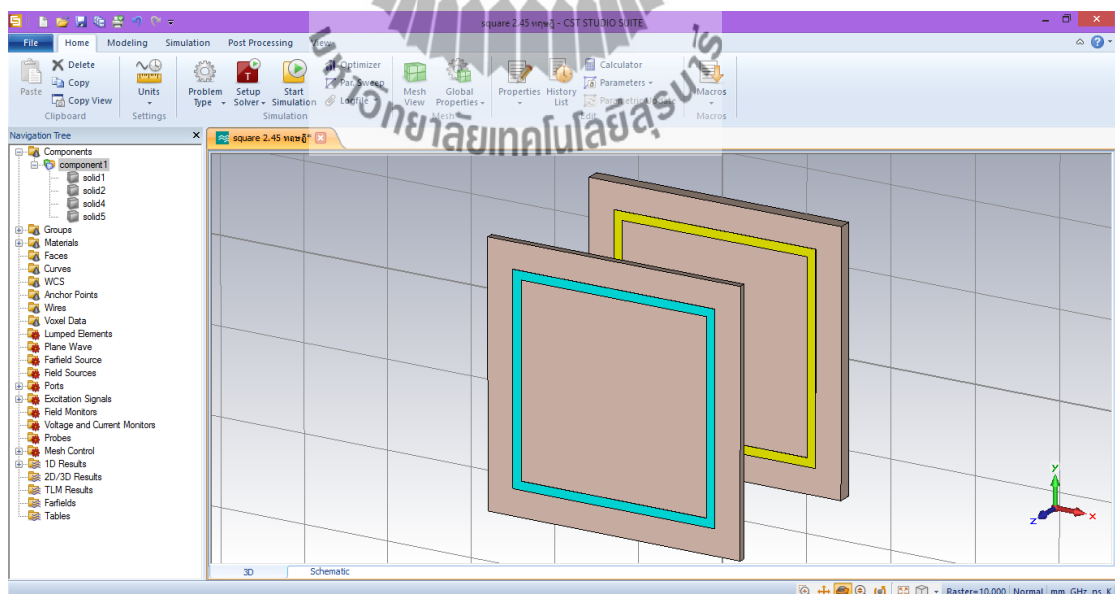
3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

1. การสร้าง First layer แบบ unit cell ตามค่าที่คำนวณได้มา



รูปที่ 3.1 การสร้าง First layer แบบ unit cell

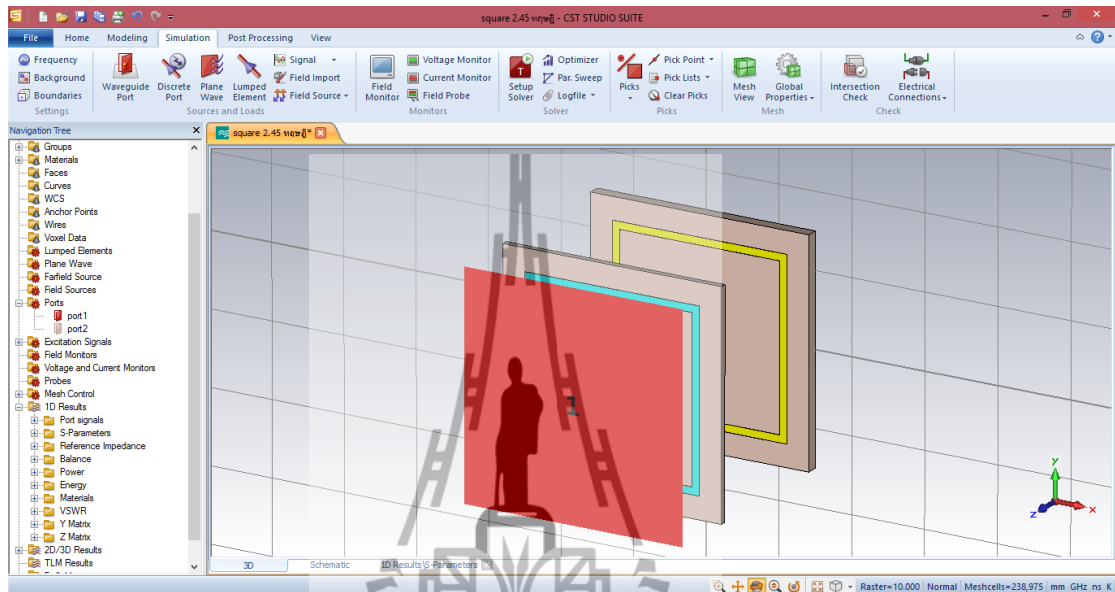
2. สร้าง Second layer แบบ Unit cell ตามค่าที่คำนวณได้มา



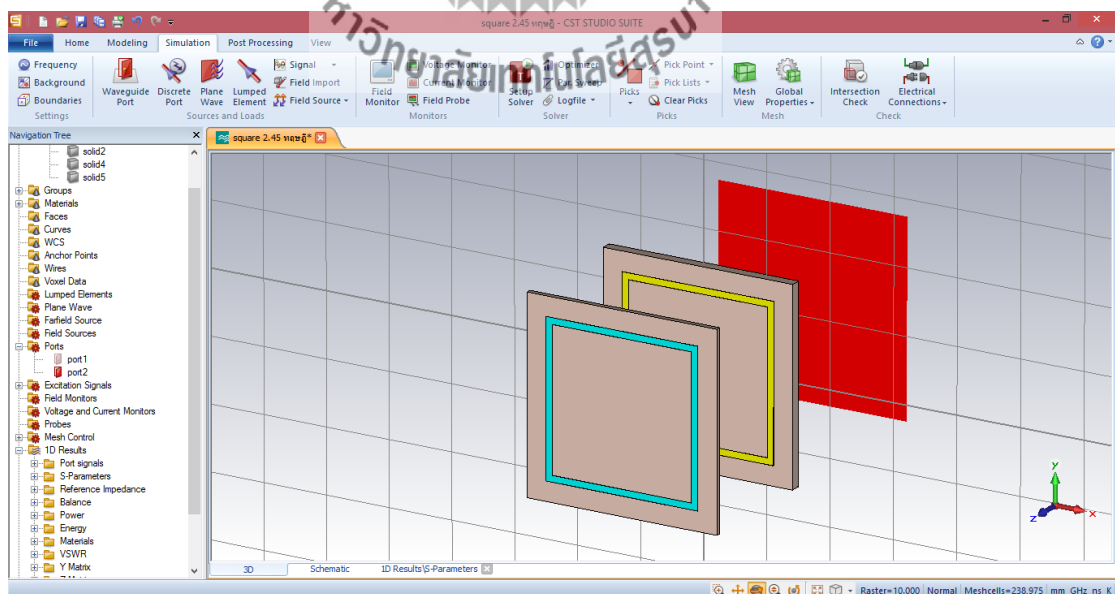
รูปที่ 3.2 การสร้าง Second layer แบบ unit cell

3. การจำลองแบบ Unit cell ใน Waveguide ports

ระยะของ port1 และ port2 โดยคำนวณหาจากสูตร λ แล้วนำมาตั้งค่าในโปรแกรม CST โดยได้ port ทั้งสองด้านห่างจาก First layer เป็นระยะ λ คือ ทั้งด้านหน้า และ ด้านหลัง หรือ port1 และ port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4



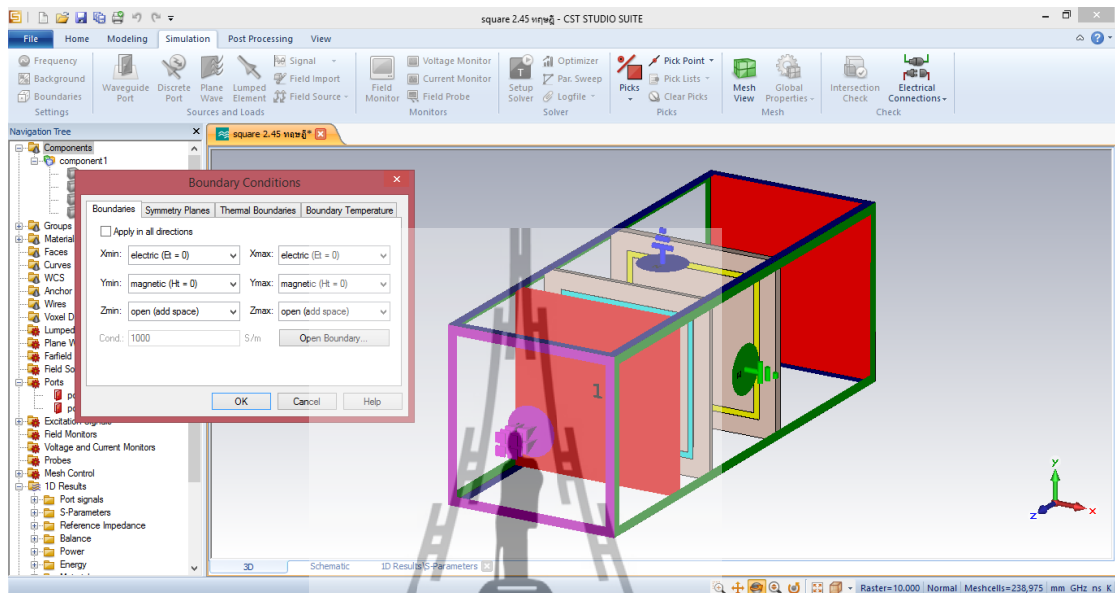
รูปที่ 3.3 การตั้งค่า Port 1



รูปที่ 3.4 การตั้งค่า Port 2

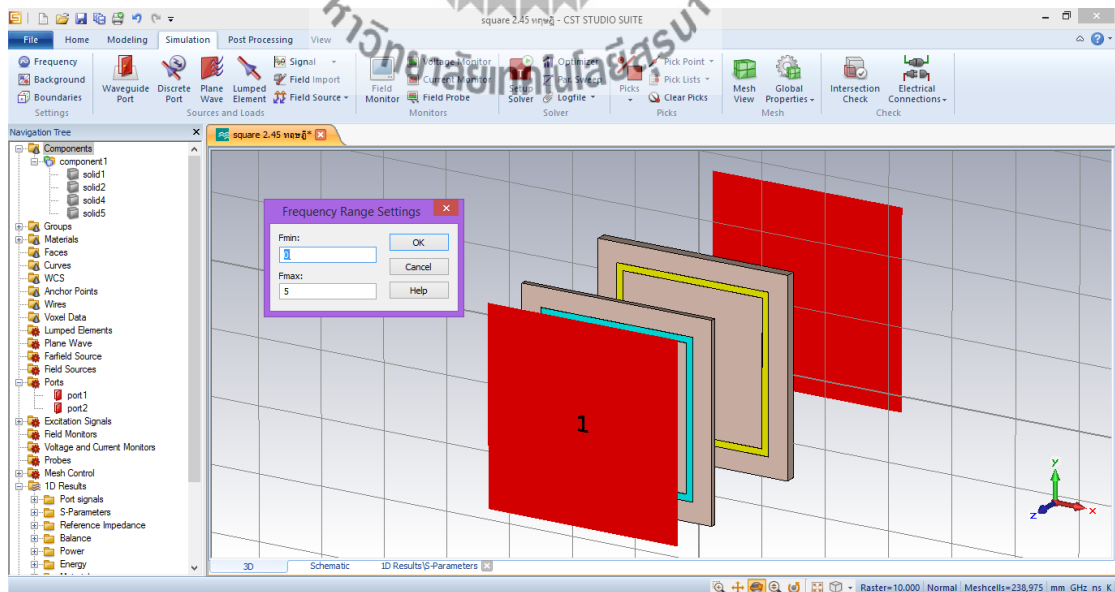
4. การตั้งค่า Boundary Condition

เริ่มจากการตั้งค่า $X_{\min}$ และ $X_{\max}$ ให้มีค่าเท่ากับ magnetic ($H_t = 0$) และ ค่า $Y_{\min}$ และ $Y_{\max}$ มีค่าเท่ากับ electric ($E_t = 0$) และ ค่า $Z_{\min}$ และ $Z_{\max}$ มีค่าเท่ากับ open (add space)



รูปที่ 3.5 การตั้งค่า Boundary Condition

5. การตั้งค่าความถี่ ที่ใช้ในการ Simulation

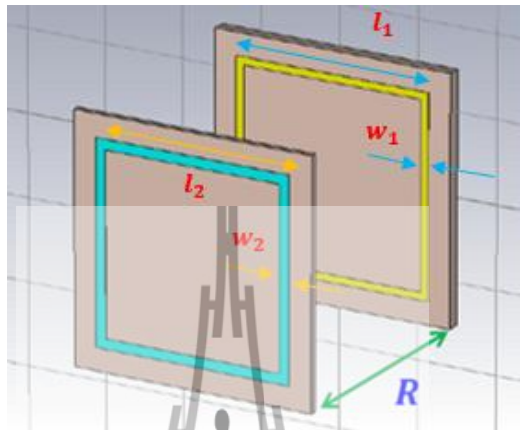


รูปที่ 3.6 การตั้งค่าความถี่ ที่ใช้ในการ Simulation

3.5 ผลการจำลองแบบ

1. ผลการจำลองแบบชิ้นงานโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการออกแบบ

ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พารามิเตอร์ของชิ้นงานต้นแบบ

จากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.7) คลื่นความถี่ 2.45 GHz

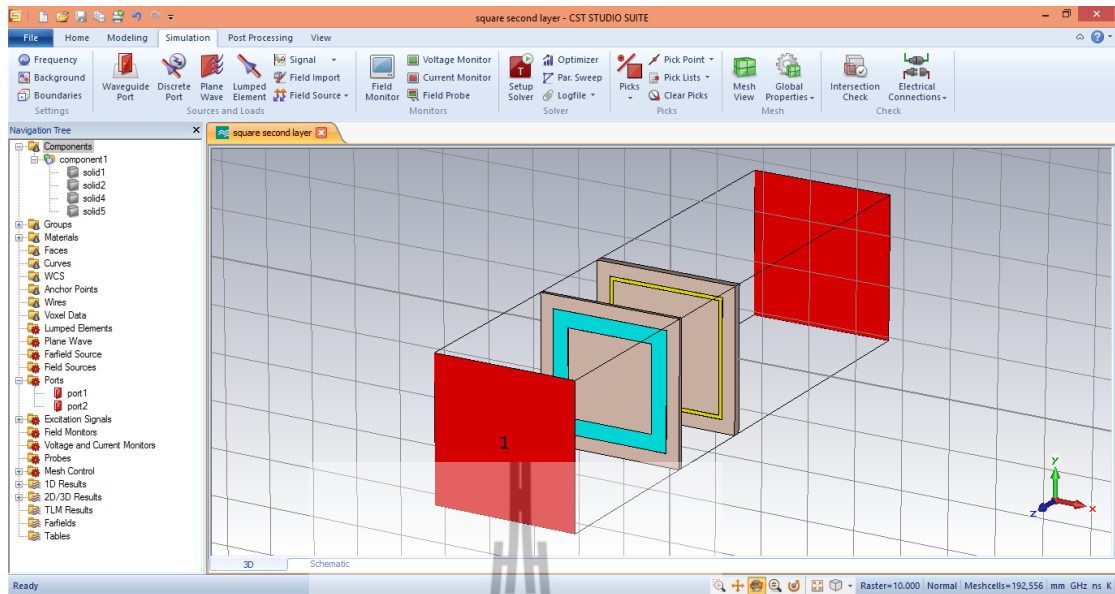
จะได้ค่า $l_1 = 24 \text{ mm}$

จะได้ค่า $l_2 = 28 \text{ mm}$

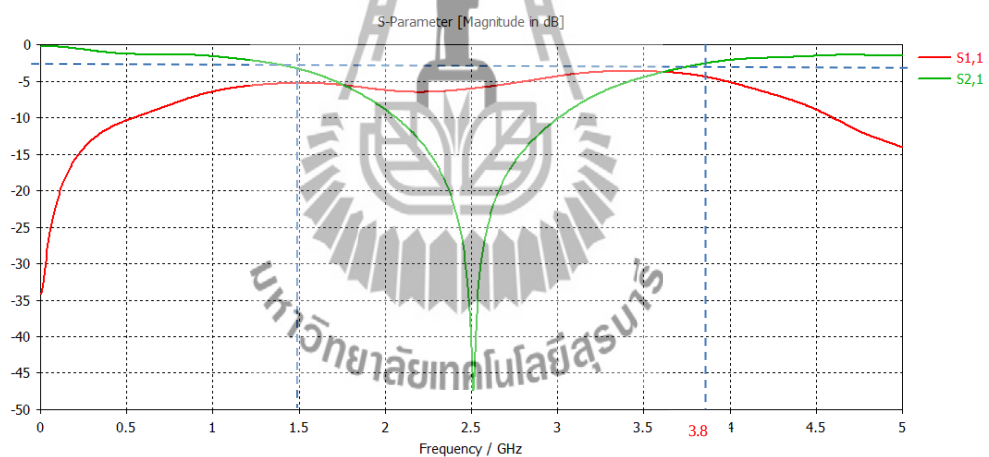
จากสมการที่ (3.4) คลื่นความถี่ 2.45 GHz

จะได้ w_1 มีความกว้างเท่ากับ 0.7 mm

w_2 มีความกว้างเท่ากับ 0.7 mm



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



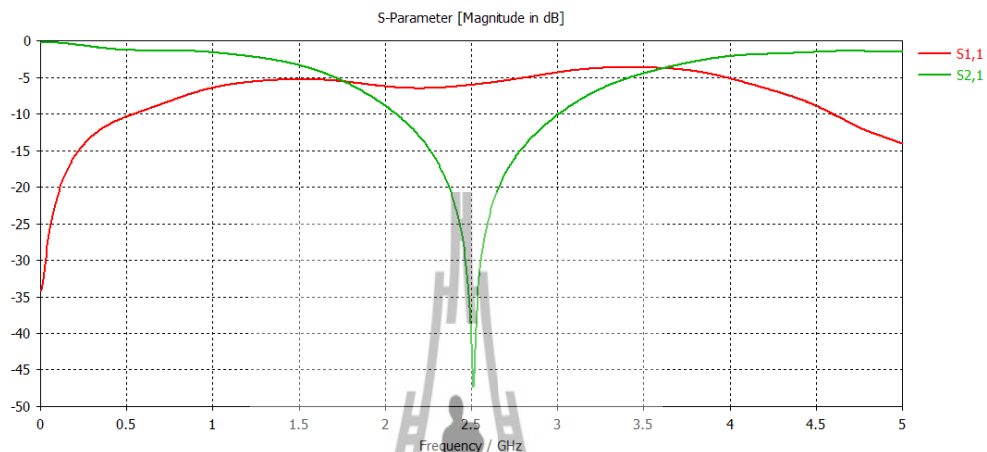
รูปที่ 3.9 ค่า S - Parameter จากการจำลองผลของชิ้นงาน

จากการจำลองผลจะได้ผลกราฟของ S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่ามาก ที่ความถี่ 2.45 GHz และ S_{21} ซึ่งจะดูที่ความถี่ตัดขาด (Cut off) -3 dB ได้ช่วงความถี่เท่ากับ 1.5 GHz และ 3.8 GHz ซึ่งความถี่ศูนย์กลาง (Center Frequency) คือ 2.65 GHz

เนื่องจากผลการจำลองแบบของชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณมีช่วงความถี่ที่ 2.45 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์บางค่าจนกระทั่งได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ ซึ่งมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

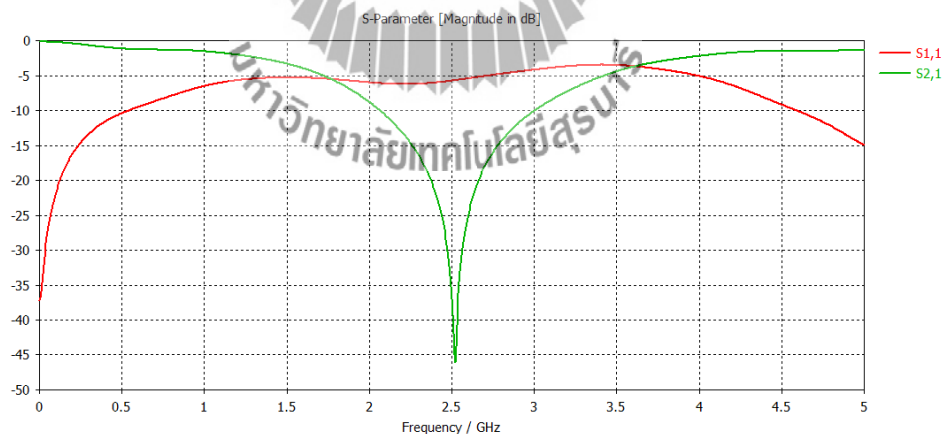
1) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ l_2

เนื่องจาก S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่ามากในช่วงความถี่ 2.4 GHz ไม่สามารถใช้งานได้ จึงได้มีการปรับค่า l_2 ก่อนโดยปรับค่า l_2 เป็น 26 mm, 24 mm และ 22 mm ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์อื่นมีค่าเท่าเดิม จะแสดงให้เห็นดังรูปต่อไปนี้



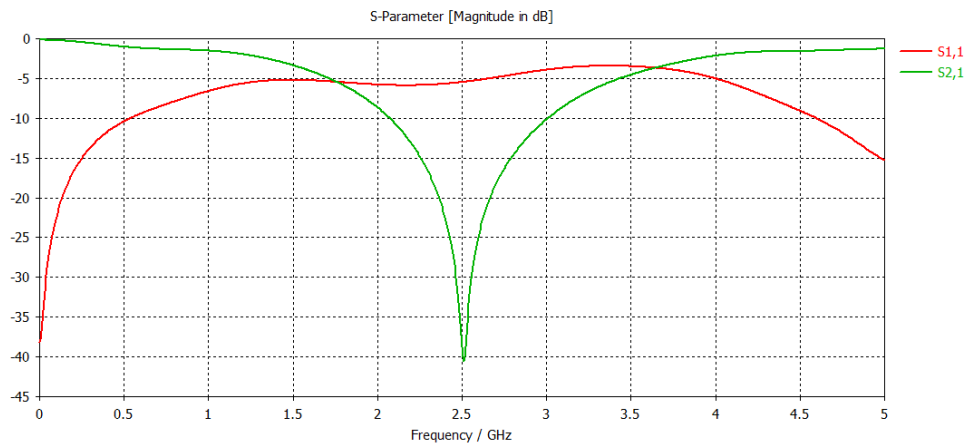
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 26$ mm

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมากในช่วงความถี่ 2.45 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ และยังไม่มีความถี่ที่ขึ้น



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 24$ mm

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมากในช่วงความถี่ 2.45 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ และยังไม่มีความถี่ที่ขึ้น



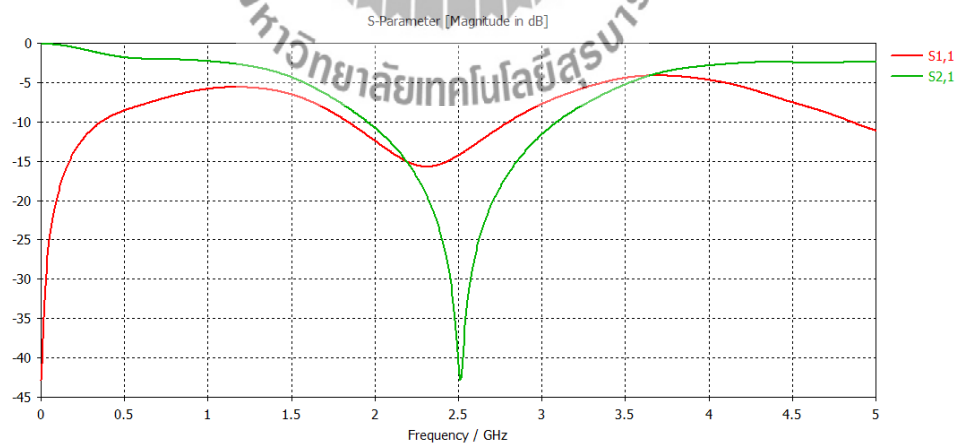
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $l_2 = 22$ mm

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมากในช่วงความถี่ 2.45 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ และยังไม่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น

จะสังเกตเห็นว่า เมื่อปรับขนาดความยาว l_2 ไม่ได้มีผลกับพารามิเตอร์ S_{11} ดังนั้นต้องเปลี่ยนขนาดความกว้าง w_2 แทน โดยให้ความยาว l_2 เท่ากับที่คำนวณได้ค่าเดิม

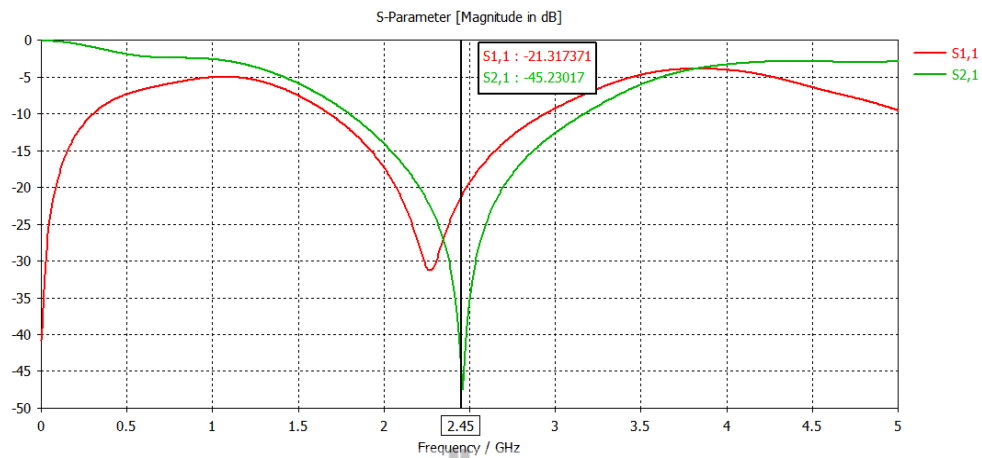
2) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ w_2

กำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงเดิม และทำการปรับพารามิเตอร์ w_2



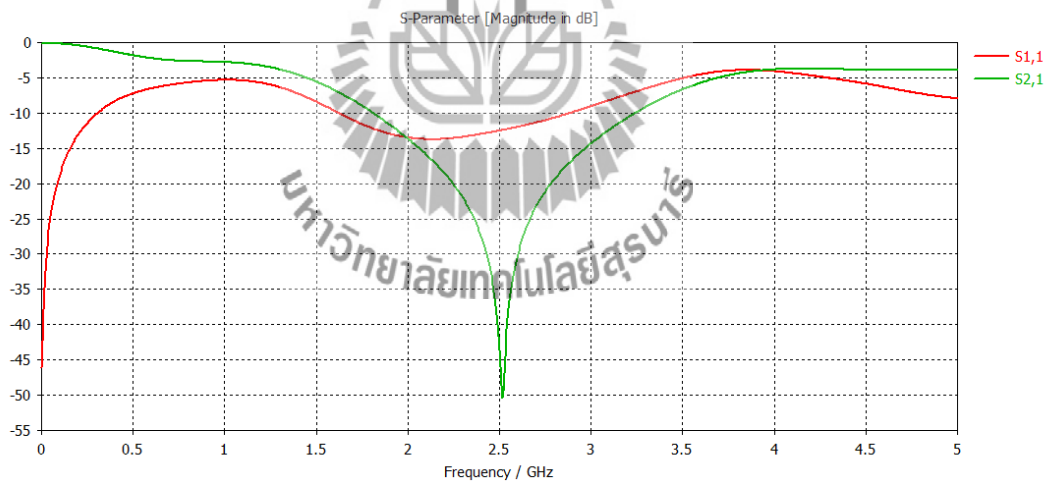
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 1.7$ mm

จากรูปที่ 3.13 จากกราฟจะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยลงที่ ความถี่ 2.3 GHz ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีขึ้น



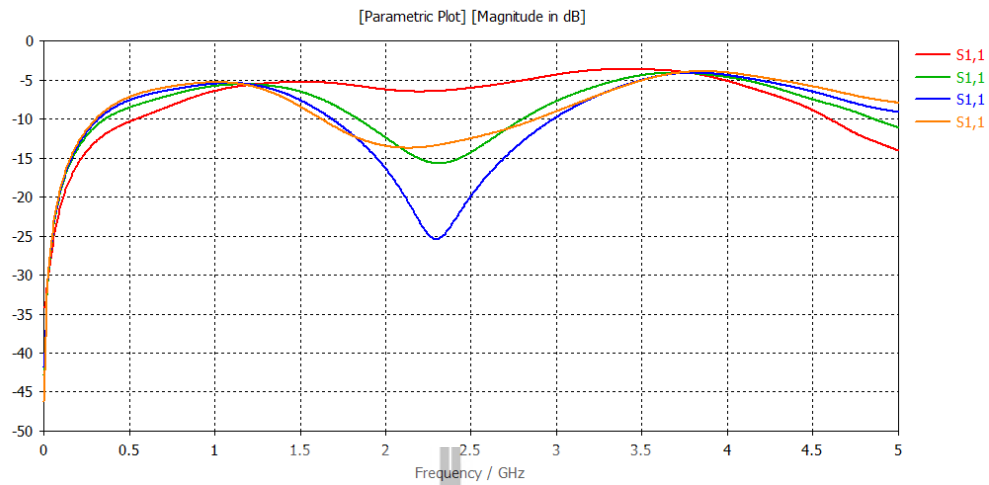
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 2.7$ mm

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าจากกราฟจะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยลงกว่าการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 1.7$ mm ที่ความถี่ 2.3 GHz ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีขึ้นมาก



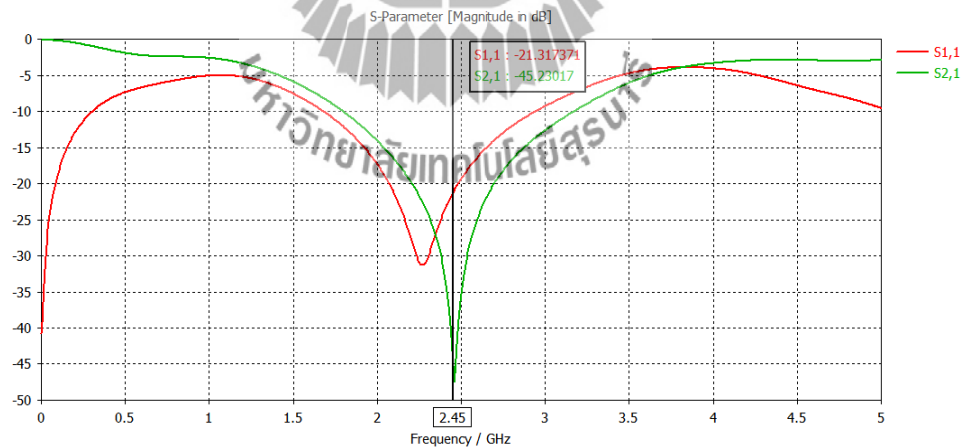
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 3.7$ mm

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าจากกราฟจะเห็นว่า S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่ามากกว่าการจำลองแบบโดยมีค่า $w_2 = 2.7$ mm ซึ่งถือว่าแนวโน้มที่แย่ลง



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ w_2

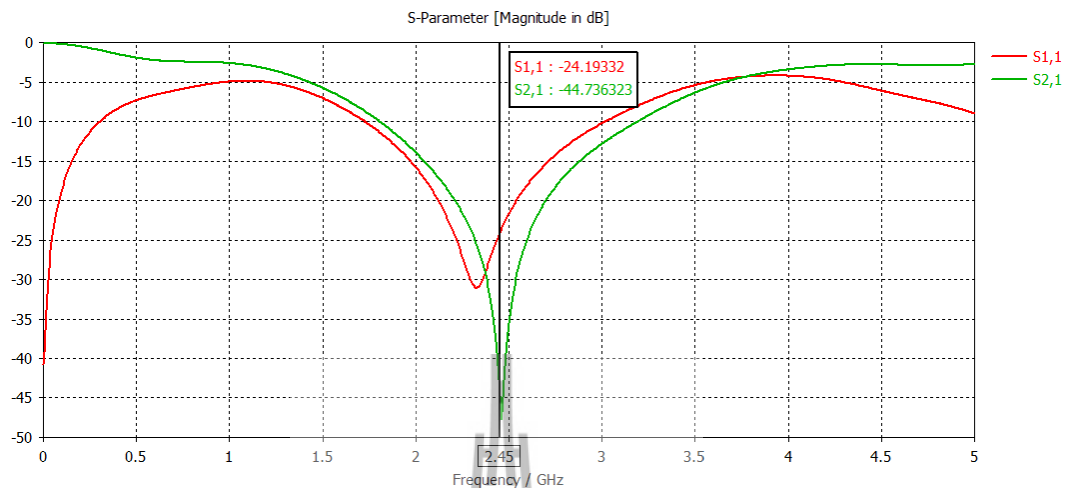
- $w_2 = 0.7 \text{ mm}$: S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากที่ย่านความถี่ 2.45 GHz
- $w_2 = 1.7 \text{ mm}$: S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดน้อยลงที่ย่านความถี่ 2.45 GHz
- $w_2 = 2.7 \text{ mm}$: S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยมากที่เข้าใกล้ย่านความถี่ 2.45 GHz
- $w_2 = 3.7 \text{ mm}$: S_{11} สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่ามากขึ้นที่ย่านความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.17 ปรับพารามิเตอร์ $w_2 = 2.7 \text{ mm}$

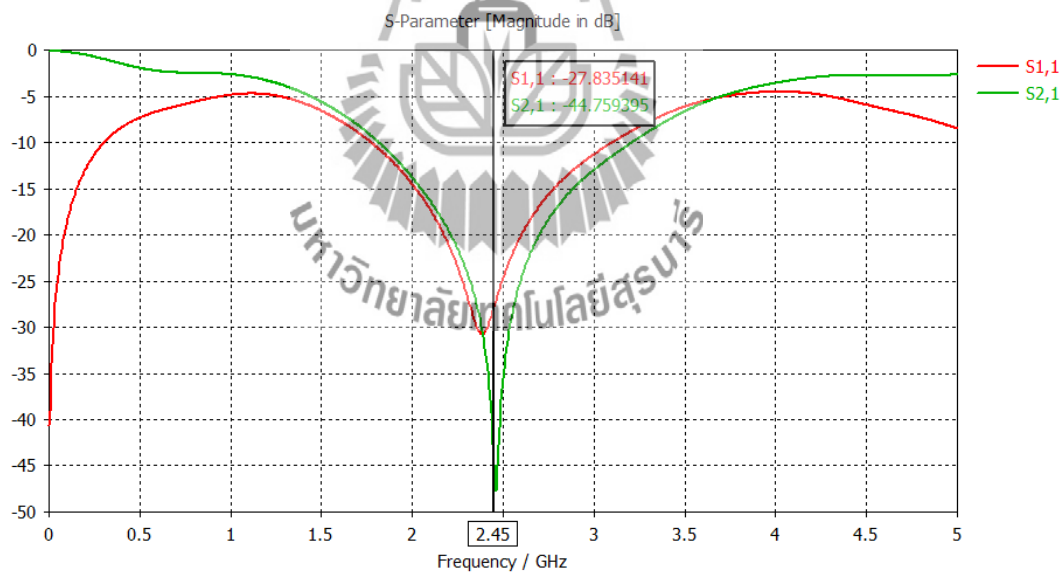
จากการปรับพารามิเตอร์ $w_2 = 2.7 \text{ mm}$ มีแนวโน้มที่ดีที่สุดแต่ยังไม่

3) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ R



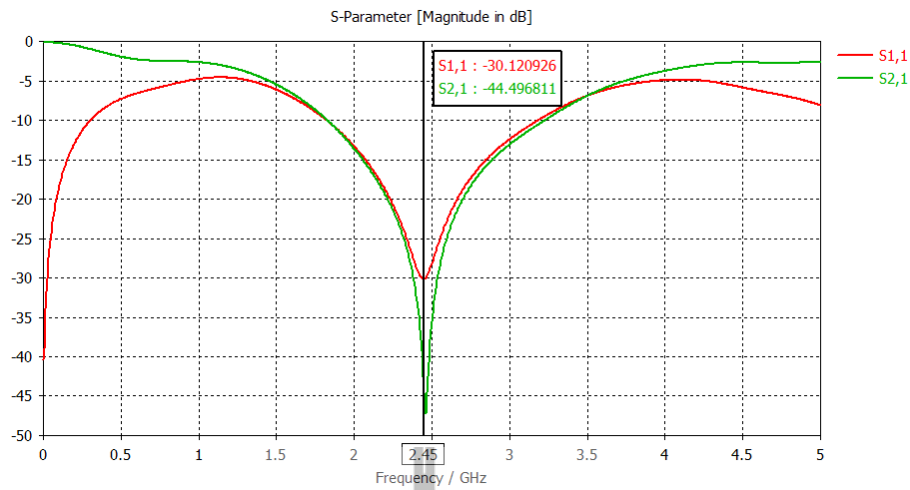
รูปที่ 3.18 ปรับพารามิเตอร์ $R = 29$ mm

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลง มีแนวโน้มที่ดี แต่ยังไม่ใช่ความถี่กึ่งกลางที่ต้องการ



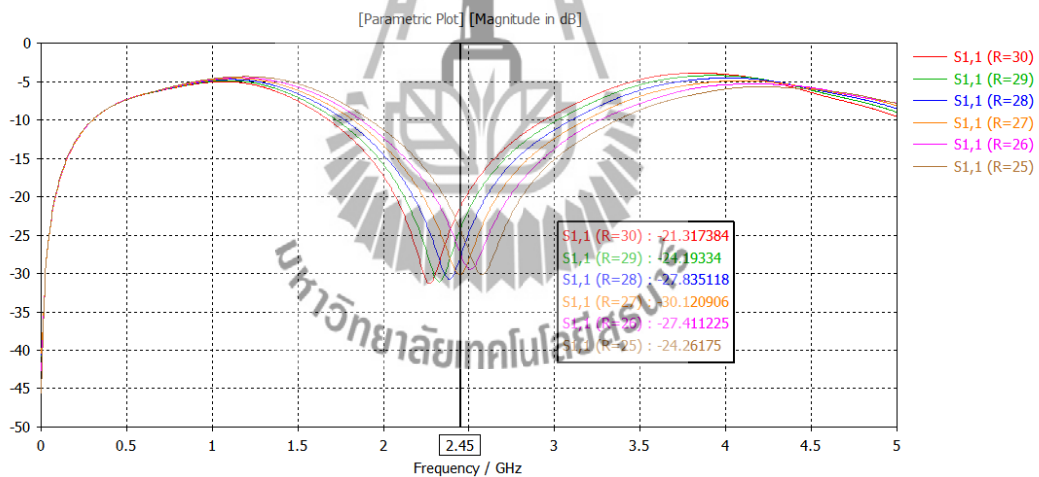
รูปที่ 3.19 ปรับพารามิเตอร์ $R = 28$ mm

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงกว่ารูปที่ 3.18 มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงความถี่ 2.45 GHz แต่ยังไม่ใช่ความถี่กึ่งกลางที่ต้องการ



รูปที่ 3.20 ปรับพารามิเตอร์ $R = 27$ mm

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า S_{11} มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงมากที่สุด ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นผลการจำลองแบบที่ต้องการ



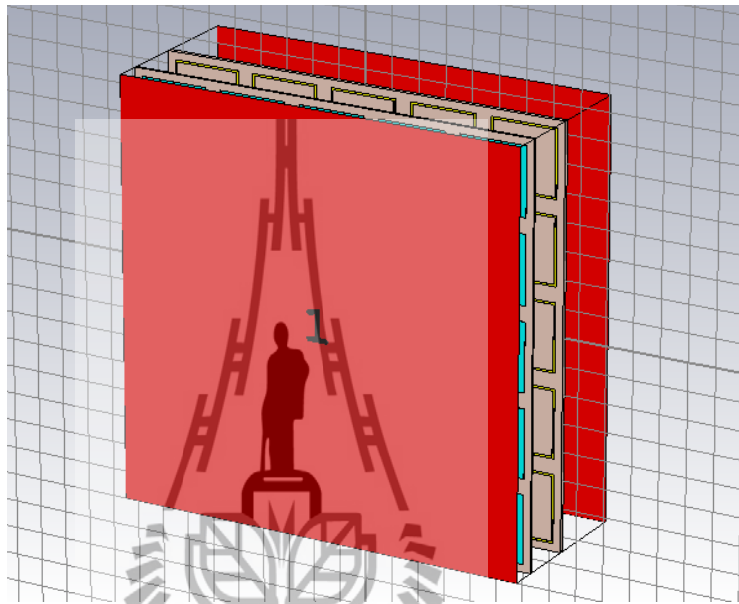
รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ R

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนลดน้อยลง ในช่วงความถี่ 2.45 GHz ที่ ระยะ $R = 27$ mm

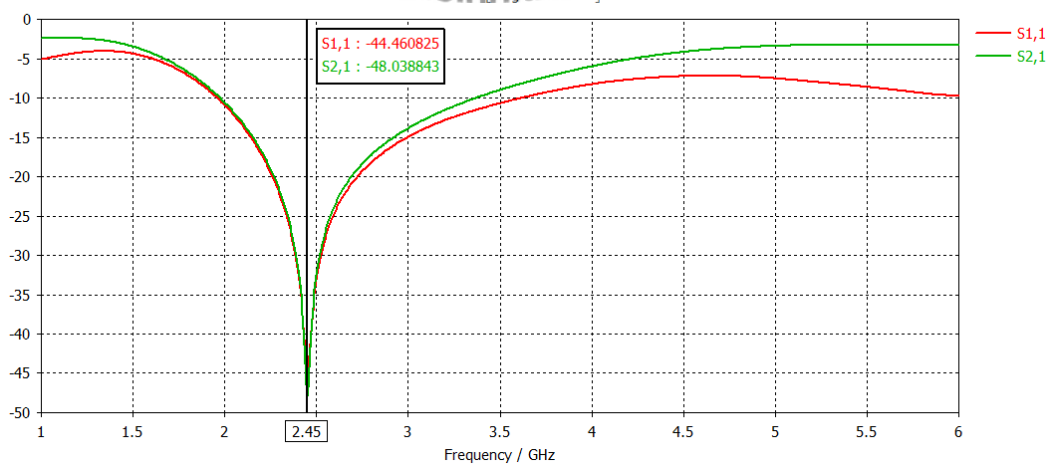
จากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนกระทั่งได้ผลการจำลองแบบที่ต้องการ จะได้ ค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปออกแบบเป็นชิ้นงาน ดังนี้ $l_1 = 24$ mm, $l_2 = 26$ mm, $w_1 = 0.5$ mm และ $w_2 = 2.7$ mm จากนั้นนำการจำลองแบบชิ้นงาน 1 ชิ้น มาทำเป็นแบบ 5×5 และจำลองผลการออกแบบ

3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง

ในการสร้างแบบจำลองที่ได้ออกแบบมาข้างต้นนี้เป็นการออกแบบชิ้นงานโดยการตั้งค่าแบบ Infinity ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานจริงไม่สามารถทำได้ จึงได้ทำการออกแบบชิ้นงานแบบ 5×5 ซึ่งจะได้ผลการจำลองแบบมีค่าเหมือนกับการออกแบบแบบ Infinity แสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.22 การจำลองชิ้นงานแบบ 5×5



รูปที่ 3.23 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5

จากการจำลองผลในรูปที่ 3.18 พบว่าการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5 มีผลการจำลองที่เหมือนกันกับการออกแบบชิ้นงานแบบ 1×1 จึงได้นำการจำลองแบบชิ้นงานแบบ 5×5 มาทำวัสดุคูคกิ้นความถี่ย่าน 2.45 GHz ต่อไป

3.7 สรุป

ในบทนี้ ที่กล่าวมาเป็นการออกแบบวัสดุคูคกิ้นความถี่ ซึ่งออกแบบไว้ให้ความถี่ย่าน 2.45 GHz เพื่อให้สามารถคูคกิ้นความถี่ได้ และได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ความกว้างและความยาวของ Copper Clad Laminate เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าพารามิเตอร์ S_{11} และค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่มีความเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งค่าได้ในการออกแบบ คือ แผ่นหลัง (First Layer) มีความกว้างและความยาวของแผ่นทองแดง มีค่า ดังนี้ $l_1 = 24 \text{ mm}$ และ $w_1 = 0.5 \text{ mm}$ และแผ่นหน้า (Second Layer) มีความกว้างและความยาวของแผ่นทองแดง มีค่า ดังนี้ $l_2 = 26 \text{ mm}$ และ $w_2 = 2.7 \text{ mm}$ เพื่อที่จะได้นำผลไปสร้างชิ้นงานจริงต่อไป



บทที่ 4

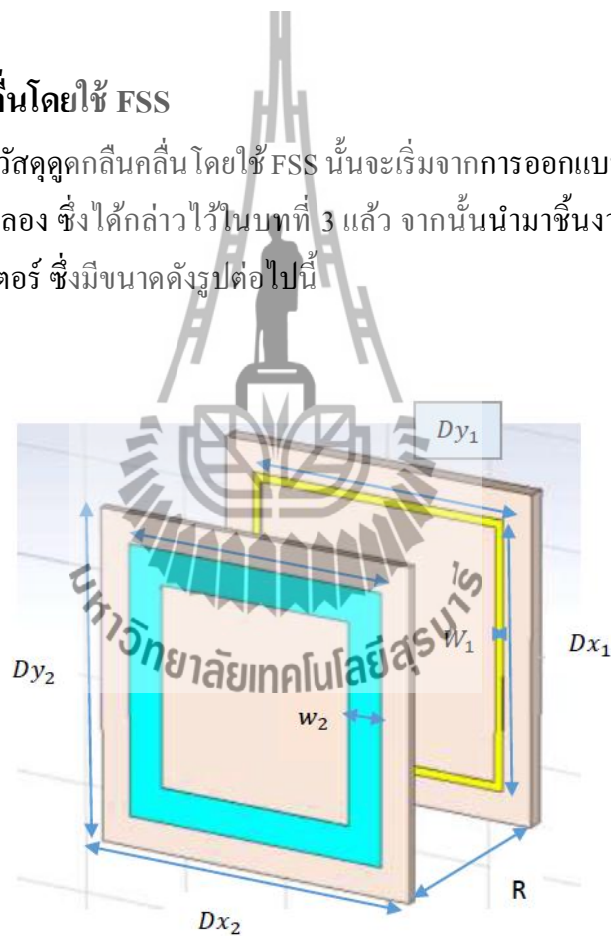
การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 และบทที่ 3 ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ และพร้อมที่จะนำไปทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แล้วนำมาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับทฤษฎี เพื่อตรวจสอบว่าผลลัพธ์ของโครงการ

4.2 วัสดุคูดกกลื่นคลื่นโดยใช้ FSS

ในการสร้างวัสดุคูดกกลื่นคลื่น โดยใช้ FSS นั้นจะเริ่มจากการออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผลการทดลอง ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้ว จากนั้นนำมาขึ้นงานต้นแบบวัสดุคูดกกลื่นคลื่นมาวัดค่าพารามิเตอร์ ซึ่งมีขนาดดังรูปต่อไปนี้



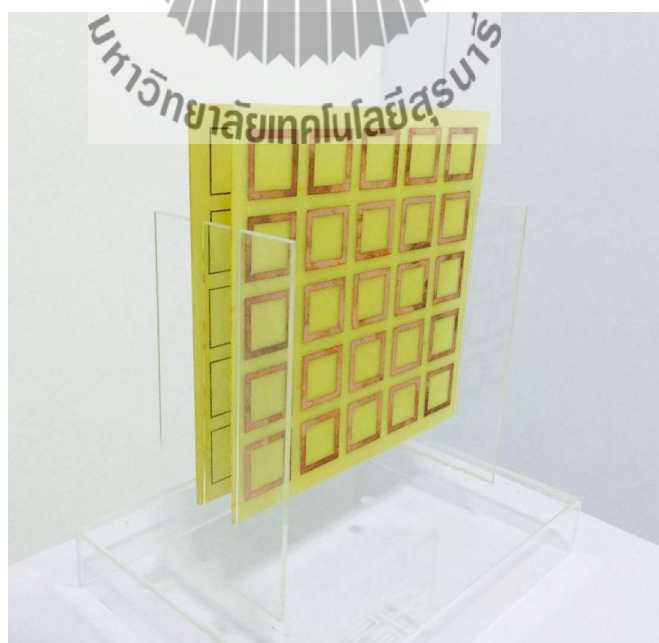
รูปที่ 4.1 วัสดุคูดกกลื่นคลื่นแผ่นหน้าและแผ่นหลัง

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคูกลิ้นกลิ้งแผ่นหลัง (First Layer)

พารามิเตอร์	Scale (mm.)
Dx_1	30
Dy_1	30
l_1	26
w_1	0.5

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคูกลิ้นกลิ้งแผ่นหน้า (Second Layer)

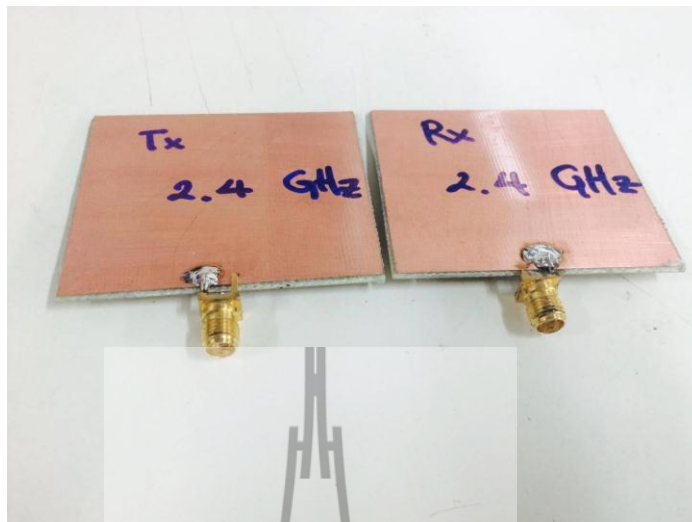
พารามิเตอร์	Scale (mm.)
Dx_2	30
Dy_2	30
l_2	26
w_2	2.7



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานต้นแบบ

ในการวัดผลชิ้นงานมีอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. สายอากาศไมโครสตริป(Microstrip Antenna) ภาครับและภาคส่งในย่านความถี่ 2.4 GHz

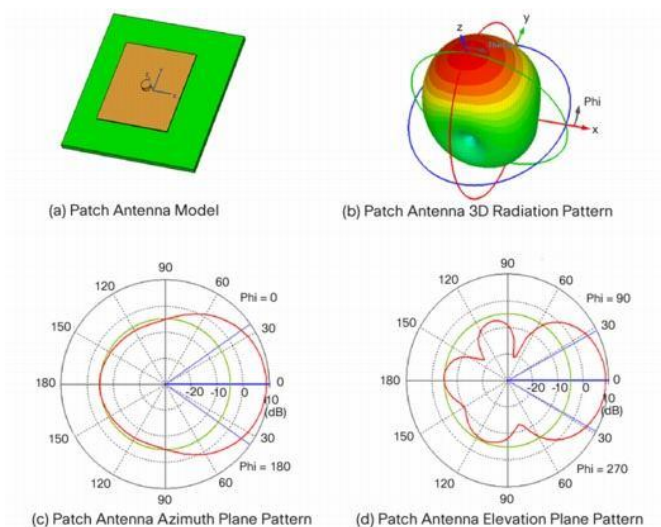


รูปที่ 4.3 สายอากาศไมโครสตริปภาครับและภาคส่งความถี่ 2.4 GHz

สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

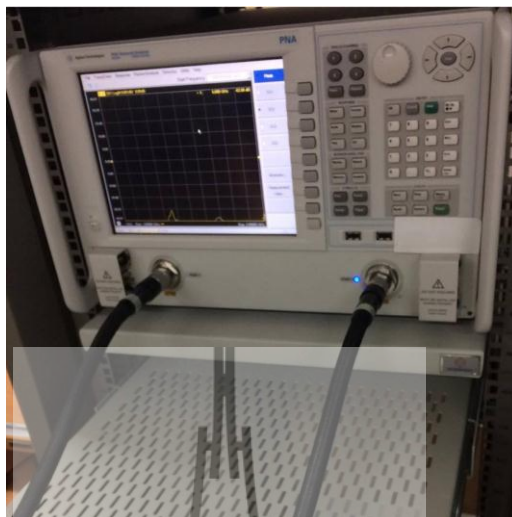
- Frequency range: 2.4 GHz
- Impedance: 50 Ohm nominal
- Gain: 6.59 dBi
- Radiation: directional
- Polarization: Circularly
- Wave: Half Wave Dipole

และมีแบบรูปการแผ่พลังงานคลื่นตามรูปต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ 2.4 GHz รูปแบบของมุมกวาดและมุมเงย

2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)



รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

ตัวเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

- เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วงจรแบบเครือข่าย ใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 300kHz ถึง 20GHz หรือกว้างกว่า พร้อมฟังก์ชันการวัดแบบ Bias Tee
- มีค่าความเที่ยงตรงของแหล่งกำเนิด (Source stability) ที่ +5 ppm หรือดีกว่าและค่าความแม่นยำของ CW ที่ +5 ppm หรือดีกว่า
- มีย่านแบนด์วิธไอเอฟระบบ (System IF bandwidth range) ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 500 kHz หรือกว้างกว่า ตัวเครื่องมีระบบไดนามิกเรนจ์ (System dynamic range) ที่ IF bandwidth 10Hz เท่ากับ 123 dB ที่ 2GHz หรือดีกว่า และ 100 dB ที่ความถี่ 12GHz หรือดีกว่า
- สามารถทนต่อระดับสัญญาณด้านเข้าสูงสุด (Damage Input level) ของ Test port ได้ +35 VDC (26dBm)
- มีค่า Test port noise floor ที่ช่วงความถี่ 2.5 GHz ถึง 8 GHz มีค่า -130 dBm/Hz หรือน้อยกว่า
- มีค่า Non-harmonics (Spurious) ของ Test port output ในตลอดช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่า -30 dBc
- มีช่องต่อ Probe power ที่หน้าเครื่องเพื่อความสะดวกสำหรับใช้งาน ไม่น้อยกว่า 2 พอร์ต
- มีค่าความละเอียดการวัดสูงสุดไม่ต่ำกว่า 20,000 จุดต่อช่องสัญญาณวัด

- สามารถกวาดสัญญาณแบบ Linear, Log, segment, power หรือมากกว่า
- แสดงผลการวัดด้วยหน้าจอสีแบบ TFT color LCD และขนาดความกว้างหน้าจอ ไม่น้อยกว่า ๑๐.๔ นิ้ว ชนิด Touch screen และมีความละเอียดหน้าจอแบบ XGA ไม่น้อยกว่า ๑๐๒๔ x ๗๖๘ และสามารถแสดงผลการวัดได้ 16 Traces หรือดีกว่า
- ตัวเครื่องสามารถใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ได้ ตัวเครื่องมีพอร์ต GPIB, LAN, USB, Video out, keyboard, mouse, หรือมากกว่า เพื่อการใช้งานกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ได้
- สามารถเก็บข้อมูลการวัดในลักษณะไฟล์รูปภาพได้ และสามารถเก็บเป็นข้อมูล (Data) แบบ Text ได้
- รองรับการปรับแต่งค่าก่อนทำการวัดทดสอบ (Calibration) ตัวเครื่องได้ทั้งแบบ อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) และ แบบแมคคานิกส์ (Mechanic)

ตัวเครื่องมีพอร์ตสำหรับทำการวัดค่า ๒ พอร์ต และเป็นขั้วต่อแบบ 3.5mm อิมพีแดนซ์ 50 Ohms

3. ห้อง chamber

4. Flexible test port set (สายเครื่องเนตเวิร์คสำหรับวัด 2 พอร์ต) 2 เส้น



รูปที่ 4.6 Flexible test port set

5. สายโคแอกเชียลสีฟ้าสำหรับต่อสายอากาศ 2 เส้น



รูปที่ 4.7 สายโคแอกเชียล

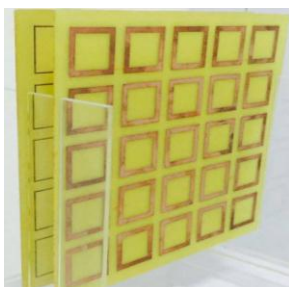
4.3 ผลการวัดทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ต่อสายอากาศไมโครสตริปกับสายโคแอกเชียลทั้งภาครับและภาคส่งเพื่อนำไปต่อเข้ากับเครื่อง network analysis นำวัสดุคุณลักษณะ สายอากาศไมโครสตริปวางไว้ในห้อง Chamber ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.8 ดังนี้

แผ่น FR-4

สายอากาศไมโครสตริป

ภาครับ



สายอากาศไมโครสตริป

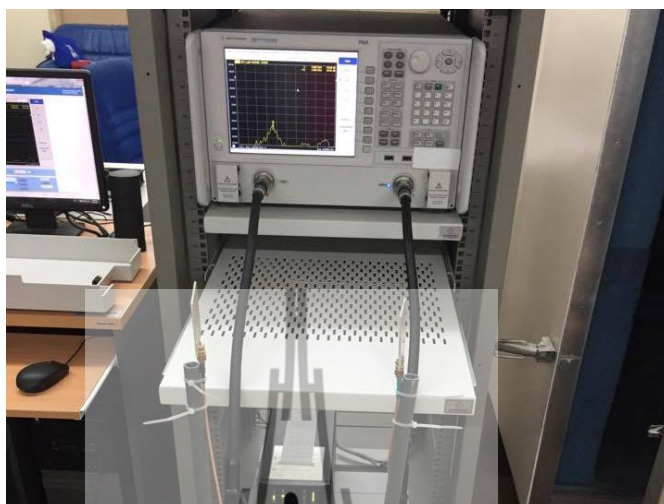
ภาคส่ง

เครื่อง Network analyzer

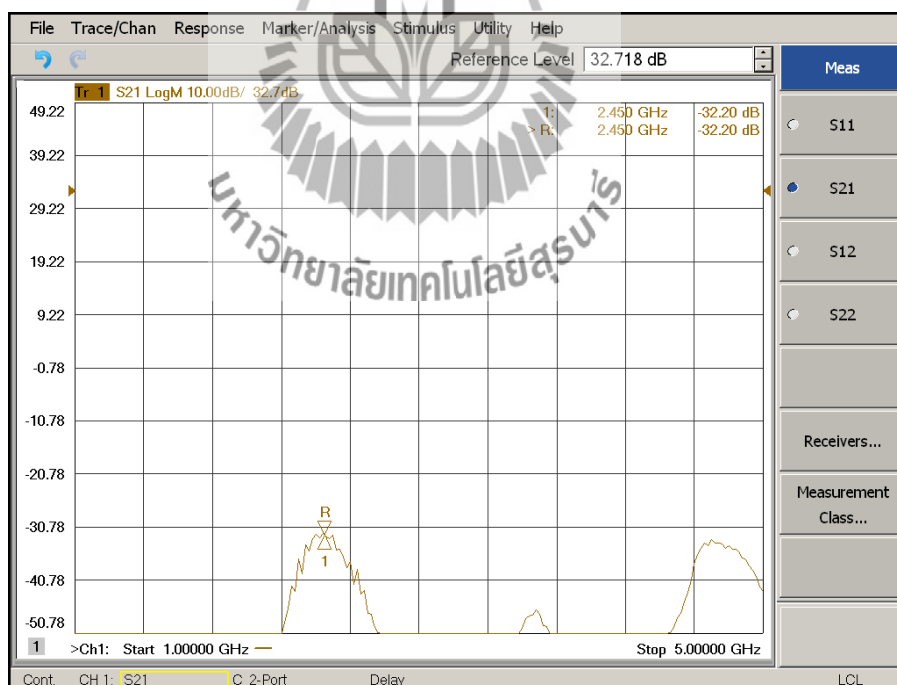


รูปที่ 4.8 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล

1. เริ่มจากวัดทดสอบสายอากาศไมโครสตริปว่าใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz และ ได้หรือไม่โดยการวางสายอากาศไมโครสตริปในแนวเดียวกัน ให้ตรงกันความสูงเท่ากัน



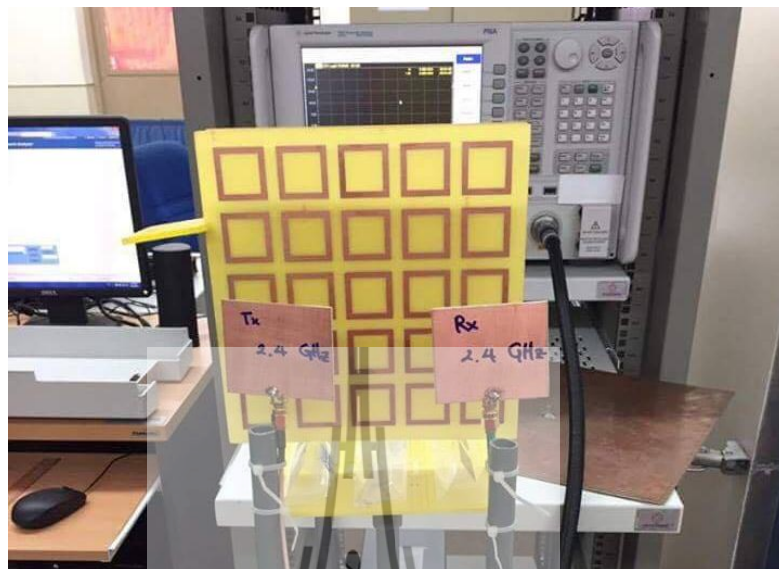
รูปที่ 4.9 วางสายอากาศภาครับ-ภาคส่ง



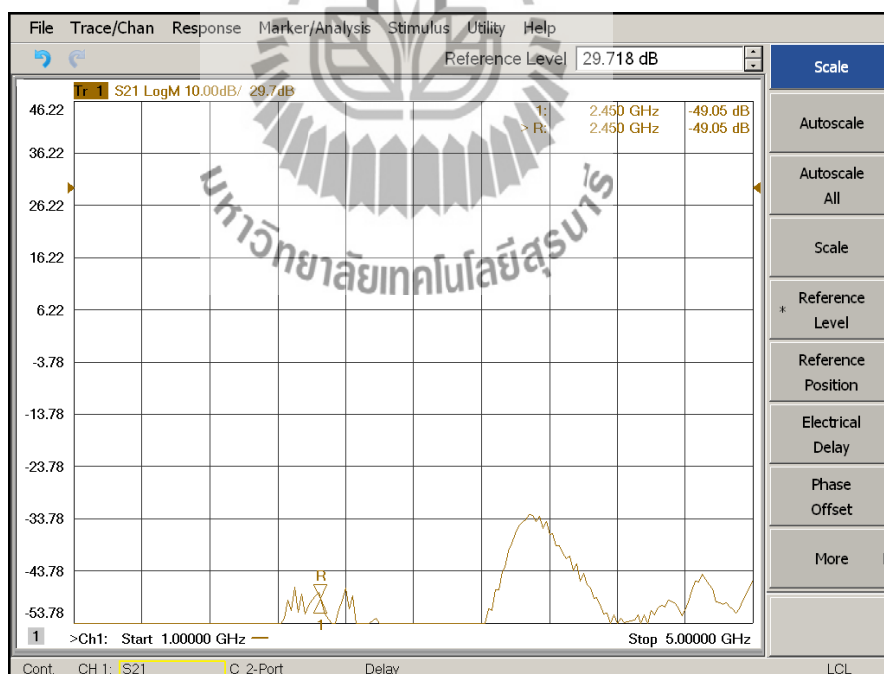
รูปที่ 4.10 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ของสายอากาศไมโครสตริป

จากภาพผลการทดสอบรูปที่ 4.9 พบว่า สายอากาศไมโครสตริปใช้งานได้ที่ความถี่ 2.4GHz โดยมี ค่า $S_{21} = -32.20$ dB

3. วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านวัสดุคูคกิ้นคั่น โดยวางสายอากาศภาคส่ง – ภาครับ ไว้
ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 การติดตั้งการวัดผลวัสดุคูคกิ้นคั่น

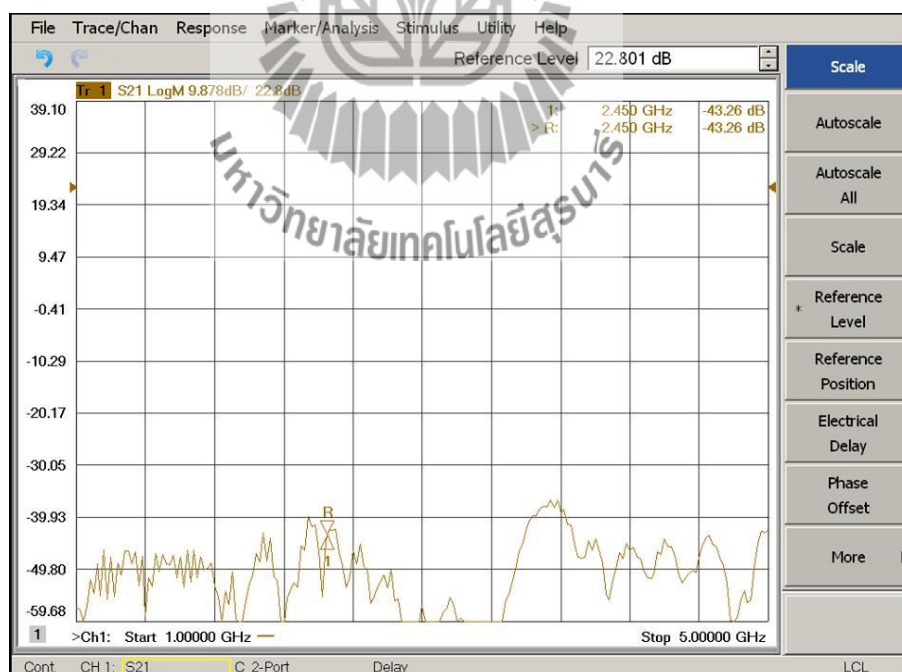


รูปที่ 4.14 ผลการวัดทดสอบ S_{21} คูการสะท้อนคั่นของวัสดุคูคกิ้นคั่น
ที่ความถี่ 2.4 GHz ได้ ค่า $S_{21} = -49.05$ dB

4. วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านแผ่นโลหะ ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 การติดตั้งการวัดผลผ่านแผ่นโลหะ



รูปที่ 4.16 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ผ่านแผ่นโลหะ
ที่ความถี่ 2.4 GHz ได้ ค่า $S_{21} = -43.26$ dB

ตารางที่ 4.3 ผลการบันทึกการส่งผ่านคลื่นผ่านวัสดุต่างๆ

ความถี่ (GHz)	ค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่ผ่านวัสดุต่างๆ (dB)	
	ชิ้นงานวัสดุคูคกคลื่น	แผ่นโลหะ
2.4	-53.55	-43.26

4.4 การเปรียบเทียบผล

จากผลการทดสอบชิ้นงานวัสดุคูคกคลื่นความถี่ 2.45 GHz นำมาเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดต่างๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

จากผลการวัดการส่งผ่านคลื่นที่ผ่านตัวกลางที่เป็นโลหะ นำมาเปรียบเทียบกับผลจากการส่งผ่านคลื่นผ่านชิ้นงานวัสดุคูคกคลื่นวัสดุคูคกคลื่นสามารถคูคกคลื่นได้ ซึ่งมีค่า S_{21} น้อยมากคือสามารถส่งผ่านได้น้อยมาก แต่เมื่อนำโลหะมาวัดค่าแทน คลื่นจะสะท้อนกลับเมื่อกระทบกับแผ่นโลหะ ส่งผ่านได้น้อยลงทำให้ค่า S_{21} มีค่าเพิ่มขึ้น

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ S_{21} ของชิ้นงานกระจกเลือกความถี่ที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวัดที่ได้จากชิ้นงานวัสดุคูคกคลื่น สามารถคูคกคลื่นในย่านความถี่ 2.45 GHz ได้

บทที่ 5

บทสรุปของโครงการ

5.1 บทสรุป

โครงการวัสดุคูกคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz มีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. สายอากาศไมโครสตริปความถี่ 2.4 GHz
2. หัวคอนเน็คเตอร์ (SMA)
3. แผ่น FR-4
4. ชุดอุปกรณ์ในการวัดค่า S_{21} และแบบรูปการส่งผ่านคลื่นของสายอากาศซึ่ง

ได้แก่

4.1 เครื่อง Network Analyzer

4.2 ห้อง Chamber

ในการศึกษาเรื่องวัสดุคูกคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz และพบปัญหาการรบกวนของสัญญาณไร้สายและสัญญาณอื่นๆที่ใช้ความถี่ในย่าน 2.45 GHz ตามสถานที่ต่างๆ โดยเฉพาะภายในตึกอาคารบ้านเรือน จึงได้ทำการออกแบบวัสดุคูกคลื่นคลื่นขึ้นมาเพื่อช่วยลดปัญหาการรบกวนของสัญญาณที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งในการออกแบบวัสดุคูกคลื่นคลื่นนี้ เริ่มตั้งแต่การออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO2014 โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสูตรการคำนวณและจากเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับวัสดุคูกคลื่นคลื่น มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบพบว่า ผลการจำลองแบบในครั้งแรกยังไม่ได้ผลตามที่ต้องการ จึงต้องทำการค่อยๆ ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นงาน จนได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ จากนั้นทำชิ้นงานต้นแบบจริงตามที่ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO2014 และนำชิ้นงานต้นแบบไปวัดทดสอบผล

จากผลการทดสอบพบว่า วัสดุคูกคลื่นความถี่ย่าน 2.45 GHz ที่ออกแบบและสร้างชิ้นงานนั้นสามารถใช้งานได้ตรงตามความถี่ที่ได้ออกแบบไว้และมีประสิทธิภาพตรงตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานจริง

และในบทนี้ยังกล่าวถึงปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และวิธีการพัฒนาโครงการต่อไปของโครงการวัสดุคูกคลื่นความถี่ในย่าน 2.45 GHz

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

ในการทำโครงการวัสดุทดกลืนคลื่นความถี่ย่าน 2.45GHz ปัญหาที่พบได้บ่อยๆ แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน สาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1.การสร้างชิ้นงานจริง	สาเหตุ เนื่องจากชิ้นงานต้องใช้สติกเกอร์แปะลงบนแผ่น FR-4 เพื่อให้ตรงตามที่ออกแบบ ในขณะที่แปะสติกเกอร์มีการเบี้ยวไปมา และขณะที่ลอกสติกเกอร์ส่วนที่ไม่ต้องการออก สติกเกอร์อาจมีหลุดออกไปบ้างเล็กน้อยเพราะขนาดของชิ้นงานมีขนาดเล็ก และเมื่อนำแผ่น FR-4 ไปกัดเอาโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกอาจมีโลหะบางส่วนที่หลุดออกไปไม่หมด จึงทำให้ผลการวัดมีความคลาดเคลื่อน วิธีแก้ไขปัญหา ขณะลอกสติกเกอร์ส่วนที่ไม่ต้องการออก ให้ใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่ามือเราอาจจะเป็นเข็มหรือคัตเตอร์ในการลอกออกมา มือควรนิ่งมากหรือควรตัดขนาดแผ่นสติกเกอร์กับแผ่น FR-4 ให้ตรงกันพอดีจะได้ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและขั้นตอนการกัดแผ่นFR-4 ควรทิ้งไว้นานจนจะมั่นใจว่าโลหะออกหมดและใช้อุปกรณ์ที่สามารถลอกแผ่น FR-4 กับ น้ำยากัดโลหะ เพราะเมื่อเราเขย่า จะทำให้โลหะหลุดออกมาไวขึ้น
2. ในการวัดค่าแบบรูปการแผ่ส่งผ่านคลื่นเมื่อมีชิ้นงานกั้นระหว่างสายอากาศ 2 ตัวเกิดความ คลาดเคลื่อนและผิดเพี้ยน	สาเหตุ 1.ความไม่ประณีตในการติดตั้งอุปกรณ์ 2. ความไม่แม่นยำในการอ่านค่า 3.เกิดจากการรบกวนของสัญญาณไร้สาย ในบริเวณที่ทำการทดสอบ วิธีแก้ไขปัญหา 1. มีความประณีตบรรจงในการติดตั้งอุปกรณ์

	2. เพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่ามากขึ้น 3. ในขณะที่วัด ควรหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนดังกล่าว เช่น ปิดห้อง chamber ให้แคบที่สุด
3. การใช้งานเครื่องมืออุปกรณ์ มีจำนวนจำกัด	สาเหตุ ในการวัดค่ารูปแบบการส่งผ่านของคลื่น จำเป็นต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีเพียงเครื่องเดียว และกลุ่มโครงข่ายที่ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีจำนวนมาก ทำให้ต้องรอกการใช้งาน และเกิดความล่าช้าในการทำโครงข่าย วิธีแก้ไขปัญห ควรมีการจองใช้เครื่องมือ หรือจัดสรรเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายให้เพียงพอกับการใช้งาน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ (filter) ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องสูง สามารถสังเกตได้จากกราฟการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจาก task manager ของ windows ผู้ใช้งานควรใช้งานโปรแกรมนี้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง

5.3.2 ในการวัดขนาด การตัดและการแปะสติกเกอร์นั้นควรทำด้วยความปราณีต ไม่เร่งรีบ เพื่อให้ได้สายวงจรที่ได้ออกมานั้นมีความเหมือนจริงกับที่ออกแบบมากที่สุด

5.3.3 ในการจัดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่ารูปแบบการส่งผ่านคลื่นนั้น ควรตั้งชิ้นงานให้ระยยะเท่าที่ออกแบบมากที่สุด ควรมีฐานของชิ้นงานที่มั่นคง โดยเฉพาะสายอากาศไมโครสตริปความถี่ 2.4GHz ทั้ง 2 ตัวที่ใช้งาน ควรวางให้ตรงกันระยะห่างอยู่ในระยะFar field ผลการวัดจะได้ไม่มีความคลาดเคลื่อนมากนัก

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากชิ้นงานใช้เป็นแผ่น FR-4 ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน จะดูไม่สวยงาม หากต้องนำมาใช้สร้างหรือทำเป็นผนังอาคาร บ้านเรือนหรือในสถานที่ที่ไม่ต้องการการรบกวนของคลื่นในย่านความถี่ 2.4 GHz ควรออกแบบเป็นกระจกกรรมคาเพื่อให้สวยงามมากขึ้น ซึ่งอาจจะนำมาพัฒนาเป็นกระจกกรองแสงได้ เพื่อจะช่วยให้การประหยัดพลังงานภายในสถานที่นั้นๆได้อีกด้วย

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิรียา สุทธิกุล เกิดวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2538 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 136 หมู่ 5 ตำบลโพธิ์ไทร อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพิบูลมังสาหาร ปีการศึกษา 2555 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวณิชา ชูรัตน์ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ.2538 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 111 หมู่ 17 ตำบลกำแพง อำเภออุทุมพร จังหวัดยโสธร จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนมัธยมวัดใหม่กรงทอง ปีการศึกษา 2555 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวศรีสุกข์ โมทย์วาริศรี เกิดวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ.2538 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 30 หมู่ 3 ตำบลคูบัว อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศราชบุรี ปีการศึกษา 2555 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

- MudassarAbdin, UmairRafique, Fahad Malik, ShahzaibQasim, M. Arif Khan, M. Mansoor Ahmed. (2012). A Novel Dual-Band Frequency Selective Surface Absorber. (online), Retrieved on October1,2016.Scientific&AcademicPublishing. <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijea.20120206.08.html>
- Miss RattanaPanyakrua. (2005). Wireless LAN คืออะไร. (online), 2 ตุลาคม 2559. งานบริการเทคโนโลยีสารสนเทศ information technology service. <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page1.asp>
- Miss RattanaPanyakrua. (2005). มาตรฐาน IEEE,อุปกรณ์. (online), 2 ตุลาคม 2559. งานบริการเทคโนโลยีสารสนเทศ information technology service. <http://www.phrae.mju.ac.th/ITS/page4.asp>
- เบญจสิริยา ปานบุญเดช. (2016). องค์ประกอบงานกราฟิก (Element of Design). (online), 2 ตุลาคม 2559. Develobment of weblog for knowledge management in public relation via website. <http://www.km-web.rmutt.ac.th/?p=64>
- KasinPrakobwaitayakit, Mr. (Pele). (2016). บทที่ 11 คลื่นระนาบสม่ำเสมอ. (online), Retrieved on October 1, 2016. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. <http://www.ee.eng.cmu.ac.th/~kasin/Courses/252311/PDF/Chapter%20II.pdf>
- นาถดา นวนน้อยและวณิชชา วรรณกุล. (2553). กระจกเลือกความถี่ผ่านย่าน900MHzและ 1800MHz. ปรินิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นัฐพงษ์ ชูหมและอาลิณี รักมิตานนท์. (2553). การประยุกต์สายอากาศจากวัสดุเหลือใช้ที่ความถี่ 2.45GHz. ปรินิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นายเสกสรร เข้มพราย.(2016).สมบัติของคลื่น.19ต.ค.2016.ส่วนเครื่องจักรกล กรมชลประทานที่17. <http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.htm>

