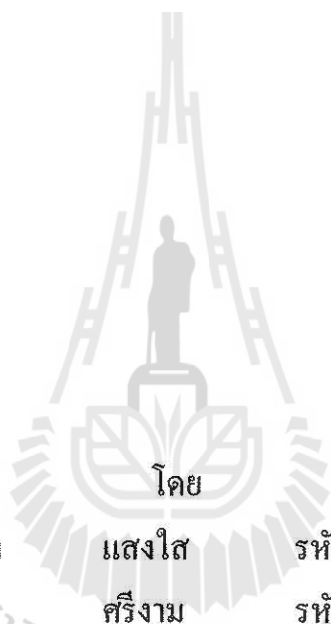


## การออกแบบวัสดุประคิษฐ์ที่ความถี่ 2.45 GHz



นางสาวรัชฎา แสงใส รหัสนักศึกษา B5211531  
นางสาวนุจรี ศรีงาม รหัสนักศึกษา B5219360  
นางสาวเบญจมาภรณ์ กว้างพิมาย รหัสนักศึกษา B5225620

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

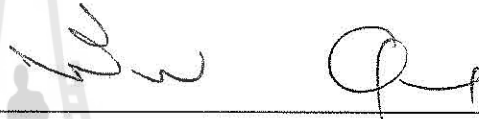
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2555

# การออกแบบวัสดุประดิษฐ์ที่ความถี่ 2.45 GHz

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยากรณ์ กระลองคนอก)  
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)  
กรรมการ



(อ.สรณัฐวิทย์ ภูฉายา)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรม  
โทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2555

โครงการ	การออกแบบวัสดุประดิษฐ์ที่ความถี่ 2.45 GHz		
โดย	1. นางสาวรัชฎา	แสงใส	รหัส B5211531
	2. นางสาวนุจรี	ศรีงาม	รหัส B5219360
	3. นางสาวเบญจมาภรณ์	กว้างพิมาย	รหัส B5225620
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะภรณ์ กระจอดนอก		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม		
ภาคการศึกษาที่	3/2555		

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เสนอการออกแบบอภิวัดสำหรับครอบบนสายอากาศ ซึ่งเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุทางธรรมชาติ โดยการออกแบบวัสดุประดิษฐ์จะศึกษาโครงสร้างของตัวกลาง ขนาด รูปร่าง และส่วนประกอบทั้งแบบ 1 มิติและ 2 มิติที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น แล้วนำมาพิจารณาค่าสภาวะ - ขอมทางไฟฟ้า ค่าชาบซึมทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเห ตามลำดับ โดยจะทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ไมโครเวฟ จากนั้นทำการสร้างวัสดุประดิษฐ์และทดสอบต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

จากการจัดทำโครงการเรื่องการออกแบบของวิทยุประดิษฐ์ที่ความถี่ 2.45 GHz ส่งผลให้คณะผู้จัดทำได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆมากมาย โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ และบุคคลหลายท่านที่คอยช่วยเหลือและคอยให้คำปรึกษารวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะภรณ์ กระจงนอก (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ) อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และแนะนำในทุกๆ ด้าน รวมถึงการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงานและแนะแนวทางในการเขียนรายงาน ให้แก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด

นางสาวนุชนาฏ ผ่าเพ็ญ ( นักศึกษาปริญญาเอก ) และรุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงการสอนการใช้งานโปรแกรม CST Microwave studio เบื้องต้น และการวัดผลการทดลองของชิ้นงาน

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นางสาวรัชสุภา      แสงใส

นางสาวนุจรี      ศรีงาม

นางสาวเบญจมาภรณ์ กว้างพิมาย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ระยะเวลาดำเนินการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 คุณสมบัติของคลื่น	3
2.2.1 คุณสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น	6
2.2.2 โหมดการแพร่กระจายคลื่น	7
2.3 อภิวัดดู (Metamaterials )	11
2.3.1 การประยุกต์ใช้งานอภิวัดดูสำหรับสายอากาศ	13
2.4 สายอากาศไมโครสตริป ( Microstrip Antenna )	17
2.4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	17
2.4.2 หลักการและสมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	18
2.5 สายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้สตริปร่วมกับ EBG	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.5.2 สายอากาศเรโซเนเตอร์สภาพเจาะจงทิศทางสูง	23
2.6 สรุป	24
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการจำลอง</b>	
3.1 กล่าวนำ	25
3.2 การศึกษาอภิวัดดู	25
3.3 การโพลาริซซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติและ 2 มิติ	30
3.3.1 การโพลาริซซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ	30
3.3.2 การโพลาริซซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	33
3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ	35
3.5 การออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์	39
3.6 สรุป	42
<b>บทที่ 4 การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล</b>	
4.1 กล่าวนำ	44
4.2 สายอากาศไมโครสตริป	44
4.3 สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ	46
4.4 สายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ	48
4.5 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศ	50
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดจริง	52
4.7 บทสรุป	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปของโครงการ	
5.1 บทสรุป	52
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	53
5.3 ข้อเสนอแนะ	53
ภาคผนวก	54
ประวัติผู้เขียน	56
บรรณานุกรม	56



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่นที่ 1 และ 2 - คลื่นตามขวาง , คลื่นที่ 3 - คลื่นตามยาว	6
รูปที่ 2.2 การสะท้อนกลับของคลื่น	7
รูปที่ 2.3 การสะท้อนกลับและคลื่นที่ส่งผ่านบริเวณผิว	7
รูปที่ 2.4 การเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นเมื่อผ่านตัวกลาง	8
รูปที่ 2.5 ผลการจำลองแบบแผนการโพลาริซชันตามขวาง	10
รูปที่ 2.6 ผลการจำลองแบบแผนการโพลาริซชันแม่เหล็กตามขวาง	11
รูปที่ 2.7 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก	12
รูปที่ 2.8 นำ (ก) EBG และ (ข) AMC มาใช้กับสายอากาศเพื่อลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพ	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	17
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของค่าพารามิเตอร์	18
รูปที่ 2.11 การสะท้อนของคลื่นระหว่างระนาบกราวด์และช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.12 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติและสายอากาศไมโครสตริป	22
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นผิวแบบดอกเห็ด	23
รูปที่ 3.1 ผลการจำลองแบบอภิวัดดูหนึ่งหน่วย 1 มิติ	26
รูปที่ 3.2 ผลการจำลองแบบอภิวัดดูหนึ่งหน่วย 2 มิติ	27



### สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 ผลจากการจำลองช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโพลาริซ์แนวนอน	29
รูปที่ 3.4 ผลการโพลาริซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง โหมด TE	31
รูปที่ 3.5 ผลการโพลาริซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง โหมด TM	32
รูปที่ 3.6 ผลการโพลาริซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง โหมด TE	33
รูปที่ 3.7 ผลการโพลาริซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง โหมด TM	34
รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	35
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริป	39
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 1 มิติ	40
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 2 มิติ	42
รูปที่ 4.1 ผลการวัดสายอากาศไมโครสตริป	45
รูปที่ 4.2 ผลการวัดแผ่น EBG 1 มิติ แสดงผลการวัด EBG 1 มิติ	46
รูปที่ 4.3 ผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ	47
รูปที่ 4.4 ผลการวัดแผ่น EBG 2 มิติ	49
รูปที่ 4.5 ผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ	50

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์แนวนอน	28
ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริป	38
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป	44
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของแผ่น EBG 1 มิติ	46
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผ่น EBG 2 มิติ	48
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $S_{21}$ ของ EBG 1 มิติ และ 2 มิติ	52
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราขยายของสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ และ 2 มิติ	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องด้วยในปัจจุบันระบบการสื่อสารมีการพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาและการออกแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงขึ้น เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านการสื่อสารนั้นๆ ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติของอภิวัดที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถพบในวัสดุธรรมชาติ เช่น ค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า หรือ ค่าซิมแซมแม่เหล็กเป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน จากคุณสมบัติดังกล่าวอภิวัดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับ โครงการนี้นำเสนอการออกแบบและศึกษาโครงสร้างของอภิวัดหรือวัสดุประดิษฐ์สำหรับวางครอบบนสายอากาศ โดยให้มีคุณสมบัติให้คลื่นผ่านได้บางส่วนและสะท้อนกลับบางส่วนในช่วงความถี่ที่ต้องการ ส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงขึ้น

สำหรับวัสดุประดิษฐ์ที่ทำการออกแบบจะมีคุณสมบัติการสะท้อนกลับ หรือส่งผ่านคลื่นตามที่ต้องการ โดยออกแบบชิ้นงานทั้งในรูปแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ เพื่อที่จะศึกษาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น แล้วนำค่าเหล่านี้มาพิจารณาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าซิมแซมได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเห ตามลำดับ เพื่อให้ใช้งานได้ที่ความถี่ 2.45 GHz ในการจำลองการออกแบบจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ศึกษาโครงสร้าง และลักษณะการทำงานของชิ้นงานให้ได้ผลออกมาตามที่ต้องการ

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคลื่นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านวัสดุประดิษฐ์
- 2.) เพื่อศึกษาการออกแบบวัสดุประดิษฐ์
- 3.) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอภิวัด
- 4.) เพื่อศึกษาโครงสร้างของวัสดุประดิษฐ์

### 1.3 ขอบเขตงาน

- 1.) ศึกษาคุณสมบัติของอภิวัด
- 2.) ออกแบบวัสดุประติษฐานและจำลองแบบ โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 4.) สร้างชิ้นงาน โดยใช้แผ่น FR-4
- 5.) วัดและทดสอบชิ้นงาน

### 1.4 ระยะเวลาดำเนินการ

กิจกรรม	พ.ศ.2556		
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาเกี่ยวกับโครงงาน	↔		
2. ศึกษาและค้นหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงงาน		↔	
3. ทำการออกแบบชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio		↔	
4. สร้างชิ้นงานแล้วนำไปทดสอบ/และแก้ไขสิ่งที่ผิดพลาด		↔	
5. เขียนโครงงานเสนออาจารย์ที่ปรึกษา		↔	
6. สรุปผลและเขียนรายงาน		↔	
7. นำเสนอโครงงาน			↔

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) ได้ทราบคุณสมบัติของอภิวัด
- 2.) ได้เรียนรู้ขั้นตอนและเทคนิคการออกแบบวัสดุประติษฐ์
- 3.) ได้เรียนรู้การใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 4.) ได้เรียนรู้การสร้างชิ้นงานที่ได้ออกแบบ
- 5.) ได้เรียนรู้การอ่านกราฟแสดงผลที่ได้จากการทดลอง
- 6.) ได้เรียนรู้การใช้เครื่อง Network Analyzer
- 7.) ได้เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่มและแลกเปลี่ยนความรู้จากผู้มีประสบการณ์
- 8.) สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในอนาคตได้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

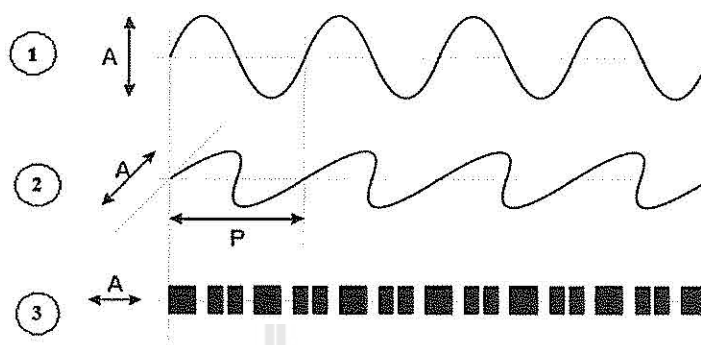
#### 2.1 กล่าวนำ

การออกแบบวัสดุประติมาตรที่ความถี่ 2.45 GHz ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ และนำไปออกแบบเพื่อครอบบนสายอากาศ ในการออกแบบวัสดุประติมาตรจะศึกษาโครงสร้างของ ตัวกลาง ขนาด รูปร่าง และส่วนประกอบทั้งแบบ 1 มิติและ 2 มิติที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การ สะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น แล้วนำมาพิจารณาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าซึม ซาบทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเห ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานที่จะ นำไปสร้างชิ้นงาน การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโดยส่วนมากคือการติดตั้งตัวสะท้อนไว้ ด้านหลังหรือเรียกว่า สายอากาศตัวสะท้อน (Reflector Antenna) แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษา เกี่ยวกับอภิวัดศุอย่างกว้างขวางมากขึ้นจึงมีการนำอภิวัดศุมานำมาใช้ออกแบบ เพื่อให้สามารถสะท้อน และส่งผ่านคลื่นได้บางส่วน ดังนั้นในบทนี้ได้กล่าวถึงการส่งผ่านคลื่นผ่านตัวกลาง การศึกษา อภิวัดศุ การศึกษาสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการนำอภิวัดศุมารวมกันกับสายอากาศไมโครสตริปหรือเรียกว่า สายอากาศเรโซเนเตอร์ (Resonator Antenna) อีกด้วย

#### 2.2 คุณสมบัติของคลื่น

คลื่น หมายถึง ลักษณะของการถูกรบกวน ที่มีการแผ่กระจาย เคลื่อนที่ออกไป ในลักษณะ ของการกวัดแกว่ง หรือกระเพื่อมและมักจะมีการส่งถ่ายพลังงานไปด้วย คลื่นเชิงกลซึ่งเกิดขึ้นใน ตัวกลาง (ซึ่งเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูป จะมีความแรงยืดหยุ่นในการคึดตัวกลับ) จะเดินทางและ ส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในตัวกลาง โดยไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตำแหน่งอย่างถาวรของอนุภาคตัวกลางคือ ไม่มีการส่งถ่ายอนุภาคนั้นเอง แต่จะมีการเคลื่อนที่แกว่งกวัดกลับไป กลับมาของอนุภาค อย่างไรก็ตามสำหรับการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแผ่รังสีแรงดึงดูด นั้นสามารถเดินทางในสุญญากาศได้โดยไม่ต้องมีตัวกลาง ลักษณะของคลื่นนั้นจะระบุจากสันคลื่น หรือยอดคลื่น (ส่วนที่มีค่าสูงขึ้น) และท้องคลื่น (ส่วนที่มีค่าต่ำลง) ในลักษณะตั้งฉากกับทิศทางเดิน

คลื่นเรียกว่า คลื่นตามขวาง (Transverse wave) หรือ ขนานกับทิศทางเดินคลื่นเรียกว่า คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)



รูปที่ 2.1 คลื่นที่ 1 และ 2 - คลื่นตามขวาง , คลื่นที่ 3 - คลื่นตามยาว

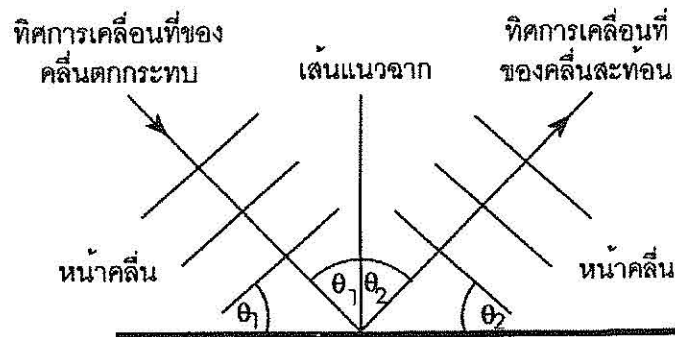
### 2.2.1 คุณสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น

การสะท้อนของคลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญประการหนึ่งของคลื่น ถือได้ว่าเป็นสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปพบสิ่งกีดขวางหรือเปลี่ยนตัวกลางในการเคลื่อนที่ โดยคลื่นที่เคลื่อนที่ไปกระทบสิ่งกีดขวางเรียกว่า คลื่นตกกระทบ และคลื่นที่สะท้อนออกมาเรียกว่า คลื่นสะท้อน ในการสะท้อนแต่ละครั้งพบว่ามุมที่หน้าคลื่นตกกระทบกระทำกับสิ่งกีดขวางจะเท่ากับมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนกระทำกับสิ่งกีดขวางเสมอ นั่นคือการสะท้อนของคลื่นจะเป็นไปตามกฎการสะท้อนที่ว่า “ เมื่อคลื่นเกิดการสะท้อนจะได้มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ ”

#### • การสะท้อนของคลื่น (Reflection wave)

ในกรณีคลื่นเคลื่อนที่แล้วเกิดการสะท้อนไม่ว่าจะเป็นคลื่นชนิดใดๆ จะสามารถสรุปเป็นกฎได้ 2 ข้อ คือ

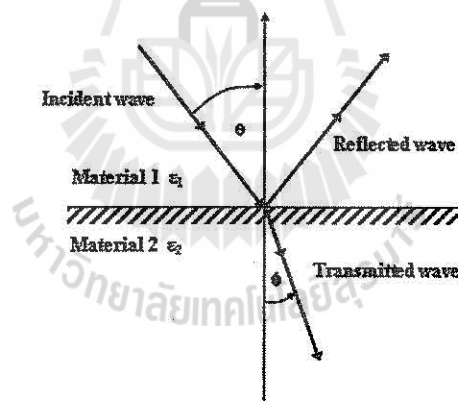
1. รังสีตกกระทบ เส้นปกติ รังสีสะท้อน อยู่ในระนาบเดียวกัน
2. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ



รูปที่ 2.2 การสะท้อนกลับของคลื่น

- การส่งผ่านของคลื่น (Transmitted wave)

การส่งผ่านของคลื่นเป็นอีกสมบัติของคลื่น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเปลี่ยนตัวกลางในการเคลื่อนที่หรือคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีสมบัติต่างกัน มีผลทำให้อัตราเร็วและความยาวของคลื่นเปลี่ยนไป การส่งผ่านของคลื่นมักเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการสะท้อนของคลื่น การส่งผ่านของคลื่นยังขึ้นกับความถี่ของคลื่นอีกด้วย ยิ่งความถี่ลดลงก็จะเกิดส่งผ่านเพิ่มขึ้น

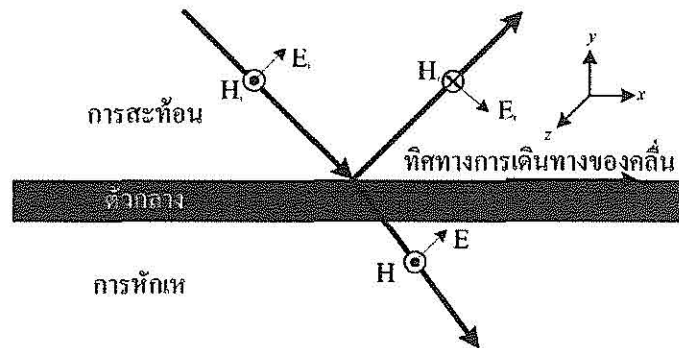


รูปที่ 2.3 การสะท้อนกลับและคลื่นที่ส่งผ่านบริเวณผิว

### 2.2.2 โหมดของการแพร่กระจายคลื่น

เนื่องจากใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นชั้นวางซ้อน (Superstrate) ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวกลางจากรูปที่ 2.4 แสดงการเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลาง เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางมาตกกระทบยังตัวกลางจะเกิดการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่น ส่งผลให้ในทิศทางการเดินทางของคลื่น ไปตามแกน  $x$





รูปที่ 2.4 การเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นเมื่อผ่านตัวกลาง

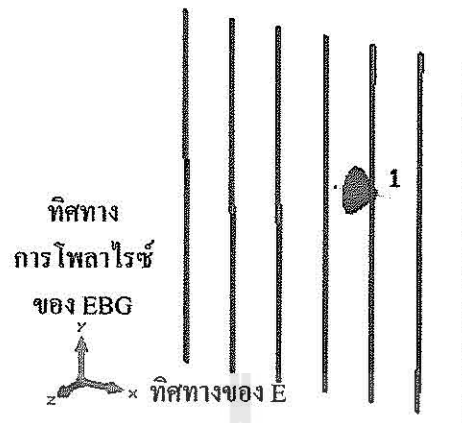
เมื่อพิจารณาในลักษณะของการโพลาไรซ์ที่ซึ่งตัวโพลาไรซ์ทำหน้าที่เป็นช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าด้วย ซึ่งในกรณีช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติและ 2 มิติจะมีโพลาไรซ์สองทิศทางคือ ไม่มีทิศทางก็มีทิศตรงกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายดังนั้นจึงสามารถแบ่งแบบแผนของการโพลาไรซ์ออกเป็น 2 แบบดังต่อไปนี้

- การโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Polarization Mode ;TE)

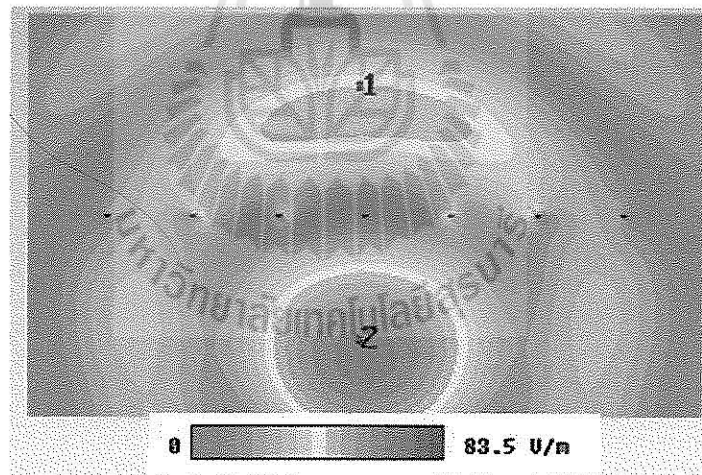
จากรูปที่ 2.5 แสดงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวางตัวตั้งในแนวแกน  $y$  ดังนั้นทิศทางการโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าจึงอยู่ในทิศทางแกน  $y$  แต่สายอากาศไดโพลถูกวางตัวนอนในแนวแกน  $x$  แสดงว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายอยู่ในทิศทางแกน  $x$  ดังนั้นทิศทางของสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจึงมีทิศทางขวางกับทิศทางการโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางการเดินทางของคลื่น จึงเกิดโหมดแบบแผนโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวางขึ้น

- การโพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Polarization Mode ;TM)

จากรูปที่ 2.6 แสดงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวางตัวนอนในแนวแกน  $x$  ดังนั้นทิศทางการโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าจึงอยู่ในทิศทางแกน  $x$  และสายอากาศไดโพลถูกวางตัวนอนในแนวแกน  $x$  แสดงว่าทิศทางของสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายอยู่ในทิศทางแกน  $x$  ดังนั้นทิศทางของสนามไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจึงมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้มีสนามไฟฟ้าในทิศทางการเดินทางของคลื่น จึงเกิดโหมดแบบแผนโพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวางขึ้น

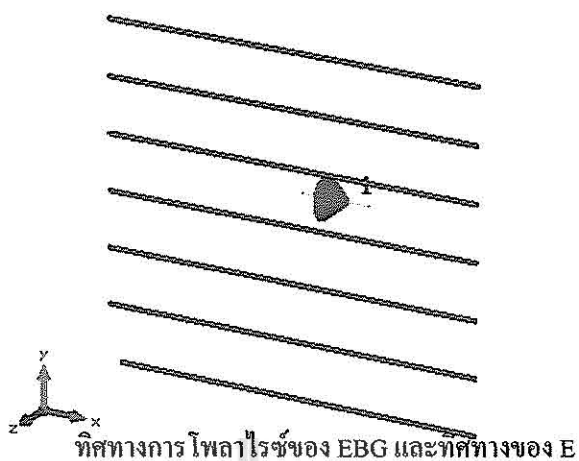


(ก) โครงสร้าง

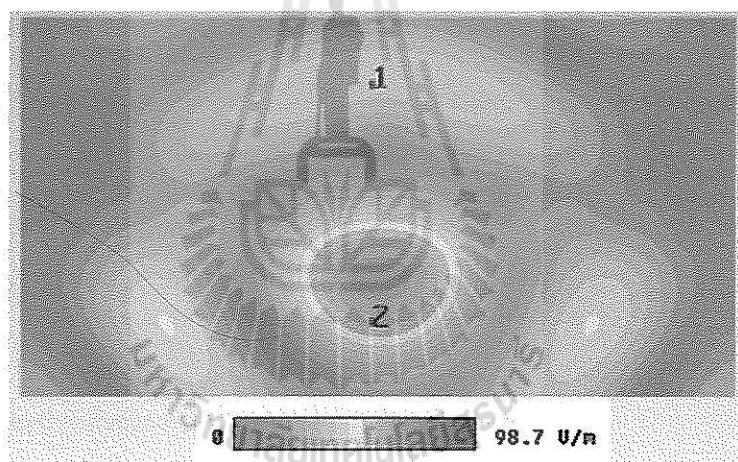


(ข) การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้

รูปที่ 2.5 ผลการจำลองแบบแผนการโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง



(ก) โครงสร้าง



(ข) การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าระยะใกล้

รูปที่ 2.6 ผลการจำลองแบบแผนการ โพลาริซซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง

จากทฤษฎีข้างต้นแสดงให้เห็นว่าช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าจะกีดขวางทิศทางการเดินทางของคลื่นในทิศทางแกน  $x$  และ  $y$  ในแบบแผนการ โพลาริซซ์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวาง ตามลำดับ ถ้าทิศทางสนามไฟฟ้าอยู่ในวงตัวอยู่แนวตรงกันกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าคลื่นส่วนน้อยจะสามารถผ่านไปได้ แต่คลื่นส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับขึ้นมา

จนสามารถเรโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้หลักการนี้จะสามารถเพิ่มอัตราขยายเชิงทิศทางของสายอากาศได้สูงขึ้นมาก

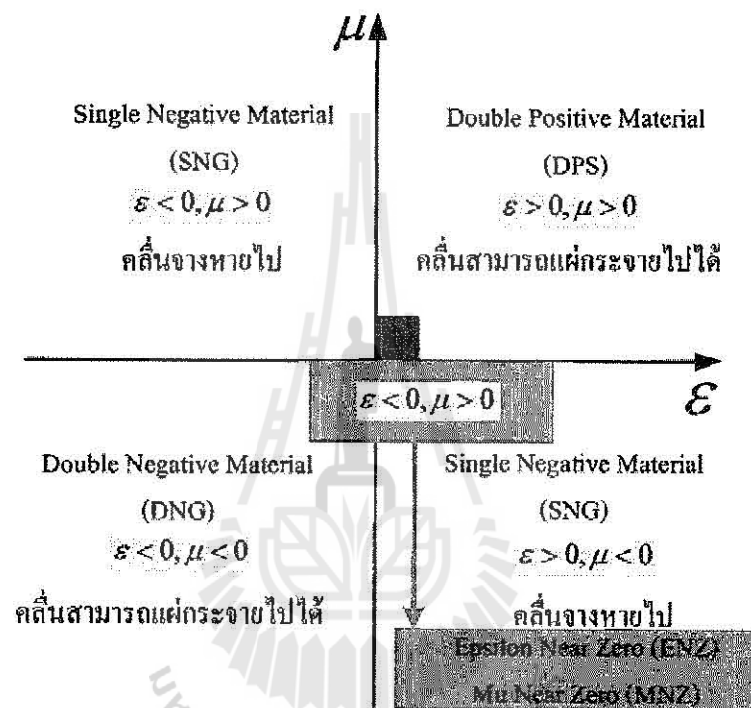
### 2.3 อภิวัดสุ ( Metamaterials )

อภิวัดสุหรือวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม คือ วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าถูกสังเคราะห์หรือออกแบบขึ้นอย่างเหมาะสมเพื่อให้สนามไฟฟ้า (Electric fields) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic fields) ทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (Artificial atoms) เกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ เช่น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ( Electric permittivity ;  $\epsilon$ ) ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability ;  $\mu$ ) และค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index ;  $n$ ) โดยทั่วไปวัสดุทางธรรมชาติจะมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นบวก ซึ่งเกิดได้จากอะตอมของเนื้อวัสดุนั้นๆ ทำปฏิกิริยาร่วมทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเราทำการออกแบบอะตอมเทียมสำหรับอภิวัดสุให้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เราสามารถออกแบบคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติได้ เช่น ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นลบและค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ เป็นต้น จากคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวของอภิวัดสุสายอากาศเป็นสาขาหนึ่งในการนำอภิวัดสุมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงได้แบ่งกลุ่มตามการประยุกต์ใช้งานของอภิวัดสุสำหรับสายอากาศ ดังนี้

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศขนาดเล็ก
2. เพื่อใช้ในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์ ( Artificial Conductor )
3. เพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง ( Substrate Material )
4. เพื่อใช้ในการออกแบบชั้นวางซ้อน ( Superstrate ) หรือฝาครอบ ( Radome )
5. เพื่อลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและระบบ MIMO
6. เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นรั่วและเรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์
7. เพื่อควบคุมทิศทางการลำคลื่น ( Steering Beam Antennas )

ในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่มีดัชนีหักเหที่มีค่าเป็นลบ เนื่องจาก  $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$  ดังนั้นดัชนีหักเหเป็นลบจึงเกิดจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่เป็นลบทั้งคู่ จะเรียก

วัสดุที่ว่า DNG (Double Negative Medium) ซึ่งมีคุณสมบัติตรงข้ามกับวัสดุในธรรมชาติที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่เป็นบวกทั้งคู่ (Double Positive Medium ; DPS) นอกจากนี้วัสดุบางชนิดอาจจะมีค่า  $\epsilon$  หรือ  $\mu$  อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นลบเรียกว่ วัสดุที่ว่า SNG (Single Negative Medium) โดยที่วัสดุที่มีค่า  $\epsilon$  เป็นลบเรียกว่า ENG (Epsilon Negative Medium) ส่วนวัสดุที่มีค่า  $\mu$  เป็นลบเรียกว่า MNG (Mu Negative Medium)



รูปที่ 2.7 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

### 2.3.1 การประยุกต์ใช้งานอภิวัดูดสำหรับสายอากาศ

- การใช้อภิวัดูดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก

เนื่องจากสายอากาศขนาดเล็กโดยทั่วไปจะมีกำลังการแผ่กระจาย ( $P_{rad}$ ) ที่ค่อนข้างต่ำหรือมีประสิทธิภาพการแผ่คลื่นต่ำ โดยในที่นี้สมมติว่าแหล่งกำเนิดคือ ไดโพลขนาดเล็กที่มีโมเมนต์ของกระแสเท่ากับ  $I_0 \ell$  วางไว้ตรงกลางของทรงกลมรัศมี  $a$  ที่ถูกบรรจุด้วยวัสดุ DPS (ปกติคืออากาศว่าง) ดังนั้นกำลังการแผ่กระจายคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

$$P_{dipole} = \eta \frac{\pi}{3} \left| \frac{I_0 \ell}{\lambda} \right|^2 \left[ 1 - \frac{j}{(ka)^3} \right] = P_{real} + jP_{im} \quad (1)$$

โดยกำลังการแผ่กระจายคลื่นในส่วนจินตภาพเท่ากับ

$$P_{dipole}^{im} = -\eta \frac{\pi}{3} \left| \frac{I_0 \ell}{\lambda} \right|^2 \left[ \frac{j}{(ka)^3} \right] \quad (2)$$

ในทางกลับกันถ้าบรรจุด้วยวัสดุ DNG โดยการแทนค่า  $\epsilon \rightarrow -\epsilon$  และ  $\mu \rightarrow -\mu$  ดังนั้น  $K_{real} \rightarrow -|K_{real}|$  และ  $\eta \rightarrow +\eta = \sqrt{|\epsilon|} / \sqrt{|\mu|}$  สำหรับกรณีที่ไม่เกิดการสูญเสีย  $K \rightarrow -|K| = -w\sqrt{|\epsilon|}\sqrt{|\mu|}$  เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ของกำลังการแผ่กระจายคลื่นของไดโพลที่บรรจุใน DPS และ DNG มีค่า  $P_{dipole}^{DPS} = P_{dipole}^{DNG}$  จะพบว่า  $P_{DNG}$  ในส่วนจริงจะมีค่าเป็นบวก เหมือนกับ DPS ขณะที่ส่วนจินตภาพจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งตรงกันข้ามกับ DPS ซึ่งมีค่าเป็นลบตามสมการที่ (2) ไดโพลไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการเข้าคู่ (Match) กับอิมพีแดนซ์ของไดโพลในอวกาศว่างได้ ซึ่งผลที่ได้คือจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเพิ่มขึ้น รวมทั้งสายอากาศยังคงมีขนาดเล็กเพราะใช้ไดโพลเล็กในการออกแบบ

นอกจากนี้การนำวัสดุที่มีคุณสมบัติ ENG ไปล้อมรอบสายอากาศไมโนโพลขนาดเล็กซึ่งสามารถทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 98% รวมทั้งยังคงมีขนาดเล็กจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองจึงสามารถนำวัสดุ ENG มาใช้ในการแมตซ์ ซึ่งเพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ และการอยู่เป็นคู่ (Duality) ของวัสดุ ENG คือ วัสดุ MNG ก็สามารถนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก (ไดโพลแม่เหล็ก) ได้เช่นกัน รวมทั้งค่าของ  $\mu$  ที่มีค่าเป็นลบไม่จำเป็นต้องมีค่าขนาดใหญ่ ดังนั้นทั้งสามกรณีในการนำวัสดุ DNG ENG และ MNG มาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็กได้

- การใช้วัสดุในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์

โดยทั่วไปสายอากาศจะใช้ระนาบกราวด์ด้วยตัวนำทางไฟฟ้า (Electric Conductor) ซึ่งในทางอุดมคติจะเรียกว่า ตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ PEC ( Perfect Electric Conductor ) ส่วนตัวนำทางแม่เหล็ก ( Magnetic Conductor ) ในทางอุดมคติจะเรียกว่า ตัวนำทางแม่เหล็กสมบูรณ์ PMC (Perfect Magnetic Conductor) โดย PEC และ PMC มีคุณสมบัติที่ต่างกันคือ PEC จะสะท้อนคลื่นระนาบและมีเฟสที่สะท้อนกลับเท่ากับ  $180^\circ$  หรือ  $\pi$  (Out-of-phase) ขณะที่ PMC จะมีเฟสที่สะท้อนกลับเป็น  $0^\circ$  (In-phase) เนื่องจากตัวนำทางแม่เหล็กไม่มีอยู่จริงแต่เป็นตัวนำที่สมมติขึ้นมาเพื่อใช้ในการอธิบายการเป็นคู่กันของตัวนำทางไฟฟ้างั้น ตัวนำทางแม่เหล็กจึงเป็นตัวนำประดิษฐ์ซึ่งเรียกว่า ตัวนำแม่เหล็กประดิษฐ์ (Artificial Magnetic Conductor ;AMC) โดย AMC

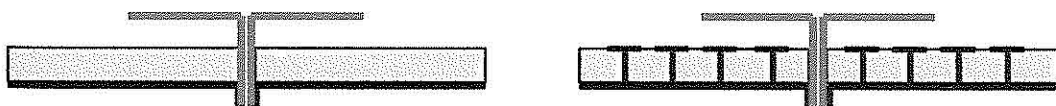
สามารถสร้างขึ้นมาจากสองโครงสร้างหลักๆ คือ ช่องแถบว่างแม่เหล็กไฟฟ้า ( Electromagnetic Bandgap: EBG ) ซึ่งเป็นหนึ่งในอภิวัตถุ รวมทั้งผิวที่มีอิมพีแดนซ์สูง

โดยทั่วไป EBG จะประกอบด้วย โลหะรูปต่างๆ ที่เป็นรอยคาบวางบนระนาบกราวด์ที่แยกด้วยชั้นรอง ไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อาจจะเชื่อมต่อ ( $V_{in}$ ) หรือไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ก็ได้ โดยที่  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$  วัสดุมีความกว้าง  $d$

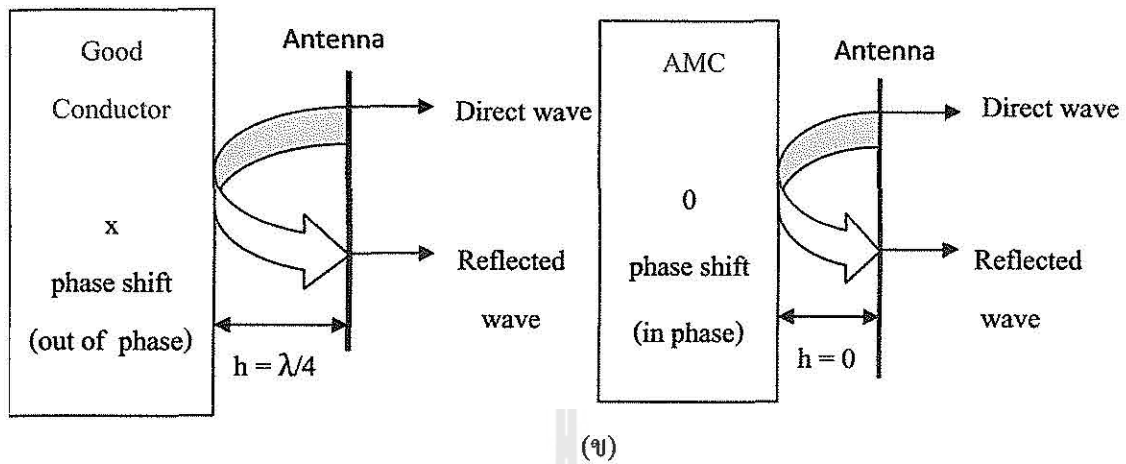
$$\text{reflection} = S_{11} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \left( \frac{1 - e^{-j2kd}}{1 - \left( \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \right)^2 e^{-j2kd}} \right) \quad (3)$$

$$\text{transmission} = S_{21} = \frac{4\eta\eta_0}{(\eta + \eta_0)^2} \left( \frac{e^{-j2kd}}{1 + \left( \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \right)^2 e^{-j2kd}} \right) \quad (4)$$

ตัวอย่างการใช้งานทั้ง EBG และ AMC แสดงดังรูป 2.8 ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ใช้ในการออกแบบเพื่อลดขนาดสายอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ โดยในรูป 2.8(ก) เมื่อวางไดโพลขนานระนาบกราวด์จะทำให้ภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดได้ระนาบกราวด์มีทิศทางของกระแสตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดจริงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต่ำ ในขณะที่เมื่อวางไดโพลขนานกับระนาบ EBG ทิศทางกระแสของภาพเสมือนแหล่งกำเนิดจะมีทิศทางเดียวกันกับแหล่งกำเนิดจริงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศสูงและ EBG ยังช่วยในการกำจัดคลื่นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนรูป 2.8(ข) เป็นการแทนตัวสะท้อนโลหะด้วย AMC โดยปกติจะวางสายอากาศเหนือตัวสะท้อนโลหะที่ระยะทาง  $\lambda/4$  เพื่อให้คลื่นสะท้อนกลับมาจากตัวสะท้อนโลหะมีเฟสเดียวกันกับคลื่นที่ส่งออกโดยตรงที่สายอากาศ จากแนวคิดคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันนี้ตรงกันกับคุณสมบัติของ AMC ดังนั้นจึงสามารถนำ AMC แทนตัวสะท้อนโลหะได้และจะลดระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับสายอากาศลดลงโดยตามอุดมคติสามารถวางสายอากาศติดกับตัวสะท้อนได้



(ก)



รูปที่ 2.8 การนำ (ก) EBG และ (ข) AMC มาใช้กับสายอากาศเพื่อลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพ

• การใช้วัสดุในการออกแบบวัสดุฐานรอง

การลดขนาดของสายอากาศแผ่นพิมพ์ ( Printed Antenna ) หรือสายอากาศไมโครสตริป ส่วนใหญ่สามารถทำได้โดยการใช้แผ่นพิมพ์หรือวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ;  $\epsilon_r$ ) ที่สูง เนื่องจากความยาวคลื่นในแผ่นพิมพ์  $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$  อย่างไรก็ตามผลจากการเพิ่ม  $\epsilon_r$  ให้สูงขึ้นปกติแล้วจะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศลดลง รวมทั้งจะทำให้เกิดคลื่นผิว (Surface wave) มากขึ้นซึ่งทำให้ประสิทธิภาพสายอากาศลดลง จากความสัมพันธ์

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (5)$$

จะพบว่านอกจาก  $\epsilon_r$  แล้วยังสามารถเพิ่ม  $\mu_r$  ได้เช่นกัน แต่ข้อจำกัดของการเพิ่ม  $\mu_r$  คือ วัสดุที่มีค่า  $\mu_r$  สูง จะใช้ได้กับความถี่ที่ไม่สูงมากนักหรือที่ใช้ได้ก็มีราคาค่อนข้างสูงมาก เมื่อเทียบกับแผ่นที่มี  $\epsilon_r$  สูง แต่ข้อดีของวัสดุที่มีค่า  $\mu_r$  สูงที่เหนือกว่าการเพิ่ม  $\epsilon_r$  สูงคือการเข้าคู่กันของอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance ;  $\eta$ ) ของวัสดุกับอิมพีแดนซ์ของคลื่นในอวกาศว่าง ( $\eta_0 = 120\pi$ ) โดยที่

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (6)$$

ซึ่งจะพบว่าเมื่อเพิ่ม  $\epsilon_r$  ให้สูงขึ้น  $\eta$  จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและห่างออกจาก  $\eta_0$  ในทางตรงกันข้ามในการเพิ่ม  $\mu_r$  จะสามารถทำให้  $\eta_0$  และ  $\eta$  เข้าคู่กันได้ เพื่อข้ามข้อจำกัดของวัสดุ



แม่เหล็กที่มีตามธรรมชาติและข้อดีของการเพิ่ม  $\mu_r$  ในการออกแบบสายอากาศ จึงมีผู้วิจัยหลายท่านนำแนวคิดของอภิวัดคุมออกแบบในการเพิ่ม  $\mu_r$  โดยไม่ใช้วัสดุแม่เหล็ก (Non-magnetic Material) แต่ใช้การผนวกกันของโลหะหรือ(และ) ชั้นไดอิเล็กตริกในการออกแบบวัสดุแม่เหล็กประดิษฐ์ (Artificial Magnetic Material ; AMM) โดยเฉพาะการนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นพิมพ์และไมโครสตริปจะเรียกอภิวัดคุมที่มี  $\mu_r$  และ  $\epsilon_r$  มากกว่าหนึ่งว่า วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก (Magneto-dielectric Material ; MDM) มีการนำเสนอการออกแบบวัสดุแม่เหล็กประดิษฐ์ที่มี  $\mu_r$  มากกว่าหนึ่ง เพื่อให้สายอากาศไมโครสตริปมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากขึ้นตามอัตราส่วนของ  $\mu_r / \epsilon_r$  และมีขนาดที่ลดลงตามตัวประกอบการทำให้ขนาดลดลง  $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$

- การใช้อภิวัดคุมในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบ

ในความเป็นจริงชั้นวางซ้อน (Superstrate) ก็คือวัสดุฐานรองอย่างหนึ่งแต่ถูกนำมาวางไว้บนหรือครอบสายอากาศ ซึ่งการใช้อภิวัดคุมในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบ (Radome) วางบนหรือครอบสายอากาศ (โดยปกติจะใช้สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศร่อง) โดยส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ โดยมีการเพิ่มชั้นวางซ้อนที่มีคุณสมบัติคือค่าดัชนีการหักเห ( $n$ ) มีค่าเท่ากับ ZRI (Zero Refractive Index) หรือใกล้เคียงศูนย์ NZR (Near Zero Refraction) ตามกฎของสเนลล์ คือเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่มี  $n = 0$  คลื่นจะตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสหรือคลื่นจะขนานกันออกไปดังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8 เมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่า  $n_1 \rightarrow 0$  ดังนั้นมุมของคลื่นที่ออกจากตัวกลางที่หนึ่ง ไปยังตัวกลางที่สอง ( $\theta_2$ ) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือตั้งฉากกับผิว ดังสมการที่ (7)

$$\theta_2 = \sin^{-1}(n_1 / n_2 \sin \theta_1) \quad (7)$$

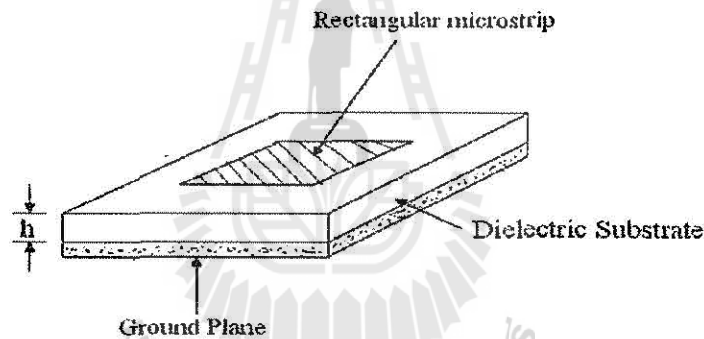
ดังนั้นชั้นวางซ้อนจึงเปรียบเสมือนอุปกรณ์บังคับทิศทางคลื่นให้ขนานออกไป (Directive Confining Device) ผลที่ได้คือ การทำให้สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ในทิศทางบรอดไซด์ (Broadside) ของสายอากาศเพิ่มขึ้นหรือถ้าวิเคราะห์ในมุมของเรโซเนเตอร์จะพบว่าการจัดวางสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่างและการวางชั้นวางซ้อนไว้ด้านบนเปรียบเสมือนการมีแผ่นกระจกสะท้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงมากสองแผ่นขนานกันในระยะที่เหมาะสม (โดยปกติมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้งจนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ แบบ Fabry-Perot ผลที่เกิดขึ้นคือ ทำให้สายอากาศมีสภาพ

เจาะจงทิศทางที่สูงมากเพราะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor:  $Q$ ) ที่สูง แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากมี  $Q$  ที่สูงดังนั้นแบนด์วิดท์ของสายอากาศจะแคบมากๆ เช่นกัน

## 2.4 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

### 2.4.1 คุณลักษณะพื้นฐานสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างรูปร่างสายอากาศแบบไมโครสตริปมีหลากหลายรูปแบบแต่ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางคือรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โครงสร้างตัวสายอากาศประกอบด้วยแผ่นโลหะรูปบางๆ มีหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ตั้งวางอยู่บนชั้นฉนวนที่หนาเป็นฉนวน ในขณะที่ด้านล่างนั้นจะเป็นชั้นโลหะบางๆ เช่นกัน ซึ่งโลหะดังกล่าวมีหน้าที่เป็นระบบกราวด์ให้กับตัวสายอากาศ



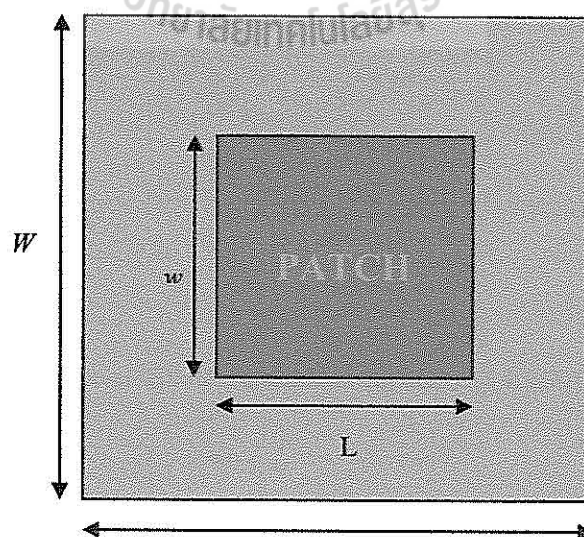
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริปนี้สามารถจะกำจัดให้ลดน้อยลงได้ ถ้าได้รับการออกแบบให้ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ

• ข้อดีและข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริป

ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีขนาดเล็ก ปริมาณน้อย จึงไม่ต้านลม</li> <li>- น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน</li> <li>- สร้างได้ง่าย ราคาถูก</li> <li>- ต่อเข้ากับวงจรได้ง่าย</li> <li>- สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบวงกลม โดยการเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ และรูปร่างของแผ่นแผ่พลังงานที่ใช้</li> <li>- สามารถป้อนสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้พร้อม ๆ กับการสร้างสายอากาศ</li> <li>- สามารถสร้างเป็นสายอากาศแถวลำดับ (Array) ได้ง่าย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- มีแถบความถี่ (Bandwidth) แคบมาก</li> <li>- มีกำลังในการแผ่พลังงานต่ำ</li> <li>- มีการสูญเสีย (Loss) มาก โดยมักเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อและจุดป้อนสัญญาณ จึงทำให้มีอัตราขยายต่ำ</li> <li>- การแพร่กระจายได้ไม่กว้างไกลและไม่สมบูรณ์คือมีการแผ่พลังงานได้เพียงครึ่งระบบ</li> <li>- สายอากาศอาจเกิดออกไซด์บริเวณผิว ทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น</li> <li>- ต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารที่ใช้ทำสายอากาศ</li> </ul>

2.4.2 หลักการและสมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของค่าพารามิเตอร์

การคำนวณหาความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นตัวนำ จาก

$$w = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (9)$$

โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสง เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

$f_0$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน

จากนั้นนำค่า  $w$  แทนค่าในสมการที่ (10) เพื่อคำนวณหา Effective dielectric constant ( $\epsilon_{eff}$ )

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

โดยที่  $h$  คือ ความสูงของฉนวน

เมื่อได้  $\epsilon_{eff}$  แล้ว นำมาคำนวณหา Effective Length ( $L_{eff}$ ) จากสมการที่ (11)

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (11)$$

คำนวณหาความยาวที่แผ่ขยายออก ( $\Delta L$ ) โดยการแทนค่าที่ได้จากสมการที่ (9) และ (10)

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (12)$$

แทนค่าที่ได้จากสมการ (11) และ (12) ในสมการที่ (13) เพื่อคำนวณหาความยาวของ Patch ( $L$ )

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (13)$$

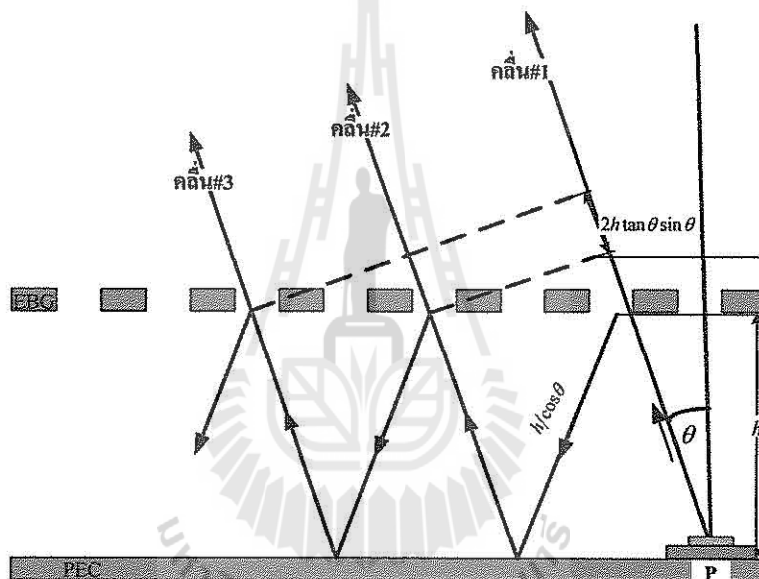
คำนวณหาขนาดของแผ่น Ground และแผ่นฉนวน ( $L_g$  และ  $W_g$ ) จากสมการที่ (14) และ (15)

$$L_g = 6h + L \quad (14)$$

$$W_g = 6h + w \quad (15)$$

## 2.5 สายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้สตริปร่วมกับ EBG

การจำลองแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบคือ ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศไมโครสตริปที่ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนและระนาบกราวด์ ซึ่งก็คือแผ่นตัวนำสมบูรณ์ ( Perfect electric conductor ; PEC) นั่นเอง ถ้าสายอากาศถูกวางไว้ระหว่างระนาบกราวด์และช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า จากรูปที่ 2.11 การแผ่พลังงานของสายอากาศตัวป้อนมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด P โดยที่แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศสตริปมีค่าเท่ากับ  $f(\theta)$  ระหว่างระนาบกราวด์และช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ  $h$  และสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ  $\gamma e^{j\phi_{EBG}}$



รูปที่ 2.11 การสะท้อนของคลื่นระหว่างระนาบกราวด์ และช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า

สมมติให้การส่งผ่านไม่เกิดการสูญเสีย แอมพลิจูดของคลื่นตัวที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{1-\gamma^2}$  และแอมพลิจูดของคลื่นตัวที่ 2 ซึ่งเกิดการสะท้อนกลับ 1 ครั้ง จะมีค่าเท่ากับ  $\gamma\sqrt{1-\gamma^2}$  ในทำนองเดียวกัน แอมพลิจูดของคลื่นตัวที่ 3 ที่เกิดการสะท้อนกลับ 2 ครั้งก็จะมีค่าเท่ากับ  $\gamma^2\sqrt{1-\gamma^2}$  ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าสามารถพิจารณาจาก

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} f(\theta) E_0 \gamma^n \sqrt{1-\gamma^2} e^{j\Delta\phi_n} \quad (16)$$

เมื่อ  $\Delta\phi$  คือความต่างเฟส โดยที่เราสามารถหาค่าความต่างเฟสระหว่างคลื่นตัวที่ 1 และ 2 หาได้จาก

$$\Delta\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \tan\theta \sin\theta - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h}{\cos\theta} - \phi_{PEC} + \phi_{EBG} \quad (17)$$

และค่าความต่างเฟสระหว่างคลื่นตัวที่ 1 และ 3 หาได้จาก

$$\Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} 4h \tan\alpha \sin\alpha - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{4h}{\cos\alpha} - 2\phi_{PEC} + 2\phi_{EBG} \quad (18)$$

ดังนั้นถ้ามีจำนวนคลื่นเท่ากับ  $n$  จะได้

$$\Delta\phi_n = n\Phi = n \left[ -\frac{4\pi}{\lambda} h \cos\alpha - \phi_{PEC} + \phi_{EBG} \right] \quad (19)$$

เมื่อ  $p < 1$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (\gamma e^{j\Phi})^n = \frac{1}{1 + \gamma e^{j\Phi}} \quad (20)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$|E| = |E_0| f(\theta) \sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos\Phi}} \quad (21)$$

สามารถหาแบบรูปการแผ่กำลังงานได้ดังนี้

$$S = \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos\left(\phi_{EBG} - \phi_{PEC} - \frac{4\pi}{\lambda} h \cos\theta\right)} f^2(\theta) \quad (22)$$

อย่างไรก็ตามแอมพลิจูด ( $\gamma$ ) และเฟส ( $\phi_{EBG}$ ) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า อยู่ในฟังก์ชันของมุม  $\theta$  กำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ  $\theta = 0$  องศา

$$\phi_{EBG} - \phi_{PEC} - \frac{4\pi}{\lambda} h = 0 \quad (23)$$

ดังนั้นระยะห่างระหว่างระนาบกราวด์และช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h \cong \left( \frac{c}{2f} \right) \left( \frac{\phi_{EBG} - \phi_{PEC}}{360} \right) + N \frac{\lambda}{2} \quad (24)$$

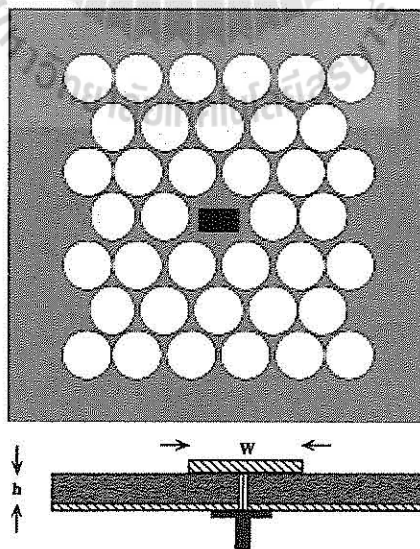
เมื่อ  $N = 0, 1, 2, 3, \dots$

### 2.5.1 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap)

ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเป็นคาบ ประกอบไปด้วย ไดอิเล็กตริก (dielectric) โลหะหรือวัสดุเมตาโล ไดอิเล็กตริก (metallo-dielectric materials) ที่ซึ่งสามารถกีดขวางการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางและความถี่ที่เจาะจง ดังนั้นช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าสามารถนำไปใช้เป็นตัวกรอง (filter) ระยะเวลาถี่ นี้เป็นการแสดงความหลากหลายทางโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศ ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

- **พื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Surfaces)**

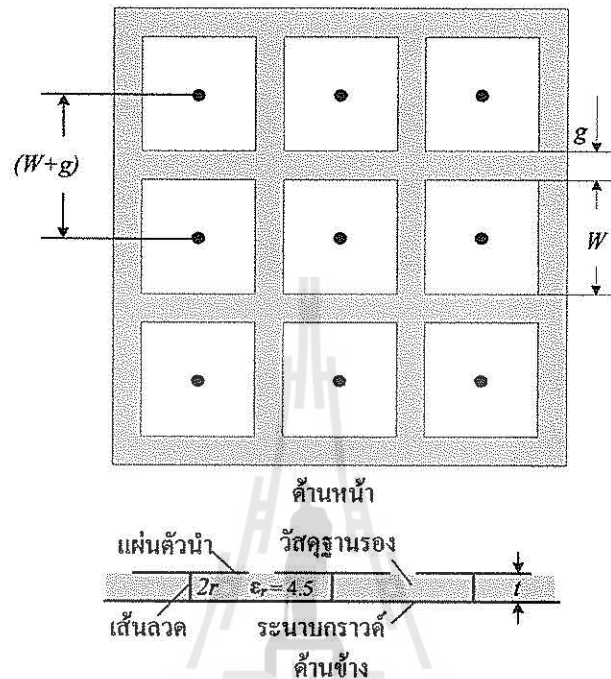
สามารถเรียกโครงสร้างแบบนี้ได้อีกชื่อว่า โครงสร้างแบบสองมิติ ที่สามารถนำไปใช้กับสายอากาศไมโครสตริปเพื่อกำจัดคลื่นผิว (surface wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองมิติและสายอากาศไมโครสตริป

• พื้นผิวประดิษฐ์ (Artificial Surfaces)

เช่นตัวนำแม่เหล็กประดิษฐ์และพื้นผิวจินตภาพ (reactive surface) เพื่อออกแบบสายอากาศสัญญาณต่ำ (low profile antenna) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นผิวแบบดอกเห็ด

### 2.5.2 สายอากาศเรโซเนเตอร์สภาพเจาะจงทิศทางสูง (High Directive Resonator Antenna)

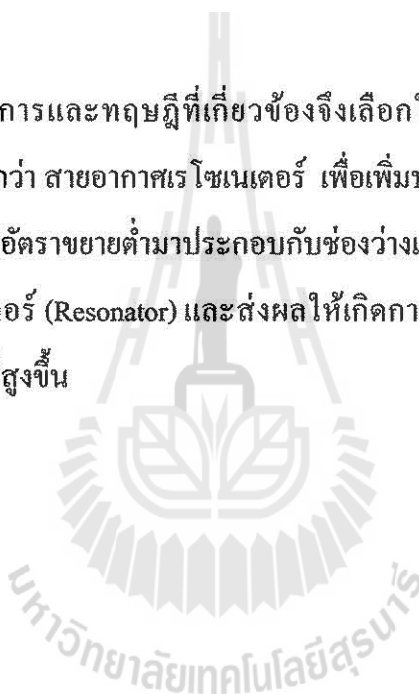
ซึ่งถูกออกแบบด้วยพื้นฐานของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเป็นแบบเดียวกัน ข้อบกพร่องที่นำไปสู่การสร้างความถี่เฉพาะในช่องว่างแถบของโครงสร้างที่ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายไปได้ ในโหมดที่โพรงช่องว่างทำงานคล้ายกับที่ว่างและตัวกรองความถี่ที่มีค่า Q factor สูง ถ้าแหล่งกำเนิดเริ่มต้นถูกยึดติดไว้กับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า มีความเป็นไปได้ว่ารูปแบบการแผ่พลังงานในช่วงแถบความถี่ที่เราต้องการมีโครงสร้างของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์ที่มีค่าสภาพจงทิศทางสูง เช่น แผ่นโลหะไดอิเล็กตริกแบบหลายชั้น แผ่นโลหะแบบหลายชั้นสร้างจากไดอิเล็กตริกหรือแท่งโลหะ และพื้นผิวเลือกความถี่แบบหลายชั้น



สำหรับแหล่งจ่ายเบื้องต้น เช่น สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศอะพोजอร์ โดยมีช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่เป็น วัสดุไดอิเล็กทริกวางซ้อนทับด้านบน (superstrate) เป้าหมายหลักของการนำช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้คือ เพิ่มอัตราขยายของแหล่งจ่าย นอกจากนี้สายอากาศชนิดนี้จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเพื่อที่ให้มีกำลังงานสะท้อนที่ต่ำพอ และทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ที่แมตซ์เป็นอย่างดี

## 2.6 สรุป

จากการศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจึงเลือกใช้อิทธิพลวัสดุเป็นตัวครอบด้านบนสายอากาศไมโครสตริป เรียกว่า สายอากาศเรโซเนเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยการนำสายอากาศสตริปที่มีอัตราขยายต่ำมาประกอบกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (EBG) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเรโซเนเตอร์ (Resonator) และส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต้องการ ออกแบบและมีอัตราขยายที่สูงขึ้น



## บทที่ 3

### การออกแบบและการจำลอง

#### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและการจำลองชิ้นงาน เพื่อสามารถนำไปสร้างชิ้นงานจริง โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และขนาดของชิ้นงานแล้วนำไปสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ในการศึกษาแวนโวม์และผลต่างๆ แล้วนำมาปรับค่าพารามิเตอร์และรูปแบบชิ้นงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลจำลองที่ต้องการ

#### 3.2 การศึกษาอภิวัด

ทำโดยการออกแบบอภิวัดหนึ่งหน่วย ในรูปแบบ 1 มิติและ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 เพื่อนำมาศึกษาความซึมซาบได้ (permeability หรือ  $\mu$ ) และค่าสภาพยอม (permittivity หรือ  $\epsilon$ ) หรือ สามารถคำนวณได้จาก

$$\epsilon_r \approx \frac{2}{jk_0 d} \frac{1-v_1}{1+v_1}$$

$$\mu_r \approx \frac{2}{jk_0 d} \frac{1-v_2}{1+v_2}$$

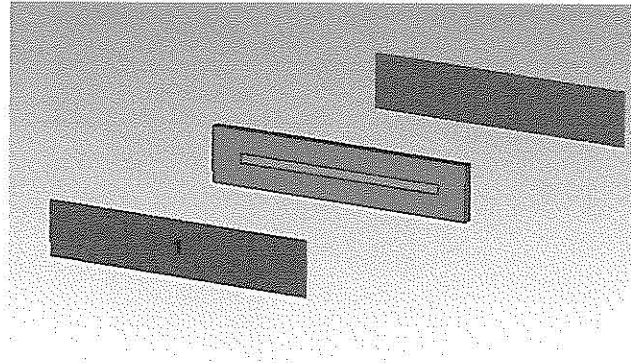
เมื่อ  $v_1$  =ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $s_{21}+s_{11}$ )

$v_2$  =ผลลบของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $s_{21}-s_{11}$ )

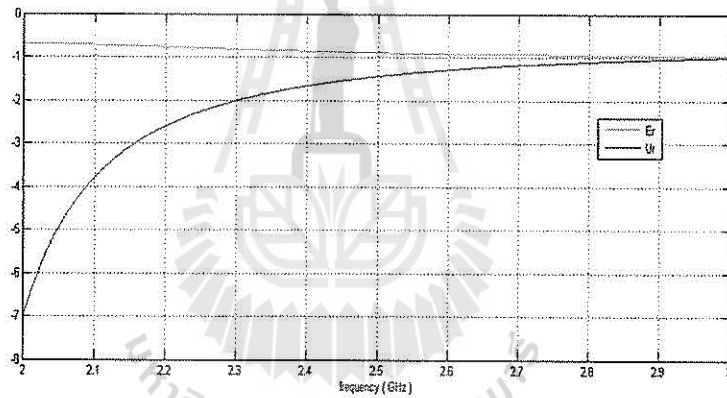
$$k_0 = \omega/c$$

$d$  = ความหนาไดอิเล็กตริก

$c$  = ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

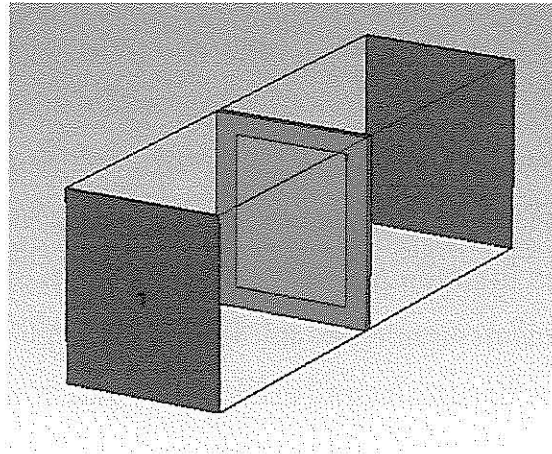


(ก) โครงสร้าง

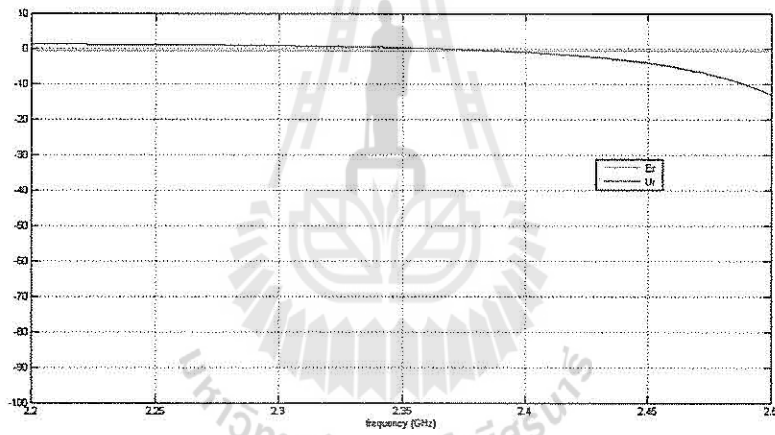


(ข) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซาบซิมได้ทางแม่เหล็ก

รูปที่ 3.1 ผลการจำลองแบบอภิวัดหนึ่งหน่วย 1 มิติ



(ก) โครงสร้าง



ข) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซาบซิม ได้ทางแม่เหล็ก

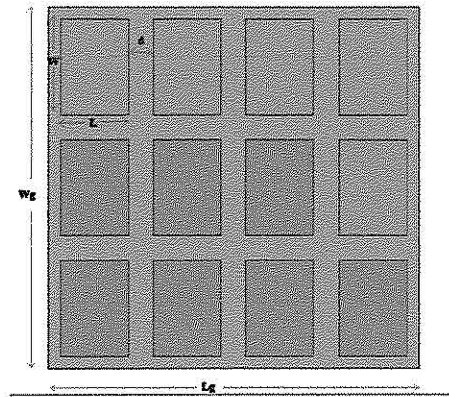
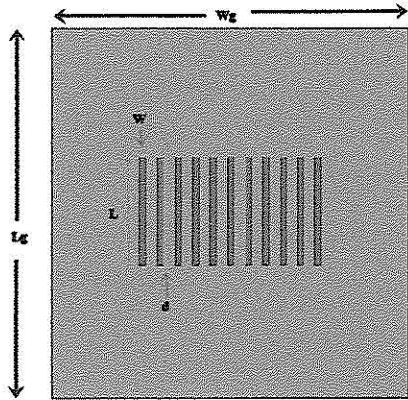
รูปที่ 3.2 ผลการจำลองแบบบอวิสต์ดูหนึ่งหน่วย 2 มิติ

จากผลการคำนวณ สรุปได้ดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 ว่าวัสดุชนิดนี้ถูกจัดอยู่ในอภิวัดตัวกลางชนิดสภาพยอมได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $\epsilon \geq 1$ ) หรือเรียกว่า MNZ (Mu Near Zero) ซึ่งมีคุณสมบัติแบบที่ให้คลื่นสามารถแพร่กระจายไปได้ แต่เนื่องจากค่าความซาบซึมได้ ( $\mu$ ) และสภาพยอม ( $\epsilon$ ) มีค่าเป็นบวกที่เข้าใกล้ศูนย์ และค่าบวกตามลำดับ จึงส่งผลให้อภิวัดตัวกลางชนิดนี้ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวที่สะท้อนคลื่นบางส่วนและส่งผ่านคลื่นบางส่วนจึงจัดได้ว่าวัสดุชนิดนี้เป็นช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ และ ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดสะท้อนบางส่วนและส่งผ่านบางส่วนซึ่งค่าพารามิเตอร์อ้างอิงเริ่มต้นในการออกแบบกำหนดให้ตามตารางที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือแท่งโลหะ (metallic rod) แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ทำการป้อนสัญญาณโดยเป็นคลื่นระนาบ (plane wave) ด้วยระยะห่างจากผิวของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ  $\lambda/2$  เมื่อคลื่นระนาบเดินทางด้วยระยะ  $\lambda/2$  ทั้งไปและกลับนั้น ส่งผลให้ค่าเฟสของคลื่นระนาบมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันก็จะสามารถทราบค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์แนวอน (EBG Polar H) ที่ออกแบบได้ ในที่นี้เป็นไปตามที่ต้องการคือสามารถสะท้อนกลับบางส่วนและส่งผ่านบางส่วน จากรูปที่ 3.3(ค) และ (ง) แสดงการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และ ค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ( $\phi_{EBGpolarH}$ ) 1 มิติเท่ากับ -71 องศา และค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ( $\phi_{EBGpolarH}$ ) 2 มิติเท่ากับ -51.41 องศา เมื่อพิจารณาที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมแสดงค่าพารามิเตอร์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ ดังตารางที่ 3.1

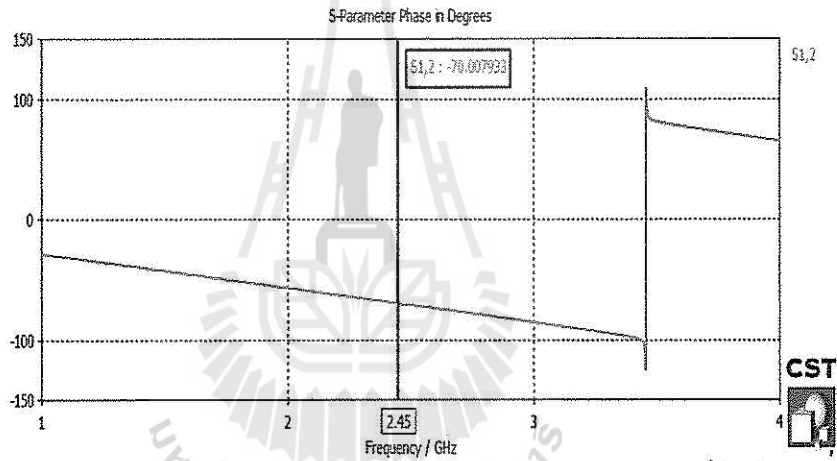
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์แนวอน

พารามิเตอร์ของสายอากาศ Patch	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)	
	1 มิติ	2 มิติ
w : ความกว้างของ Patch	2.44	36.92
L : ความยาวของ Patch	44.08	28.41
$W_g$ : ความกว้างของแผ่น Ground	150	46.52
$L_g$ : ความยาวของแผ่น Ground	150	38.01
d : ระยะห่างระหว่าง PEC	4.9	9.6

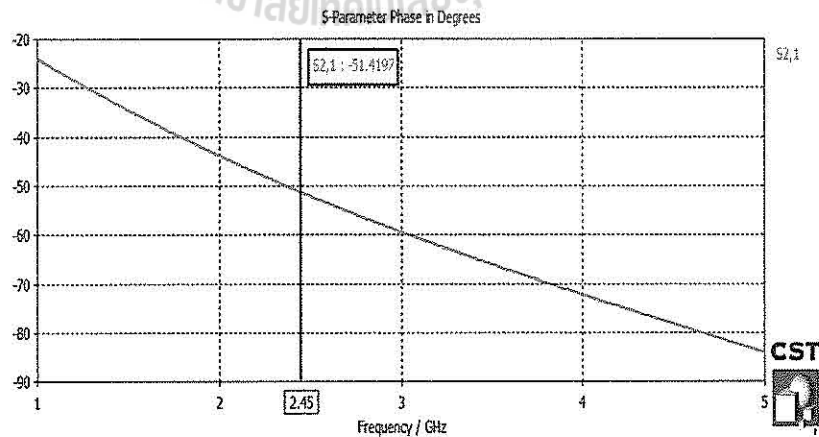


(ก) แบบจำลองช่องว่างความถี่แม่เหล็ก ไฟฟ้า 1 มิติ

(ข) แบบจำลองช่องว่างความถี่แม่เหล็ก ไฟฟ้า 2 มิติ



(ค) ค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับ ( $\phi_{S11EBGPolarH}$ ) ของช่องว่างความถี่ไฟฟ้า 1 มิติ



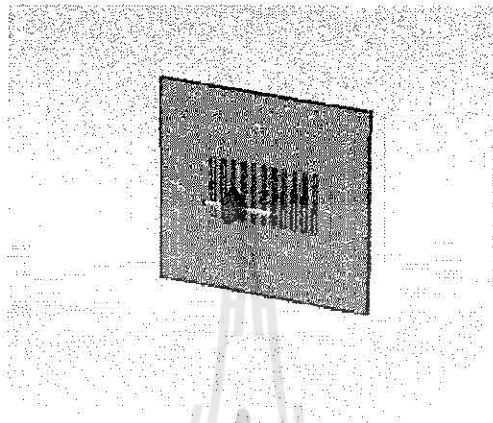
(ง) ค่าเฟสของการสูญเสียย้อนกลับ ( $\phi_{S11EBGPolarH}$ ) ของช่องว่างความถี่ไฟฟ้า 2 มิติ

รูปที่ 3.3 ผลจากการจำลองช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์แนวอน

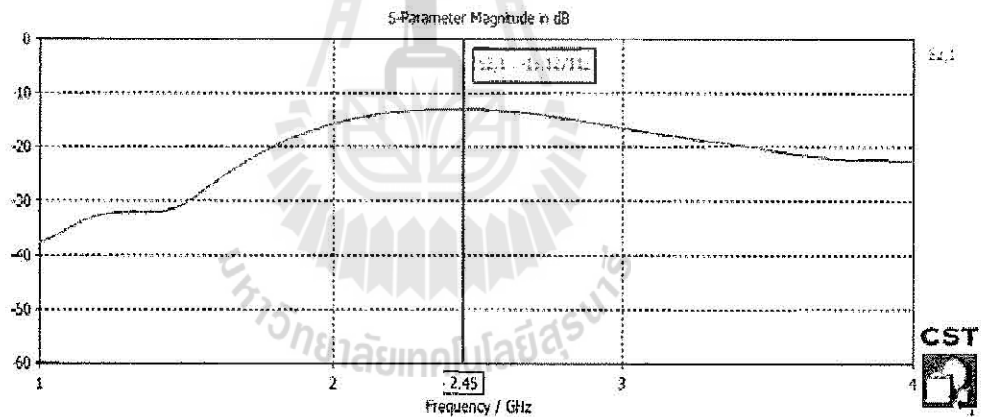
### 3.3 การโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติและ 2 มิติ

#### 3.3.1 การโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ

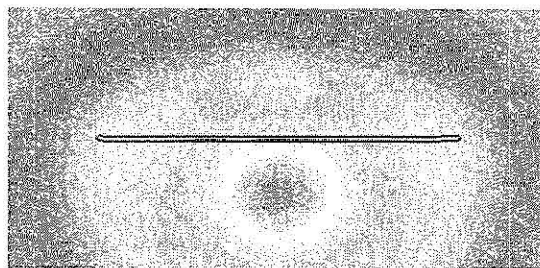
การโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Polarization Mode : TE)



(ก) โครงสร้าง EBG



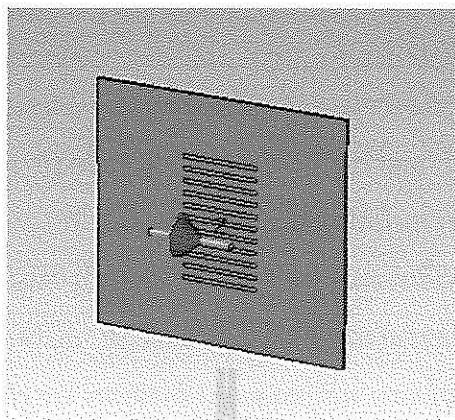
(ข) ค่า  $S_{21}$  จากการจำลองผลวัดชิ้นงาน



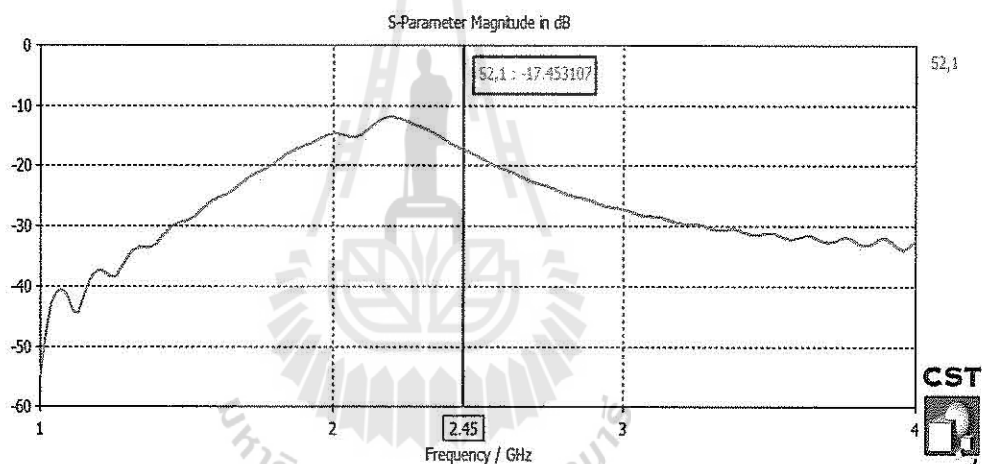
(ค) การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้

รูปที่ 3.4 ผลการโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง โหมด TE

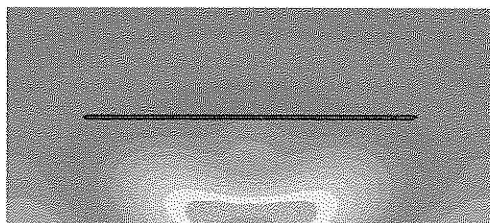
การโพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง( Transverse Magnetic Polarization Mode :TM )



(ก) โครงสร้าง EBG



(ข)  $S_{21}$  จากการจำลองผลวัดชิ้นงาน



(ค) การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้

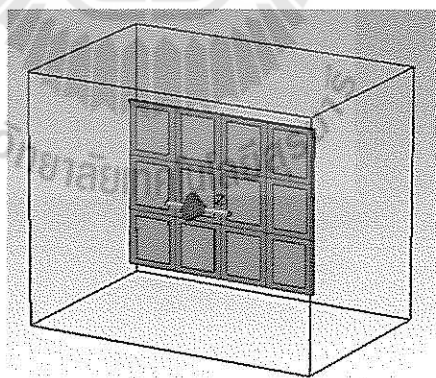
รูปที่ 3.5 ผลการโพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง โหมด TM



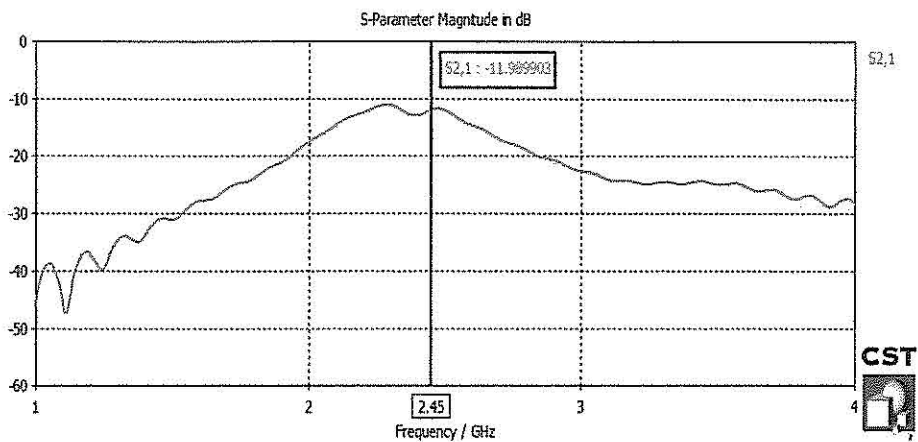
จากรูปที่ 3.4 (ก) และรูปที่ 3.5 (ก) แสดงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าในแบบ 1 มิติ โดยใช้ EBG จาก 1 unit มาเรียงต่อกันขนาด 4x3 โดยทำการป้อนสัญญาณสายอากาศโคโพล 2 ต้น วางห่างจาก EBG เป็นระยะ  $\lambda/2$  เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในกรณีการโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าตามขวาง (TE mode) และสนามแม่เหล็กตามขวางโหมด (TM mode) ดังรูปที่ 3.4 (ข) , (ค) และ รูปที่ 3.5 (ข) , (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวางนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) เท่ากับ  $-13.13$  dB พบว่าคลื่นส่วนใหญ่จะสามารถผ่านไปได้ แต่คลื่นส่วนน้อยจะสะท้อนกลับมา ส่วนการโพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวางนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) เท่ากับ  $-17.45$  dB พบว่าคลื่นส่วนน้อยจะสามารถผ่านไปได้ แต่คลื่นส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับไปมาจนสามารถเรโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งานได้ จากผลการจำลองในขั้นต้นจึงได้นำเอาหลักการของการ โพลาไรซ์สนามแม่เหล็กตามขวาง ไปประดิษฐ์สายอากาศเรโซเนเตอร์ เพื่อที่จะเพิ่มอัตราขยายเชิงทิศทางของสายอากาศให้สูงขึ้น ในบทต่อไป

### 3.3.2 การโพลาไรซ์ของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

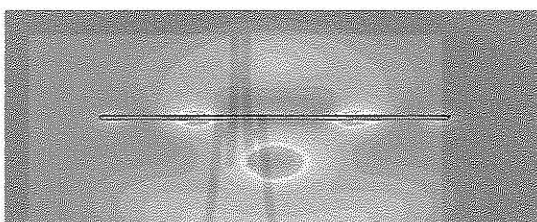
- การโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Polarization Mode : TE)



(ก) โครงสร้าง EBG

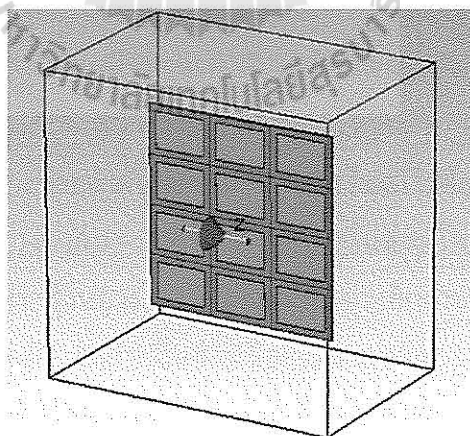


(ข) ค่า  $S_{21}$  จากการจำลองผลวัดชิ้นงาน

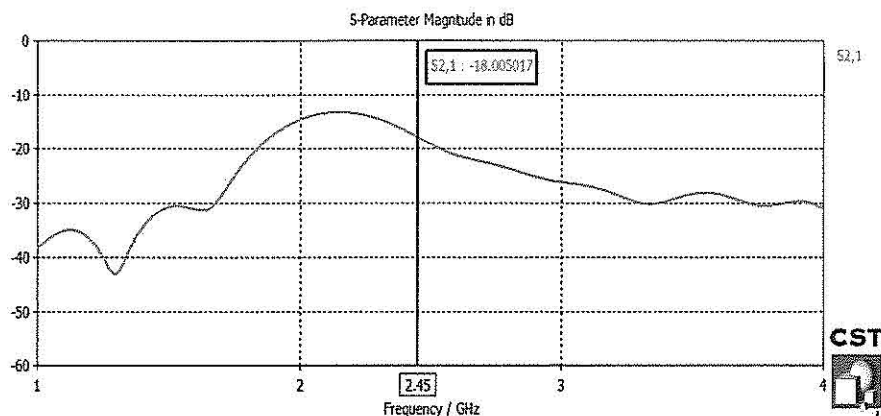


(ค) การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้  
รูปที่ 3.6 ผลการโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าตามขวาง โหมด TE

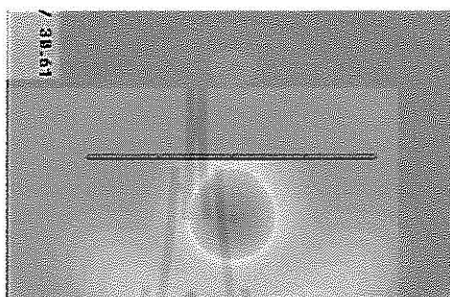
- การโพลาไรซ์ สนามไฟฟ้าตามขวาง(Transverse Magnetic Polarization Mode : TM )



(ก) โครงสร้าง EBG



(ข) ค่า  $S_{21}$  จากการจำลองผลวัดชิ้นงาน



(ค) การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าระยะใกล้

รูปที่ 3.7 ผลการโพลาริซชันแม่เหล็กตามขวาง โหมด TM

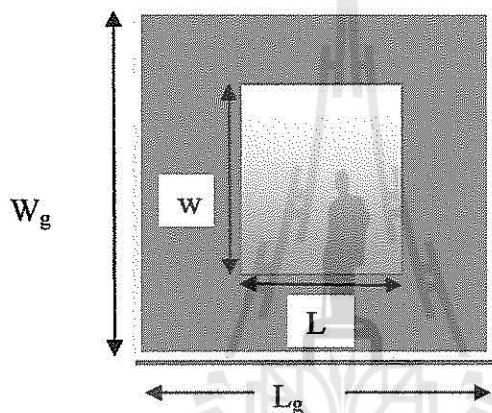
จากรูปที่ 3.6 (ก) และรูปที่ 3.7 (ก) แสดงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าในแบบ 2 มิติ โดยใช้ EBG จาก 1 unit มาเรียงต่อกันขนาด  $3 \times 4$  โดยทำการป้อนสัญญาณสายอากาศไดโพล 2 ดัน วางห่างจาก EBG เป็นระยะ  $\lambda/2$  เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ในกรณีการโพลาริซชันตามขวาง (TE mode) และสนามแม่เหล็กตามขวางโหมด (TM mode) ดังรูปที่ 3.6 (ข) , (ค) และ รูปที่ 3.7 (ข) , (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการโพลาริซชันตามขวางนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) เท่ากับ  $-11.98$  dB พบว่าคลื่นส่วนใหญ่จะสามารถผ่านไปได้ แต่คลื่นส่วนน้อยจะสะท้อนกลับมา ส่วนการโพลาริซชันแม่เหล็กตามขวางนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) เท่ากับ  $-18.00$  dB พบว่าคลื่นส่วนน้อยจะสามารถผ่านไปได้ แต่คลื่นส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับ ไปมาจนสามารถเรโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งานได้ จากผลการจำลองในขั้นต้นจึงได้นำเอาหลักการของการโพลาริซชันแม่เหล็กตามขวาง ไปประดิษฐ์สายอากาศเรโซเนเตอร์ เพื่อที่จะเพิ่มอัตราขยายเชิงทิศทางของสายอากาศให้สูงขึ้น เช่นเดียวกับการโพลาริซชันของช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 1 มิติ

### 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบชิ้นงานได้ออกแบบบนวัสดุที่เป็นอภิวัด ในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นงาน ดังนี้

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน (Dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็น แผ่น FR-4 มีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.5
2. ความสูงของฉนวน (h) เท่ากับ 1.6 mm.

#### การออกแบบ Patch Antenna และผลการจำลอง



รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบ

**Step 1 :** คำนวณหาความกว้าง (w) ของ Microstrip Patch Antenna

$$w = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $c = 3 \times 10^8$  m/s

$f_0$  คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ เท่ากับ  $2.45 \times 10^9$  Hz

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน เท่ากับ 4.5

แทนค่าในสมการที่ (3.1) จะได้

$$w = \frac{3 \times 10^8}{2(2.45 \times 10^9) \sqrt{\frac{(4.5 + 1)}{2}}}$$

$\therefore$  ความกว้างของ Microstrip Patch Antenna เท่ากับ 36.92 มิลลิเมตร

**Step 2 :** คำนวณหาค่า Effective dielectric constant ( $\epsilon_{eff}$ )

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของชั้นสเตรท เท่ากับ  $1.6 \text{ mm}$

แทนค่าในสมการที่ (3.2) จะได้ 
$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{(1.6 \times 10^{-3})}{(36.92 \times 10^{-3})} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$\therefore$  ค่า Effective dielectric constant เท่ากับ 4.2

**Step 3 :** คำนวณหาค่า Effective Length ( $L_{eff}$ )

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.3) จะได้ 
$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2(2.45 \times 10^9) \sqrt{4.91}}$$

$\therefore$  ค่า Effective Length เท่ากับ 29.88 มิลลิเมตร

**Step 4 :** คำนวณหาความยาวที่แผ่ขยายออก ( $\Delta L$ )

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.4)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.4) จะได้

$$\Delta L = 0.412 \times (1.6 \times 10^{-3}) \frac{(4.91 + 0.3) \left( \frac{36.92 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.264 \right)}{(4.91 - 0.258) \left( \frac{36.92 \times 10^{-3}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.8 \right)}$$

$\therefore$  ค่า Effective Length เท่ากับ 0.735 มิลลิเมตร

**Step 5 :** คำนวณหาความยาวของ Patch ( $L$ )

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.5) จะได้ 
$$L = (27.63 \times 10^{-3}) - 2(0.721 \times 10^{-3})$$

$\therefore$  ค่า Effective Length เท่ากับ 28.41 มิลลิเมตร

**Step 6 :** กำหนดหาขนาดของแผ่น Ground ( $L_g$  และ  $W_g$ )

$$L_g = 6h + L \quad (3.6)$$

$$W_g = 6h + w \quad (3.7)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) จะได้

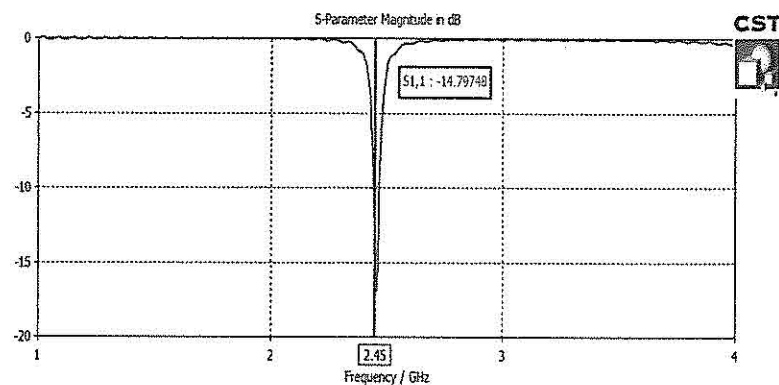
$$L_g = 6(1.6 \times 10^{-3}) + (26.188 \times 10^{-3})$$

$$W_g = 6(1.6 \times 10^{-3}) + (36.92 \times 10^{-3})$$

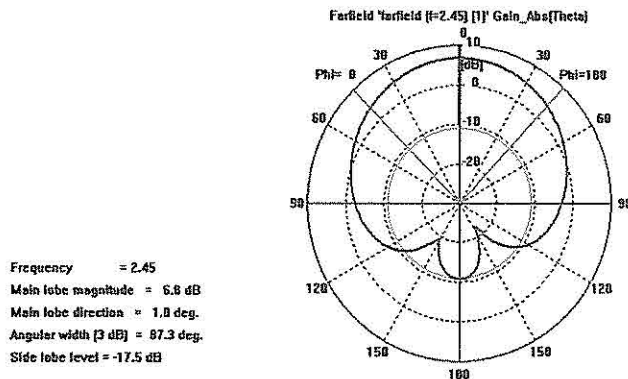
∴ ความยาวของแผ่น FR-4 เท่ากับ 38.01 มิลลิเมตร และ ความกว้างของแผ่น FR-4 เท่ากับ 46.52 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริป

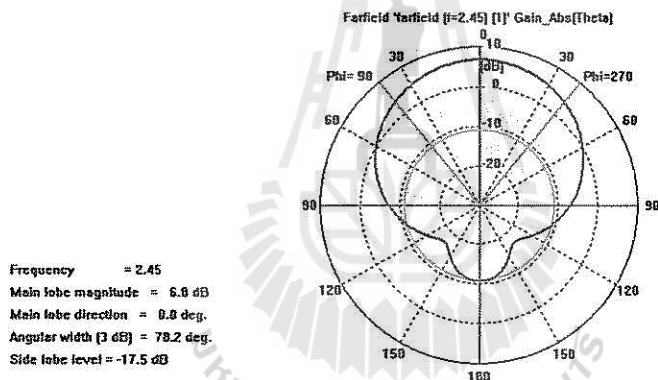
พารามิเตอร์ของสายอากาศ Patch	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)
w : ความกว้างของ Patch	36.92
L : ความยาวของ Patch	28.41
$W_g$ : ความกว้างของแผ่น Ground	46.52
$L_g$ : ความยาวของแผ่น Ground	38.01



(ก) ค่า  $S_{11}$  จากการจำลองผล



(ข) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ค) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก  
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริป

จากรูปที่ 3.9 เป็นการแสดงผลการจำลองสายอากาศไมโครสตริป จะเห็นได้ว่าสายอากาศใช้งาน ได้จริงคู่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ที่มีผลการสะท้อนเท่ากับ -14.79 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz และมีค่าอัตรายาวเท่ากับ 6.8 dB

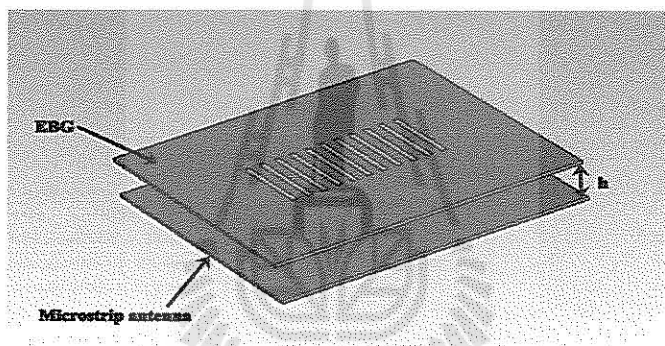
### 3.5 การออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์

ในหัวข้อนี้ได้นำเอาผลจากหัวข้อ3.3 และ3.4 มาใช้ในการออกแบบ โดยนำแผ่นEBG ที่ได้ ออกแบบไว้ มาครอบตัวสายอากาศไมโครสตริป กำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศกับ EBG เป็น ระยะ h

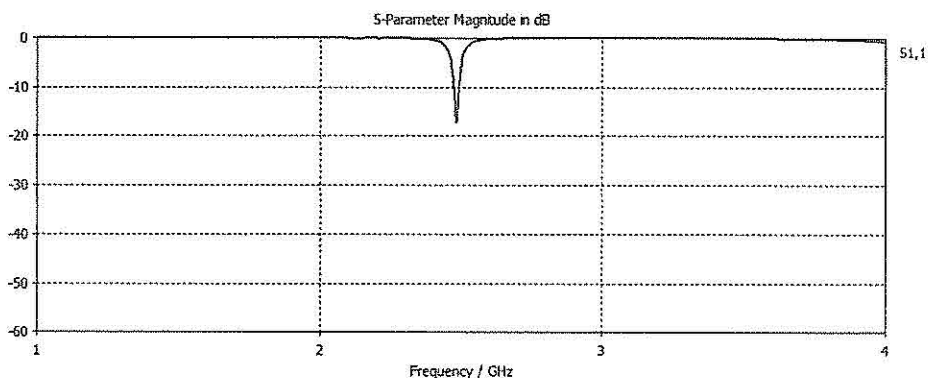
#### 3.5.1 ผลการจำลองในรูปแบบ 1 มิติ

คำนวณค่า h ได้จากสมการที่ 24 ในบทที่ 2

$$h = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9} \left[ \frac{-70^\circ + 180^\circ}{360^\circ} \right] = 18 \text{ mm}$$

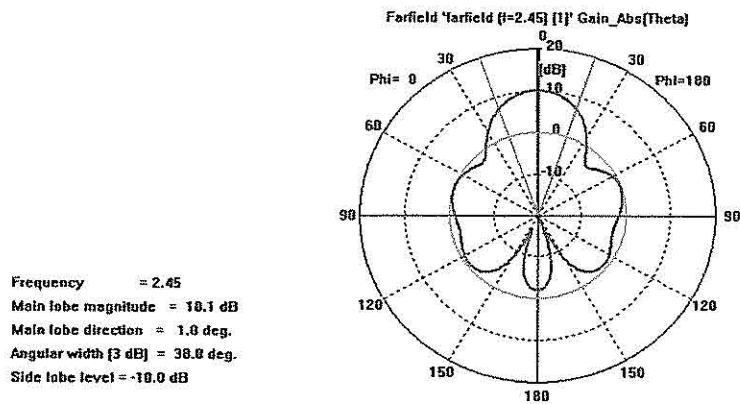


(ก) โครงสร้าง

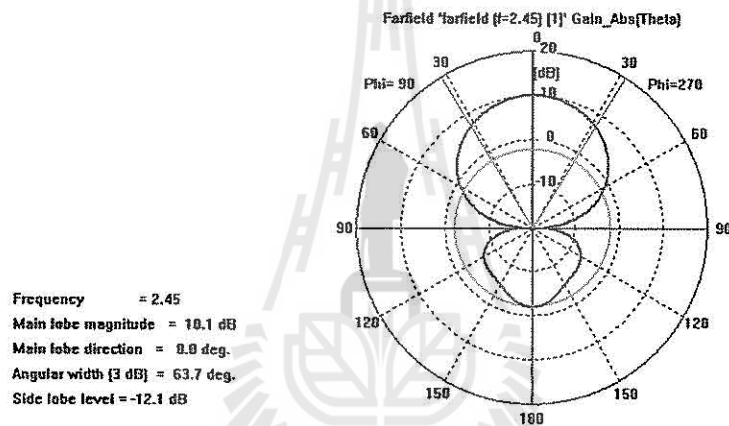


(ข) ค่า S<sub>11</sub> จากผลการจำลอง





(ค) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

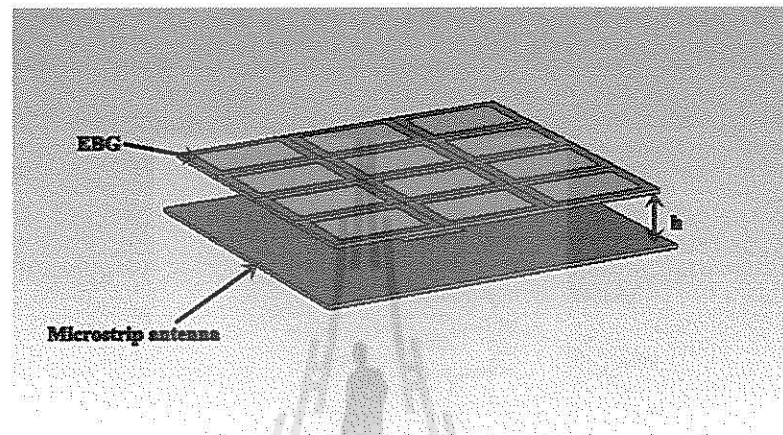
รูปที่ 3. 10 ผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 1 มิติ

จากรูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 1 มิติ พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  มีการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz และมีอัตราขยายเท่ากับ 10.1 dB

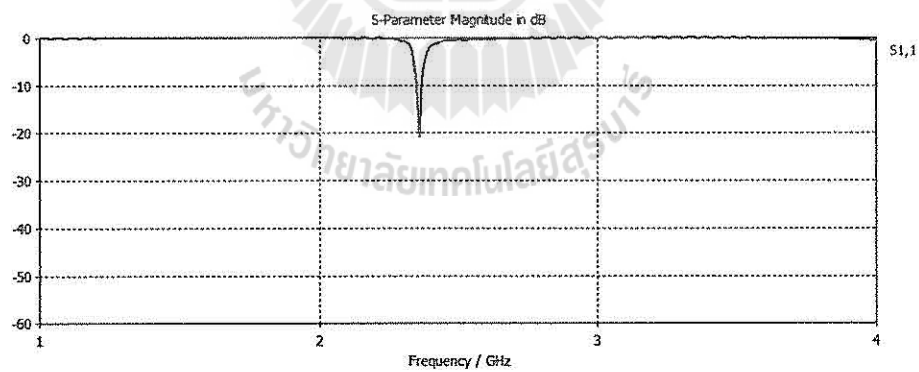
### 3.5.2 ผลการจำลองในรูปแบบ 2 มิติ

คำนวณค่า  $h$  ได้จากสมการที่ 24 ในบทที่ 2

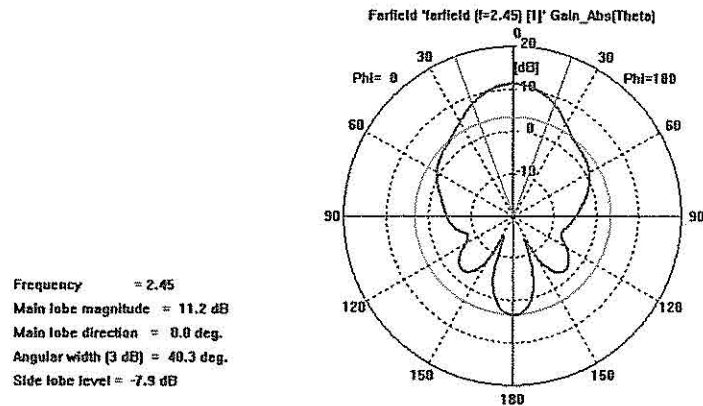
$$h = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9} \left[ \frac{-51^\circ + 180^\circ}{360^\circ} \right] = 21 \text{ mm}$$



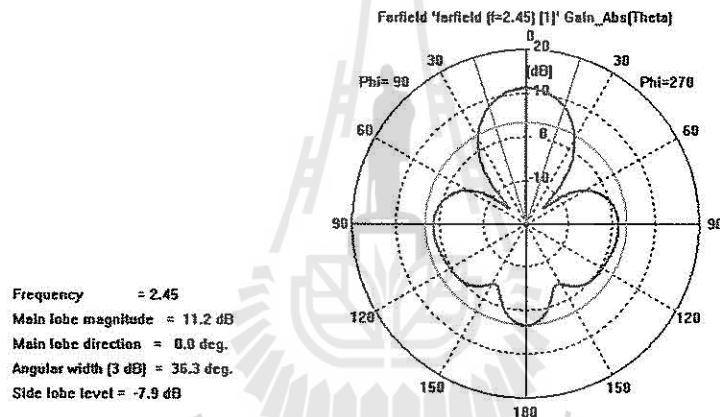
(ก) โครงสร้าง



(ข) ค่า  $S_{11}$  จากผลการจำลอง



(ค) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3. 11 ผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 2 มิติ

จากรูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองการออกแบบสายอากาศเรโซเนเตอร์โดยใช้ EBG 2 มิติ พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  มีการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz และมีอัตราขยายเท่ากับ 11.2 dB

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบวัสดุประดิษฐ์โดยการจำลองชิ้นงาน เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง แล้วนำผลที่ได้ไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงในบทต่อไป เพื่อตรวจสอบดูว่า ค่าที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม กับค่าที่วัดได้จากชิ้นงานจริงมีค่าใกล้เคียงกันมากเพียงใด

## บทที่ 4

### การทดสอบชิ้นงานและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 กล่าวนำ

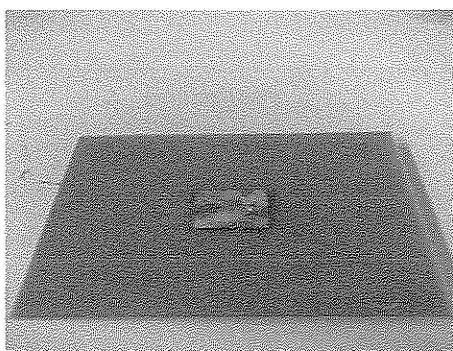
ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และ บทที่ 3 มาสร้างชิ้นเพื่อทำการวัดผลและวิเคราะห์คุณลักษณะให้เหมาะสมในการสร้างสายอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศไมโครสตริปอย่างง่าย

#### 4.2 สายอากาศไมโครสตริป

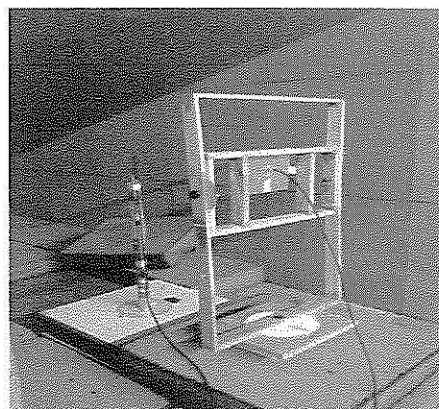
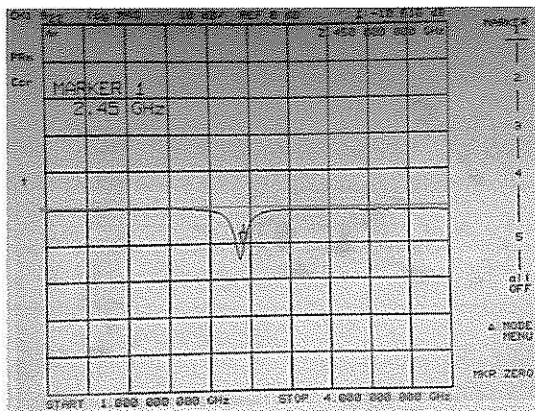
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป

พารามิเตอร์ของสายอากาศ Patch	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)
$w$ : ความกว้างของ Patch	33
$L$ : ความยาวของ Patch	30
$W_g$ : ความกว้างของแผ่น Ground (FR-4)	150
$L_g$ : ความยาวของแผ่น Ground (FR-4)	150
$X_f$ : จุด Feed	4.1

\* กำหนดให้ ขนาดของแผ่น ไดอิเล็กทริกเท่ากับขนาดของแผ่น Ground

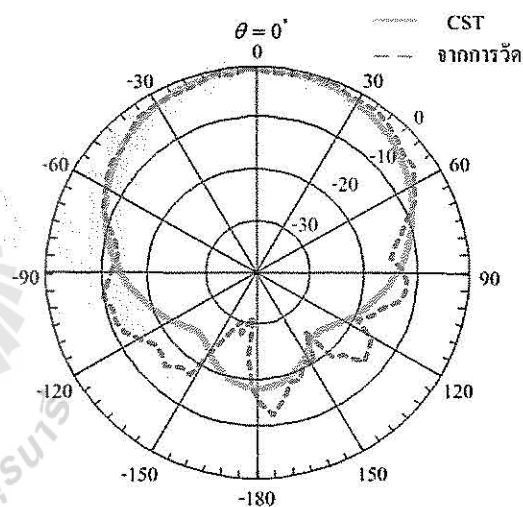
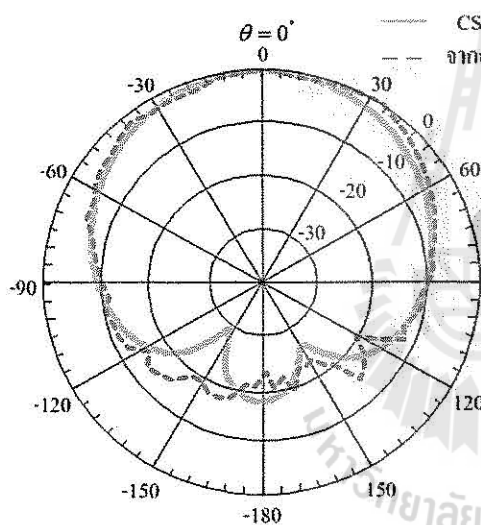


(ก) สายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ



(ข) ค่า  $S_{11}$  ของชิ้นงาน

(ค) การวัดค่าการแผ่กระจายของสายอากาศ



(ง) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

(จ) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

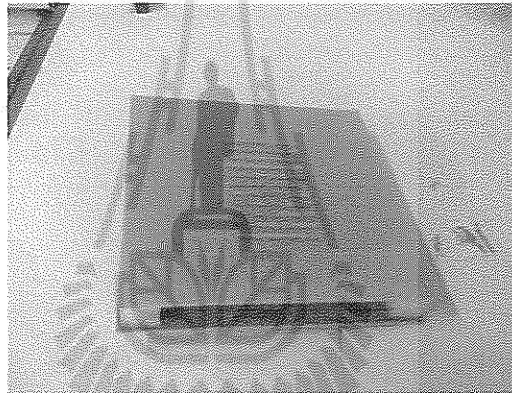
รูปที่ 4.1 ผลการวัดสายอากาศไมโครสตริป

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการวัดสายอากาศไมโครสตริป พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะมีการสะท้อนเท่ากับ  $-10.616$  dB ที่ความถี่  $2.45$  GHz ตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3

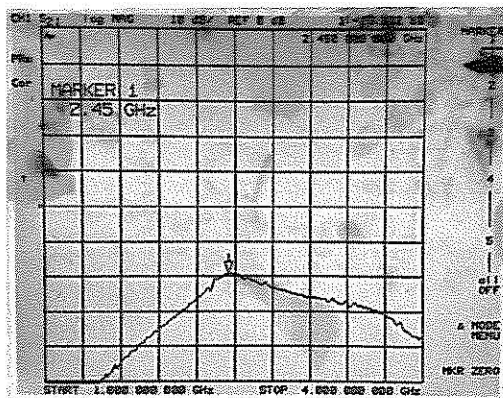
### 4.3 สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของแผ่น EBG 1 มิติ

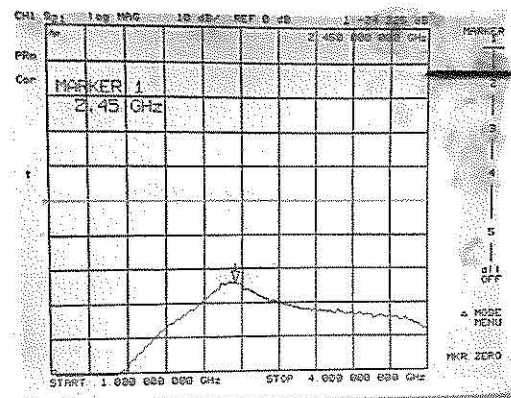
พารามิเตอร์ของสายอากาศ Patch	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)
$w$ : ความกว้าง PEC	2.44
$L$ : ความยาวของ PEC	44.08
$W_g$ : ความกว้างของแผ่น Ground	150
$L_g$ : ความยาวของแผ่น Ground	150
$d$ = ระยะห่างของช่องว่าง	4.9



(ก) แผ่น EBG 1 มิติ

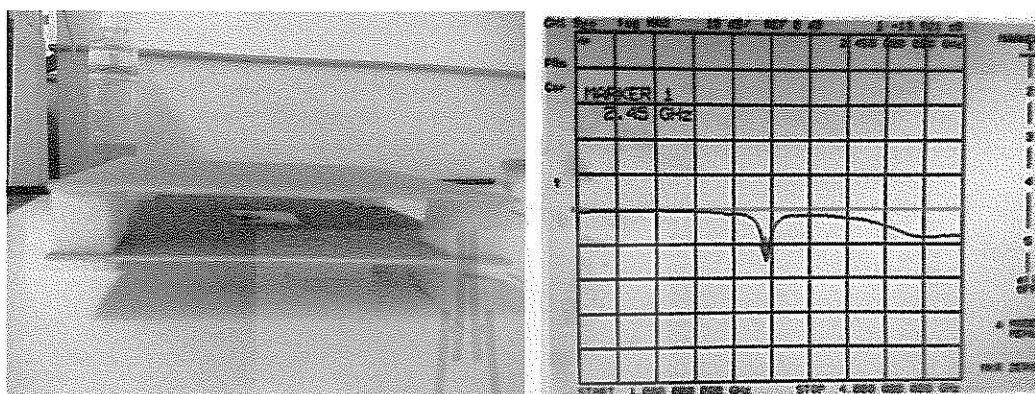


(ข) ค่า  $S_{21}$  ในโหมด TE



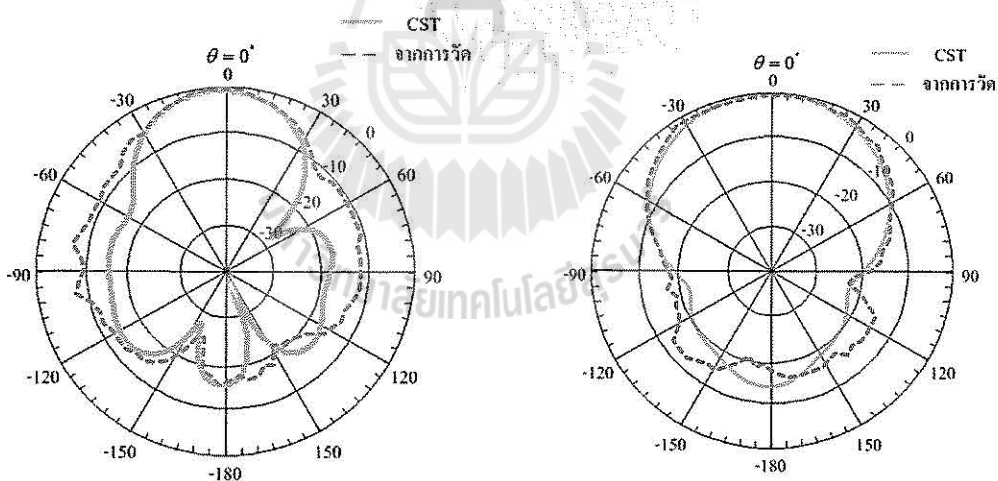
(ค) ค่า  $S_{21}$  ในโหมด TM

จากรูปที่ 4.2 ผลการวัดแผ่นEBG 1 มิติ แสดงผลการวัด EBG 1มิติ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแล้วจะเห็นว่า การเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางในกรณี TM สามารถสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า ในกรณี TE



(ก) สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ

(ข) ค่า  $S_{11}$  จากการวัดชิ้นงาน



(ค) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

(ง) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

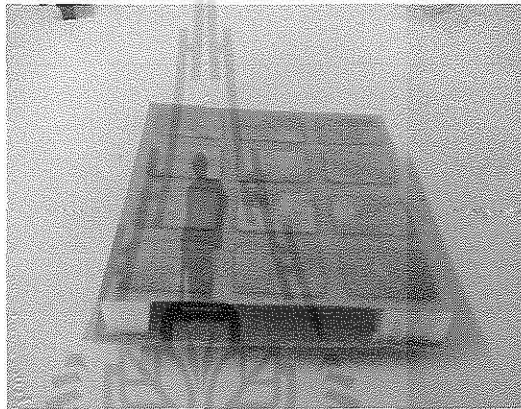
รูปที่ 4.3 ผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  มีการสะท้อนเท่ากับ  $-12.096$  dB ที่ความถี่  $2.45$ GHz ตามที่ต้องการ

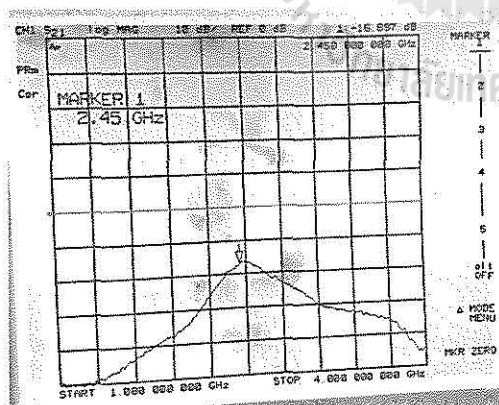
#### 4.4 สายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผ่น EBG 2 มิติ

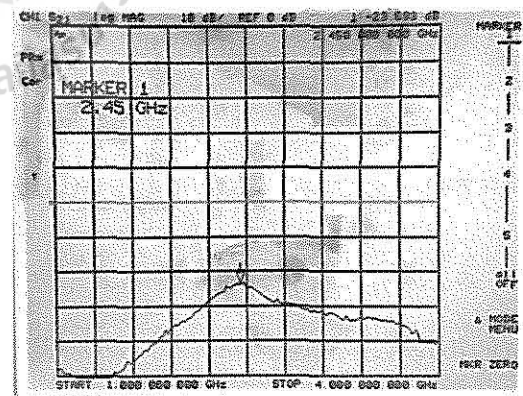
พารามิเตอร์ของสายอากาศ Patch	ขนาดของพารามิเตอร์ (mm)
w : ความกว้างของ Patch	36.92
L : ความยาวของ Patch	28.41
$W_g$ : ความกว้างของแผ่น Ground	46.52
$L_g$ : ความยาวของแผ่น Ground	38.01



(ก) แผ่น EBG 2 มิติ



(ข) ค่า  $S_{21}$  ในโหมด TE

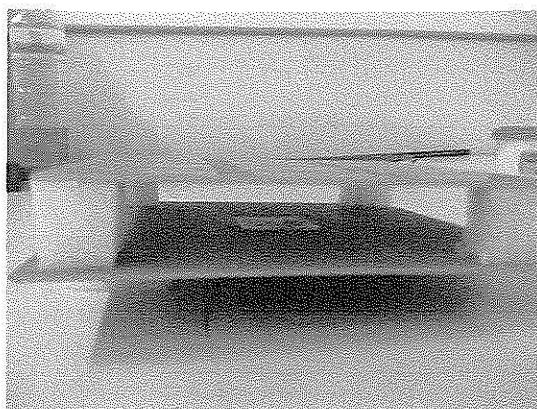


(ค) ค่า  $S_{21}$  ในโหมด TM

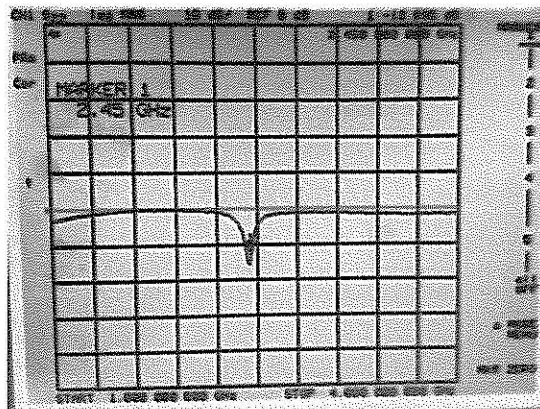
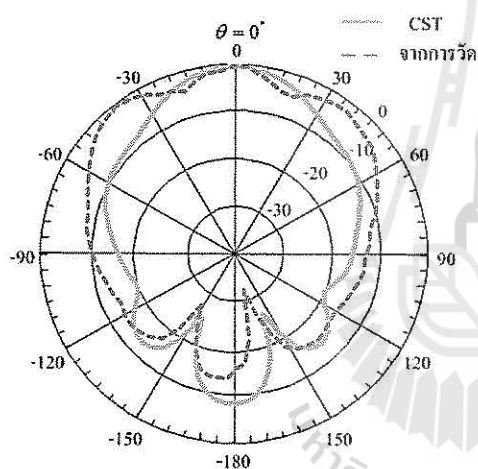
รูปที่ 4.4 ผลการวัดแผ่น EBG 2 มิติ

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการวัด EBG 2 มิติ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแล้วจะเห็นว่า การเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางในกรณี TM สามารถสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า ในกรณี TE

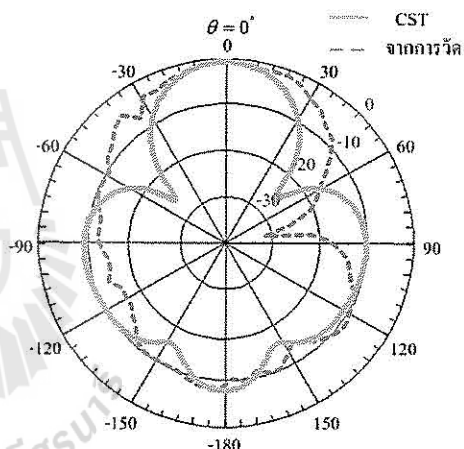




(ก) สายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ

(ข) ค่า  $S_{11}$  จากการวัดชิ้นงาน

(ค) การแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) การแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.5 ผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดสายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  มีการสะท้อนเท่ากับ  $-12.096$  dB ที่ความถี่  $2.45$  GHz ตามที่ต้องการ

## 4.5 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ออกแบบ

### 4.5.1 หาสนามระยะไกล (Far field)

การหาสนามระยะไกลที่ใช้ในการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$Farfield = \frac{2d^2}{\lambda}$$

$d$  คือ ความยาวของสายอากาศไดโพล

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$$Farfield = \frac{2 \times (0.12)^2}{0.122}$$

$$= 0.23 \text{ เมตร}$$

ในที่นี้จะกำหนดระยะ  $Farfield = 0.5$  เมตร

### 4.5.2 อัตราการสูญเสีย (Loss)

การหาอัตราการสูญเสียของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$loss = 20 \log \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} \right]$$

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$$loss = 20 \log \left[ \frac{4\pi(0.5)}{0.122} \right]$$

$$= 34.24 \text{ dB}$$

### 4.5.3 การคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศ

การหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$G_r = P_r - P_t - G_t + loss$$

$G_r$  คือ อัตราขยายภาครับ

$G_t$  คือ อัตราขยายภาคส่ง

$P_r$  คือ กำลังขยายภาครับ

$P_t$  คือ กำลังขยายภาคส่ง

$Loss$  คือ อัตราการสูญเสีย

- อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ

$$G_t = 2 \text{ dB}$$

$$\text{ค่า } P_r - P_t = -28.74$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ ได้ } G_r (\text{dB}) &= -28.74 (\text{dB}) - 2 (\text{dB}) + 34.24 (\text{dB}) \\ &= 3.5 \text{ dB} \end{aligned}$$

- สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ

$$\text{ค่า } P_r - P_t = -27.20$$

$$G_t = 2 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ ได้ } G_r (\text{dB}) &= -27.20 (\text{dB}) - 2 (\text{dB}) + 34.24 (\text{dB}) \\ &= 5.04 \text{ dB} \end{aligned}$$

- สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ

$$\text{ค่า } P_r - P_t = -24.94$$

$$G_t = 2 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการ ได้ } G_r (\text{dB}) &= -24.94 (\text{dB}) - 2 (\text{dB}) + 34.24 (\text{dB}) \\ &= 7.3 \text{ dB} \end{aligned}$$

#### 4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดจริง

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน  $S_{21}$  ของ EBG 1 มิติ และ 2 มิติ

ชิ้นงาน	ผลการจำลอง		ผลการวัดจริง	
	โหมด TE	โหมด TM	โหมด TE	โหมด TM
แผ่น EBG 1 มิติ	-13.13 dB	-17.45 dB	-19.32 dB	-24.22 dB
แผ่น EBG 2 มิติ	-11.98 dB	-18.00 dB	-16.89 dB	-23.63 dB

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราขยายของสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 เมตร และ 2 เมตร

ชั้นงาน	ผลกำสำรอง	ผลการวัดจริง
สายอากาศไมโครสตริป	6.8 dB	3.5 dB
สายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 เมตร	10.1 dB	5 dB
สายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 เมตร	11.2 dB	7.3 dB

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการพิจารณาและวิเคราะห์ผลการวัดจากชั้นงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำเอาคุณสมบัติของอภิวัดมาสร้างเป็นสายอากาศเรโซเนเตอร์ร่วมกับ EBG สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศจริงตามทฤษฎี



## บทที่ 5

### บทสรุปของโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการทดลอง การออกแบบวัสดุประติมาตรที่ความถี่ 2.45 GHz และข้อเสนอแนะในการประยุกต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

#### 5.1 บทสรุป

โครงการการออกแบบวัสดุประติมาตรที่ความถี่ 2.45 GHz มีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. สายอากาศความถี่ 2.45GHz
2. หัวคอนเน็คเตอร์ (SMA)
3. ชุดอุปกรณ์วัดค่า  $S_{21}$  และรูปแบบการส่งผ่านคลื่นของสายอากาศ ซึ่ง ได้แก่
  - 3.1 เครื่อง Network Analyzer
  - 3.2 ห้อง Chamber

ในบทนี้เป็นสรุปผล เพื่อพิจารณาวัสดุประติมาตรที่ทำการสร้างขึ้นมา คือ EBG 1 มิติ EBG 2 มิติ และสายอากาศไมโครสตริป โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นนำเอาแผ่น EBG ที่สร้างไว้ทั้ง 1 มิติ และ 2 มิติ มาครอบบนสายอากาศไมโครสตริปทำเป็นสายอากาศเรโซเนเตอร์ จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่วัดแบบ E-plane และ H-plane ของสายอากาศไมโครสตริป และ สายอากาศเรโซเนเตอร์ทั้ง 1 มิติ และ 2 มิติ กำลังขยายที่วัดได้ที่ ศูนย์ของสายของสายอากาศไมโครสตริป มีค่าเท่ากับคือ -28.74 dB และเมื่อนำไปคำนวณอัตราขยาย ได้เท่ากับ 3.5 dB กำลังขยายที่วัดได้ที่ศูนย์ของสายของสายอากาศเรโซเนเตอร์ 1 มิติ มีค่าเท่ากับ คือ -27.20 dB และเมื่อนำไปคำนวณอัตราขยายได้เท่ากับ 5.04 dB กำลังขยายที่วัดได้ที่ ศูนย์ของสายของสายอากาศเรโซเนเตอร์ 2 มิติ มีค่าเท่ากับคือ -24.94 dB และเมื่อนำไปคำนวณอัตราขยายได้เท่ากับ 7.3 dB จะเห็นได้ว่าวัสดุประติมาตรที่ได้ออกแบบมาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศได้จริง ดูจากค่าอัตราขยายที่เปลี่ยนแปลง

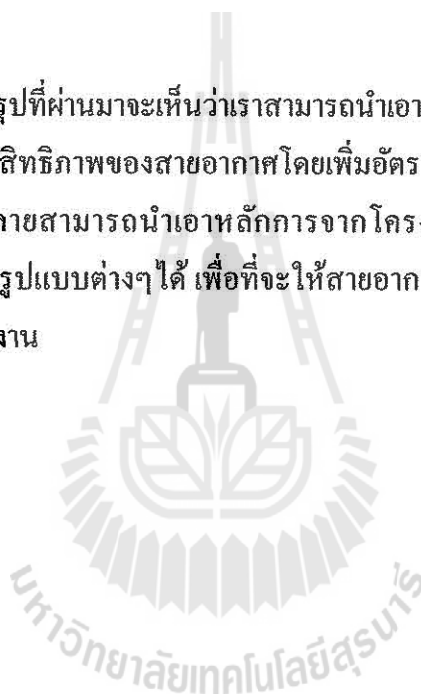
#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ไม่มีความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรม CST Microwave studio มาก่อน จึงทำให้เสียเวลาในการศึกษาการใช้งานโปรแกรมมากพอสมควร

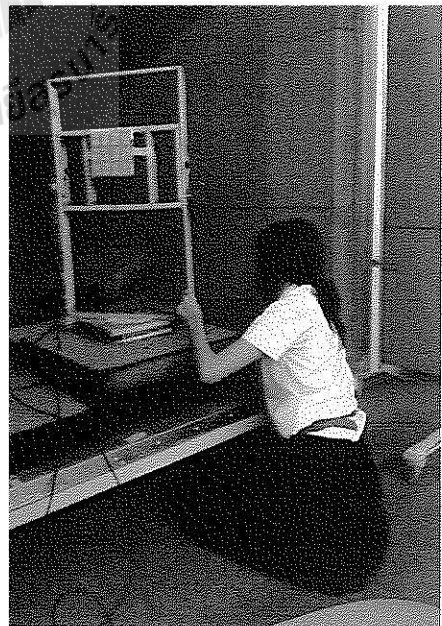
2. วัสดุที่ใช้ออกแบบ ซึ่งเป็นวัสดุที่หายากจำเป็นต้องสั่งซื้อจากที่อื่นทำให้เสียเวลาพอสมควร
3. สร้างชิ้นงานจริงตามที่ได้ออกแบบในโปรแกรม ผลที่ได้ออกมาไม่ตรงกันกับการออกแบบด้วยโปรแกรม ส่งผลทำให้ต้องปรับเปลี่ยนขนาดชิ้นงานจริงเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ
4. การวัดทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) อาจมีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆ ขณะทำการวัด

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

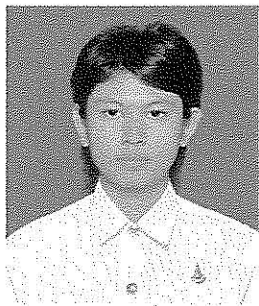
จากบทสรุปที่ผ่านมามองเห็นว่าเราสามารถนำเอาคุณสมบัติของอภิวัดคุมออกแบบวัสดุประติมาตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโดยเพิ่มอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz ได้จริงเพื่อให้เกิดความหลากหลายสามารถนำเอาหลักการจากโครงงานเล่มนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวัสดุประติมาตรในรูปแบบต่างๆ ได้ เพื่อที่จะให้สายอากาศทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพตามความต้องการของผู้ใช้งาน



ภาคผนวก



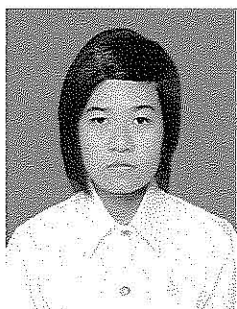
## ประวัติผู้จัดทำ



นางสาวรัชสุภา แสงใส เกิดเมื่อวันที่ 22 เดือน มิถุนายน พ.ศ.2534  
ภูมิลำเนาอยู่ที่ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ  
การศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ นครราชสีมา เมื่อปี  
พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวนุจรี ศรีงาม เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2533  
ภูมิลำเนาอยู่ที่ตำบลทับทัน อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษา  
ระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสังขะ อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ เมื่อปี พ.ศ.  
2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนัก  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวเบญจมาภรณ์ กว้างพิมาย เกิดเมื่อวันที่ 13 มิถุนายน 2533  
ภูมิลำเนาอยู่ที่ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ  
การศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ นครราชสีมา เมื่อปี  
พ.ศ. 2551 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาโทรคมนาคม สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บรรณานุกรม

รังสรรค์ วงศ์สรรค์, วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3), ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.

นุชนาฎ ฝาเพ็ญ , “สายอากาศเรโซเนเตอร์ที่มีโพลาริซ์แบบวงกลม โดยใช้วัสดุช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า,” สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน , “อภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ,”

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , ปีที่ 21 , ฉบับที่ 2 , 2554.

นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ , “ อภิวัด (Metamaterials),”

วารสารวิชาการวิศวกรรม ม.อบ. , ปีที่ 2 , ฉบับที่ 2 , 2553.

