

สายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz  
ARRAY ANTENNA FOR WIRELESS POWER TRANSMISSION AT 2.4 GHz BAND



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-010-050

สายอากาศแวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz

ARRAY ANTENNA FOR WIRELESS POWER TRANSMISSION AT 2.4 GHz BAND



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-010-050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ARRAY ANTENNA FOR WIRELESS POWER TRANSMISSION AT 2.4 GHz BAND



KHANET POOKKAPUND

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-EN-M-010-050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz  
Thesis Title Array Antenna for Wireless Power Transmission at 2.4 GHz Band  
นักศึกษา ว่าที่ร้อยตรีเคศ พุกกะพันธ์  
รหัสประจำตัว 56601269  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-050

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ศ.ดร.ประยูทธ	อัศรเอกมาลิน	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	
รศ.ดร.ชวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 ยืนยันด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงาน ไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz
นักศึกษา	ว่าที่ร้อยตรีคุณศ พุกกะพันธ์
รหัสนักศึกษา	56601269
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายที่มีการออกแบบไม่ซับซ้อน โดยใช้สายอากาศแบบไดโพลจำนวน 4 องค์ประกอบ วางตัวจัดเรียงร่วมกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณและอัตราย้าย ในการเก็บกำลังงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz สายอากาศที่ถูกนำเสนอนี้จะทำการแปลงคลื่นความถี่วิทยุไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวและมีอัตราย้ายสูง ในส่วนของวงจรเรียงกระแสจะทำการออกแบบโดยใช้ไดโอดเป็นหลักและสลับปลายเปิดในการแมตซ์วงจรเรียงกระแส ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศและวงจรเรียงกระแสจะได้มาจากการศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลอง ศึกษาสายอากาศและวงจรเรียงกระแสโดยใช้เครื่องกำเนิดความถี่ (RF Generator) ในการกำเนิดสัญญาณความถี่เพื่อที่จะศึกษาและทดสอบการแมตซ์กันระหว่างสายอากาศและวงจรเรียงกระแสรวมถึงค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังงาน ( $\eta$ ) ของสายอากาศ ซึ่งขนาดของสายอากาศทั้งหมดมีขนาดเป็น 30 cm x 30 cm และมีคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ตั้งแต่ 2.3 GHz ถึง 2.6 GHz อัตราย้ายของสายอากาศที่นำเสนอมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 7.2 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Array Antenna for Wireless Power Transmission at 2.4 GHz Band
Student	Acting Sub Lt.Khanet Pookkapund
Student ID.	56601269
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### Abstract

This thesis presents a rectifying antenna (rectenna) which can harvest the wireless power at 2.45 GHz band. The proposed antenna is designed to convert the wireless RF signal into DC power. The antenna structure consists of four printed dipoles located perpendicularly to one another to combine the pattern and increase gain. The compact antenna radiates unidirectional pattern with high gain. The rectifying circuit part is designed based on Voltage Diode with stub matching circuit. The suitable parameters of the antenna and rectifier are achieved by parametric study from simulated results in order to study and test the impedance matching between antenna and rectifier circuit including efficiency of the power transmission for the proposed antenna. The dimension of the proposed antenna is 30 cm x 30 cm. The  $|S_{11}|$  of the antenna is less than -10 dB from 2.4 GHz to 2.5 GHz. The maximum gain is 7.2 dBi.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องมาจากการสนับสนุนจาก รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้ความรู้ คำแนะนำในด้านงานวิจัยรวมถึงแง่คิดในการดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา โดยเฉพาะ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่ช่วยแนะนำแนวทางการวิจัยและสั่งสอนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ ทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทดสอบ และให้คำปรึกษา รวมถึงเทคนิคต่างๆที่สามารถนำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะ คุณสิทธิชัย เต๋นตรี คุณศุภกิต แก้วดวงตา คุณธัชชัย พุ่มพวง คุณคมกฤษ บุญยั้ง คุณพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร คุณรัศมีทัต แผนสมบุญณ์ คุณอานนท์ สกลคณาพงษ์ และ พี่ๆน้องๆ ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ช่วยให้คำปรึกษา และกำลังใจให้กับข้าพเจ้าอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งมีความสำคัญยิ่งที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดช่วงชีวิตของข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างลุล่วง คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้ซึ่งมีพระคุณทุกท่าน

คณะศ พุกกะพันธุ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	5
2.2.1 ความเป็นมาของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	5
2.2.2 การประยุกต์ใช้งานการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	6
2.2.3 ประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	7
2.3. มาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN .....	8
2.3.1 มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN.....	9
2.3.2 ประวัติลำดับของการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16.....	10
2.4 หลักการและทฤษฎีสายอากาศไดโพล.....	11
2.4.1 ไดโพลขนาดจิ๋ว.....	12
2.4.2 ไดโพลขนาดเล็ก.....	12
2.4.3 ไดโพลความยาวจำกัด.....	13
2.4.4 ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น.....	16
2.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	16
2.5.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss).....	16
2.5.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio; SWR).....	17
2.5.3 ระยะสนามของสายอากาศ (Field Region).....	18
2.5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern).....	19
2.5.5 โพลาริเซชันของคลื่นระนาบ (Polarization).....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 วงจรเรียงกระแส (Rectifying circuit).....	24
2.6.1 วงจรเรียงกระแสและการทำงานของไดโอด.....	24
2.6.2 ไดโอดทวีแรงดันสองเท่า (Voltage Doubler Diode).....	25
2.6.3 ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ.....	26
2.6.4 กรองสัญญาณโดยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter).....	27
2.6.5 ตัวต้านทาน (Resistor).....	27
2.6.6 วงจรแมตซ์ชิงสตัป.....	28
2.7 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	30
2.8 สรุป.....	36
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ.....	37
3.1 บทนำ.....	37
3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ.....	37
3.2.1 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแถวลำดับ สำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz.....	37
3.3 การปรับอิมพีแดนซ์และ $ S_{11} $ .....	38
3.3.1 การออกแบบสายอากาศ.....	38
3.3.2 สายอากาศเริ่มต้น.....	40
3.3.3 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $L_f$ .....	41
3.3.4 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $d_a$ .....	43
3.4 ผลการจำลองสายอากาศเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	44
3.4.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $ .....	44
3.4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	44
3.5 การนำเอาสายอากาศไดโพลมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ.....	45
3.5.1 การจำลองสายอากาศจำนวน 2 ถึง 6 ตัวมารวมกัน.....	45
3.6 สายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	52
3.6.1 การจำลองหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศ.....	52
3.6.2 ผลการจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศทั้งสี่องค์ประกอบ.....	58
3.6.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	59
3.6.4 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ.....	61
3.7 สรุป.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบและจำลองวงจรเรียงกระแส.....	62
4.1 บทนำ.....	62
4.2 จำลองค่าความต้านทาน (Resistor) และการตอบสนองต่อความถี่.....	63
4.3 แบบวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น.....	65
4.3.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $ ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น.....	66
4.3.2 ผลการจำลอง $ S_{11} $ ของวงจรเรียงกระแสเมื่อมีค่าแมตซ์ซึ่งสลับที่เหมาะสม.....	67
4.3.3 ผลการจำลองค่าแรงดันที่ขาออกของวงจรเรียงกระแส.....	68
4.4 สรุป.....	68
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	69
5.1 บทนำ.....	69
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	69
5.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบสายอากาศ.....	70
5.3.1 การทดสอบคุณลักษณะของ $ S_{11} $ .....	70
5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern).....	71
5.3.3 อัตราขยาย (Gain).....	74
5.4 ขั้นตอนและผลการทดสอบวงจรเรียงกระแส.....	76
5.5 สรุป.....	83
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	85
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	106
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	จำแนกประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	8
3.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการสร้าง.....	38
3.2	พารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้น.....	41
3.3	ค่าพารามิเตอร์เมื่อทำการปรับขนาดของ $L_f$ .....	42
3.4	พารามิเตอร์ของสายอากาศองค์ประกอบเดียวเมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมจากการจำลอง.....	43
3.5	พารามิเตอร์ของสายอากาศแถวลำดับองค์ประกอบเมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมจากการจำลอง.....	58
4.1	พารามิเตอร์ของวงจรรีจกเรสแอสเริ่มต้น.....	65
4.2	พารามิเตอร์ของวงจรรีจกเรสแอสให้มีค่าของแมตซ์ซึ่งสลับที่เหมาะสม.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การทำงานของระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	1
1.2	การการประยุกต์ใช้งานกับจุดกระจายสัญญาณ.....	2
1.3	ส่วนประกอบของระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย.....	2
2.1	การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายของเสา.....	6
2.2	สายอากาศไดโพลชนิดลำดับของนักวิจัย อาร์.เฮท จอร์จ.....	7
2.3	การจัดวางโครงสร้างของไดโพลและการกระจายของกระแส.....	12
2.4	แบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิว.....	13
2.5	แบบรูปเชิงขนาดในระนาบมุมยก (Elevation plane) สำหรับไดโพลพอมที่มีการกระจายกระแสแบบไซน์ไฮดอลเมื่อ $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ และ $\lambda$ .....	14
2.6	แบบรูปเชิงขนาดสามมิติและสองมิติสำหรับไดโพลพอม เมื่อ $l = 1.25\lambda$ และมีการกระจายกระแสแบบไซน์ไฮดอล.....	15
2.7	การกระจายของกระแสตามแนวความยาวของสายอากาศแบบเส้นลวดเชิงเส้น.....	15
2.8	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น.....	16
2.9	การเกิดคลื่นนิ่ง.....	17
2.10	ระยะสนามของสายอากาศที่ระยะต่างๆ.....	18
2.11	แบบรูปการแพร่กระจาย.....	20
2.12	พหุคูณการแผ่กำลังงานและบีบวิดิทของสายอากาศ.....	21
2.13	คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ Z .....	22
2.14	โพลาริเซชันแบบต่างๆ.....	23
2.15	ผังวงจรเรียงกระแส.....	24
2.16	การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	25
2.17	วงจรไดโอดทวิแรงดันสองเท่าและรูปแบบสัญญาณ.....	25
2.18	การจำลองตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ $C_1$ .....	26
2.19	ผังวงจรแมตซ์ชิงสตัด์.....	28
2.20	ผังวงจรปรับแมตซ์ชิงสตัด์.....	28
2.21	การต่อใส่สตัด์เดี่ยวในรูปแบบไมโครสตริป.....	29
2.22	รูปแบบการต่อใช้งานของสายอากาศ.....	30
2.23	วงจรเรียงกระแสต้นแบบ.....	31
2.24	ผลการทดสอบคุณลักษณะของ $ S_{11} $ อัตราขยายและการวัดเทียบของวงจร.....	31
2.25	รูปแบบสายอากาศแถวลำดับและการทดสอบ.....	31
2.26	สายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.27	ผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ.....	32
2.28	รูปสายอากาศต้นแบบด้านหน้าและด้านหลัง.....	32
2.39	ผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ.....	33
2.30	สายอากาศแถวลำดับแบบสององค์ประกอบและสามองค์ประกอบ.....	33
2.31	รูปการติดตั้งการทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ.....	33
2.32	ผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ.....	34
2.33	การออกแบบไมโครสตริป.....	35
2.34	ผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ.....	35
2.35	ผลการจำลองและผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ.....	36
3.1	โครงสร้างสายอากาศไดโพล WLAN 2.4 GHz มุมมองด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้าง.....	38
3.2	โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้น.....	40
3.3	$ S_{11} $ ของสายอากาศเริ่มต้น.....	41
3.4	$ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $L_f$ .....	42
3.5	$ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $d_a$ .....	43
3.6	$ S_{11} $ ของสายอากาศเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	44
3.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	44
3.8	การจำลองสายอากาศจำนวน 2 ถึง 6 ตัวเมื่อนำมารวมกัน.....	46
3.9	การจำลอง $ S_{ii} $ ของสายอากาศจำนวน 2 ถึง 6 ตัวเมื่อนำมารวมกัน.....	48
3.10	ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบเมื่อนำมารวมกัน.....	50
3.11	ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแบบ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ.....	51
3.12	สมิทชาร์ตแสดงถึงการแมชชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละแบบ.....	51
3.13	โครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำมาวางร่วมกัน.....	52
3.14	การปรับระยะการวางของสายอากาศโดยเริ่มจากจุดศูนย์กลาง.....	52
3.15	$ S_{ii} $ ของสายอากาศที่ระยะ $d_s$ ต่างๆตั้งแต่ 9 cm ถึง 13 cm ตามลำดับ.....	55
3.16	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ $d_s$ ต่างๆ.....	56
3.17	อัตราขยายที่ระยะ $d_s$ ต่างๆ.....	57
3.18	ของสายอากาศทั้งสององค์ประกอบเมื่อนำมาวางร่วมกันเทียบกับความถี่.....	58
3.19	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz.....	60
3.20	ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	โครงสร้างของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้า.....	62
4.2	วงจรที่ใช้ในการจำลองปรับค่าความต้านและความถี่.....	63
4.3	ผลการจำลองค่าความต้านทานของวงจรเรียงกระแส.....	64
4.4	ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสเมื่อปรับความถี่.....	64
4.5	แบบวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น.....	65
4.6	S <sub>11</sub>   ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้นก่อนการปรับสลับ.....	66
4.7	S <sub>11</sub>   ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้นหลังการปรับสลับ.....	67
4.8	การต่อการจำลองเพื่อทดสอบวงจรเรียงกระแส.....	67
4.9	ผลการจำลองค่าแรงดันที่ขาออกของวงจรเรียงกระแส.....	68
5.1	รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบ.....	69
5.2	การทดสอบคุณลักษณะ  S <sub>11</sub>   ของสายอากาศ.....	70
5.3	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  S <sub>11</sub>   ของสายอากาศต้นแบบ.....	71
5.4	การต่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้สายอากาศตัวที่ 1 เป็นตัวอ้างอิง.....	73
5.5	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz.....	73
5.6	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz.....	73
5.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบเทียบกับผลจากการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz.....	74
5.8	เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบ.....	75
5.9	รูปถ่ายของวงจรเรียงกระแสต้นแบบ.....	76
5.10	S <sub>11</sub>   ของวงจรเรียงกระแสเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ.....	76
5.11	ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส.....	77
5.12	การต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรง.....	78
5.13	เปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกที่ความถี่ 2.45 GHz.....	78
5.14	การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ.....	79
5.15	รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบและรูปการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ.....	80
5.16	เปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz โดยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในระยะต่างๆ.....	80
5.17	การหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน ( $S_{RF}$ ) ในแต่ละระยะ ( $R_s$ ).....	81
5.18	ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าต้นแบบ.....	82

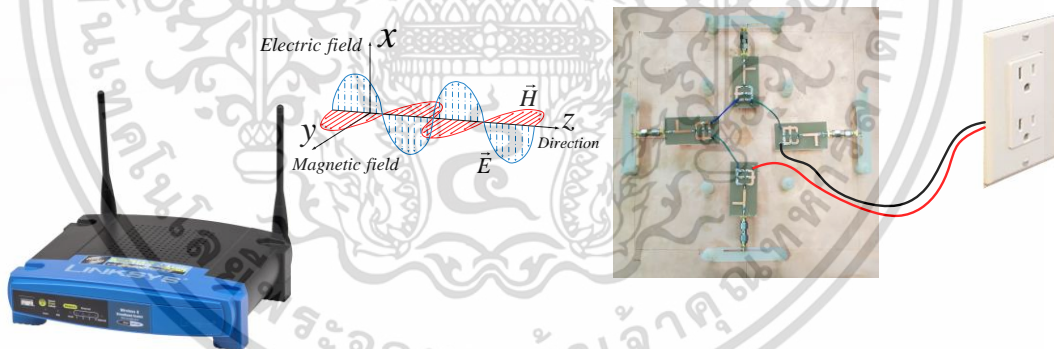
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

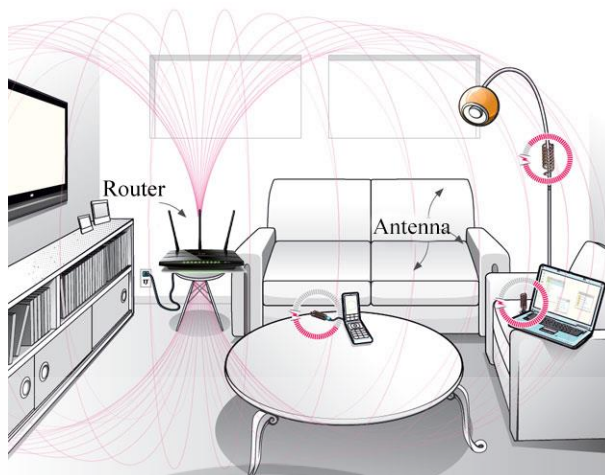
### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบส่งสัญญาณจากจุดจุดหนึ่งไปสู่อีกหลายๆจุดคือ เทคโนโลยีบรอดแบนด์แบบไร้สายเช่นระบบ CDMA (Code Division Multiple Access) WLAN (Wireless Local Area Network) และ WiMAX (Worldwide Interoperability Microwave Access) ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ในระบบที่กล่าวมานั้นจะถูกปล่อยสัญญาณออกมาโดยจุดกระจายสัญญาณ (access point) อยู่ตลอดเวลาและทุกคนสามารถใช้งานได้ ทางผู้จัดทำจึงได้มีความสนใจที่จะใช้ย่านสัญญาณความถี่ดังกล่าวนำกลับมาให้อยู่ในรูปแบบพลังงานเพื่อนำกลับมาใช้งานได้ ซึ่งในระบบต่างๆที่กล่าวถึง ล้วนเป็นการส่งสัญญาณความถี่วิทยุทั้งสิ้น สัญญาณความถี่วิทยุที่ถูกส่งออกมาจะอยู่ในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วย สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ในส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถนำกลับมาเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสายอากาศ ทำให้เกิดกำลังงานความถี่วิทยุ นั้นหมายความว่า เมื่อนำสายอากาศไปวางในอากาศจะเกิดการตัดผ่านของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังงานไฟฟ้าขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้มานั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นใช้วงจรเรียงกระแส ทำการเรียงกระแส จากกระแสสลับเป็นกระแสตรงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การทำงานของระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

ในรูปที่ 1.2 เป็นการจำลองการประยุกต์ใช้งานกับจุดกระจายสัญญาณในห้องปิดโดยมีเสาอากาศเป็นตัวกระจายสัญญาณและมีสายอากาศต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ อยู่เพื่อทำการแปลงสัญญาณที่รับมาเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้ [1]



รูปที่ 1.2 การการประยุกต์ใช้งานกับจุดกระจายสัญญาณ [1]

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย เพื่อแปลงคลื่นความถี่วิทยุเป็นกำลังงานไฟฟ้า [2-4] โดยความถี่ที่เลือกใช้คือย่านความถี่ WLAN (2.4 – 2.5 GHz) และสามารถนำกำลังงานที่ได้ไปปรับใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้กำลังงานต่ำๆได้ โดยระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สายนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 สายอากาศ ส่วนที่ 2 วงจรเรียงกระแส และ ส่วนที่ 3 โหลด [5] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

โดยระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายดังกล่าวจะเริ่มทำงานจากส่วนที่ 1 จะทำการรับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่รับเข้ามานั้นจะถูกส่งไปยังส่วนที่ 2 (วงจรเรียงกระแส) เพื่อที่จะทำการแปลงสัญญาณที่ได้จากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำแรงดันที่ได้ไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้กำลังงานต่ำต่อไปในส่วนที่ 3

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย โดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบไดโพล 4 ตัววางเรียงร่วมกันเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ [6-7] และสามารถรับสัญญาณได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน ต่อมาในส่วนของวงจรเรียงกระแสได้ออกแบบมาเพื่อแปลงกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะต่อกับสายอากาศแต่ละตัว แล้วจึงนำแรงดันที่ได้จากทั้ง 4 ตัวรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดแล้วจากนั้นนำแรงดันที่ได้ทางเอาต์พุตจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อที่จะนำไปต่อกับโหลดต่อไป

โดยจุดประสงค์หลักคือ การออกแบบระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายที่มีความไม่ซับซ้อน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากที่สุด และสามารถนำแรงดันที่ได้ไปต่อใช้งานกับโหลดต่อไป โดยในแต่ละส่วนนั้นจะถูกกล่าวนำเสนอและอธิบายในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอสายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบจากการนำสายอากาศชนิดไดโพลจำนวนสี่ตัว โดยทำการวางตัวแบบตั้งฉากซึ่งกันและกันโดยมีแผ่นสะท้อนอยู่ด้านล่างเพื่อนให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และใช้คอนเนคเตอร์ชนิด SMA เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและวงจรเรียงกระแสเข้าด้วยกัน โดยโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งจะนำสายอากาศดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ 2.4GHz

ในส่วนของการจำลองสายอากาศสายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz จะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งการหาค่าคุณลักษณะของสายอากาศให้เหมาะสม โดยการพิจารณาจากผลของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) การกระจายของกระแส (Current distribution) อัตราขยาย (Gain)

ในส่วนของวงจรเรียงกระแสได้ใช้โปรแกรม ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS) ในการศึกษาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นจะทำการยืนยันความสามารถของการรับสัญญาณความถี่วิทยุเข้ามาแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกได้ ซึ่งการทดลองการส่งสัญญาณจะใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นภาคส่งสายอากาศ โดยต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณเพื่อป้องกันความถี่ที่ 2.45 GHz จากนั้นใช้สายอากาศนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นสายอากาศในภาครับ จึงจะได้ทำการพิจารณาจากผลของแรงดันทางด้านขาออกเทียบกับระดับกำลังงานตั้งแต่ -20 dBm ไปจนถึง 14 dBm ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ก็เพื่อศึกษาสายอากาศระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายซึ่งมีช่วงความถี่การใช้งานตั้งแต่ 2.40 GHz ถึง 2.50 GHz โดยจะศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศและวงจรเรียงกระแส เพื่อพัฒนาระบบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน และปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังงานที่ดียิ่งขึ้น รวมทั้งโครงสร้างของสายอากาศจะต้องมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน

## 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศแบบไดโพล วงจรเรียงกระแส และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆสำหรับสายอากาศต้นแบบ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศเริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบต่างๆของพารามิเตอร์ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 2.40 GHz ถึง 2.50 GHz และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานได้จะต้องมีลักษณะที่เหมือนหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการจำลองวงจรเรียงกระแสด้วยโปรแกรม ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS) เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อสายอากาศ การส่งผ่านกำลังงานรวมไปถึงการแปลงสัญญาณความถี่วิทยุไปเป็นกำลังงานไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงผลจากการทดสอบสายอากาศและวงจรเรียงกระแสที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในขั้นต้นแล้วนำมาสร้างชิ้นจริง จากนั้นนำผลจากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลในทางปฏิบัติ โดยแสดง ถึง  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ และแรงดันทางด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสรวมถึงประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังงาน ( $\eta$ )

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการแนะนำทางทางการศึกษาสำหรับการพัฒนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

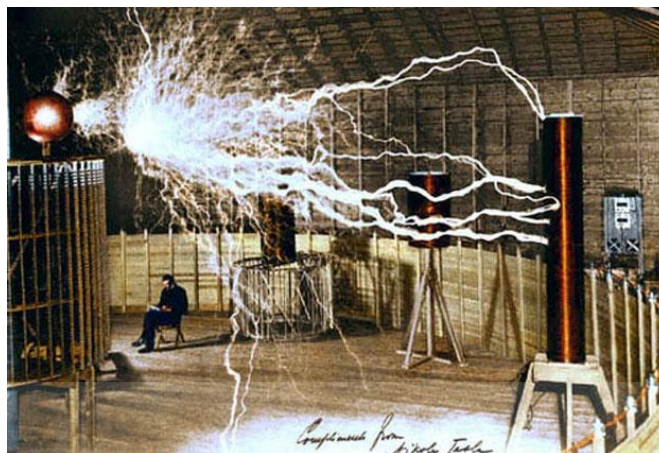
ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาทฤษฎีและหลักการของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transmission : WPT) โดยจะเริ่มจากทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย ความเป็นมาของระบบ ชนิดการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย หลักการและทฤษฎีของระบบ WLAN และ WIMAX ความถี่ 2.4 GHz ที่จะนำมาใช้กับระบบ รวมถึงทฤษฎีสายอากาศแบบ ไดโพล วงจรเรียง กระแส และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนสำหรับ ระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

### 2.2 ทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

การส่งผ่านกำลังงานไร้สายคือ การใช้พลังงานไฟฟ้ามาแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ซึ่งไม่อาศัยตัวนำในการเดินทางที่เป็นตัวส่ง จากนั้นส่งกำลังงานไปยังตัวรับ และตัวรับก็มีหน้าที่แปลงพลังงานนั้นกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้ง

#### 2.2.1 ความเป็นมาของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

การส่งผ่านกำลังงานไร้สายมาจากแนวคิดและการทดสอบของนิโคลาส เทสลา (Nicola Tesla) การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1899 ที่บริษัท โคลราโด สปริง อิเล็กทริก (Colorado Springs Electric Company) [8] การทดสอบดังกล่าวประกอบด้วย ขดลวดขนาดใหญ่ (Gigantic Coil) ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60 m x 60 m โดยขดลวดนี้สามารถให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับ 150 kHz และมีกำลังงานมากถึง 300 kW ในส่วนของด้านบนขดลวดสี่เหลี่ยมได้ทำการติดตั้งแท่งเสาโลหะ โดยยอดดอยเสาโลหะจะถูกติดตั้งลูกบอลทองแดงขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 m ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายของเทสลา พบว่าเมื่อทำการปล่อยกำลังงานออกจากลูกบอลทองแดง จะมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 100 MV อยู่รอบๆ ชั้นอากาศ ดังรูปที่ 2.1



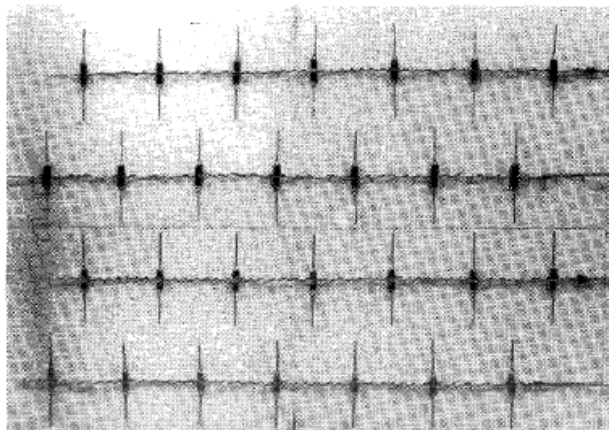
รูปที่ 2.1 การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายของเทสลา [8]

นอกจากนี้เทสลาได้ประสบความสำเร็จกับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย โดยได้อาศัยบอลลูนในการรับและส่งกำลังงานไฟฟ้า ซึ่งบอลลูนจะถูกลอยอยู่บนชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Layer) โดยมีระยะห่างระหว่างบอลลูนทั้งสองเป็นระยะทางเท่ากับ 42 km จากการทดสอบดังกล่าวพบว่าสามารถทำให้หลอดไฟติดมากกว่า 200 ดวง โดยแต่ละดวงจะใช้กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 50 W ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจึงกลายเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1933 ถึง ค.ศ. 1934 นักวิจัยชื่อ เฮท. วี. โนเบิล (H.V. Noble) ได้อาศัยแนวคิดและทฤษฎีของเทสลานำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อต้องการให้การส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีประสิทธิภาพมากกว่าที่เทสลาเคยทำมาก่อนหน้านี้ โดยโนเบิลได้ทำการเปลี่ยนลูกบอลทองแดงที่มีหน้าที่ส่งกำลังงานมาเป็นสายอากาศไดโพลแทน โดยการส่งกำลังงานนี้ถูกส่งด้วยความถี่ 100 MHz ผลจากการทดสอบพบว่าการส่งกำลังงานไร้สายไปยังสายอากาศไดโพลด้านรับสามารถรับกำลังงานได้ถึง 100 W

## 2.2.2 การประยุกต์ใช้งานการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

ในปี ค.ศ. 1958 มีนักวิจัยได้ให้ความสนใจให้มีการพัฒนาการส่งผ่านกำลังงานไร้สายและนำงานวิจัยดังกล่าวนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่ต่างแตกต่างกันออกไป เช่น ระบบดาวเทียมภาคพื้นดินพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar-Powered Satellite to Ground System : SPS) [9] และการใช้กำลังงานไร้สายขับเคลื่อนเครื่องบินเฮลิคอปเตอร์ (Helicopter Powering) เป็นต้น โดยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายทั้งหมดนี้จะถูกคำนึงถึงค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านในระบบด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สายอากาศไดโพลชนิดลำดับของนักวิจัย อาร์.เฮท จอร์จ [10]

ในปี ค.ศ.1964 นักวิจัยชื่อ อาร์.เฮท จอร์จ (R.H. George) [10] ได้ทำการวิจัยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายโดยใช้สายอากาศไดโพลชนิดแถวลำดับ (Array Antenna) จำนวน 28 ตัว ต่อเข้ากับไดโอดแบบสะพาน (Bridge Diodes) จำนวน 4 ตัว โดยไดโอดที่ใช้เบอร์ 1N82G ดังรูปที่ 2.2 ผลการทดสอบของการส่งผ่านกำลังงานไร้สายพบว่า ได้ทำการส่งกำลังงานออกไปเท่ากับ 40 W ที่ความถี่ 2-3 GHz สามารถรับกำลังงานได้เพียง 7 W เมื่อคิดประสิทธิภาพของการส่งผ่านเท่ากับ 40% โดยเป็น ที่มาของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifying Circuit Integrated with Antenna : Rectenna)

### 2.2.3 ประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

ประเภทของการส่งผ่านกำลังงานงานไร้สายสามารถแบ่งได้ตามประเภทของเทคโนโลยีในการส่ง เช่น ใช้คลื่น WiFi WLAN Microwaves รวมทั้ง คลื่นแสง ระยะในการรับส่ง และสายอากาศที่ใช้ในการรับ เช่น เส้นลวดหรือขดลวดในการรับสัญญาณความถี่ต่ำ ไปจนถึงใช้เลนส์ในการรวบรวมแสงได้ สามารถดูได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำแนกประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย [11 -15]

เทคโนโลยี	ระยะ	ค่าสภาพ เจาะจงทิศทาง	ความถี่	สายอากาศ	การประยุกต์ใช้งาน
Inductive coupling	Short	Low	Hz - MHz	Wire coils	Electric tooth brush
Resonant inductive coupling	Mid	Low	MHz - GHz	Tuned Wire coils Lumped element	Charging portable devices RFID Smartcards
Capacitive coupling	Short	Low	kHz - MHz	Electrodes	Smartcards Charging portable devices
Magneto dynamic	Short	N.A.	Hz	Rotating magnets	Charging Electric vehicles
Microwaves	Long	High	GHz	Parabolic dishes rectennas	Solar power satellite Powering drone aircraft
Light waves	Long	High	$\geq$ THz	Lasers photocells lenses	Powering drone aircraft

ดังนั้นจากตารางที่ 2.1 สามารถเห็นได้ว่าการส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีหลายประเภท และมีการนำไปใช้งานที่หลากหลายมาก ทั้งนี้ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการออกแบบสายอากาศและวงจรเรียงกระแสเป็นหลักเพื่อที่จะทำการเก็บเกี่ยวพลังงานได้ โดยผู้จัดทำจะทำการออกแบบเพื่อรองรับเทคโนโลยี WLAN ที่มีการทำงานในย่านความถี่ 2.40 GHz ถึง 2.50 GHz ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะขอกล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้ในเทคโนโลยี WLAN

### 2.3 มาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN

มาตรฐาน IEEE 802.11 หรือ WLAN ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 Mbps 2 Mbps 5.5 Mbps 11 Mbps และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz 5 GHz และ อินฟราเรด(1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบผู้ใช้ ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วย

เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้นได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11e และ IEEE 802.11i [16]

### 2.3.1 มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN

**IEEE 802.11b** ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น บลูทูธ โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 หรือ WLAN ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และ Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatability Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

**IEEE 802.11a** ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 m ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 m สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก

**IEEE 802.11g** ได้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (Backward Compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g ได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

**IEEE 802.11e** ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ QoS สำหรับการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับมัลติมีเดีย เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

**IEEE 802.11i** ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีช่องโหว่อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูลด้วยคีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้ [16]

### 2.3.2 ประวัติลำดับของการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16

กรกฎาคม 1999 IEEE 802.16 กลุ่มคณะทำงานได้กำเนิดขึ้นเพื่อพัฒนามาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ในการใช้ในระบบไร้สายย่านความถี่กว้าง โดยกลุ่มคณะทำงานอยู่ภายใต้องค์กร IEEE Standard Association (IEEE-SA) ประกอบไปด้วยนักวิจัยและพัฒนา จากหน่วยงานรัฐ บริษัทเอกชนจากทั่วโลก ร่วมกันพัฒนามาตรฐาน

ธันวาคม 2001 มาตรฐานแรกของ IEEE 802.16 ได้ผ่านการรับรองซึ่งมีชื่อว่า IEEE 802.16-2001 ซึ่งเป็นการกำหนดมาตรฐาน สำหรับอุปกรณ์เครือข่ายและลูกข่ายติดตั้งอยู่กับที่ และ ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 10 ถึง 66 GHz

ในปี 2002 มาตรฐาน IEEE 802.16a ถูกพัฒนาขึ้นและได้รับการรับรองเพื่อเป็นมาตรฐานเสริมสำหรับ IEEE 802.16-2001 (ซึ่งเป็นตัวมาตรฐานหลัก) IEEE 802.16a กำหนดมาตรฐาน สำหรับ อุปกรณ์ เครือข่าย และ ลูกข่าย ติดตั้งอยู่กับที่ แต่ ทำงาน ที่ แถบ คลื่น วิทยุ 2 ถึง 11 GHz และในปีเดียวกันยังมีการพัฒนามาตรฐานย่อยหลายมาตรฐานตามมา ตัวอย่างเช่น

- IEEE 802.16c กำหนด คุณสมบัติตั้งต้นของระบบ เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตอุปกรณ์สามารถนำไปกำหนดใช้ในผลิตภัณฑ์ของตนเองหรืออีกนัยหนึ่งเป็นการกำหนด เพื่อให้อุปกรณ์จากผู้ผลิตสามารถทำงานร่วมกันได้บนคุณสมบัติตั้งต้นอันเดียวกัน
- IEEE 802.16.2 ซึ่งมีชื่อว่า วิธีปฏิบัติข้อเสนอแนะบน "Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems" ใน ความถี่ 10 GHz ถึง 66 GHz หมายถึง มาตรฐานนี้จะเป็นการกำหนดแนวทางและคำแนะนำในการออกแบบและติดตั้งระบบสำหรับอุปกรณ์เครือข่ายและลูกข่ายติดตั้งอยู่กับที่เพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ใช้กับระบบที่ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 10 GHz ถึง 66 GHz
- IEEE 802.16.2a ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติข้อเสนอแนะบน "Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems" ใน ความถี่ 2 GHz ถึง 11 GHz จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายคลึงกับ IEEE 802.16.2 แต่ต่างที่เป็นมาตรฐานสำหรับระบบที่ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 2 ถึง 11 GHz

ในปี 2005 มาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งเป็นมาตรฐานเสริมให้กับมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 เพื่อรองรับอุปกรณ์ไร้สายย่านความถี่กว้าง ได้รับการรับรองเมื่อเดือนธันวาคม 2548 จึงมีชื่อเรียกมาตรฐานเป็นทางการว่า IEEE 802.16e-2005

ส่วนประเด็นเรื่องมาตรฐานความปลอดภัยบนเครือข่าย IEEE 802.16 นั้น ได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 แต่จากผลการศึกษาของจากหลายๆ สถาบัน ยังพบช่องโหว่ในมาตรฐาน ซึ่งทาง IEEE 802.16 กลุ่มคณะกรรมการได้แก้ไขปรับปรุงและบรรจุอยู่ใน IEEE 802.16-2004 ฉบับแก้ไขหรือที่เรียกว่า IEEE 802.16-2004/Corrigendum1 และบางส่วนถูกเพิ่มเติมอยู่ใน IEEE 802.16e-2005

## 2.4 หลักการและทฤษฎีสายอากาศไดโพล

สำหรับสายอากาศเส้นลวดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้งถือว่าเป็นสายอากาศที่มีความเก่าแก่ที่สุด เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและมีราคาถูก จึงนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในอดีตสายอากาศเส้นลวดดังกล่าวถูกนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นสายอากาศไดโพล ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้เป็นสายอากาศต้นแบบให้กับสายอากาศประเภทอื่นๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไดโพลรวมถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และสายอากาศไดโพลได้มีการจำแนกอยู่หลายประเภทตามขนาดความยาวคลื่นเช่น

- ไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal dipole) คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวของสายอากาศที่น้อยกว่า  $\lambda/50$
- ไดโพลเล็ก (Small dipole) คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวที่มากกว่า  $\lambda/50$  แต่ไม่เกิน  $\lambda/10$
- ไดโพลยาวจำกัด (Finite length dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวไม่น้อยกว่า  $\lambda/10$
- ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-wavelength dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความคลื่น ( $\lambda/2$ ) ซึ่งเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการออกแบบของสายอากาศไดโพลทั้งหมด

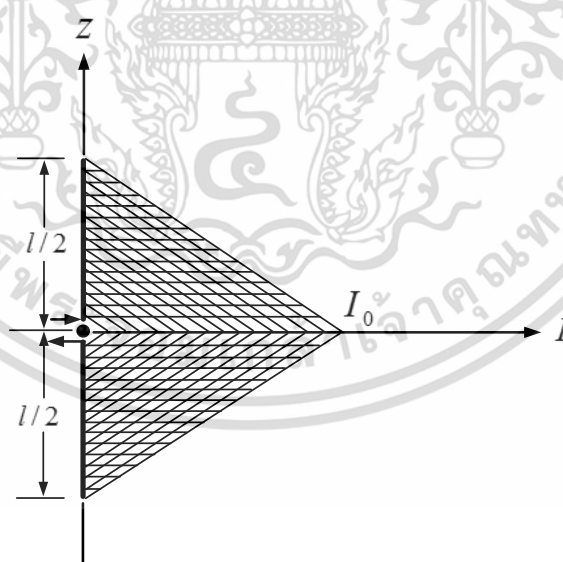
### 2.4.1 ไดโพลขนาดจิ๋ว [17]

ไดโพลขนาดจิ๋ว (Infinitesimal linear dipole) หรือสายอากาศไดโพลที่มีความยาวน้อยกว่าความยาวของคลื่นมากๆ  $l \ll \lambda$  โดยสายอากาศวางตัวตามแนวแกน  $z$  และสมมาตรที่จุดกำเนิด ถึงแม้ว่าไดโพลจิ๋วจะไม่ถูกนำไปใช้ในทางปฏิบัติแต่จะถูกใช้แสดงในรูปของสายอากาศแผ่นตัวเก็บประจุ (Capacitor-plate) หรือบางที่เรียกว่า สายอากาศที่มีโหลดอยู่ด้านบน (Top-hat-loaded) โดยแผ่นที่ปลายทั้งสองถูกใช้ทำเป็นโหลดเก็บประจุเพื่อที่จะทำให้กระแสในไดโพลมีค่าสม่ำเสมอ เนื่องจากสมมติให้ขนาดของแผ่นที่ปลายทั้งสองมีขนาดเล็กและไม่คำนึงถึงการแผ่พลังงานของแผ่นทั้งสองดังนั้นเส้นลวดจิ๋วที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีความยาวสั้นมากๆ  $l \ll \lambda$  และพอมมากๆ ( $a \ll \lambda$  -รัศมีเส้นลวดเล็กมากๆ) การเปลี่ยนแปลงกระแสตามเส้นลวดจึงสมมติให้มีค่าคงที่

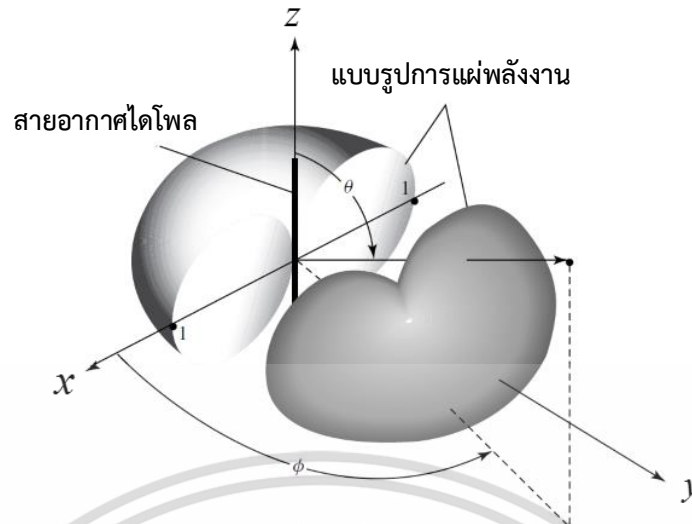
### 2.4.2 ไดโพลขนาดเล็ก

คุณสมบัติการแผ่พลังงานของไดโพลจิ๋วซึ่งมีความยาว  $l \leq \lambda/50$  ถูกพิจารณาในหัวข้อที่แล้ว โดยการกระจายของกระแส ถูกสมมติให้มีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าการกระจายของกระแสมีค่าคงที่แต่ในทางปฏิบัติแล้วทำไมไม่ได้เพราะเป็นแค่ปริมาณทางคณิตศาสตร์แต่การกระจายของกระแสจริงๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงสั้นๆ

การประมาณที่ดีกว่าของการกระจายของกระแสบนสายอากาศเส้นลวดซึ่งมาความยาว  $\lambda/50 < l \leq \lambda/10$  คือใช้การกระจายแบบการเปลี่ยนแปลงของรูปสามเหลี่ยม (Triangular variation) โดยการจัดเรียงรูปทรงที่สะดวกที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ของไดโพล ส่วนใหญ่จะกำหนดให้สมมาตรกับจุดกำเนิดและวางตามแนวแกน  $z$  แสดงดังรูปที่ 2.3 และแบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิ๋วแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การจัดวางโครงสร้างของไดโพลและการกระจายของกระแส [17]



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิว [17]

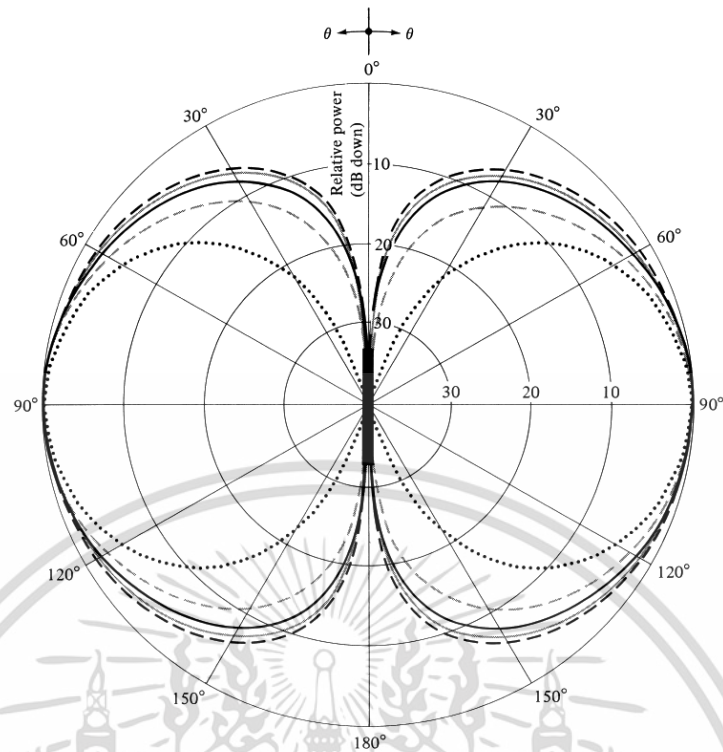
### 2.4.3 ไดโพลความยาวจำกัด






จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาเราจะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการแผ่พลังงานของไดโพลที่มีความยาวต่างๆ เพื่อที่จะลดความยุ่งยากของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยข้อสมมติเบื้องต้นคือเส้นลวดบางมากๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางเข้าใกล้ศูนย์) โดยข้อสมมติฐานนี้จะดีก็ต่อเมื่อนาขนาดของเส้นลวดมีขนาดเล็กมากๆ ถ้าเทียบกับความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.5 จะแสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบสองมิติที่ความยาวตามที่กำหนดคือ  $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$  และ  $\lambda$  และแสดงเปรียบเทียบกับแบบรูปกำลังสำหรับไดโพลจิว  $l \ll \lambda (U \sim \sin^2 \theta)$  จะพบว่าถ้าความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น ล้อคลื่นจะมีค่าแคบลง เพราะสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นตามความยาว และที่ 3-dB บีมวิทท์แต่ละความยาวมีค่าดังนี้

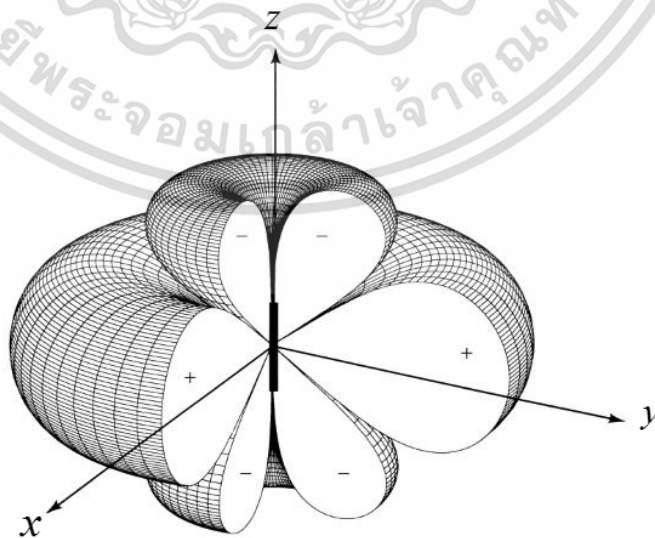
$l \ll \lambda$	3-dB บีมวิทท์	= $90^\circ$
$l = \lambda/4$	3-dB บีมวิทท์	= $87^\circ$
$l = \lambda/2$	3-dB บีมวิทท์	= $78^\circ$
$l = 3\lambda/4$	3-dB บีมวิทท์	= $64^\circ$
$l = \lambda$	3-dB บีมวิทท์	= $47.8^\circ$

เมื่อความยาวของไดโพลเพิ่มมากขึ้นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ( $l > \lambda$ ) จำนวนของล้อคลื่นจะเพิ่มมากขึ้นตามแบบรูปกำลังนอร์มอลไลซ์ของไดโพลความยาว  $l = 1.25\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.6 ในขณะรูปที่ 2.6 (ก) แสดงรูปสามมิติขณะที่รูปที่ 2.6 (ข) แสดงรูปสองมิติ ส่วนการกระจายกระแสสำหรับไดโพลที่มีความยาว  $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$  และ  $2\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.7



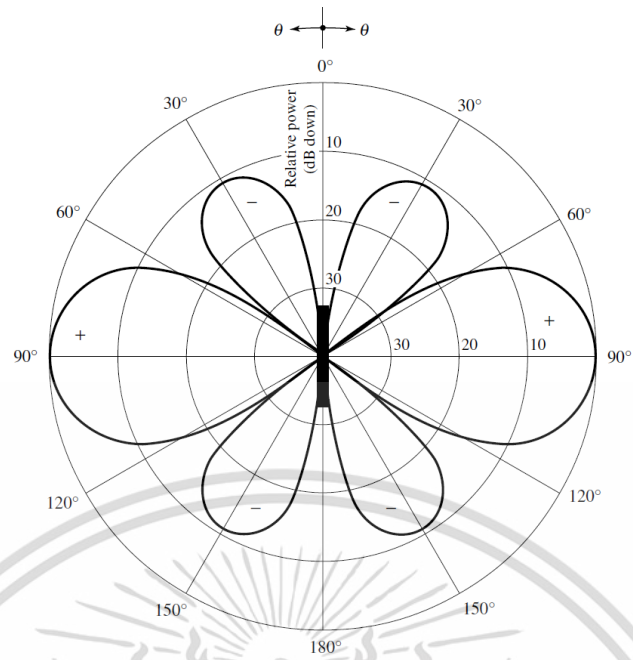
	$l \leq \lambda$	3-dB ปีมวิทท์ = $90^\circ$
	$l = \lambda/4$	3-dB ปีมวิทท์ = $87^\circ$
	$l = \lambda/2$	3-dB ปีมวิทท์ = $78^\circ$
	$l = 3\lambda/4$	3-dB ปีมวิทท์ = $64^\circ$
	$l = \lambda$	3-dB ปีมวิทท์ = $47.8^\circ$

รูปที่ 2.5 แบบรูปเชิงขนาดในระนาบมุมยก (Elevation plane) สำหรับไดโพลพอมที่มีการกระจายกระแสแบบไซน์ซอดอลเมื่อ  $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$  และ  $\lambda$  [17]



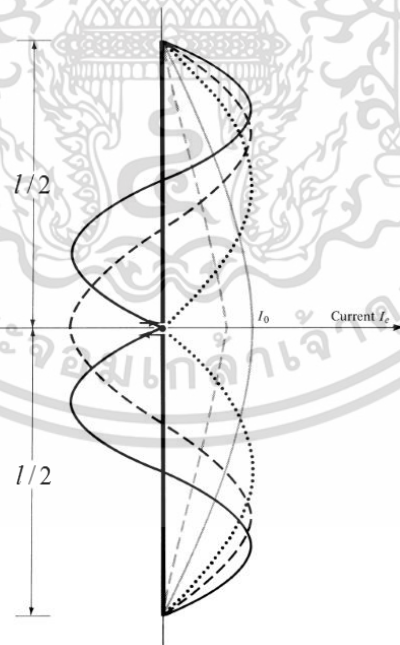
(ก) รูปสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปสองมิติ

รูปที่ 2.6 แบบรูปเชิงขนาดสามมิติและสองมิติสำหรับไดโพลพอม เมื่อ  $l = 1.25\lambda$  และมีการกระจายกระแสแบบไซน์ไซดอล [17]

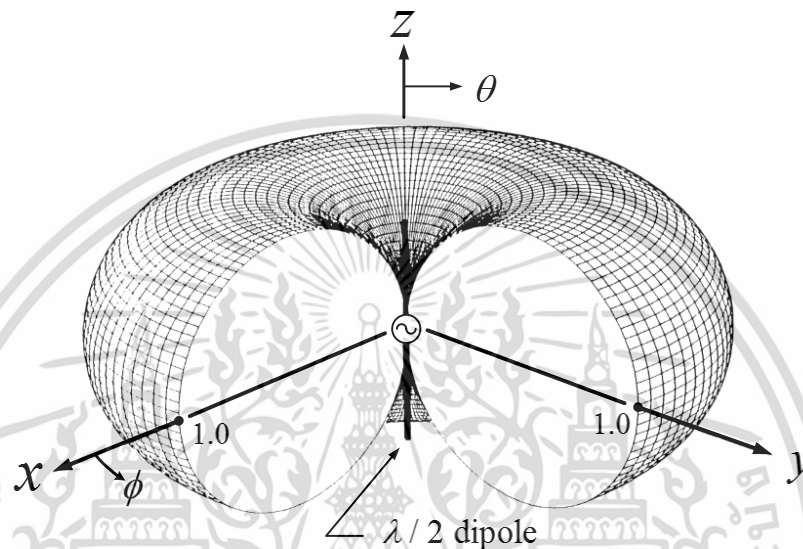


รูปที่ 2.7 การกระจายของกระแสตามแนวความยาวของสายอากาศแบบเส้นลวดเชิงเส้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

หนึ่งในสายอากาศที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางคือ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ( $l = \lambda / 2$ ) ทั้งนี้ เนื่องจากความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลมีค่า 73  $\Omega$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณที่นิยมใช้คือ 50 หรือ 75  $\Omega$  เมื่อนำมาต่อรวมกันจะทำให้ติดตั้งได้โดยเฉพาะที่ความถี่ที่เรโซแนนซ์ โดยแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น [17]

### 2.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่างๆ ที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไปมีค่าคุณลักษณะและค่าปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินสมรรถนะของสายอากาศเพื่อช่วยตัดสินใจประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานอยู่มากมาย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศดังต่อไปนี้

#### 2.5.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้นนอกจากจะพิจารณาเฉพาะ  $|S_{11}|$  แล้วยังสามารถที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากๆ จะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศไม่สามารถที่จะแผ่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด จะเป็นผลให้เกิดการสะสม

พลังงานไว้บางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2

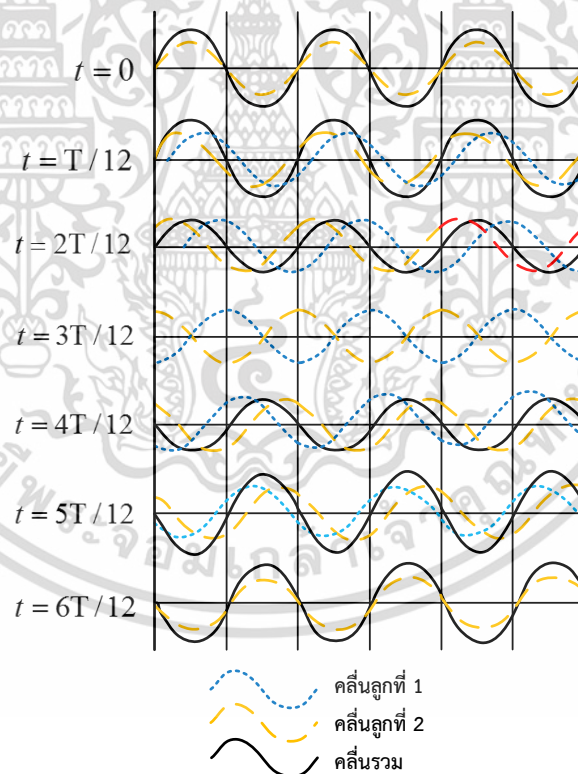
$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $Z_{in}$  คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ  
 $Z_o$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$RL(\text{dB}) = -20 \log |\Gamma| \quad (2.2)$$

### 2.5.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio; SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นที่เคลื่อนที่บนสายส่งในทิศทางตรงข้ามกัน คลื่นทั้งสองจะรวมตัวกันและหักล้างซึ่งกันและกันสลับไปมา ผลที่ได้จะเรียกว่าคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดคลื่นนิ่ง

รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองรวมตัวกันและหักล้างกันได้อย่างไร โดยอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะแบ่งได้เป็นสองประเภทคืออัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) และอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแส (Current Standing Wave Ratio; ISWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันคือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงสุดกับแรงดันต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกันอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแสคือ อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ 2.4

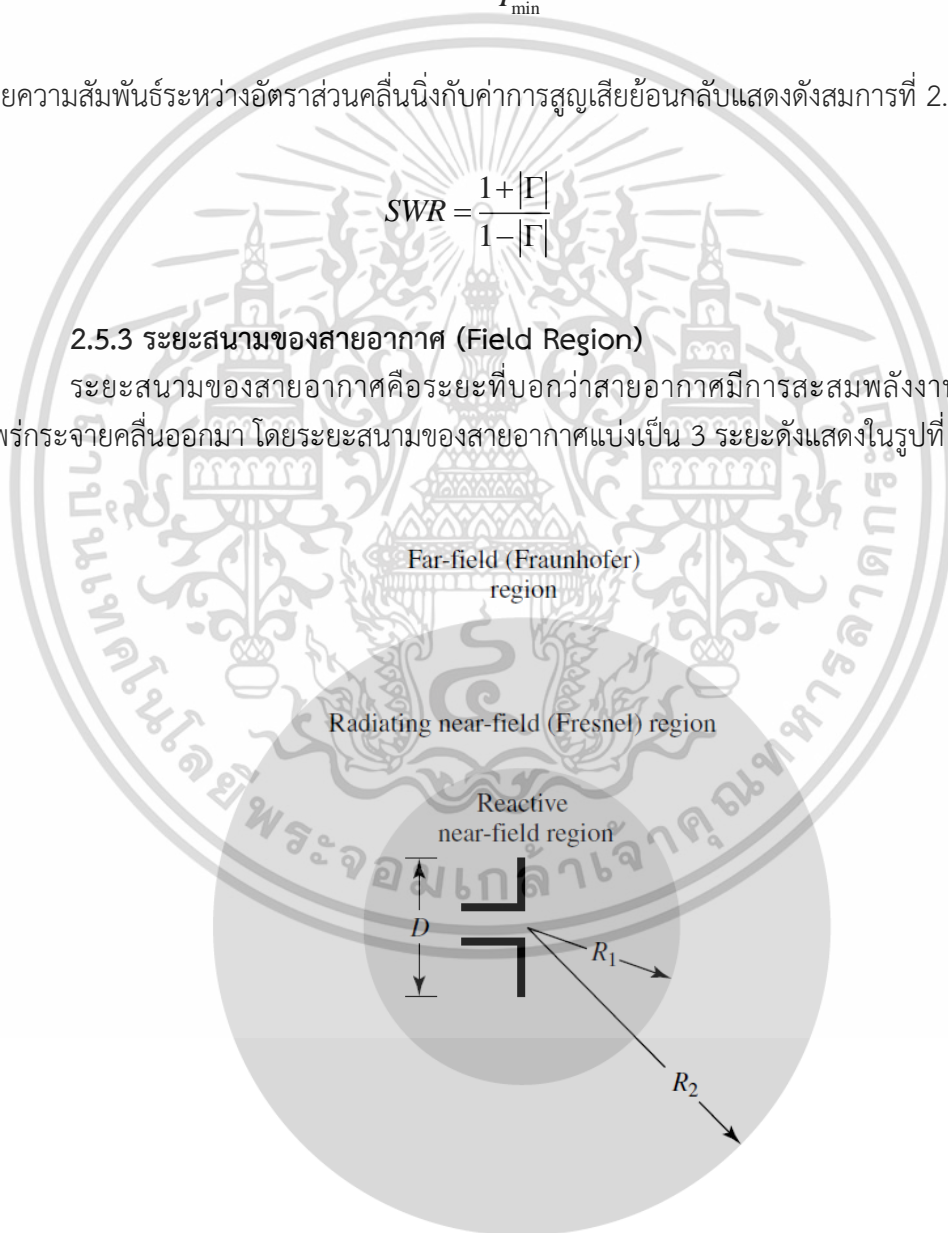
$$ISWR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (2.4)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังสมการที่ 2.5

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.5)$$

### 2.5.3 ระยะเวลาของสายอากาศ (Field Region)

ระยะเวลาของสายอากาศคือระยะที่บอกว่าสายอากาศมีการสะสมพลังงานหรือมีการแพร่กระจายคลื่นออกมา โดยระยะเวลาของสายอากาศแบ่งเป็น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระยะเวลาของสายอากาศที่ระยะต่างๆ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_1$  - ระยะสนามระยะใกล้รีแอคทีฟ (Reactive near field) คือระยะที่วัดจากสายอากาศไปจนถึง  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  หรือระยะที่อยู่ระหว่าง  $0 \leq R1 < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  โดยที่  $D$  คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ ที่ระยะนี้จะพบว่าสายอากาศจะไม่แพร่กระจายคลื่นออกมาแต่จะสะสมพลังงานในรูป Reactive กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของส่วนจินตภาพ

$R_2$  - ระยะสนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายคลื่น (Radiation near field) คือระยะตั้งแต่  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  ไปจนถึง  $\frac{2D^2}{\lambda}$  หรือ  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R2 < \frac{2D^2}{\lambda}$  ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาบางส่วนและสะสมไว้บางส่วน กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

- ระยะสนามระยะไกล (Far field) คือระยะตั้งแต่  $\frac{2D^2}{\lambda}$  เป็นต้นไปหรือ  $\frac{2D^2}{\lambda} \leq R3 < \infty$  ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาหมด กำลังที่คำนวณได้จะเป็นส่วนจริง

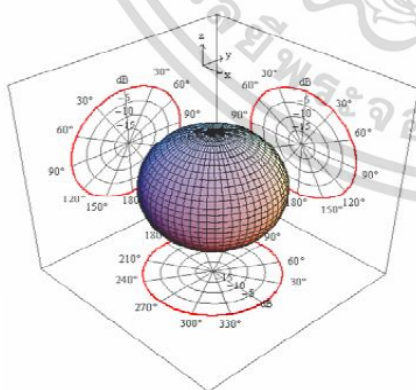
โดยที่  $D$  คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

#### 2.5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

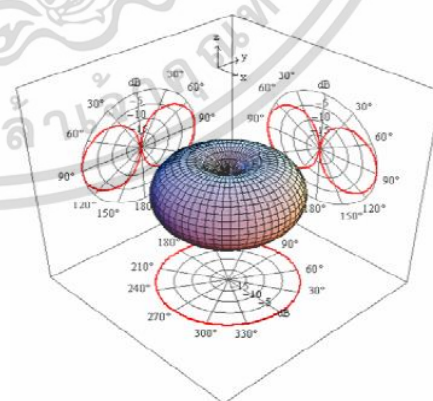
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือการแสดงทางกราฟของคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะหาได้จากระยะสนามระยะไกลและแสดงเป็นฟังก์ชันของการระบุทิศทาง โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ คือ

- แบบไม่ชี้ทิศทาง (Non-directional)
- แบบรอบทิศทาง (Omni-directional)
- แบบทิศทางเดียว (Uni-directional)
- แบบสองทิศทาง (Bi-directional)

ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ต่อไปนี้

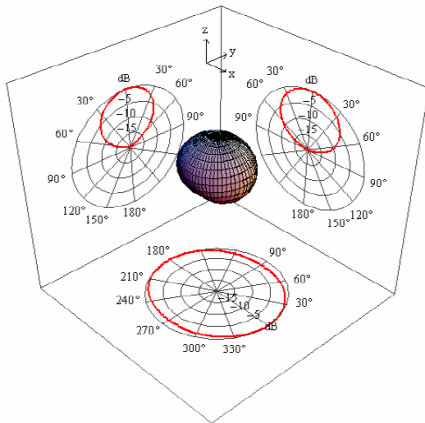


(ก) แบบไม่ชี้ทิศทาง

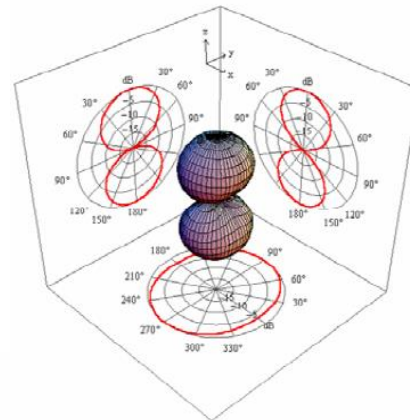


(ข) แบบรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบทิศทางเดียว

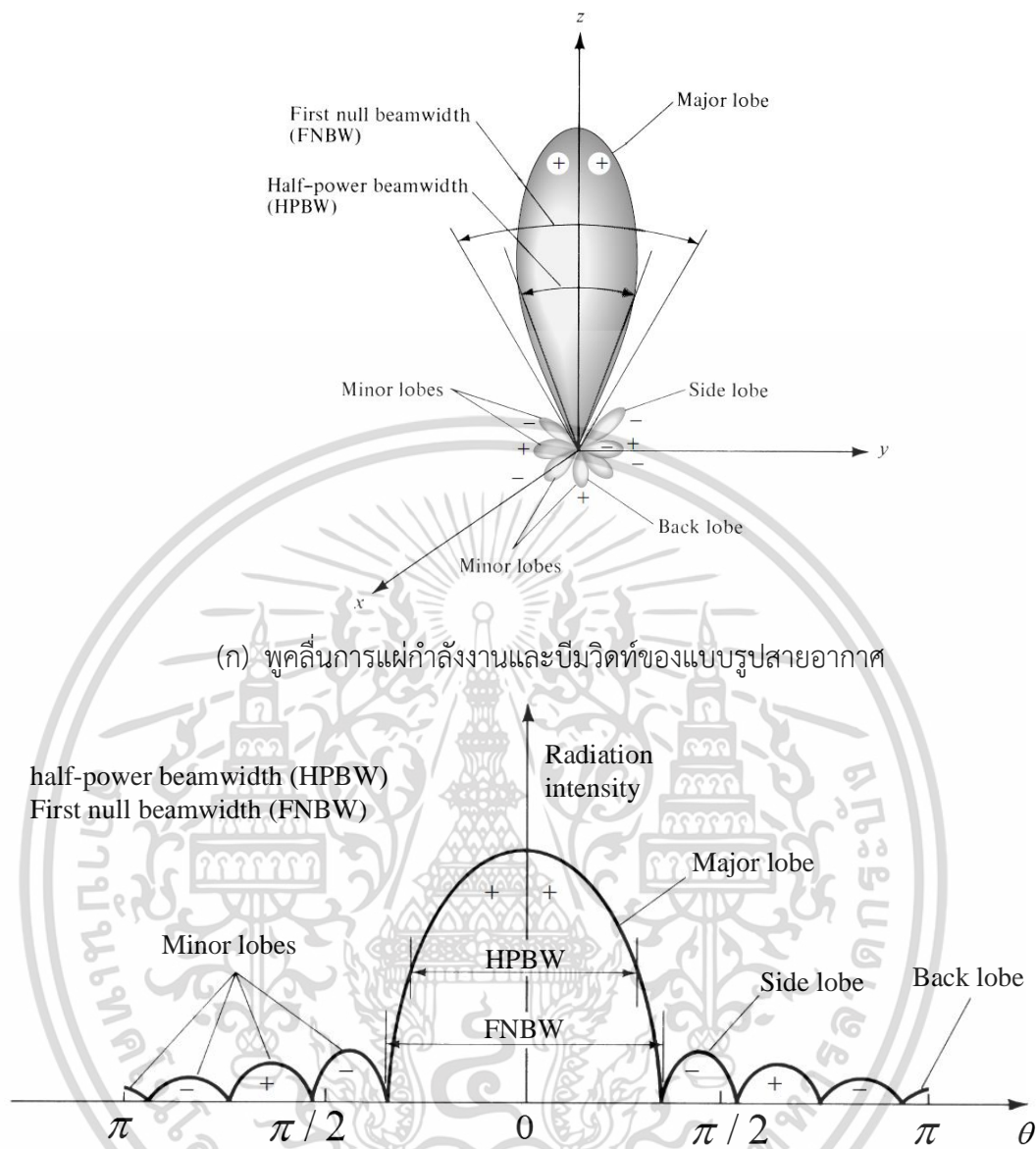


(ง) แบบสองทิศทาง

### รูปที่ 2.11 แบบรูปการแพร่กระจาย

โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศขณะที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีความเหมือนกันทุกประการ ในการวัดจึงสามารถทำได้โดยให้สายอากาศทดสอบทำงานในภาคส่งหรือภาครับก็ได้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปขนาดยอดของสนาม แบบรูปโพลาริเซชันและแบบรูปสภาพเจาะจงทิศทาง แบบรูปเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้งานสายอากาศในลักษณะงานเฉพาะต่างๆ

ในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ชี้ไปในทิศทางต่างๆ ปกติระดับสัญญาณที่มียอดสูงสุดเป็นตัวกำหนดแนวหลักของสายอากาศ ระดับสัญญาณนี้เรียกว่าลำคลื่นหลัก (Major Lobe) และระดับสัญญาณอื่นๆ เรียกว่าลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) โดยลำคลื่นย่อยมีอยู่สองลักษณะคือลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back Lobe) ซึ่งระดับลำคลื่นย่อยมีความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเนื่องจากลำคลื่นย่อยเป็นทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางที่ไม่พึงประสงค์



รูปที่ 2.12 พูคลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิทซ์ของสายอากาศ [17]

รูปที่ 2.12 (ก) (ข) ลาคลื่นของสายอากาศจะมีการพิจารณาความกว้างลาคลื่น โดยความกว้างลาคลื่นมีผลต่อการพิจารณาความสามารถในการกำหนดรายละเอียดการตรวจวัดข้อมูลในการสำรวจข้อมูลระยะไกล หรือพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ เช่นในการให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยทั่วไปมีนิยามของความกว้างลาคลื่นสองแบบที่นิยมใช้กัน ได้แก่

- ความกว้างลาคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beam width; HPBW) คือขนาดเชิงมุมของลาคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่กำลังคลื่นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

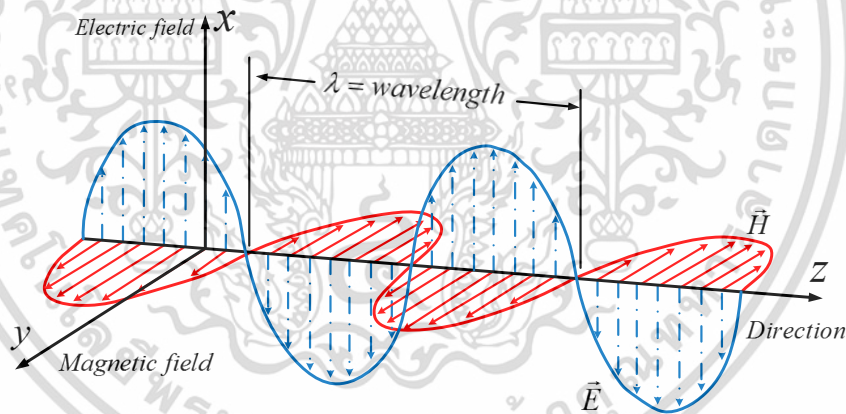
- ความกว้างลำคลื่น ณ จุดศูนย์คู้แรก (First null beam width; FNBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู้แรก

### 2.5.5 โพลาริเซชันของคลื่นระนาบ (Polarization) [18]

โพลาริเซชันของคลื่นระนาบโดยทั่วไปแล้วคลื่นระนาบไม่ได้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในทิศทางเดียวอย่างในรูปที่ 2.13 เสมอไปจากสมการดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= (M_x \vec{i}_x + M_y \vec{i}_y) k^2 e^{-jkz} \\ \vec{H} &= (-M_x \vec{i}_y + M_y \vec{i}_x) (\omega \epsilon - j\sigma) k e^{-jkz} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

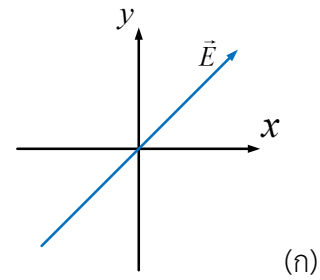
จะเห็นได้ว่าถ้าเฟสของ  $M_x$  และ  $M_y$  ไม่เท่ากันทิศทางของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  หรือ  $\vec{H}$  จะเปลี่ยนไปตามเวลา ในการนิยามของการโพลาริเซชันนี้ เราถือเอาทิศทางของปลายของ  $\vec{E}$  บนระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เป็นหลัก เช่น ทิศทางของปลายสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  เป็นเส้นตรงเราเรียกโพลาริเซชันของกรณีนี้ว่า โพลาริเซชันแบบเส้นตรง (linear polarization) ถ้าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรงที่ขนานกับพื้นโลก เราเรียกว่า โพลาริเซชันแบบขนานกับพื้นโลก (horizontal polarization) ถ้าตั้งฉากกับพื้นโลกเรียกว่า โพลาริเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลก (vertical polarization)



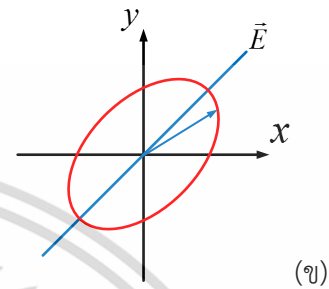
รูปที่ 2.13 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ  $Z$  [11]

และโพลาริเซชันในแบบอื่นๆ ก็จะต้องดูที่คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลาต่างๆ การแบ่งอาจแบ่งออกเป็น 3 แบบคือโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น โพลาริเซชันแบบวงกลม โพลาริเซชันแบบวงรี ซึ่งแต่ละแบบขึ้นอยู่กับ การหมุนของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และถ้าดูจากเฟส  $M_x$  และ  $M_y$  เราสามารถสรุปเป็นภาพได้ดังรูปที่ 2.14

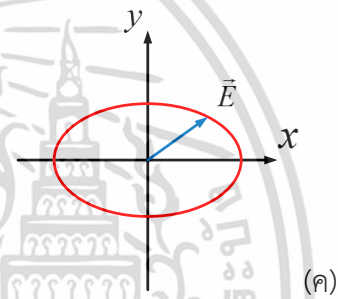
1. เมื่อเฟสของ  $M_x$  เท่ากับ  $M_y$  จะได้  
โพลาริเซชันแบบเส้นตรงตามรูป (ก)



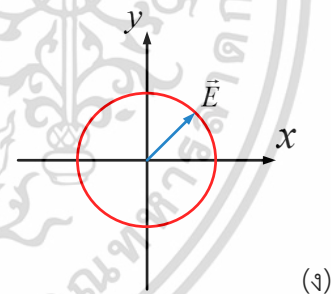
2. เมื่อเฟสของ  $M_x$  ไม่เท่ากับ  $M_y$  และ  $\theta \neq \pi/2$   
จะได้โพลาริเซชันแบบวงรีตามรูป (ข)



3. เมื่อเฟสของ  $M_x$  และ  $M_y$  ต่างกันเท่ากับ  $\pi/2$   
- ถ้า  $|M_x| \neq |M_y|$  จะเป็นโพลาริเซชันแบบวงรีที่มี  
แกนหลักอยู่บนแกน  $x$  และ  $y$  ตามรูป (ค)



- ถ้า  $|M_x| = |M_y|$  จะเป็นโพลาริเซชันแบบวงกลม  
ตามรูป (ง)



รูปที่ 2.14 โพลาริเซชันแบบต่างๆ [18]

โพลาริเซชันแบบวงรีและแบบวงกลมนั้นทิศทางการหมุนของ  $\vec{E}$  อาจจะเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ในการนิยามให้ถือหลักดังนี้ คือ เมื่อเรากำหนดระนาบ  $x-y$  คงที่ระนาบหนึ่งและเมื่อเรามองจากทิศทางของสายอากาศส่ง ถ้าสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุนตามเข็มนาฬิกาเรากำหนดว่าเป็นโพลาริเซชันแบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนเวียนขวา และถ้า  $\vec{E}$  หมุนทวนเข็มนาฬิกา ก็จะเป็นโพลาริเซชันแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนเวียนซ้าย

## 2.6 วงจรเรียงกระแส (Rectifying circuit)



รูปที่ 2.15 ผังวงจรเรียงกระแส

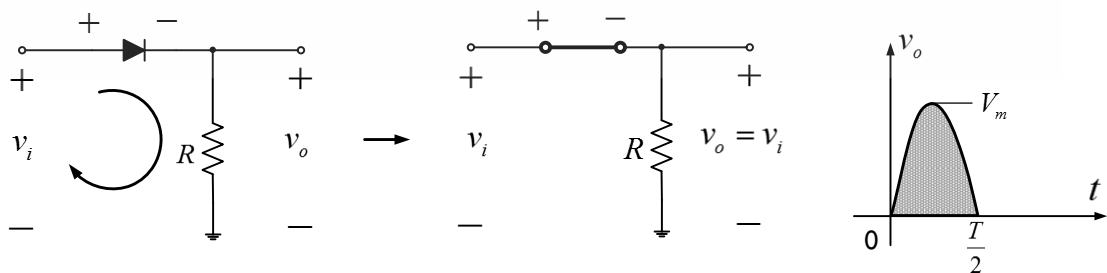
วงจรเรียงกระแสมีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณดังกล่าวคือ ไดโอด โดยพื้นฐานทั่วไปวงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (Coupling Capacitor) วงจรตขึ่งแบบสตัด (Stub Matching) ไดโอดช็อคกี้ (Schottky Diode) ตัวกรองสัญญาณเก็บประจุ (Capacitor Filter) และตัวต้านทาน (Resistor) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งแต่ละส่วนของวงจรเรียงกระแสจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

### 2.6.1 วงจรเรียงกระแสและการทำงานของไดโอด [19]

วงจรเรียงกระแสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

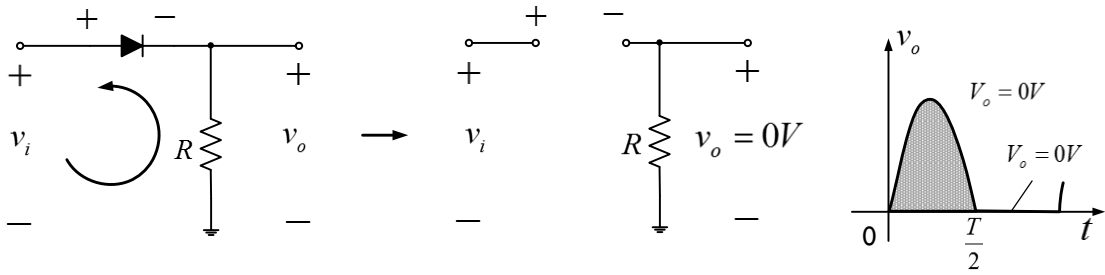
- วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier)
- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full-Wave Rectifier)

วงจรเรียงกระแสทั้งสองแบบนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ไดโอดเพื่อทำการเรียงกระแสโดยไดโอดจะยอมให้กระแสไหลไปในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการทำงานของไดโอดในอุดมคติ โดยที่จ่ายแรงดันชั่วขณะ  $v_i = V_m \sin \omega t$  ซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ให้วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นซึ่งประกอบด้วย ไดโอดในอุดมคติ ดังรูปที่ 2.17



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

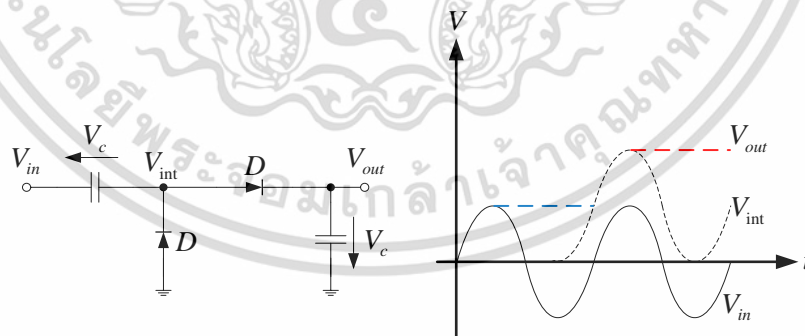
รูปที่ 2.16 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น [19]

ขณะสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านบวกปรากฏที่วงจรเรียงกระแส จะเกิดการไปอัสตรงที่ไดโอด ซึ่งเปรียบเสมือนการลัดวงจร ทำให้สัญญาณผ่านไดโอดได้จะได้แรงดันเอาต์พุต ( $v_o$ ) ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงดันอินพุต ( $v_i$ ) ตามรูปที่ 2.16 (ก)

ในทางตรงกันข้าม ขณะสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านลบปรากฏที่วงจรเรียงกระแส จะเกิดการไปแอสกลับที่ไดโอดในอุดมคติ ซึ่งเปรียบเสมือนการเปิดวงจร สัญญาณไม่สามารถผ่านไดโอดได้แรงดันเอาต์พุตจึงเท่ากับศูนย์ ( $v_o = 0V$ ) ดังรูปที่ 2.16 (ข)

### 2.6.2 ไดโอดทวีแรงดันสองเท่า (Voltage Doubler Diode)

ไดโอดทวีแรงดันสองเท่า ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเปรียบเทียบขนาดของ Magnitude ของสัญญาณทางด้านเข้าและทางด้านออกของวงจร โดยทางด้านออกของวงจรจะมีขนาดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากกว่าขนาดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ สองเท่า ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรไดโอดทวีแรงดันสองเท่าและรูปแบบสัญญาณ

ไดโอดที่ใช้งานสำหรับเรียงกระแสบนความถี่ไมโครเวฟได้เลือกใช้ไดโอดช็อตกี้ (Schottky Diode) ซึ่งไดโอดชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และมีแรงดันตกคร่อมไดโอดเพียง 0.3 V - 0.5 V จึงเหมาะสำหรับนำมาเรียงกระแส (Rectifier) ตรวจวัดสัญญาณ (Detector) และยังมีคุณสมบัติเป็นสวิตช์เปิดและปิดได้เร็วกว่าไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรผสมสัญญาณความถี่สูง (High frequency mixer) ไดโอดช็อตกี้มีความสัมพันธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างแรงดันกับกระแสและไดโอดชนิดนี้มีลักษณะการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการที่ 2.7

$$i(v) = I_o + \frac{d_2}{4}V^2 + d_1V_1 \cos(\omega t) + \frac{d_2}{4}V^2 \cos 2\omega t + \dots \tag{2.7}$$

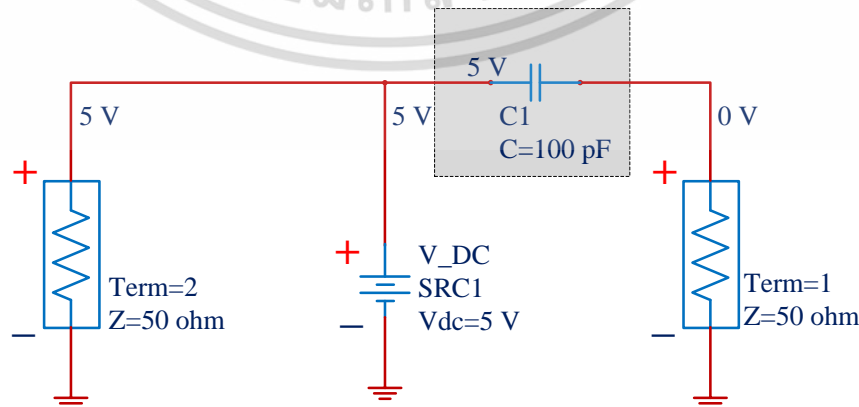
จากสมการที่ 2.13 จะประกอบไปด้วยเทอมของแรงดันไฟตรง เทอมของกระแสไฟตรงและเทอมของกำลังงาน โดยทั้งสามเทอมนี้มีความสัมพันธ์กัน เมื่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกผ่านการตรวจวัดสัญญาณด้วยไดโอดซ็อดก็ ขนาดของสัญญาณทางด้านเข้าจะมีสัดส่วนกับแรงดันไฟตรงทางด้านออกเท่ากับกำลังสอง  $V_2$  ซึ่งเรียกว่าการตรวจวัดตามกฎกำลังสอง (Square law detection) โดยทั่วไปไดโอดที่ถูกใช้ในการเรียงกระแสจะมีคุณสมบัติของกระแสไฟฟ้าจะมีอยู่ 3 ช่วง คือ ช่วงการเรียงกระแสตามกฎกำลังสอง ช่วงการเรียงกระแสเชิงเส้น ช่วงการอิ่มตัว ช่วงการเรียงกระแสตามกฎกำลังสอง เป็นช่วงที่นิยมใช้งานเนื่องจากต้องการกำลังงานไมโครเวฟไม่สูงมาก

### 2.6.3 ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ

ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (Coupling Capacitor) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟตรงรั่วหรือไหลออกทางด้านเข้าและทางด้านออกของวงจรความถี่วิทยุ หรืออาจจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งตัวเก็บประจุเชื่อมต่อทำหน้าที่ลัดวงจร (Short Circuit) เฉพาะกระแสไฟฟ้าตรง แต่ความถี่วิทยุสามารถไหลผ่านหรือทำงานได้ปกติ ดังรูปที่ 2.19 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุเชื่อมต่อได้จากสมการที่ 2.8

$$C_{coupling} = \frac{1}{2\pi f(Z_{input})} \tag{2.8}$$

- เมื่อ  $f$  = ความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบ
- $Z_{input}$  = อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของวงจรหรือสายอากาศ



รูปที่ 2.18 การจำลองตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ  $C_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าไม่มีแรงดันกระแสตรงไหลไปทาง Term=1 เนื่องจากตัวเก็บประจุทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟตรงไหลผ่านไปได้

#### 2.6.4 กรองสัญญาณโดยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้าที่มีการกระเพื่อม (Ripple) ของสัญญาณหรือมีการแกว่งของสัญญาณ ตัวเก็บประจุดังกล่าวเสมือนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) เพื่อต้องการให้ได้สัญญาณเรียบ โดยสามารถหาค่าตัวเก็บประจุนี้ได้จากสมการ

$$C = \frac{4N}{T} \int_0^T C_D (\bar{V}_D + V_0 \sin \omega t) dt \quad 2.9$$

โดยที่

$$N = \frac{V_0}{2V_s} \quad 2.10$$

เมื่อ

$N$  คือ จำนวนไดโอดที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอินพุตกับด้านออก

$T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

$C_D$  คือ ค่าตัวเก็บประจุภายในตัวไดโอด

$\bar{V}_D$  คือ ค่าแรงดันที่ไบอัสเดินหน้าให้กับไดโอด

$V_0 \cos \omega t$  คือ ค่าแรงดันไฟตรงที่ได้จากด้านออกของวงจร

#### 2.6.5 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทาน (Resistor) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตรงให้กับวงจรแปลงกระแสไฟฟ้ามากขึ้นกว่าเดิม โดยตัวต้านทานนี้มีผลต่อกำลังงานทางด้านเข้าและด้วยไดโอดที่มีคุณสมบัติเป็นไม่เป็นเชิงเส้นนี้จึงทำให้กำลังงานถูกทำให้ลดลง (Absorbed Active Power) ค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11 ถึง สมการที่ 2.13

$$V_{out} = V_O - I_{out} R_{out} \quad 2.11$$

$$R_{out} = \frac{V_O - V_{out}}{I_{out}} \quad 2.12$$

$$V_O = 4N\bar{V}_D \Big|_{I_{out}} \quad 2.13$$

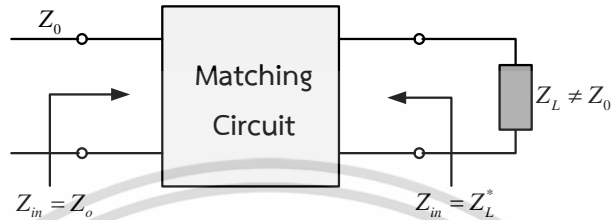
โดยที่

$N$  คือ จำนวนไดโอด

$\bar{V}_D$  คือ กระแสไฟฟ้าตรงตกคร่อมไดโอด

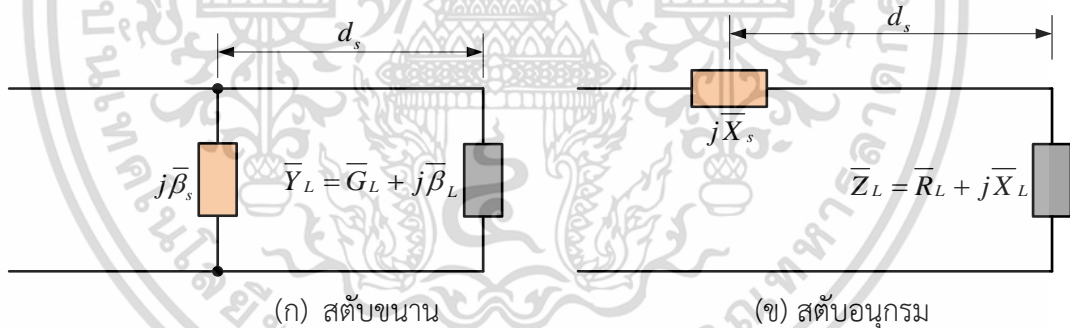
2.6.6 วงจรตขงสตับ

วงจรถงสตับ (Stub Matching) ทำหน้าท่ ปรบอิมพีแดนซ์ด้านเข้าให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ด้านออกมากที่สุด หรือระหว่างโหลดกับวงจรถง อันเนื่องมาจากเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณเกิดขึ้นมาเมือค่า  $Z_L \neq Z_0$  การแก้ปัญหานี้จะทำได้โดยการใช้วงจรถงสตับแทรกกลางระหว่างสายนำสัญญาณกับโหลดดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.19 ผังวงจรถงสตับ

จากรูปที่ 2.19 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของวงจรถง ( $Z_0$  หรือ  $Z_{in}$ ) และ  $Z_L$  คือ อิมพีแดนซ์ของไดโอดซ้อตก็ วงจรถงปรบตขงสตับกระทำตัวเสมือนเป็นอุปกรณ์รีแอกแตนซ์ การพิจารณาสายนำสัญญาณแบบไม่มีการสูญเสียมีโหลดแอดมิตแตนซ์เท่ากับ  $Y_L$  ดังรูปที่ 2.20 (ก) ในกรณีท่วงจรถงปรบตขงสตับถูกต่อแบบขนานและโหลดอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $R_L$  ดังรูปที่ 2.20 (ข) ในกรณีท่วงจรถงปรบตขงสตับถูกต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 2.20 ผังวงจรถงปรบตขงสตับ

การหาระยะ  $d_s$  ในกรณีวงจรถงปรบตขงสตับถูกต่อแบบขนานหาได้จากสมการที่ 2.14 ถึงสมการที่ 2.15 และความยาวสายนำสัญญาณสำหรับวงจรถงปรบตขงสตับบแบบเปิดปลายสายได้จากสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{\bar{\beta}_L \pm \sqrt{\bar{\beta}_L^2 - A(1 - \bar{G}_L)}}{A} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่

$$A = \bar{G}_L(\bar{G}_L - 1) + \bar{\beta}^2 \quad (2.15)$$

$$l_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1}(\bar{\beta}_s) \quad (2.16)$$

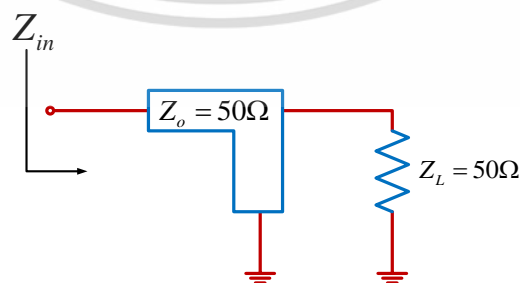
การหาระยะ  $d_s$  ในกรณีวงจรปรับตึงระดับถูกต้องแบบอนุกรมหาได้จากสมการที่ 2.17 ถึงสมการที่ 2.18 และความยาวสายนำสัญญาณสำหรับวงจรตึงระดับชนิดปลายปิดได้จากสมการที่ 2.19

$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left( \frac{\bar{X}_L \pm \sqrt{\bar{X}_L^2 - A(1 - \bar{R}_L)}}{A} \right) \quad (2.17)$$

$$A = \bar{R}_L(\bar{R}_L - 1) + \bar{X}_L^2 \quad (2.18)$$

$$l_s = \frac{1}{\beta} \cot(-\bar{X}_s) \quad (2.19)$$

และเนื่องด้วยการออกแบบวงจรเรียงกระแสต้องออกแบบบนแผ่นไมโครสตริปและตัวไมโครสตริปเองก็สามารถใช้เป็นสายนำสัญญาณแบบอนุกรม หรือสลับแบบวงจรเปิดและแบบปิดได้ เพื่อการตึงวงจรในย่านความถี่สูงและไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่อยู่บนแผ่นพิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของไมโครสตริปจะเหมือนกับเส้นสายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากนี้การใช้ไมโครสตริปยังทำให้เกิดการสูญเสียกำลังน้อยกว่าการใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์ อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครสตริปจะไม่เหมาะกับความถี่ต่ำ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำนั้นไมโครสตริปจะมีความยาวมาก และทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้การออกแบบการตึงวงจรด้วยไมโครสตริปโดยใช้สตัปเดี่ยว (Single - stub)



รูปที่ 2.21 การต่อใช้สตัปเดี่ยวในรูปแบบไมโครสตริป [20]

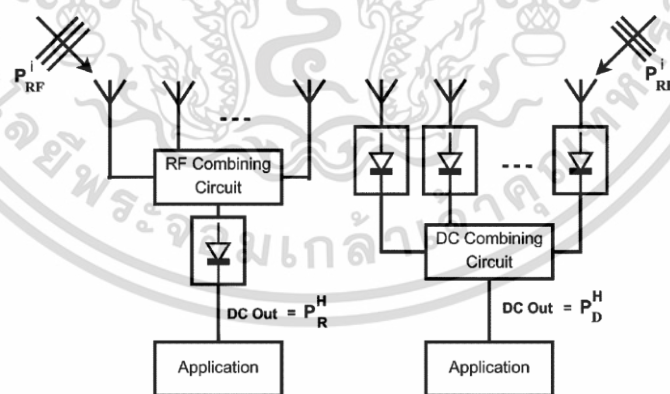
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.21 แสดงการต่อกับโหลด 50  $\Omega$  เพื่อต่อหรือแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดไปยังค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{in}$  ที่ต้องการ โดยใช้ไมโครสตริปที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50  $\Omega$  ทำหน้าที่เป็นวงจรการต่อ ซึ่งประกอบด้วยสลับแบบวงจรลัดต่อขนานกับโหลด ทั้งนี้วงจรการต่ออาจใช้สลับแบบวงจรเปิดแทนสลับแบบวงจรลัดก็ได้ [20]

## 2.7 งานวิจัยที่มีมาก่อน

จากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่าม้งานวิจัยที่ทำการแปลงกำลังสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีรูปแบบที่หลากหลาย ทั้งการศึกษาเกี่ยวกับค่าประสิทธิภาพของระบบแรงดันทางด้านขาออกที่ได้ โครงสร้างของระบบโดยหลักแล้วจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สายอากาศและวงจรเรียงกระแส ซึ่งงานวิจัยที่มีมาก่อนนี้จะศึกษาสายอากาศที่ต่อรวมกับวงจรเรียงกระแสที่เรียกว่า Rectenna

งานวิจัยแรกเป็นการนำเสนอรูปแบบการต่อใช้งานของสายอากาศซึ่งมีสองรูปแบบด้วยกันซึ่งเป็นผลงานของ Ugur Olgun และคณะ ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2011 โดยรูปแบบแรกในรูปที่ 2.22 (ก) เป็นการใส่สายอากาศหลายๆตัวรับสัญญาณเข้ามาจากนั้นทำการรวมสัญญาณคลื่นวิทยุเข้าด้วยกันก่อนที่จะเข้าสู่วงจรเรียงกระแส และในแบบที่สองในรูป 2.22 (ข) เป็นการใส่สายอากาศหลายๆตัวเช่นกันแต่สายอากาศแต่ละตัวจะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสก่อน จากนั้นจะรวมแรงดันที่ได้เข้าด้วยกันข้อดีของแบบ 2.22 (ข) นี้คือเกิดการสูญเสียน้อยกว่าแบบแรก 2.22 (ก) เนื่องจากการนำสัญญาณวิทยุมารวมกันจะทำให้เกิดการสูญเสียในวงจรมากขึ้น โดยแสดงวงจรเรียงกระแสดังรูปที่ 2.23 ผลการทดสอบ  $|S_{11}|$  และอัตราขยายแสดงได้ดังรูปที่ 2.24 (ข) โดยผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศมีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ตั้งแต่ 2. GHz ถึง 2.6 GHz โดยประมาณ และมีอัตราขยายมากที่สุด 4.8 dBi โดยประมาณ

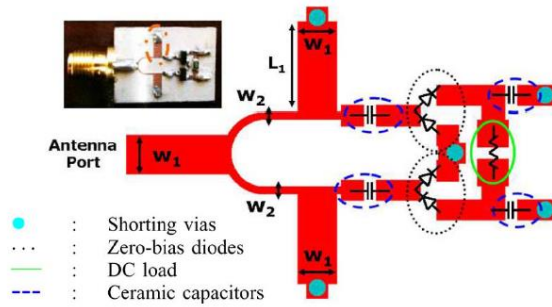


(ก) รวมความถี่วิทยุ

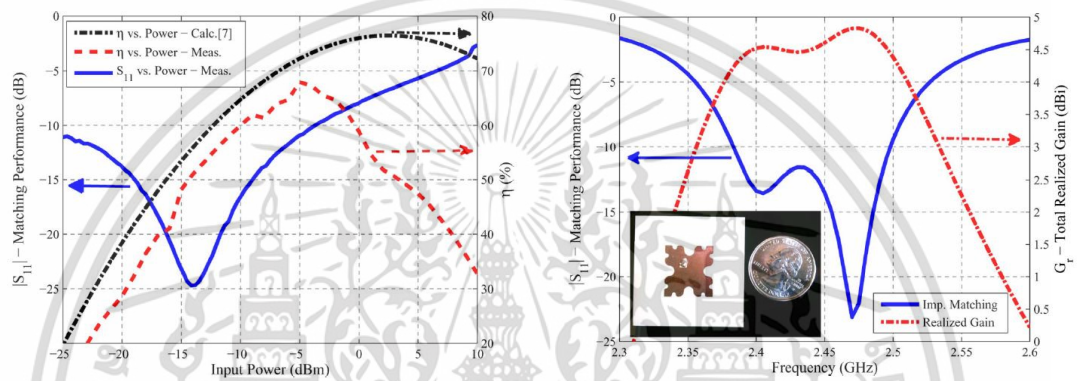
(ข) รวมไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 2.22 รูปแบบการต่อใช้งานของสายอากาศ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 วงจรเรียงกระแสต้นแบบ [21]

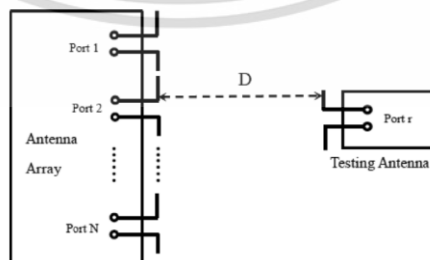


(ก) เปรียบเทียบระหว่างอินพุตต่อ  $|S_{11}|$  และ  $\eta$

(ข) การทดสอบคุณลักษณะต่างๆ

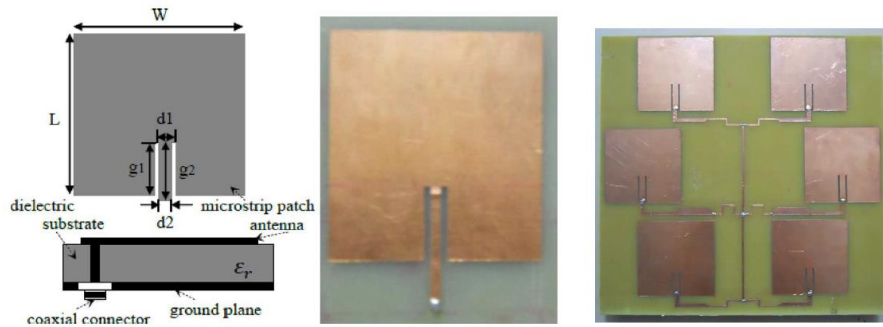
รูปที่ 2.24 ผลการทดสอบคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  อัตราขยายและการวัดเทียบของวงจร [21]

งานวิจัยต่อมาเป็นของ Fangyi Xie ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2013 ได้นำเสนอรูปแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ (Antenna Array) จากรูปที่ 2.25 - 2.26 เสนอโดยการนำเอาสายอากาศต้นแบบมาต่อเรียงกันในรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณให้ได้มากที่สุด และจากรูปที่ 2.27 (ก) แสดงถึงการจำลองและการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ รูปที่ 2.27 (ข) เป็นการจำลองและการทดสอบค่าประสิทธิภาพเทียบกับระยะทางโดยมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 40% ที่ระยะ 40 cm

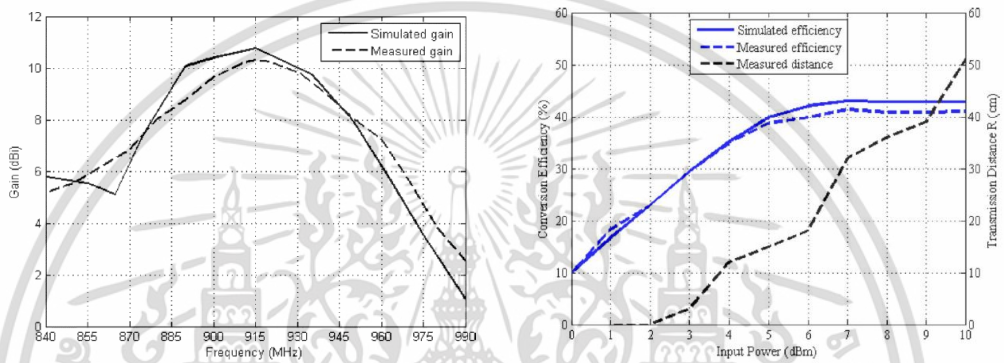


รูปที่ 2.25 รูปแบบสายอากาศแถวลำดับและการทดสอบ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



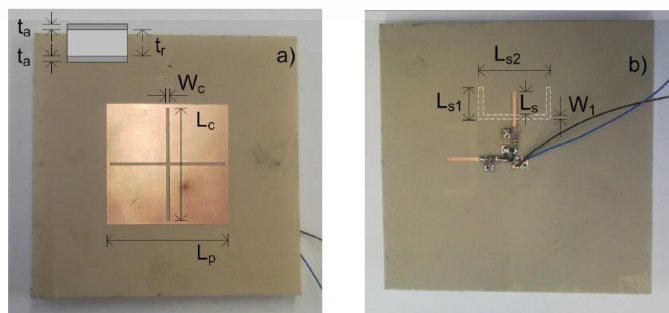
รูปที่ 2.26 สายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ [22]



(ก) การจำลองและการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ (ข) การจำลองและการทดสอบค่าประสิทธิภาพเทียบกับระยะทาง

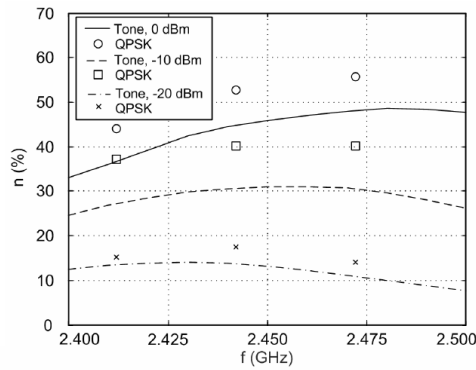
รูปที่ 2.27 ผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ [22]

งานวิจัยนี้เป็นของ Gianfranco Andia Vera ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2010 ได้นำเสนอสายอากาศจัดเรียงกระแสดังกล่าวโดยใช้สายอากาศแบบร่องกนกบาทเพื่อรับสัญญาณความถี่ย่าน กำลังงานไร้สาย 2.45 GHz โดยการออกแบบในการรับสัญญาณคลื่นสนามแม่เหล็กกำลังงานต่ำๆ สายอากาศถูกใช้งานอยู่ในย่านความถี่ประมาณ 2.30 GHz ถึง 2.60 GHz มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศหรือ efficiency ค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 40% ที่ความถี่ 2.475 GHz โดยแปลงเป็นแรงดันกระแสตรงได้ประมาณ 78 mV ดังแสดงดังรูปที่ 2.28 ถึง 2.29

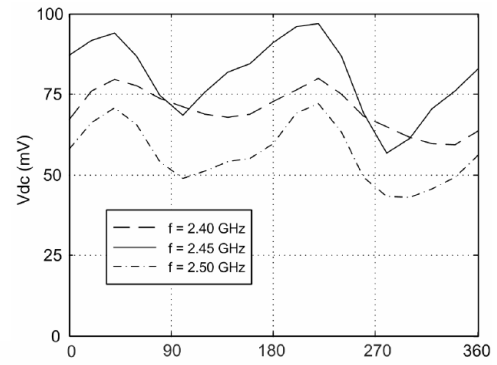


รูปที่ 2.28 รูปสายอากาศต้นแบบด้านหน้าและด้านหลัง [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อคุณเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



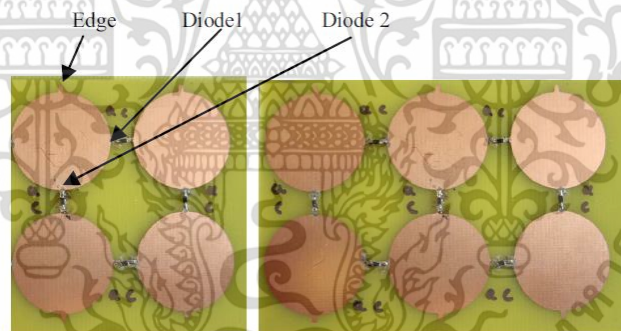
(ก) ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพของวงจร เรียงกระแส



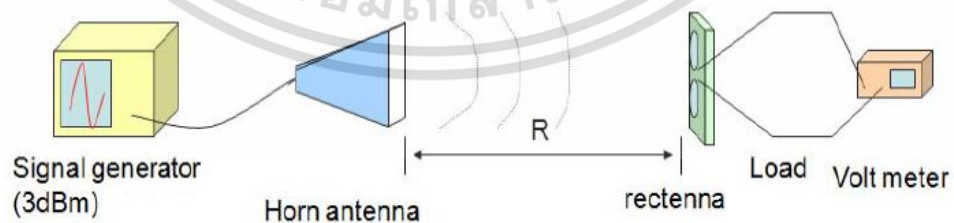
(ข) แรงดันกระแสตรงทางด้านขาออก

**รูปที่ 2.29** ผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ [23]

งานวิจัยต่อมาเป็นของ Jingwei Zhang ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2011 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการต่อสายอากาศแบบแถวลำดับโดยได้ทำการเปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกเปรียบเทียบระหว่างการต่อสายอากาศแถวลำดับตั้งแต่หนึ่งองค์ประกอบถึงสามองค์ประกอบดังรูปที่ 2.30 แต่จะแยกวัดค่าแรงดันที่ไดโอดทีละตัวแยกกัน และกล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อที่จะทำการทดสอบวัดค่าแรงดันต่างๆได้

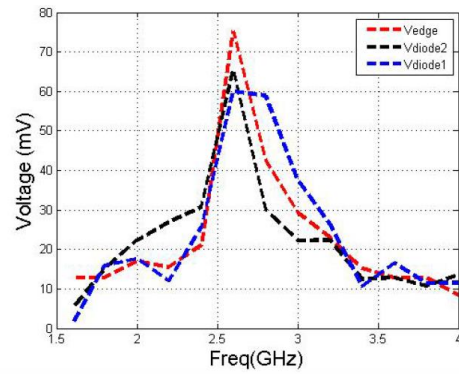
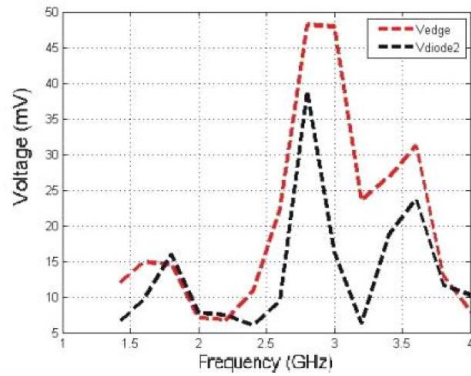


**รูปที่ 2.30** สายอากาศแถวลำดับแบบสององค์ประกอบและสามองค์ประกอบ [24]



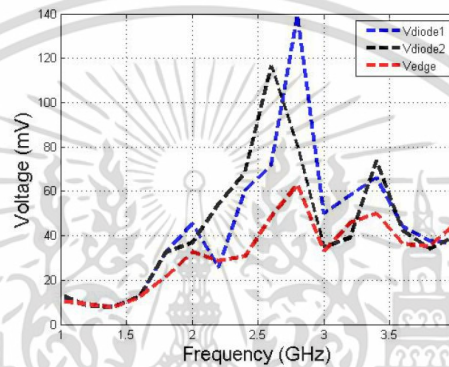
**รูปที่ 2.31** รูปการติดตั้งการทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ

(ข) ผลการทดสอบสายอากาศ 2 องค์ประกอบ

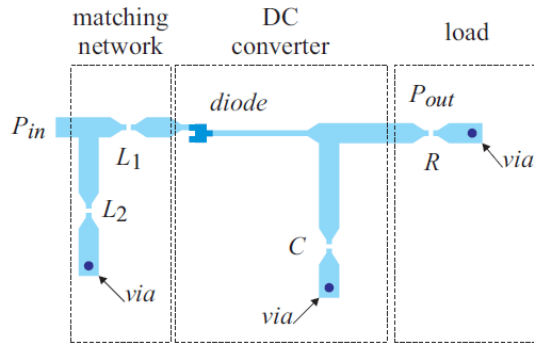


(ค) ผลการทดสอบสายอากาศ 3 องค์ประกอบ

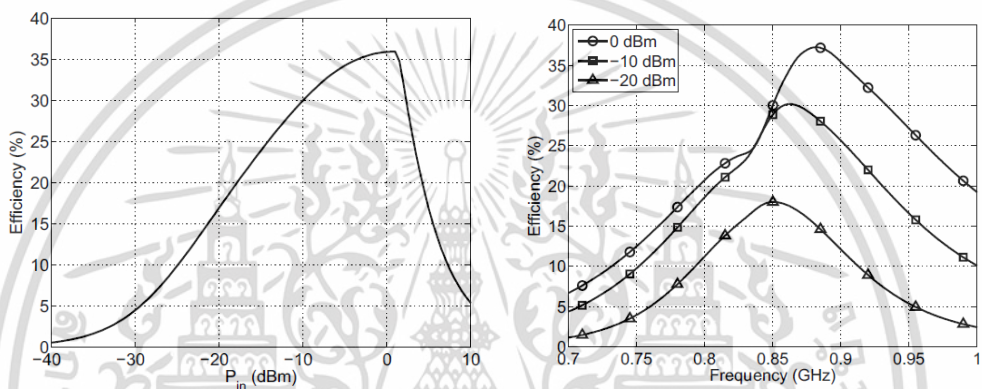
### รูปที่ 2.32 ผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ [24]

ในรูปที่ 2.31 เป็นอธิบายถึงการติดตั้งการทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณต่อเข้ากับสายอากาศปากแตรเพื่อเป็นสายอากาศส่งและใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศรับโดยใช้โวลมิเตอร์อ่านค่าแรงดันทางด้านขาออก ได้แสดงดังรูปที่ 2.32 เป็นผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศตั้งแต่ 1 ถึง 3 องค์ประกอบโดยมีมีแรงดันทางด้านขาออกอยู่ที่ 50 80 140 mV ตามลำดับ

งานวิจัยต่อมาเป็นของ Stylianos D. ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2014 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการแบ่งสายอากาศและวงจรเรียงกระแสออกเป็นส่วนๆเพื่อที่จะงานต่อการสร้างและการวิเคราะห์ โดยได้ทำการทดสอบวงจรเรียงกระแสแยกกับสายอากาศและหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสโดยเปรียบเทียบกับตัวต้านทานหลายๆค่า และความถี่ต่างๆเพื่อดูค่าประสิทธิภาพได้ดังแสดงตามรูปที่ 2.33 ถึง 2.34

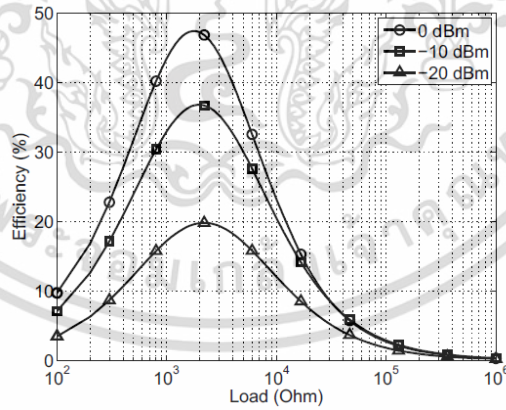


รูปที่ 2.33 การออกแบบไมโครสตริป [25]



(ก) ค่าประสิทธิภาพต่อกำลังงานด้านเข้า

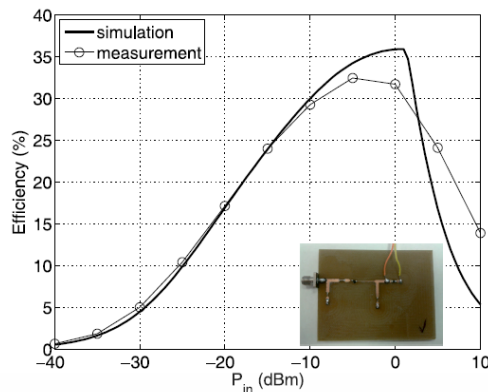
(ข) ค่าประสิทธิภาพพวงจรเรียงกระแสเทียบกับความถี่ต่างๆ



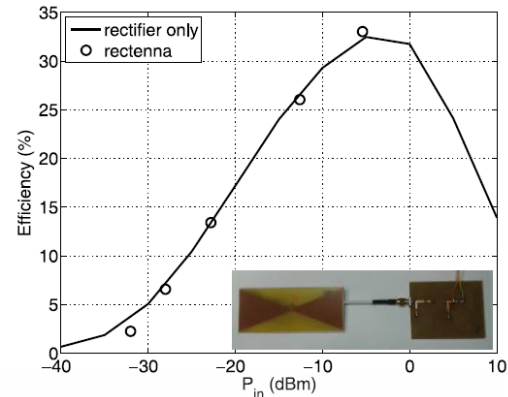
(ค) ค่าประสิทธิภาพพวงจรเรียงกระแสเทียบกับค่าความต้านทานต่างๆ

รูปที่ 2.34 ผลการจำลองแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลการจำลองและผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพ วงจรเรียงกระแสเทียบกับกำลังงานด้านเข้า



(ข) ผลการทดสอบสายอากาศ และวงจรเรียงกระแส

### รูปที่ 2.35 ผลการจำลองและผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ [25]

จากรูปที่ 2.35 เป็นผลการทดสอบเทียบกับผลการจำลองแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศและวงจรเรียงกระแสโดยเปรียบเทียบเฉพาะวงจรเรียงกระแส และวงจรเรียงกระแสต่อร่วมกับสายอากาศได้

จากการศึกษาวิจัยที่มีมาก่อนนั้นมีข้อเสียของระบบที่เป็นปัญหาส่วนใหญ่คือการรับสัญญาณได้น้อย สามารถรับกำลังงานได้ในระยะที่ใกล้ๆ เกิดการสูญเสียของกำลังงานเกิดขึ้นในวงจร รวมถึงระบบการส่งกำลังงานทำให้ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านหรือประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานให้มีค่าที่ดีได้ยากจึงได้นำแนวคิดและการออกแบบต่างๆที่ได้นำเสนอมาปรับปรุงและประยุกต์ใช้เข้ากับงานที่จะได้ทำการออกแบบ เช่นสายอากาศแบบแกลลัดบ การติดตั้งการวัดทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ รวมถึงแนวคิดการออกแบบสายอากาศที่ติดกับวงจรเรียงกระแสในแต่ละตัวเพื่อที่จะลดการสูญเสียภายในวงจรได้

## 2.8 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีและหลักการของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transmission : WPT) โดยได้เริ่มจากประวัติความเป็นมาและกล่าวถึงชนิดของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย มาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN ความถี่ 2.40 GHz ประวัติลำดับของการพัฒนามาตรฐาน ซึ่งระบบ WLAN นั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเป็นระบบที่น่าสนใจซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวได้นำมาทำการออกแบบสายอากาศในลำดับต่อไป

สายอากาศสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายนั้นส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากและมีความละเอียดเนื่องจากต้องต่อใช้งานกับใช้อุปกรณ์แบบลิ้มพ์ต่างๆ โดยในที่นี้เราจะเลือกใช้สายอากาศแบบแผ่นพิมพ์โดยที่เราได้เลือกใช้สายอากาศแบบไดโพล โดยเบื้องต้นจะให้หลักการในการออกแบบจากการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ตขในสายนำสัญญาณไมโครสตริป และในส่วนของวงจรเรียงกระแสที่ได้สร้างแยกกันกับสายอากาศเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและใช้งานโดยส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศน้อยที่สุด โดยพิจารณา  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

อัตราขยาย แรงดันทางด้านขาออกและค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานในบทที่ 3 และ 4 ต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

### 3.1 บทนำ

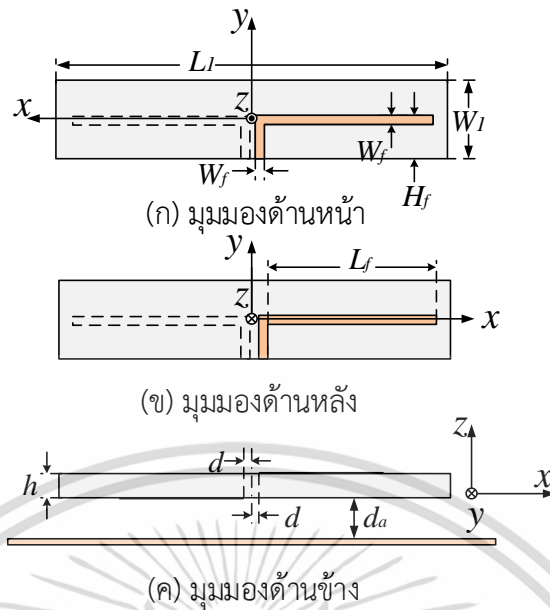
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ที่จะมาประยุกต์ใช้ในการรับสัญญาณของเทคโนโลยี Wireless โดยใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และนำมาออกแบบโดยใช้โปรแกรม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วย  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย รวมไปถึงแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแส เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติของสายอากาศให้ดีขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการเริ่มต้นของการออกแบบสายอากาศนั้นจะเริ่มต้นจากการกำหนดขนาดความยาวของสายอากาศไดโพล ให้มีขนาดความยาวเป็น  $\lambda/2$  โดยจะออกแบบและสร้างสายอากาศไดโพล ให้ง่ายที่สุด จากนั้นทำการออกแบบวงจรเรียงกระแสเพื่อที่จะนำไปรวมกับสายอากาศเพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณความถี่ย่าน Wireless แล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าได้

### 3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในเบื้องต้นโดยใช้ทฤษฎีของสายอากาศไดโพล ครึ่งความยาวคลื่นมาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น สำหรับใช้ในการคำนวณหาความยาวทั้งหมดของสายอากาศ โดยการออกแบบสายอากาศในแต่ละโครงสร้างนั้นจะใช้โปรแกรมในการจำลอง และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยจะพิจารณา  $|S_{11}| \leq -10$  dB จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ โดยการจำลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [26]

#### 3.2.1 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นโดยออกแบบอยู่ในรูปตัวแอลกลับหัว ให้ความยาวทั้งหมดเป็น  $\lambda/2$  และแบ่งให้แขนแต่ละข้างของไดโพลมีความยาวเท่ากับ  $\lambda/4$  โดยกำหนดให้มีระยะห่างของแขนแต่ละข้างเป็น 1.26 mm ซึ่งเป็นระยะระหว่างคอนเนคเตอร์ที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณที่เป็นชนิด SMA มีอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  โดยให้ตัวนำในป้อนสัญญาณให้แขนทางด้านขวามือและตัวนำนอกป้อนแขนทางด้านซ้ายมือ โครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยความถี่ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณคือ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางใช้งาน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศไดโพล WLAN 2.4 GHz มุมมองด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้าง

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศไดโพลสร้างจากวัสดุไดอิเล็กทริกชนิด FR4 เนื้อสารเป็นอีพ็อกซี เป็นวัสดุซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไป และมีราคาถูก มีคิงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.3 โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการสร้าง

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
$W_l$	ความกว้างของสายอากาศ
$L_l$	ความยาวของสายอากาศ
$W_f$	ความกว้างของเส้นสตริป
$L_f$	ความยาวของเส้นสตริป
$H_f$	ความสูงของแขนไดโพล
$d$	ระยะห่างของเส้นสตริปจากกึ่งกลางสายอากาศ
$d_a$	ระยะห่างจากแผ่นสะท้อนถึงสายอากาศไดโพล
$h$	ความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก

### 3.3 การปรับอิมพีแดนซ์และ $|S_{11}|$

#### 3.3.1 การออกแบบสายอากาศ

ในขั้นต้นของการออกแบบมุ่งเน้นเพื่อให้ได้สายอากาศสำหรับ รับความถี่ในย่าน 2.4 GHz - 2.5 GHz ซึ่งครอบคลุมการใช้งานกับเทคโนโลยี WiFi จากสายอากาศแบบไดโพลการป้อนรูปตัวแอล ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสายอากาศที่จะทำการสร้างขึ้นนี้ป้อนด้วยสายนำสัญญาณ จึงทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่  $50 \Omega$  เป็นค่าเริ่มต้น โดยหาได้จากทฤษฎีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์ โดยไม่คิดความหนาของตัวนำ ( $t$ ) จึงได้สมการดังต่อไปนี้

$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2h}{t} \right) + 1 \right]$$

$$H = h - 2t$$

เมื่อไม่คิดความหนาของตัวนำ ( $t$ ) ได้

$$W = w$$

และ

$$H = h = h_s$$

ถ้าต้องการอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_o = 50 \Omega$  เมื่อ ความสูงของวัสดุฐานรอง  $h = h_s$  คือ 1.5 mm มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  $\epsilon_r = 4.3$  จากนั้นทำการแทนค่าลงในสมการที่ (2.1) - (2.4) แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปโดย  $W = w_f$  ได้ค่าที่เหมาะสมซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_o = 50 \Omega$  คือ 1.5 mm ดังแสดงให้เห็นได้ดังนี้

เมื่อ  $h = h_s$  และ  $W = w_f$  ดังนั้นจึงได้  $\frac{w_f}{h_s} = \frac{1.5}{0.75} > 1$  ดังนั้นจึงเข้าเงื่อนไขของสมการที่ (2.3) - (2.4) คำนวณได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{h} > 1$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}$$

คำนวณหา  $\epsilon_{\text{reff}}$  โดยการแทนค่า  $\epsilon_r = 4.3$  เมื่อ  $h = h_s = 0.75 \text{ mm}$   $w = w_f = 1.5 \text{ mm}$  ลงในสมการที่ (2.4)

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2\sqrt{1 + 12 \frac{1.5}{0.75}}} = 2.98$$

แทนค่า  $\epsilon_{\text{reff}}$  ลงไปในสมการที่ 2.3 จะได้

$$z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{2.98}} \left\{ \frac{1.5}{0.75} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{1.5}{0.75} + 1.444 \right) \right\}^{-1} = 51.776 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

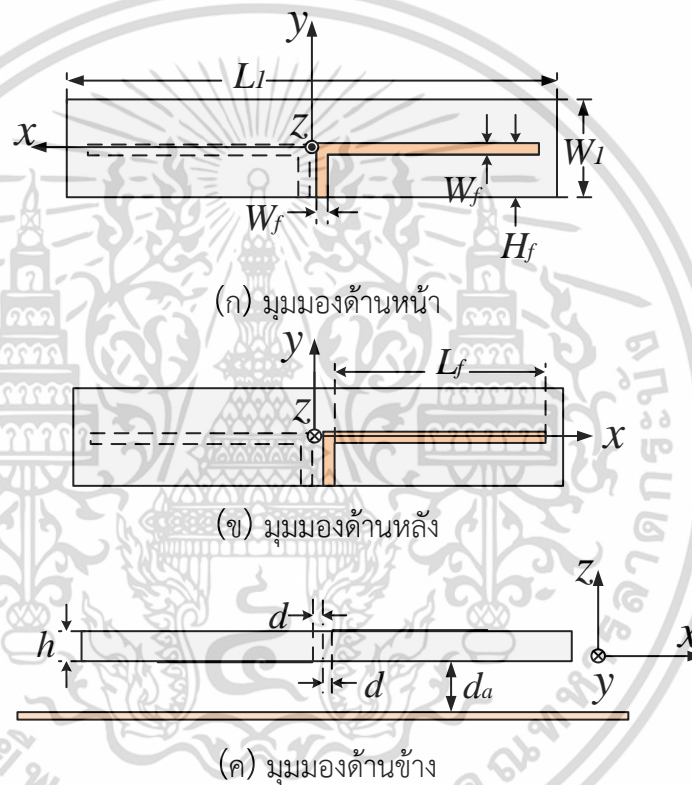
ซึ่งประมาณได้ใกล้เคียง 50  $\Omega$

จากนั้นทำการหาความยาวและความกว้างของของสายอากาศโดยใช้

$$\lambda_o = \frac{c}{f_o}$$

ดังนั้นที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 12.24 cm และมีค่าความยาวคลื่นส่วนสี่เท่ากับ ( $\lambda/4=3.06$  cm) คือระยะที่ถูกกำหนดขึ้นต้นของความยาวของแขนของไดโพล

### 3.3.2 สายอากาศเริ่มต้น



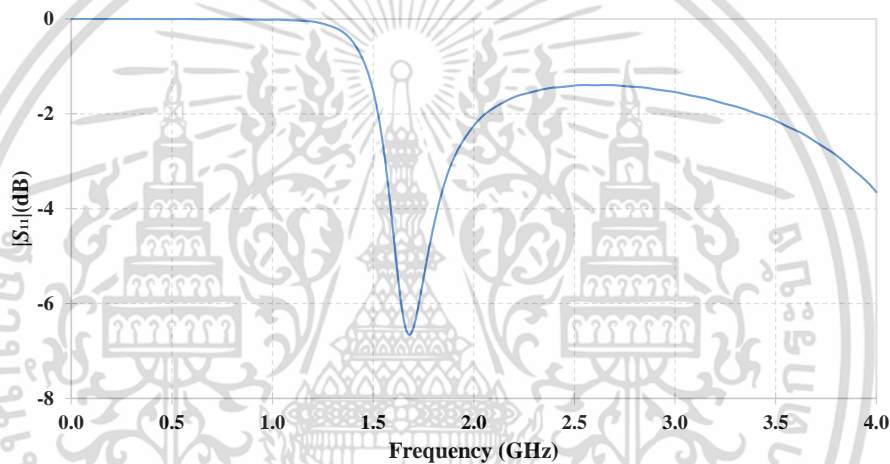
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้น

โดยตารางที่ 3.2 ถึงพารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้นเพื่อดูความสอดคล้องของทฤษฎีการออกแบบร่องของสายอากาศ และ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้น

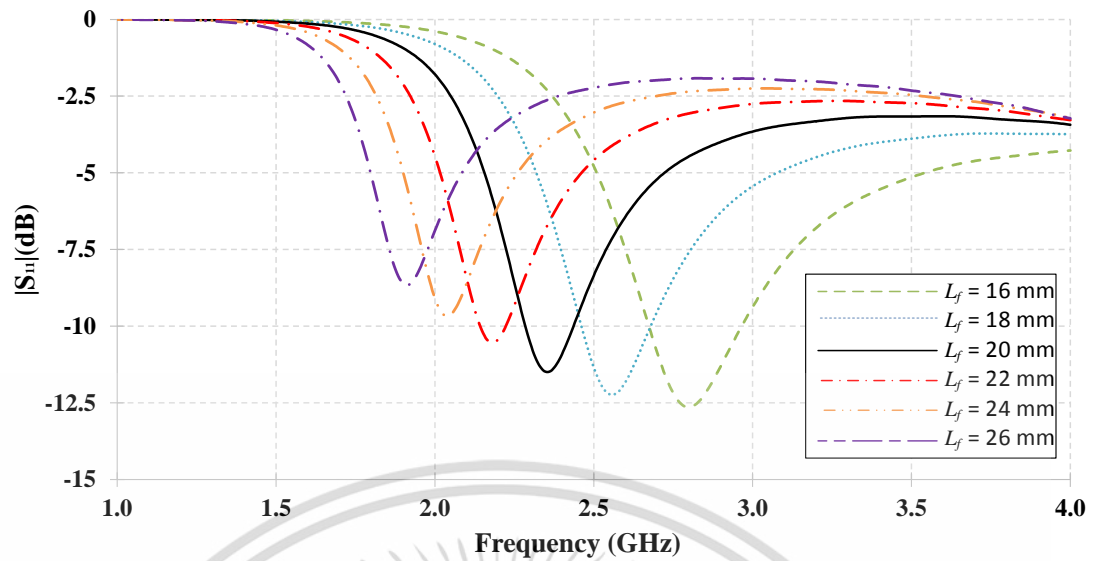
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ(mm)
$W_I$	13.00
$L_I$	65.00
$W_f$	1.50
$L_f$	30.60
$H_f$	5.00
$d$	0.63
$d_a$	25.00
$h$	1.50

รูปที่ 3.3  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเริ่มต้น

เมื่อจำลองสายอากาศเริ่มต้นดังรูปที่ 3.2 และมีขนาดของพารามิเตอร์เท่ากับในตารางที่ 3.2 ซึ่งจากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ในรูปที่ 3.3 นั้นแสดงให้เห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1.6 GHz

### 3.3.3 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $L_f$

จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเริ่มต้นพบว่าเมื่อความถี่ที่เรโซแนนซ์ของสายอากาศนั้นอยู่ที่ 1.6 GHz ซึ่งจะพบว่ามี การคลาดเคลื่อนจากความถี่ที่ต้องการใช้งานคือ ที่ 2.45 GHz จึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศซึ่งค่าพารามิเตอร์แรกที่จะทำการปรับนั้นคือพารามิเตอร์  $L_f$  หรือความยาวของความยาวของแขนไดโพลซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่น่าจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด ซึ่งผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศนั้นแสดงในรูปที่ 3.4



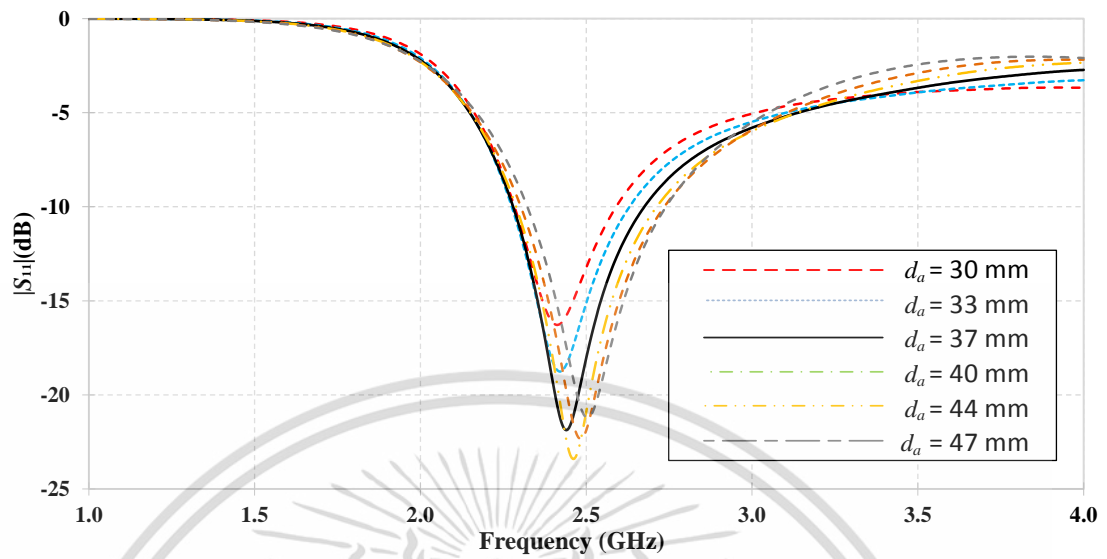
รูปที่ 3.4  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $L_f$

จากรูปที่ 3.4 จะสังเกตว่าเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $L_f$  ให้มีความยาวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ไปทางความถี่ต่ำ และที่  $L_f$  มีขนาด 20 mm แล้วจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการ ประมาณ 2.3 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้งานแต่มีแบนด์วิดธ์ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการคือ 2.45 GHz จึงต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น โดยที่พารามิเตอร์ ที่หลังจากการจำลองนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งพารามิเตอร์ต่อไปที่จะทำการปรับคือ  $d_a$  หรือ ระยะห่างจากแผ่นสะท้อนถึงสายอากาศไดโพล ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์เมื่อทำการปรับขนาดของ  $L_f$

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ(mm)
$W_l$	13
$L_l$	65
$W_f$	1.5
$L_f$	20
$H_f$	5
$d$	0.63
$d_a$	25
$h$	1.5

### 3.3.4 สายอากาศเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ $d_a$



รูปที่ 3.5  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $d_a$

เมื่อทำการปรับระยะห่างจากแผ่นสะท้อนถึงสายอากาศจะได้  $|S_{11}|$  แสดงดังรูปที่ 3.4 จะพบว่าสายอากาศนั้นมีความถี่ที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz และมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.26 GHz - 2.66 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ 2.45 GHz

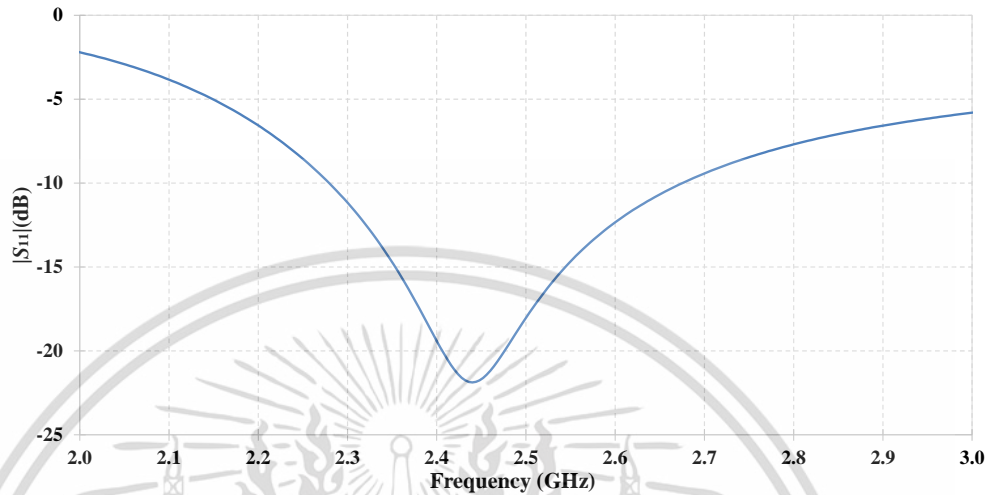
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศองค์ประกอบเดียวเมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมจากการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ(mm)
$W_l$	13
$L_l$	65
$W_f$	1.5
$L_f$	20
$H_f$	5
$d$	0.63
$d_a$	37
$h$	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ผลการจำลองสายอากาศเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

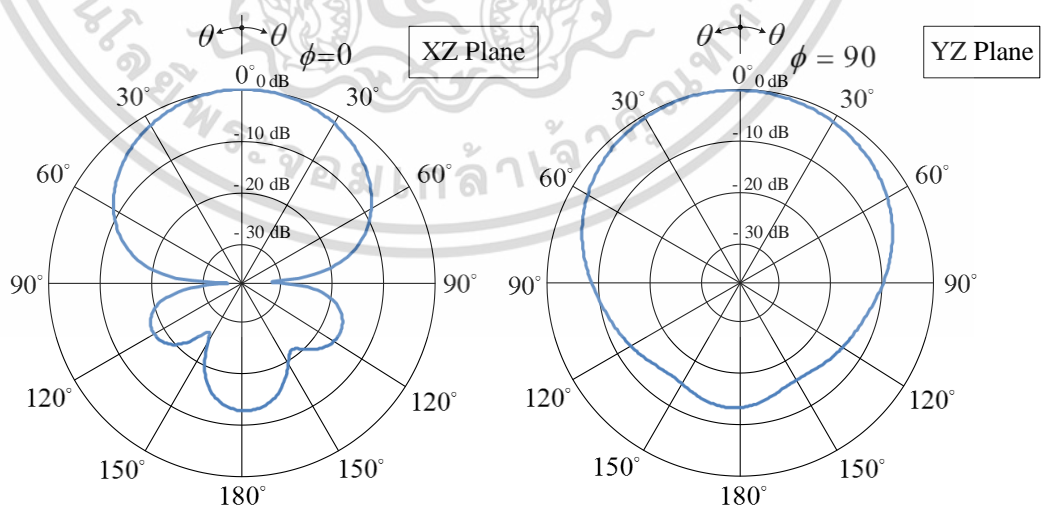
#### 3.4.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$



รูปที่ 3.6  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

จากรูปที่ 3.6 สายอากาศมีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10$  dB ตั้งแต่  $2.28$ - $2.68$  GHz โดย  $|S_{11}|$  ต่ำสุดเท่ากับ  $-24.60$  dB อยู่ที่ความถี่  $2.44$  GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ คือ ตั้งแต่  $2.40$  GHz ถึง  $2.5$  GHz

#### 3.4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

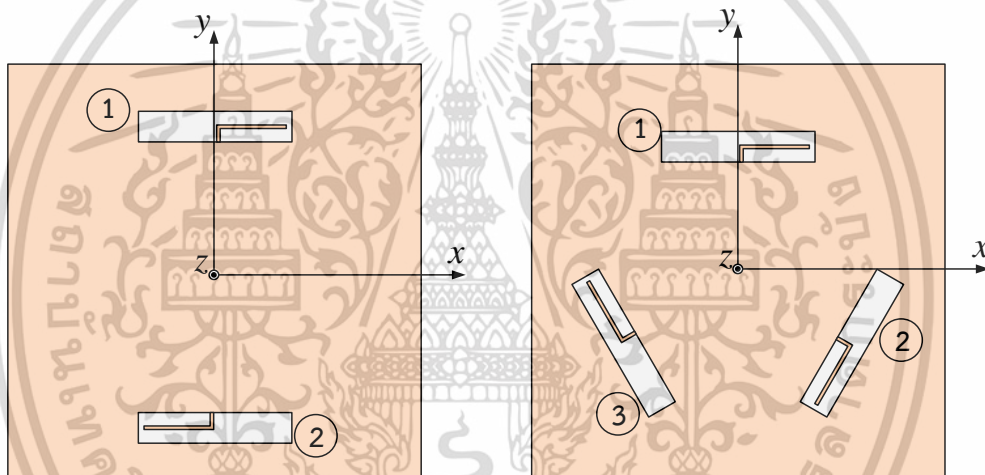
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีแบนด์วิดธ์ในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 71.3 องศา และ 142.4 องศาตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 13.52 dB และที่ความถี่ 2.45 GHz

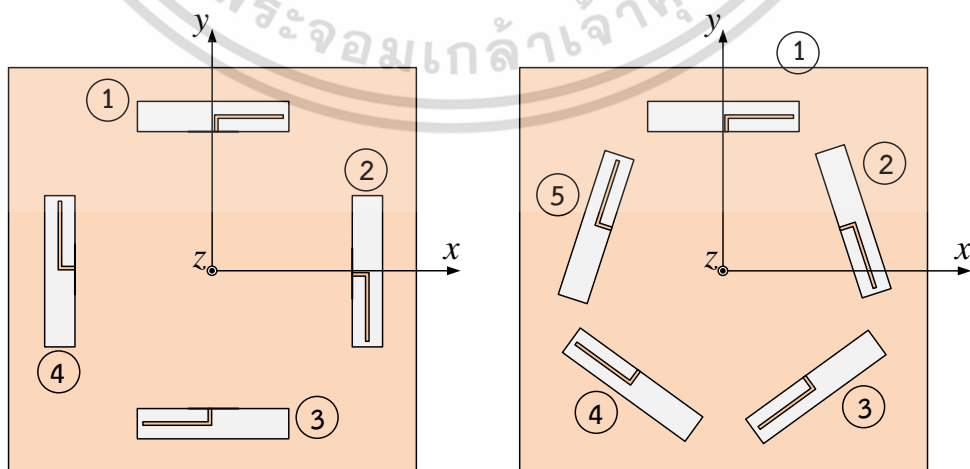
### 3.5 การนำเอาสายอากาศไดโพลมาวางร่วมกันบนแผ่นสะท้อนเดียวกัน

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลต้นแบบแล้ว ได้ทำการนำเอาสายอากาศจำนวน 2 ถึง 6 ตัวมาวางร่วมกันบนแผ่นสะท้อนแผ่นเดียวกันโดยให้สายอากาศแต่ละตัวทำมุมซึ่งกันและกัน เท่าๆกันและทำการศึกษาผลกระทบของ  $|S_{ii}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศแต่ละแบบได้ โดยให้ระยะห่างของสายอากาศกับแผ่นสะท้อนดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.4

#### 3.5.1 การจำลองการวางสายอากาศร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 ตัวองค์ประกอบ

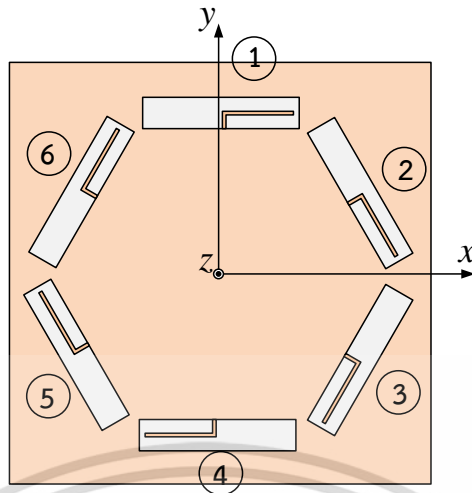


(ก) การวางสายอากาศร่วมกัน 2 องค์ประกอบ (ข) การวางสายอากาศร่วมกัน 3 องค์ประกอบ



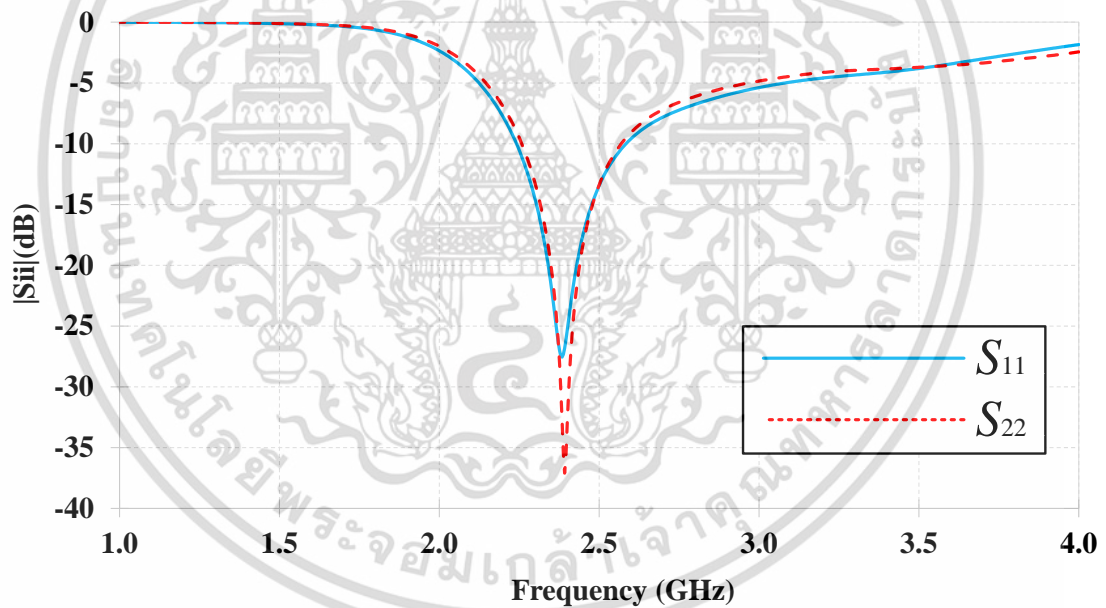
(ค) การวางสายอากาศร่วมกัน 4 องค์ประกอบ (ง) การวางสายอากาศร่วมกัน 5 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



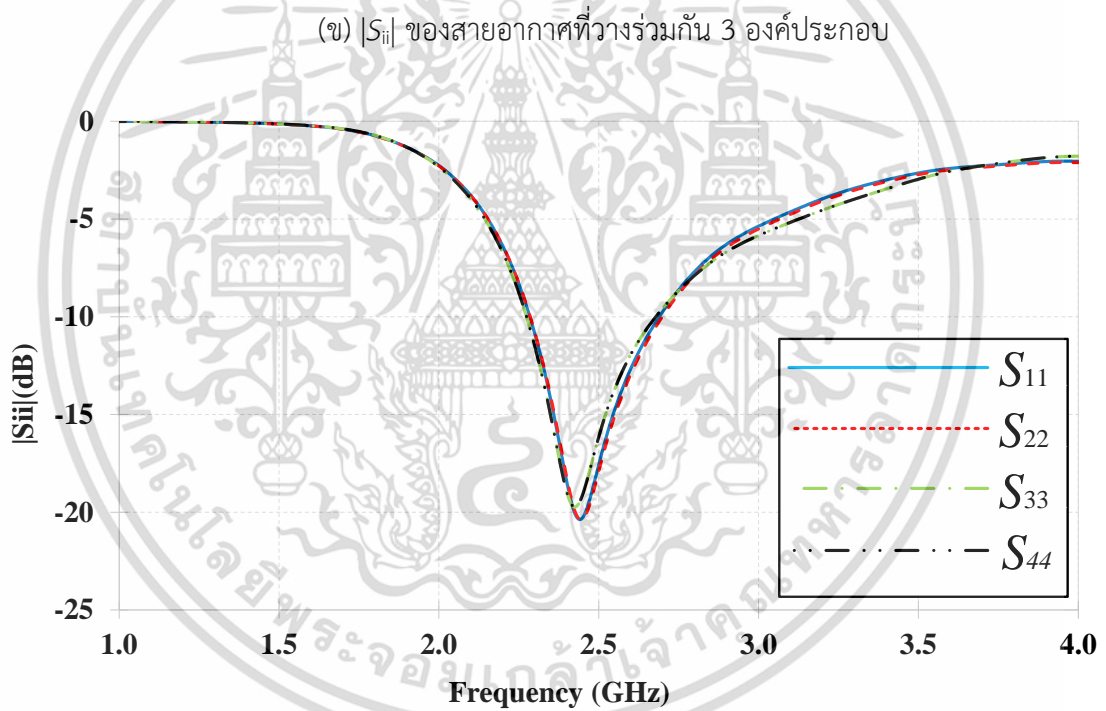
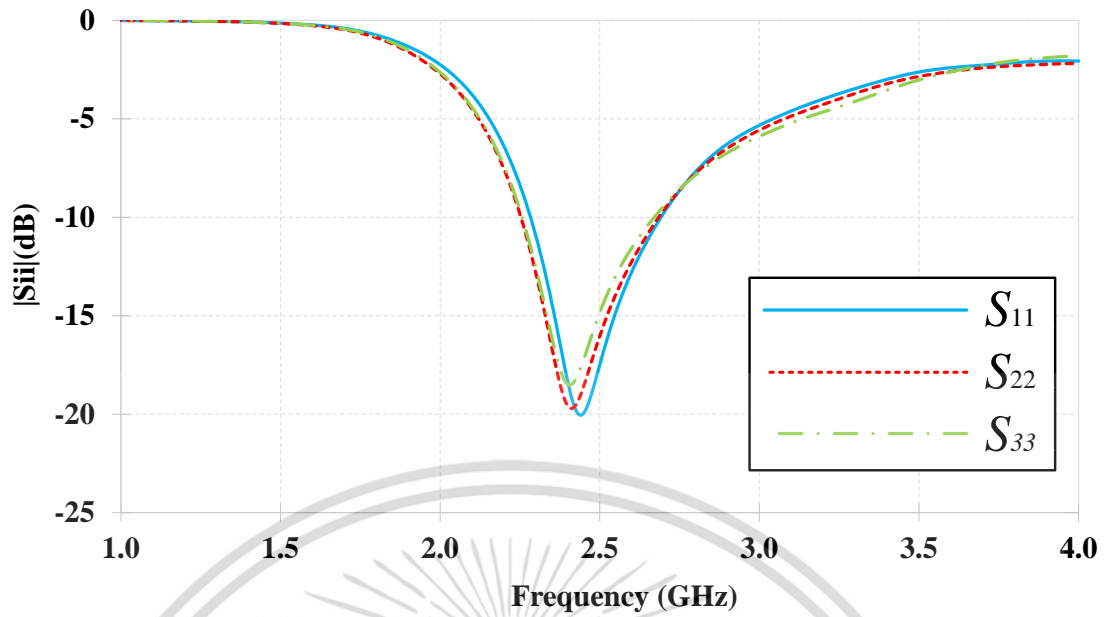
(จ) การวางสายอากาศร่วมกัน 6 องค์ประกอบ

รูปที่ 3.8 จำลองการวางสายอากาศร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

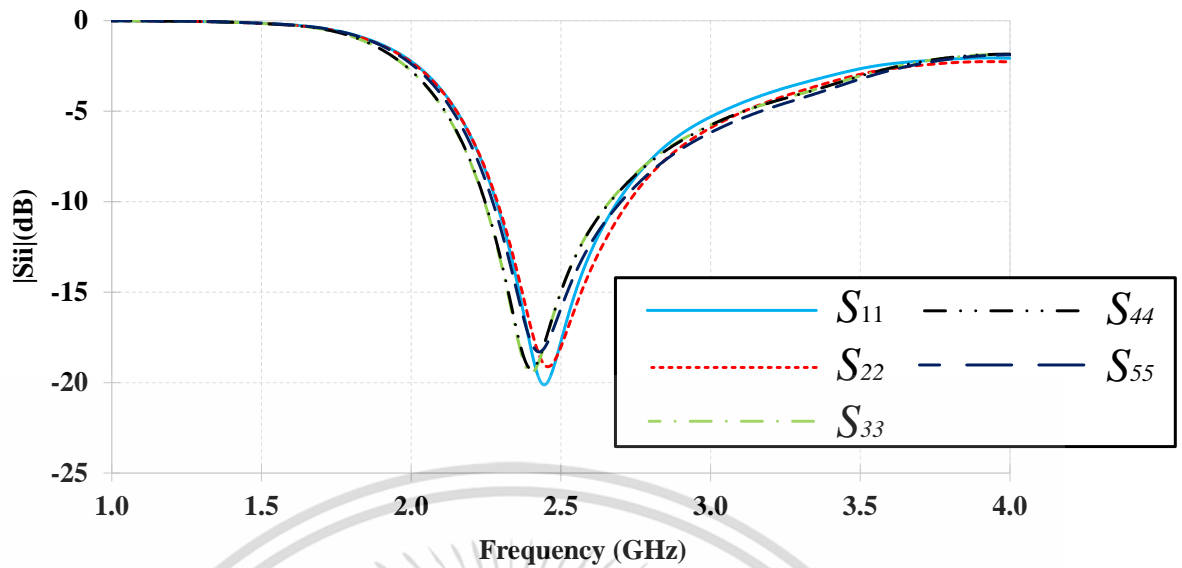
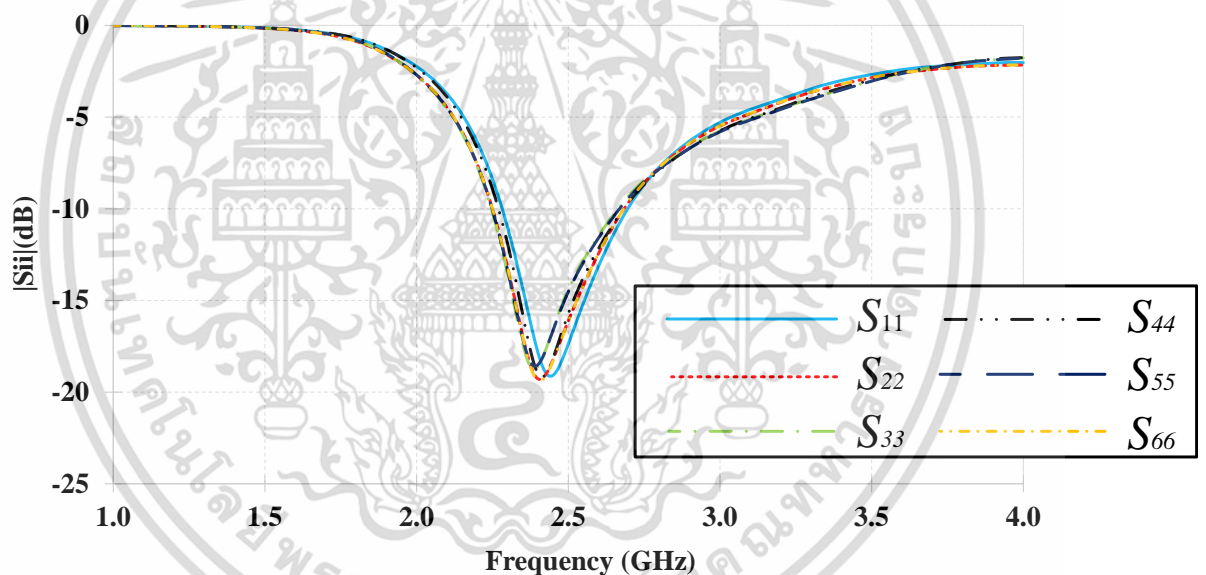


(ก)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่วางร่วมกัน 2 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

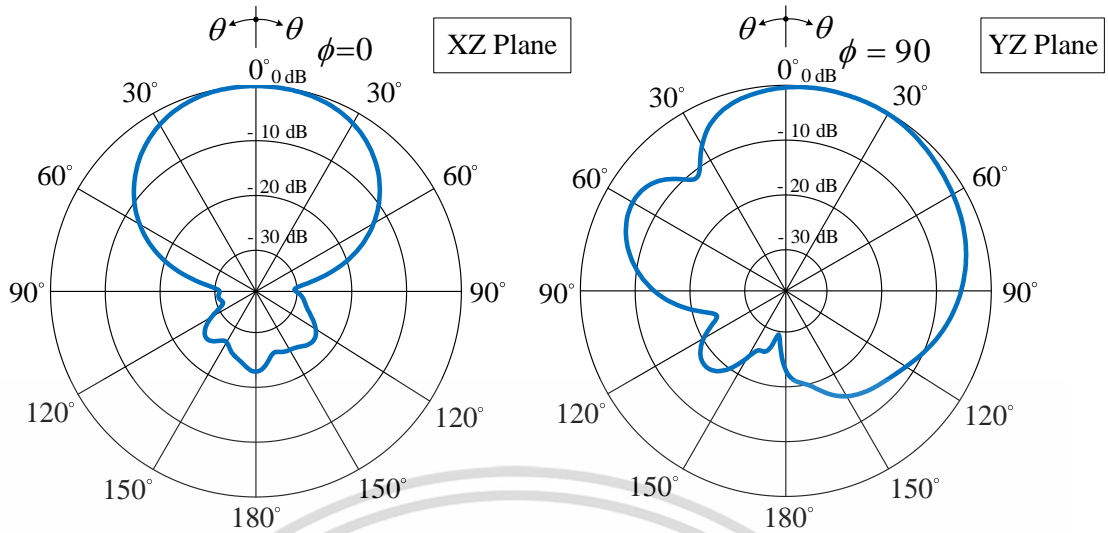


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

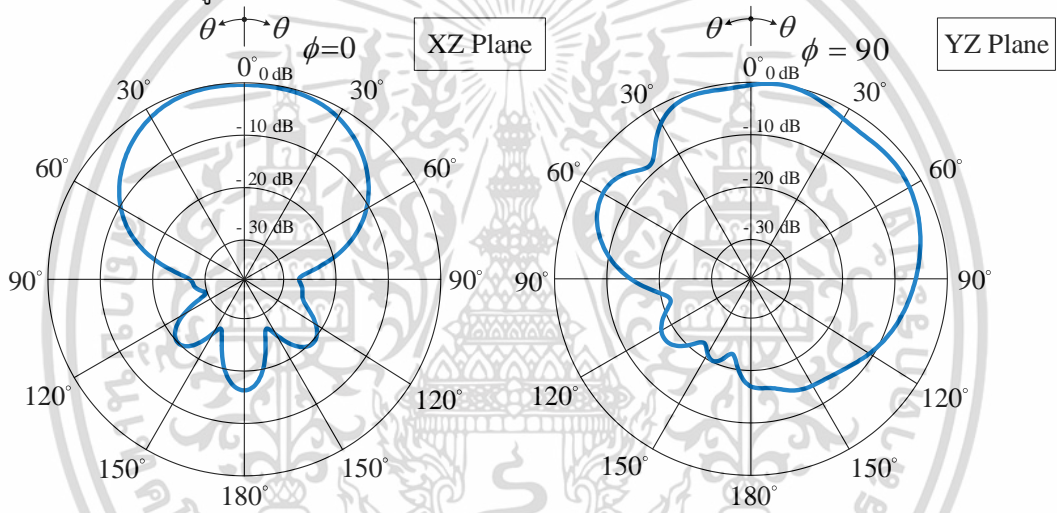
(ง)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่วางร่วมกัน 5 องค์ประกอบ(จ)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่วางร่วมกัน 6 องค์ประกอบรูปที่ 3.9 การจำลอง  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่วางร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

จากรูปที่ 3.9 เป็นการจำลอง  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่วางร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบ จะสังเกตได้ว่า  $|S_{ii}|$  ของแต่ละแบบคล้ายคลึงกัน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมี  $|S_{ii}|$  อยู่ที่ประมาณ -18 dB ถึง -20 dB และยังมีสายอากาศจำนวนหลายองค์ประกอบมากขึ้นก็จะเกิดการรบกวนกันมากขึ้นจึงต้องมีระยะห่างของสายอากาศที่เหมาะสม

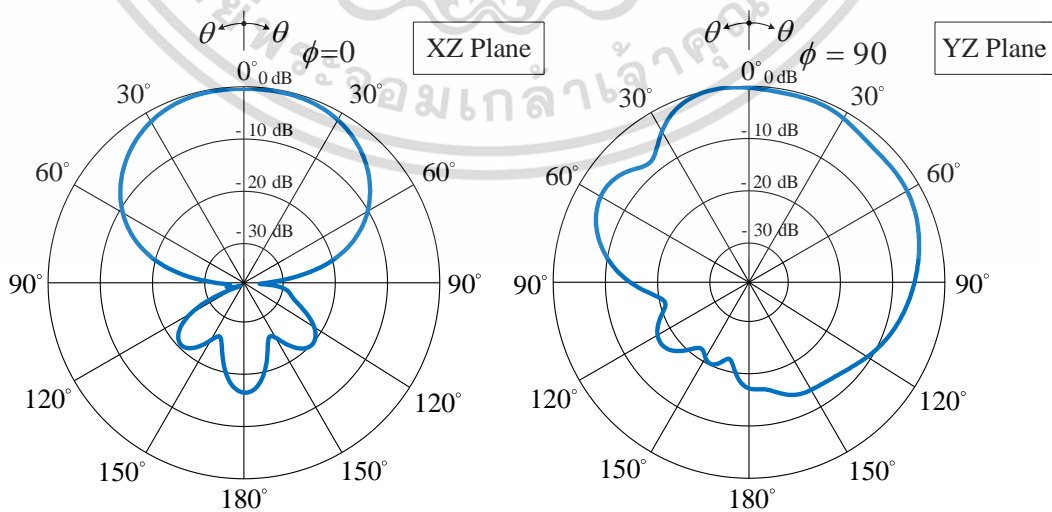
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศตัวที่ 1 ของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ

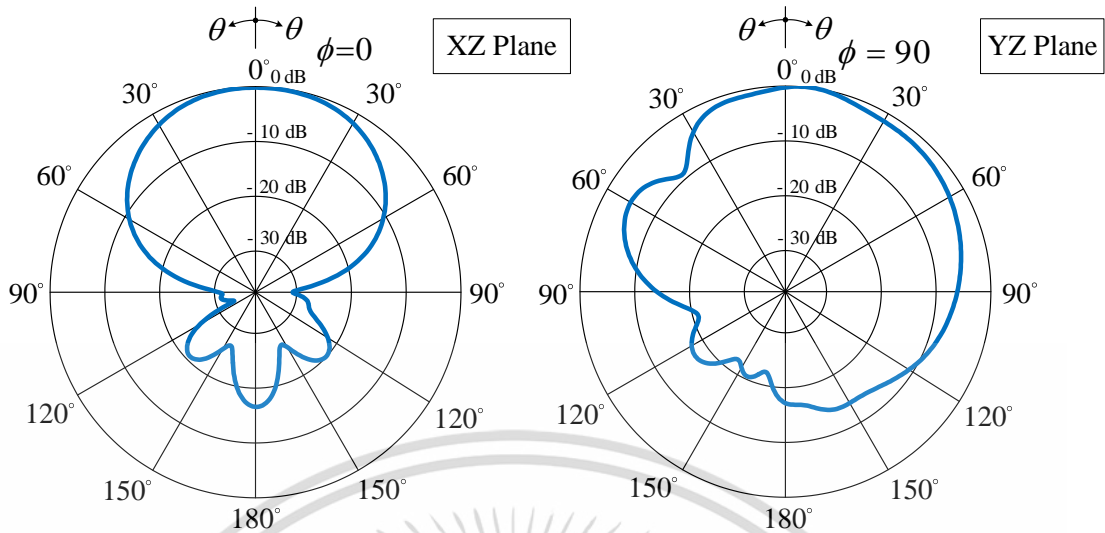


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศตัวที่ 1 ของสายอากาศแบบ 3 องค์ประกอบ

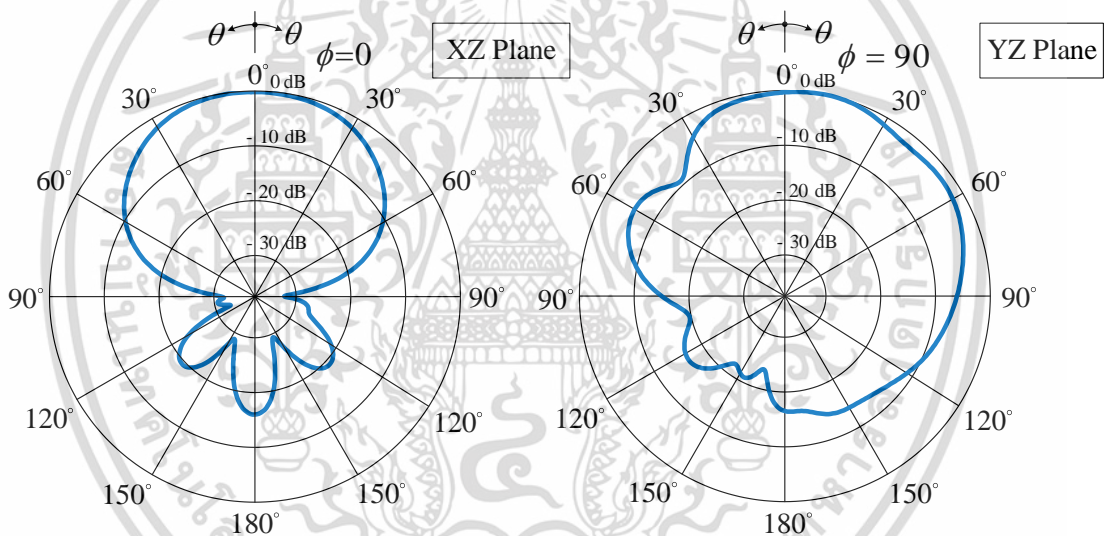


(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศตัวที่ 1 ของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศตัวที่ 1 ของสายอากาศแบบ 5 องค์ประกอบ

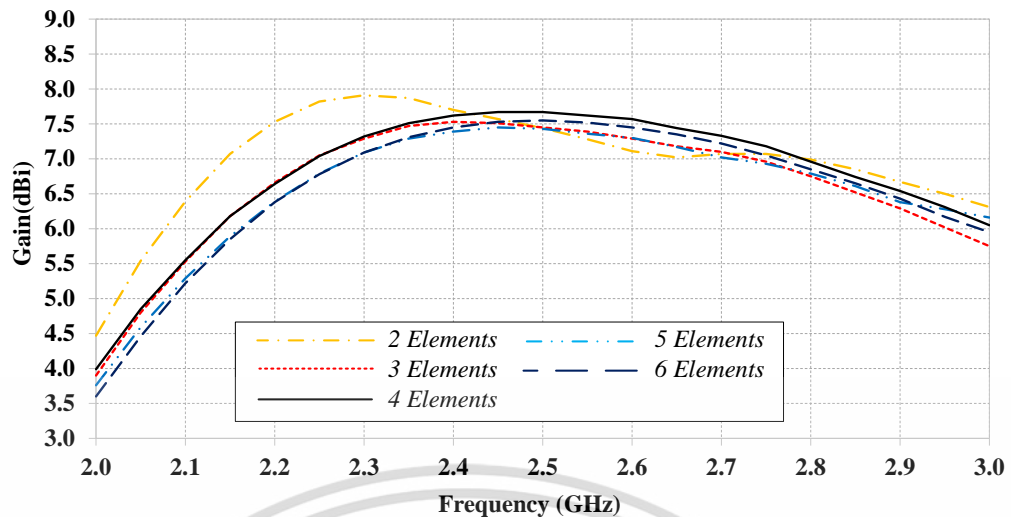


(จ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศตัวที่ 1 ของสายอากาศแบบ 6 องค์ประกอบ

**รูปที่ 3.10** ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

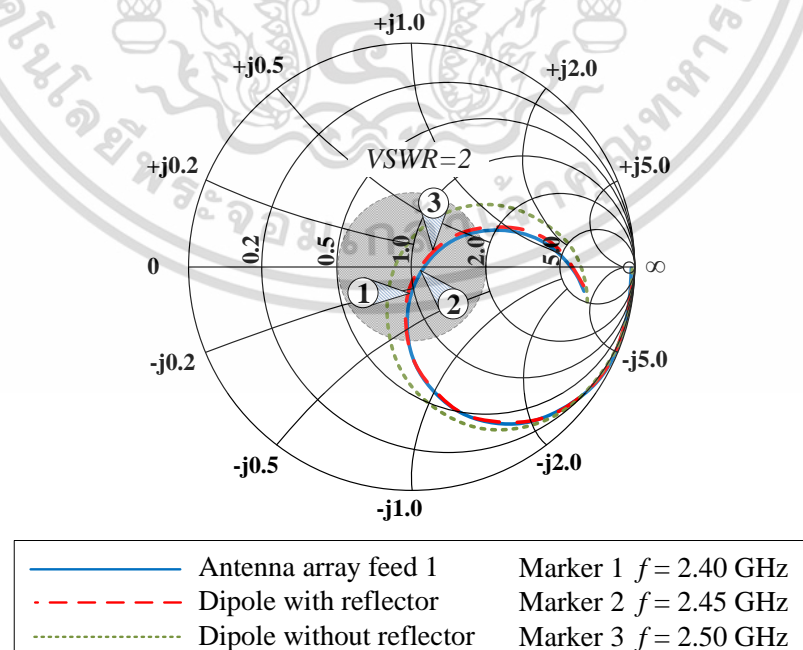
จากรูปที่ 3.10 เป็นผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางร่วมกันจำนวน 2 ถึง 6 องค์ประกอบ โดยจะทำการยกตัวอย่างเป็นสายอากาศตัวที่ 1 ทั้งหมด สามารถสังเกตได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละแบบมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละตัว ยกตัวอย่างเช่นการวางสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบร่วมกัน ซึ่งตำแหน่งของสายอากาศค่อนข้างห่างกันแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจึงคล้ายกับแบบหนึ่งองค์ประกอบ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแบบ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

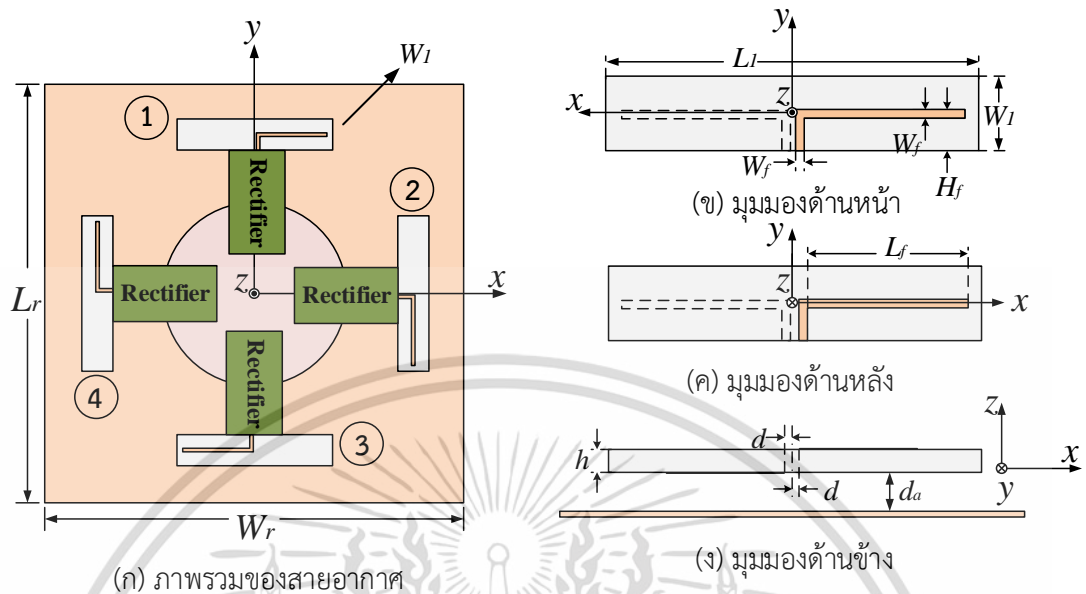
จากรูปที่ 3.11 คืออัตราขยายของสายอากาศแต่ละแบบเมื่อนำมาเทียบกัน สามารถสังเกตได้ว่าสายอากาศแต่ละแบบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน สายอากาศแต่ละแบบมีอัตราขยายค่อนข้างสูงคืออยู่ที่ประมาณ 6.5 dBi ถึง 7.5 dBi ทั้งนี้เนื่องจากสายอากาศแบบวางร่วมกัน 4 องค์ประกอบมีค่า  $|S_{ii}|$  ที่สอดคล้องกันคือมีการกวนกันระหว่างสายอากาศน้อยและอัตราขยายอยู่ในช่วงประมาณ 7.7 dBi ทางผู้จัดทำจึงเลือกสายอากาศแบบสี่องค์ประกอบรวมกันนี้มาปรับปรุงต่อไป และในรูปที่ 3.12 เป็นสมิทชาร์ตแสดงถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลทั้งที่มีแผ่นสะท้อน ไม่มีแผ่นสะท้อนและแบบการนำสายอากาศมาวางร่วมกันสี่องค์ประกอบ จากการจำลองสามารถสังเกตได้ว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละแบบมี VSWR น้อยกว่า 2 ตั้งแต่ความถี่ต้น 2.40 GHz ถึงความถี่ปลาย 2.50 GHz



รูปที่ 3.12 สมิทชาร์ตแสดงถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

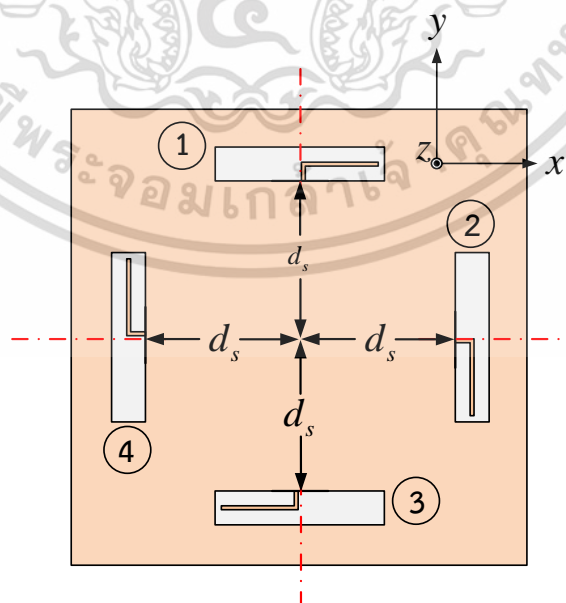
3.6 สายอากาศแบบวางรวมกันสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของสายอากาศเมื่อนำมาวางรวมกัน

3.6.1 การจำลองหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศ

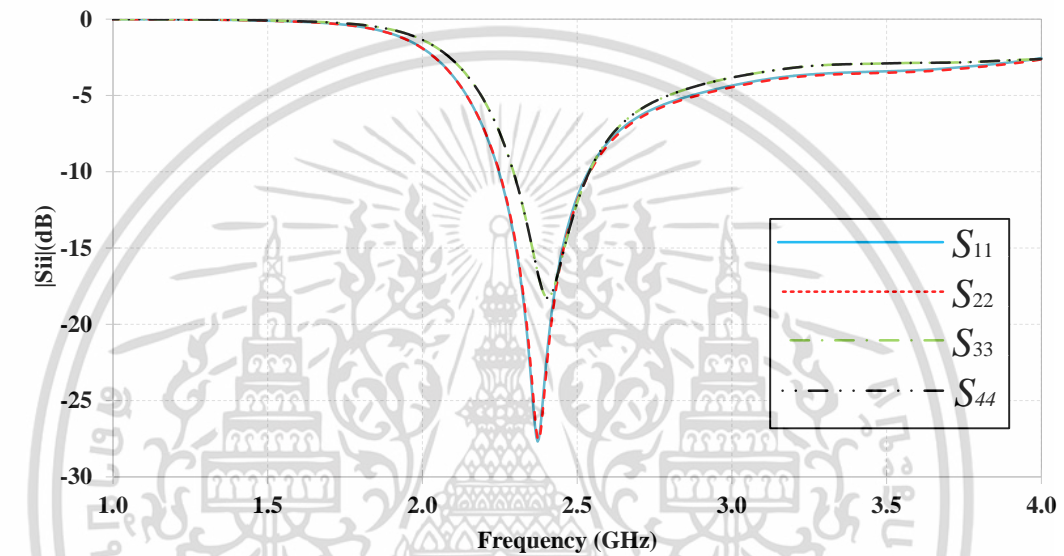
จากรูปที่ 3.13 หลังจากเมื่อนำสายอากาศทั้งสององค์ประกอบมาวางรวมกันแล้ว จะต้องหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับวางสายอากาศโดยให้มีความห่างกันโดยจะเริ่มให้อยู่ในช่วงหนึ่งความยาวคลื่นของความถี่ 2.45 GHz หรือ  $\lambda = 12.24$  cm หรือให้อยู่ที่ประมาณ 12cm จึงจะทำการหาระยะที่ 9cm 10cm 11cm 12cm และ 13cm เพื่อดูระยะที่เหมาะสมได้



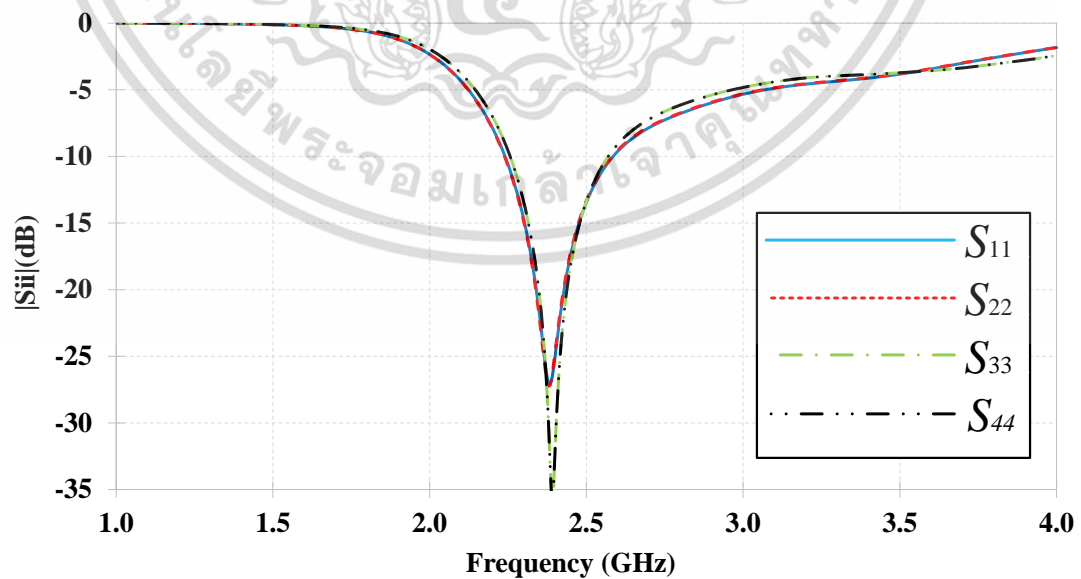
รูปที่ 3.14 การปรับระยะการวางของสายอากาศโดยเริ่มจากจุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 จะเป็นรูปการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศ ว่าสายอากาศ ไดโพลควรวางอยู่ตำแหน่งใด ควรมีความห่างจากกันเท่าใด ที่จะมีค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจาย คลื่น อัตรายาย และที่สำคัญสายอากาศแต่ละตัวทำงานไม่กวนกันเอง จึงจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสม ที่สุดในการวางสายอากาศ โดยจะให้ตัวแปรคือ  $d_s$  ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยค่า  $d_s$  นั้น เป็นค่าระยะที่นับจากกึ่งกลางของสายอากาศเรียงกระแสไปไปจนถึงสายอากาศไดโพลต้นแบบ

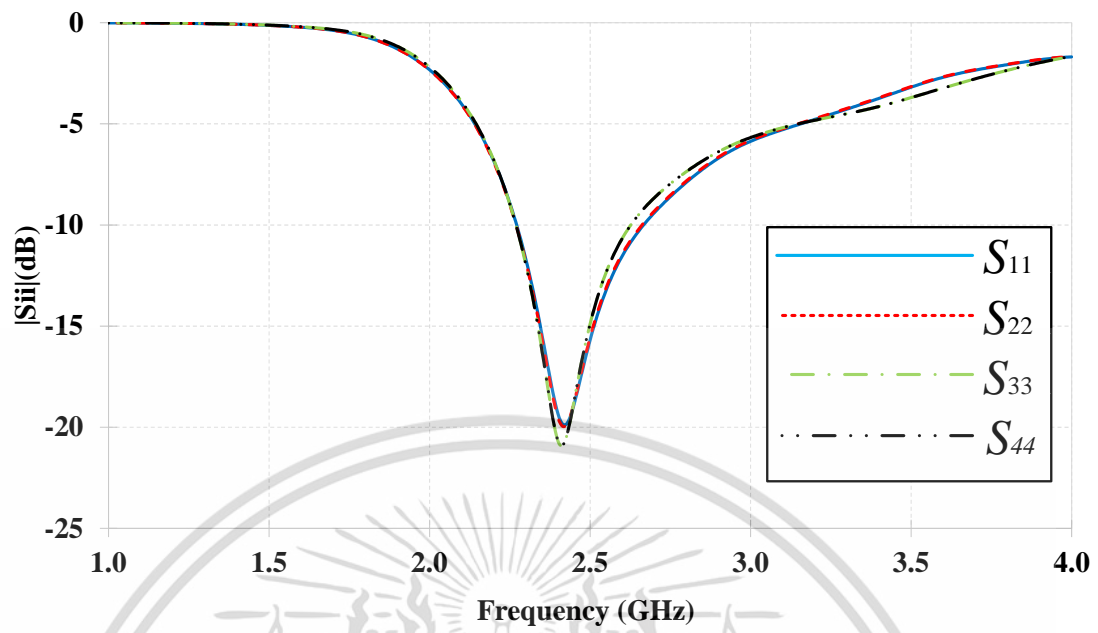


(ก)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  เท่ากับ 9cm

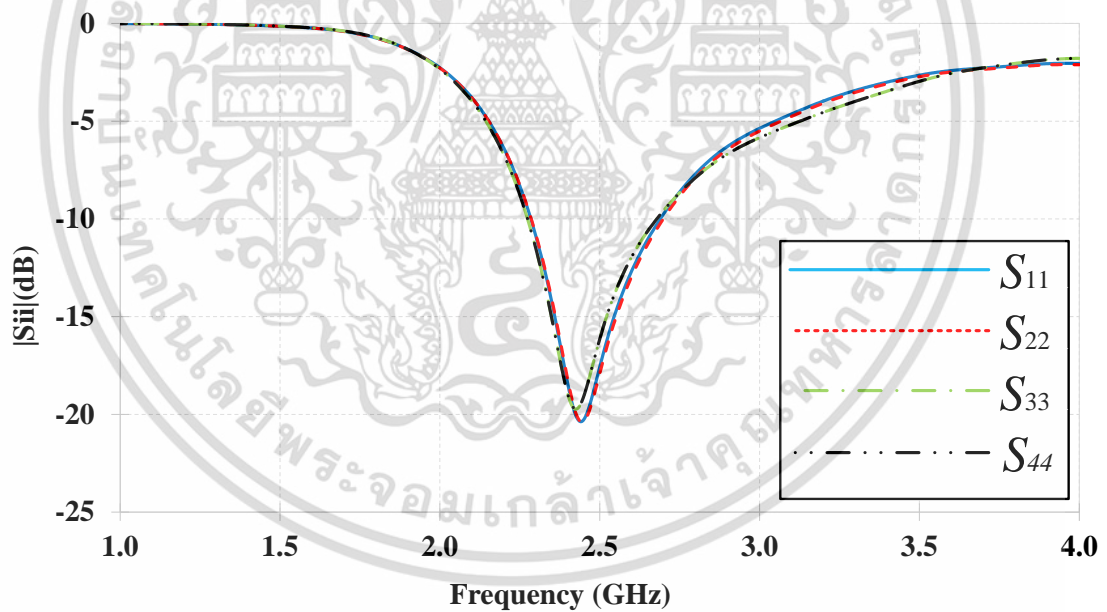


(ข)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  เท่ากับ 10cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

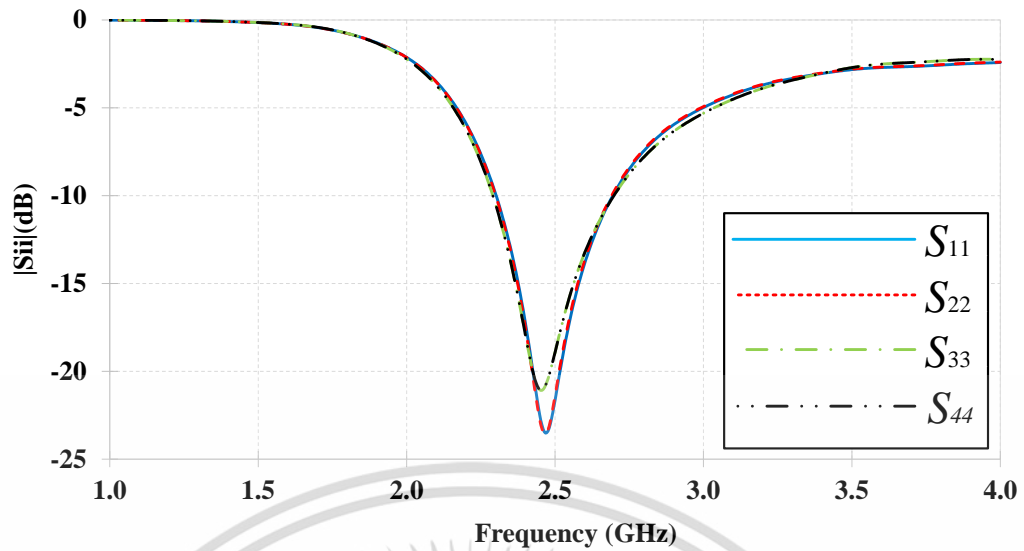


(ค)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  เท่ากับ 11cm



(ง)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  เท่ากับ 12cm

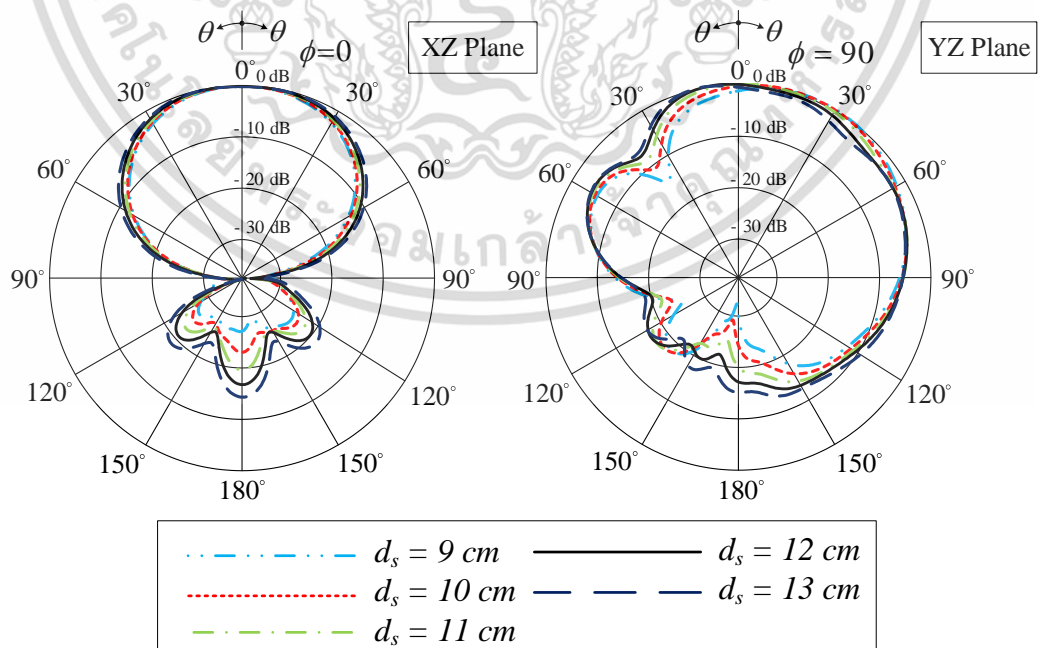
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  เท่ากับ 13 cm

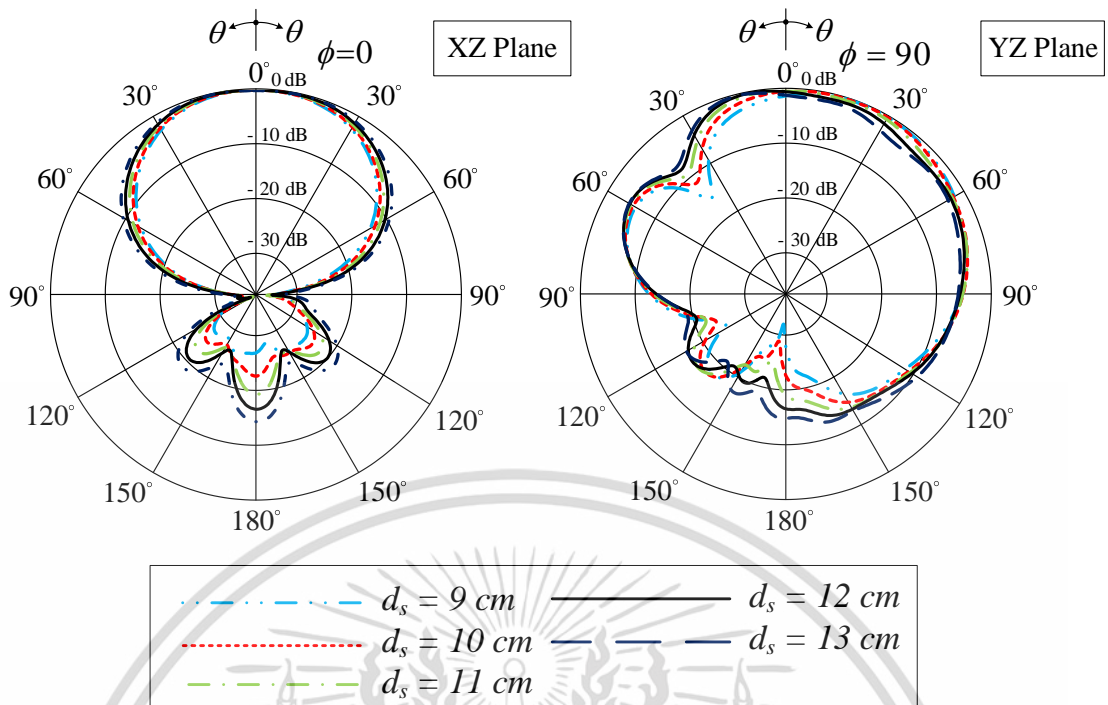
รูปที่ 3.15  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆตั้งแต่ 9 cm ถึง 13 cm ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.15 (ก) ถึง (จ) สังเกตได้ว่า  $|S_{ii}|$  ที่ระยะการวางสายอากาศ  $d_s$  9 cm และ 10 cm มีค่า  $|S_{ii}|$  ที่คลาดเคลื่อนไปจากความถี่กลางและมี  $|S_{ii}|$  ที่ต่างกัน เนื่องจากระยะการวางของสายอากาศที่ใกล้กันมากเกินไปทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณเกิดขึ้น จากนั้นที่ระยะ  $d_s$  11 cm และ 12 cm มีค่า  $|S_{ii}|$  ที่ค่อนข้างมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากสายอากาศแต่ละตัวมีการรบกวนกันน้อยซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่น  $\lambda = 12.24$  cm

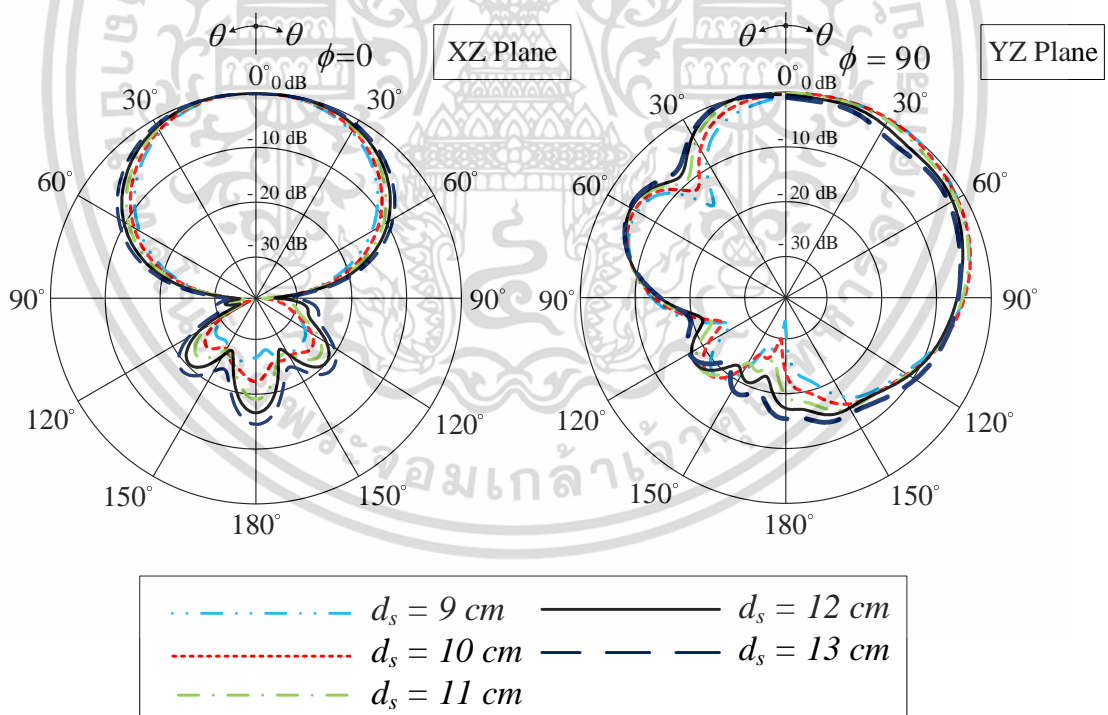


(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆในความถี่ 2.40 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆ ในความถี่กลาง 2.45 GHz

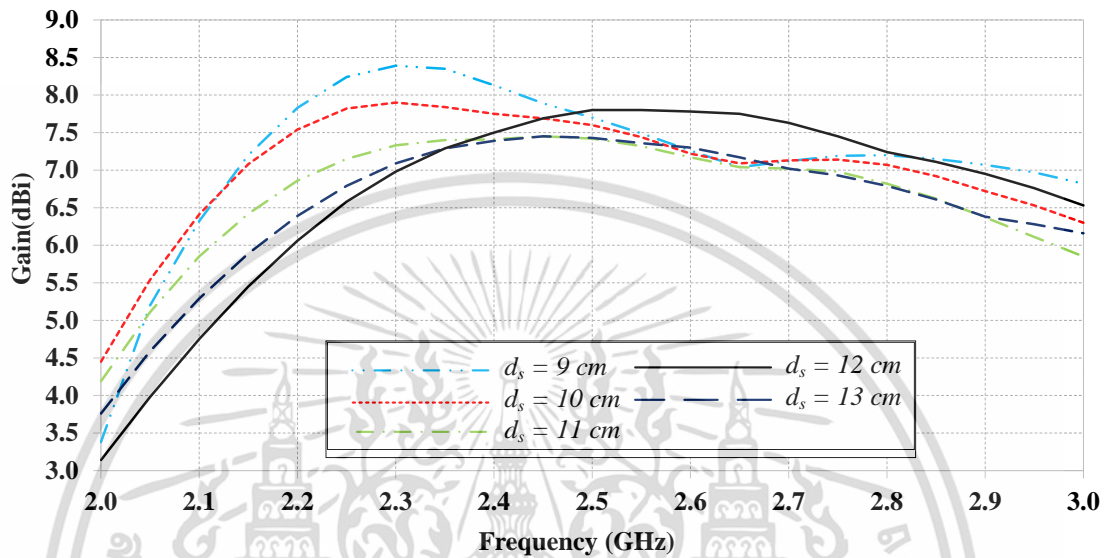


(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆ ในความถี่ปลาย 2.50 GHz

รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.16 เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่  $d_s$  ในระยะต่างๆ ตั้งแต่ความถี่ต้นที่ 2.40 GHz ความถี่กลางที่ 2.45 GHz และความถี่ปลายที่ 2.50 GHz โดยใช้สายอากาศตัวที่ 1 เป็นสายอากาศอ้างอิง สามารถสังเกตได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ในแต่ความถี่มีความคล้ายคลึงกัน แต่จะมีลำคลื่นที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยในแต่ละระยะ ส่งผลถึงอัตราขยายซึ่งจะนำเสนอต่อไป



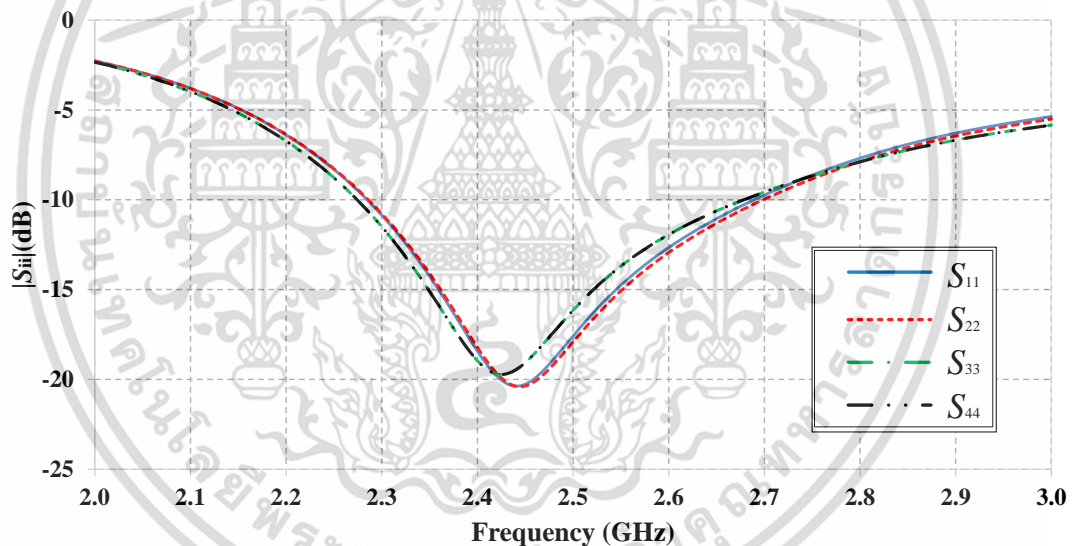
รูปที่ 3.17 อัตราขยายที่ระยะ  $d_s$  ต่างๆ

จากรูปที่ 3.17 เป็นการเปรียบเทียบอัตราขยายที่  $d_s$  ในระยะต่างๆ สามารถสังเกตได้ว่าอัตราขยายมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมีอัตราขยายสูงในย่านความถี่ใช้งานคือ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงได้เลือกระยะ  $d_s$  ที่ 12 cm เนื่องจากสอดคล้องกับระยะของความยาวคลื่น ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไดโพลต้นแบบแต่ละตัวมีความคล้ายคลึงกัน ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นแบบทิศทางเดียว มีแบนด์วิดธ์ในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 103.6 องศาและ 62.6 องศาตามลำดับ และมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 18.79 dB มีอัตราขยายที่ความถี่กลาง 2.45 GHz อยู่ที่ประมาณ 7.7 dBi

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศแกลวลำดับสี่องค์ประกอบเมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมจากการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ(mm)
$W_l$	13
$L_l$	65
$W_f$	1.5
$L_f$	20
$H_f$	5
$d$	0.63
$d_a$	37
$h$	1.5
$d_s$	120

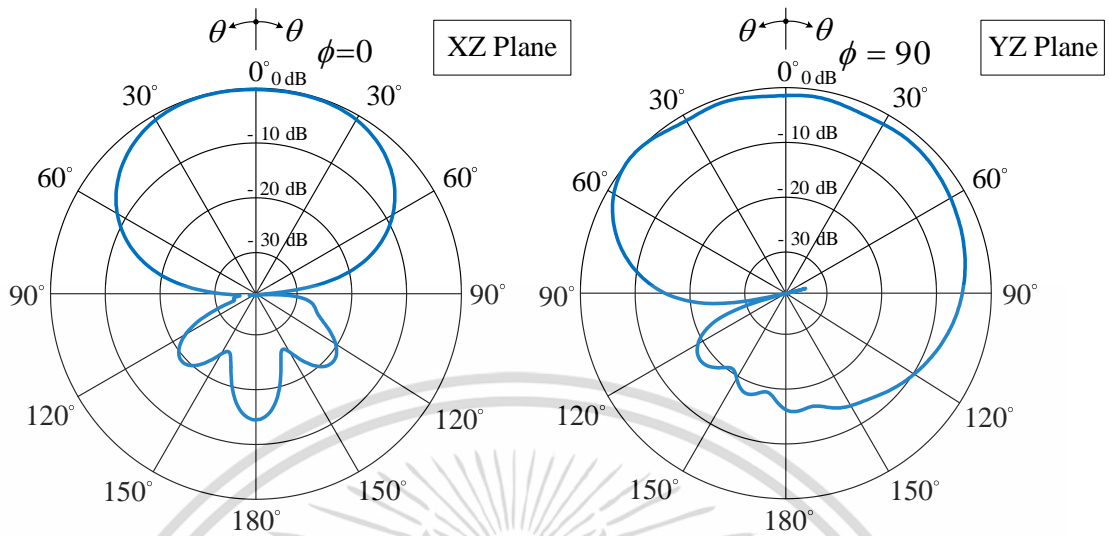
### 3.6.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศทั้งสี่องค์ประกอบ



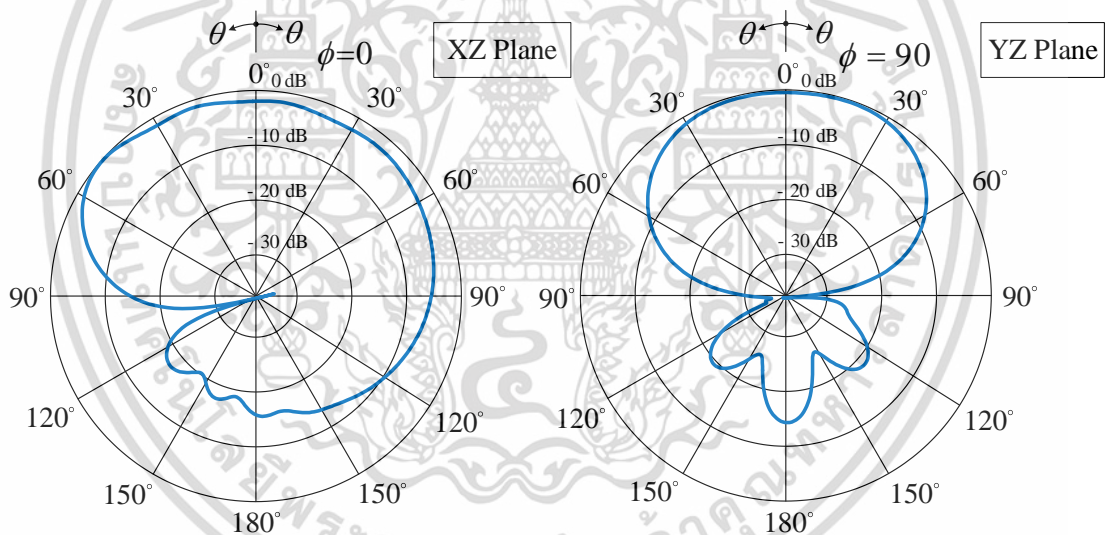
รูปที่ 3.18  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศทั้งสี่องค์ประกอบเมื่อนำมาวางร่วมกันเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 3.18 สายอากาศมีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.28 GHz ถึง 2.68 GHz โดย  $|S_{11}|$  ต่ำสุดประมาณ -20 dB อยู่ที่ความถี่ 2.44 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ คือ ตั้งแต่ 2.44 GHz ถึง 2.5 GHz และสายอากาศทั้งสี่องค์ประกอบไปในทิศทางเดียวกัน

### 3.6.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

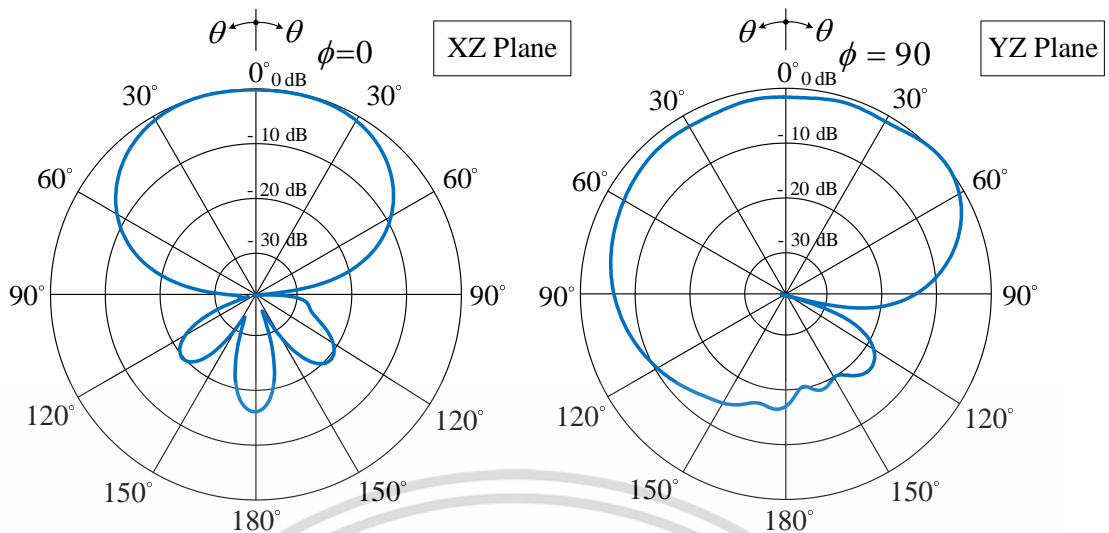


(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตัวที่ 1

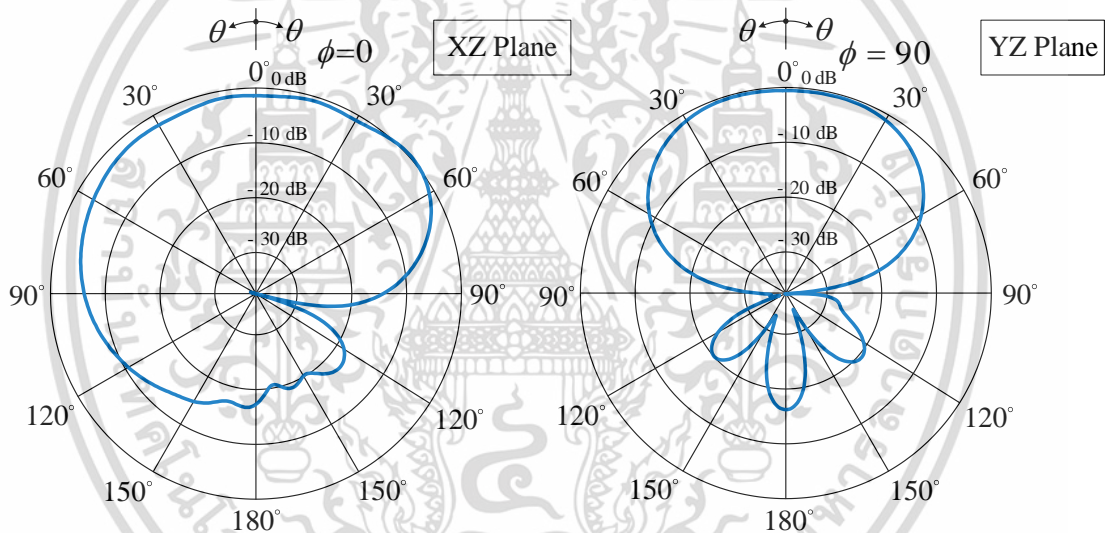


(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตัวที่ 3



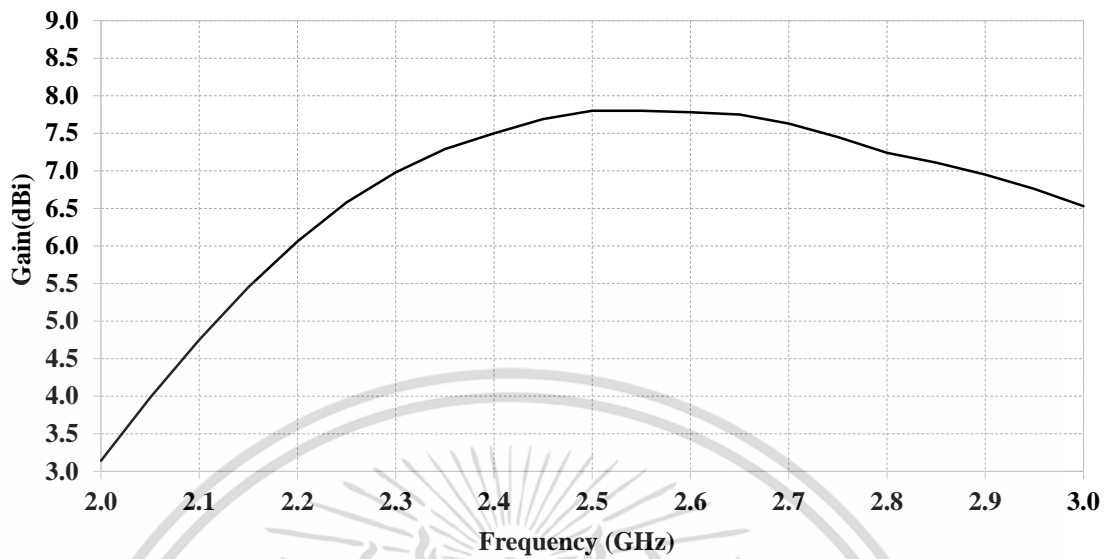
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลตัวที่ 4

รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 3.19 สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีแบนด์วิดธ์ในระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 2.45 ตัวที่ 1 ถึง 4 มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 73 องศาและ 87 องศาตามลำดับ และมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 18.79 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุดที่ความถี่ 2.4-2.6 GHz โดยประมาณเท่ากับ 7.7 dBi ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

### 3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองของสายอากาศ โดยได้เริ่มจากการคำนวณตามทฤษฎีเพื่อหาขนาดของสายอากาศเริ่มต้น และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้บนเทคโนโลยี WLAN ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการจำลองประกอบไปด้วย  $|S_{11}| \leq -10$  dB ในความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการจำลองสายอากาศไดโพลแบบตัวเดี่ยวก่อน พอได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วจึงนำเอาสายอากาศไดโพลต้นแบบมาลองวางเรียงกันตั้งแต่แบบที่มีสายอากาศไดโพลต้นแบบจำนวน 2 องค์ประกอบไปจนถึง 6 องค์ประกอบเพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยายของสายอากาศแต่ละแบบเพื่อทำการตัดสินใจในการเลือกใช้ ออกแบบสายอากาศต่อไปได้

จากนั้นได้เลือกสายอากาศแบบที่มีโครงสร้างที่ใช้สายอากาศไดโพลต้นแบบจำนวน 4 องค์ประกอบวางรวมกันโดยให้ตั้งฉากกันเพื่อที่จะเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณให้ได้มากที่สุด จากนั้นทำการหาตำแหน่งการวางสายอากาศ ไดโพลต้นแบบจากจุดศูนย์กลางเพื่อไม่ให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีการบดบังกันเกิดขึ้น โดยผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไดโพลสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 73 องศาและ 87 องศาตามลำดับ และยังมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 18.79 dB และโครงสร้างของสายอากาศเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีไดโพลอยู่ทั้งสี่ด้านเท่าๆกัน ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความสมมาตร ส่วนอัตราขยายของสายอากาศโดยมีอัตราขยายเป็น 7.7 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

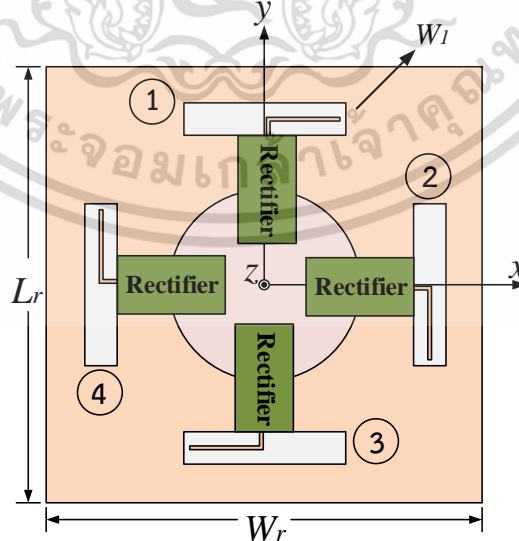
## บทที่ 4

# การออกแบบและจำลองวงจรเรียงกระแส

### 4.1 บทนำ

สายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยสายอากาศรวมเข้ากับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Antenna Integrated with Rectifying Circuit: Rectenna) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยสายอากาศดังกล่าวรับความหนาแน่นของกำลังงาน (Power Density) เข้ามายังวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและได้ทำการจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้กลายเป็นกระแสไฟฟ้าไฟตรง (DC Power) และนำกระแสไฟฟ้าตรงที่ได้นำไปขับเคลื่อนอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งาน

สำหรับสายอากาศจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนออยู่นี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้บนระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ที่ทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านที่ได้รับความนิยม เนื่องจากย่านความถี่ดังกล่าวมีการลดทอนของสัญญาณต่ำและอุปกรณ์ที่ใช้ในย่านความถี่นี้มีราคาถูกหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและปัจจุบันมีการใช้งานระบบโครงข่ายนี้เป็นจำนวนมาก อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ (Transceiver Devices) ในระบบโครงข่ายไร้สายเรียกว่า อุปกรณ์เข้าถึงจุดสัญญาณ (Access Point : AP) การใช้งานโดยทั่วไปของอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกเปิดใช้งานตลอดเวลาหรือมีสถานะพร้อมใช้งานตลอดเวลา การดักเอากำลังงานที่ถูกปล่อยจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณจาก AP โดยจะนำกำลังงานที่ไม่ได้ถูกใช้งาน ซึ่งเป็นการสูญเสียกำลังงานโดยไร้ประโยชน์ การนำกำลังงานที่ถูกส่งจากเครื่อง AP มาทำให้เกิดประโยชน์ได้หลายลักษณะ อาทิเช่น เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) ให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เป็นแหล่งสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply : UPS) ขนาดเล็กหรือเป็นแบตเตอรี่ไร้สาย (Wireless Battery) เป็นต้น



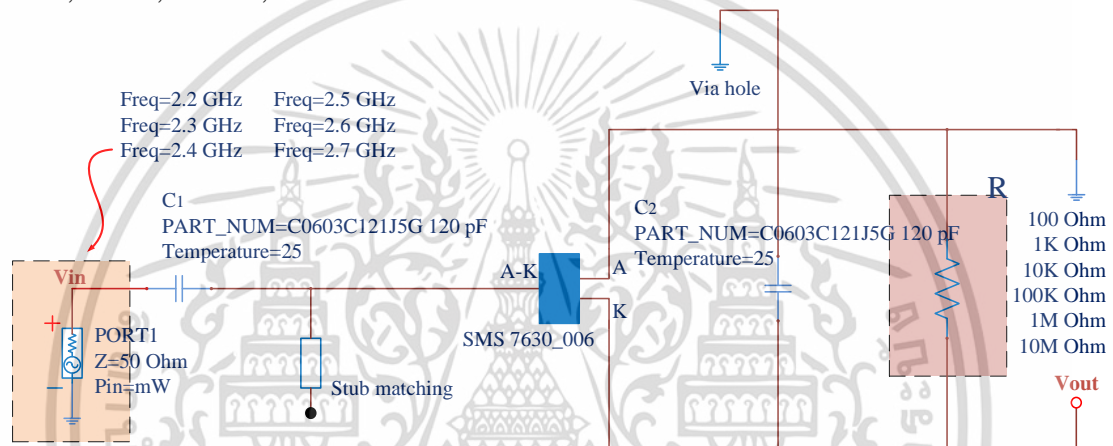
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเรียงกระแสมีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณคือ ไดโอด กล่าวคือโดยพื้นฐานทั่วไปวงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ(Coupling Capacitor) วงจรแมตชิงแบบสตับ (Stub Matching) ไดโอดช็อคกี้ (Schottky Diode) ตัวกรองสัญญาณเก็บประจุ (Capacitor Filter) และตัวต้านทาน (Resistor) ดังรูปที่ 4.2

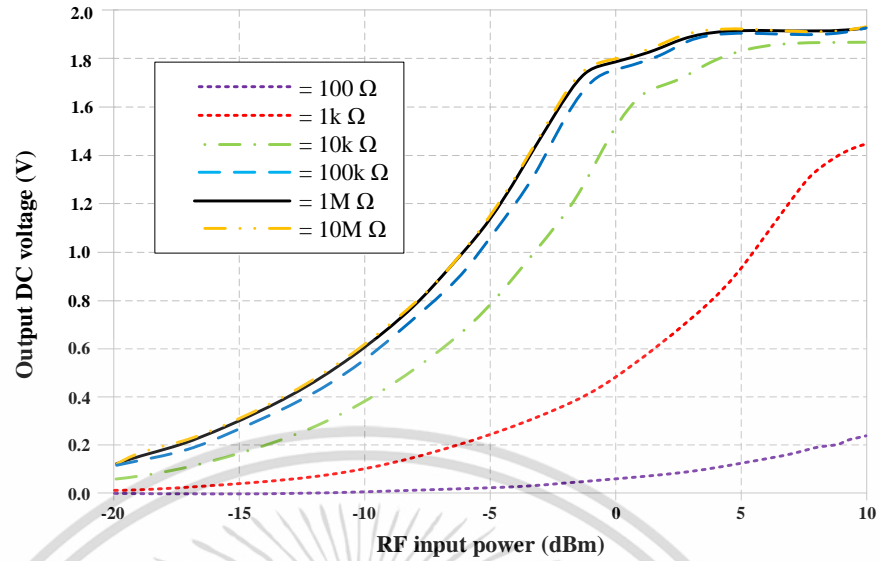
#### 4.2 จำลองค่าความต้านทาน (Resistor) และการตอบสนองต่อความถี่

ทำการจำลองค่าความต้านทาน (Resistor) ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าว่าค่าความต้านทานเท่าไรจึงจะเหมาะสมกับวงจรเรียงกระแสที่ดีที่สุดได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานตั้งแต่ 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  และ 10 M $\Omega$



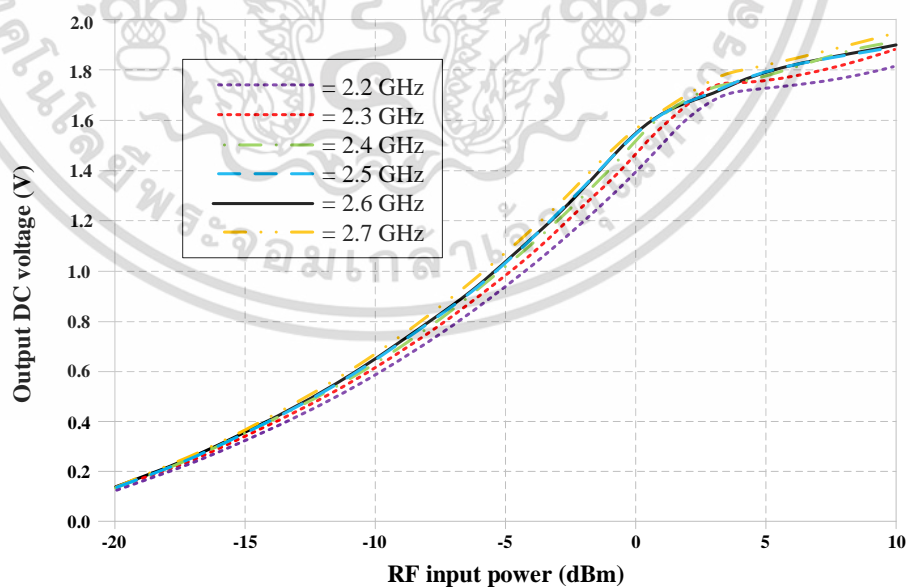
รูปที่ 4.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองปรับค่าความต้านและความถี่

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการจำลองปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานและความถี่เพื่อดูผลกระทบที่มีต่อวงจรเรียงกระแสตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองค่าความต้านทานของวงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 4.3 คือผลจำลองความต้านทานของวงจรเรียงกระแสโดยได้ทำการปรับค่าความต้านทานตั้งแต่  $100 \Omega$   $1 \text{ k}\Omega$   $10 \text{ k}\Omega$   $100 \text{ k}\Omega$   $1 \text{ M}\Omega$  และ  $10 \text{ M}\Omega$  พบว่าค่าความต้านทาน  $1 \text{ M}\Omega$  และ  $10 \text{ M}\Omega$  ให้กระแสไฟตรงมากที่สุด โดยได้ทำการป้อนกำลังงานด้านขาเข้าตั้งแต่  $-20 \text{ dBm}$  ถึง  $10 \text{ dBm}$  แต่เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานมากกว่า  $10 \text{ M}\Omega$  วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าจะเกิดปรากฏการณ์ในสภาวะอิมิตัวเกิดขึ้น

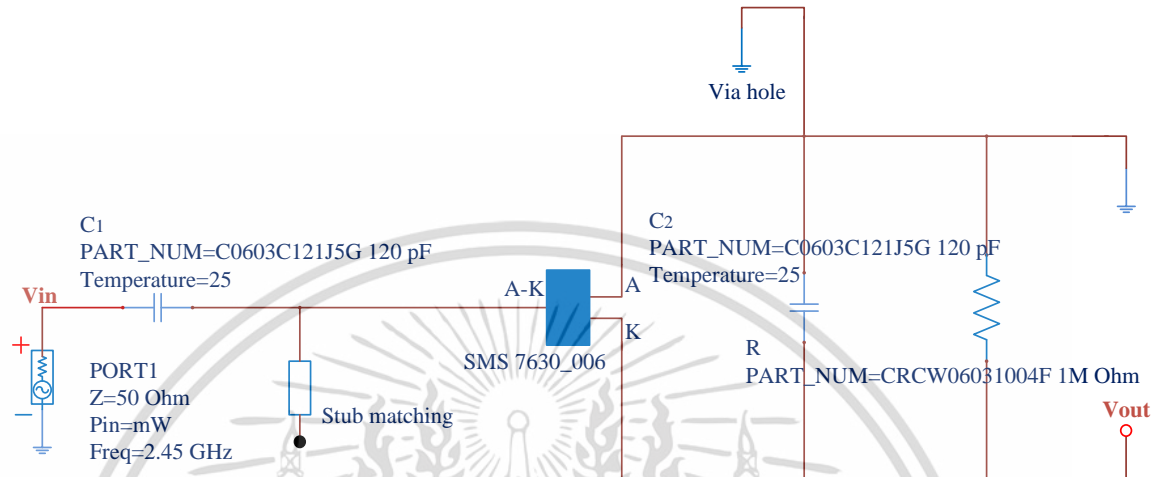


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสเมื่อปรับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 กำหนดให้ความต้านทานมีค่าเท่ากับ  $1\text{ M}\Omega$  ปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 2.2 GHz ถึง 2.7 GHz และป้อนกำลังงานตั้งแต่ -20 dBm ถึง 10 dBm พบว่า ด้านออกของวงจรให้กระแสตรงมากที่สุดและครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 2.400 GHz ถึง 2.484 GHz

### 4.3 แบบวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น



รูปที่ 4.5 แบบวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น

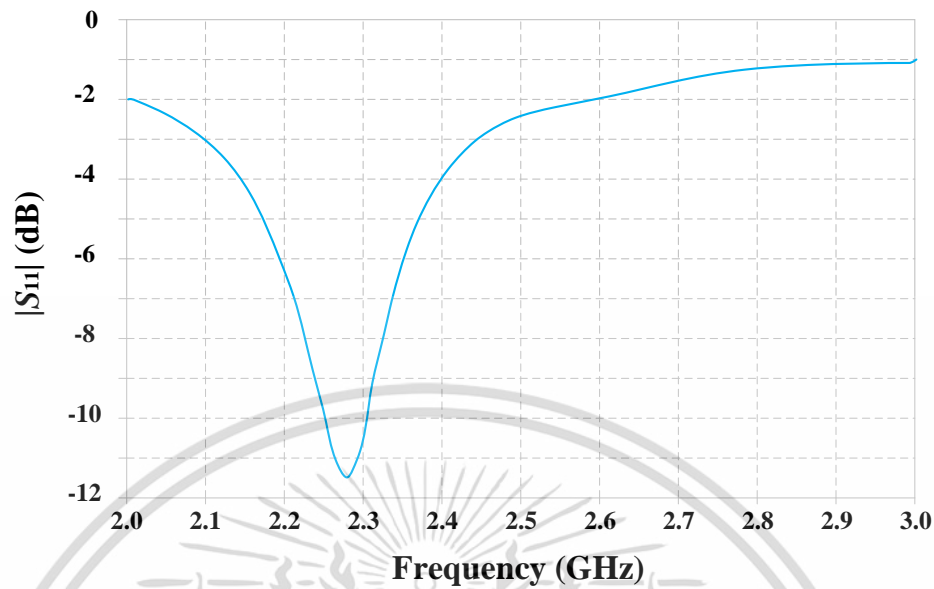
จากวงจรเริ่มต้นนี้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) [27] ในการจำลองผล โดยให้ค่าสัญญาณทางขาเข้าของวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสเช่น ไดโอด ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

จากรูปที่ 3.12 แสดงวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น โดยกำหนดค่าของอุปกรณ์ต่างๆและพารามิเตอร์ไว้ในตารางที่ 3.5 ให้ความยาวของแมตซ์ซิ่งสตัปมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ  $\lambda/4$

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
$C_1$	120 pF
$C_2$	120 pF
Diode	SMS7630-006
Resistor	1M $\Omega$
Stub matching	14.75 mm

### 4.3.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้น



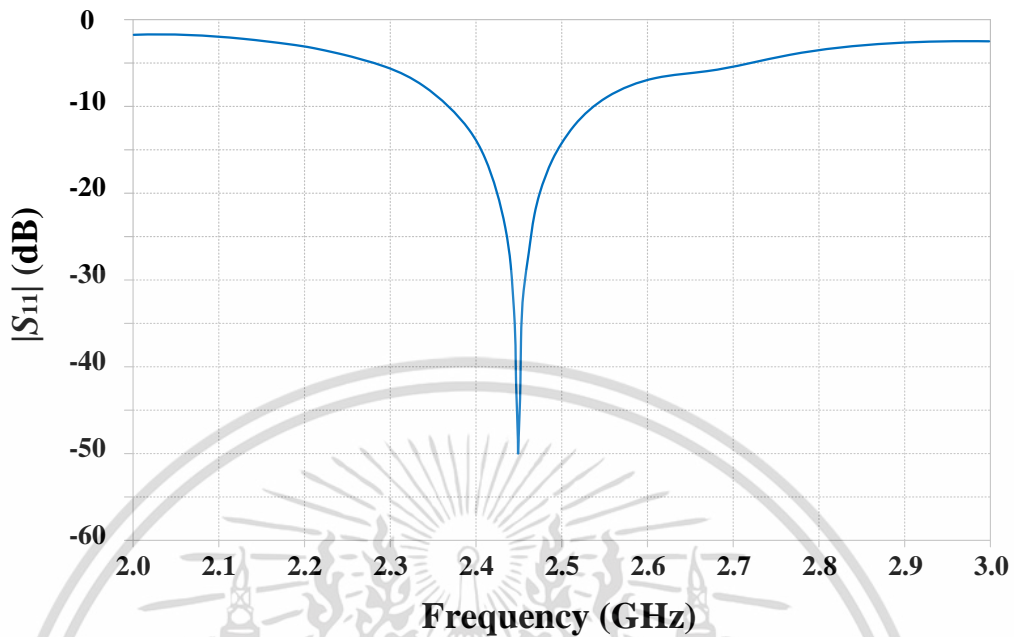
รูปที่ 4.6  $|S_{11}|$  ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้นก่อนการปรับสตัป

เมื่อจำลองวงจรเรียงกระแสเริ่มต้นดังรูปที่ 4.5 และมีขนาดของพารามิเตอร์เท่ากับในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ในรูปที่ 4.6 นั้นแสดงให้เห็นว่าความถี่ยังเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.28 GHz ซึ่งยังไม่ตรงกับความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการปรับแม่ตซึ่งสตัปเพื่อให้มีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้เรโซแนนซ์ในความถี่ที่ต้องการ และมีอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) ที่ 50  $\Omega$  เพื่อที่จะนำไปต่อกับสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ ที่ 50  $\Omega$  เช่นกัน เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังงานสูงสุดได้โดยให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสให้มีค่าของแม่ตซึ่งสตัปที่เหมาะสม

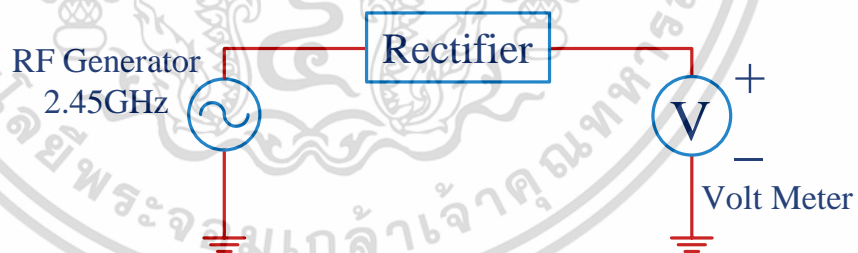
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
$C_1$	120 pF
$C_2$	120 pF
Diode	SMS7630-006
Resistor	1M $\Omega$
Stub matching	10.86 mm

### 4.3.2 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของวงจรเรียงกระแสเมื่อมีค่าแมตซ์ิ่งสลับที่เหมาะสม



รูปที่ 4.7  $|S_{11}|$  ของวงจรเรียงกระแสเริ่มต้นหลังการปรับสลับ

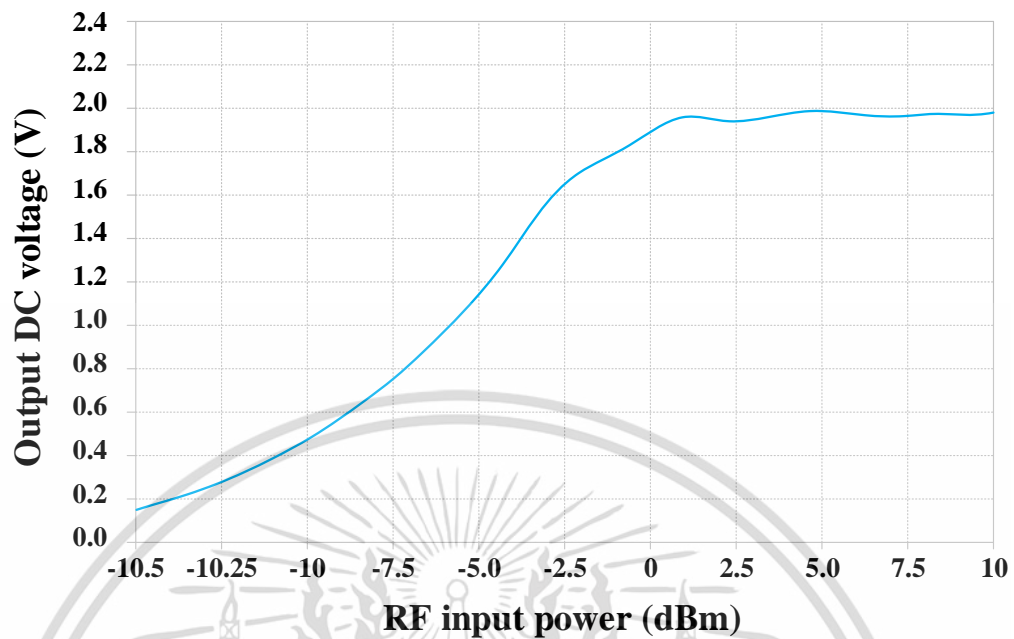
จากรูปที่ 4.7 วงจรเรียงกระแสมีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.36 ถึง 2.53 GHz โดย  $|S_{11}|$  ต่ำสุดเท่ากับ -50 dB อยู่ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ คือ ตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz



รูปที่ 4.8 การต่อการจำลองเพื่อทดสอบวงจรเรียงกระแส

จากรูปที่ 4.8 เป็นผังการต่อการจำลองเพื่อทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสโดยใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) เพื่อเปรียบเทียบกับความถี่ที่ป้อนทางด้านขาเข้า

### 4.3.3 ผลการจำลองค่าแรงดันที่ขาออกของวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองค่าแรงดันที่ขาออกของวงจรเรียงกระแส

### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาการจำลองวงจรเรียงกระแสในความถี่ย่าน WLAN โดยใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) ในการจำลองป้อนและรับสัญญาณเข้ามาในวงจร จากนั้นได้ทำการแปลงออกมาเป็นแรงดันทางด้านขาออกได้ โดยได้ศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับค่าความต้านทาน (Resistor) ว่ามีผลกระทบอย่างไรกับแรงดันทางด้านขาออกบ้าง โดยได้ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทานตั้งแต่  $100\ \Omega$   $1\ \text{k}\Omega$   $10\ \text{k}\Omega$   $100\ \text{k}\Omega$   $1\ \text{M}\Omega$  และ  $10\ \text{M}\Omega$  พบว่าค่าความต้านทาน  $1\ \text{M}\Omega$  และ  $10\ \text{M}\Omega$  ให้กระแสไฟตรงมากที่สุด โดยได้ทำการป้อนกำลังงานด้านขาเข้าตั้งแต่  $-20\ \text{dBm}$  ถึง  $10\ \text{dBm}$  แต่เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานมากกว่า  $10\ \text{M}\Omega$  วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าจะเกิดปรากฏการณ์ในสภาวะอิมิตัวเกิดขึ้นดังนั้นจึงได้เลือกค่าความต้านทานที่  $1\ \text{M}\Omega$  จากนั้นได้ศึกษาผลกระทบของวงจรในแต่ละความถี่ตั้งแต่ความถี่  $2.2\ \text{GHz}$  ถึง  $2.7\ \text{GHz}$  และป้อนกำลังงานตั้งแต่  $-20\ \text{dBm}$  ถึง  $10\ \text{dBm}$  พบว่า ด้านออกของวงจรให้กระแสตรงมากที่สุดและครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้ทำงานคือ  $2.40\ \text{GHz}$  ถึง  $2.484\ \text{GHz}$  ซึ่งการศึกษาที่กล่าวมานี้สามารถดูได้ในผลข้างต้นได้

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแกลลุ่มสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz และวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  อัตราขยายของสายอากาศ และแรงดันทางด้านขาออกของวงจรเรียงกระแส ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างสายอากาศสำหรับนำมาทดสอบ ได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้นำผลจากการศึกษาพารามิเตอร์นั้นมาสร้างเป็นสายอากาศ และวงจรเรียงกระแสต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศแกลลุ่มสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz เพื่อยืนยันความถูกต้องจากการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ WLAN โดยสายอากาศชนิดนี้ถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 (ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3) ของ Taconic ที่มีความหนา 1.6 mm ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมาตรฐานและใช้คอนเนคเตอร์ชนิด SMA ต่อร่วมกับสายนำสัญญาณ โดยโครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศต้นแบบได้กล่าวไว้ในตารางที่ 3.4



รูปที่ 5.1 รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

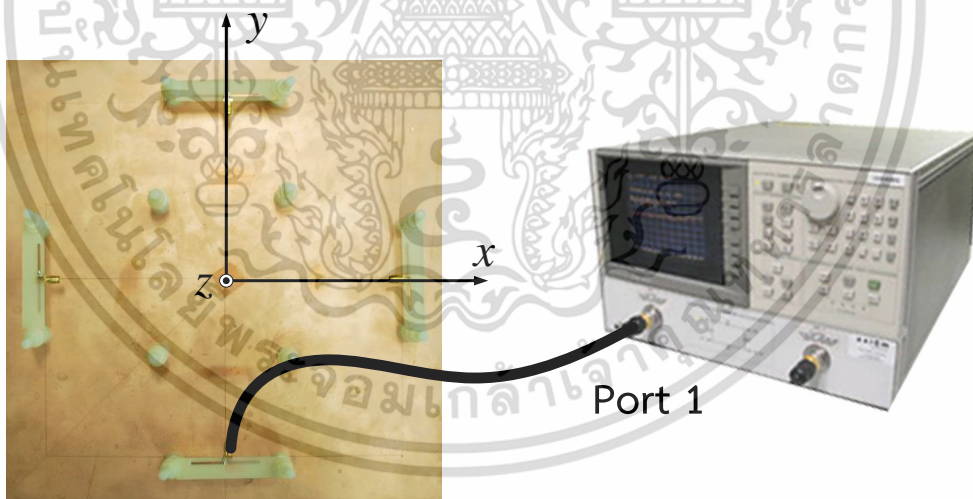
### 5.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบสายอากาศ

การทดสอบถึงคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อทดสอบสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz มีดังนี้

- ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Microwave anechoic chamber)
- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น HP-8720C
- สายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$

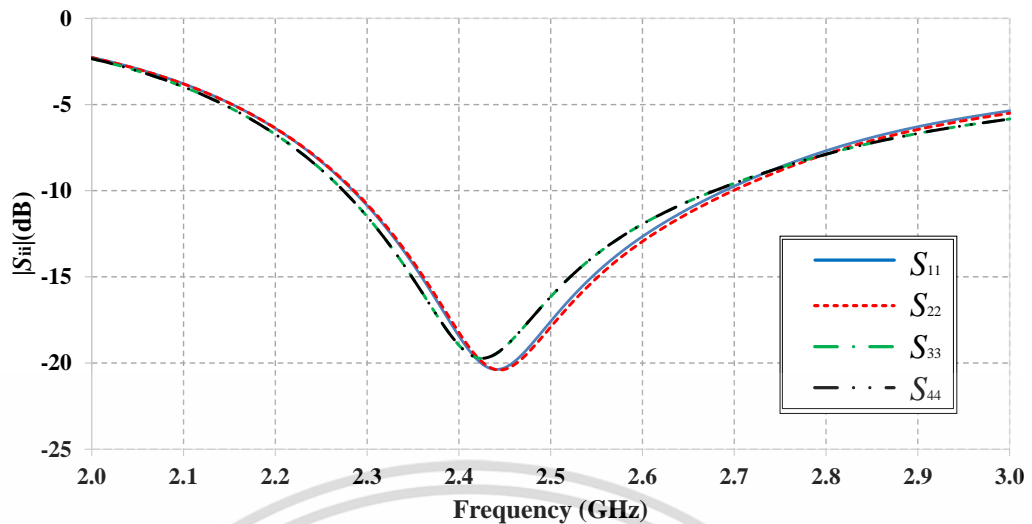
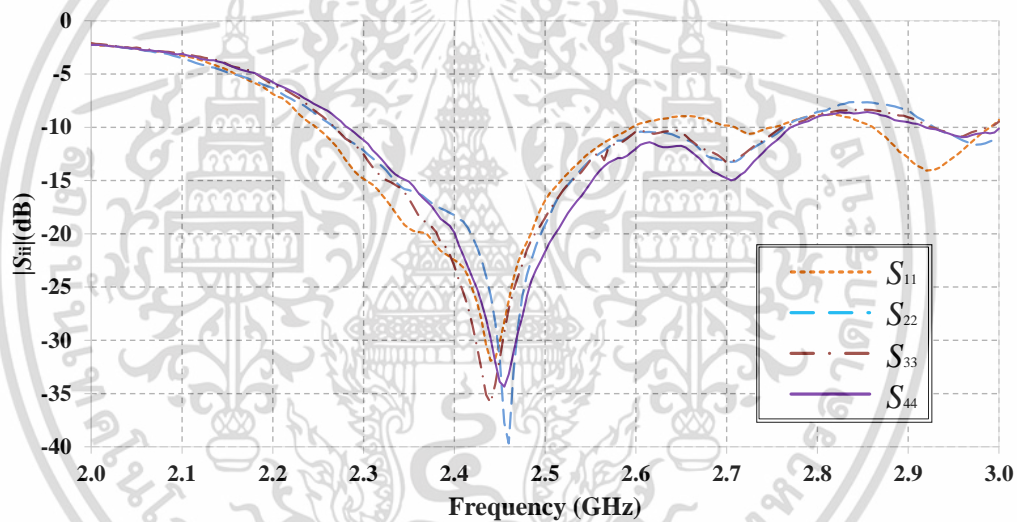
#### 5.3.1 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{11}|$

การทดสอบคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  ทำได้โดยนำสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายเชื่อมต่อเข้ากับสายนำสัญญาณและพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายตามลำดับ โดยก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศเพื่อที่จะทดสอบนั้น การปรับเทียบให้กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายถือเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยการปรับเทียบจะอยู่ที่ปลายของสายนำสัญญาณเพื่อลดการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณที่อาจจะส่งผลกระทบต่อ  $|S_{11}|$  โดยการทดสอบ  $|S_{11}|$  จะมีวิธีการติดตั้งสายอากาศร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยสายนำสัญญาณจะมีการเชื่อมต่อกับสายอากาศไดโพลแต่ละตัวทั้งสี่ตัวเพื่อดูแนวโน้ม และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การทดสอบคุณลักษณะ  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง(ข)  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  $|S_{ii}|$  ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 5.3 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{11}| \leq -10$  dB มีช่วงความถี่ที่ตั้งแต่ 2.27 GHz ถึง 2.60 GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 13.5% โดย  $|S_{11}|$  ต่ำสุดที่ความถี่ 2.46 GHz เท่ากับ 37 dB ซึ่งผล  $|S_{11}|$  จากการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับผลจากการจำลอง

### 5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบได้จะเป็นของสายอากาศภาครับ และใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสายอากาศภาคส่ง เนื่องจากสายอากาศไดโพลมาตรฐานมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซที่แน่นอนใน จึงเหมาะสมกว่าที่จะใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบ เนื่องจากยังไม่ทราบถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซ โดยการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับสำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างมากพอที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะคงที่ หรือเรียกระยะดังกล่าวนี้ว่าระยะสนามระยะไกล (Far-field :  $R$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 [17]

$$\text{จาก} \quad D_r + D_t = D$$

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (5.1)$$

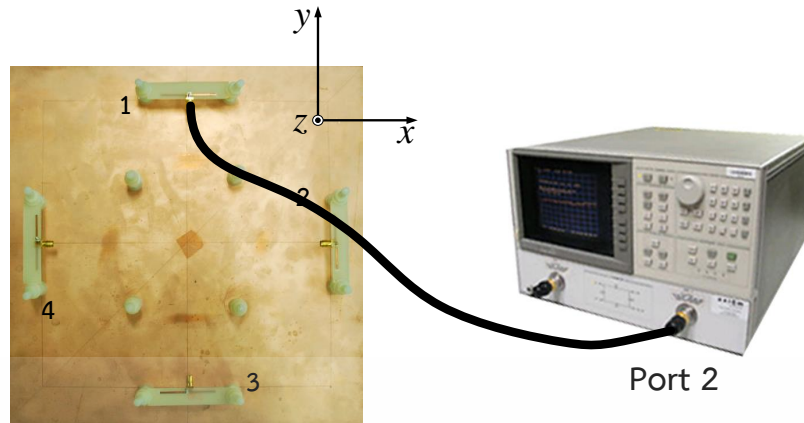
โดยที่  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ  
 $D$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ  
 $D_r$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านรับ  
 $D_t$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่ง

ที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 12.24 cm และมีขนาดของสายอากาศด้านรับเท่ากับ 7 cm มีขนาดของสายอากาศด้านส่งเท่ากับ 6.5 cm นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 5.1 ได้

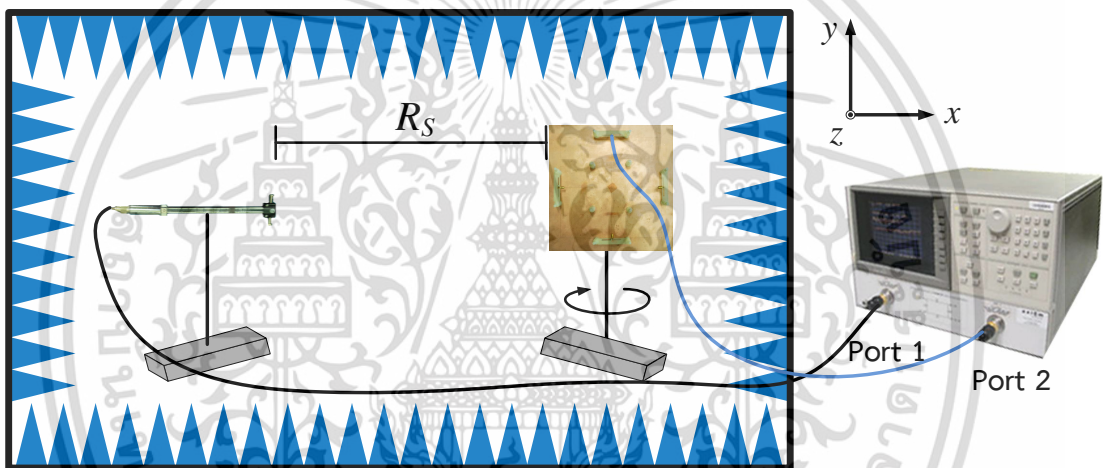
$$R \geq \frac{2(49.5)^2}{0.122} = 29.77 \text{ cm}$$

โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจะทดสอบในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นห้องที่มีสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงช่องว่างอิสระ (Free space) มากที่สุด ทางสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายนี้จะทำการทดสอบสายอากาศไดโพลตัวที่ 1 เป็นตัวอ้างอิงสายอากาศไดโพลทั้งหมด โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ดังรูปที่ 5.4 โดยการติดตั้งสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องทำการเชื่อมต่อกับสายอากาศภาคส่งเข้าที่พอร์ต 1 และเชื่อมต่อกับสายอากาศภาครับเข้าที่พอร์ต 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซร่วมในระนาบ xz และในกรณีการทดสอบแบบโพลาริซไขว้จะเปลี่ยนการติดตั้งของสายอากาศส่งให้วางในแนวตั้ง และรูปที่ 5.6 จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซร่วมในระนาบ yz และในกรณีการทดสอบแบบโพลาริซไขว้จะเปลี่ยนการติดตั้งของสายอากาศส่งให้วางในแนวนอน ซึ่งการวางแกนในการทดสอบสายอากาศสามารถอ้างอิงได้จากรูปที่ 5.1 โดยผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7

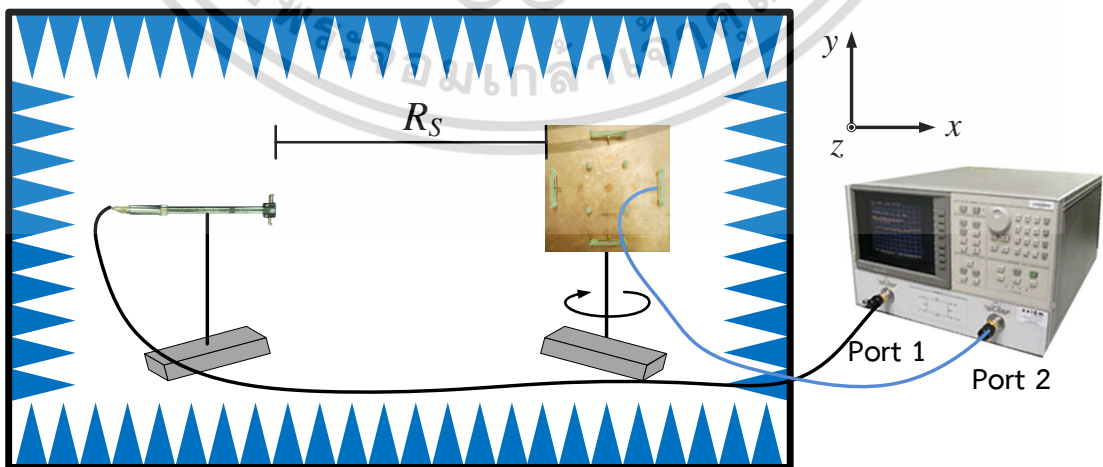
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้สายอากาศตัวที่ 1 เป็นตัวอ้างอิง

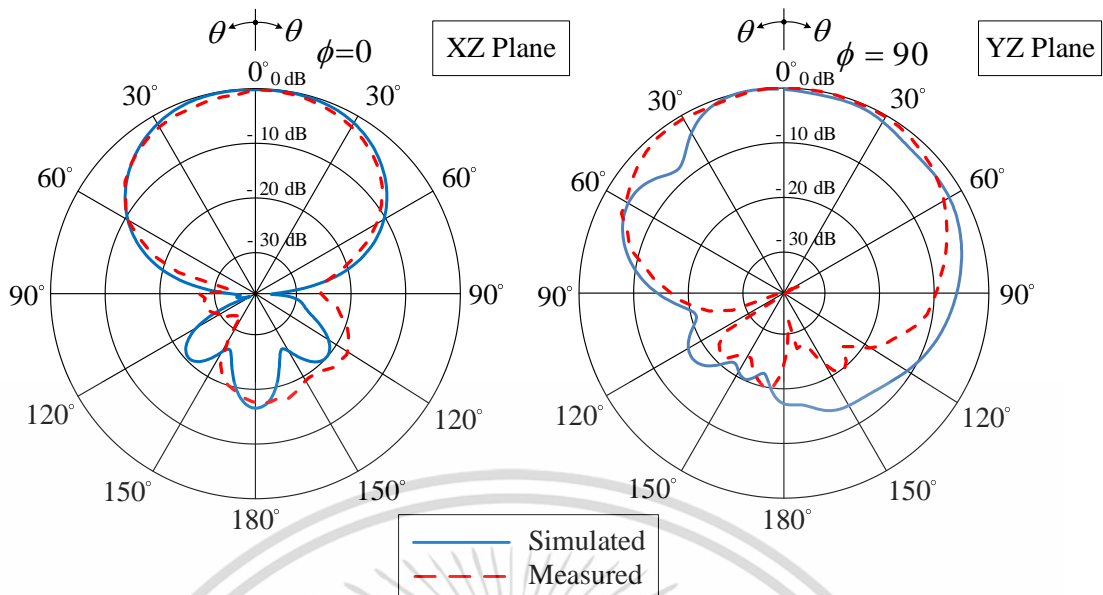


รูปที่ 5.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz



รูปที่ 5.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบ เทียบกับผลจากการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 5.7 พบว่าในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  ผลจากการทดสอบและผลจากการจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และพบว่าในระนาบ  $xz$  และ  $yz$  มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 73 องศาและ 83 องศาตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 17.7 dB มีค่าที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการจำลองและจากการทดสอบในแต่ละแนวแกน ซึ่งได้วิเคราะห์ถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในผลการทดสอบเนื่องจากอาจมีการเชื่อมต่อระหว่างสายนำสัญญาณและคอนเนคเตอร์ ซึ่งอยู่ด้านหลังของสายอากาศภาครับ โดยขณะที่สายอากาศมีการหมุน สายนำสัญญาณที่เชื่อมต่ออยู่ที่ด้านหลังจะเกิดการหมุนตามไปด้วยดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 และ รูปที่ 5.6 ซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณร่วมกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง และการส่งสัญญาณที่มาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะต้องผ่านสายนำสัญญาณที่มีความยาวมาสู่สายอากาศ และมีการเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณอยู่มาก จึงเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้สัญญาณที่มาจากภาครับและภาคส่งเกิดการสูญเสีย เป็นผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในผลการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว

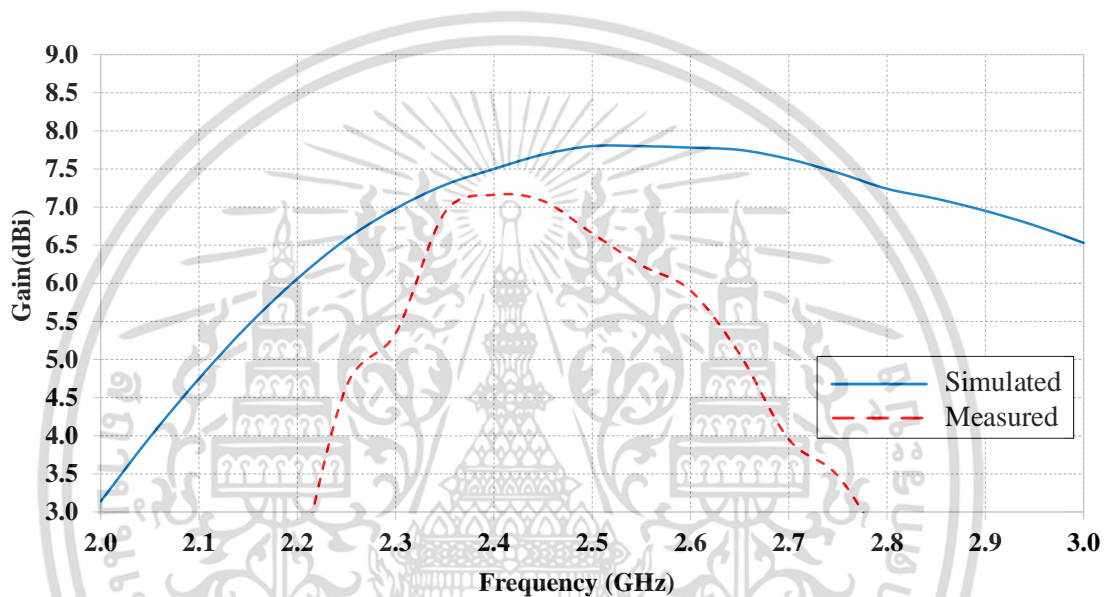
### 5.3.3 อัตราขยาย (Gain)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศสามารถใช้วิธีการติดตั้งดังรูปที่ 5.5 หรือ 5.6 ก็ได้แต่จะไม่มี การหมุนที่สายอากาศภาครับ โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่ง ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi และใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ เพื่อทดสอบหาอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 โดยการติดตั้งสายอากาศเพื่อทดสอบอัตราขยายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และผลการทดสอบอัตราขยายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (5.2)$$

- เมื่อ  $G_{0t}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dBi)  
 $G_{0r}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dBi)  
 $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (m)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน (m)  
 $P_t$  คือ กำลังของภาคส่ง (W)  
 $P_r$  คือ กำลังของภาครับ (W)



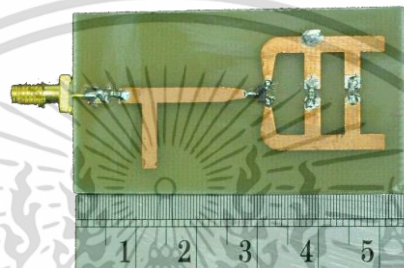
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบ

จากรูปที่ 5.8 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ ที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายประมาณ 7.2 dBi โดยที่ความถี่ 2 GHz ถึง 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และสังเกตได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลการจำลอง โดยสาเหตุอาจจะเกิดจากสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเกิดการสูญเสียระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น และเนื่องจากการสร้างสายอากาศลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองที่มีส่วนประกอบนอกเหนือจากทองแดงจึงทำให้สัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุดังกล่าวมีการสูญเสียเกิดขึ้น

## 5.4 ขั้นตอนและผลการทดสอบวงจรเรียงกระแส

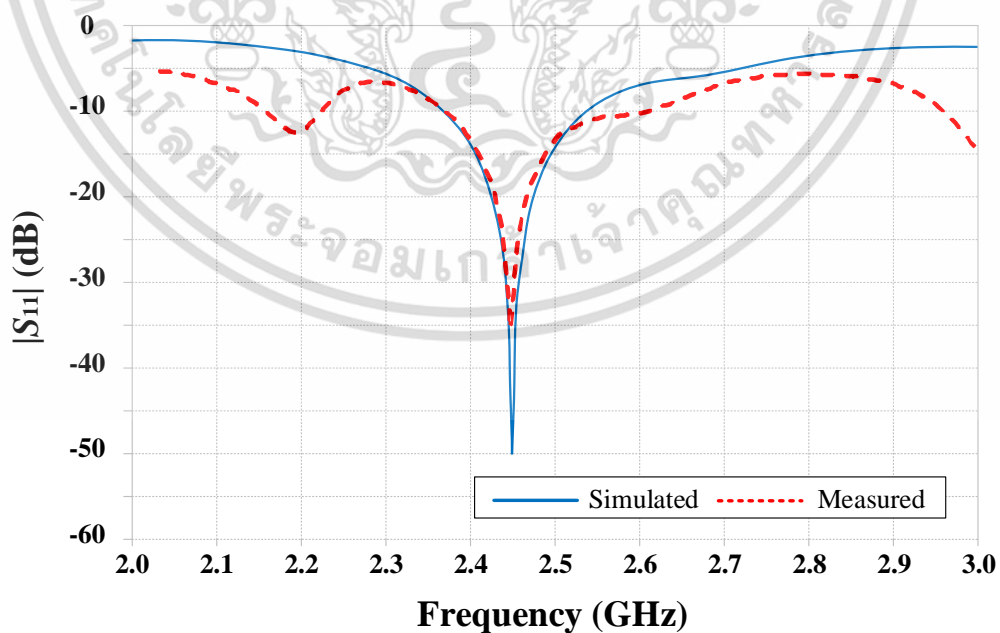
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอวงจรเรียงกระแสต้นแบบ และการทดสอบคุณลักษณะของวงจรเรียงกระแส จึงได้สร้างวงจรเรียงกระแสต้นแบบ และทดสอบคุณสมบัติ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ค่า  $|S_{11}|$  การแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังงาน ( $\eta$ )

รูปที่ 5.9 แสดงวงจรเรียงกระแสต้นแบบโดยวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุที่เป็นแผ่น FR4 โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  $\epsilon_r = 4.3$  น้ำหนักเบาและมีราคาถูกซึ่งหัวที่ใช้ป้อนเป็นหัวป้อน SMA



รูปที่ 5.9 รูปถ่ายของวงจรเรียงกระแสต้นแบบ

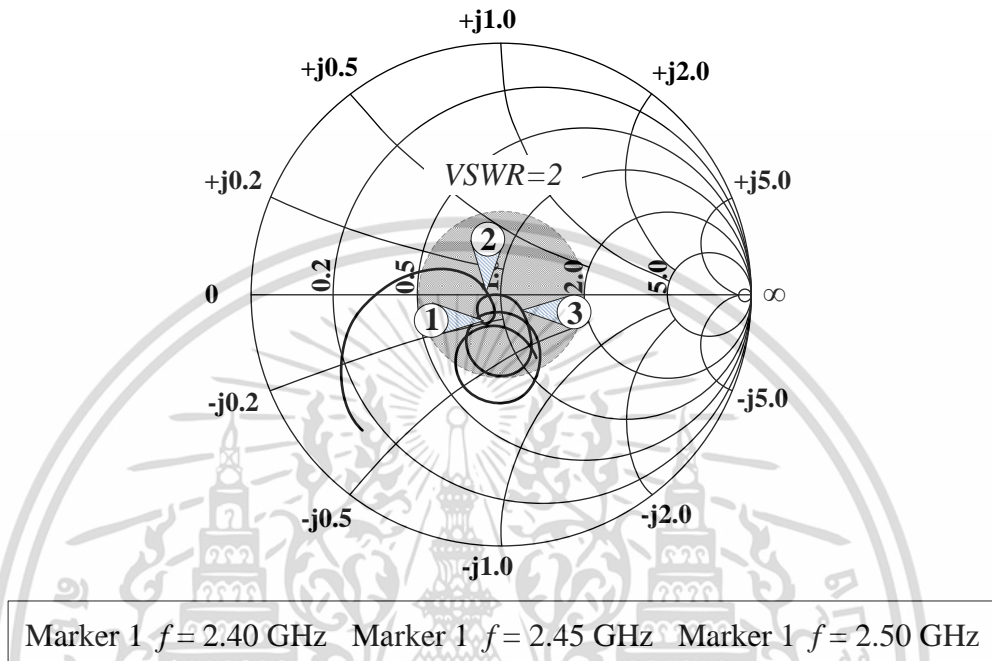
เมื่อสร้างวงจรเรียงกระแสต้นแบบแล้ว จากนั้นนำวงจรดังกล่าวเชื่อมต่อกับสายอากาศต้นแบบมาทดสอบคุณลักษณะต่างๆ เพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองโดยโปรแกรม advanced design system (ADS) โดยทำการทดสอบ  $|S_{11}|$  ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10  $|S_{11}|$  ของวงจรเรียงกระแสเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

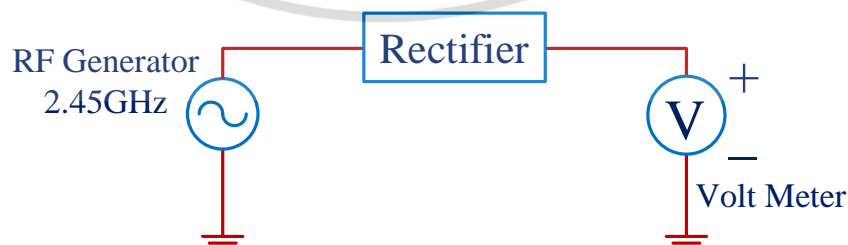
จากรูปที่ 5.10 พบว่า  $|S_{11}|$  จากการทดสอบของวงจรเรียงกระแสที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ครอบคลุม ช่วงความถี่ตั้งแต่  $2.3$  ถึง  $2.6$  GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์  $12.2\%$  โดย  $|S_{11}|$  ต่ำสุดที่ความถี่  $2.45$  GHz เท่ากับ  $-35$  dB ซึ่งผล  $|S_{11}|$  จากการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลจากการจำลอง



รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส

ในรูปที่ 5.11 จากการทดสอบที่ความถี่ใช้งานตั้งแต่  $2.40$  GHz ถึง  $2.50$  GHz พบว่าที่ความถี่กลาง  $2.45$  GHz วงจรเรียงกระแสมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าหรือ  $Z_m$  โดยมีจำนวนจริงเท่ากับ  $50.125$   $\Omega$  และจำนวนจินตภาพเท่ากับ  $0.671$

จากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกที่ความถี่  $2.45$  GHz โดยที่ต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรงดังรูปที่ 5.12(ก) และ (ข) เพื่อดูแนวโน้มเปรียบเทียบกับผลการจำลองได้

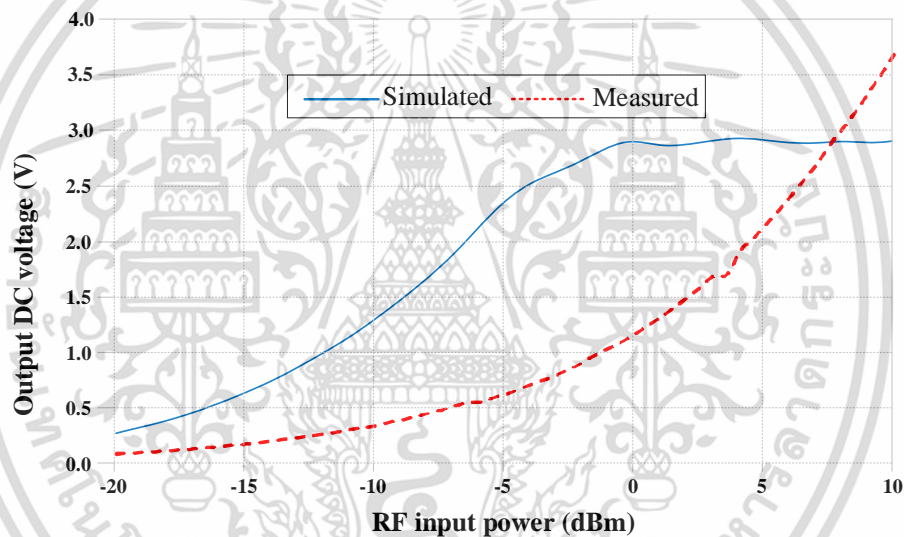


(ก) ผังการต่อทดสอบวงจรเรียงกระแสโดยต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรง



(ข) รูปการต่อทดสอบวงจรเรียงกระแสโดยต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรง

รูปที่ 5.12 การต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรง

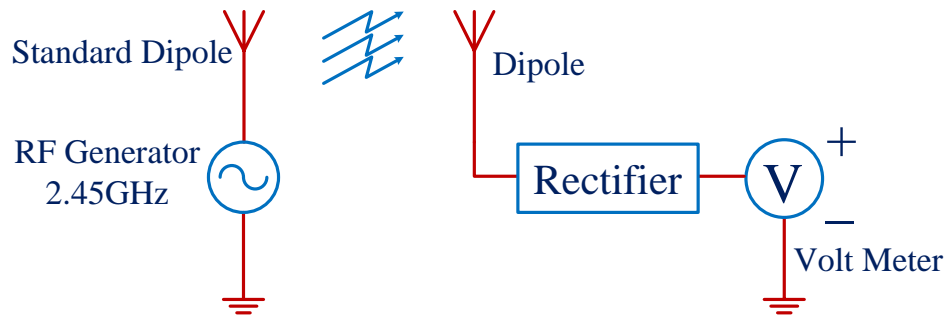


รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกที่ความถี่ 2.45 GHz

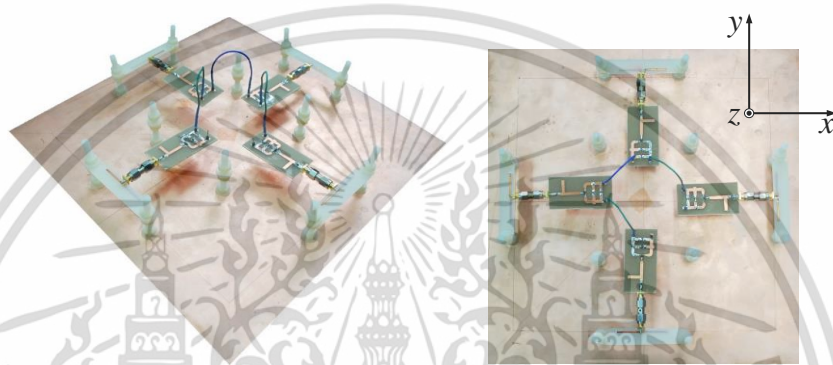
จากรูปที่ 5.13 พบว่าแรงดันทางด้านขาออกจากการทดสอบของสายอากาศ ได้ทำการตั้งค่าเครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งแต่ -20 dBm ไปจนถึง 10 dBm ที่ความถี่ 2.45 GHz จากการทดสอบของวงจรเรียงกระแสมีแนวโน้มค่อนข้างต่างกับผลจากการจำลองเนื่องจากค่าคงที่ของไดโอด (k constant) แต่ละตัวไม่เท่ากันกับผลการจำลอง

จากนั้นได้ทำการทดสอบโดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ เป็นตัวส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz ใช้กำลังในการส่งตั้งแต่ -10 dBm ถึง 14 dBm ต่อจากนั้นใช้สายอากาศไดโพลที่สร้างขึ้นมาในข้างต้นเป็นสายอากาศด้านรับโดยจะทดสอบการรับส่ง 3 ระยะด้วยกันคือ 0.5 m 1 m และ 1.5 m โดยจะทำการทดสอบโดยรวมสายอากาศและวงจรเรียงกระแสเข้าด้วยกันเป็นวงจรอนุกรมทั้งสี่ตัวดังแสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

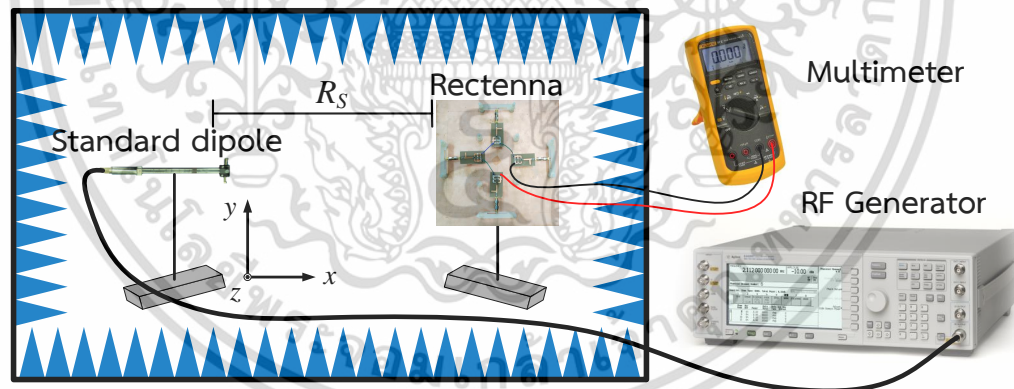
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ

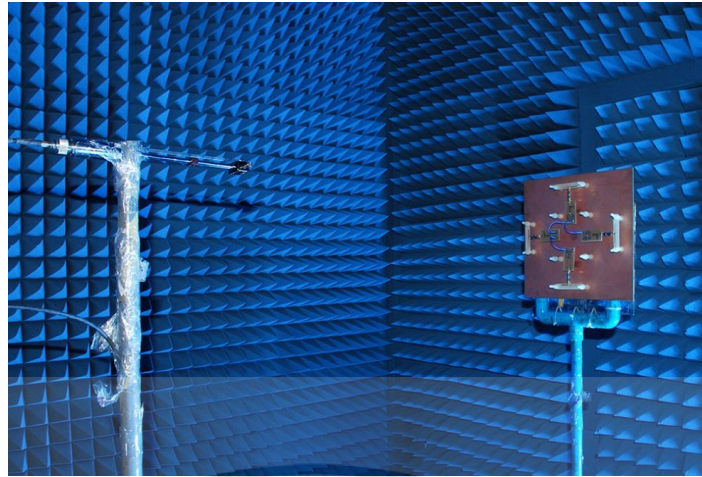


(ก) รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ



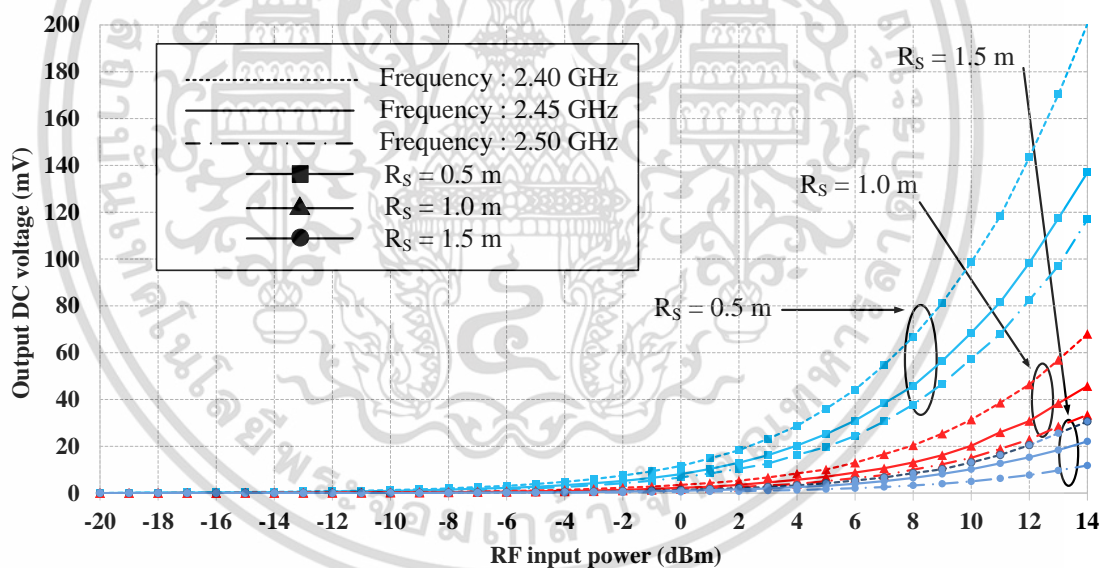
(ข) การจัดวางการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปถ่ายการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 5.15 รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบและรูปการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz โดยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในระยะต่างๆ

จากรูปที่ 5.16 พบว่าแรงดันทางด้านขาออกจากการทดสอบของสายอากาศมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความถี่และระยะทาง โดยให้ค่าระยะทางจากสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับคือ  $R_s$  ให้ระยะทางเท่ากับ 0.5 m 1 m และ 1.5 m โดยการตั้งค่ากำลังงานเครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งแต่ -20 dBm ไปจนถึง 14 dBm ที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz สามารถแปลงกำลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณมาเป็นแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 200 mV

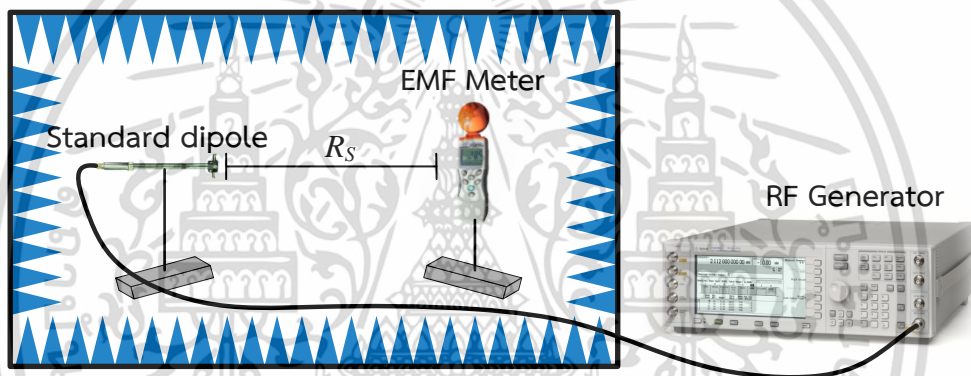
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจัดเรียงกระแสนอกจากจะให้ความสนใจในเรื่องกระแสไฟฟ้าทางด้านออกของวงจรที่ได้จากการเรียงกระแสนอกจากนี้ยังต้องคิดถึงประสิทธิภาพการแปลงกำลังงาน ( $\eta$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพในการแปลงกำลังงานเป็นกระแสไฟฟ้าตรง โดยหาได้จากสมการที่ 5.1 [28]

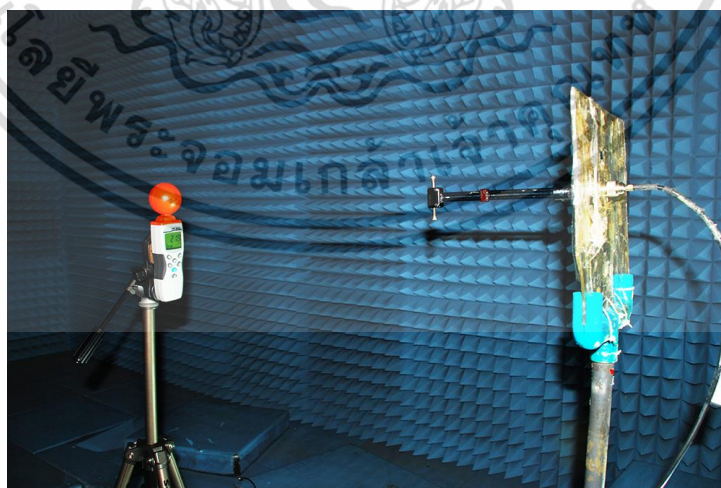
$$\eta_{RFtoDC} = \frac{P_{out,DC}}{S_{RF} A_G} = \left( \frac{V_{DC}^2}{R_{Load}} \right) \frac{1}{S_{RF} A_G} \quad (5.1)$$

โดยที่

- $V_{DC}$  คือ กระแสไฟฟ้าตรง  
 $R_{Load}$  คือ ตัวต้านทานภายในวงจร  
 $S_{RF}$  คือ ค่าความหนาแน่นกำลังงาน  
 $A_G$  คือ ขนาดของสายอากาศ



(ก) การหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน ( $S_{RF}$ ) ในแต่ละระยะ ( $R_S$ )

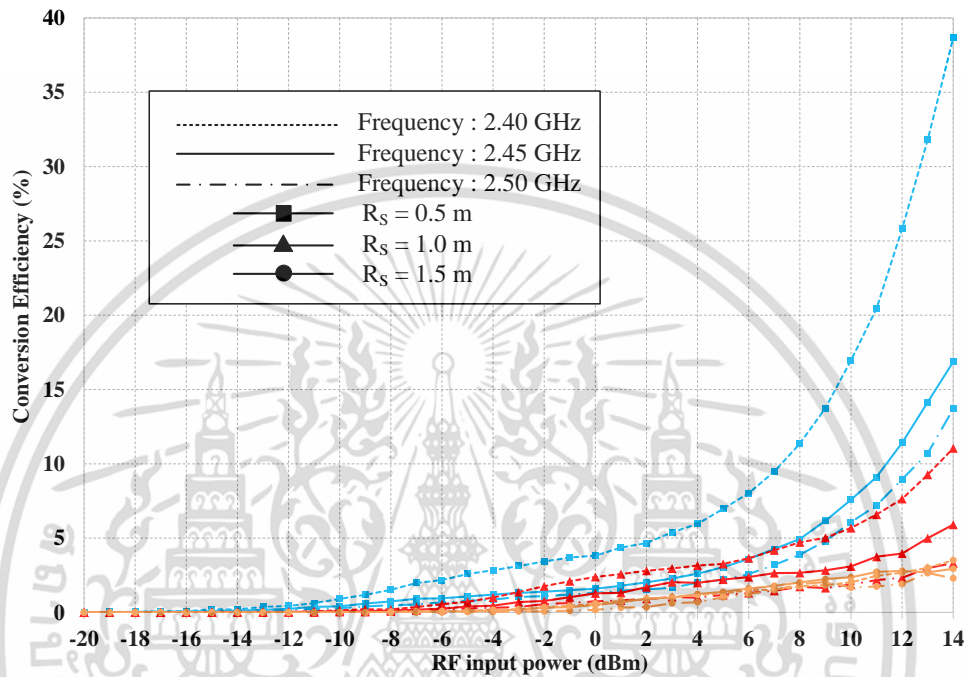


(ข) รูปถ่ายการหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน ( $S_{RF}$ ) ในแต่ละระยะ ( $R_S$ )

### รูปที่ 5.17 การหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน ( $S_{RF}$ ) ในแต่ละระยะ ( $R_S$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขายหรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.17 การหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน ( $S_{RF}$ ) ในแต่ละระยะ ( $R_s$ ) ตั้งแต่ระยะ 0.5 m 1 m และ 1.5 m โดยใช้ 3 ความถี่ตั้งแต่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz เพื่อหาค่าความหนาแน่นกำลังงานในแต่ละจุด โดยใช้เครื่องวัด Electromagnetic Field - EMF Meter เป็นเครื่องวัดมาตรฐาน เพื่ออ้างอิงความหนาแน่นกำลังงานที่จุด จุดที่เราต้องการอ้างอิง และหาค่า  $S_{RF}$  เพื่อเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพกับสายอากาศได้



รูปที่ 5.18 ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าต้นแบบ

จากรูปที่ 5.18 แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานของสายอากาศหรือ Conversion efficiency สูงสุดที่ 40% ของการแพร่กระจายคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศไดโพลมาตรฐาน โดยแปลงความถี่วิทยุเป็นกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความถี่ 2.40 GHz ระยะทางจากสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับเท่ากับ 0.5 m โดยการป้อนกำลังทางด้านส่งอยู่ที่ 14 dBm ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศขึ้นอยู่กับตัวแปรหลาย ๆ อย่างเช่น ระยะทางของตัวรับ ตัวส่ง สายอากาศ ความถี่แต่ละความถี่ ขนาดของตัวรับกำลังงาน รวมถึงตัวต้านทานภายในวงจรเรียงกระแสด้วยเพราะว่าค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศจะแปรผกผันกับตัวต้านทานภายในวงจรเรียงกระแสสามารถดูได้จากสมการที่ 5.1

สายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายที่ได้นำเสนอได้เลือกใช้ตัวต้านทานเท่ากับ 1 M $\Omega$  เพื่อถูกใช้ในการเพิ่มกระแสไฟฟ้าตรงให้กับวงจร และได้ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบสายอากาศดังกล่าว โดยได้ใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานในการส่งกำลังมายังใช้อากาศโดยมีอัตราขยาย ( $G_T$ ) เท่ากับ 1.2 dBi และส่งเป็นโพลาริซิงเส้นแนวตั้ง สำหรับสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีอัตราขยายเท่ากับ 7.2 dBi นอกจากนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะทางเป็น  $R_s$  เปลี่ยนกำลังงานส่งเป็น  $P_t$  และความถี่  $f$  ตามลำดับ จากรูปที่ 5.15 ผลการทดสอบพบว่าระยะทางเท่ากับ 0.5 m สายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุดทั้ง 3 ความถี่และถ้าระยะทางไกลขึ้นสายอากาศมีการจัดเรียงกระแสไฟฟ้าตรงจำนวนน้อย หรือไม่มีประสิทธิภาพในการเรียงกระแสไฟฟ้า และจากรูปที่ 5.17 คือประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าที่ระยะทางเท่ากับ 0.5 m 1 m และ 1.5 m โดยคำนวณจากสมการที่ 5.1 พบว่า สายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อมีการส่งกำลังงานที่ 14 dBm หรืออยู่ที่ประมาณ 2.51 mW จะให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 40%, ที่ความถี่ 2.40 GHz

## 5.5 สรุป

จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายและวงจรเรียงกระแส ที่ประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่ WLAN 2.4 GHz ที่ประกอบไปด้วย  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริซั อัตรายายของสายอากาศ และแรงดันทางด้านขาออกของวงจรเรียงกระแส โดยนำผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 นี้ พบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการจำลองของสายอากาศไม่ได้มีการออกแบบอุปกรณ์คอนเนคเตอร์ และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างขั้นตอนการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบสามารถนำไปใช้งานในช่วงความถี่ WLAN ได้ โดยมีช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz การพิจารณาถึงคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่พิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz ตามลำดับ พบว่าที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลอง โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณที่ด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณร่วมกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง และการส่งสัญญาณที่มาจากเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายจะต้องผ่านสายนำสัญญาณมาสู่สายอากาศ ที่มีจุดเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเนคเตอร์อยู่มาก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 73 องศา และ 83 องศาตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 17.7 dB และมีอัตรายายในช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz อยู่ที่ประมาณ 7.2 dBi ส่วนทางด้านของการทดสอบวงจรเรียงกระแสพบว่า  $|S_{11}|$  มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองคือมี  $|S_{11}|$  อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการ จากการทดสอบวงจรเรียงกระแสโดยต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรงวงจรสามารถแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นแรงดันได้ประมาณ 3.5 V ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยให้กำลังจากเครื่องส่งสัญญาณที่ -20 dBm ถึง 10 dBm

จากนั้นทำการนำสายอากาศไดโพลจำนวนสี่ตัวมาวางร่วมกันแบบตั้งฉากซึ่งกันและกันโดยต่อวงจรเรียงกระแสเข้าด้วยกันเพื่อหาค่าและทดสอบโดยวัดแรงดันทางด้านขาออกด้วยมัลติมิเตอร์ โดยใช้ระยะทางในการทดสอบ 3 ระยะด้วยกันคือ 0.5 m 1 m และ 1.5 m ที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz สามารถวัดค่าแรงดันทางด้านขาออกสูงสุดได้ถึง 200 mV ที่ระยะ 0.5 m ความถี่ 2.40 GHz จากนั้นทำงานหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ โดยใช้ระยะและความถี่เดียวกันกับการวัดหาแรงดันทางด้านขาออก แต่จะทำการวัดเทียบกับเครื่อง Electromagnetic Field - EMF Meter ซึ่งเป็นเครื่องวัดมาตรฐานในการหาค่าความหนาแน่นกำลังงานที่จุดนั้นๆ สามารถหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ อยู่ที่ประมาณ 40% ที่ระยะ 0.5 m และความถี่ 2.40 GHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศที่สามารถแปลงความถี่คลื่นวิทยุมาเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้ โดยที่ราคาถูก โครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อน และเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ติดตั้งในสถานที่ปิดเช่น ในที่ทำงาน ห้างสรรพสินค้าทั่วไป ซึ่งเริ่มจากการหาขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้คุณลักษณะของสายอากาศที่มี  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.40 GHz ถึง 2.50 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ WLAN ซึ่งจะต้องสามารถรับสัญญาณจากการสะท้อนจากพื้นที่ยกได้ เพื่อนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับใช้งานจริงต่อไป

ในบทนี้จะแบ่งหัวข้อหลักออกเป็น 2 หัวข้อ โดยในหัวข้อแรกจะกล่าวถึง พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ และการจำลองการทดสอบของวงจรเรียงกระแสทั้งแบบวงจรเรียงกระแสเพียงอย่างเดียวและต่อร่วมกับสายอากาศ ในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และอธิบาย ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบ WLAN WiMAX การออกแบบสายอากาศไดโพล และวงจรเรียงกระแส เพื่อนำไปสู่การหาขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย โดยที่จะนำพารามิเตอร์ต่างๆ ไปจำลองผลหาขนาดที่เหมาะสมจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และ Advanced Design System (ADS) จากนั้นนำขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ไปสร้างและทดสอบผลคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบ โดยที่จะทำการศึกษาผลกระทบของสายอากาศเมื่อเมื่อสายอากาศได้รับสัญญาณในย่านความถี่ต่าง ในระยะต่างๆ รวมถึงค่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังงาน ( $\eta$ ) ของสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปจำลองเริ่มจากการคำนวณขนาดเริ่มต้นตามทฤษฎีของสายอากาศไดโพล ตามด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศจนทำให้สายอากาศดังกล่าวมีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้บนเทคโนโลยี WLAN WiMAX สายอากาศแกลวลำดับสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งมีช่วงความถี่ที่  $|S_{11}| \leq -10$  dB ตั้งแต่ 2.40 GHz จนถึง 2.50 GHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง อันเป็นผลมาจากสายอากาศไดโพลต้นแบบทั้งสิ้นตัวมีค่าที่เหมือนกันในการออกแบบดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.18 ถึง 3.19 โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งหมด ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เป็น 73 องศา และ 83 องศาตามลำดับ และมีอัตราขยายเป็น 7.2 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการออกแบบและจำลองวงจรเรียงกระแสเพื่อที่จะนำมาต่อร่วมกับสายอากาศ ไทโพลต์แบบที่ได้ออกแบบได้ โดยพื้นฐานทั่วไปวงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (Coupling Capacitor) วงจรแมตซิงแบบสตับ (Stub Matching) ไดโอดช็อตตี้ (Schottky Diode) ตัวกรองสัญญาณเก็บประจุ (Capacitor Filter) และตัวต้านทาน (Resistor) ในวงจรที่จะทำการจำลองนี้จะใช้ ไดโอดช็อตตี้เบอร์ SMS7630-006 ในการเรียงกระแส โดยเริ่มจากหาค่าตัวต้านทาน ตั้งแต่ 100  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  จนถึง 10 M $\Omega$  ผลที่ได้สามารถดูได้ดังรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการจำลองการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรตั้งแต่ความถี่ 2.2 GHz ไปจนถึง 2.7 GHz ต่อมาได้ทำการคำนวณและหาค่าความยาวของแมตซิงสตับเพื่อให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับ 50 $\Omega$  เพื่อที่จะต่อเข้ากับสายอากาศได้ดีที่สุด โดยค่าของวงจรและแมตซิงสตับที่เหมาะสมสามารถดูได้ดังตารางที่ 4.2

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.5 มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริซ และอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ พบว่าค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง ถึงแม้ว่าลักษณะของกราฟ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศต้นแบบจะคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย อันเป็นผลเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างขั้นตอนการสร้างสายอากาศ รวมไปถึงผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศนั้นยังไม่ได้คำนวณผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการอุปกรณคอนเนคเตอร์ อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบก็ยังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว ที่ระนาบ xz และ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 32 องศาและ 35 องศาตามลำดับ มีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 24.5 dB มีอัตราขยายอยู่ที่ 9.7 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นทำการสร้างและทดสอบวงจรเรียงกระแส พบว่าค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง จากนั้นทดสอบโดยการต่อวงจรเรียงกระแสเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรงโดยใช้มัลติมิเตอร์อ่านวัดค่าแรงดันทางด้านขาออกได้ถึง 3.5 V

ถัดมาได้ทำการรวมเอาสายอากาศไทโพลต์ต้นแบบและวงจรเรียงกระแสต้นแบบมาเชื่อมต่อกันด้วยหัวต่อชนิด SMA เพื่อที่จะทำการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายโดยใช้สายอากาศไทโพลต์มาตรฐานต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ เป็นตัวส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.40 GHz 2.45 GHz และ 2.50 GHz ใช้กำลังในการส่งตั้งแต่ -10 dBm ถึง 14 dBm ต่อจากนั้นใช้สายอากาศไทโพลต์ที่สร้างขึ้นมาในข้างต้นเป็นสายอากาศด้านรับโดยจะทดสอบการรับส่ง 3 ระยะด้วยกันคือ 0.5 m 1 m และ 1.5 m โดยจะทำการทดสอบโดยรวมสายอากาศและวงจรเรียงกระแสเข้าด้วยกันเป็นวงจรอนุกรมทั้งสี่ตัวดังรูปที่ 5.14 สามารถวัดค่าแรงดันทางด้านขาออกได้สูงสุดที่ประมาณ 200 mV ที่ความถี่ 2.40 GHz ระยะ 0.5 m จากนั้นทำการหาค่าความหนาแน่นกำลังงาน โดยใช้เครื่องวัด Electromagnetic Field - EMF Meter เป็นเครื่องวัดมาตรฐาน เพื่ออ้างอิงความหนาแน่นกำลังงานที่จุด จุดที่เราต้องการอ้างอิง คือที่ระยะ 0.5 m 1 m และ 1.5 m เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศได้จากสูตรที่ 5.1 สายอากาศมีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศหรือ efficiency ค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 40% ของการแพร่กระจายคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศไทโพลต์มาตรฐาน โดยแปลงความถี่วิทยุเป็นกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ที่ความถี่ 2.40 GHz ระยะทางจากสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับเท่ากับ 0.5 m โดยการป้อนกำลังทางด้านส่งอยู่ที่ 14 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการศึกษาของผลกระทบของพารามิเตอร์และจากแรงดันทางด้านขาออกพบว่า สายอากาศโครงสร้างดังกล่าวมีความสามารถที่จะออกแบบเพื่อเพิ่มขนาดของตัวรับสัญญาณ หรือ ช่องทางในการรับสัญญาณเพื่อเพิ่มแรงดัน หรือเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณได้มากขึ้น โดยเฉพาะจงในการรับสัญญาณจากแหล่งจ่ายที่มีความแรงมากขึ้น เช่นจากสถานีฐานปล่อยสัญญาณโทรศัพท์ หรืออยู่ในเขตที่ไกลกลับสถานีวิทยุก็อาจจะจับสัญญาณนั้นๆมาแปลงเป็นกำลังงานได้ โดยที่มีกระแสที่สูงขึ้น เพื่อที่จะนำกระแสที่เก็บเกี่ยวได้มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้มีโครงสร้างที่ง่ายขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wireless power transmission [Online]. Available: [http:// www.kml.ku-tokyo.ac.jp/wp/researches\\_en.html](http://www.kml.ku-tokyo.ac.jp/wp/researches_en.html)
- [2] R. Selvakumaran, W. Liu, B. H. Soong, L. Ming, and Y. L. Sum, “Design of low power rectenna for wireless power transfer,” *Proceeding of International Technical Conference of IEEE*, pp.1-5, Jan. 2009.
- [3] T. Q. V. Hoang, E. Séguenot, F. Ferrero, J. L. Dubard, P. Brachat, and J. L. Desvilles, “3D voltage pattern measurement of a 2.45 GHz rectenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 3354-3356, vol. 61, no. 6, June 2013.
- [4] J. A. G. Akkermans, M. C. van Beurden, G. J. N. Doodeman, and H. J. Visser, “Analytical models for low-power rectenna design,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 187-190, vol. 4, 2005.
- [5] F. Xie, G. M. Yang, and W. Geyi, “Optimal design of an antenna array for energy harvesting,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 155-158, vol. 12, 2013.
- [6] Y. Ushijima, T. Sakamoto, E. Nishiyama, M. Aikawa, and I. Toyoda, “5.8-GHz integrated differential rectenna unit using both-sided MIC technology with design flexibility,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 3357-3360, vol. 61, no. 6, June 2013.
- [7] ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, “ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ”, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552.
- [8] W. C. Brown, “The History of Power Transmission by Radio Wave,” *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MIT-32, pp. 1230-1242, 1984.
- [9] W. C. Brown, “Satellite Power Station- A New Source of Energy,” *IEEE Spectrum*, vol. 10, pp. 38-47, 1973.
- [10] R. H. George and E. M. Sabbagh, “An Efficient Means of Converting Microwave energy to DC Using Semiconductor Diodes,” *IEEE International Conference Electron D*
- [11] S. Naoki, “Wireless Power Transfer via Radio waves,” John Wiley & Sons, 2014
- [12] S. Tianjia, X. Xiang, and Z. Wang, “Wireless Power Transfer for Medical Microsystems,” Springer Science & Business Media 2013
- [13] V. Stanimir S., B. Elena N. and J. Luis R., “Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy,” *Universitatis Ser. Electrical Engineering* 2012
- [14] A. Steven, “Wireless recharging: Pulling the plug on electric cars,” British Broadcasting Corp, 2014

- [15] T. Anuradha, and G. Sunil, “Wireless power Transmission: Applications and Components,” International Journal of Engineering Research & Technology 2014
- [16] I. J. Bahl and P. Bhartia, “*Microstrip Antenna*,” Artech House, 1980.
- [17] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory: Analysis and Design*,” John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [18] บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์, “วิศวกรรมสายอากาศ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [19] มงคล ทองสงคราม, “อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น”, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรีนติ้ง, 2553.
- [20] ประยุทธ์ อัครเอกฒาลิน, “การออกแบบไมโครเวฟ Microwave Circuit Design”, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [21] U. Olgun, C.C. Chen, and J.L. Volakis, “Investigation of Rectenna Array Configurations for Enhanced RF Power Harvesting,” *IEEE antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol. 10, pp. 262-265, 2011.
- [22] F. Xie, G.M. Yang, and W. Geyi, “Optimal Design of an Antenna Array for Energy Harvesting,” *IEEE antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol. 12, pp. 155-158, 2013.
- [23] G.A. Vera, A. Georgiadis, A. Collado, and S. Via, “Design of a 2.45 GHz Rectenna for Electromagnetic (EM) Energy Scavenging,” *IEEE Radio and Wireless Symposium.*, pp. 61-64, 2010.
- [24] J. Zhang, Y. Huang and P. Cao, “Harvesting RF Energy with Rectenna Arrays,” *European Conference on Antennas and Propagation.*, pp. 365-367, 2012.
- [25] S.D. Assimonis, and A. Bletsas, “Energy Harvesting with a Low-Cost and High Efficiency Rectenna for Low-Power Input,” *IEEE Radio and Wireless Symposium.*, pp. 229-231, 2014.
- [26] CST-Microwave Studio, User’s Manual, 2006.
- [27] ADS-Advanced Design System, User’s Manual.
- [28] G. Monti and F. Congedo, “UHF Rectenna Using a Bowtie Antenna,” *Progress In Electromagnetics Research* Vol. 26, pp. 181-192, 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



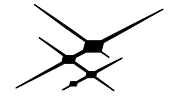
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Surface Mount Mixer and Detector Schottky Diodes

## Applications

- Sensitive RF and microwave detector circuits
- Sampling and mixer circuits
- High-volume wireless
- WiFi and mobile
- Low-noise receivers in high-sensitivity ID tags
- Radio designs

## Features

- Tight parameter distribution
- Available as singles, pairs, and dual pairs
- Packages rated MSL1, 260 °C per JEDEC J-STD-020)



Skyworks Green™ products are compliant with all applicable legislation and are halogen-free. For additional information, refer to *Skyworks Definition of Green™*, document number SQ04-0074.

## Description

These low-cost, surface mountable, plastic packaged silicon mixer Schottky diodes are designed for RF and microwave mixers and detectors. They include low barrier diodes and zero-bias detectors that combine Skyworks advanced semiconductor technology with low-cost packaging techniques. All diodes are 100 percent DC tested and deliver tight parameter distribution, which minimizes performance variability.

These diodes are available in SOD-882, SC-70, SC-79, SC-88, SOD-323, SOT-23, SOT-143, and Molded Interconnect System (MIS) packages. Wiring configurations include singles, common cathode, series pairs, unconnected pairs, and dual series pairs. They may be used at frequencies up to 24 GHz.

Table 1 describes the various packages and marking of the mixer and detector Schottky diodes.



Table 1. Schottky Diode Packaging and Marking

Single	Single	Single	Common Cathode	Series Pair
SC-79 Green™	SOD-323 Green™	SOT-23	SOT-23	SOT-23
				<b>SMS1546-005LF</b> Green™ Marking: XG2
		<b>SMS7621-001</b> Marking: SH1		◆ <b>SMS7621-005</b> Marking: SH2
◆ <b>SMS7621-079LF</b> Marking: Cathode		<b>SMS7621-001LF</b> Green™ Marking: XH1		◆ <b>SMS7621-005LF</b> Green™ Marking: XH2
		<b>SMS7630-001</b> Marking: SD1		<b>SMS7630-005</b> Marking: SD2
◆ <b>SMS7630-079LF</b> Marking: Anode	<b>SMS7630-011LF</b> Marking: XD	<b>SMS7630-001LF</b> Green™ Marking: XD1		<b>SMS7630-005LF</b> Green™ Marking: XD2
$L_S = 0.7 \text{ nH}$	$L_S = 1.5 \text{ nH}$	$L_S = 1.5 \text{ nH}$		$L_S = 1.5 \text{ nH}$
			SC-70	SC-70
			<b>SMS7621-074</b> Marking: SH3	<b>SMS7621-075</b> Marking: SH2
			<b>SMS7621-074LF</b> Green™ Marking: XH3	<b>SMS7621-075LF</b> Green™ Marking: XH2
			$L_S = 1.4 \text{ nH}$	$L_S = 1.4 \text{ nH}$

Reverse Series Pair	Unconnected Pair	Reverse Unconnected Pair	Unconnected Pair	Dual Series Pair	Single
SOT-23	SOT-143	SOT-143	MIS Green™	SC-88 Green™	SOD-882 Green™
◆ <b>SMS7621-006</b> Marking: SH8	<b>SMS7621-015</b> Marking: SH7		<b>SMS7621-517</b> Marking: H Pb-Free		
◆ <b>SMS7621-006LF</b> Green™ Marking: XH8	<b>SMS7621-015LF</b> Marking: XH7			<b>SMS7621-081LF</b> Marking: XHQ	<b>SMS7621-040LF</b> Marking: E
◆ <b>SMS7630-006</b> Marking: SD8		◆ <b>SMS7630-020</b> Marking: SD0	<b>SMS7630-517</b> Marking: D Pb-Free		
◆ <b>SMS7630-006LF</b> Green™ Marking: XD8		◆ <b>SMS7630-020LF</b> Marking: XDO			<b>SMS7630-040LF</b> Marking: P
$L_S = 1.5 \text{ nH}$	$L_S = 1.5 \text{ nH}$	$L_S = 1.5 \text{ nH}$	$L_S = 0.6 \text{ nH}$	$L_S = 1.8 \text{ nH}$	$L_S = 0.45 \text{ nH}$



The Pb-free symbol or "LF" in the part number denotes a lead-free, RoHS-compliant package unless otherwise noted as Green™. Tin/lead (Sn/Pb) packaging is not recommended for new designs.



**Innovation to Go™**  
Select Linear Products (indicated by ◆) now available for purchase online.

**Electrical and Mechanical Specifications**

The absolute maximum ratings of the mixer and detector Schottky diodes are provided in Table 2. Electrical specifications are provided in Tables 3 and 4. The associated SPICE model parameters are provided in Table 5. A typical detector schematic diagram is shown in Figure 1.

A pinout and equivalent circuit diagram for the dual series pair Schottky diode (SMS7621-081LF) is shown in Figure 2. Typical performance characteristics are illustrated in Figures 3 and 4. Package dimensions are shown in Figures 5 to 19 (odd numbers), and tape and reel dimensions are provided in Figures 6 to 20 (even numbers).

Otherwise, problems related to moisture absorption may occur when the part is subjected to high temperature during solder assembly.

The mixer and detector Schottky diodes are rated to Moisture Sensitivity Level 1 (MSL1) at 260 °C for 5 seconds. They can be used for lead or lead-free soldering. For additional information, refer to the Skyworks Application Note, *Solder Reflow Information*, document number 200164.

Care must be taken when attaching this product, whether it is done manually or in a production solder reflow environment. Production quantities of this product are shipped in a standard tape and reel format.

**Package and Handling Information**

Instructions on the shipping container label regarding exposure to moisture after the container seal is broken must be followed.

**Table 2. Surface Mount Mixer and Detector Diodes Absolute Maximum Ratings**

Parameter	Symbol	Minimum	Maximum	Units
Reverse voltage	$V_R$		Rated $V_B$	V
Forward current, steady state	$I_F$		50	mA
Power dissipation	$P_D$		75	mW
Storage temperature	$T_{STG}$	-65	+150	°C
Operating temperature	$T_A$	-65	+150	°C
Junction temperature	$T_J$		+150	°C

**Note:** Exposure to maximum rating conditions for extended periods may reduce device reliability. There is no damage to device with only one parameter set at the limit and all other parameters set at or below their nominal value. Exceeding any of the limits listed here may result in permanent damage to the device.

**CAUTION:** Although this device is designed to be as robust as possible, Electrostatic Discharge (ESD) can damage this device. This device must be protected at all times from ESD. Static charges may easily produce potentials of several kilovolts on the human body or equipment, which can discharge without detection. Industry-standard ESD precautions should be used at all times.

**Table 3. Surface Mount Mixer and Detector Diodes Electrical Specifications (Note 1)  
( $T_A = +25$  °C Per Junction, Unless Otherwise Noted)**

Part Number	Barrier	Minimum $V_B$ @ 10 $\mu$ A (V)	Typical $C_T$ @ 0 V (pF)	$V_F$ @ 1 mA (mV)	Maximum Pair Configuration $\Delta V_F$ @ 1 mA (mV)	Maximum $R_T$ (Note 2) ( $\Omega$ )
SMS1546 series	Low	2	0.50	200 to 270	10	8 @ 10 mA
SMS7621 series	Low	2	0.25	260 to 320	10	18 @ 5 mA

**Note 1:** Performance is guaranteed only under the conditions listed in this Table.

**Note 2:**  $R_T$  is the slope resistance.

**Table 4. Surface Mount Mixer and Detector Diodes Electrical Specifications (Note 1)**  
 (TA = +25 °C Per Junction, Unless Otherwise Noted)

Part Number	Minimum Vb @ 100 $\mu$ A (V)	Typical Cr @ 0.15 V (pF)	Vf @ 0.1 mA (mV)	Vf @ 1 mA (mV)	Maximum Pair Configuration $\Delta$ Vf @ 1 mA (mV)	Typical Rv ( $\Omega$ )
SMS7630 series	1	0.3	60 to 120	135 to 240	10	5000

Note 1: Performance is guaranteed only under the conditions listed in this Table.

**Table 5. SPICE Model Parameters (Per Junction)**

Parameter	Units	SMS1546 Series	SMS7621 Series	SMS7630 Series
Is	A	3E-7	4E-8	5E-6
Rs	$\Omega$	4	12	20
N	–	1.04	1.05	1.05
Tt	sec	1E-11	1E-11	1E-11
Cj0	pF	0.38	0.1	0.14
M	–	0.36	0.35	0.40
Eg	eV	0.69	0.69	0.69
Xti	–	2	2	2
Fc	–	0.5	0.5	0.5
Bv	V	3	3	2
Ibv	A	1E-5	1E-5	1E-4
Vj	V	0.51	0.51	0.34

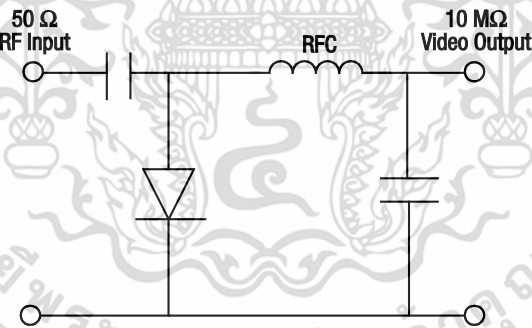


Figure 1. Typical Detector Circuit

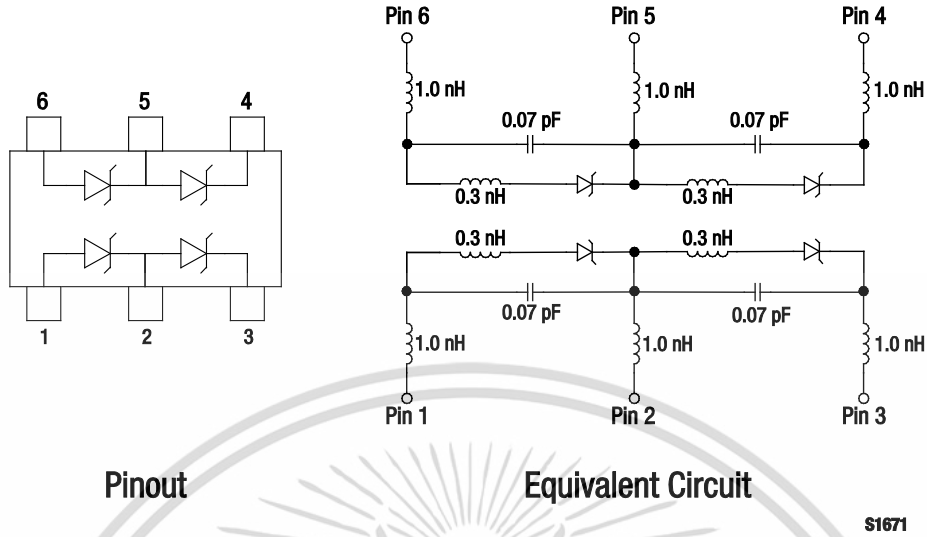


Figure 2. SMS7621-081LF Dual Series Pair Pinout and Equivalent Circuit

**Typical Performance Characteristics**

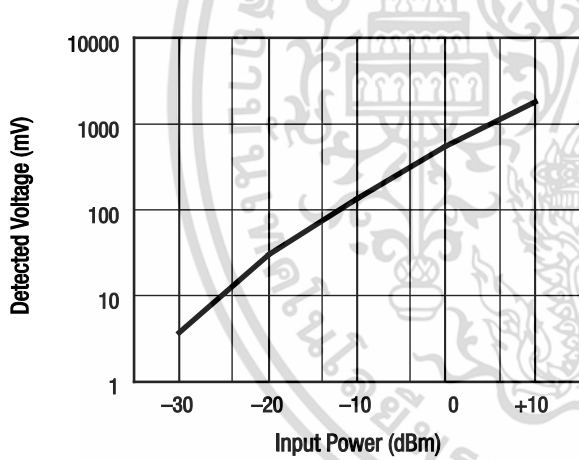


Figure 3. Typical Detector Characteristics @ 1.8 GHz

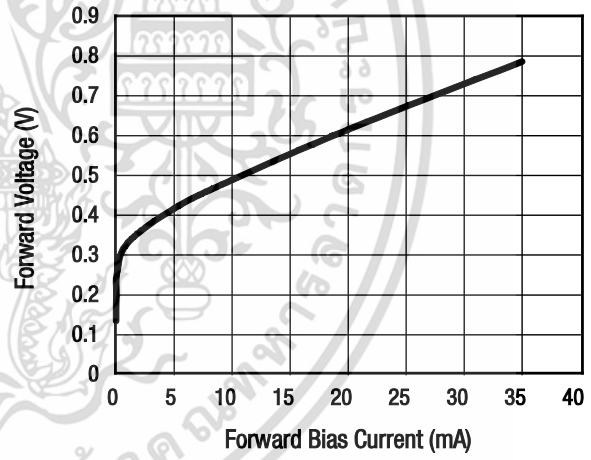


Figure 4. SMS7621-081LF Forward Voltage vs Forward Bias Current

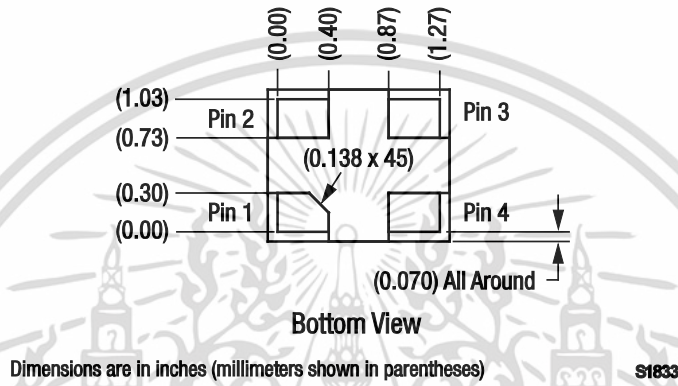
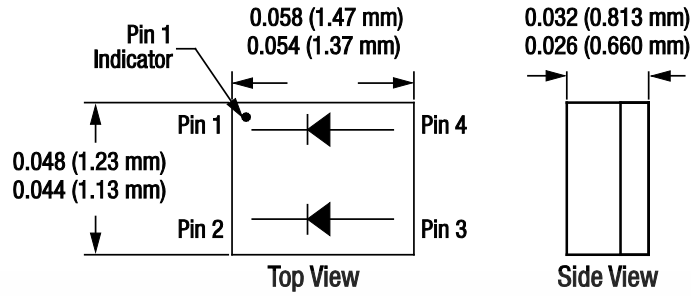
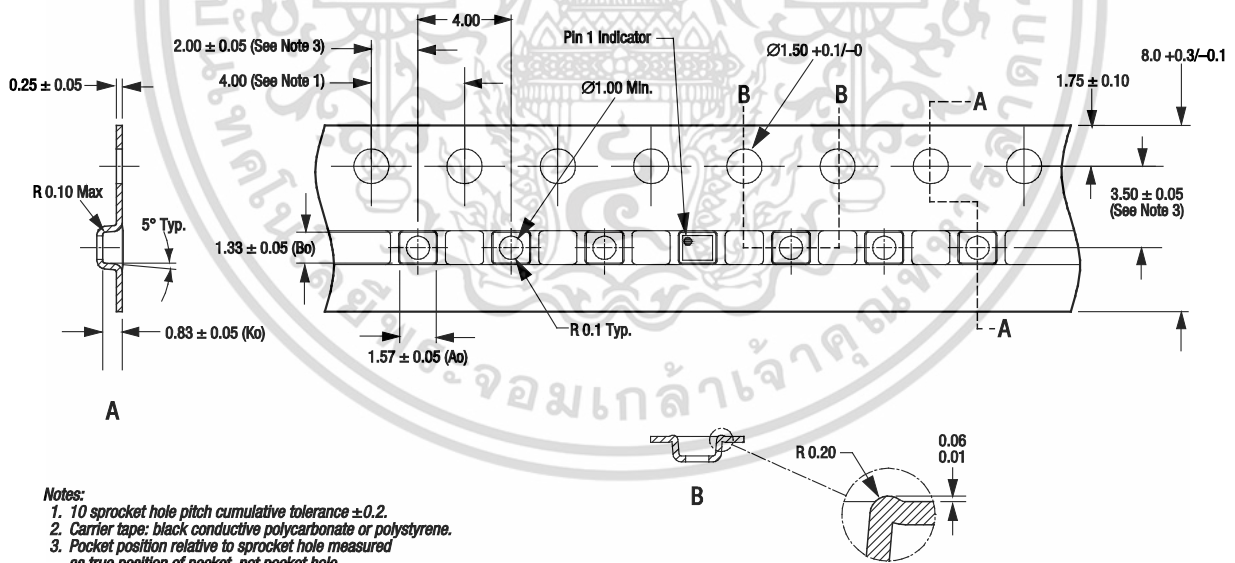


Figure 5. MIS Package Dimension Drawing



- Notes:
1. 10 sprocket hole pitch cumulative tolerance  $\pm 0.2$ .
  2. Carrier tape: black conductive polycarbonate or polystyrene.
  3. Pocket position relative to sprocket hole measured as true position of pocket, not pocket hole.
  4. ESD-surface resistivity is  $\leq 1 \times 10^8$  Ohms/square per EIA, JEDEC TNR Specification.
  5. Cover tape material: transparent conductive PSA with 5.4 mm width.
  6. All measurements are in millimeters.

S2928

Figure 6. MIS Tape and Reel Dimensions



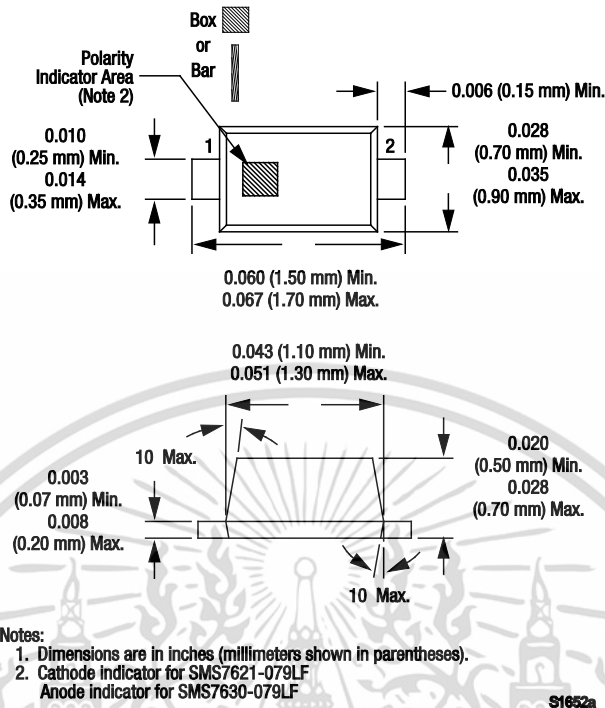


Figure 9. SC-79 Package Dimension Drawing

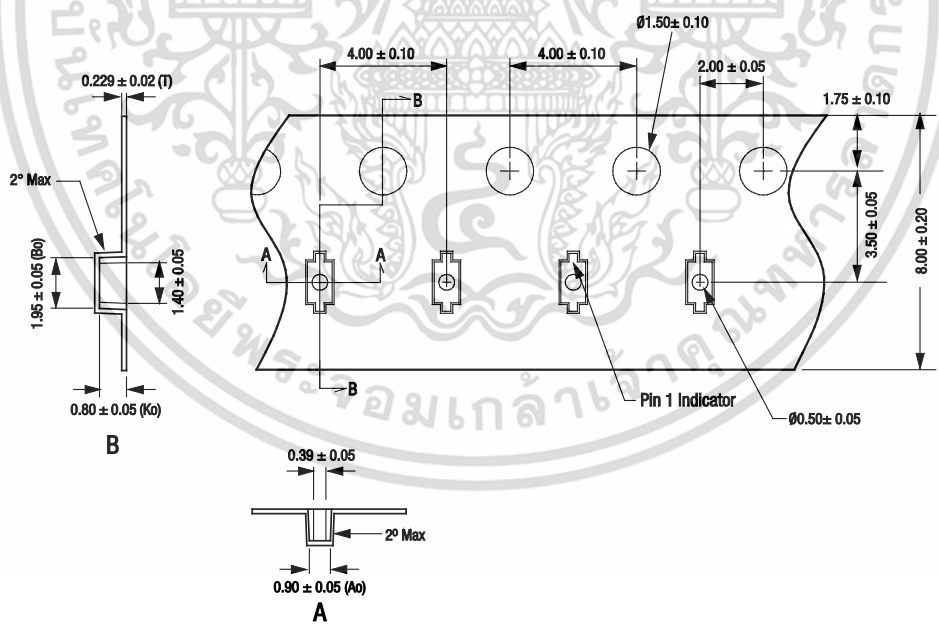


Figure 10. SC-79 Tape and Reel Dimensions

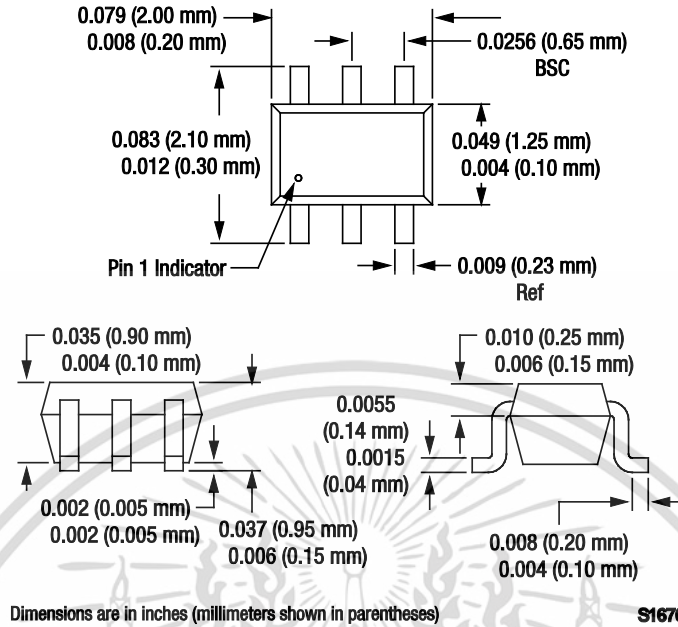
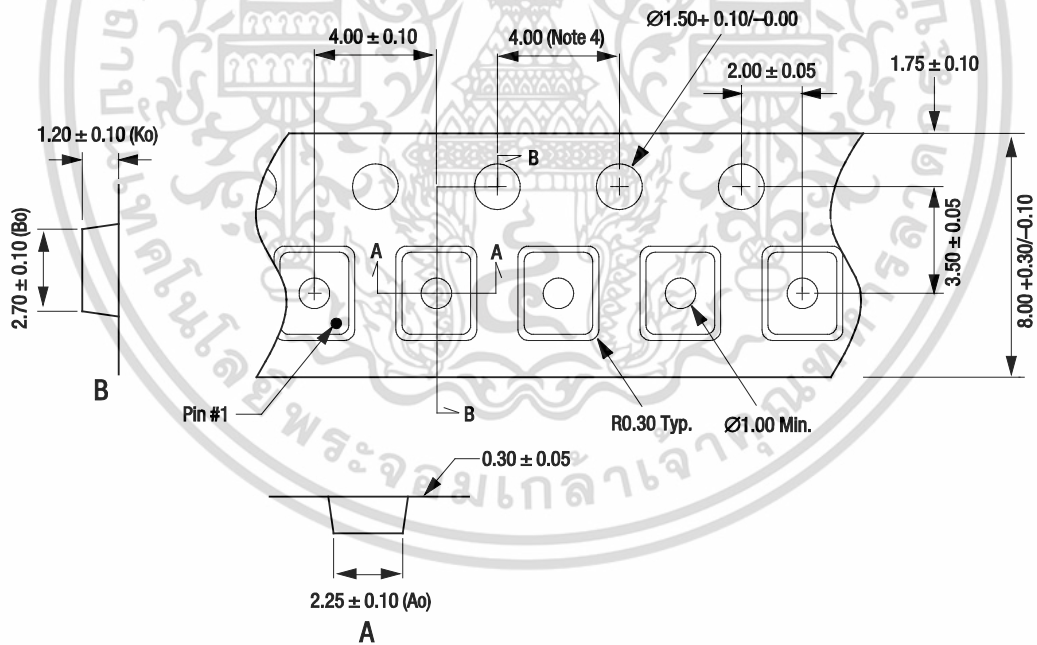


Figure 11. SC-88 Package Dimension Drawing



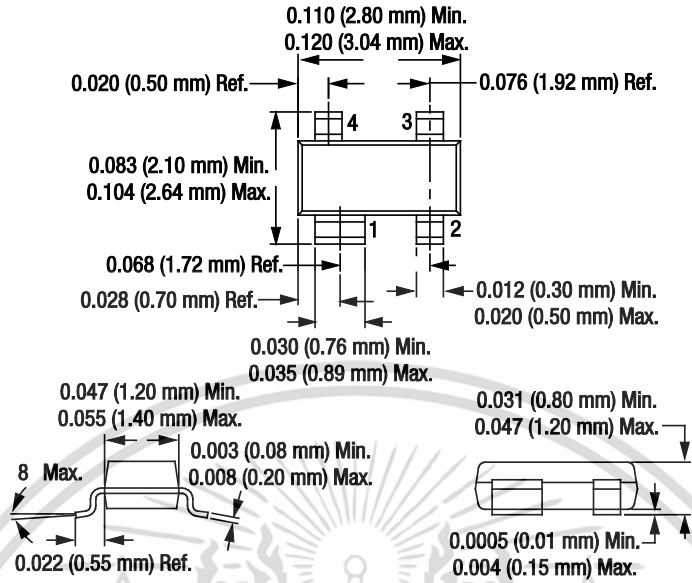
- Notes:
1. Carrier tape: black conductive polystyrene.
  2. Cover tape material: transparent conductive HSA.
  3. Cover tape size: 5.40 mm width.
  4. Ten sprocket hole pitch cumulative tolerance  $\pm 0.20$  mm.
  5. All measurements are in millimeters.
  6. Standard reel size is 7 inches. Standard reel quantity is 3000 pcs.

Figure 12. SC-88 Tape and Reel Dimensions



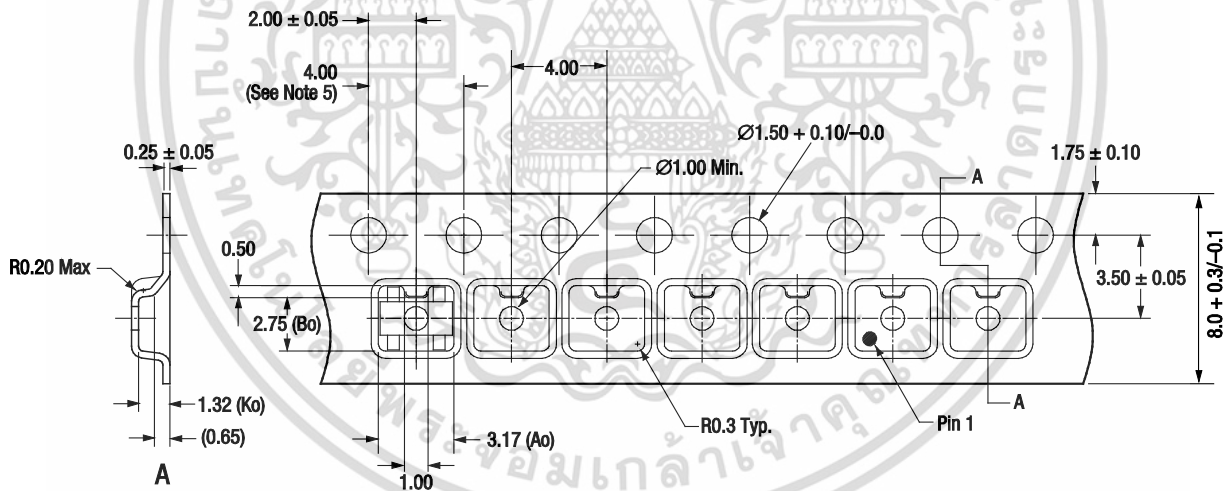






Dimensions are in inches (millimeters shown in parentheses) **S1651**

**Figure 19. SOT-143 Package Dimension Drawing**



**Notes:**

1. Carrier tape: black conductive polycarbonate.
2. Cover tape material: transparent conductive PSA.
3. Cover tape size: 5.4 mm width.
4. Tolerance:  $.XX = \pm 0.10$
5. Ten sprocket hole pitch cumulative tolerance:  $\pm 0.2$  mm.
6. All measurements are in millimeters.

S2515a

**Figure 20. SOT-143 Tape and Reel Dimensions**



Copyright © 2002-2007, 2009-2012, 2013 Skyworks Solutions, Inc. All Rights Reserved.

Information in this document is provided in connection with Skyworks Solutions, Inc. ("Skyworks") products or services. These materials, including the information contained herein, are provided by Skyworks as a service to its customers and may be used for informational purposes only by the customer. Skyworks assumes no responsibility for errors or omissions in these materials or the information contained herein. Skyworks may change its documentation, products, services, specifications or product descriptions at any time, without notice. Skyworks makes no commitment to update the materials or information and shall have no responsibility whatsoever for conflicts, incompatibilities, or other difficulties arising from any future changes.

No license, whether express, implied, by estoppel or otherwise, is granted to any intellectual property rights by this document. Skyworks assumes no liability for any materials, products or information provided hereunder, including the sale, distribution, reproduction or use of Skyworks products, information or materials, except as may be provided in Skyworks Terms and Conditions of Sale.

THE MATERIALS, PRODUCTS AND INFORMATION ARE PROVIDED "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, WHETHER EXPRESS, IMPLIED, STATUTORY, OR OTHERWISE, INCLUDING FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR USE, MERCHANTABILITY, PERFORMANCE, QUALITY OR NON-INFRINGEMENT OF ANY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT; ALL SUCH WARRANTIES ARE HEREBY EXPRESSLY DISCLAIMED. SKYWORKS DOES NOT WARRANT THE ACCURACY OR COMPLETENESS OF THE INFORMATION, TEXT, GRAPHICS OR OTHER ITEMS CONTAINED WITHIN THESE MATERIALS. SKYWORKS SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY DAMAGES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL, STATUTORY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOST REVENUES OR LOST PROFITS THAT MAY RESULT FROM THE USE OF THE MATERIALS OR INFORMATION, WHETHER OR NOT THE RECIPIENT OF MATERIALS HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

Skyworks products are not intended for use in medical, lifesaving or life-sustaining applications, or other equipment in which the failure of the Skyworks products could lead to personal injury, death, physical or environmental damage. Skyworks customers using or selling Skyworks products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Skyworks for any damages resulting from such improper use or sale.

Customers are responsible for their products and applications using Skyworks products, which may deviate from published specifications as a result of design defects, errors, or operation of products outside of published parameters or design specifications. Customers should include design and operating safeguards to minimize these and other risks. Skyworks assumes no liability for applications assistance, customer product design, or damage to any equipment resulting from the use of Skyworks products outside of stated published specifications or parameters.

Skyworks, the Skyworks symbol, and "Breakthrough Simplicity" are trademarks or registered trademarks of Skyworks Solutions, Inc., in the United States and other countries. Third-party brands and names are for identification purposes only, and are the property of their respective owners. Additional information, including relevant terms and conditions, posted at [www.skyworksinc.com](http://www.skyworksinc.com), are incorporated by reference.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล                      ว่าที่ร้อยตรีณศ พุกกะพันธุ์  
 วัน เดือน ปีเกิด                      27 มกราคม 2532  
 ที่อยู่                                      58 หมู่ 10 ถนนเชียงใหม่ – พริ้ว ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย  
     จังหวัดเชียงใหม่ 50290  
 ประวัติการศึกษา                      พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
     สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
     มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] K.Pookkapund, S.Kosulvit, and C.Phongcharoenpanich, “A Dual-band Bidirectional Rectangular Ring Antenna Fed by CDM with Attached Sleeves for WiFi Applications,” Proceedings of the 2013 Thailand-Japan Microwave, Bangkok, 4 pages, Dec. 2013.
- [2] K.Pookkapund, K.Boonying, S.Dentri and C.Phongcharoenpanich, “A Planar Antenna for Wireless Power Transmission System,” Proceedings of the 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2014), Kanazawa, pp.117-118, May 2014.
- [3] K.Pookkapund, K.Boonying, S.Dentri, and C.Phongcharoenpanich, “Planar Array Antenna for WPT System at 2.4 GHz,” Proceedings of the 2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), Kaohsiung, pp.541-542, Dec.2014.
- [4] K.Pookkapund, K.Boonying, S.Dentri and C.Phongcharoenpanich, “Planar Rectenna Design for WPT System at 2.4 GHz,” Proceedings of the 2014 Thailand-Japan Microwave, Bangkok, 2 pages, Dec. 2014.