

การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนรูปวงกลม  
บนพื้นผิวอภิวัดยุคแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก  
สำหรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่

DESIGN OF CIRCULAR RING PATCH ANTENNA ON SPLIT-RING  
RESONATOR METASURFACE FOR DUAL-BAND APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-010-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF CIRCULAR RING PATCH ANTENNA ON SPLIT-RING  
RESONATOR METASURFACE FOR DUAL-BAND APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2021-EN-M-010-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนรูปวงกลมบนพื้นผิวอภิวัดแบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกสำหรับการประยุกต์ใช้งานสองย่านความถี่
นักศึกษา	นางสาวจินณัฐา เหมเมือง
รหัสนักศึกษา	62601092
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบพื้นผิวอภิวัด (Metasurface) โดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS) แบบเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกชนิดแถบหยุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายให้รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical Band) ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยโครงสร้างทั้งสองถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 หนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 สายอากาศมีขนาด 30×45 mm และพื้นผิวอภิวัดมีขนาด 82×82 mm สายอากาศถูกวางไว้ด้านหน้าพื้นผิวอภิวัดที่ระยะห่าง 12 mm จากผลการจำลองของอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากเดิมมีค่าเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi เมื่อปรับปรุงสายอากาศอัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.66 dBi และ 9.02 dBi ตามลำดับ โดยสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Design of Circular Ring Patch Antenna on Split-Ring Resonator Metasurface for Dual-Band Applications
<b>Student</b>	Ms. Jinnattha Hemmuang
<b>Student ID.</b>	62601092
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

This thesis presents the design of a metasurface using Frequency Selective Surface on a bandstop split-ring resonator to work with a ring patch antenna to enhance the gain that is operated along the ISM band of 2.45 GHz and 5.8 GHz. Both structures have been designed on FR-4 substrate with thickness of 1.6 mm and dielectric constant of 4.3. The ring patch antenna and the metasurface have the size of 30 mm × 45 mm and 82 mm × 82 mm, respectively. The antenna located above the metasurface with the spacing of 12 mm. The simulation results of gain at 2.45 GHz and 5.8 GHz was 1.70 dBi and 4.01 dBi, when the antenna gain was improved, the gain was increased to 5.66 dBi and 9.02 dBi, respectively. The radiation pattern of the proposed antenna is unidirectional beam.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์และสนับสนุนของ รศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและองค์ความรู้ต่างๆ รวมทั้งแนวคิด การแก้ปัญหา และกระบวนการทางงานวิจัย จนกระทั่งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอมา

ขอขอบคุณ ดร.อานนท์ สกลคณาพงษ์ ดร.คณศ พุกกะพันธ์ คุณพิสิษฐ์ จันแบ่งเงิน ซึ่งเป็นผู้ที่ให้องค์ความรู้ในทางเทคนิคและข้อคิดอย่างเป็นระเบียบแบบแผนทั้งทางด้านการออกแบบสายอากาศ การสร้างสายอากาศ และการทดลองสายอากาศเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการสายอากาศและแม่เหล็กไฟฟ้าประยุกต์ (Antenna and Electromagnetic Applications Research Laboratory: AERIAL) ที่ช่วยให้คำปรึกษาและกำลังใจให้กับข้าพเจ้าอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งมีความสำคัญยิ่งที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดช่วงชีวิตของข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างลุล่วง คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้ซึ่งมีพระคุณทุกท่าน

จิณณ์ภูษา เหมเมือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 สายอากาศแพดซ์.....	3
2.3 สายอากาศตัวสะท้อน.....	4
2.4 อภิวัด.....	5
2.5 พื้นผิวอภิวัด.....	7
2.6 พื้นผิวเลือกความถี่.....	8
2.7 โครงสร้างแบบรายคาบ.....	12
2.8 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็ก.....	15
2.9 ทฤษฎีสายอากาศ.....	17
2.9.1 แถบความถี่.....	17
2.9.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ.....	17
2.9.3 อัตราขยาย.....	18
2.9.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	19
2.9.5 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	19
2.10 ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	20
2.11 สรุป.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศแพตช์วงแหวนและหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 การออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวน.....	26
3.2.1 สรบบโครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวน.....	30
3.3 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่.....	34
3.4 สรุป.....	37
บทที่ 4 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวน.....	38
4.1 บทนำ.....	38
4.2 ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่.....	38
4.3 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่.....	41
4.3.1 การปรับปรุงอัตราขยายของย่านความถี่ 2.45 GHz.....	41
4.3.2 การปรับปรุงความกว้างแถบความถี่ของย่านความถี่ 5.8 GHz.....	43
4.3.3 การปรับปรุงขนาดระนาบกราวด์ของพื้นผิวเลือกความถี่.....	48
4.4 สรบบโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ.....	49
4.5 สรุป.....	53
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	54
5.1 บทนำ.....	54
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	54
5.3 การทดสอบสายอากาศ.....	55
5.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบ.....	55
5.3.2 อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	56
5.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	57
5.4 สรุป.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	60
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประสิทธิภาพของรูปแบบองค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่.....	10
3.1	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน.....	31
3.2	ขนาดและพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่.....	37
4.1	ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	50
5.1	สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างสายอากาศแพตช์.....	3
2.2	ตัวอย่างรูปร่างตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์.....	4
2.3	การกำหนดค่าทางเรขาคณิตสำหรับระบบตัวสะท้อน.....	4
2.4	ตัวอย่างของสายอากาศสะท้อนพาราโบลิก.....	5
2.5	ภาพร่างทั่วไปของอภิวัดเชิงปริมาตรที่ถูกประกอบขึ้นจากการฝังตัวในตัวกลาง...	6
2.6	คุณสมบัติของอภิวัด.....	7
2.7	ตัวอย่างพื้นผิวอภิวัดโดยใช้โครงสร้างวงแหวนแยกแบบพื้นฐาน.....	8
2.8	ตัวอย่างพื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง.....	8
2.9	รูปแบบตามแบบฉบับขององค์ประกอบพื้นผิวเลือกความถี่.....	9
2.10	การทำงานของพื้นผิวเลือกความถี่.....	11
2.11	ประเภทและการตอบสนองของการกรองพื้นผิวเลือกความถี่.....	12
2.12	พฤติกรรมของการสะท้อนและส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบบนตัวกลางที่ไม่ เหมือนกัน.....	13
2.13	คลื่นตกกระทบบนโครงสร้างแบบรายคาบ.....	14
2.14	การวิเคราะห์โครงสร้างแบบรายคาบด้วยเซลล์หนึ่งหน่วย.....	15
2.15	รูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.16	โครงสร้างทั่วไปของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.17	โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	20
2.18	โครงสร้างสายอากาศ.....	21
2.19	โครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่.....	21
2.20	โครงสร้างสายอากาศที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิว เลือกความถี่ชนิดแถบผ่าน.....	22
2.21	การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ของ สายอากาศทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือก ความถี่ชนิดแถบผ่าน.....	22
2.22	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่าน.....	23
2.23	โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.24	โครงสร้างหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด.....	24
2.25	การเปรียบเทียบผลการจำลองอัตราขยาย.....	24
2.26	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	25
3.1	โครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงกลม.....	28
3.2	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลม.....	28
3.3	โครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์.....	29
3.4	การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์.....	29
3.5	การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมสายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์และสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอ.....	30
3.6	การเปรียบเทียบโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอ.....	31
3.7	การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอ.....	32
3.8	ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอ.....	32
3.9	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน.....	33
3.10	โครงสร้างวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก.....	34
3.11	ผลการจำลองคาสมประสพทการสะท้อนของหน่วยเซลล์พนผวเลือกความถ.....	36
3.12	โครงสร้างของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่.....	36
4.1	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่.....	39
4.2	โครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	40
4.3	ผลการจำลองคาสมประสพทการสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	40
4.4	ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $L_1$ .....	42
4.6	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $L_{12}$ .....	43
4.7	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $L_2$ .....	44
4.8	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $L_{22}$ .....	45
4.9	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $g_2$ .....	46
4.10	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $D_z$ .....	47
4.11	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์ $R_g$ .....	49
4.12	โครงสร้างสายอากาศโครงสร้างสายอากาศที่น้ำเสนอ.....	49
4.13	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่น้ำเสนอ	51
4.14	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่น้ำเสนอ.....	52
5.1	โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	55
5.2	การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	55
5.3	การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบ.....	56
5.4	การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	57
5.5	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศต้นแบบ.....	58
5.6	การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายรวมถึงการสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ ISM (Industrial Sciences Medicine) ซึ่งได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ถูกนิยามให้ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ โดยย่านความถี่ ISM เป็นย่านความถี่เสรีที่ใช้กันทั่วโลกโดยไม่ต้องขออนุญาต จึงส่งผลให้จำนวนของผู้ใช้งานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทำให้ช่องสัญญาณและอัตราขยายของสายอากาศรองรับการใช้งานได้อย่างไม่เพียงพอ ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากของระบบสื่อสารไร้สาย โดยสายอากาศแพทช์ได้รับความนิยมอย่างมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟทั่วไป อาทิเช่นมีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการวิเคราะห์และการประดิษฐ์ อย่างไรก็ตามสายอากาศแพทช์ยังมีข้อบกพร่องบางประการคือมีอัตราขยายต่ำและแถบความถี่แคบ [1] ซึ่งมีการศึกษาบางส่วนที่หาวิธีพัฒนาหรือลดข้อบกพร่องเหล่านี้ [2,3] ในปัจจุบันได้มีการนำแผ่นโลหะสะท้อนมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศด้วยหลักการที่จะทำให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงแต่โดยทั่วไปแผ่นโลหะสะท้อนจะสามารถทำงานได้เพียงความถี่เดียวจากปัญหาดังกล่าวนั้นได้มีนักวิจัยพัฒนาตัวสะท้อนคลื่นด้วยการนำอภิวัด (Metamaterials) มาประยุกต์ใช้งานในการออกแบบ ซึ่งอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติโดยหนึ่งในวิธีที่น่าสนใจคือการใช้พื้นผิวอภิวัด (Metasurface) โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยุดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS)

พื้นผิวเลือกความถี่คืออภิวัดในรูปแบบสองมิติที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกรองความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวกรองความถี่ทั่วไป โดยเฉพาะพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแผ่นสะท้อนให้กับสายอากาศแพทช์ทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นและความกว้างแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น [4] และเมื่อนำพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดเทียบกับแผ่นโลหะสะท้อน โดยทั้งสองมีข้อแตกต่างกันคือ พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดสามารถออกแบบให้สะท้อนคลื่นมากกว่าหนึ่งย่านความถี่ได้ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานกับสายอากาศหลายย่านความถี่มากกว่าแผ่นโลหะสะท้อน เนื่องจากคุณสมบัติของแผ่นโลหะสะท้อนมีค่าขนาดการสะท้อนเท่ากับ 1 และเฟสการสะท้อนเท่ากับ  $180^\circ$  เมื่อนำมาทำงานร่วมกับสายอากาศแพทช์จะทำให้แต่ละความถี่จะถูกจำกัดด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแผ่นโลหะสะท้อนส่งผลให้แผ่นโลหะสะท้อนจะสามารถปรับปรุงได้เพียงหนึ่งย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษ การวิเคราะห์ พัฒนาและออกแบบพื้นผิว อภิวัดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยุดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายและความกว้างแถบความถี่ ที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยโปรแกรม CST Studio Suit 2017 ถูกใช้ในการจำลองผล

## 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่ต้องการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย สายอากาศแพตช์ สายอากาศตัวสะท้อน อภิวัด พื้นผิวอภิวัด พื้นผิวเลือกความถี่ โครงสร้างแบบรายคาบ โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีสายอากาศและผลงานวิจัยที่มาก่อน ซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์ หลักการและการออกแบบสำหรับสายอากาศแพตช์ โดยเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพตช์ให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ต่อมาทำการคำนวณและออกแบบหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ต้นแบบที่สามารถทำงานร่วมกับสายอากาศแพตช์ได้ โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ในโปรแกรม CST Studio Suit 2017 โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมของพื้นผิวเลือกความถี่จะถูกอธิบายในบทถัดไป

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองและออกแบบของพื้นผิวเลือกความถี่ให้สามารถทำงานร่วมกับสายอากาศแพตช์ที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM และทำการปรับรูปร่างขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะส่งผลให้สายอากาศที่เสนออมีอัตราขยายที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศแพตช์ตัวเดียว

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการทดสอบสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในขั้นต้น แล้วนำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ พร้อมทั้งแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลทดสอบ ซึ่งจะพิจารณา  $|S_{11}|$ (dB) อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์ตลอดจนการวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการแนะนำแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

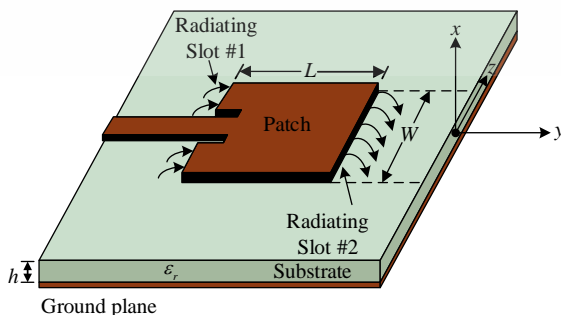
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

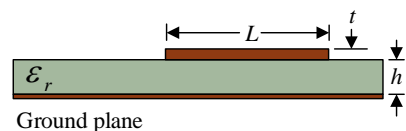
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบพื้นผิวอภิวัดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยุดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพทช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงความกว้างแบนด์วิดท์และอัตราขยาย ซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศตัวสะท้อน พื้นผิวอภิวัด ทฤษฎีสายอากาศและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 2.2 สายอากาศแพทช์

สายอากาศแพทช์ (Patch antennas) หรือสายอากาศไมโครสตริบ (Microstrip antennas) ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น อาทิเช่น มีน้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการวิเคราะห์และการประดิษฐ์ สายอากาศแพทช์นั้นประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำที่เป็นโลหะบางทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งจะถูกวางเหนือระนาบกราวด์และมีวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกชั้นกลาง โดยโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริบแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมทั่วไปจะมีความยาว ( $L$ ) เท่ากับ  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$  และมีรูปร่างหรือรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันเช่น วงกลม วงรี สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และความหนาของแผ่นตัวนำโลหะจะมีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระมาก ( $t \ll \lambda_0$ ) ถัดมาความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกโดยทั่วไปแล้วจะมีความหนาอยู่ที่  $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$  และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constants:  $\epsilon_r$ ) อยู่ในช่วง  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$



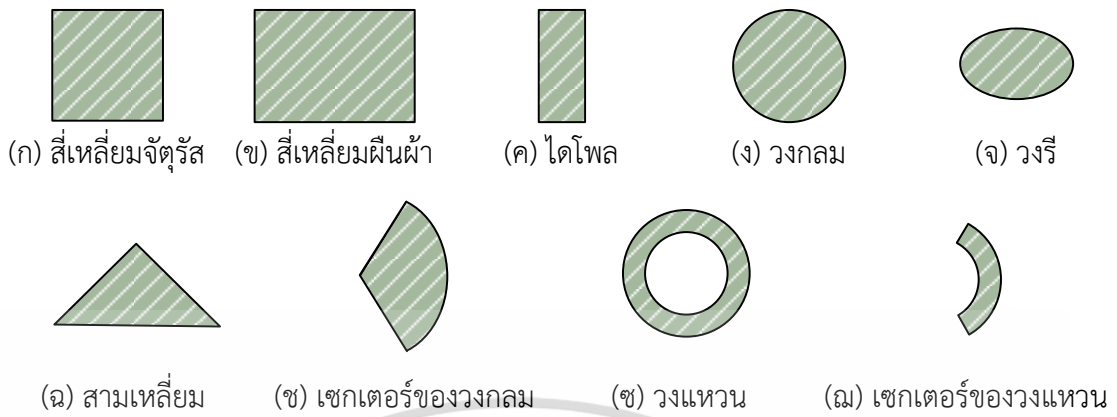
(ก) สายอากาศแพทช์



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ [1]

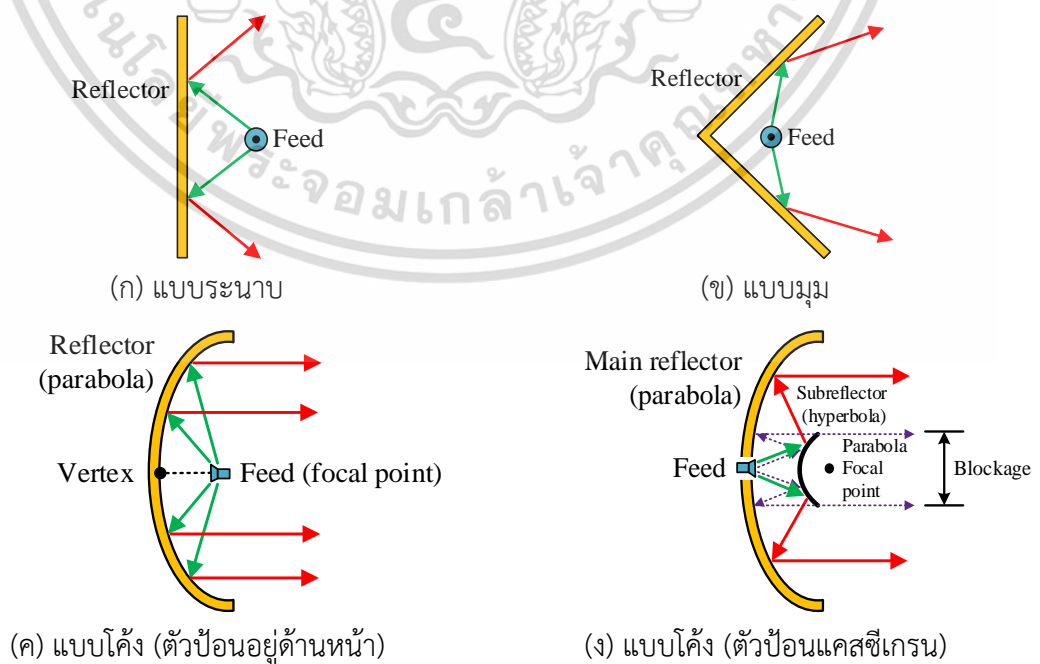
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างรูปร่างตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์

### 2.3 สายอากาศตัวสะท้อน

สายอากาศตัวสะท้อน (Reflector antennas) ถูกพัฒนาการวิเคราะห์และการออกแบบ เพื่อให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นสำหรับความต้องการการใช้งานทางด้านดาราศาสตร์วิทยุ การสื่อสารไมโครเวฟและการติดตามดาวเทียม ซึ่งจะมีสายอากาศตัวสะท้อนบางรูปทรงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากได้แก่ ตัวสะท้อนแบบระนาบ (Plane reflectors), ตัวสะท้อนแบบมุม (Corner reflectors) และตัวสะท้อนแบบโค้ง (Curved reflectors) โดยเฉพาะรูปทรงแบบโพลาโบลิคหรือสายอากาศสะท้อนพาราโบลิค (Parabolic antennas) ซึ่งการกำหนดค่าทางเรขาคณิตสำหรับระบบตัวสะท้อนแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกำหนดค่าทางเรขาคณิตสำหรับระบบตัวสะท้อน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เก็บค่าธรรมเนียมการดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าตัวสะท้อนแบบโค้งพาราโบลิกหรือสายอากาศสะท้อนพาราโบลิกจะได้รับความนิยมเป็นอย่างมากแต่ถึงอย่างไร สายอากาศสะท้อนพาราโบลิกจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดของตัวจานสะท้อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของจาน [5] ซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่จำกัด โดยตัวอย่างของสายอากาศสะท้อนพาราโบลิกแสดงดังรูปที่ 2.4 ในส่วนของแผ่นสะท้อนถึงแม้จะมีขนาดเล็กแต่ก็ยังคงสามารถสะท้อนคลื่นได้หนึ่งย่านความถี่ [6-7] ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกใช้พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดเพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้มากกว่าหนึ่งย่านความถี่ โดยพื้นผิวเลือกความถี่จะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.8



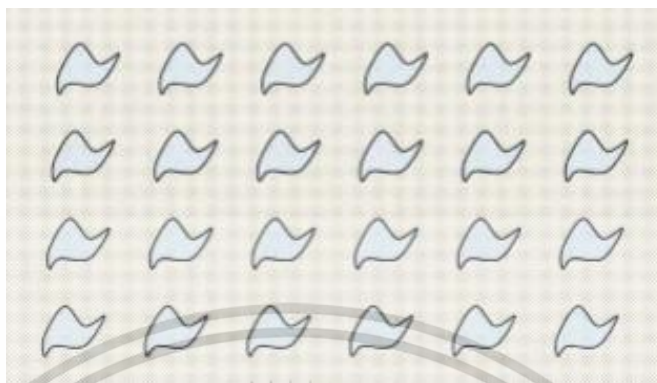
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของสายอากาศสะท้อนพาราโบลิก

## 2.4 อภิวัด

อภิวัด (Metamaterial) ถูกนิยามว่าเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ปกติเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (Composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Inhomogeneous) เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติประสิทธิผลในระดับมาโคร (Macroscopic) ซึ่งตัวกลางที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการผนวกตัวของ การเหนี่ยวนำของโมเมนต์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Moments) ซึ่งผลกระทบในระดับมาโครจะอยู่ในรูปของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลและค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิผล (Effective permittivity :  $\epsilon_{\text{eff}}$  and Effective permeability :  $\mu_{\text{eff}}$ ) ของตัวกลางขนาดใหญ่ (Bulk Medium) ดังนั้นอภิวัดสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝังของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไปยังตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนด โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระ อาทิเช่น ชนิดของตัวกลาง รูปร่าง ขนาด หรือการจัดวางตำแหน่งของวัสดุประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

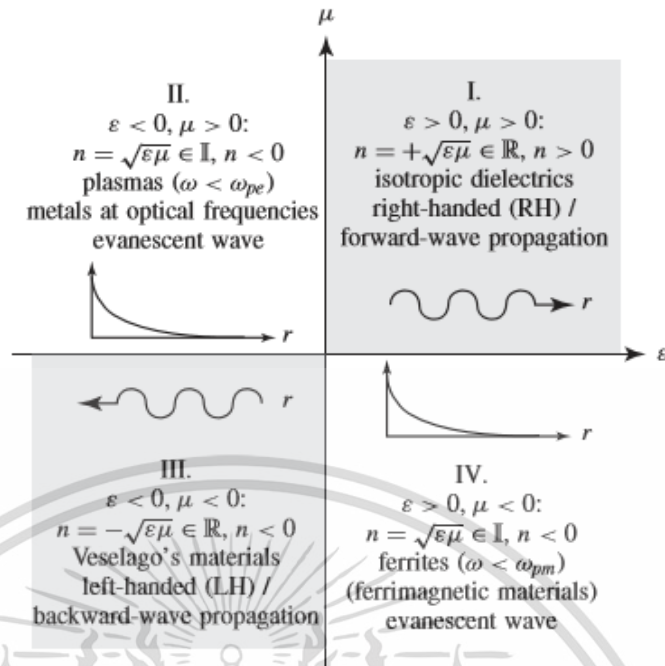
เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป ภาพร่างทั่วไปของอภิวัดเชิงปริมาตรที่ถูกประกอบขึ้นจากการฝังตัวในตัวกลางแสดงดังรูปที่ 2.5 [8]



รูปที่ 2.5 ภาพร่างทั่วไปของอภิวัดเชิงปริมาตรที่ถูกประกอบขึ้นจากการฝังตัวในตัวกลาง

เริ่มแรกในงานวิจัยส่วนใหญ่อภิวัดมักถูกสนใจเกี่ยวกับวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index:  $n$ ) ที่มีค่าเป็นลบ (Negative refractive index) โดยที่  $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$  ดังนั้นการที่ค่าดัชนีหักเหมีค่าเป็นลบจึงเกิดจากการที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity:  $\epsilon$ ) เป็นลบ ( $\epsilon < 0$ ) และมีค่าซาบซิมแม่เหล็ก (Permeability:  $\mu$ ) เป็นลบ ( $\mu < 0$ ) เช่นเดียวกัน เมื่อวัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซาบซิมแม่เหล็กมีค่าเป็นลบทั้งคู่ นั่น วัสดุชนิดนี้จะถูกเรียกว่า DNG (Double Negative Medium) ซึ่งวัสดุ DNG ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีคุณสมบัติที่แตกต่างและตรงข้ามกับวัสดุทั่วไปในธรรมชาติ โดยวัสดุทั่วไปในธรรมชาตินั้นมักจะมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นบวก ( $\epsilon > 0$ ) และค่าความซาบซิมแม่เหล็กเป็นบวก ( $\mu > 0$ ) ทั้งคู่ ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะถูกเรียกว่า DPS (Double Positive Medium) จากผลการศึกษาและการวิจัยของ Veselago เมื่อคลื่นระนาบเดินทางเข้าไปยังตัวกลาง DNG พบว่าพอยน์ติงเวกเตอร์ (Pointing vector) ขนานกับทิศทางของความเร็วเฟสแต่มีทิศทางตรงกันข้ามถูกเรียกว่า BW (Backward wave) ซึ่งในทางกลับกันเมื่อคลื่นระนาบเคลื่อนที่ในตัวกลาง DPS ทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ขนานและมีทิศทางเดียวกัน

นอกจากนี้วัสดุบางชนิดอาจจะมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซาบซิมแม่เหล็กอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นลบ ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะถูกเรียกว่า SNG (Single Negative Medium) โดยวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบแต่มีค่าความซาบซิมเป็นบวกเรียกว่า ENG (Epsilon Negative Medium) และวัสดุที่มีค่าความซาบซิมเป็นลบแต่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นบวกเรียกว่า MNG (Mu Negative Medium) โดยคุณสมบัติของอภิวัดแสดงดังรูปที่ 2.6



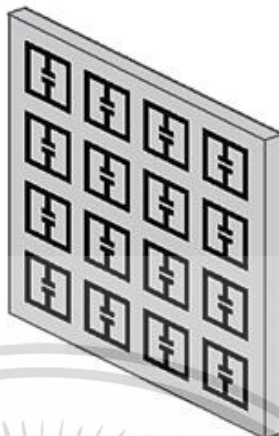
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของอภิวัด

## 2.5 พื้นผิวอภิวัด

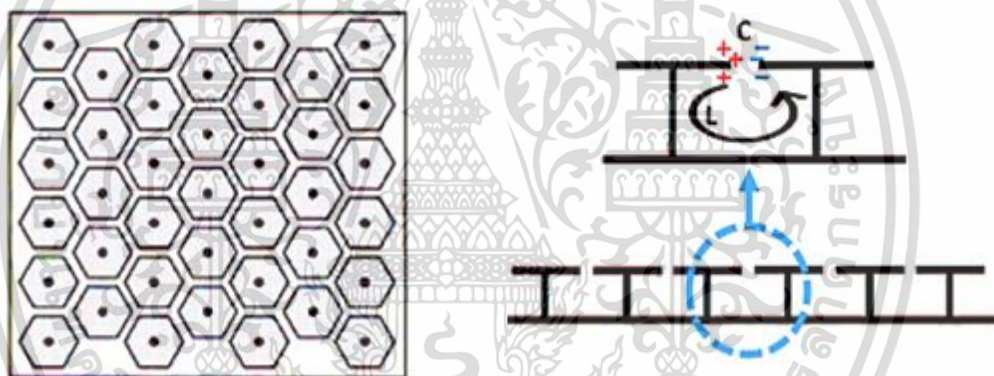
พื้นผิวอภิวัด (Metasurface) มีชื่อเรียกอย่างกว้างๆ ว่าเป็นอภิวัดระนาบที่มีความหนาของ ความยาวคลื่นย่อยและสามารถประดิษฐ์ได้ง่าย โดยโครงสร้างของพื้นผิวอภิวัดถูกประกอบขึ้นจาก การจัดเรียงองค์ประกอบของเซลล์หน่วยด้วยรูปทรงต่าง ๆ ที่เป็นผิวโลหะบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก และมีการบ่อนสัญญาณด้วยสายอากาศ พื้นผิวอภิวัดและอภิวัดเป็นแนวทางการวิจัยที่เติบโตอย่าง รวดเร็วและด้วยการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าหรือการตอบสนองทางแสง (Optical responses) ที่แตกต่างกัน สามารถทำได้ด้วยการกระจายของเฟส (Scattering phase) แอมพลิจูดและการโพลาไรซ์ โดย การออกแบบและการเลือกใช้อภิวัด ตัวอย่างพื้นผิวอภิวัดโดยใช้โครงสร้างวงแหวนแยก (Split-ring) แบบพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.7 [9] เมื่อพิจารณาการตอบสนองของการโพลาไรซ์สามารถแบ่ง ประเภทตามหลักการของพื้นผิวอภิวัดได้ อาทิเช่น พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS) พื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง (High-Impedance Surface : HIS) และ พื้นผิวการสะท้อน (Reflecting surfaces) เป็นต้น [10-11] ในรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างพื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง

โดยคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของพื้นผิวอภิวัดคือ วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่า ความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์รวมถึงมีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ โดยคุณสมบัติหลักของ พื้นผิวอภิวัดสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นลบและมีค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็น บวกหรือวัสดุ ENG ค่าสภาพยอมไฟฟ้าเป็นบวกและมีค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบหรือวัสดุ MNG และ

นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติของพื้นผิวอภิวัดที่ได้รับความสนใจคือวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ (Zero Refractive Index : NZI) ซึ่งแต่ละคุณสมบัติของพื้นผิวอภิวัดจะให้ผลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างพื้นผิวอภิวัดที่ใช้โครงสร้างวงแหวนแยกแบบพื้นฐาน



(ก) มุมมองด้านบน

(ข) มุมมองด้านข้าง

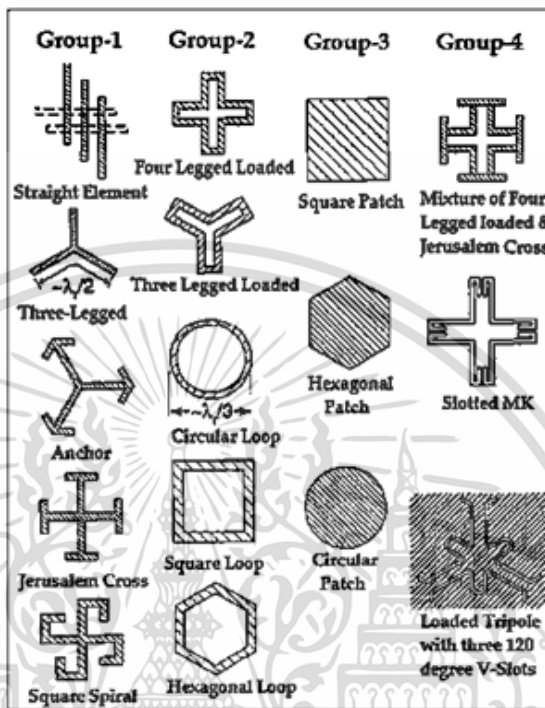
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างพื้นผิวอิมพีแดนซ์สูง

## 2.6 พื้นผิวเลือกความถี่

พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface : FSS) คือพื้นผิวอภิวัดที่แสดงการตอบสนองทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเลือกความถี่ในคุณสมบัติการส่งผ่านหรือการสะท้อน จากทางทฤษฎีโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่เป็นพื้นผิวรายคาบ (Periodic surface) ที่มีแถวลำดับขององค์ประกอบสองมิติที่เหมือนกันถูกจัดเรียงบนพื้นผิวไดอิเล็กตริก ซึ่งรูปแบบตามแบบฉบับพื้นฐานขององค์ประกอบพื้นผิวเลือกความถี่แสดงในรูปที่ 2.9 [12] รูปร่างหรือรูปแบบขององค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่มีผลต่อสมรรถนะของพื้นผิวเลือกความถี่ซึ่งทำให้เกิดคุณลักษณะที่เป็นผลกระทบต่าง ๆ จากตัวพื้นผิวเลือกความถี่ เช่น ความเสถียรภาพเชิงมุม (Angular stability) ความกว้างแถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ การแยกแถบ (Band separation) ระดับการโพลาริไซซ์ไขว้ โดยโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามรูปแบบของพื้นผิวดำนำดังนี้ ชนิดตัวเชื่อมต่อตรงกลางหรือโพล N ชนิดบ่วง ชนิดแผ่นตัวนำภายในและชนิดผสม



รูปที่ 2.9 รูปแบบตามแบบฉบับขององค์ประกอบพื้นผิวเลือกความถี่

ชนิดตัวเชื่อมต่อตรงกลางหรือโพล N (Center connected or N-poles) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นไดโพล ไตรโพลและรูปแบบไม้กางเขนไขว้ (Jerusalem) โครงสร้างพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดตัวเชื่อมต่อตรงกลางหรือโพล N สามารถเรโซแนนซ์คลื่นได้ก็ต่อเมื่อองค์ประกอบของขามีความยาวประมาณครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีองค์ประกอบเป็นไดโพลจะมีโพลาริไซซ์แบบเชิงเส้นและจะมีสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนระนาบขององค์ประกอบ โดยโครงสร้างพื้นผิวเลือกความถี่นี้เมื่อมีการรวมของไดโพลสองตัวไขว้กัน  $90^\circ$  ในแต่ละองค์ประกอบจะสามารถเกิดโพลาริไซซ์รูปแบบอื่นได้เช่นกัน

ชนิดบ่วง (Loop types) รูปแบบชนิดนี้จะมีรูปแบบเป็นบ่วงแบบวงกลม สี่เหลี่ยมและหกเหลี่ยม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบแบบบ่วงสามารถเกิดการเรโซแนนซ์เมื่อความยาวทั้งหมดในแต่ละองค์ประกอบมีความยาวประมาณหนึ่งความยาวคลื่น ดังนั้นขนาดในแต่ละองค์ประกอบจะมีขนาดเล็กกว่าหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ซึ่งพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดนี้นิยมใช้เนื่องจากมีความกว้างแถบความถี่ที่กว้าง

ชนิดแผ่นตัวนำภายในหรือแพตช์ (Solid interior or patch type) ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่มีรูปแบบเป็น แผ่นสี่เหลี่ยม วงกลมและหกเหลี่ยม ซึ่งรูปแบบขององค์ประกอบชนิดแผ่นตัวนำภายในหรือแพตช์นั้นจะมีขนาดเป็นครึ่งความยาวคลื่น

ชนิดผสม (Combination) องค์ประกอบชนิดนี้จะเป็นการผสมกันของรูปแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งรูปแบบของโครงสร้างอาจมีการเปลี่ยนแปลงและการผสมกันแบบไม่สิ้นสุด ดังนั้นการกำหนดขนาดของแผ่นตัวนำภายในแต่ละองค์ประกอบที่จะสามารถทำให้เกิดการเรโซแนนซ์จะสามารถกำหนดได้ยาก

จากตารางที่ 2.1 ได้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยทั่วไปขององค์ประกอบรูปแบบต่าง ๆ จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปแบบวงสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบอื่น ๆ ในด้านความเสถียรเชิงมุม ระดับโพลาไรซ์ไขว้ ความกว้างแถบความถี่และการแยกแบนด์ขนาดเล็ก [13] ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้รูปแบบวงสี่เหลี่ยมมาทำการออกแบบในงานวิจัย

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของรูปแบบองค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่

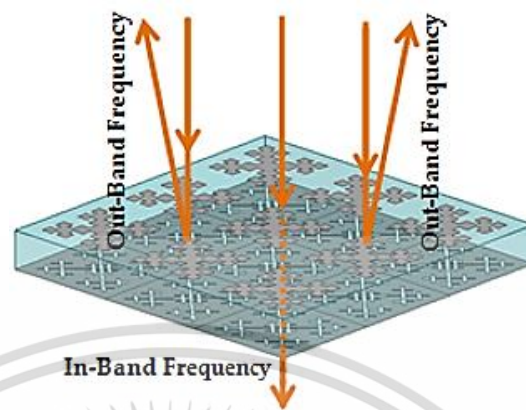
รูปแบบองค์ประกอบ พื้นผิวเลือกความถี่	ความเสถียร	ระดับโพลาไรซ์	ความกว้าง	การแยกแบนด์ ขนาดเล็ก
	เชิงมุม	ไขว้	แบนด์วิดท์	
ไดโพล	1	4	1	4
ไม้กางเขนไขว้	3	2	3	3
วงแหวน	4	3	4	4
ไตรโพล	2	2	2	3
ไดโพลไขว้	2	2	2	2
บ่วงสี่เหลี่ยม	4	4	4	4

โดย อัตรา 1 คือน้อยสุด 2 คือน้อย 3 คือดี และ 4 คือดีที่สุด

เมื่อพิจารณาคลื่นระนาบขาเข้าเป็นแถบผ่าน (Passband) หรือแถบหยุด (Stopband) จะขึ้นอยู่กับลักษณะขององค์ประกอบแถวลำดับ โดยคุณสมบัติเหล่านี้เกิดขึ้นเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) เข้าคู่กันกับความถี่เรโซแนนซ์ขององค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่ ซึ่งคุณสมบัติเด่นของพื้นผิวเลือกความถี่คือ สันฐานต่ำ (Low profile) การโพลาไรซ์แบบคู่ (Dual polarization) ความเสถียรเชิงมุม (Angular stability) การตอบสนองความถี่หลายขั้ว (Multi-pole frequency response) และการผลิตชิ้นงานที่ง่าย โดยรูปที่ 2.10 เป็นการแสดงฟังก์ชันการทำงานของพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำโดยเครือข่ายการเรโซแนนซ์เติมเต็ม (Complementary self-resonating network) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่ พื้นผิวเลือกความถี่จะกระตุ้นกระแสไฟฟ้าเข้าสู่องค์ประกอบอาร์เรย์ระดับพลังงานของการคัปปลิงจะ

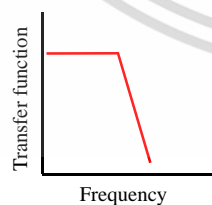
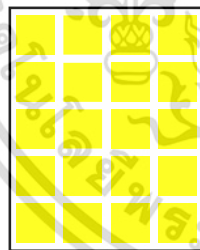
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดแอมพลิจูดของกระแสที่ผลิต ดังนั้นคุณสมบัติของสนามและกระแสที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสม

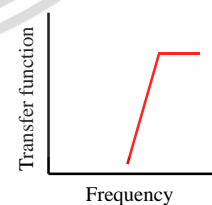
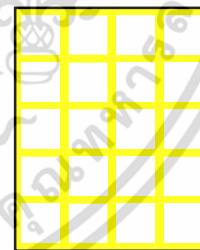


รูปที่ 2.10 การทำงานของพื้นผิวเลือกความถี่

ตัวเก็บประจุ (Capacitive) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductive) ของโครงสร้างพื้นผิวเลือกความถี่หรือที่ถูกระบุว่าตัวกรองเชิงพื้นที่ (Spatial filters) มีคุณสมบัติคล้ายกับตัวกรองไมโครเวฟตามทฤษฎีของวงจร โดยลักษณะการกรองความถี่ของพื้นผิวเลือกความถี่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ความถี่ต่ำผ่าน (Low pass) ความถี่สูงผ่าน (High pass) แถบความถี่หยุด (Stop band) และแถบความถี่ผ่าน (Passband) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบความถี่หยุด เนื่องจากต้องการให้พื้นผิวเลือกความถี่สามารถทำการสะท้อนคลื่นที่ย่านความถี่ที่ออกแบบเพื่อปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศแพทช์ [14]

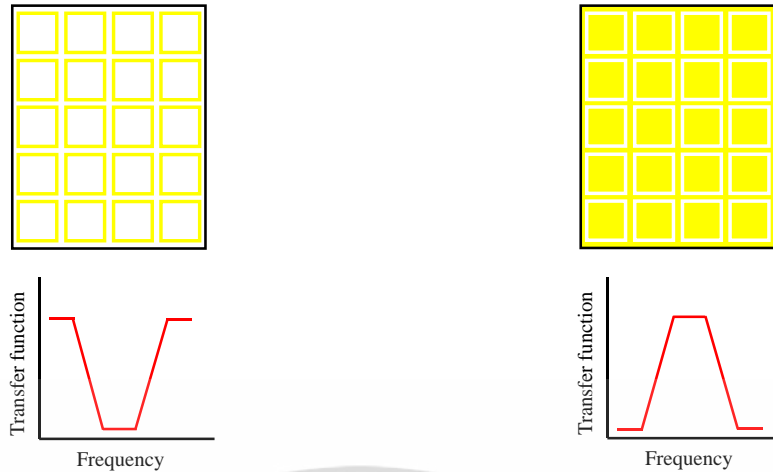


(ก) ความถี่ต่ำผ่าน



(ข) ความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แถบความถี่หยุด

(ง) แถบความถี่ผ่าน

รูปที่ 2.11 ประเภทและการตอบสนองของการกรองพื้นผิวเลือกความถี่

## 2.7 โครงสร้างแบบรายคาบ

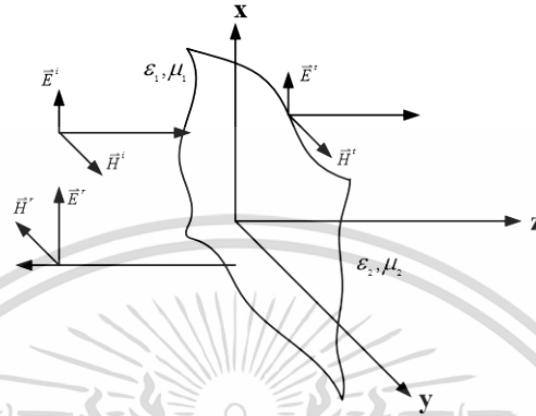
ในทางอุดมคติการวิเคราะห์โครงสร้างรายคาบ (Periodic structure) ต้องใช้ทฤษฎีการขยายที่เป็นอนันต์ เพื่อให้ได้แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงมีผลที่สมบูรณ์ที่สุด แต่ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์จะถูกจำกัดขนาดเนื่องจากทรัพยากรที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดที่จำกัด เมื่อการแพร่กระจายคลื่นกระทบขอบเขต เงื่อนไขที่เหมาะสมของขอบเขตจำเป็นต้องกำกวดสนามที่เกิดการสะท้อนส่งผลให้เกิดการจำลองที่ทำให้เหมือนมีการวิเคราะห์ที่ขอบเขตอนันต์

เงื่อนไขขอบเขตการดูดซับ (Absorbing Boundary Conditions: ABC) ได้มีการวิจัยและพัฒนาการออกแบบให้สามารถดูดซับคลื่นได้ดีขึ้นเพื่อให้สามารถลดทอนได้มากกว่าหรือเท่ากับ 70 dB หรือสามารถเรียกได้ว่าลดทอนปราศจากการสะท้อน เงื่อนไขขอบเขตการดูดซับมีการแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เงื่อนไขขอบเขตการแพร่กระจายที่มีพื้นฐานจากสมการคลื่นเดินทาง [15] และเลเยอร์แมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matches Layers: PML) [16] ซึ่งเทคนิคเลเยอร์แมตช์สมบูรณ์มีพื้นฐานจากการถูกออกแบบเลเยอร์เทียมอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปราศจากการสะท้อน

### 2.7.1 คลื่นตกกระทบตั้งฉากบนตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

โดยปกติแล้วสำหรับเงื่อนไขขอบเขตแบบ PML เมื่อคลื่นมีการตกกระทบบนตัวกลางที่ไม่เหมือนกันคือมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความขابซึมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดคลื่นบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับและคลื่นบางส่วนสามารถส่งผ่าน จากรูปที่ 2.12 แสดงพฤติกรรมของคลื่นสะท้อนและส่งผ่านเมื่อตกกระทบบนตัวกลางที่ไม่เหมือนกัน เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  $E^i$  และ  $H^i$  ถูกส่งให้เดินทางผ่านตัวกลางที่ 1 โดยมีคุณสมบัติเป็น  $\epsilon_1$  และ  $\mu_1$  ซึ่งตกกระทบบนรอยต่อระหว่างตัวกลางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ซึ่งตัวกลางที่ 2 มีคุณสมบัติเป็น  $\epsilon_2$  และ  $\mu_2$  ส่งผลทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นบางส่วนกลับมายังตัวกลางที่ 1 ( $\vec{E}'$  และ  $\vec{H}'$ ) และคลื่นบางส่วนส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 ( $\vec{E}''$  และ  $\vec{H}''$ ) โดยการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นมีผลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซาบซึมของตัวกลางทั้งสอง



รูปที่ 2.12 พลวัตของการสะท้อนและส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบบนตัวกลางที่ไม่เหมือนกัน

### 2.7.2 คลื่นตกกระทบบนรอยต่อที่มีโครงสร้างแบบรายคาบ

การจำลองผลโดยใช้การวิเคราะห์เป็นได้ยากสำหรับรอยต่อที่มีโครงสร้างที่เป็นอนันต์เนื่องจากมีขอบเขตที่จำกัด ซึ่งการวิเคราะห์จะถูกลดทอนเพื่อให้มีขอบเขตที่เหมาะสม โดย PML ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานที่แพร่ออกมาจากตัวแพร่กระจายหรือสายอากาศที่มีขนาดจำกัด ส่วนมากนิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเทียม (Artificial Magnetic Conductor: AMC) โดย AMC มีลักษณะเป็นโครงสร้างรายคาบแบบไม่จำกัดขนาด อาทิเช่น พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surfaces: FSS) โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap Structure: EBG) วัสดุที่มีดัชนีด้านลบทั้งคู่ (Double Negative Index Materials) หลักการของ PML นั้นมีการดูดซับคลื่นที่แพร่กระจายอย่างจำกัดจึงไม่นิยมนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบใหม่ โดยการปรับปรุงและพัฒนาในส่วนการลดขั้นตอนของการวิเคราะห์ซึ่งถูกเรียกว่า เงื่อนไขขอบเขตแบบรายคาบ (Periodic Boundary Condition: PBC) เป็นการจำลองผลแบบรายคาบโดยในส่วนของการวิเคราะห์จะพิจารณาเพียงเซลล์เดียว

โดย PBC ได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของทฤษฎี Floquet [17] สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบรายคาบโดยมีจำนวนรายคาบ  $p$  เรียงตัวในแนวแกน  $x$  โดยสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตทั้งสองคือ  $x=0$  และ  $x=p$  แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\vec{E}(x=0, y, z) &= \vec{E}(x=p, y, z)e^{jk_x p} \\ \vec{H}(x=0, y, z) &= \vec{H}(x=p, y, z)e^{jk_x p}\end{aligned}\quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $k_x$  คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นและเทอมเอ็กโพเนนเชียลคือความหน่วงเฟสการแพร่กระจาย สำหรับกระจายค่าคงที่  $k_x$  สามารถหาได้จากความถี่และมุมตกกระทบบนวัสดุที่มีโครงสร้างรายคาบหรือ PBC ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$k_x = k_0 \sin \theta = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sin \theta \quad (2.2)$$

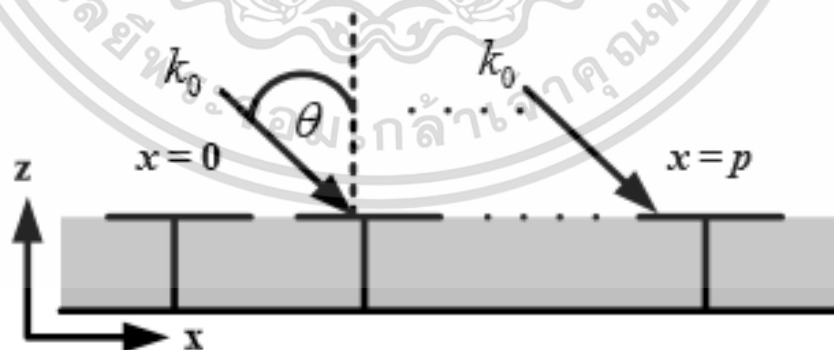
เมื่อ  $k_0$  คือเลขของคลื่นในช่องว่างของโครงสร้างแบบรายคาบ จากสมการที่ (2.1) ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาโดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์จะได้

$$\begin{aligned} \bar{E}(x=0, y, z, t) &= \bar{E}(x=p, y, z, t + p \sin \theta / c) \\ \bar{H}(x=0, y, z, t) &= \bar{H}(x=p, y, z, t + p \sin \theta / c) \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่  $c$  คือความเร็วของคลื่นในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$   $t$  คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของเซลล์รายคาบเริ่มต้นและ  $t + p \sin \theta / c$  คือค่าสนามของเซลล์รายคาบที่ตำแหน่ง  $p$  ซึ่งมีผลตรงข้ามกับความสัมพันธ์ในการจำลองทางโดเมนความถี่

ในกรณีที่คลื่นระนาบ (Plane wave) ตกกระทบตั้งฉากกับโครงสร้างที่มีลักษณะแบบรายคาบ จากรูปที่ 2.13 แทนค่า  $\theta = 0$  ในสมการที่ (2.2) ส่งผลให้ค่า  $k_x = 0$  และนำมาแทนค่าในสมการที่ (2.3) จะได้

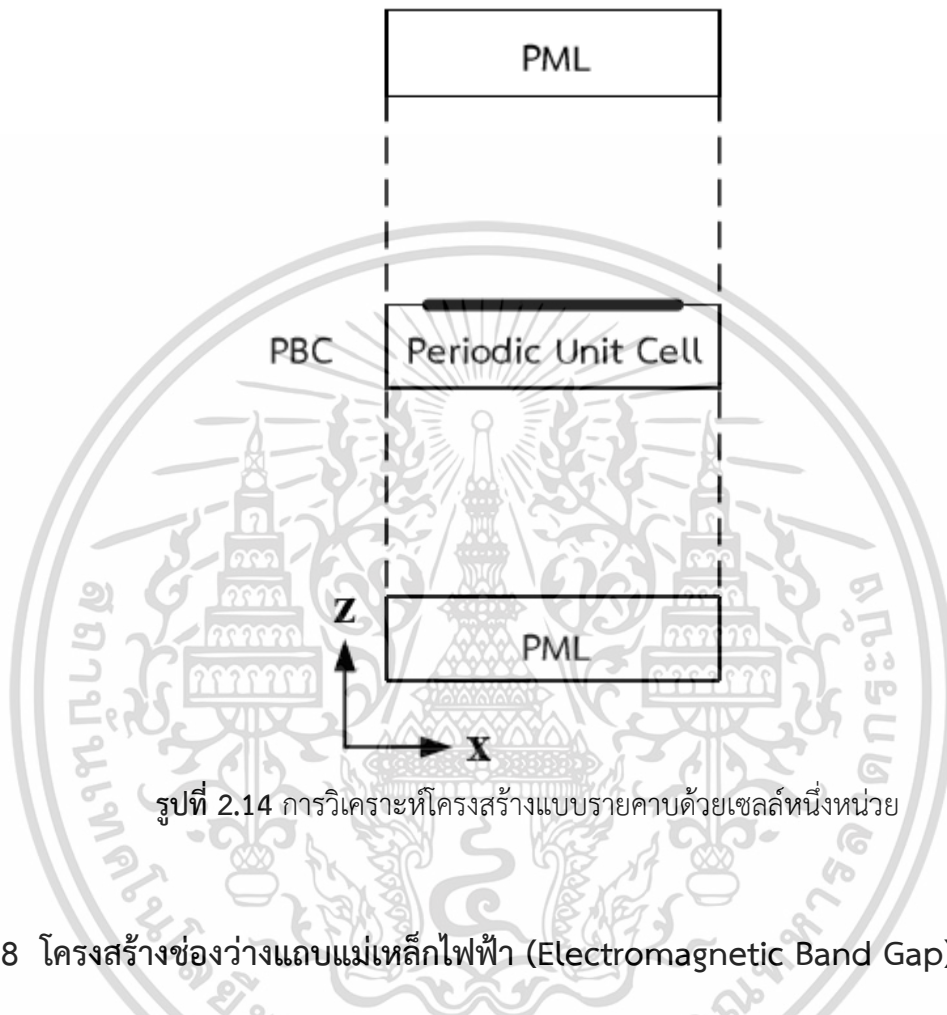
$$\begin{aligned} \bar{E}(x=0, y, z, t) &= \bar{E}(x=p, y, z, t) \\ \bar{H}(x=0, y, z, t) &= \bar{H}(x=p, y, z, t) \end{aligned} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.13 คลื่นตกกระทบบนโครงสร้างแบบรายคาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.4) พบว่าการจำลองแบบ PBC สามารถพิจารณาสนามของเซลล์รายคาบเพียงเซลล์เดียวโดยไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์เซลล์ถัดไป เนื่องจากความซับซ้อนในสมการที่ (2.3) ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.14

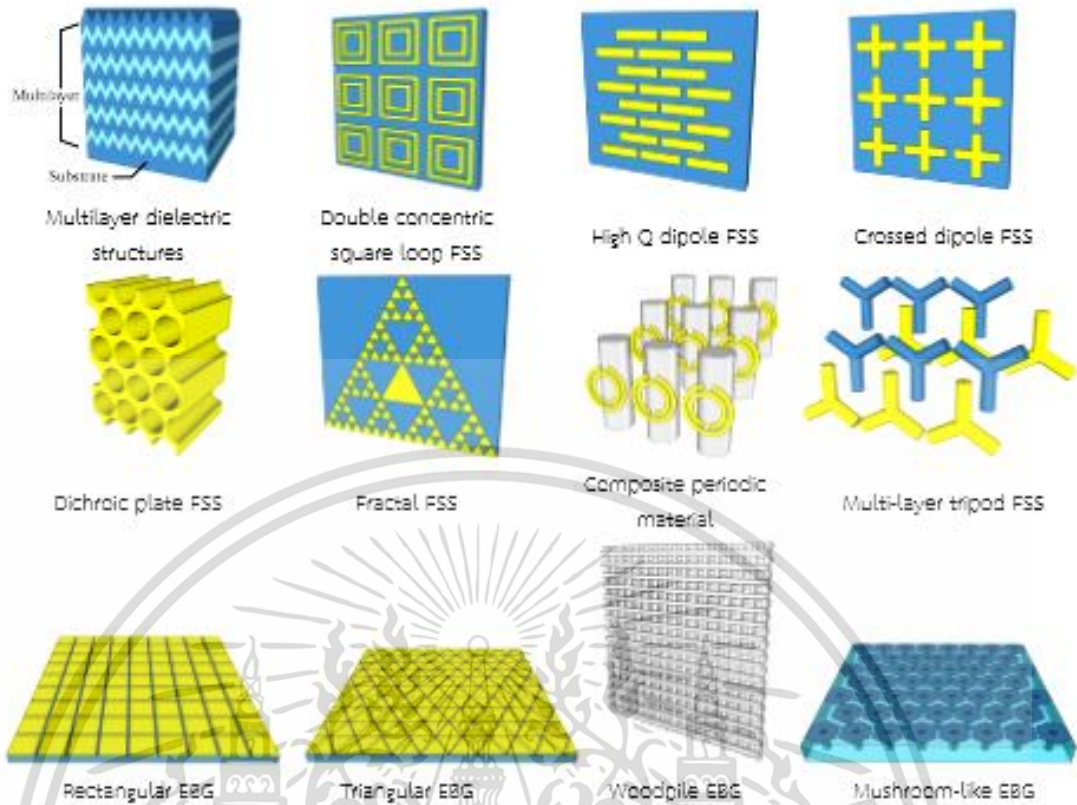


รูปที่ 2.14 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบรายคาบด้วยเซลล์หนึ่งหน่วย

## 2.8 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap)

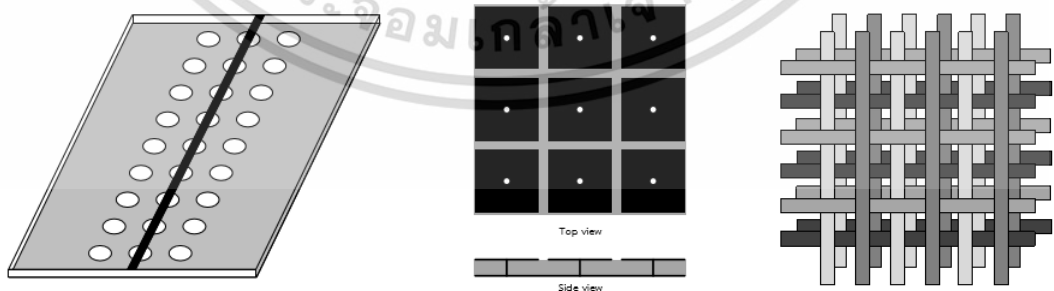
โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap: EBG) เป็นอภิวัดที่มีการจัดเรียงตัวในลักษณะรายคาบและนิยมนำมาประยุกต์ใช้ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าถูกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบผลกระทบที่ได้จะมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก อาทิเช่น แถบผ่านและแถบช่องว่าง (Band gap) ซึ่งมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency selective surface: FSS) การออกแบบตัวกรองความถี่ (Filter design) โครงสร้างแบบตาข่าย (Grating) ผลึกแสง (Photonic crystal) และแถบช่องว่างแสง (Photonic Band Gap: PBG) โดยรูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 รูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นโครงสร้างของวัสดุไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เรียงตัวแบบรายคาบ โครงสร้างทั่วไปของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าโดยคำนึงตามรูปทรงและรูปร่าง ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ โครงสร้างปริมาตรสามมิติ พื้นผิวระนาบสองมิติและสายนำสัญญาณหนึ่งมิติ แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามการประยุกต์ใช้



(ก) สายนำสัญญาณหนึ่งมิติ

(ข) พื้นผิวระนาบสองมิติ

(ค) โครงสร้างปริมาตรสามมิติ

รูปที่ 2.16 โครงสร้างทั่วไปของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ทฤษฎีสายอากาศ

### 2.9.1 แแถบความถี่

แแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) คือช่วงความถี่ของสายอากาศที่มีคุณลักษณะที่สอดคล้องกับมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้เพื่อดูว่าสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ตามย่านความถี่ที่ต้องการหรือไม่ โดยปกติแแถบความถี่จะถูกแสดงในอัตราส่วนของแแถบความถี่สูงต่อแแถบความถี่ต่ำซึ่งสามารถยอมรับได้ในกรณีของสายอากาศที่มีช่วงความถี่แคบ การแสดงค่าของแแถบความถี่ของสายอากาศนั้นโดยทั่วไปจะถูกแสดงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความถี่ (Percentage of the frequency difference) ต่อความถี่กลางของแแถบความถี่ทั้งหมด ซึ่งในมาตรฐานของสายอากาศจะพิจารณาจากช่วงความถี่ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $-10$  dB ( $|S_{11}| \leq -10$  dB) หรือมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2:1 โดยการคำนวณหาความถี่กลาง ( $f_c$ ) ของแแถบความถี่ของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f_c = \frac{f_L + f_H}{2} \quad (2.5)$$

โดยที่  $f_L$  คือความถี่ต่ำที่สุดของแแถบความถี่และ  $f_H$  คือความถี่สูงที่สุดของแแถบความถี่ ซึ่งการคำนวณหาค่าเศษส่วนของความกว้างแแถบความถี่ (Fractional bandwidth: FB) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$FB = 2 \left( \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \right) \quad (2.6)$$

### 2.9.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) คือค่าที่วัดปริมาณของการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับเมื่อป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศ โดยการสูญเสียจะเกิดขึ้นเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือไม่แมตซ์กัน ส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ แสดงว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศไม่สามารถแพร่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ทำให้มีกำลังงานบางส่วนสะท้อนกลับไปในสายส่ง โดยสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) ดังสมการที่ (2.7) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นั้นเป็นจำนวนเชิงซ้อน จากสมการที่ (2.7) เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศมีค่าเท่ากัน ( $Z_0 = Z_A$ ) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ ( $\Gamma = 0$ ) หมายความว่ากำลังงานที่ส่งจากสายส่งจะไม่เกิดการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างสายส่งและสายอากาศ ในทางกลับกันกรณี

ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศมีค่าที่ไม่เท่ากัน ( $Z_0 \neq Z_A$ ) ส่งผลทำให้เกิดกำลังงานสะท้อนกลับมายังสายส่งที่รอยต่อระหว่างสายส่งและสายอากาศ

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.7)$$

คุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  (dB) ก็ได้รับความนิยทางารวิเคราะห์และการแสดงผลการออกแบบสายอากาศในสาขาวิศวกรรมสายอากาศ (Antenna engineering) เช่นเดียวกัน โดยคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) สามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังสมการที่ (2.8) โดยช่วงความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ดีหรือมีการสูญเสียย้อนกลับจะพิจารณาที่  $|S_{11}|$  (dB) มีค่าตั้งแต่ -10 dB เป็นต้นไป

$$|S_{11}| \text{ (dB)} = 20 \log |\Gamma| \quad (2.8)$$

### 2.9.3 อัตราขยาย

อัตราขยาย (Gain) เป็นคุณลักษณะที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างในการออกแบบและการวิเคราะห์ของสายอากาศ โดยคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  (dB) มีความสัมพันธ์กับอัตราขยายอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อกำลังงานจากสายส่งสามารถส่งผ่านไปยังสายอากาศได้แล้วมีการสะท้อนกลับน้อยนั้น หมายความว่าสายอากาศจะสามารถแพร่กระจายคลื่นด้วยกำลังงานที่ได้รับมาจากสายส่งได้อย่างไม่เกิดการสูญเสีย ดังนั้นอัตราขยายจึงเป็นคุณลักษณะที่สามารถใช้พิจารณาว่าสายอากาศที่ออกแบบมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการได้มากน้อยเพียงใด โดยการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นออกไป เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้ทราบว่าสายอากาศนี้สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีกว่าสายอากาศไอโซทรอปิกและได้ดีกว่าในทิศทางใดบ้าง โดยหน่วยของอัตราขยายจะเป็น dBi เมื่อเทียบกับการแพร่กระจายคลื่นกับสายอากาศไอโซทรอปิก

การทดสอบอัตราขยายนั้นในทางปฏิบัติจะต้องติดตั้งสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับที่มีระยะห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับสนามระยะไกล (Far-field:  $R$ ) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $D$  คือมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น

ในกรณีที่สายอากาศภาครับและภาคส่งนั้นมีลักษณะที่เหมือนกัน ( $G_t \neq G_r$ ) การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานในการทดสอบจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) โดยพิจารณาจากกำลังงานของภาคส่ง ( $P_t$ ) และภาครับ ( $P_r$ )

$$(G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่  $P_t$  คือกำลังงานของภาคส่งและ  $P_r$  คือกำลังงานภาครับ

#### 2.9.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) คือรูปแบบที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็นดังนี้

แบบรูปไอโซโทรปิก (Isotropic pattern) เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นออกไปทุกทิศทางเท่ากันทั้งหมดเสมือนรูปทรงกลม ซึ่งในความเป็นจริงนั้นไม่มีสายอากาศใดที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะเช่นนี้ทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติจึงถือว่าแบบรูปไอโซโทรปิกเป็นแบบรูปที่เป็นอุดมคติ อย่างไรก็ตามมักจะถูกนำมาใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทาง (Directional pattern) เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทิศทางที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพกล่าวคือในทิศทางที่กำหนดไว้นั้นจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่าทิศทางอื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง (Omnidirectional pattern) เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นออกไปรอบตัวในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบอื่นที่ตั้งฉากกันจะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางสองทิศทาง

#### 2.9.5 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip line) ถูกนำมาออกแบบใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับสร้างวงจรขยายสัญญาณย่านไมโครเวฟ เนื่องจากสร้างโดยใช้เทคนิคแผ่นวงจรพิมพ์ทำให้มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.17 กล่าวคือสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบ ๆ อยู่บนวัสดุฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวนด์ [18] โดยขนาดของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปหาได้จากสมการ

$$\frac{w}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{for } w/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{for } w/d > 2 \end{cases} \quad (2.11)$$

เมื่อ

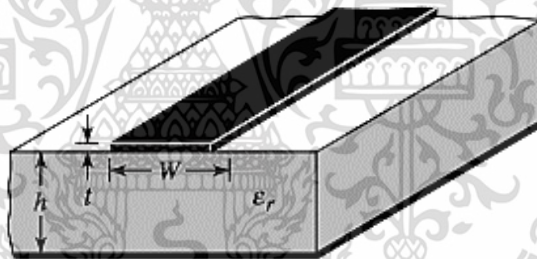
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad \text{และ} \quad B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

โดยที่

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$d$  คือ ความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก



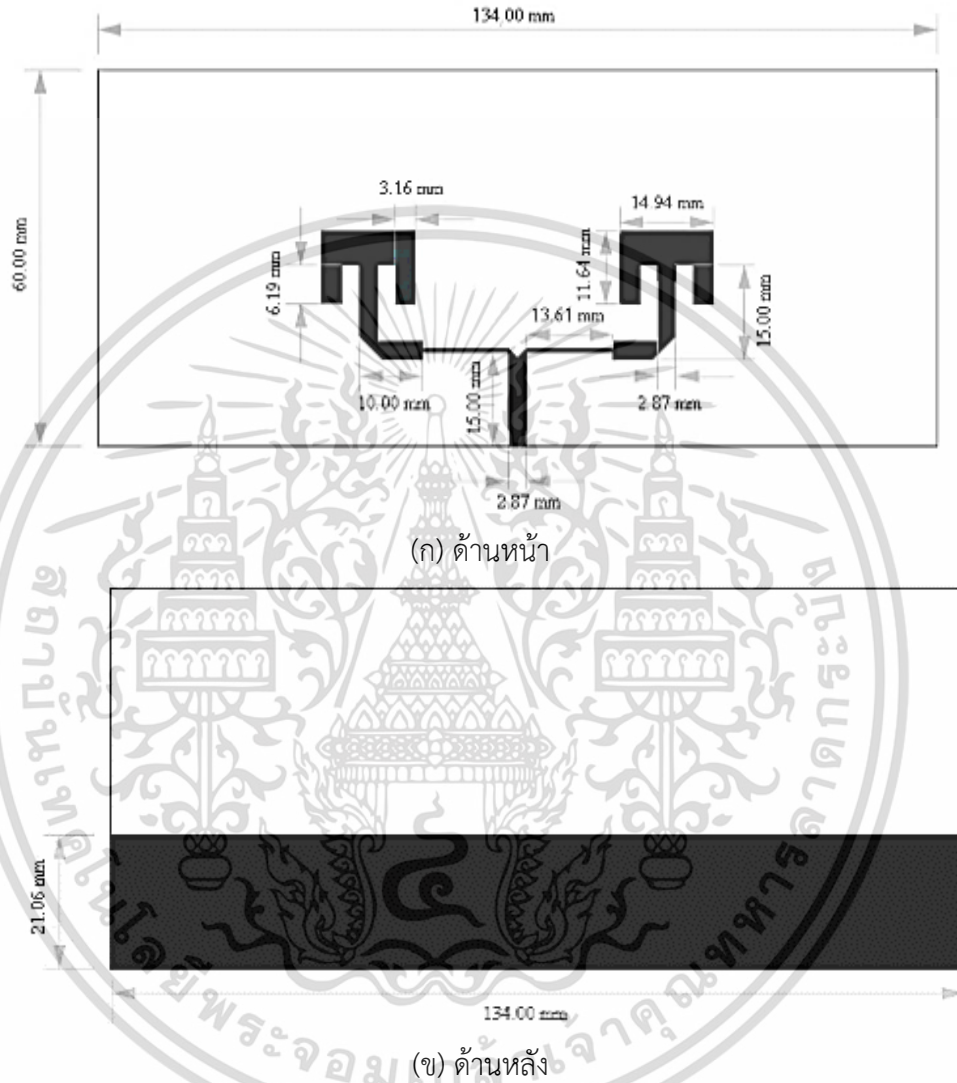
รูปที่ 2.17 โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

## 2.10 ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

### 2.10.1 Performance Optimization of Microstrip Antenna Array Using Frequency Selective Surfaces

ในปี 2014 โดย Valdez A. Almeida Filho และคณะได้นำเสนองานวิจัยเพื่อพิสูจน์ว่าการใช้พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency selective surface : FSS) กับสายอากาศเป็นทางเลือกในการปรับปรุงพารามิเตอร์การแพร่กระจาย (Radiation parameters) มีการเสนอสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริประหว่างพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการใช้งานในระบบ WLAN และ LTE 4G พารามิเตอร์หลายตัวได้รับการปรับปรุงโดยเฉพาะแบนด์วิดท์ (Bandwidth) อัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และโครงสร้างสายอากาศที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่านแสดงดังรูปที่ 2.20 [19]

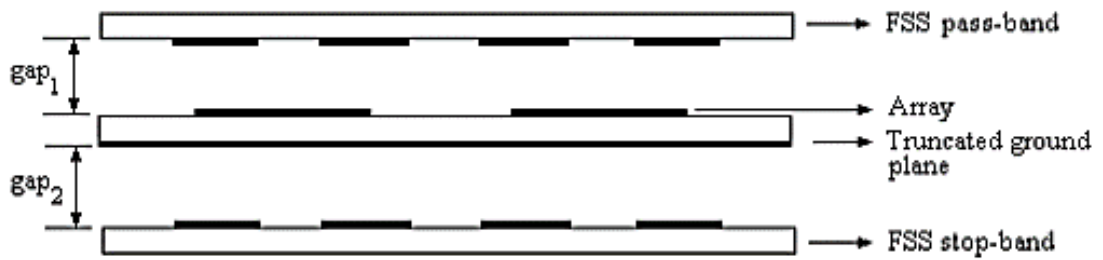


รูปที่ 2.18 โครงสร้างสายอากาศ



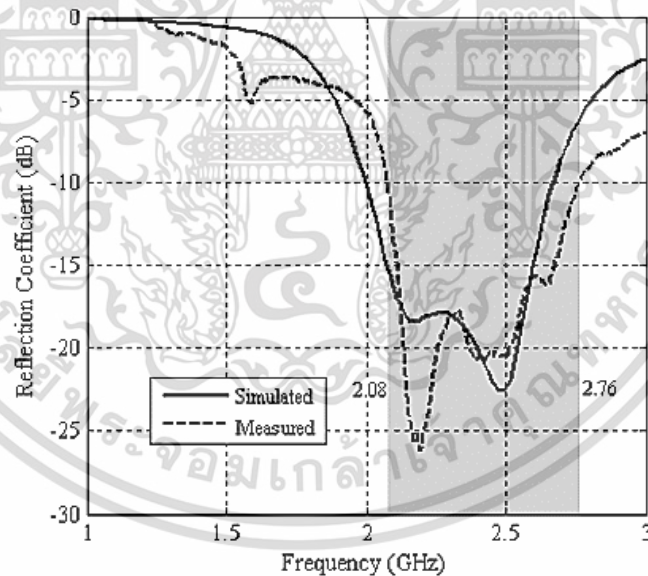
รูปที่ 2.19 โครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



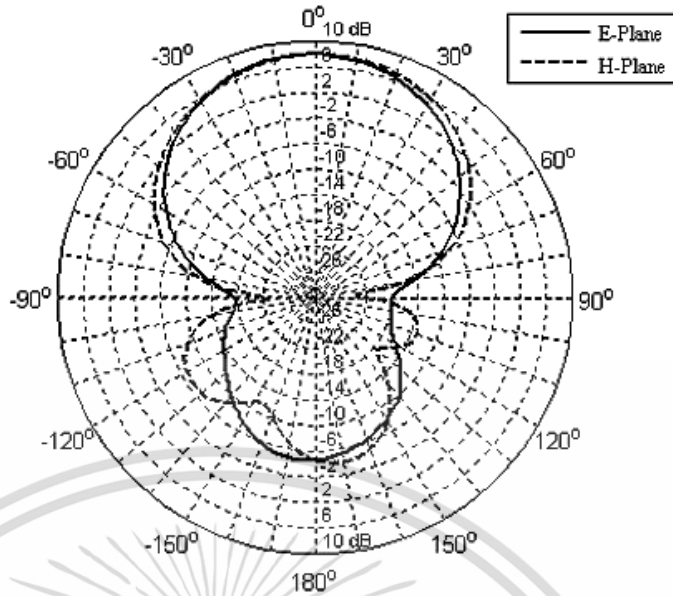
รูปที่ 2.20 โครงสร้างสายอากาศที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด และพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่าน

รูปที่ 2.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จากรูปสังเกตได้ว่าสายอากาศที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่านมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 672 MHz ที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราขยายเท่ากับ 7.67 dBi และสามารถรองรับการใช้งานในระบบ WLAN และ 4G ได้ และจากรูปที่ 2.22 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีค่าประมาณ 85%



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่าน

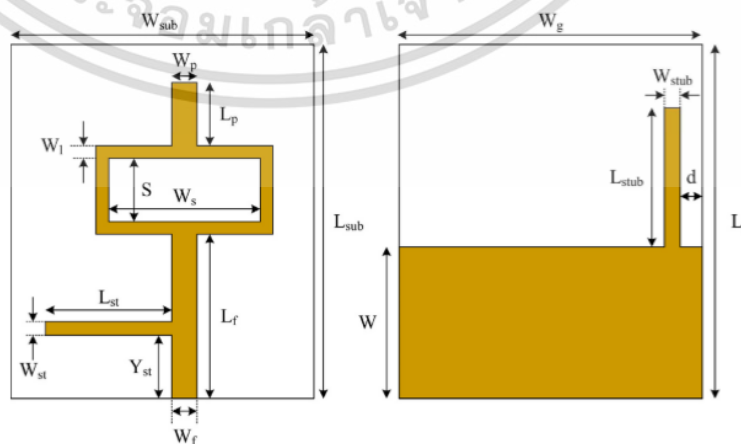
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดและพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบผ่าน

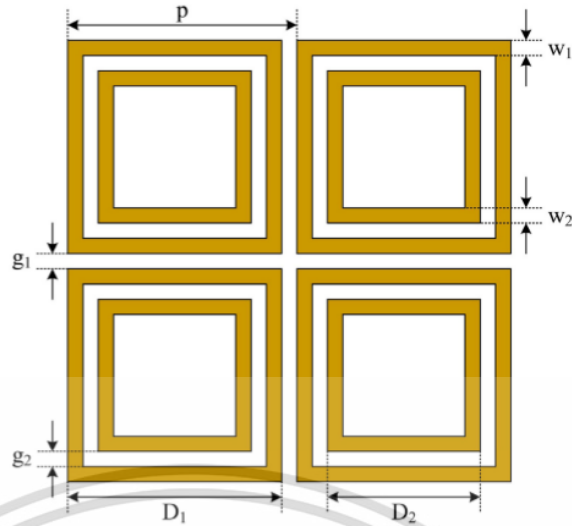
2.10.2 2.4–5.8 GHz dual-band patch antenna with FSS reflector for radiation parameters enhancement

ในปี 2019 E.M.F. Fernandes และคณะได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่สามารถรองรับการใช้งานได้สองย่านความถี่สำหรับย่านความถี่ ISM ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นให้ดีขึ้น โดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด (Frequency Selective Surfaces: FSS) ทำหน้าที่เป็นระนาบสะท้อนให้สายอากาศที่สามารถทำงานได้สองย่านความถี่ ส่งผลให้เกิดการลดลงของพูข้าง (Side lobe) และปรับปรุงพูกคลื่นหลัก (Main lobe) โดยโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแสดงในรูปที่ 2.23 และโครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดแสดงดังรูปที่ 2.24 [20]



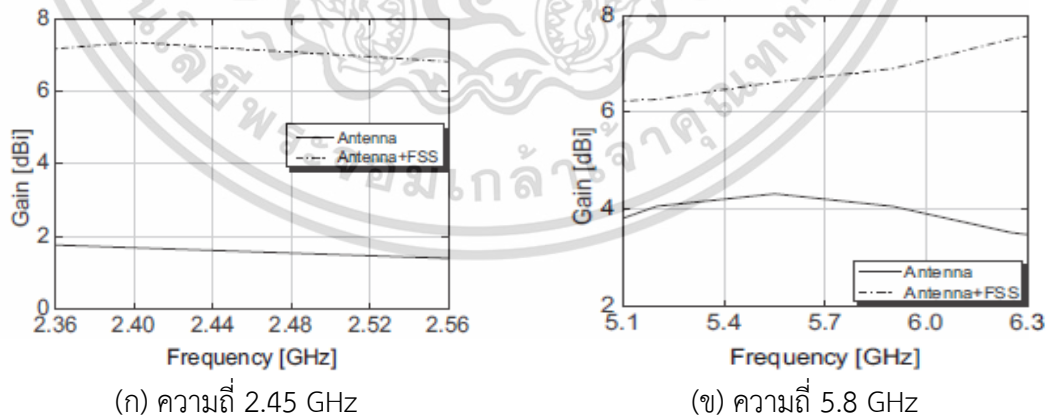
รูปที่ 2.23 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



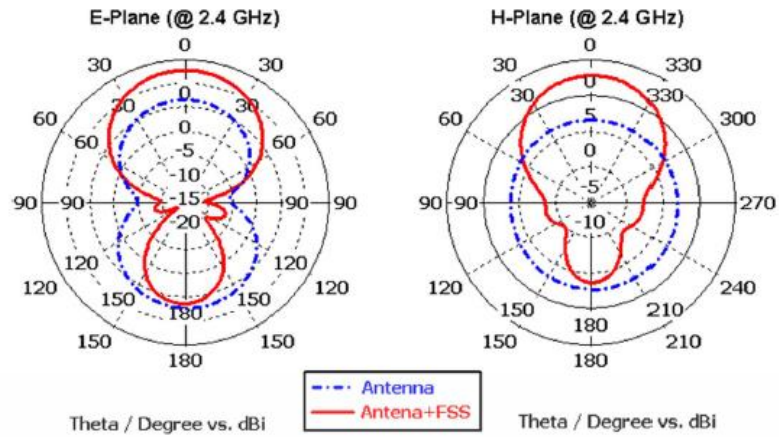
รูปที่ 2.24 โครงสร้างหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด

จากรูปที่ 2.25 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองอัตราขยายระหว่างสายอากาศไมโครสตริปกับสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ จากรูปที่ 2.25(ก) จะสังเกตเห็นได้ว่าจากเดิมอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปตัวเดียวที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายอยู่ที่ 1.8 dBi เมื่อนำสายอากาศมาทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่อัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 7.54 dBi และจากรูปที่ 2.25(ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าจากเดิมอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปตัวเดียวที่ความถี่ 5.8 GHz จากเดิมมีอัตราขยายอยู่ที่ 4.3 dBi เมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปมาทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่อัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 6.8 dBi ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบตัว (Quasi-omnidirectional) ดังแสดงในรูปที่ 2.26

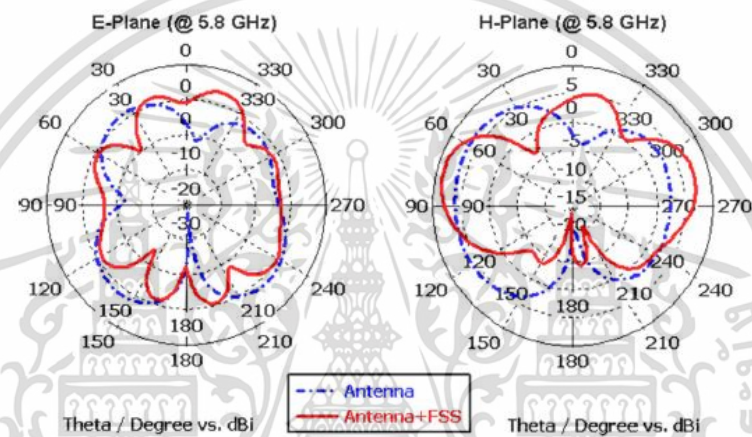


รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบผลการจำลองอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 2.26 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

### 2.11 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอหลักการ ทฤษฎีและการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น สายอากาศแพตช์ สายอากาศตัวสะท้อน อภิวัดศุ พื้นผิวอภิวัดศุ พื้นผิวเลือกความถี่ โครงสร้างแบบรายคาบ โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีสายอากาศและผลงานวิจัยที่มีมาก่อน จากหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวมานั้นทำให้ทราบถึงข้อบกพร่องของสายอากาศแพตช์และคุณสมบัติที่สำคัญของพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อนำไปปรับปรุงข้อบกพร่องของสายอากาศแพตช์ โดยหลักการและทฤษฎีพื้นฐานจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศแพตช์และพื้นผิวเลือกความถี่ในบทถัดไป

### บทที่ 3

## การออกแบบและการจำลองสายอากาศแพทช์วงแหวน และหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวนที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ที่ความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และ 5.8 (5.15-5.895) GHz และต่อมาทำการคำนวณและออกแบบหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ที่สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ได้เช่นเดียวกัน โดยพื้นผิวเลือกความถี่จะถูกนำมาวางไว้ทางด้านหลังของสายอากาศแพทช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายและแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ สำหรับการออกแบบและการจำลองผลจะใช้โปรแกรม CST Studio Suit 2017 โดยจะศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์รวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะนำเสนอในลำดับต่อไป

### 3.2 การออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวน

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแพทช์วงแหวน เบื้องต้นการออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวนมีพื้นฐานบนทฤษฎีของสายอากาศแพทช์วงกลม [1] ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการใช้ในการคำนวณหาขนาดของสายอากาศแพทช์ โดยโครงสร้างของสายอากาศแพทช์นั้นได้มีการพัฒนารูปลักษณะจากรูปแบบวงกลมเป็นรูปแบบวงแหวนที่ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.035 mm ซึ่งเส้นไมโครสตริปถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแพทช์วงแหวนด้วยสายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าใกล้ 50  $\Omega$  โดยรัศมีของแพทช์วงกลม ( $r_1$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [21-22]

$$r_1 = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

โดยที่  $f_r$  คือความถี่เรโซแนนซ์และ  $h$  คือความหนาของวัสดุฐานรอง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของวัสดุฐานรองของสายอากาศแพตช์ ( $S_x$ ) และความยาวของวัสดุฐานรองของสายอากาศแพตช์ ( $S_y$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_x = S_y = 6h + w \quad (3.3)$$

เมื่อ  $w = c/2f_r \sqrt{2/(\epsilon_r + 1)}$  และ  $c$  คือความเร็วแสง

ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ( $W_s$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.11) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับความยาวของสายส่งไมโครสตริป ( $L_s$ ) และความยาวของระนาบกราวด์ ( $L_g$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$L_s = L_g = \frac{\lambda_g}{4} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$\lambda_g = \frac{c/f_r}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3.5)$$

และ

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{S_x} \right) \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.2) เมื่อ  $f_r$  มีค่าเท่ากับ 2.45 GHz และ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.3 สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์  $F$  ได้มีค่าเท่ากับ 1.73 ดังนั้นนำค่า  $F$  แทนในสมการที่ (3.1) จะได้รัศมีของแพตช์วงกลม ( $r_f$ ) มีค่าเท่ากับ 17.29 mm

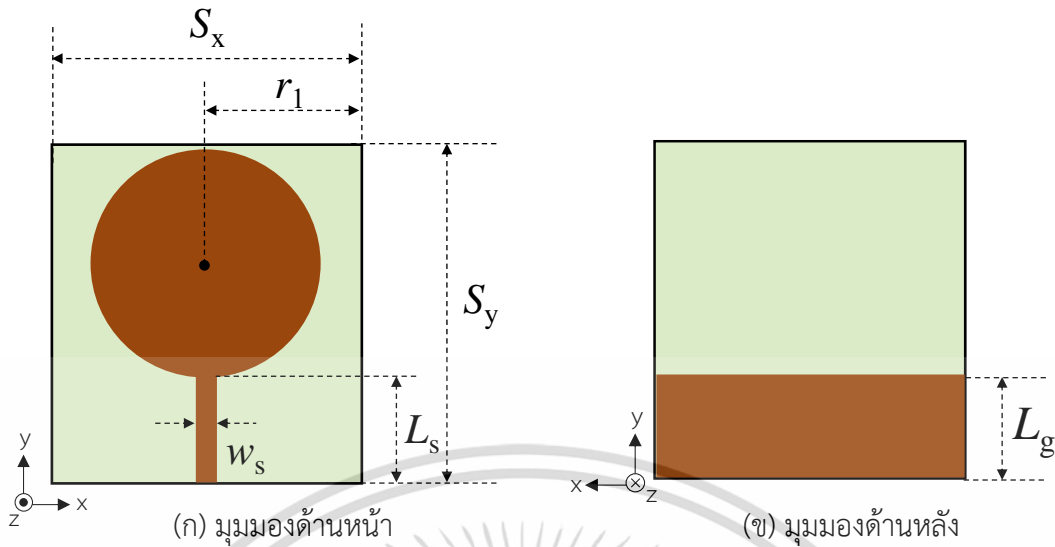
จากสมการที่ (3.3) เมื่อ  $h$  มีค่าเท่ากับ 1.6 mm และ  $c$  มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s สามารถคำนวณหาความกว้างของวัสดุฐานรองของสายอากาศแพตช์ ( $S_x$ ) และความยาวของวัสดุฐานรองของสายอากาศแพตช์ ( $S_y$ ) มีค่าเท่ากับ 47.21 mm

จากสมการที่ (2.11) เมื่อ  $Z_0$  มีค่าเท่ากับ 50  $\Omega$  และ  $d$  มีค่าเท่ากับ 1.6 mm สามารถคำนวณหาความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ( $W_s$ ) มีค่าเท่ากับ 3.12 mm และในสมการที่ (3.4)-(3.6) เมื่อแทนค่าในสมการแล้ว  $\epsilon_{\text{eff}}$  มีค่าเท่ากับ 3.63  $\lambda_g$  มีค่าเท่ากับ 64.31 mm ดังนั้นความยาวของสายส่งไมโครสตริป ( $L_s$ ) และความยาวของระนาบกราวด์ ( $L_g$ ) มีค่าเท่ากับ 16.08 mm

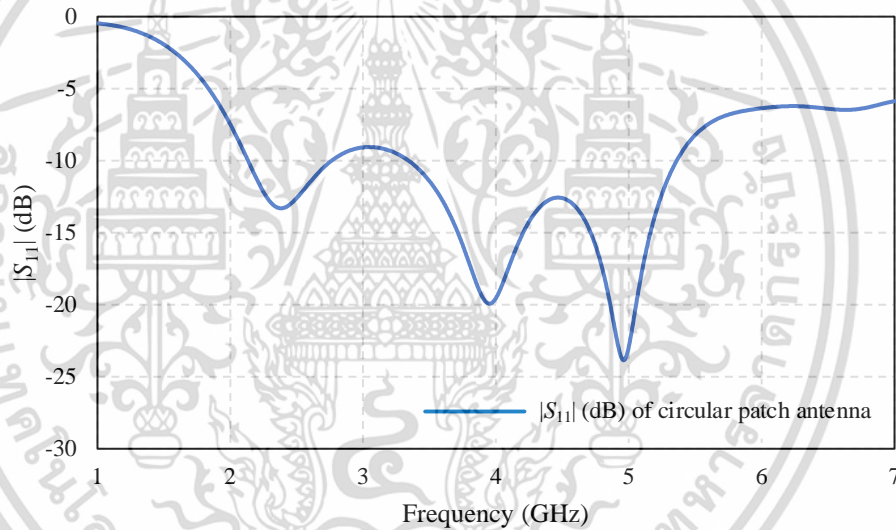
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมแล้วต่อมานำค่าที่ได้จากการคำนวณไปจำลองผลในโปรแกรม โดยโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.1 และผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมแสดงดังรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.2 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีการตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -13.04 dB ในทางกลับกันที่ความถี่ 5.8 GHz ยังไม่มีการตอบสนองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงกลม

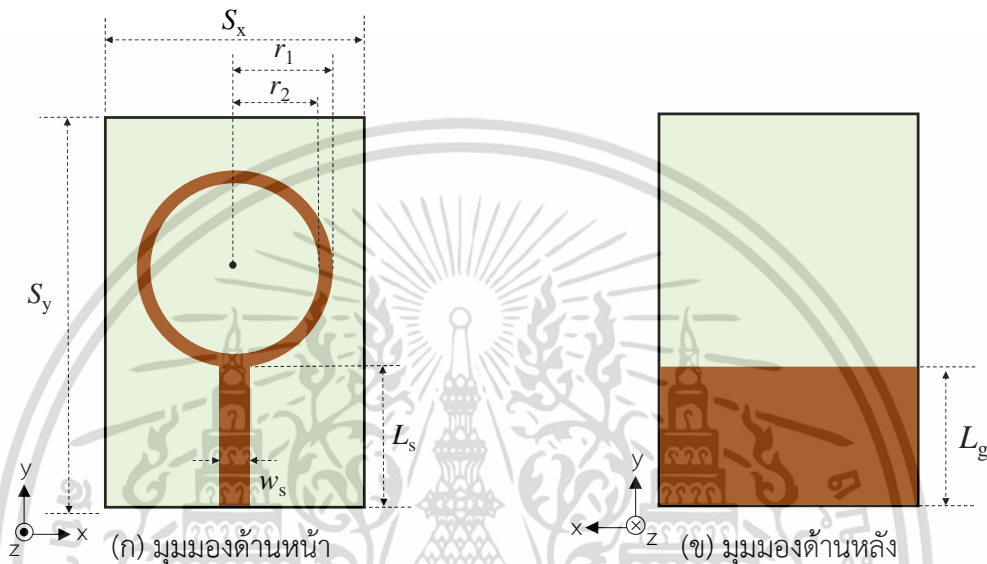


รูปที่ 3.2 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลม

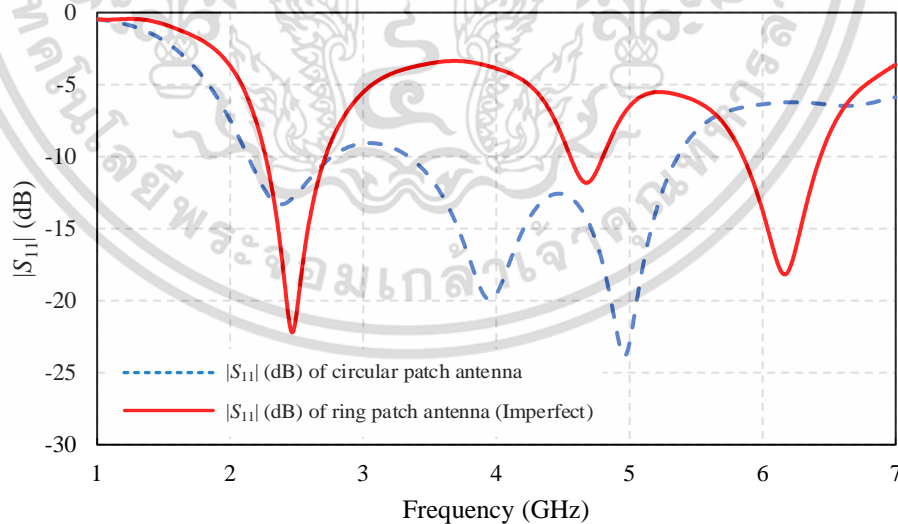
โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ของสายอากาศอากาศแพตช์วงแหวนนั้น ทางผู้จัดทำได้ปรับปรุงพารามิเตอร์  $S_x$  มีค่าเท่ากับ 30 mm พารามิเตอร์  $S_y$  มีค่าเท่ากับ 45 mm พารามิเตอร์  $L_s$  มีค่าเท่ากับ 16.1 mm พารามิเตอร์  $L_g$  มีค่าเท่ากับ 15 mm พารามิเตอร์  $w_s$  มีค่าเท่ากับ 3.5 mm และพารามิเตอร์  $r_1$  มีค่าเท่ากับ 11.5 mm นอกจากนี้ทางผู้จัดทำทำการเซาะแพตช์วงกลมให้เป็นแพตช์วงแหวนซึ่งขนาดของรัศมีวงกลมวงใน ( $r_2$ ) มีค่าเท่ากับ 10 mm โดยโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์แสดงในรูปที่ 3.3 และการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.4

จากรูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์ จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีการแมชชิงที่ดีขึ้นเมื่อพิจารณาที่ -10 dB มีค่าเท่ากับ -21.77 dB ถึงแม้ว่าที่ย่านความถี่ 5.8 GHz สายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์จะยังไม่สามารถรองรับการทำงานได้แต่ก็มีการตอบสนองที่ย่านความถี่ใกล้เคียง ดังนั้นทางผู้จัดจึงได้ทำการเพิ่มเส้นลวดรูปตัวยูคว่ำเข้าไปยังตรงกลางของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์เพื่อทำให้เกิดการตอบสนองของย่านความถี่ 5.8 GHz



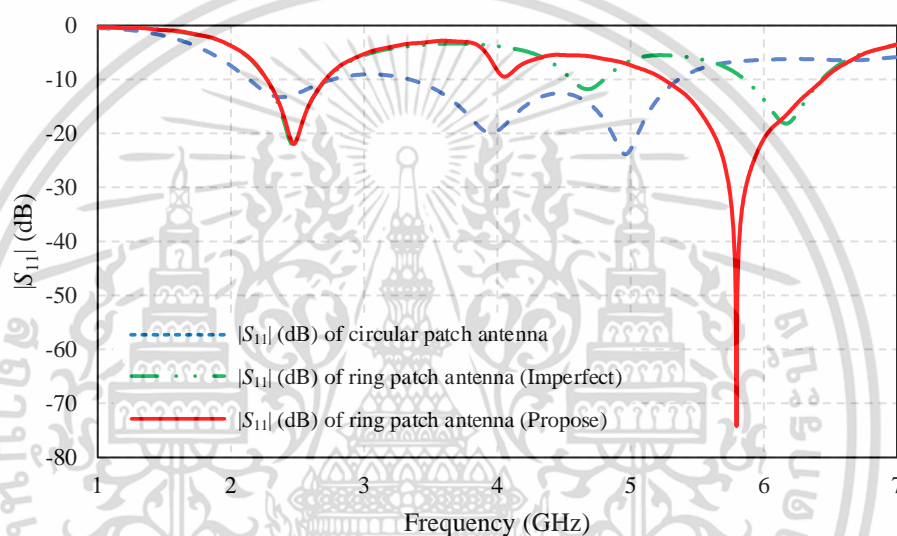
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

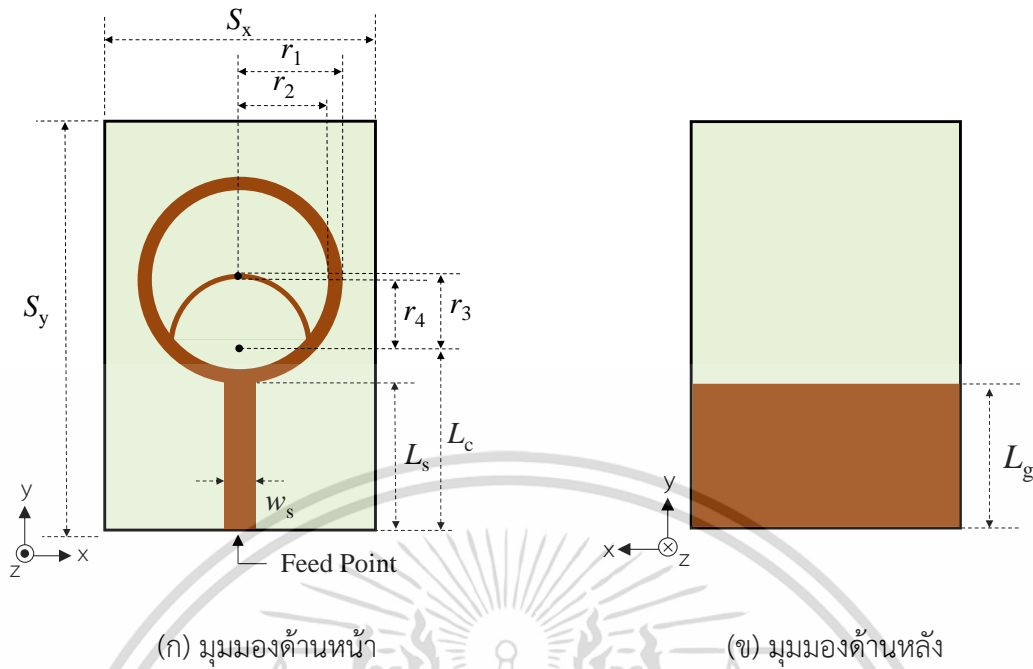
เมื่อทำการเพิ่มเส้นลวดรูปตัวยูคว่ำเข้าไปยังตรงกลางของสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอมีการตอบสนองที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงแหวน เมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -50.55 dB ซึ่งการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลม สายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์และสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอได้แสดงในรูปที่ 3.5 โดยโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงกลม สายอากาศแพตช์วงแหวนไม่สมบูรณ์และสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอ

### 3.2.1 สรุปโครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวน

สายอากาศแพตช์วงแหวนที่เสนอถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.8 GHz ซึ่งสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอประกอบด้วยแพตช์วงแหวนที่ตรงกลางมีเส้นลวดรูปตัวยูคว่ำบรรจุอยู่บนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกชนิด FR-4 ถูกป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป โดยโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอได้แสดงในรูปที่ 3.6 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอแสดงดังตารางที่ 3.1



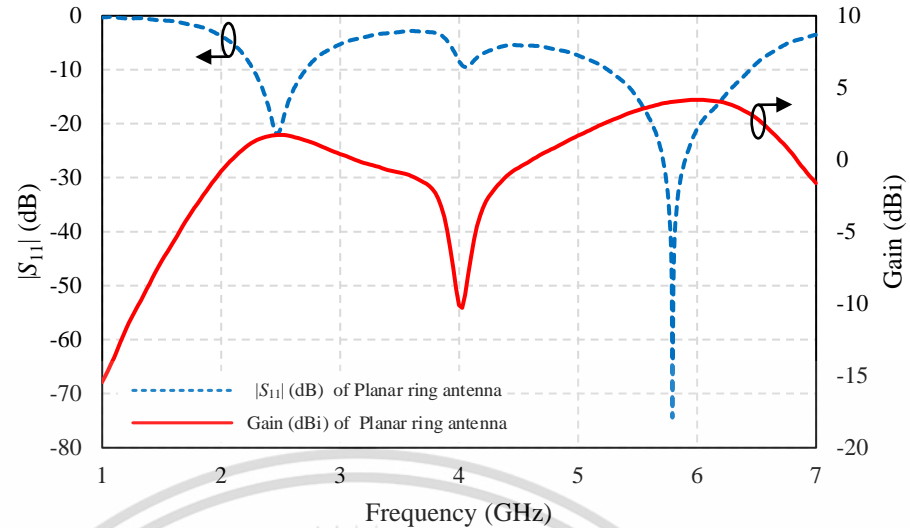
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$S_x$	30	$r_4$	7.5
$S_y$	45	$w_s$	3.5
$r_1$	11.5	$L_c$	20
$r_2$	10	$L_s$	16.1
$r_3$	8	$L_g$	15

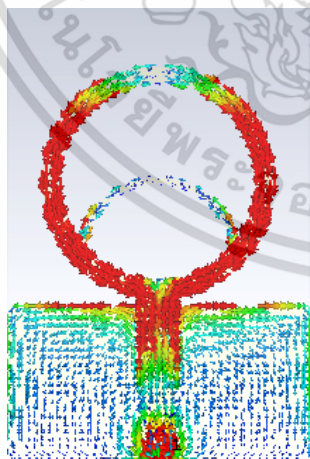
จากการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-21.16$  dB และที่ย่านความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-50.55$  dB และผลการจำลองของอัตราขยายที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $1.70$  dBi และที่ย่านความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $4.01$  dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

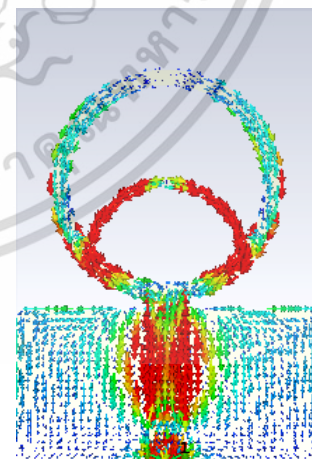


รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพทช์วงแหวนที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3.8 แสดงผลการจำลองของการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว (Surface current distributions) ของสายอากาศแพทช์วงแหวนที่นำเสนอที่ความถี่ 2.45 GHz และที่ความถี่ 5.8 GHz ซึ่งการจำลองของการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวเป็นการแสดงตำแหน่งของการตอบสนองของแต่ละความถี่ จากรูปที่ 3.8 (ก) จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณวงแหวนและสายส่งไมโครสตริปและในรูปที่ 3.8 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณของเส้นลวดรูปตัวยูคว่ำและสายส่งไมโครสตริป



(ก) ความถี่ 2.45 GHz

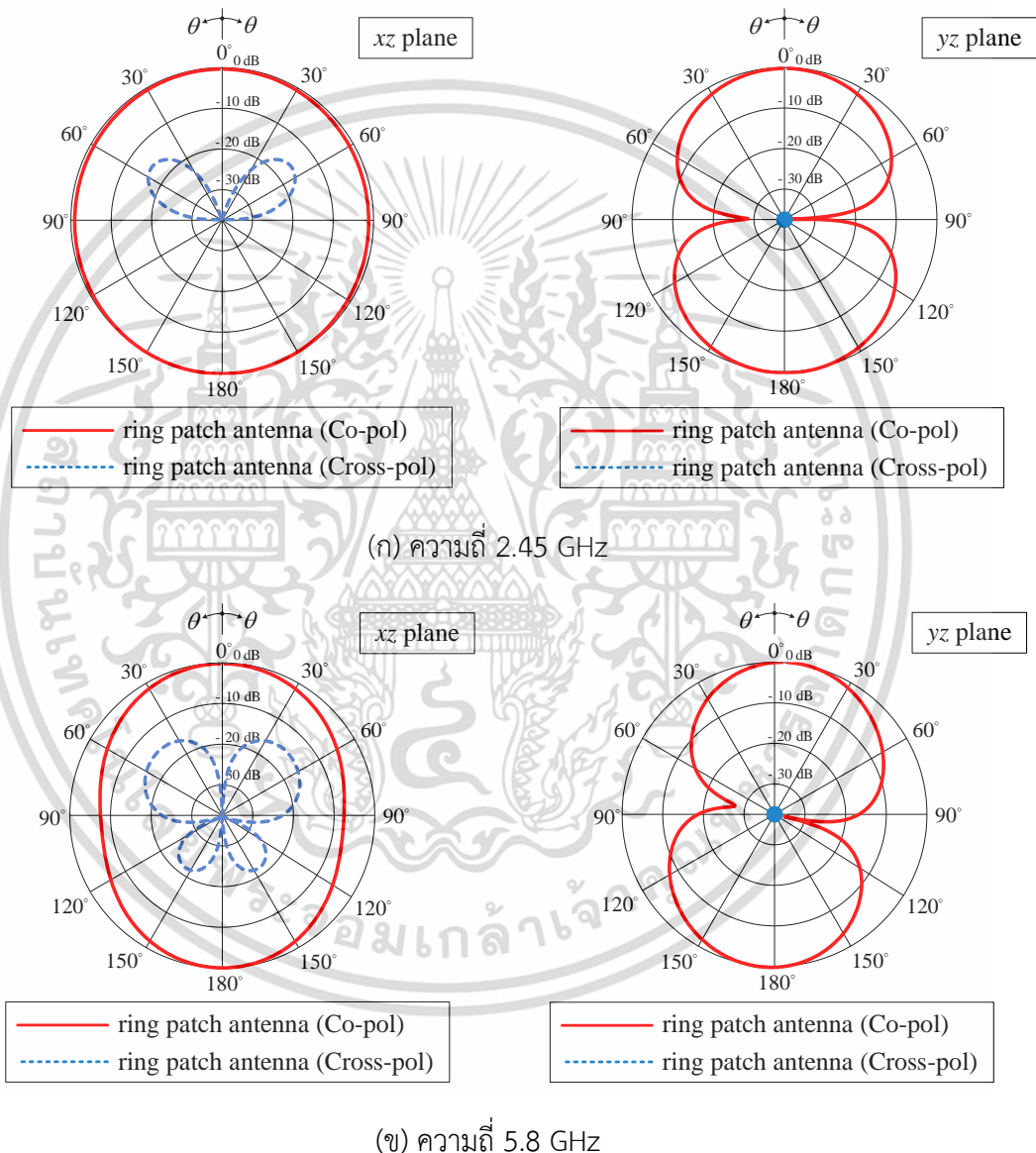


(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของสายอากาศแพทช์วงแหวนที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized radiation pattern) ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (Bidirectional radiation pattern)

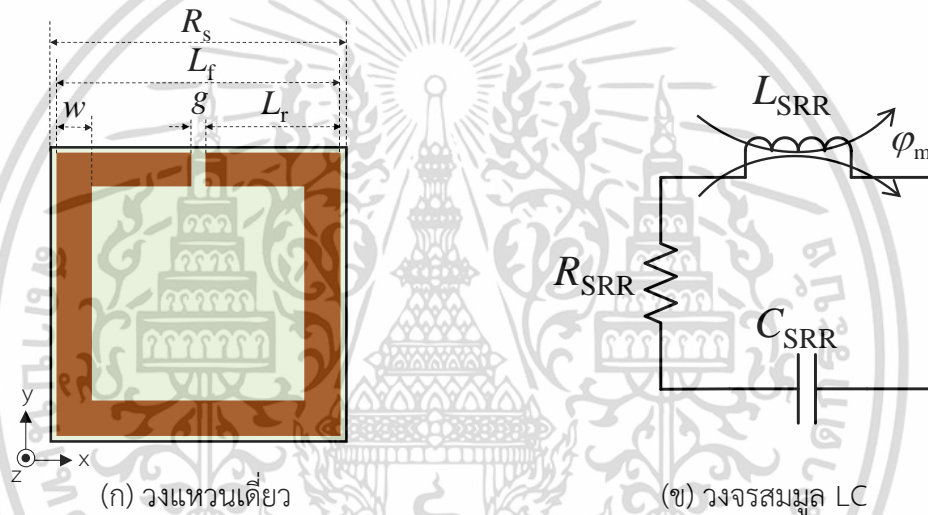


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดรูปแบบบ่วงสี่เหลี่ยม 2 บ่วง เนื่องจากต้องการให้พื้นผิวเลือกความถี่สามารถทำการสะท้อนคลื่นได้ 2 ย่านความถี่คือที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งประเภทการตอบสนองของพื้นผิวเลือกความถี่และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปร่างองค์ประกอบของพื้นผิวเลือกความถี่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยโครงสร้างของพื้นผิวเลือกความถี่นั้นประกอบด้วยโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators: SRRs) ถูกบรรจุบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.035 mm ซึ่งโครงสร้างวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างวงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก

โดยเริ่มแรกเป็นการคำนวณหาการประมาณค่าของความถี่เรโซแนนซ์วงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกซึ่งจะเป็นการคำนวณหนึ่งวงแหวนต่อหนึ่งความถี่เรโซแนนซ์ โดยความถี่เรโซแนนซ์วงแหวนเดี่ยวของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก ( $f_{SRR}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [23]

$$f_{SRR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{SRR}C_{SRR}}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $L_{SRR}$  คือค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนวงเดี่ยวและ  $C_{SRR}$  คือค่าความประจุสมมูล ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนเดี่ยวและค่าความประจุสมมูล สามารถคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{\text{SRR}} = \frac{\mu_0 \pi L_m^2}{h} \quad (3.8)$$

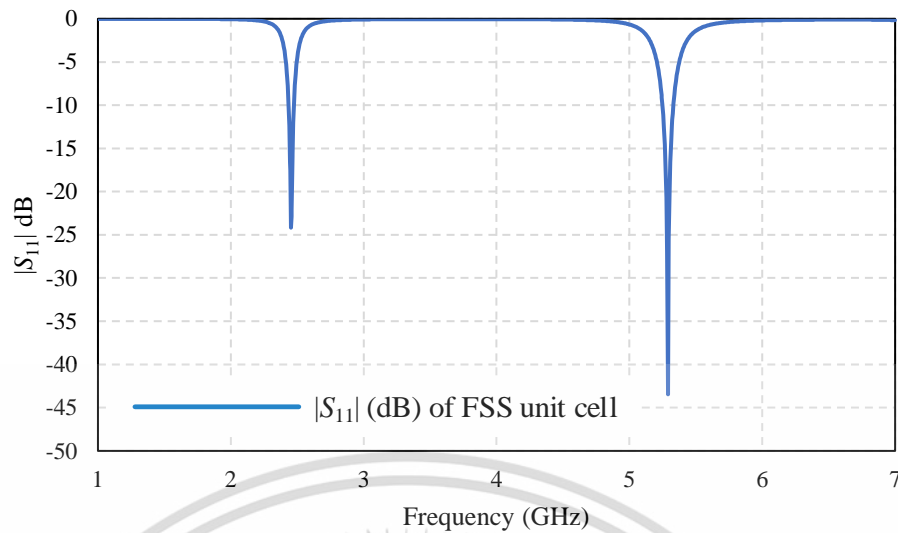
$$C_{\text{SRR}} = \frac{\varepsilon_0 h w}{g} \quad (3.9)$$

โดยที่  $L_m = L_r/2 - w/2$  และ  $\mu_0$  คือค่าความซาบซึมแม่เหล็กในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m  $\varepsilon_0$  คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ  $1/36\pi \times 10^9$  F/m และ  $h$  คือความหนาของวัสดุฐานรองมีค่าเท่ากับ 1.6 mm

การคำนวณพารามิเตอร์ทางโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 2.45 GHz จากสมการที่ (3.8) เมื่อ  $L_r$  มีค่าเท่ากับ 20 mm  $w$  มีค่าเท่ากับ 2.5 mm และ  $g$  มีค่าเท่ากับ 1 mm จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนวงเดียว ( $L_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 2.45 GHz ได้มีค่าเท่ากับ 0.19  $\mu\text{H}$  และจากสมการที่ (3.9) จะได้ค่าความประจุสมมูล ( $C_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 0.03 pF ดังนั้นเมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนวงเดียวและค่าความประจุสมมูลของความถี่ 2.45 GHz แทนค่าในสมการที่ (3.7) จะสามารถคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 2.45 GHz ได้มีค่าเท่ากับ 2.11 GHz

การคำนวณพารามิเตอร์ทางโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยกของย่านความถี่ 5.8 GHz จากสมการที่ (3.8) เมื่อ  $L_r$  มีค่าเท่ากับ 11 mm  $w$  มีค่าเท่ากับ 2.5 mm และ  $g$  มีค่าเท่ากับ 1 mm จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนวงเดียว ( $L_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 5.8 GHz ได้มีค่าเท่ากับ 0.04  $\mu\text{H}$  และจากสมการที่ (3.9) จะได้ค่าความประจุสมมูล ( $C_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 0.03 pF ดังนั้นเมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวนวงเดียวและค่าความประจุสมมูลของความถี่ 5.8 GHz แทนค่าในสมการที่ (3.7) จะสามารถคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_{\text{SRR}}$ ) ของความถี่ 5.8 GHz ได้มีค่าเท่ากับ 4.59 GHz

ลำดับถัดมานำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดมาทำการจำลองผลเพื่อดูค่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB มีการตอบสนองที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -24.16 dB และที่ย่านความถี่ 5.29 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -43.47 dB ซึ่งผลการจำลองมีผลใกล้เคียงกับผลคำนวณทางทฤษฎี โดยโครงสร้างหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่แสดงดังรูปที่ 3.12 ขนาดและพารามิเตอร์เริ่มต้นของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ขนาดและพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$R_s$	25	$w_1$	2.5
$L_1$	20	$w_2$	2.5
$L_{12}$	15	$w_g$	2
$L_2$	11	$g_1$	1
$L_{22}$	6	$g_2$	1

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ การออกแบบและการศึกษาจำลองผลของสายอากาศแพตช์วงแหวนและหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุด จากผลการจำลองสายอากาศแพตช์วงแหวนสามารถรองรับการใช้งานได้ 2 ย่านความถี่คือที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยมีอัตราขยายเท่ากับ 1.70 dBi และ 4.01 dBi ซึ่งยังคงมีอัตราขยายที่ต่ำ ดังนั้นจึงทำการออกแบบหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดให้สามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz เช่นเดียวกัน โดยจะนำไปวางไว้ทางด้านหลังของตัวสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อทำการสะท้อนคลื่นให้กับตัวสายอากาศแพตช์วงแหวนส่งผลให้ทำให้เกิดการปรับปรุงอัตราขยาย โดยการวิเคราะห์และการออกแบบการทำงานร่วมกันของสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดจะถูกกล่าวถึงในบทถัดไป

## บทที่ 4

# การออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ที่ทำงานร่วมกับ สายอากาศแพทช์วงแหวน

### 4.1 บทนำ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ช่องสัญญาณและอัตราขยายของสายอากาศรองรับการใช้งานได้ไม่เพียงพอ โดยสายอากาศแพทช์ได้รับความนิยมเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น อย่างไรก็ตามสายอากาศแพทช์ยังมีข้อบกพร่องบางประการคือ อัตราขยายต่ำและแถบความถี่แคบ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้พื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดนำมาทำการปรับปรุงข้อบกพร่องของสายอากาศแพทช์วงแหวน โดยการนำพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่มีขนาดมิติ  $3 \times 3$  cell นำมาวางไว้ทางด้านหลังของตัวสายอากาศแพทช์วงแหวน ซึ่งบทนี้จะทำการอธิบาย การคำนวณและการวิเคราะห์ของระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศแพทช์กับพื้นผิวเลือกความถี่และการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อให้พื้นผิวเลือกความถี่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

### 4.2 ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่

ในหัวข้อนี้เป็นการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่โดยคำนวณและวิเคราะห์จากค่าเฟสการสะท้อน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [24]

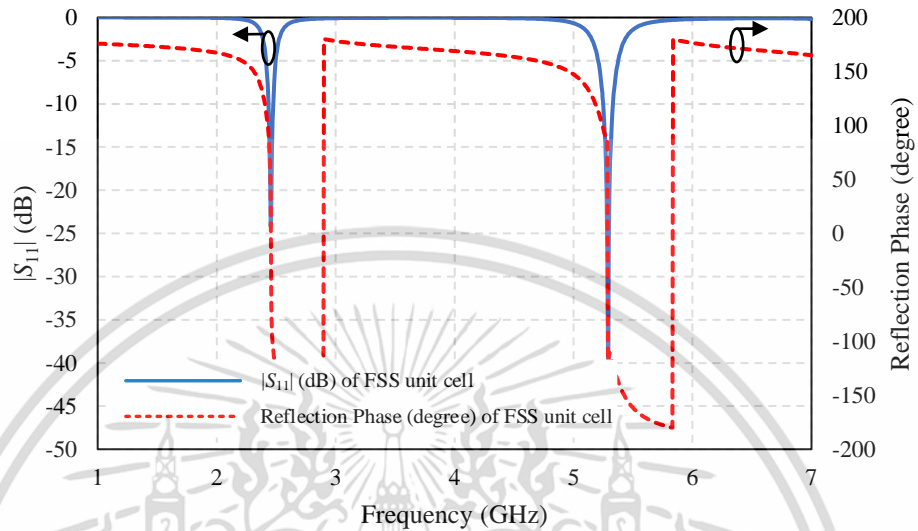
$$D_z = \frac{\phi_r (\text{rad}) \cdot c}{2 \times 360 \times f \times 10^{-3}} \quad (4.1)$$

โดยที่  $D_z$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่  $\phi_r$  คือค่าเฟสการสะท้อน  $c$  คือความเร็วแสงและ  $f$  คือความถี่เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ ซึ่งได้ถูกออกแบบไว้ในบทที่ 3 จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.29 GHz มีค่าเฟสการสะท้อนเท่ากับ  $38.903^\circ$  และ  $-148.36^\circ$  ตามลำดับ เมื่อทราบค่าเฟสการสะท้อนจึงทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ในสมการที่ (4.1) จะได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ ( $D_z$ ) ของย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 6.14 mm และที่ย่านความถี่ 5.29 GHz มีค่าเท่ากับ 11.68 mm

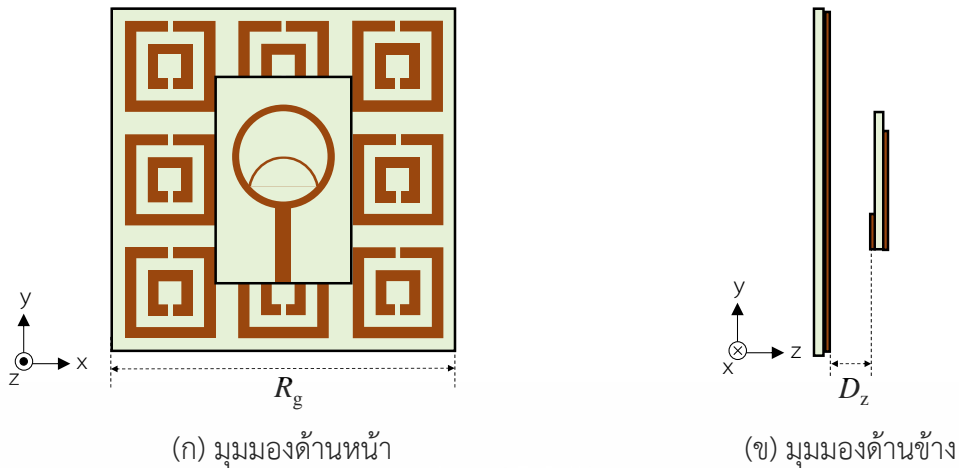


รูปที่ 4.1 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสการสะท้อนของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่

จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ ( $D_{z(\text{avg})}$ ) ของทั้งสองย่านความถี่ดังสมการต่อไปนี้

$$D_{z(\text{avg})} = \frac{D_{z(2.45 \text{ GHz})} + D_{z(5.8 \text{ GHz})}}{2} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) เมื่อแทนค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ของทั้งสองย่านความถี่ จะได้ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่มีค่าประมาณ 9 mm โดยในลำดับถัดไปจะใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ระยะ 9 mm ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยโครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4.2

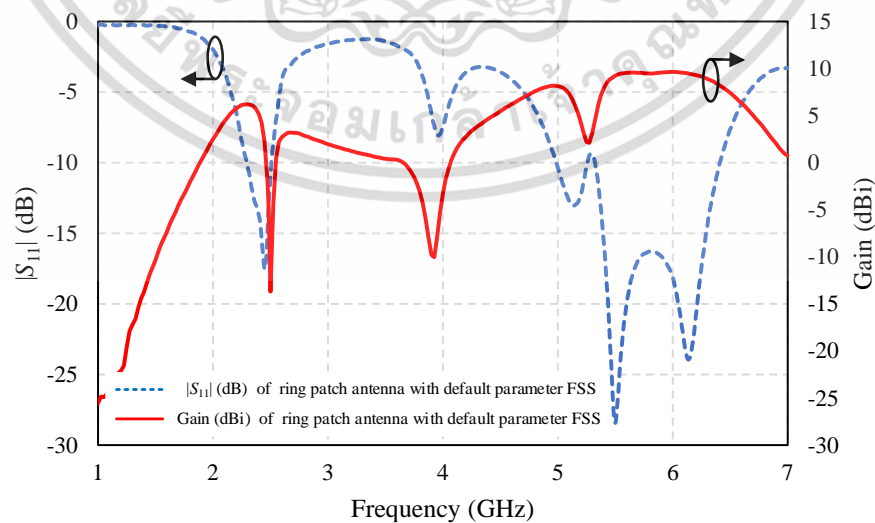


(ก) มุมมองด้านบน

(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.2 โครงสร้างสายอากาศแพตช์วงแหวนทำงานร่วมกับ  
พื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-17.50$  dB โดยมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่  $2.29$  GHz ถึง  $2.51$  GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ย่านความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-16.28$  dB โดยมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่  $5.32$  GHz ถึง  $6.41$  GHz และอัตราขยายที่ความถี่  $2.45$  GHz และที่ความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $2.26$  dBi และ  $9.49$  dBi ตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าอัตราขยายของความถี่  $2.45$  GHz ยังคงมีอัตราขยายต่ำและความกว้างแถบความถี่ในย่านความถี่  $5.8$  ( $5.15$ - $5.895$ ) GHz ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งานได้ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยาย

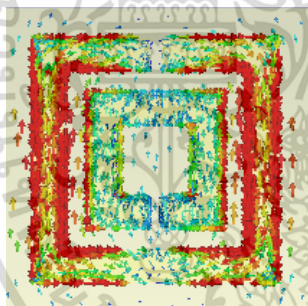
ของสายอากาศแพตช์วงแหวนทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

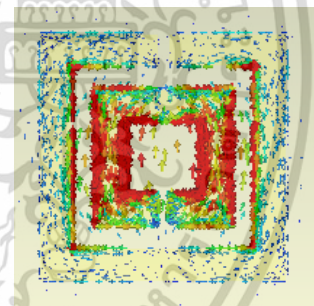
### 4.3 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz ยังคงมีอัตราขยายที่ต่ำและความกว้างแถบความถี่ในย่านความถี่ 5.8 (5.15-5.895) GHz ยังไม่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งานได้ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ โดยทำการจำลองผลของหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่เพื่อวิเคราะห์ดูการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว (Surface current distributions) เพื่อดูตำแหน่งของการตอบสนองของย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 (ก) แสดงการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงนอกและรูปที่ 4.4 (ข) แสดงการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของความถี่ 5.8 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของกระแสเกิดขึ้นที่บริเวณบ่วงสี่เหลี่ยมบ่วงใน ดังนั้นจากผลการจำลองจะทำให้ทราบการตอบสนองของแต่ละความถี่และทราบตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ได้ โดยที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_1$   $L_{12}$  และ  $g_1$  เพื่อปรับปรุงอัตราขยาย และที่ความถี่ 5.8 GHz สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_2$   $L_{22}$  และ  $g_2$  เพื่อปรับปรุงความกว้างแถบความถี่



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

#### รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิว

ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่ที่มีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

#### 4.3.1 การปรับปรุงอัตราขยายของย่านความถี่ 2.45 GHz

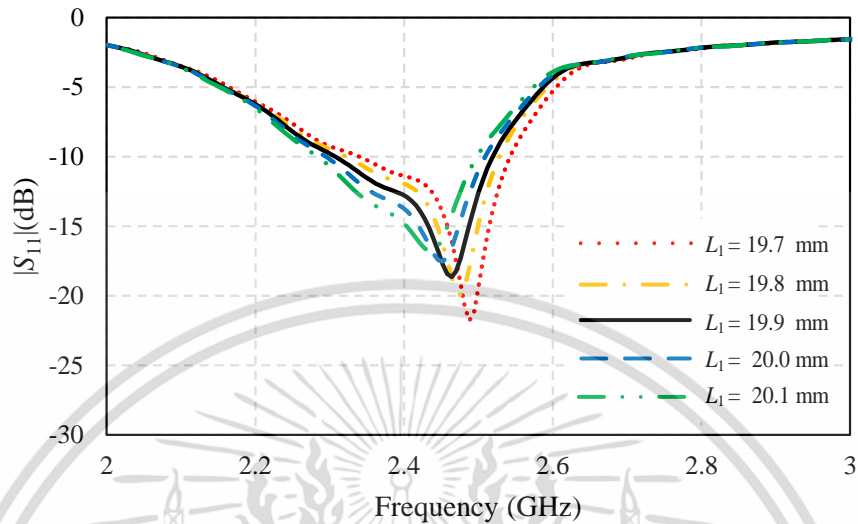
จากผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของความถี่ 2.45 GHz ทำให้ทราบตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ได้ ซึ่งจากผลการจำลองจะสามารถปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_1$   $L_{12}$  และ  $g_1$  ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่เพื่อปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_1$  จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นว่าเมื่อพารามิเตอร์  $L_1$  มีค่าเท่ากับ

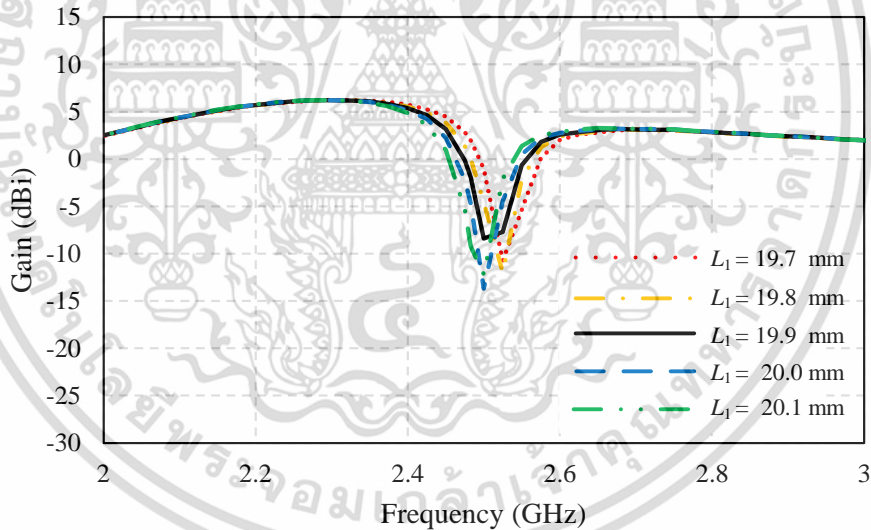
19.9 mm ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.26 dBi เป็น 3.17 dBi เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีการแมตซ์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยแต่ก็ยังคงมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-17.43$  dB



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

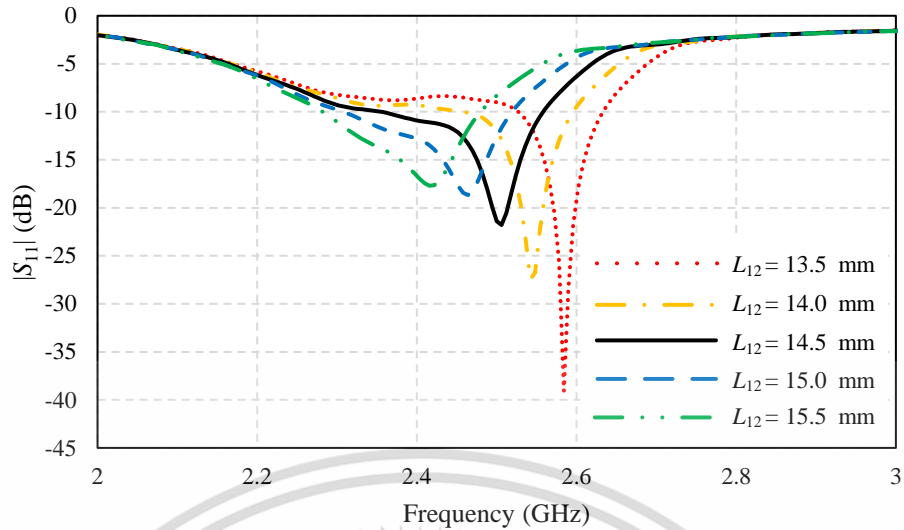


(ข) อัตราขยาย

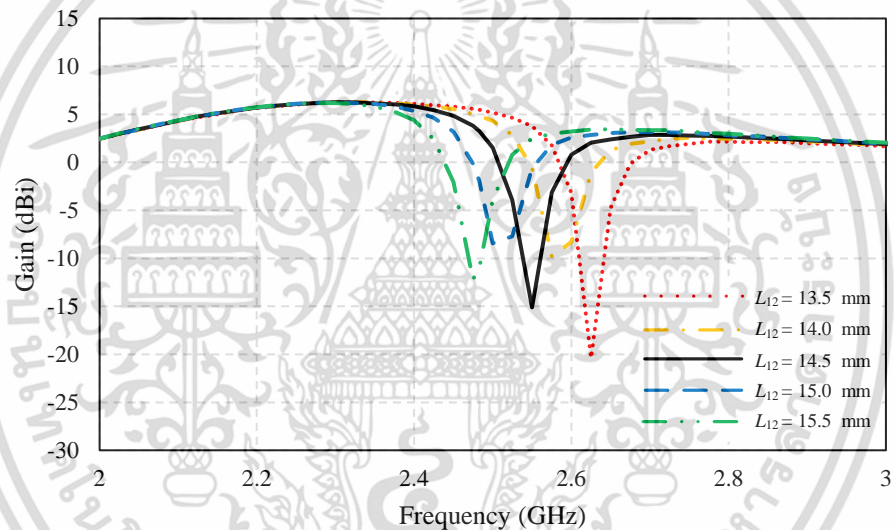
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_1$

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_{12}$  จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นว่า เมื่อพารามิเตอร์  $L_{12}$  มีค่าเท่ากับ  $14.5$  mm ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $3.17$  dBi เป็น  $4.85$  dBi ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีการแมตซ์ที่ลดลงแต่ก็ยังคงมีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-12.05$  dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



(ข) อัตราขยาย

รูปที่ 4.6 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_{12}$

ตั้งนั้นจากการปรับปรุงพารามิเตอร์หน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz จากเดิมมีค่าเท่ากับ 2.26 dBi และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.85 dBi สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.05 dB

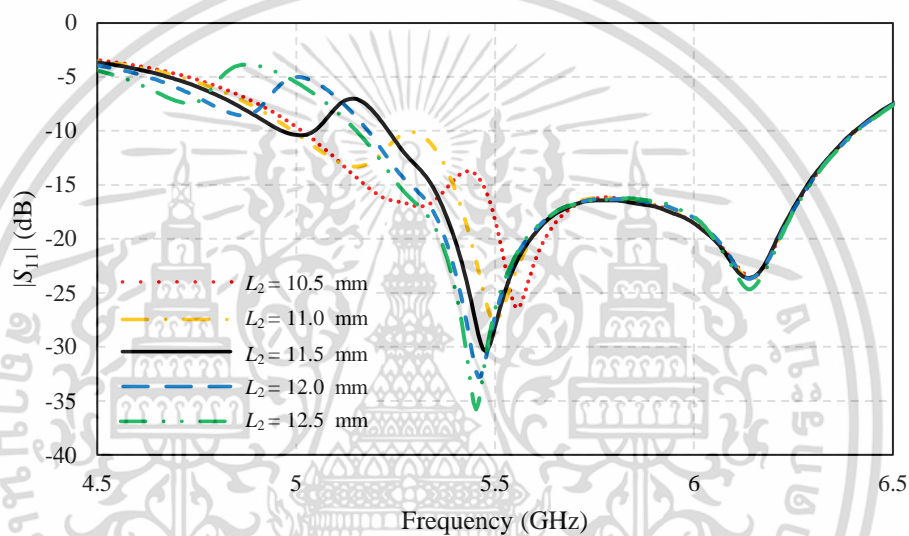
#### 4.3.2 การปรับปรุงความกว้างแถบความถี่ของย่านความถี่ 5.8 GHz

จากผลการจำลองการกระจายกระแสเชิงพื้นผิวของความถี่ 5.8 GHz ทำให้ทราบตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ ซึ่งจากผลการจำลองจะสามารถปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_2$ ,  $L_{22}$  และ  $g_2$

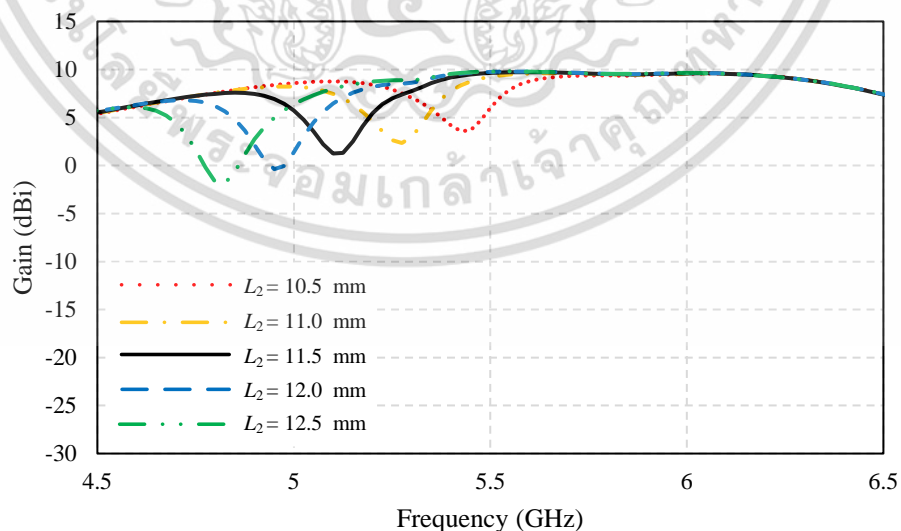
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหน่วยเซลล์พื้นผิวเลือกความถี่เพื่อปรับปรุงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศแพทช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_2$  จากผลการจำลองสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์  $L_2$  ส่งผลให้แถบความถี่ของย่านความถี่ 5.8 GHz กว้างขึ้นและเลื่อนมาที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากขนาดของบ่วงมีขนาดใหญ่ขึ้นและเมื่อพารามิเตอร์  $L_2$  เท่ากับ 11.5 mm ความกว้างแถบความถี่จึงครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.23 GHz ถึง 6.41 GHz ซึ่งจากเดิมความกว้างแถบความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.32 GHz ถึง 6.41 GHz ถึงแม้ความกว้างแถบความถี่จะกว้างขึ้นแต่ก็ยังไม่สามารถครอบงำความถี่ใช้งานได้ ดังนั้นจึงทำการปรับพารามิเตอร์  $L_{22}$  เป็นลำดับถัดไป



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

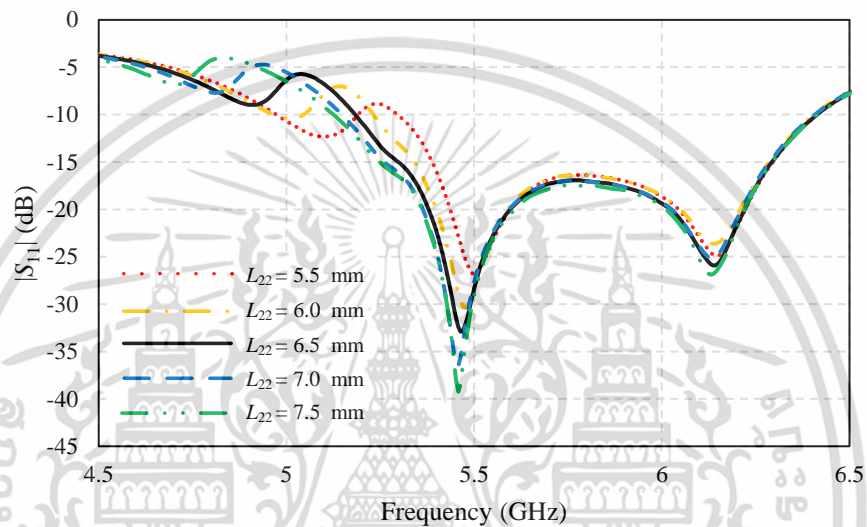


(ข) อัตราขยาย

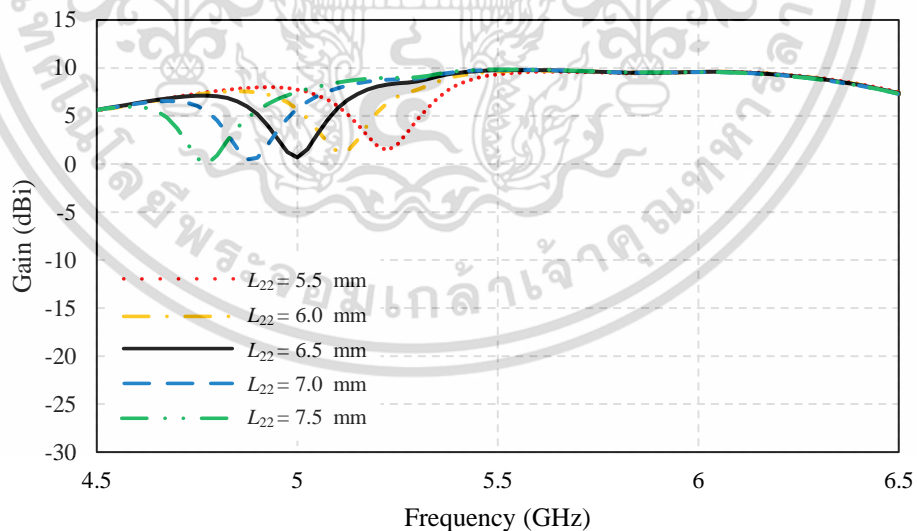
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_{22}$  จากผลการจำลองสังเกตเห็นว่า เมื่อพารามิเตอร์  $L_{22}$  มีค่าเท่ากับ 6.5 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น จากเดิมความถี่แถบความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.23 GHz ถึง 6.41 GHz เมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_{22}$  ความถี่แถบความถี่สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 5.19 GHz ถึง 6.41 GHz ถึงแม้ความถี่แถบความถี่จะกว้างขึ้นแต่ก็ยังไม่สามารถครอบงำความถี่ใช้งานได้ดังนั้นจึงทำการปรับพารามิเตอร์  $g_2$  เป็นลำดับถัดไป



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

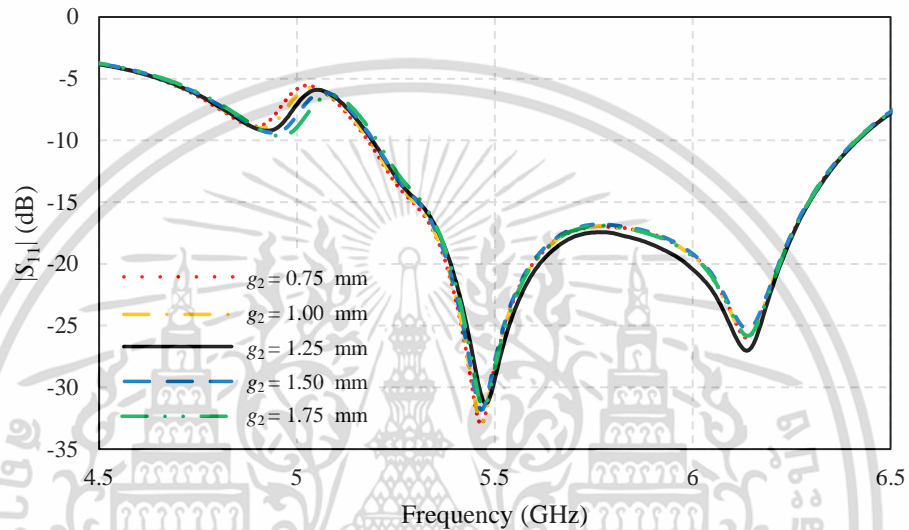


(ข) อัตราขยาย

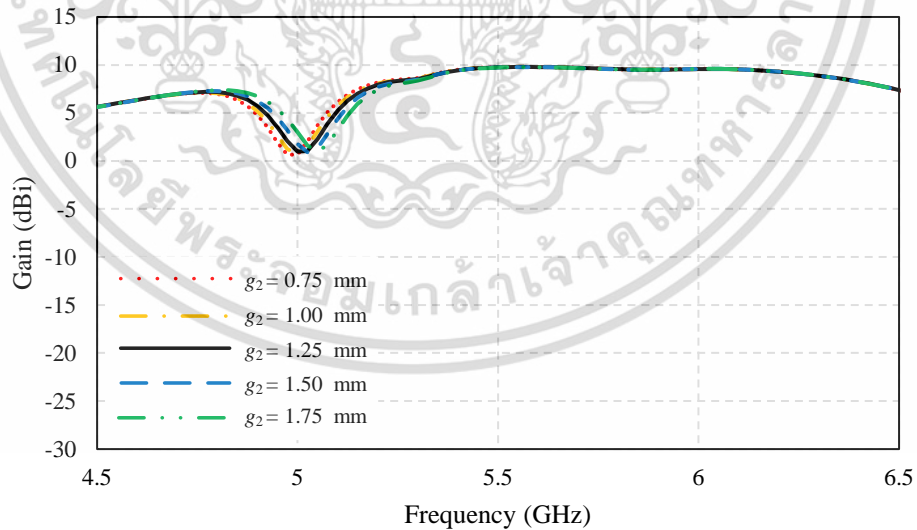
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $L_{22}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $g_2$  จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อพารามิเตอร์  $g_2$  มีค่าเท่ากับ 1.25 mm ส่งผลให้ความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น จากเดิมความกว้างแถบความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 5.19 GHz ถึง 6.41 GHz เมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์  $g_2$  ความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ ตั้งแต่ความถี่ 5.15 GHz ถึง 6.41 GHz ซึ่งความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมแถบความถี่ที่ต้องการใช้งาน



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

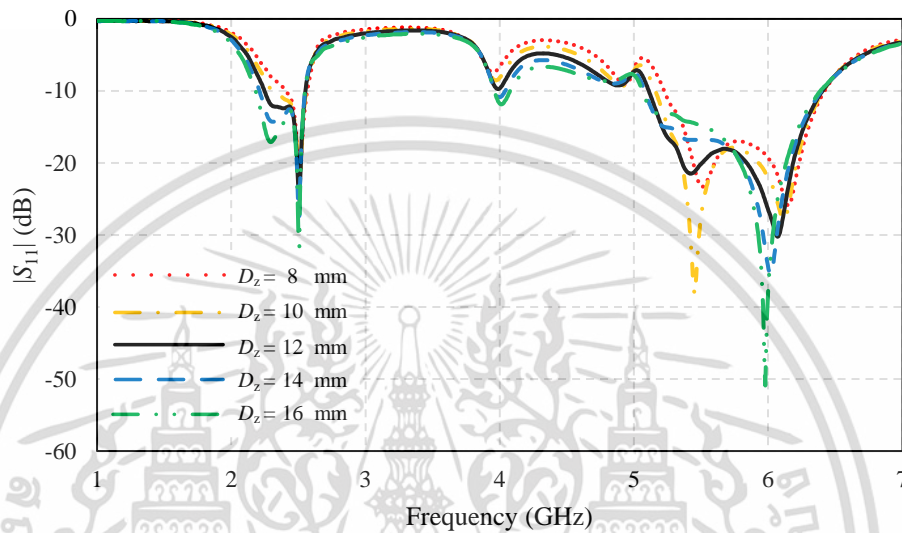


(ข) อัตราขยาย

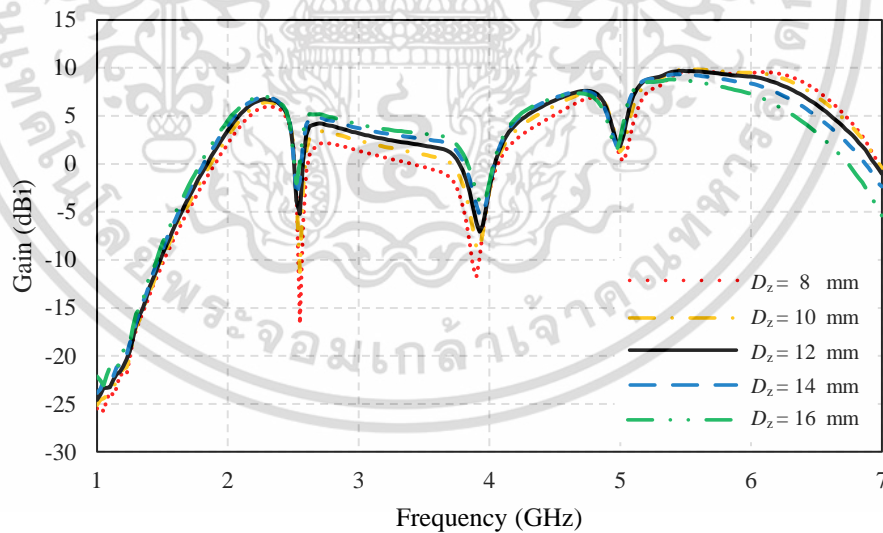
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $g_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้คุณสมบัติที่เหมาะสม ลำดับถัดไปทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) จากผลการคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศแพตช์วงแหวนกับพื้นผิวเลือกความถี่ที่ถูกปรับปรุงพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 16 mm ดังนั้นจึงทำการจำลองผลเปรียบเทียบกับระยะห่างอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.10



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



(ข) อัตราขยาย

รูปที่ 4.10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $D_z$

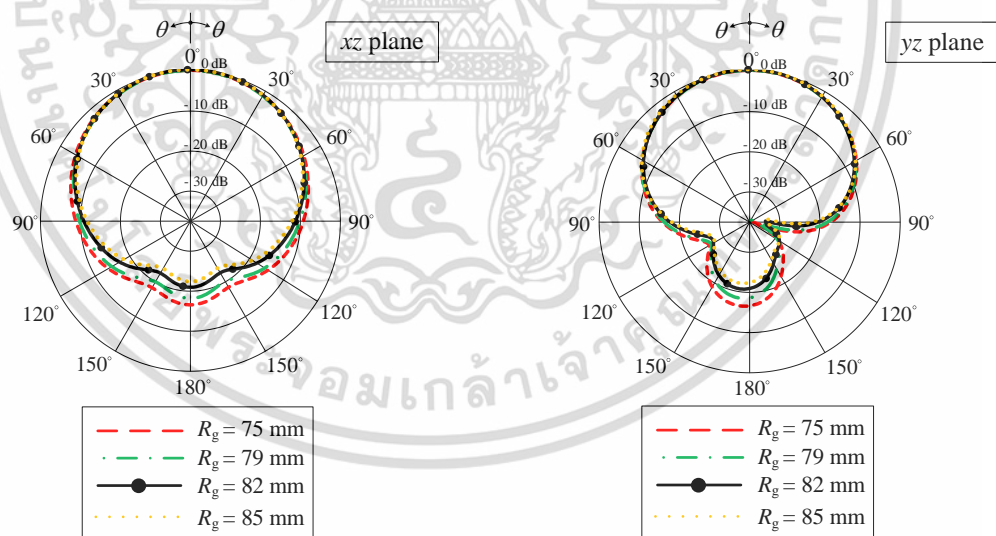
จากผลการจำลองเมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์  $D_z$  ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของทั้ง 2 ย่านความถี่มีการแมตช์ที่ดีขึ้นและอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์  $D_z$  ส่งผลให้อัตราขยายที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีอัตราขยายที่ลดลง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้พารามิเตอร์  $D_z$  ที่มีขนาดเท่ากับ 12 mm เพื่อที่จะให้คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของทั้ง 2 ย่านความถี่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากที่สุด

### 4.3.3 การปรับปรุงขนาดระนาบกราวด์ของพื้นผิวเลือกความถี่

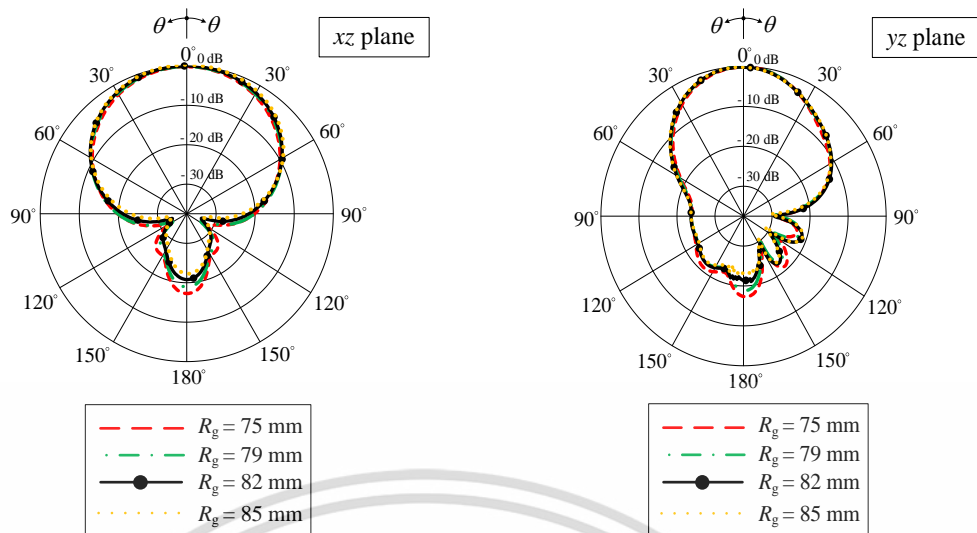
ลำดับถัดมาได้จำลองการเพิ่มขนาดระนาบกราวด์ให้กับพื้นผิวเลือกความถี่ เพื่อทำการลดลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$  จากเดิมพารามิเตอร์  $R_g$  มีขนาดเท่ากับ 75 mm จึงทำการจำลองผลการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$  ที่มีขนาดเท่ากับ 75 79 82 และ 85 mm ตามลำดับ ซึ่งขนาดระนาบกราวด์ของพื้นผิวเลือกความถี่ ( $R_g$ ) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$  ที่มีขนาดเท่ากับ 82 mm มีขนาดที่เหมาะสมที่สุด จากเดิมอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front-to-back ratio) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 17.48 dB และ 18.98 dB ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$  ให้มีขนาดเท่ากับ 82 mm ส่งผลให้อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับ โดยผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$  แสดงดังรูปที่ 4.11



(ก) ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

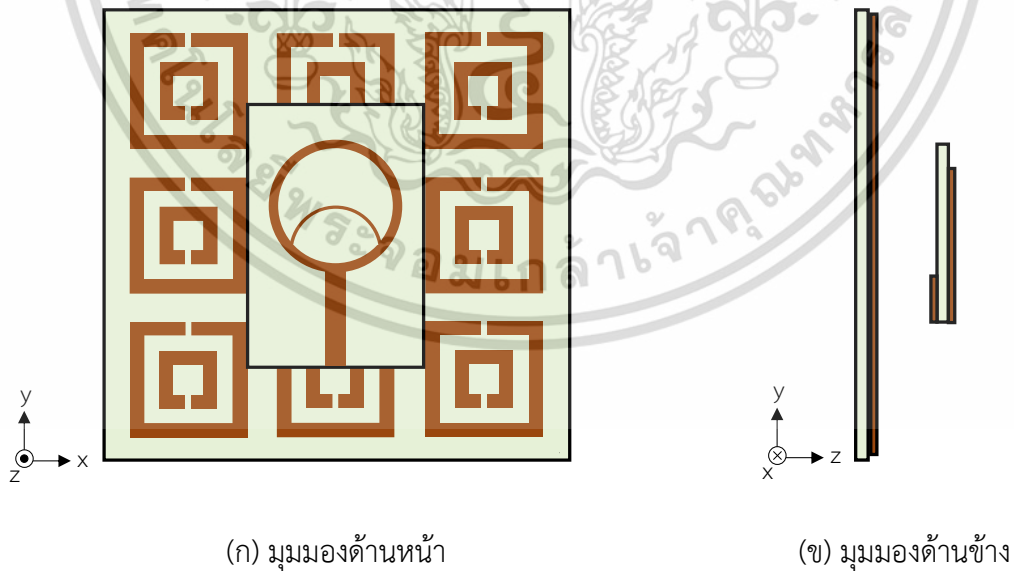


(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์แมลไลซ์ของการปรับปรุงพารามิเตอร์  $R_g$

#### 4.4 สรุปโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ

จากการปรับปรุงพารามิเตอร์ของพื้นผิวเลือกความถี่ในหัวข้อที่ผ่านมา โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 4.12 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอแสดงในตารางที่ 4.1



(ก) มุมมองด้านหน้า

(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.12 โครงสร้างสายอากาศโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ

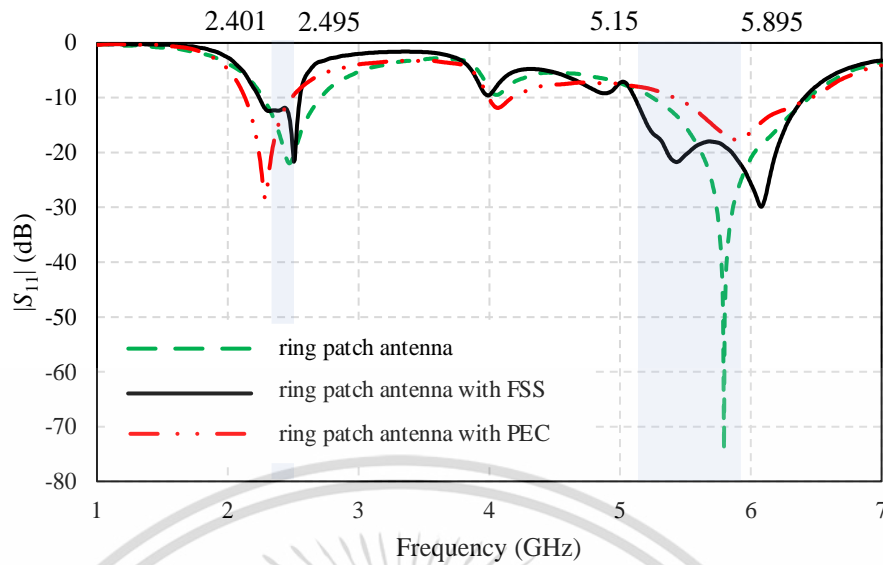
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ

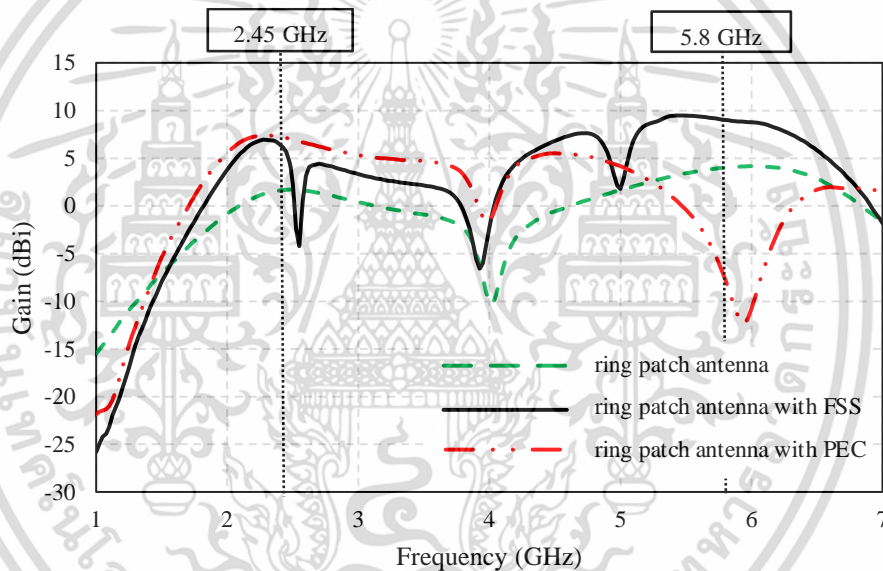
พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)	พารามิเตอร์ (Parameter)	ขนาด (Physical Size: mm)
$S_x$	30	$R_g$	82
$S_y$	45	$D_z$	12
$r_1$	11.5	$L_1$	19.9
$r_2$	10	$L_{12}$	14.5
$r_3$	8	$L_2$	11.5
$r_4$	7.5	$L_{22}$	6.5
$W_s$	3.5	$w_1$	2.7
$L_c$	20	$w_2$	2.5
$L_s$	16.1	$w_g$	1.5
$L_g$	15	$g_1$	1
$R_s$	25	$g_2$	1.25

รูปที่ 4.13 เป็นการแสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูปที่ 4.13 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB ซึ่งมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.24 GHz ถึง 2.55 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB ซึ่งมีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.11 GHz ถึง 6.41 GHz และจากผลการจำลองอัตราขยายในรูปที่ 4.13 (ข) อัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 9.02 dBi

จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นได้ว่าความกว้างแถบความถี่ที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ของสายอากาศที่นำเสนอมีความกว้างแถบความถี่ที่กว้างกว่า เมื่อเทียบกับสายอากาศแพตช์วงแหวนแบบตัวเดียวและสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน ถึงแม้ว่าอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศที่นำเสนอจะมีอัตราขยายที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับแผ่นโลหะสะท้อน แต่ถึงอย่างไรอัตราขยายที่ความถี่ 5.8 GHz ของสายอากาศที่นำเสนอก็ยังคงมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศทั้งสอง



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

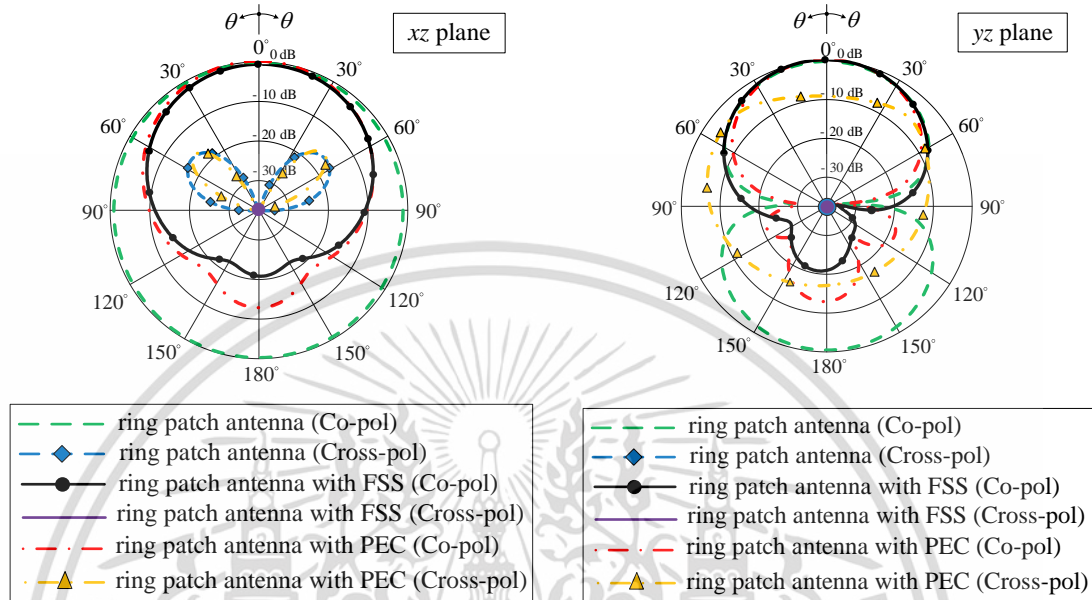


(ข) อัตราขยาย

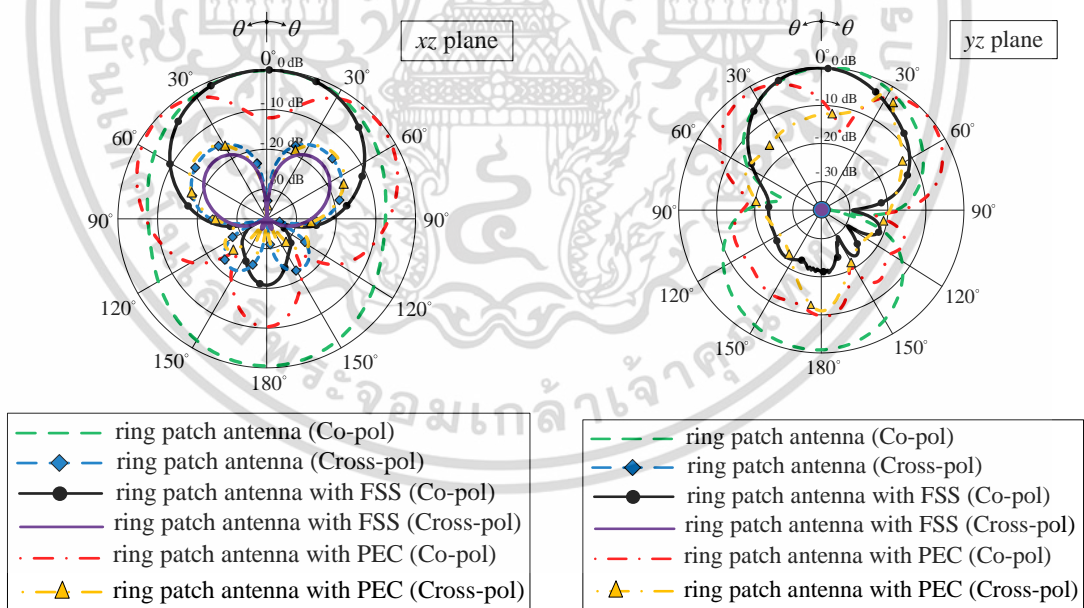
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอ

รูปที่ 4.14 เป็นการแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่นำเสนอในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ซึ่งเป็นการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) และโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมของสายอากาศที่นำเสนอเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Unidirectional pattern) ซึ่งอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 20.18 dB และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 20.42 dB โดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง  $0^\circ$  สำหรับการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศที่นำเสนอที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ  $xz$  และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ yz และที่ความถี่ 5.8 GHz ในระนาบ yz จากผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้วันั้นแสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้วันั้นมีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่รับได้ถึง 40 dB จึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีโพลาไรซ์เป็นเชิงเส้นที่ดี



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 4.14 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์และการออกแบบพื้นผิวอวกาศโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นหยดแถบความถี่ที่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแพตช์วงแหวนเพื่อปรับปรุงอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่รองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ที่ความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และ 5.8 (5.15-5.895) GHz โดยย่านความถี่ 2.45 GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 2.24 GHz ถึง 2.55 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz ครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 5.11 GHz ถึง 6.41 GHz จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.06 dB และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -18.90 dB โดยอัตราขยายของความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.66 dBi และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 9.02 dBi ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังมีค่าเท่ากับ 20.18 dB และ 20.42 dB ตามลำดับ โดยมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง  $0^\circ$  และจากการวิเคราะห์และออกแบบในบทนี้จะถูกนำไปสร้างและทดสอบในบทรถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

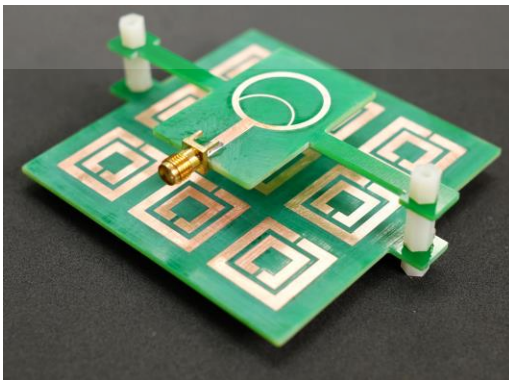
### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

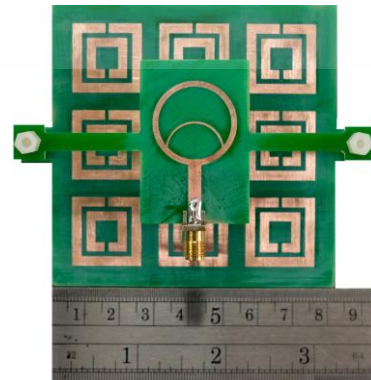
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ในย่านความถี่ ISM ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ของสายอากาศ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาทดสอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และ 4 โดยนำผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์นั้นมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลการจำลองและการทดสอบดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ในย่านความถี่ ISM เพื่อยืนยันความถูกต้องจากผลการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวสามารถครอบคลุมได้ 2 ย่านความถี่ คือที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 2.24 GHz ถึง 2.55 GHz และความถี่ 5.8 GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 5.11 GHz ถึง 6.41 GHz ซึ่งมาตรฐานของย่านความถี่ ISM คือที่ความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และ 5.8 (5.15-5.895) GHz โดยสายอากาศชนิดนี้ถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 มีความหนา 1.6 mm ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.035 mm ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมาตรฐานและใช้คอนเนคเตอร์ชนิด SMA ต่อร่วมกับสายนำสัญญาณ โดยโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบได้กล่าวไว้ในตารางที่ 4.1



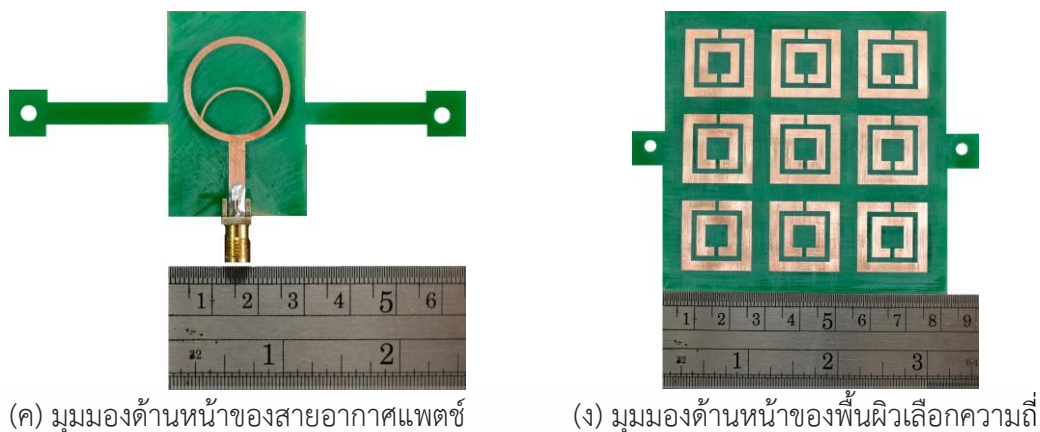
(ก) โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ



(ข) มุมมองด้านหน้าของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) มุมมองด้านหน้าของสายอากาศแพตช์

(ง) มุมมองด้านหน้าของพื้นผิวเลือกความถี่

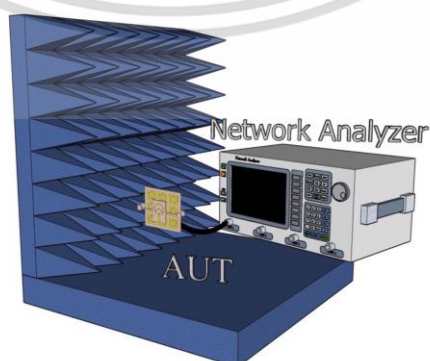
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

### 5.3 การทดสอบสายอากาศ

การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสมและได้มาตรฐาน ได้แก่ ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Microwave anechoic chamber) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น ZNLE6 และสายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$

#### 5.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบ

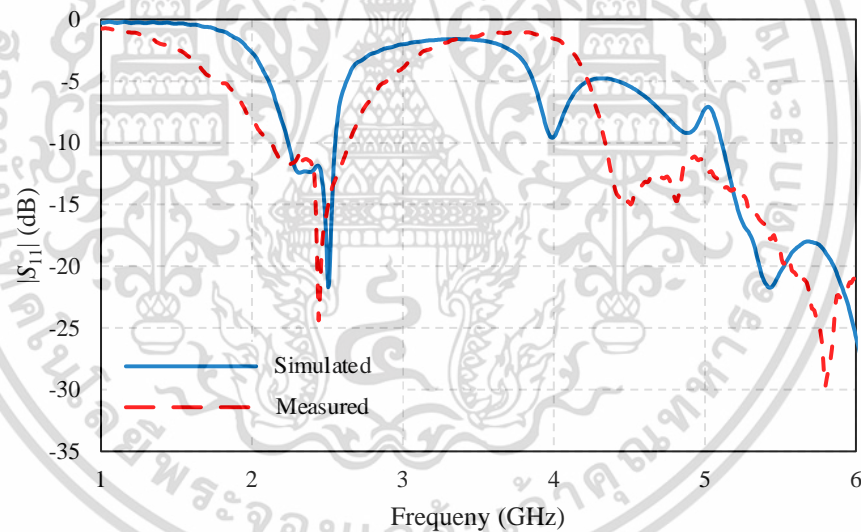
การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้นำเสนอ โดยการทดสอบจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Vector รุ่น ZNLE6 ซึ่งการทดสอบเริ่มต้นนำสายอากาศต้นแบบเชื่อมต่อเข้ากับสายนำสัญญาณโดยเชื่อมต่อที่พอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยก่อนที่จะเริ่มทำการเชื่อมต่อสายอากาศต้นแบบเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการปรับเทียบ (Calibrate) ให้กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยการปรับเทียบจะทำให้ปลายสายของสายนำสัญญาณ เพื่อลดการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณที่อาจจะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของสายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่ -10 dB ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.40 dB มีความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 2.12 GHz ถึง 2.63 GHz และย่านความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ -29.67 dB มีความกว้างแถบความถี่สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่ 4.34 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ายังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่บ้าง โดยผลการทดสอบมีความกว้างแถบความถี่กว้างกว่าผลการจำลองและมีการแมชชิงที่ดีกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างชิ้นงานในส่วนของสายอากาศแพทช์วงแหวน โดยองค์ประกอบที่จะส่งผลกระทบต่อการแมชชิงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนก็คือองค์ประกอบของแพทช์วงแหวนหรือความกว้างของเส้นไมโครสตริป โดยจากผลการจำลองเมื่อแพทช์วงแหวนหรือความกว้างของเส้นไมโครสตริปมีขนาดใหญ่หรือหนาขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีความกว้างที่กว้างขึ้นและแมชชิงที่ดีขึ้น แต่ถึงอย่างไรผลการทดสอบของสายอากาศต้นแบบยังคงมีช่วงความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานได้ตรงตามมาตรฐานของย่านความถี่ ISM



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบ

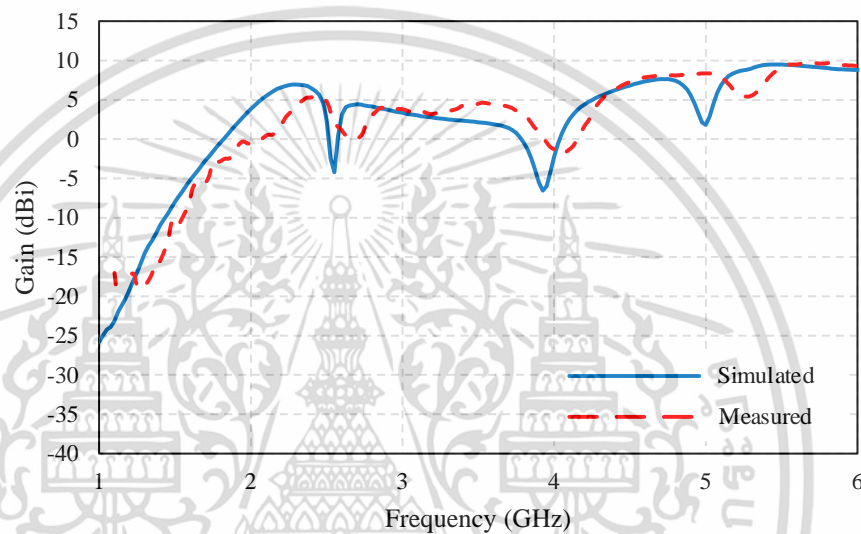
### 5.3.2 อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 5.4 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10) จากการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 5.73 dBi และที่ความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ

9.88 dBi โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบและผลการจำลองมีความสอดคล้องกันแต่ยังคงมี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่บ้าง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีอัตราขยายที่มากกว่าผลการจำลอง เนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอมีการแมชชิงที่ดีขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยอาจจะเกิดจากการสร้างชิ้นงานที่ได้กล่าวไปข้างต้น ในหัวข้อที่ 5.3.1 และจะสังเกตเห็นได้อีกว่าบางความถี่จากผลการทดสอบจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลการจำลอง ซึ่งอาจจะเกิดจากสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งเกิดการสูญเสียระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณหรืออาจเกิดจากการสร้างสายอากาศต้นแบบของผู้จัดทำซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียเกิดขึ้น

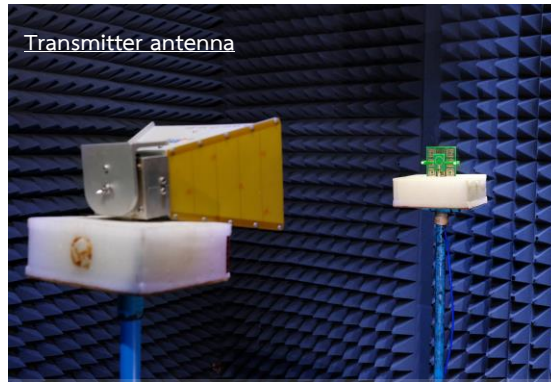


รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

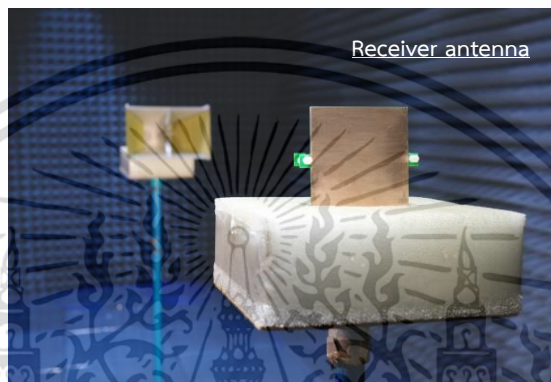
### 5.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบได้จะเป็นของสายอากาศภาครับ โดยใช้สายอากาศฮอร์นมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่งดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบจะทดสอบในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นห้องที่มีสถานะแวดล้อมที่ใกล้เคียงช่องว่างอิสระ (Free space) ซึ่งการติดตั้งสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น จะต้องทำการเชื่อมต่อสายอากาศภาคส่งเข้าที่พอร์ต 1 และเชื่อมต่อสายอากาศภาครับเข้าที่พอร์ต 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและจะเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) และแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ซึ่งจะทำการพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ฝั่งสายอากาศภาคส่ง

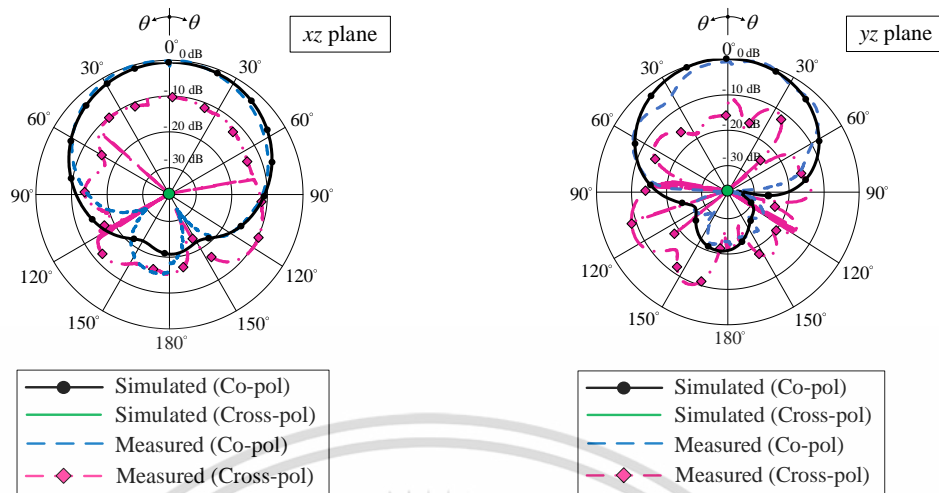


(ข) ฝั่งสายอากาศภาครับ

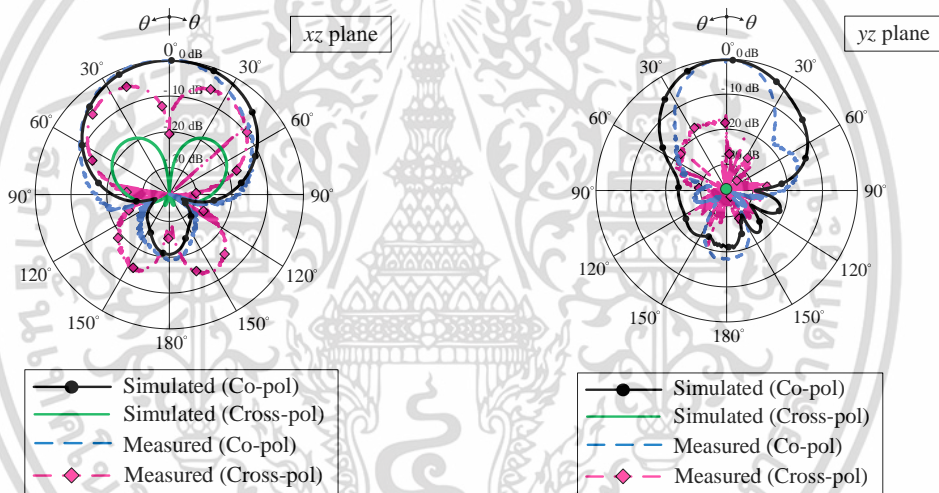
### รูปที่ 5.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งเป็นการแสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซร่วมและโพลาริซไขว้ จากการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่า ผลการจำลองและผลการทดสอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซไขว้มีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่รับได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซร่วมเท่ากับหรือน้อยกว่า 10 dB ที่มุม  $0^\circ$  โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง  $0^\circ$  ทั้งในผลการจำลองและผลการทดสอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซร่วมของทั้งความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz หรือหมายความว่ามีการแพร่กระจายที่ดีที่สุด ในทิศทางหน้าของสายอากาศ โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในผลการทดสอบอาจเนื่องมาจากอาจมีการเชื่อมต่อระหว่างสายนำสัญญาณและคอนเนคเตอร์ของสายอากาศภาครับ โดยขณะที่สายอากาศมีการหมุนสายนำสัญญาณที่เชื่อมต่ออยู่กับสายอากาศภาครับจะทำการหมุนตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณที่มาจกภาครับและภาคส่งเกิดการสูญเสียเป็นผลทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในผลการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว โดยผลที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่ 2.45 GHz



(ข) ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ  
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการทดสอบ	
ความถี่ที่ออกแบบ	2.45 GHz	5.8 GHz
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	-22.40 dB	-29.67 dB
ความกว้างแถบความถี่	2.12-2.63 GHz	4.34-6.00 GHz
โพลาริซ	เชิงเส้น	
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว	
อัตราขยาย	5.44 dBi	8.79 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 สรุป

จากการทดสอบคุณลักษณะของต้นแบบที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ซึ่งการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยพิจารณาจากผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 พบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง

เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจจะเกิดจากกระบวนการระหว่างขั้นตอนการสร้างสายอากาศแต่อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบสามารถนำไปใช้งานที่ในย่านความถี่ ISM ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งมาตรฐานของย่านความถี่ ISM คือที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีความกว้างความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.401 GHz ถึง 2.495 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีความกว้างความถี่ตั้งแต่ความถี่ 5.15 ถึง 5.895 GHz ซึ่งผลการทดสอบของสายอากาศต้นแบบที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.12 GHz ถึง 2.63 GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่ 4.34 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานตามมาตรฐานของย่านความถี่ ISM

สำหรับการพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากผลการทดสอบและผลการจำลองพบว่ามีค่าสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ 5.44 dBi และ 8.79 dBi ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบยังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่บ้าง อาจเนื่องมาจากสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอาจเกิดการสูญเสียระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณหรืออาจเกิดจากการสร้างสายอากาศต้นแบบของผู้จัดทำซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียเกิดขึ้น

และการพิจารณาคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากผลการทดสอบพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของที่ 2 ความถี่ มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลองซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง  $0^\circ$  และจากผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสายอากาศต้นแบบ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณที่มาจากภาครับและภาคส่งเกิดการสูญเสียเป็นผลทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในผลการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อน

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศที่มีขนาดเล็ก โครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อน และเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้หรือติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ โดยเริ่มจากการหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และทำการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่สอดคล้องกับมาตรฐานของย่านความถี่ ISM และนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการใช้งานได้จริงในอนาคต

ในบทนี้ประกอบด้วยหัวข้อหลัก 2 หัวข้อ โดยในหัวข้อแรกจะกล่าวถึง พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบของสายอากาศ สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศในย่านความถี่ ISM รวมไปถึงวิธีการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนและพื้นผิวเลือกความถี่โดยใช้โปรแกรม CST Studio Suit 2017 ในการจำลองผลเพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม และนำค่าพารามิเตอร์ได้นำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติในลำดับถัดไป

มาตรฐานของย่านความถี่ ISM ถูกแบ่งย่านการใช้งานออกเป็น 2 ย่านความถี่คือที่ความถี่ 2.45 (2.401-2.495) GHz และที่ย่านความถี่ 5.8 GHz (5.15-5.895) GHz ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกที่สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM โดยการออกแบบจะมุ่งเน้นไปโครงสร้างของสายอากาศให้มีขนาดเล็ก แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายที่สูง เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานและการติดตั้ง ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน รวมไปถึงต้นทุนที่ต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับการพัฒนาหรือการผลิตในเชิงพาณิชย์

การออกแบบสายอากาศที่นำเสนอจะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวน ขั้นตอนแรกทำการคำนวณหาขนาดพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศแพตช์วงแหวนตามทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแพตช์วงกลม ตามด้วยการปรับปรุงพารามิเตอร์และโครงสร้างของสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM โดยผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพตช์วงแหวนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-21.16$  dB และที่ความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-50.55$  dB และผลการจำลองของอัตราขยายของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $1.70$  dBi และที่ความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $4.01$  dBi ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนอร์มัลไลซ์ของสายอากาศแพตช์วงแหวนมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (Bidirectional radiation pattern) โดยการคำนวณและการออกแบบสายอากาศแพตช์วงแหวนถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2

ขั้นตอนต่อมาทำการออกแบบหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดเพื่อหาขนาดของพารามิเตอร์ให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ ISM ได้ซึ่งการคำนวณและการออกแบบหน่วยเซลล์ของพื้นผิวเลือกความถี่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ในลำดับถัดมาพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดจะถูกนำมาทำการปรับปรุงข้อบกพร่องของสายอากาศแพตช์วงแหวน โดยการนำพื้นผิวเลือกความถี่ชนิดแถบหยุดที่มีขนาดมิติ  $3 \times 3$  cell นำมาวางไว้ทางด้านหลังของตัวสายอากาศแพตช์วงแหวน โดยการคำนวณและการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 4 จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อพิจารณาที่  $-10$  dB ที่ความถี่  $2.45$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-12.06$  dB และที่ความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $-18.90$  dB โดยที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่  $2.24$  GHz ถึง  $2.55$  GHz และที่ย่านความถี่  $5.8$  GHz สามารถครอบคลุมได้ตั้งแต่ความถี่  $5.11$  GHz ถึง  $6.41$  GHz

และเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเนื่องจากการคำนวณและการออกแบบในบทที่ 3 และ 4 ต่อมาได้ทำการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลการจำลองและการทดสอบดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ผลการทดสอบ จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศต้นแบบที่ย่านความถี่  $2.45$  GHz มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่  $2.12$  GHz ถึง  $2.63$  GHz และที่ย่านความถี่  $5.8$  GHz มีความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ความถี่  $4.34$  GHz ถึง  $6$  GHz ซึ่งสามารถครอบคลุมการใช้งานในย่านความถี่ ISM สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่  $2.45$  GHz และ  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $5.73$  dBi และ  $9.88$  dBi ตามลำดับ และการพิจารณาคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของสายอากาศที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาที่ความถี่  $2.45$  GHz และ  $5.8$  GHz จากผลการทดสอบพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของที่ 2 ความถี่ เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional pattern) โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีกำลังงานของคลื่นสูงสุดในทิศทาง  $0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการออกแบบสายอากาศแพทช์วงแหวนที่ทำงานร่วมกับพื้นผิวเลือกความถี่ ในด้านการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Studio Suit 2017 นั้นอาจจะต้องคำนึงถึงการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศซึ่งมีอยู่ 2 ประเภทคือ Waveguide port และ Discrete port ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้จะให้ความละเอียดในการประมวลผลที่ไม่เท่ากันอาจส่งผลกระทบต่อสายอากาศในอนาคตและในส่วนของการออกแบบและการปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศที่เสนอจะมีการปรับปรุงที่ค่อนข้างยากในการที่จะให้เกิดการตอบสนองของย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากเมื่อขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กจะส่งผลกระทบต่อความถี่สูงแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีความผกผันกันของขนาดและการตอบสนองของความถี่ในส่วนของการทดสอบสายอากาศโดยสายอากาศที่นำเสนอได้ทำการออกแบบให้สามารถทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งในย่านความถี่ 5.8 GHz นั้นจะมีอุปสรรคในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดสอบซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมในการทดสอบอย่างมาก และเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายถูกจำกัดความถี่เพียง 6 GHz จึงไม่สามารถแสดงผลทดสอบในย่านความถี่เกิน 6 GHz ได้ และในอนาคตหากได้มีการนำสายอากาศที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานจริง อาจจะจำเป็นที่จะต้องใช้งานร่วมกับวงจรกรองความถี่แถบผ่าน เพื่อทำการกำจัดย่านความถี่ที่ไม่ใช้ออกไป ในกรณีงานวิทยานิพนธ์นี้คือช่วงย่านความถี่ 4.34 GHz ถึง 5.14 GHz เนื่องจากว่าที่ย่านความถี่สูง (5.8 GHz) จากผลการทดสอบนั้นมีความกว้างของแถบความถี่ที่กว้างกว่าย่านความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้เกิดการรับสัญญาณของระบบการสื่อสารอื่นๆ รวมทั้งสัญญาณรบกวนเข้ามาได้

โดยงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจเพื่อสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์และการออกแบบนำไปพัฒนาต่อยอดและปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในระบบหรือย่านความถี่อื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C.A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley and Sons, U.S.A., New York, 2005.
- [2] B. Yildirim and B.A. Cetiner, “Enhanced Gain Patch Antenna with a Rectangular Loop Shaped Parasitic Radiator,” *IEEE Antennas and Wireless propagation letters*, Vol. 7, pp. 229-232, March 2008.
- [3] J.H. Kim, C.H. Ahn and J.K. Bang, “Antenna Gain Enhancement Using a Holey Superstrate,” *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, Vol. 64, No. 3, pp. 1164-1167, March 2016.
- [4] R.S. Anwar, L. Mao and H. Ning, “Frequency Selective Surfaces: A Review,” *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 9, pp.1-46, September 2018.
- [5] M. Nagasaka, S. Nakazawa and S. Tanaka, “Prototype of a Dual-Circularly Polarized Parabolic Reflector Antenna with Microstrip Antenna Array for 12-GHz Band Satellite Broadcasting Reception,” *European Conference on Antenna and Propagation*, Switzerland, April 2016.
- [6] M.A. Trimukhe and B.G. Hogade, “Gain Enhancement of Compact UWB Antenna Using Planar Reflector,” *Proceedings of the Fourth International Conference on Communication and Electronics Systems*, Egypt, pp. 1444-1446, December 2019.
- [7] S. Kharche, G.S. Reddy and J. Mukherjee, “Parallel Metal Plated High Gain Ultra Wideband Antenna with Unidirectional Radiation Pattern,” *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies*, India, pp.1-5, January 2014.
- [8] N. Engheta and R.W. Ziolkowski, *Metamaterials Physics and Engineering Explorations*, John Wiley and Sons, U.S.A., New York, 2006.
- [9] C.L. Holloway, E.F. Kuester, J.A. Gordon, J.O. Hara, J. Booth and D.R. Smith, “An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 54, No. 2, pp.10-35, April 2012.
- [10] C. Caloz and T. ITOH, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave applications*, U.S.A., New York, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] A. Li, S. Singh and D. Sievenpiper, "Metasurfaces and their applications," in *Nanophotonics*, Vol.7, No. 6, pp. 989-1011, March 2018.
- [12] B.A. Munk, *Frequency Selective Surfaces Theory and Design*, John Wiley & Sons, 2000.
- [13] M. Raptopoulos and S. Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 8, pp. 2998-3005, August 2011.
- [14] J. T. Murugan, T. R. S. Kumar, P. Salill and C. Venkatesh, "Dual Frequency Selective Transparent Front Doors for Microwave Oven with Different Opening Areas," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Vol. 52, pp.11-16, February 2015.
- [15] G. Mur, "Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations," *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. Emc-23, No.-4, pp.377-382, November 1981.
- [16] S.D. Gedney, "An Anisotropic PML Absorbing Media for the FDTD Simulation of Fields in Lossy and Dispersive Media," in *Taylor & Francis*, Vol. 16, No. 4, pp. 399-415, October 2007.
- [17] L. Brillouin, *Wave Propagation in Periodic Structures*, 2nd ed., Dover Publications, 2003.
- [18] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., John Wiley and Sons, U.S.A., New York, 2012.
- [19] V.A.A. Filho, A.L.P.S. Campos, "Performance Optimization of Microstrip Antenna Array Using Frequency Selective Surfaces," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 13, No. 1, pp.31-46, June 2014
- [20] E. M. F. Fernandes, M. W. B. da Silva, L. da Silva Briggs, A. L. P. de Siqueira Campos, H. X. de Araujo, I. R. S. Casella, C. E. Capovilla, V. P. R. M. Souza, and L. J. de Matos, "2.4-5.8 GHz dual-band patch antenna with FSS reflector for radiation parameters enhancement," in Elsevier GmbH, June. 21, 2019.

- [21] N. Supreeyatitikul, S. Jantori, P. Boontamchau and U. Torteanchai, "Design of Circular Monopole Antenna using a Ground Plane Modifications for LTE and UWB Applications," *International Conference on Information, Communication and Networks*, Iraq, November 2012.
- [22] K.M. Gatea, "Compact Ultra Wideband Circular Patch Microstrip Antenna," *The First National Conference for Engineering Sciences*, China, pp. 6-10, 2019.
- [23] M. Ameen, S. Kalraiya and R.K. Chaudhary, "Coplanar Waveguide-fed Electrically Small Dual- Polarized Short-ended Zeroth-Order Resonating Antenna Using  $\Omega$  - Shaped Capacitor and Single - Split Ring Resonator for GPS/WiMAX/WLAN/C-band applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 29, No. 12, pp.1-15, August 2019.
- [24] C. Ratnaratom, C. Mahatthanajatuphat and P. Akkaraekthalin, "Gain Enhancement for Multiband Antenna with Frequency Selective Fractal Surface Reflector," *Asia-Pacific Microwave Conference*, Japan, pp.714-716, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ต้นฉบับไม่มีภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล                      นางสาวจิณณัฐา เหมเมือง  
 วัน เดือน ปีเกิด                    28 มีนาคม 2540  
 ที่อยู่                                    71 หมู่ 4 ตำบลกุดจิก อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา 30380  
 ประวัติการศึกษา                    พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
   สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] J. Hemmuang and C. Phongcharoenpanich, “Design of Circular Ring Patch Antenna on Split-Ring Resonator Metasurface for Dual-Band Applications,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 38, no. 2, pp. 31-39, June. 2021.