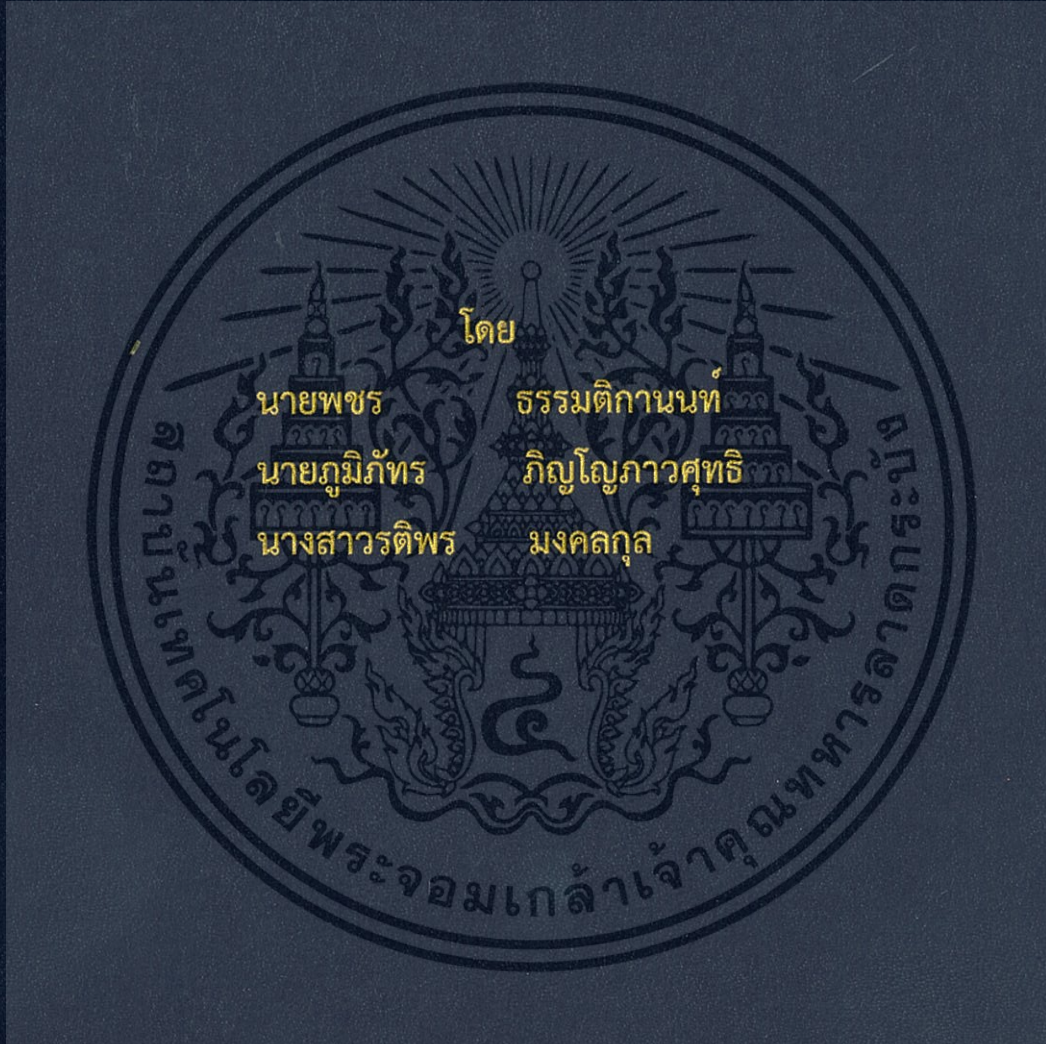


สายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่  
DUAL-BAND SWITCHED-BEAM ANTENNA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องวัดการสะท้อนคลื่นสองย่านความถี่

DUAL-BAND REFLECTOMETER



โดย

นายเพชร ธรรมติกานนท์ 55010811

นายภูมิภัทร ภิญโญภาวศุทธิ 55010963

นางสาวรติพร มงคลกุล 55011019

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์

เลขหมู่.....  
ลงทะเบียน 144371  
ในเดือนปี 24 พ.ย. 2559

b. 12819529  
i. ....

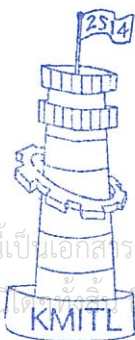
ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558



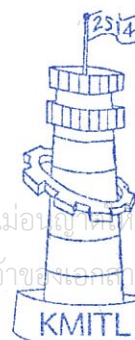
ผ่านการตรวจรูปลงแล้ว

(Signature)  
.....  
อาจารย์ที่ปรึกษา

23 Nov 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(Signature)  
.....  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

23 Nov 59

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดการสะท้อนคลื่นสองย่านความถี่

DUAL-BAND REFLECTOMETER

ผู้จัดทำ

- |                              |          |
|------------------------------|----------|
| 1. นายเพชร ธรรมติگانนท์      | 55010811 |
| 2. นายภูมิภัทร ภิญโญภาวศุทธิ | 55010963 |
| 3. นางสาว รติพร มงคลกุล      | 55011019 |



ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถดำเนินงานสำเร็จได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ผู้ดูแลการดำเนินโครงการและเป็นผู้ช่วยเหลือแนะแนวทางทั้งด้านการศึกษา งานวิจัย กระบวนการคิดและหลักการดำเนินงานวิจัย ซึ่งแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งชี้แนะ แนวทางการในการทำงานและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าเสมอมา ข้าพเจ้าผู้จัดทำโครงการใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านตลอดช่วงชีวิตการศึกษาของข้าพเจ้าที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่มีวิชา PROJECT นี้ขึ้นมา และได้อำนวยความสะดวกในการทำโครงการ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบคุณสมาชิกห้อง T-104 ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจและข้อคิดที่ดีตลอดเวลาที่ผ่านมา โดยเฉพาะ คุณชัยณรงค์ และคุณฉัตรพล เจริญทอง ที่คอยช่วยเหลือในงานวิจัยของข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวข้าพเจ้าทุกคนที่คอยสนับสนุนอันเป็น กำลังใจให้แก่ข้าพเจ้า อีกทั้งยังส่งเสริมทางด้านทุนทรัพย์ของข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วง คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการชิ้นนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายเพชร ธรรมติกานนท์

นายภูมิภัทร ภิญญภาวศุทธิ

นางสาวรติพร มงคลกุล

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่  
DUAL-BAND SWITCHED-BEAM ANTENNA

โดย นายเพชร ธรรมดิگانนท์ 55010811  
นายภูมิภัทร ภิญโญภาวศุทธิ 55010963  
นางสาวรติพร มงคลกุล 55011019

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

เครื่องวัดการสะท้อนสองย่านความถี่เป็นอุปกรณ์เพื่อวัดการสะท้อนของคลื่นจากวัตถุเพื่ออธิบายลักษณะการสะท้อนในสองย่านความถี่ เครื่องวัดการสะท้อนนี้อาศัยสายอากาศสองย่านความถี่ ซึ่งสามารถเลือกทิศทางของได้สองทิศทาง โดยลำคลื่นแรกใช้สำหรับอ้างอิง และอีกลำคลื่นหนึ่งใช้สำหรับวัดวัตถุเป้าหมาย โครงการนี้นำเสนอสายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่ โดยพัฒนามาจากสายอากาศสองทิศทางสองย่านความถี่บนตัวสะท้อนเพื่อให้ได้รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว สายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 915 MHz และ 2450 MHz

ABSTRACT

A dual-band reflectometer is an apparatus for measuring reflected wave from an object to characterize it in two bands. It needs a dual-band antenna which can switch main beam two directions; one beam for calibration and the other beam is for measurement an object. This project presents a dual-band switched beam antenna which is developed from a bidirectional dual-band switched beam antenna on a reflector to obtain unidirectional patterns. The antenna is to operate at 915 MHz and 2450 MHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	IX
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	2
2.1 สายอากาศ	2
2.2 สายอากาศไมโครสตริป	4
2.3 รูปแบบการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.4 เทคนิคการแมตซ์	9
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	19
3.1 การออกแบบ	19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	25
4.1 ผลการจำลองสายอากาศที่ออกแบบไว้	25
4.2 ผลการทดลองหาค่ากำลังสะท้อน	41
4.3 ผลการทดลองรูปแบบการแพร่กระจาย	44

บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	47
	5.1 สรุปผล	47
	5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม		49



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบหลักของการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	2
2.2 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (WIRE ANTENNA)	3
2.3 สายอากาศแบบช่อง (APERTURE ANTENNA)	3
2.4 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (ARRAY ANTENNA)	3
2.5 สายอากาศแบบระนาบหรือสายอากาศแบบไมโครสตริป (PATCH ANTENNA, MICROSTRIP ANTENNA)	4
2.6 จานสายอากาศ (DISH ANTENNA)	4
2.7 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์	6
2.8 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์	6
2.9 ลักษณะบริเวณขอบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ	8
2.10 แผนภาพสมิธ	11
2.11 ส่วนประกอบของแผนภาพสมิธ	12
2.12 การพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนลงบนแผนภาพสมิธ	13
2.13 การวาดวงกลมค่าคงที่ของ SWR	14
2.14 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	15
2.15 การใช้รูปแบบของคลื่นนิ่งในการกำหนดมุมของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	16
2.16 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดโดยใช้วิธีวัดวงจรต่ำสุด	17
3.1 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง PERSPECTIVE VIEW	19
3.2 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง TOP VIEW ของ PATCH	20
3.3 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง SIDE VIEW	20
3.4 ลักษณะของสายอากาศที่ออกแบบ	22
4.1.1.1 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHZ	25
4.1.1.2 การจำลองสายอากาศความถี่ 915MHZเมื่อ FEEDแกน Xของสายอากาศความถี่ 915MHZ	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ FEED แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz	26
4.1.1.4	ค่า $S_{11}$ และ $S_{22}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz	26
4.1.2.1	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	27
4.1.2.2	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน X ของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	28
4.1.2.3	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน Y ของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	28
4.1.2.4	ค่า $S_{11}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	29
4.1.2.5	ค่า $S_{22}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz	29
4.1.3.1	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	30
4.1.3.2	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน X ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	31
4.1.3.3	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	31
4.1.3.4	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ FEED แกน X ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	32
4.1.3.5	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ FEED แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	32
4.1.3.6	ค่า $S_{11}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	33
4.1.3.7	ค่า $S_{22}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	33
4.1.3.8	ค่า $S_{33}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	34
4.1.3.9	ค่า $S_{44}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน	34
4.1.4.1	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน โดยมีแผ่นสะท้อน	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.2	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ FEED แกน X สายอากาศ ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	36
4.1.4.3	การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ FEED แกน Y สายอากาศ ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	37
4.1.4.4	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน X สายอากาศ ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	37
4.1.4.5	การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ FEED แกน Y สายอากาศ ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	38
4.1.4.6	ค่า $S_{11}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มา วางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	38
4.1.4.7	ค่า $S_{22}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มา วางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	39
4.1.4.8	ค่า $S_{33}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มา วางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	39
4.1.4.9	ค่า $S_{44}$ จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มา วางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน	40
4.2.1	การไบแอสวงจรสวิตช์ความถี่	41
4.2.2	การต่อวงจรเลือกทิศทางการสวิตช์	42
4.2.3	ค่า $S_{11}$ เมื่อไม่ทำการไบแอส	42
4.2.4	ค่า $S_{11}$ เมื่อทำการไบแอสสวิตช์ที่พอร์ต 1	43
4.2.5	ค่า $S_{11}$ เมื่อทำการไบแอสสวิตช์ที่พอร์ต 2	43
4.3.1	รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 915 MHz (ก.) E-PLANE (ข.) H-PLANE	44
4.3.2	รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 2.45 GHz (ก.) E-PLANE (ข.) H-PLANE	45
4.3.3	รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 2 ความถี่ 915 MHz (ก.) E-PLANE (ข.) H-PLANE	45
4.3.4	รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 2 ความถี่ 2.45 GHz (ก.) E-PLANE (ข.) H-PLANE	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5	การทดลองวัดรูปแบบการแพร่กระจาย	46
5.1.1	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	47
5.1.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกับอัตราส่วน ขนาดของสัญญาณ	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ	22
4.1.1.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 915 MHZ ที่จำลองไว้	27
4.1.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 2.45 GHZ ที่จำลองไว้	30
4.1.3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 2.45 GHZ และ 915 MHZ ที่จำลองไว้	35
4.1.4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศความถี่ 915 MHZ และ 2.45 GHZ มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อนที่จำลองไว้	41
4.2.1 สรุปค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHZ และ 2.45 GHZ ที่ตำแหน่งพอร์ตต่างๆ	44



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อาศัยการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรเพื่อนำรายได้สู่ประเทศจำนวนมาก เช่น ทุเรียน สับปะรด ที่มีการส่งออกอันดับต้น ๆ ของประเทศ อย่างไรก็ตามผู้บริโภคมักมีปัญหา เมื่อซื้อมาแล้วไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ เนื่องจากการเก็บผลผลิตที่เป็นผลไม้ดิบมาปะปนกับผลไม้ดี การใช้สารเคมีเพื่อเร่งการสุก ความแห้งแล้งในช่วงเก็บเกี่ยว ซึ่งทำให้ต้องมีการเก็บเกี่ยวผลไม้ขณะที่ยังดิบ ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อ การส่งออกผลไม้มากขึ้น ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเศรษฐกิจของประเทศ จึงต้องมีการคัดคุณภาพของผลไม้ให้มีคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาด

จากปัญหาข้างต้นจึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความอ่อน-แก่ของผลไม้โดยใช้สายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่วัดค่ากำลังการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งสามารถเพิ่มความสะดวกในการวัดความอ่อน-แก่ของผลไม้ และช่วยให้ผู้ที่ไม่มีความเชี่ยวชาญสามารถแยกแยะความอ่อน-แก่ของผลไม้ได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาหลักการและทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป
- 2) ออกแบบและประดิษฐ์สายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่
- 3) เพื่อนำผลงานที่ได้ไปช่วยเพิ่มความสะดวกในการวัดความอ่อน-แก่ของผลไม้สำหรับผู้ที่ไม่มีความเชี่ยวชาญในการคัดแยก
- 4) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ความรู้ด้านวิศวกรรมกับงานเกษตรกรรม

#### 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

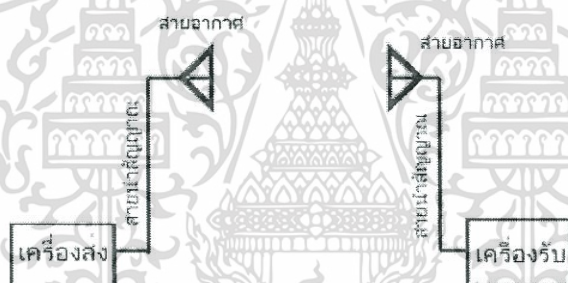
ประดิษฐ์สายอากาศปรับทิศทางสองย่านความถี่เพื่อนำไปตรวจสอบความอ่อน-แก่ของผลไม้ โดยใช้ย่านความถี่ที่ 915 MHz และ 2.45 GHz เพื่อวัดค่ากำลังการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความอ่อน-แก่ของผลไม้ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สายอากาศ

เป็นอุปกรณ์สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่ทั้งในย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency) และความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Frequency) ในการสื่อสารแบบที่ใช้การกระจายคลื่นนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆคือ เครื่องส่ง (Transmitter) สายนำสัญญาณ (Transmission Line) สายอากาศ (Antenna) และเครื่องรับ (Receiver) โดยสายนำสัญญาณ จะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ หรือจากสายอากาศมายังเครื่องรับ สายอากาศนั้น อาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งให้เป็นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันก็จะทำหน้าที่รับกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วส่งเข้าสายนำสัญญาณในรูปของกำลังไฟฟ้า เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องรับต่อไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

##### 2.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire Antenna)

เป็นสายอากาศที่พบมากที่สุด เพราะมีให้เห็นอยู่ทั่วไปไม่มีใช้งานในทุกรูปแบบ เช่น ดึก อาคาร รถยนต์ เรือ เครื่องบิน ยานอวกาศ และอื่นๆ รูปร่างของสายอากาศยังแยกย่อยได้อีกได้แก่สายอากาศแบบเส้นตรง เช่น ไดโพลแบบวง และสายอากาศแบบวงก้นหอยคล้ายสปริง สายอากาศแบบลูบไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลมอาจจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือลักษณะอื่นๆ ส่วนลูบชนิดวงกลมนั้นจัดว่ามีใช้งานมากที่สุดเพราะง่ายในการสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



Wire Antenna

รูปที่ 2.2 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (Wire antenna) [1]

### 2.1.2 สายอากาศแบบช่อง (Aperture Antenna)

เริ่มมีการใช้งานสายอากาศชนิดนี้มากในอดีตโดยเฉพาะในการใช้งานย่านความถี่สูง สายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์มากในด้านการบิน หรือยานอวกาศเนื่องจากความสะดวกในการติดตั้ง และยังสามารถหุ้มด้วยฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าได้ เพื่อป้องกันสภาพที่เป็นอันตรายต่อระบบสื่อไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

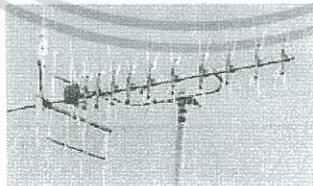


Aperture Antenna แบบ Pyramid Horn

รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบช่อง (Aperture Antenna)[1]

### 2.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array Antenna)

การประยุกต์ใช้งานสายอากาศโดยส่วนมากแล้วจะมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นไม่เหมือนกัน ทำให้เกิดวิธีการนำเอาสายอากาศมาใช้งานร่วมกันเพื่อตอบสนองกับความต้องการ ใช้งานต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



Array Antenna

รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array Antenna) [1]

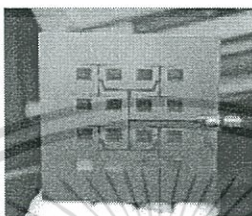
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 สายอากาศแบบระนาบหรือสายอากาศแบบไมโครสตริป (Patch Antenna, Microstrip Antenna)

สายอากาศชนิดนี้เป็นการพัฒนารูปแบบหนึ่งของสายอากาศเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น

โทรศัพท์มือถือ ลักษณะอุปกรณ์จึงแบนคล้ายกับแผ่นทองแดงทั่วไป และเนื่องจากถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับความถี่ใดความถี่หนึ่งโดยเฉพาะ รูปร่างจึงอิงตามความเหมาะสมของความถี่ใช้งานเป็นหลักสามารถแสดงได้ดังรูปที่

2.5

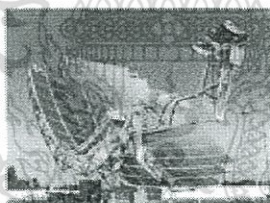


Microstrip Array Antenna

รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบระนาบหรือสายอากาศแบบไมโครสตริป (Patch Antenna, Microstrip Antenna) [1]

#### 2.1.5 จานสายอากาศ (Dish Antenna)

ใช้งานกับดาวเทียมหรือการสื่อสารที่มีระยะทางไกลมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ข้อเสียคือทิศทางแคบมากที่สุด จึงคลาดเคลื่อนไม่ได้ และสายอากาศชนิดนี้มีขนาดใหญ่ที่สุดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



Dish Antenna

รูปที่ 2.6 จานสายอากาศ (Dish Antenna) [1]

สายอากาศที่ใช้ในโครงการนี้ เลือกใช้สายอากาศไมโครสตริป เพราะมีน้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างได้ และต้นทุนต่ำ

## 2.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สายอากาศนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งภาครัฐและบุคคลทั่วไป โดยสามารถพบได้จาก โทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์ รวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

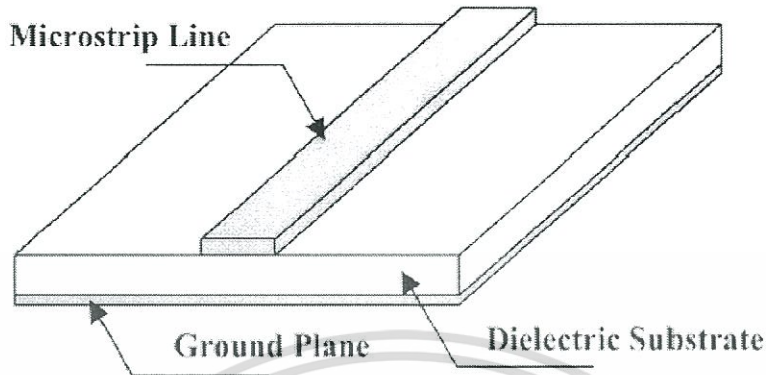
งานระบบ wifi สายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วย ชิ้นตัวนำ (Patch) วางอยู่บนวัสดุฐานรองที่เรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) รูปทรงของชิ้นตัวนำนั้นสามารถออกแบบได้หลากหลายรูปแบบ เพราะสร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย มีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นที่ดี มีรูปร่างไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำ

## 2.2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของสายส่งและสายอากาศแบบไมโครสตริป

### 2.2.1.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line)

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 กล่าวคือจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆอยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นฉนวนที่นิยมเรียกกันว่าสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane) พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆกับระนาบกราวด์ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของไมโครสตริปไลน์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของสายโคแอกเซียลที่ต้องการสำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกถึงคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับ Free Space ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปไลน์มีการเปลี่ยนแปลงค่า Loss Tangent ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นฉนวนนั้นมีการสูญเสียอันเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใดโดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดี ค่าคงตัวของความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใดค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี ค่าสุดท้ายเป็นค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกันเพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริปไลน์ เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่าความขรุขระมาก สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าทนแรงไฟสูงจะดีกว่าค่าทนแรงไฟต่ำ

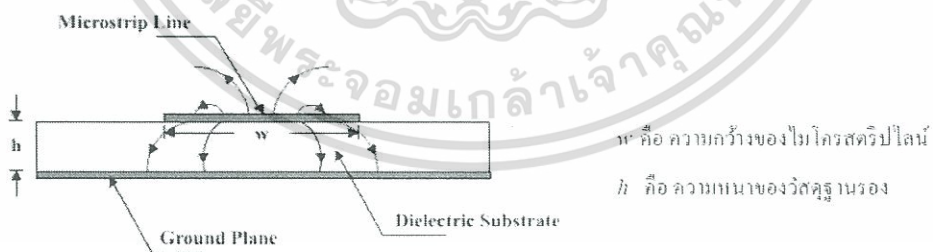
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ [1]

#### 2.2.2.2 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริปไลน์

ถึงแม้ว่าสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างแบบง่ายๆ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปไลน์โดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณแบบอื่น อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่าคลื่นที่ส่งผ่านไปตามไมโคร-สตริปไลน์นั้นจะใกล้เคียงกับโหมด TEM (Transverse ElectroMagnetic) มากแต่จะไม่ใช่มอด TEM เสียทีเดียวจึงเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) ซึ่งแสดงดังรูปข้างล่างนี้โดยแสดงถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งแบบไมโครสตริปไลน์



รูปที่ 2.8 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ [1]

สำหรับสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์นี้คลื่นที่ส่งผ่านในโหมดให้เป็นโหมด TEM โดยสามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ได้กล่าวคือถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ก็จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ได้

การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะมีความยุ่งยากมากกว่าปกติแต่ก็มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้นโดยใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant:  $\epsilon_{\text{eff}}$ ) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกันและเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่ได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วยพบว่าในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมากจึงให้ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไฟฟ้าสถิตได้สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz จะต้องคำนึงถึงการปรับแต่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้คือเมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปโมโครสตริปเป็นโหมด TEM คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ ( $Z_0$ ) ของสายส่งสัญญาณจะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ (L) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่าคาปาซิแตนซ์ ( $C_0$ ) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ในรูปต่อไปนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $Z_0$  เป็นอิมพีแดนซ์ทางสูญญากาศ (Free space impedance)

$C_0$  เป็นคาปาซิแตนซ์เมื่อวัสดุฐานรองเป็นอากาศ

ในขณะที่ความถี่ความถี่เฟส (Phase Velocity:  $v_p$ ) จะเขียนได้เป็น

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.2)$$

การพิจารณากรณีที่วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกถูกเอาออกไปเหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่โอบล้อมสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปอยู่ซึ่งในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะมีค่าเท่ากับความเร็วแสงและค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไปโดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกกระทบถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C กับความเร็วเฟสในรูปต่อไปนี้

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

ในขณะที่ความถี่ค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ ( $Z_c$ ) ก็เขียนได้ดังนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.4)$$

เมื่อนำสมการ (2.3) หารด้วย (2.2) จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C_0}{C} = \left(\frac{v_p}{v_c}\right)^2 \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามนิยามโดยทั่วไปค่าของ  $\frac{c_0}{c}$  เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสารไดอิเล็กตริกที่โบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ค่านี้จะเปรียบเสมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์ที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านบนเป็นอากาศอยู่นั้นคือ

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.6)$$

โดยทั่วไปความยาวคลื่นในวัสดุฐานรองสามารถหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\lambda_g$  เป็นความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง (Guide wavelength)

$c$  เป็นความเร็วแสงในอากาศ (Speed of light)

$f$  เป็นความถี่ที่ใช้งาน (Operating frequency)

### 2.3 การจำลองแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศเพื่อที่จะต้องการหาลักษณะรูปแบบทิศทางของสนามไฟฟ้าบนสายอากาศแบบไมโครสตริปสำหรับระยะการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะซึ่งได้แก่ระยะแรกคือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจินตภาพ (Reactive field) เป็นบริเวณที่อยู่รอบ ๆ สายอากาศซึ่งหาค่าได้จาก

สมการที่ (2.8)



รูปที่ 2.9 ลักษณะบริเวณขอบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระยณะนี้ยังไม่มีกรแพร่กระจายของคลื่นใน 3 ส่วนประกอบของพิกัดทรงกลม ( $R, \theta, \phi$ )

$$0 < R < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น ระยะที่ 2 คือบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้ (Radiating Near-Field) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.9)

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

เมื่อ  $D$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นทรงกลม 2 มิติของขนาดสายอากาศด้านที่กว้างที่สุดและระยะสุดท้ายคือบริเวณแผ่พลังงานสนามไกล (Radiating Far-Field) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.10)

$$R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.10)$$

ระยะนี้ทิศทางของสนามไฟฟ้ามีเฉพาะ 2 ส่วนประกอบของพิกัดทรงกลม ( $\theta, \phi$ ) ในการวิเคราะห์ขอบเขตของสนามไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 1 บริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจินตภาพคือ  $0 < R < R_1$  สนามไฟฟ้าบริเวณแผ่พลังงานสนามใกล้คือ  $R_1 < R < R_2$  และระยะสุดท้ายสนามไฟฟ้าบริเวณแผ่พลังงานสนามไกลคือ  $R_2 < R$  การหาระยะบริเวณสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นประโยชน์ในการหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ออกแบบ [2]

## 2.4 เทคนิคการแมตช์ (Matching Techniques)

### 2.4.1 การแมตช์

ในทางปฏิบัติ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณจะเป็นค่าจำนวนจริงเสมอ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของความถี่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของทั้งสองส่วนซึ่งต้องต่อร่วมกันให้มีการเชื่อมต่อที่แมตช์กันมากที่สุดตลอดย่านความถี่ที่กำหนดให้

Stub-matching การแมตช์ในอุดมคติที่ความถี่ที่กำหนดให้ สามารถทำได้โดยการติดตั้งสตั๊บบแบบปลายเปิดหรือแบบลัดวงจรที่ปลายขนานเข้ากับสายนำสัญญาณที่ระยะเท่ากับ  $s$  จากจุดต่อระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ เมื่อมีการปรับระยะ  $s$  จะทำให้ส่วนที่เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ และหากเปลี่ยนแปลงความยาว  $l$  ของสตั๊บบจะทำให้ค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance) ของสตั๊บบมีขนาดเท่ากับค่าซัสเซพแตนซ์ของจุดต่อระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ แต่จะมีเฟสตรงกันข้ามกัน ซึ่งขั้นตอนในการแมตช์สามารถใช้ Smith Chart มาช่วยในการกำหนดความยาว  $l$  และ  $s$  ของสตั๊บบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

จากทฤษฎีสายส่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของโหลด โดยที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่โหลด  $\Gamma_L$  และอิมพีแดนซ์ของโหลด  $Z_L$  มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.11)$$

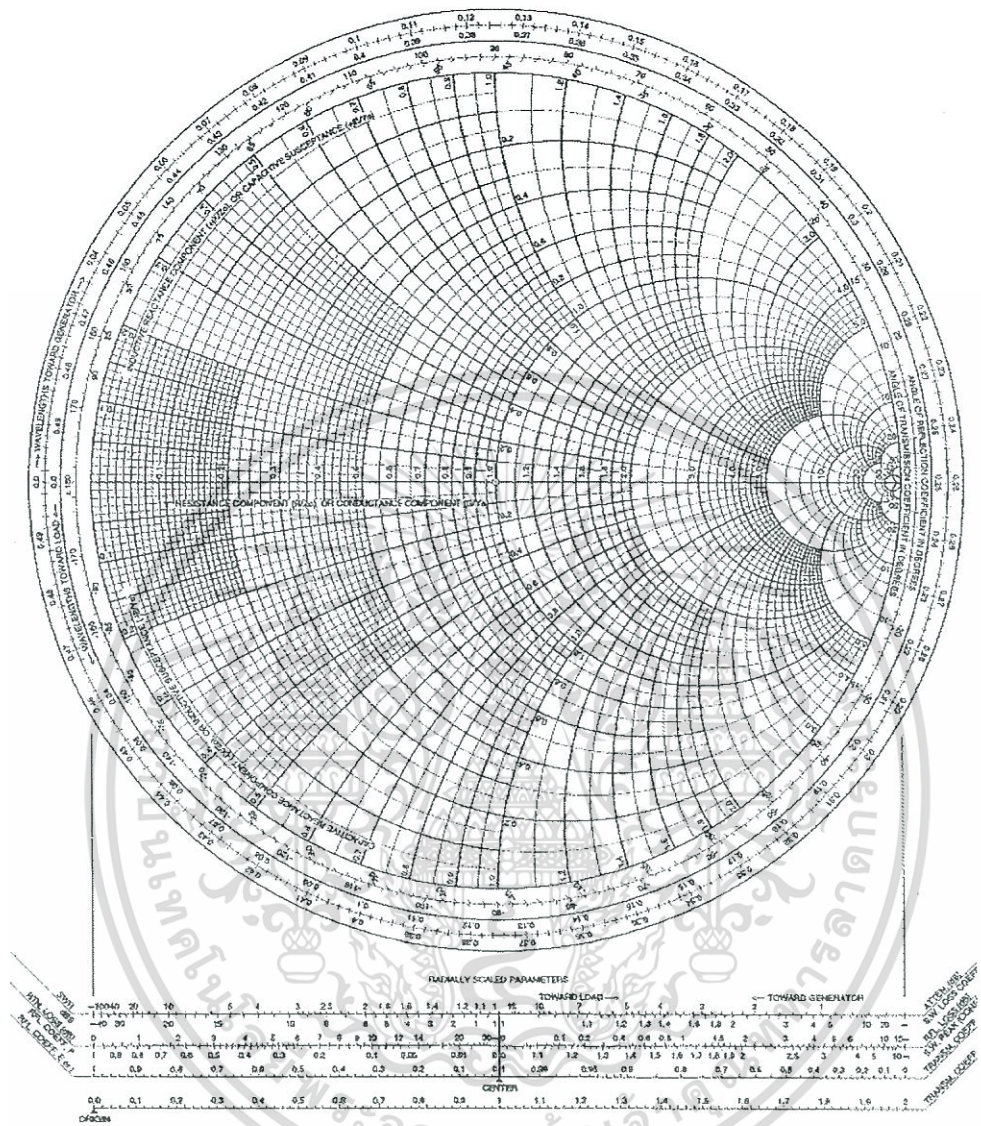
$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $Z_0$  คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของของท่อนำคลื่น  
 $Z_L$  เป็นจำนวนเชิงซ้อนประกอบด้วยจำนวนจริง (real) ที่เป็นส่วนของความต้านทาน  $R$  และจำนวนจินตภาพ (imaginary) ที่เป็นส่วนของรีแอคทีฟ  $X$   
 และ  $\Gamma_L$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาดและเฟส

### 2.4.3 แผนภาพสมิท (Smith Chart)

การคำนวณหาขนาดและเฟสของ  $\Gamma_L$  จาก  $Z_L$  และ  $Z_0$  หรือกลับกันเราสามารถใช้อิมพีแดนซ์สมิทแทนการคำนวณที่สับสนนี้ได้ แผนภาพสมิทเป็นเครื่องมือคำนวณแบบกราฟฟิกส์ ที่พัฒนาโดย Smith ในปี ค.ศ. 1939 สามารถใช้ในการคำนวณสายส่งสัญญาณ (transmission line) ได้ง่ายขึ้น ในรูปที่ 2.10

รูปร่างหลักของแผนภาพ ในระบบประกอบขึ้นจากรวงกลม 2 กลุ่ม ที่จัดเตรียมไว้สำหรับอ่านค่าปริมาณต่างๆ ของสายส่งสัญญาณได้โดยตรงจากแผนภาพเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน วงกลมที่หนึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของแผนภาพแต่ละวงกลมแสดงจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง อยู่ที่ปลายของเส้นผ่านศูนย์กลางทางขวามือ ซึ่งมีค่าเท่ากับความต้านทาน (resistance) ค่าความต้านทานของแต่ละวงกลมบนเส้นผ่านศูนย์กลางของแผนภาพสมิทวงกลมกลุ่มที่ 2 มีศูนย์กลางอยู่บนเส้นที่ลากผ่านจุด "Common" ของวงกลมความต้านทานและเส้นนั้นตั้งฉากกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter line) ดังแสดงในรูป 2.11 (ข) แต่ละวงกลมของกลุ่มที่ 2 นี้ คาร์เรคแตนต์ (reactance) จะแสดงค่าตรงขอบนอกของแผนภาพสมิท

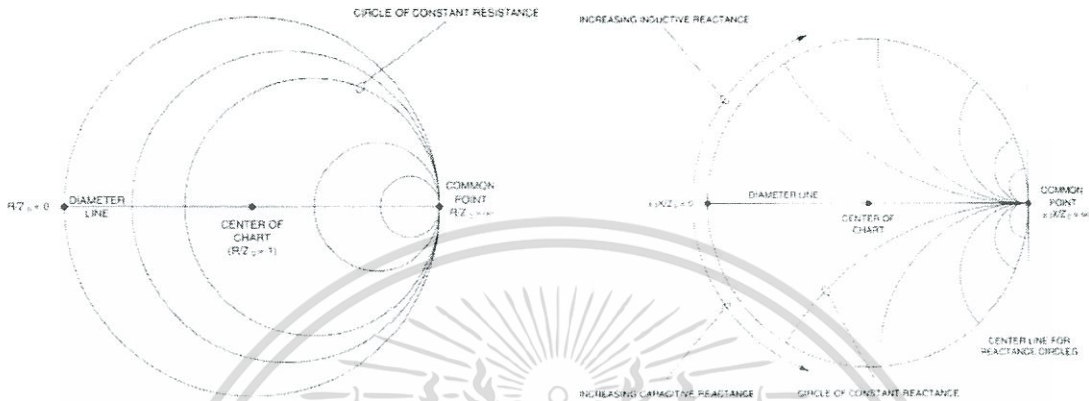


รูปที่ 2.10 แผนภาพสมิท

โดยปกติทั้งค่าความต้านทานและค่าความต้านทานที่แสดงบนแผนภาพสมิทก็คืออิมพีแดนซ์  
 คุณลักษณะ นั่นคือค่าความต้านทานบนแผนภาพ จะตรงกับ  $R/Z_0$  และค่าความต้านทานบนแผนภาพสมิทจะตรง  
 กับ  $X/Z_0$  เพราะว่าเป็นค่าอิมพีแดนซ์ปกติ แผนภาพสมิทอาจใช้กับท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณใดๆ สเกล  
 อิมพีแดนซ์ ทั้งสองเริ่มต้นที่ค่าศูนย์ที่ซ้ายมือสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางและจบที่ขวามือสุดที่ค่าอนันต์ (infinity) ของ  
 เส้นผ่านศูนย์กลางบนเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีค่าความต้านทานเท่ากับค่าศูนย์ เหนือเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นไปความ  
 ต้านทาน จะมีค่าเป็นบวก หรืออินดักทีฟ ในขณะที่ใต้เส้นผ่านศูนย์กลางความต้านทานมีค่าเป็นลบหรือคาปาซิทีฟที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบนอกของแผนภาพค่าความต้านทานเท่ากับศูนย์และจุดที่ R/Z0 เท่ากับ 1 บนเส้นผ่านศูนย์กลางคือจุดศูนย์กลางของแผนภาพ



(ก) วงกลมค่าความต้านทาน (ข) วงกลมค่ารีแอกแตนซ์  
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของแผนภาพสมิท

การใช้งานแผนภาพสมิท

1. การพล็อต (plot) ค่าอิมพีแดนซ์

ตัวอย่าง เมื่อกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด  $Z_L = 5 + j25 \Omega$  โดยที่อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งมีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  (นั่นคือเมื่อ  $Z_0 = 50 \Omega$ )

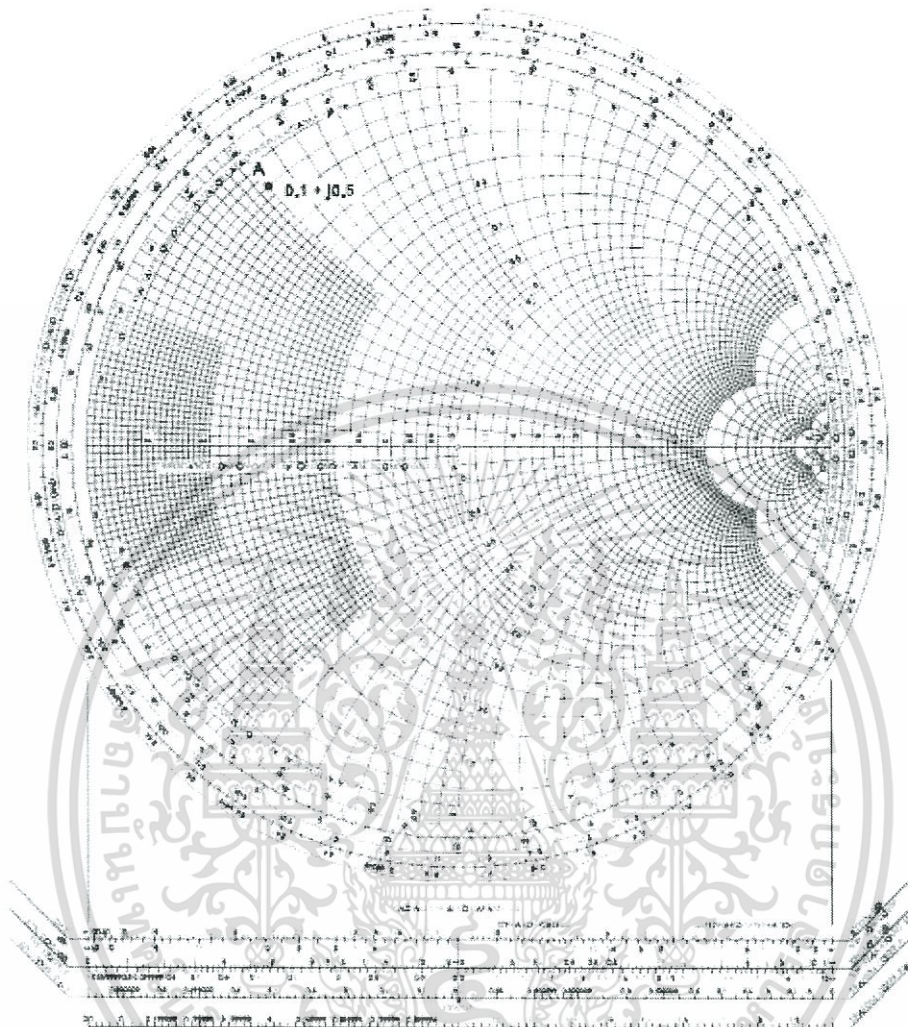
1.1 หาค่านอร์มัลไลซ์อิมพีแดนซ์ (normalized impedance) โดยการนำค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดส่งหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Z_{nor} = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{5}{50} + j\frac{25}{50} = 0.1 + j0.5$$

1.2 ที่จุดปลายซ้ายมือสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางเคลื่อนที่ไปทางขวามือถึงตรงความต้านทานเท่ากับ 0.1 ให้เขียนจุดไว้

1.3 ต่อไปจากจุดที่เขียนไว้บนเส้นวงกลมความต้านทานให้ลากขึ้นไป (หรือลากลงถ้าความต้านทานมีค่าเป็นลบ) จนกระทั่งตัดกับวงกลมค่าความต้านทานที่ตำแหน่งค่าความต้านทานเท่ากับ 0.5 นี้คือจุดที่แสดง  $0.1 + j0.5$  ดังที่เขียนตัว A แสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



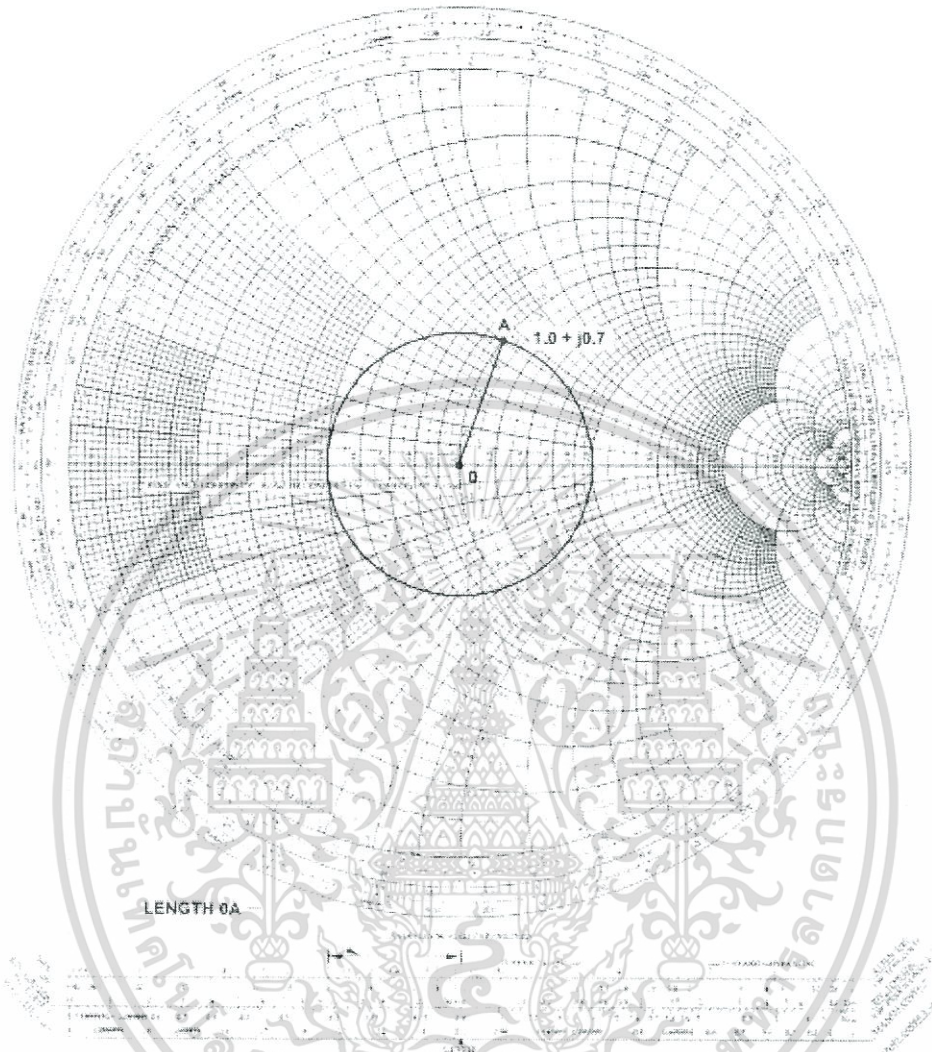
รูปที่ 2.12 การพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนลงบนแผนภาพสมิท

## 2. การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) เมื่อกำหนดโหลด

ตัวอย่าง คำนวณหาค่า SWR เมื่อสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ  $50 \Omega$  ถูกต่อกับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์

- 2.1 พล็อตค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณในตัวอย่างที่ 1 นั่นคือ  $Z_L = 1 + j0.7$  แสดงในรูปที่ 2.13 บนจุด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การวาดวงกลมค่าคงที่ของ SWR

2.2 ใช้วงเวียนเขียนวงกลมโดยให้จุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง  $1 + j0$  ให้ตัดผ่านจุดอิมพีแดนซ์  
วงกลมนี้ เรียกว่าวงกลมค่าคงที่ของ SWR

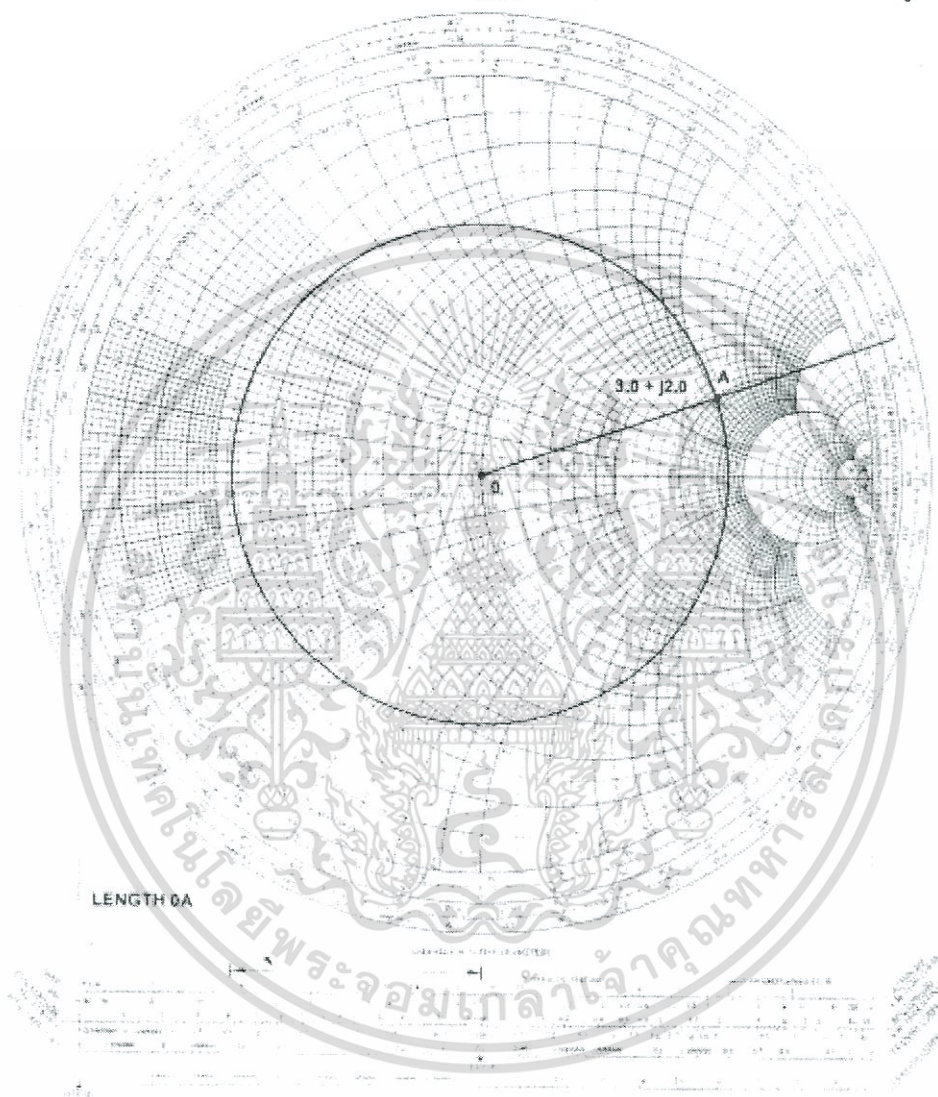
2.3 อ่าน SWR จากวงกลมนี้ ที่จุดที่ตัดกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งอยู่ทางขวามือ (SWR = 2) หรือให้กางวง  
เวียนโดยมีระยะจากจุดศูนย์กลางที่จุด  $1 + j0$  ถึงจุด A ตาม “Radically Scaled Parameter” (สเกล  
พารามิเตอร์ที่แบ่งตามรัศมีของวงกลม) จะได้ Standing Wave สเกลวางขาหนึ่งของวงเวียนบนจุดศูนย์กลางบน  
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Line) แล้วหาว่าอีกขาหนึ่งตัดที่จุดใดบนคลื่นนิ่งสเกลนี้จะให้ทั้งค่าอัตราส่วน  
(Ratio) และค่า dB (SWR = 2.0 หรือ 6.0 dB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อรู้ค่าโหลด

หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโดยต่อสาย 50  $\Omega$  กับโหลด  $150 + j100 \Omega$

#### 3.1 ทำการพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ( $Z_{Lnor} = 3 + j2$ ) และเขียนวงกลม VSWR ดังรูปที่ 2.14

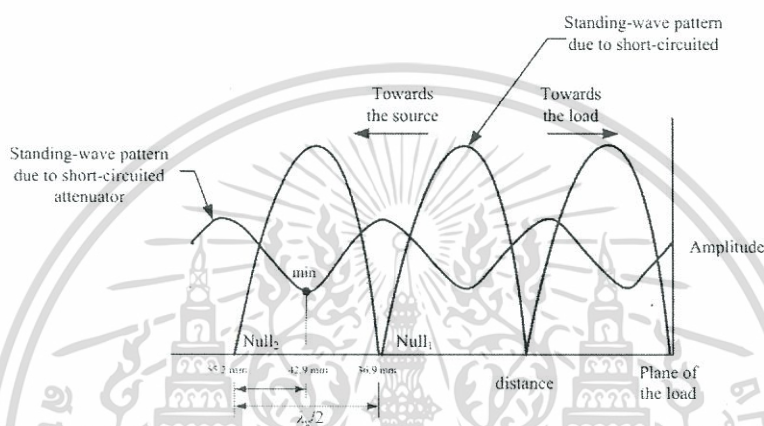


รูปที่ 2.14 การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

3.2 กางวงเวียนรัศมีเท่ากับวงกลม SWR แล้วน าระยะนี้ไปเทียบบนสเกล “Voltage (E) Reflection Coefficient” โดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดศูนย์กลางแล้ว อ่านค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับบนสเกลนี้ ( $\rho = 0.63$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ลากเส้นเริ่มจากจุดศูนย์กลางของแผนภาพ  $(1 + j0)$  ให้ผ่านจุด A ไปยังสเกล “Angle Of Reflection Coefficient in Degrees” ที่ขอบของแผนภาพและอ่านค่ามุมเฟสสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $\phi = 18^\circ$ )  
 หมายเหตุ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $\Gamma$ ) อาจเขียนอยู่ในรูปแบบโพล่า  $\rho$  และ  $\phi$  ได้ เมื่อ  $\rho$  คือขนาด และ  $\phi$  คือเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ในทางกลับกันสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ)



รูปที่ 2.15 การใช้รูปแบบของคลื่นนิ่งในการกำหนดมุมของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

4. หาค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้สล็อตไลน์และแผนภาพสมิท (วิธีเลื่อนค่าต่ำสุดของโหลดแบบลัดวงจร)  
 ตัวอย่าง คำนวณหาอิมพีแดนซ์ของโหลดเมื่อมี  $SWR = 3$  ที่หน้าคลื่น (กำหนดว่า  $SWR$  วัดด้วยสล็อตไลน์)

4.1 พล็อตวงกลมค่าคงที่ของ  $SWR$  แสดงในรูปที่ 2.16

4.2 ใช้สล็อตไลน์หามุมเฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $\phi$

4.2.1 นำโหลดแบบลัดวงจรไปแทนโหลดที่ไม่รู้ค่า ทำการหาค่า  $NULL_1$  เป็นตำแหน่งของค่าต่ำสุดของคลื่นนิ่ง ให้เลือกตำแหน่งที่ใกล้กับโหลดแบบลัดวงจรมากที่สุด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15 จะพบว่าอุปกรณ์ Lab-Volt นั้น  $NULL_1$  แสดงค่าต่ำสุดที่วัดได้เมื่ออยู่ใกล้โหลดแบบลัดวงจร

ตำแหน่ง  $NULL_1 = 36.9$  ม.ม.

4.2.2 คำนวณหาตำแหน่งที่ค่าต่ำที่สุดตำแหน่งไปที่ไปยังแหล่งจ่าย

ตำแหน่ง  $NULL_2 = 55.2$  ม.ม.

4.2.3 แทนโหลดแบบลัดวงจรที่ต้องการให้หาด้วยค่า MIN ซึ่งเป็นตำแหน่งของค่าต่ำสุดที่พบระหว่างจุด  $NULL_1$  และ  $NULL_2$

ตำแหน่ง MIN = 42.9 ม.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

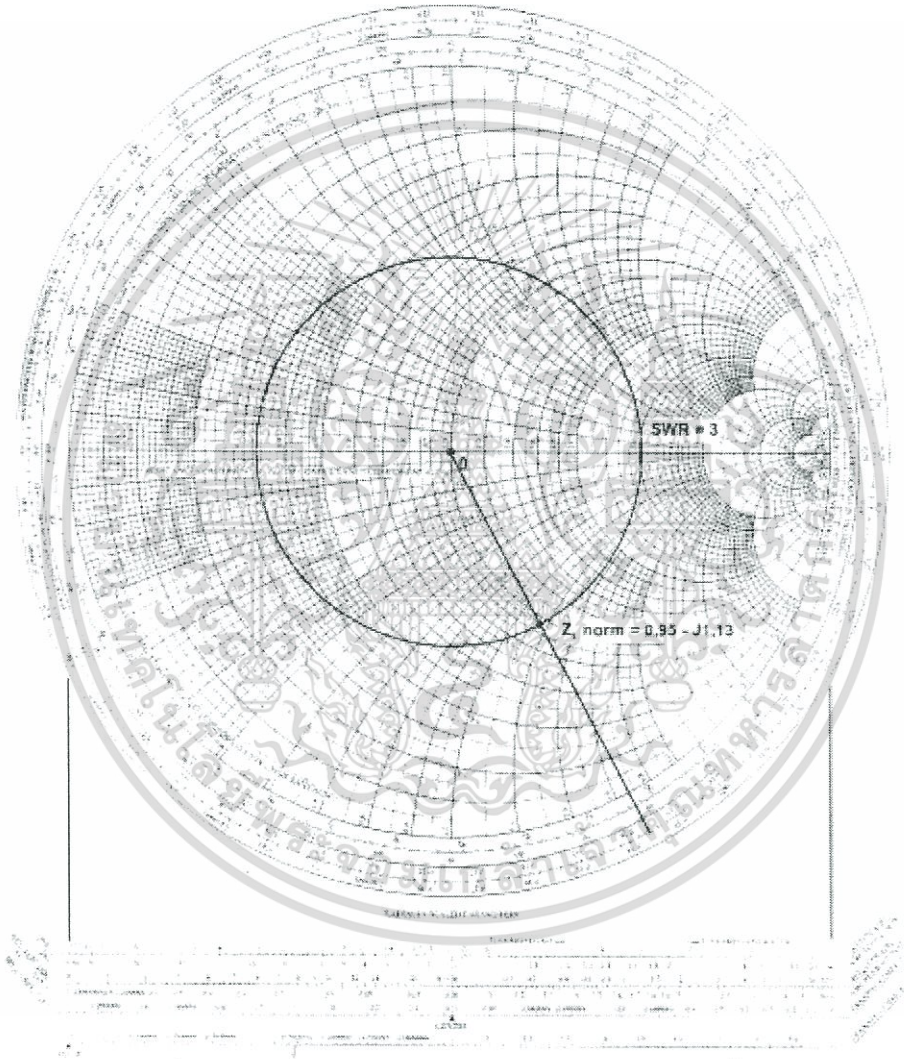
4.2.4 ทหารยะ d ระยะเลื่อนไปของค่าต่ำสุด ได้ดังนี้

$$d = \text{NULL}_2 - \text{MIN} = 55.2 - 42.9 = 12.3 \text{ ม.ม.}$$

4.2.5 หาความยาวคลื่นของท่อนำคลื่นจากจุด  $\text{NULL}_1$  และ  $\text{NULL}_2$

$$\lambda_g = 2 (\text{NULL}_2 - \text{NULL}_1) = 2 (55.2 - 36.2) = 36.6 \text{ ม.ม.}$$

4.2.6 คำนวณหามุมเฟสของลัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $\phi$



รูปที่ 2.16 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดโดยใช้วิธีลวดวงจรต่ำสุด

4.3 ในรูปที่ 2.16ลากเส้นจากจุดศูนย์กลางของแผนภาพ  $(1 + j0)$  ไปยังวงกลมนอกสุดที่สเกล “Angle of The Reflection Coefficient in Degrees” ตำแหน่งมุม  $-62^\circ$  และอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ณ จุดที่เส้นตัดวงกลม SWR ( $Z_{Lnor} = 0.95 - j1.13$ )

วิธีการนี้ใช้หาค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดใดๆ บนท่อนำคลื่น อีกอย่างหนึ่งคือหาอิมพีแดนซ์ที่จุดนั้น ใช้สเกล “Wavelength Toward Load” หรือ “Wavelength Toward Generator” ในการหาอิมพีแดนซ์ที่จุดใดๆ บนท่อนำคลื่น



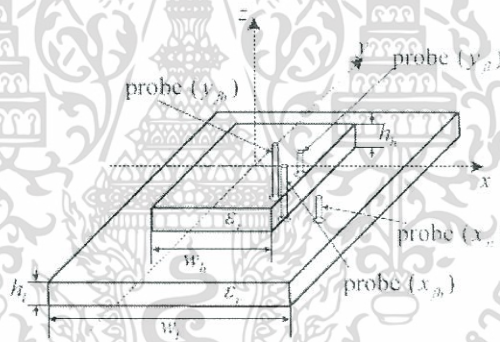
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

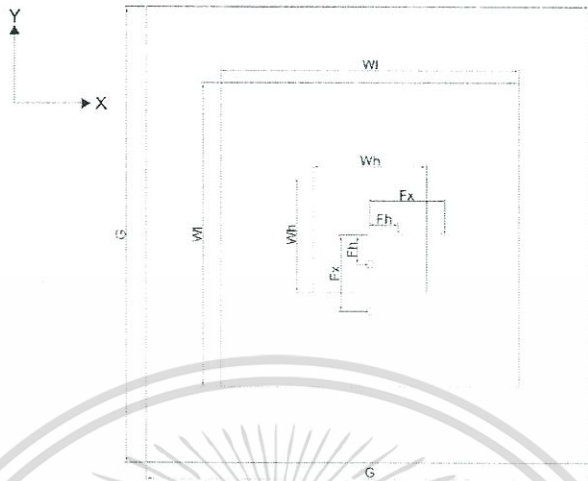
#### การออกแบบและการจัดทำปริภูมิงาน

##### 3.1 การออกแบบ

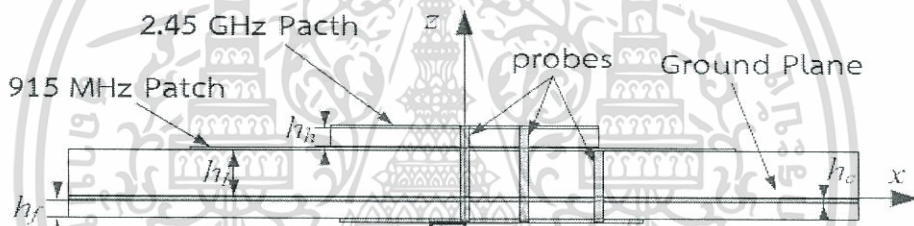
จากทฤษฎีเรื่องของ TM Mode นั้นเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศได้ กล่าวคือถ้าเราต้องการให้สายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายสองทิศทางหลักนั้น ต้องทำการออกแบบให้ Microstrip patch antenna นั้นมีลักษณะในการทำงานเป็น TM Second mode สามารถออกแบบเมื่อ Patch มีความกว้างยาวที่เหมาะสม โดยความกว้างยาวของตัว Patch นั้นจะมีผลต่อ TM mode ค่าของ  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  โดยที่ค่าของ  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  จะเป็นสิ่งที่สามารถบ่งบอกว่าสายอากาศนี้เหมาะสมกับความถี่นี้หรือไม่ ยิ่งค่าของ  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  มีค่าที่น้อยยิ่งมีความเหมาะสมต่อความถี่นั้นๆ



รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง Perspective view [4]



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง Top view ของ Patch



รูปที่ 3.3 ลักษณะของสายอากาศในมุมมอง Side view [4]

### 3.1.1 พารามิเตอร์ต่างๆ

$S_{11}$  คือ ค่ากำลัง (ในหน่วย dB) ที่เกิดจากการสะท้อนของ Probe ที่ 1 เมื่อคลื่นเดินทางไปยังสายอากาศ

$S_{22}$  คือ ค่ากำลัง (ในหน่วย dB) ที่เกิดจากการสะท้อนของ Probe ที่ 2 เมื่อคลื่นเดินทางไปยังสายอากาศ

$\epsilon_r$  คือ ค่า Dielectric Constant

$W$  คือ ความกว้างของ Patch

$h$  คือ ความหนาของชั้น Dielectric Constant (แผ่น PCB นั้นมีความหนาของชั้น Dielectric Constant 1.441 mm.)

$G$  คือ กราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การคำนวณ

ขนาดของ Patch นั้นมีความสัมพันธ์กับความถี่โดยกล่าวได้ว่าเมื่อขนาดของ Patch นั้นมีขนาดเล็กความถี่ที่เหมาะสมต่อสายอากาศนี้จะยิ่งสูงตามนอกจากนี้ยังต้องการให้สายอากาศอยู่ใน TM Second order mode เพื่อที่จะสามารถให้ทิศทางของสายอากาศมี 2 ทิศทางต่อการป้อน 1 Probe สามารถหาความกว้างของ Patch ได้ดังสมการ(3.1) [3]

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{W\sqrt{\epsilon}} \quad (3.1)$$

$(f_r)_{020}$  คือ ความถี่ที่ใช้สำหรับโหมด  $TM_{020}$  (การออกแบบจะใช้ความถี่สูงที่ 2.45GHz ความถี่ต่ำที่ 915MHz)

$W$  คือ ความกว้างของ Patch

$\epsilon$  คือ ค่า Dielectric Constant (ในการออกแบบใช้แผ่น PCB มีค่าเป็น 4.3)

$v_0$  คือ ค่าความเร็วของแสงมีค่า  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

ส่วนตำแหน่งของ Probe นั้นจะกำหนดไว้ที่ประมาณ  $\frac{W}{4}$  โดยห่างจากจุดศูนย์กลางของ Patch ทั้ง Probe แกน x และ y ขนาดของ Ground Plane จะให้มีขนาด 1.5 เท่าของขนาด Patch 915 MHz

ความกว้างของ Patch ความถี่สูง (2.45GHz) แทนค่าลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$2.45 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{W\sqrt{4.3}}$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9 \times \sqrt{4.3}} = 59.05 \text{ mm.}$$

ตำแหน่งของ Probe ห่างจากจุดศูนย์กลางของ Patch ความถี่สูงคือ  $\frac{59.05}{4} = 14.76 \text{ mm.}$

ความกว้างของ Patch ความถี่ต่ำ (915MHz) แทนค่าลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$W = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6 \times \sqrt{4.3}} = 158.12 \text{ mm.}$$

ตำแหน่งของ Probe ห่างจากจุดศูนย์กลางของ Patch ความถี่ต่ำคือ  $\frac{158.12}{4} = 39.53 \text{ mm.}$

ขนาดความกว้างของ Ground Plane คือ  $158.12 \times 1.5 = 237.18 \text{ mm.}$

วิธีในการปรับทิศทางของสายอากาศนั้นคือเปลี่ยน Probe ในการป้อนสัญญาณของอินพุต (แกน x แกน y) จะเกิดการเปลี่ยนทิศทางเกิดขึ้น และถ้าหากระยะห่างของ Probe ในแกน x และ y มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันลักษณะการแพร่กระจายของสายอากาศจะสมมาตรกัน เพียงแต่หันไปกันคนละทิศทางนั่นเอง หากต้องการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ให้ทำการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณและป้อนเข้า Probe ที่กำหนดไว้ (Probe สำหรับความถี่สูงหรือความถี่) และจะทำการกำจัดสัญญาณออก 1 ทิศทางโดยใช้แผ่น Reflector เนื่องจากว่าสายอากาศจะแพร่คลื่นออกมา 2 ทิศทางต่อ 1 พอร์ต ในการใช้งานนั้นจะกำหนดพอร์ตหนึ่งเป็นระดับอ้างอิงและอีกพอร์ตหนึ่งจะใช้ในการสะท้อนเป้าหมาย



รูปที่ 3.4 ลักษณะของสายอากาศที่ออกแบบ

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ

ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ	mm.
ความกว้างของแพทช์ความถี่สูง ( $W_H$ )	59.05
ความกว้างของแพทช์ความถี่ต่ำ ( $W_L$ )	158.12
ระยะห่างของโพรบความถี่สูง ( $F_H$ )	14.76
ระยะห่างของโพรบความถี่ต่ำ ( $F_L$ )	39.53
กราวด์	237.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. สายอากาศที่ออกแบบไว้	1	ชุด
2. อุปกรณ์ชุด Network Analyzer	1	ชุด
3. Power Supply	1	เครื่อง
4. สายอากาศมาตรฐาน SAS-571 Horn Antenna	1	ชุด
5. Step Motor	1	เครื่อง
6. ขาดังอุปกรณ์วางสายอากาศ	2	ชุด

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

#### 3.3.1 การจำลองการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบไว้

##### 3.3.1.1 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 915 MHz

##### 3.3.1.2 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

##### 3.3.1.3 จำลองการทำงานของสายอากาศ 2 ความถี่เมื่อมาวางซ้อนกัน (Stacked)

##### 3.3.1.5 จำลองการทำงานของสายอากาศ 2 ความถี่เมื่อมาวางซ้อนกัน (Stacked)

และทำการใส่รีเฟลคเตอร์

#### 3.3.2 การทดลองหาค่ากำลังการสะท้อน

อุปกรณ์การทดลอง

1. สายอากาศที่ออกแบบไว้	1	ชุด
2. อุปกรณ์ชุด Network Analyzer	1	ชุด
3. Power Supply	1	เครื่อง

#### ขั้นตอนการทดลอง

การตั้งค่าเครื่อง Network Analyzer (Calibration) เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง จากนั้นจึงนำต่อเข้ากับระบบป้อนสัญญาณของสายอากาศที่ออกแบบ (Feed System) ทำการไบแอสพอร์ต1 โดยการป้อนไฟ 5 V เข้าพอร์ตที่1 บันทึกผล  $S_{11}$  และทำเช่นเดียวกันแต่ไบแอสที่พอร์ตที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศ

#### อุปกรณ์การทดลอง

1. สายอากาศที่ออกแบบไว้	1	ชุด
2. อุปกรณ์ชุด Network Analyzer	1	ชุด
3. Power Supply	1	เครื่อง
4. สายอากาศมาตรฐาน SAS-571 Horn Antenna	1	ชุด
5. Step Motor	1	เครื่อง
6. ขาดังอุปกรณ์วางสายอากาศ	2	ชุด

#### ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้จะทำการทดลองภายในห้องอับสัญญาณ (Chamber) เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง ทำการตั้งค่า Network Analyzer และจัดวางระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ออกแบบและSAS-571 ให้มีระยะห่างกันในระยะ Far-field (สำหรับสายอากาศที่ออกแบบนี้คือ 3 เมตร) ทำการวัดทีละ 5 องศาโดยใช้ Step Motor ในการหมุน บันทึกผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบไว้

##### 4.1.1 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 915 MHz



รูปที่ 4.1.1.2 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed แกน X ของสายอากาศความถี่ 915 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1.1.2 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย  
แกน  $\pm Y$  เท่ากับ 3.36 dBi



รูปที่ 4.1.1.3 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed  
แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz

จากรูปที่ 4.1.1.3 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย  
แกน  $\pm X$  เท่ากับ 3.36 dBi



รูปที่ 4.1.1.4 ค่า  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz

จากรูปที่ 4.1.1.4 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz นั้นมีค่าที่  $S_{11}$   
และ  $S_{22}$  เท่ากับ -18.348 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 915 MHz ได้เมื่อทำ  
การป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน

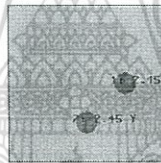
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.1.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 915 MHz ที่จำลองไว้

พารามิเตอร์	mm.
$W_l$	59
G	237
$f_x$	39
$f_y$	39

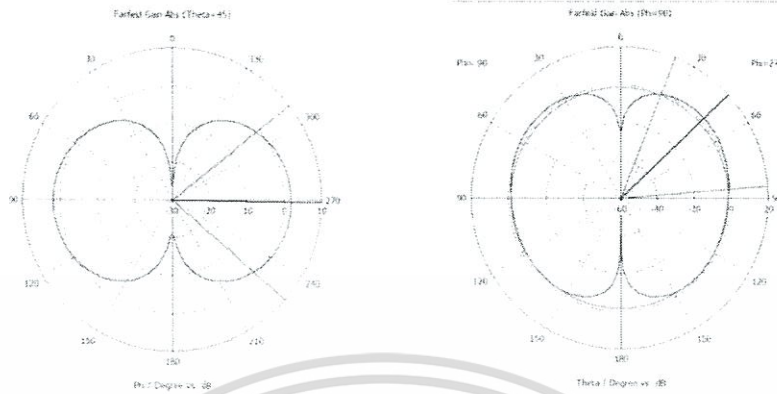
จากผลการจำลองพบว่ามีย่านกำลังการสะท้อน  $-18.348$  dB ซึ่งสามารถส่งผ่านอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถเลือกทิศทางของลำคลื่นได้อย่างชัดเจนโดยการเปลี่ยนพอร์ตแกน X หรือ Y และมีอัตราขยาย  $3.36$  dBi อีกทั้งการเลือกสวิตช์แกน X หรือ Y มีผลทำให้ลำคลื่นมีความสมมาตรกันทุกประการแต่เพียงคนละทิศทางกัน

#### 4.1.2 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.1.2.1 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.1.2.1 คือการจำลองโครงสร้างสายอากาศ 2.45 GHz



รูปที่ 4.1.2.2 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน X ของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

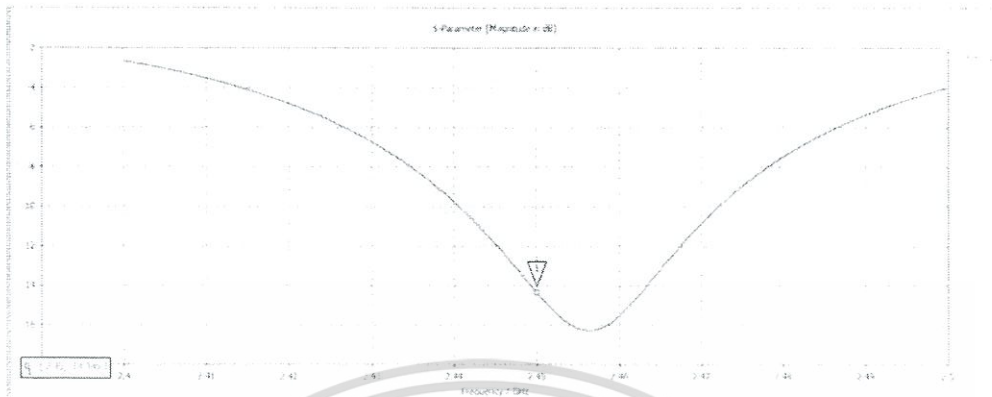
จากรูปที่ 4.1.2.2 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm Y$  เท่ากับ 1.55 dBi



รูปที่ 4.1.2.3 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน Y ของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.1.2.3 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm X$  เท่ากับ 1.55 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.2.4 ค่า  $S_{11}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.1.2.4 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่าที่ -14.346 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน X



รูปที่ 4.1.2.5 ค่า  $S_{22}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4.1.2.5 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่าที่ -14.346 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสายความถี่ 2.45 GHz ที่จำลองไว้

พารามิเตอร์	mm.
$W_h$	56.5
G	84.75
$f_x$	14
$f_y$	14

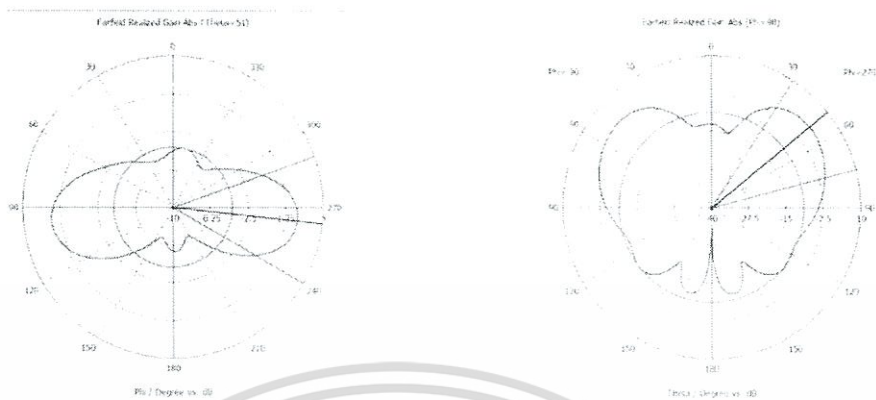
จากผลการจำลองพบว่ามีความกำกวมการสะท้อน  $-14.346$  dB ซึ่งสามารถส่งผ่านอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถเลือกทิศทางของลำคลื่นได้อย่างชัดเจนโดยการเปลี่ยนพอร์ตแกน X หรือ Y และมีอัตราขยาย  $1.55$  dBi อีกทั้งการเลือกสวิตซ์แกน X หรือ Y มีผลทำให้ลำคลื่นมีความสมมาตรกันทุกประการแต่เพียงคนละทิศทางกัน

#### 4.1.3 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 915 MHz และสายอากาศ 2.45 GHz นำมาวางซ้อนกัน (Stacked)



รูปที่ 4.1.3.1 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.1 คือการจำลองโครงสร้างสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน



รูปที่ 4.1.3.2 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน X ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

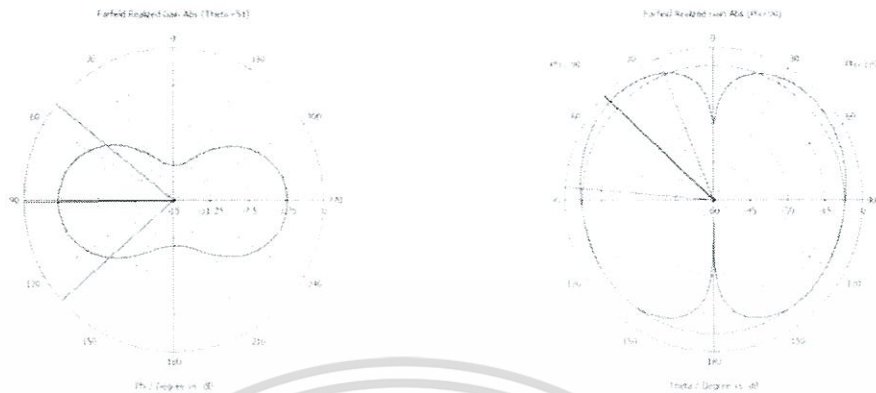
จากรูปที่ 4.1.3.2 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm Y$  เท่ากับ 2.44 dBi



รูปที่ 4.1.3.3 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.3 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm X$  เท่ากับ 2.44 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.3.4 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed แกน X ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

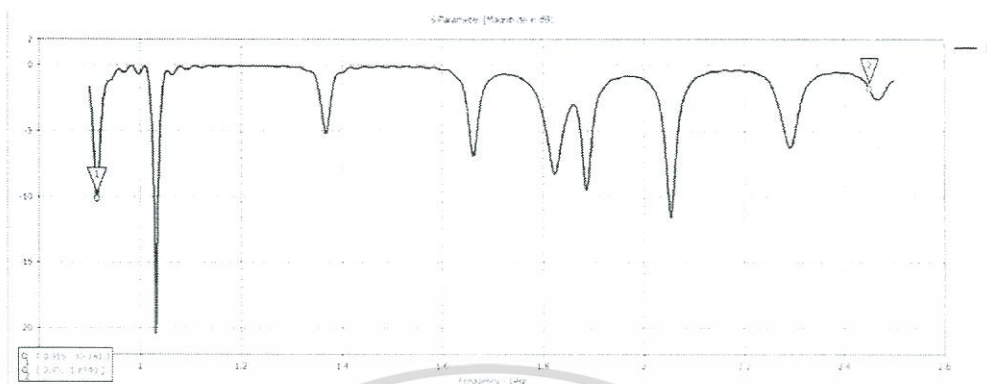
จากรูปที่ 4.1.3.4 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm Y$  เท่ากับ  $-3.41$  dBi



รูปที่ 4.1.3.5 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed แกน Y ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.5 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นมีความสมมาตรกันและมีอัตราการขยาย แกน  $\pm X$  เท่ากับ  $-3.41$  dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.3.6 ค่า  $S_{11}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.6 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz นั้นมีค่าที่ -10.141 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 915 MHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน X



รูปที่ 4.1.3.7 ค่า  $S_{22}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.7 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่าที่ -15.108 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.3.8 ค่า  $S_{33}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.8 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่าที่ -15.108 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน Y



รูปที่ 4.1.3.9 ค่า  $S_{44}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.1.3.9 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz นั้นมีค่าที่ -10.141 dB ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้สามารถทำงานที่ความถี่ 915 MHz ได้เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

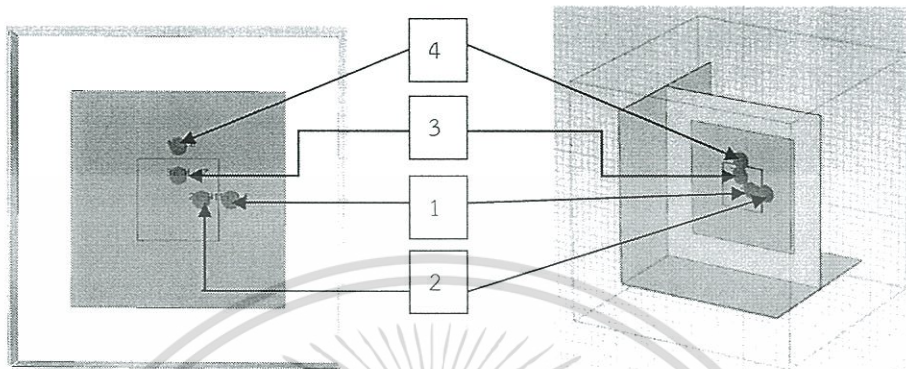
ตารางที่ 4.1.3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 2.45 GHz และ 915 MHz ที่จำลองไว้

พารามิเตอร์	mm.
$W_l$	155
$W_h$	58.75
$f_{xl}$	17
$f_{yl}$	17
$f_{xh}$	38
$f_{xy}$	38
G	232.5

จากผลการจำลองพบว่ามีความกำกวมกำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz และ 915 MHz คือ -15.108 และ -10.141 dB ตามลำดับ ซึ่งสามารถส่งผ่านอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถเลือกทิศทางของลำคลื่นได้อย่างชัดเจนโดยการเปลี่ยนพอร์ตแกน X หรือ Y โดยที่มีอัตราขยาย 2.44 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz แต่ในกรณีของความถี่ 915 MHz นั้นพบว่ามีอัตราขยายที่ต่ำคือ -3.41 dBi ซึ่งสาเหตุคาดว่าอาจจะเกิดจากอิทธิพลของแพทช์ความถี่ 2.45 GHz การเลือกสวิตช์แกน X หรือ Y ยังคงสภาพความสมมาตรกันทุกประการและมีทิศทางที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

แต่ในสภาพการใช้งานนั้นไม่ได้ต้องการให้ลำคลื่นออกมาทั้งสองทิศทางเนื่องจากอาจจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเป้าหมายซึ่งอาจจะทำให้คลาดเคลื่อน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนนี้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวแผ่นสะท้อน (Reflector) เพื่อลดอิทธิพลของทิศทางที่ไม่ต้องการอีกทั้งยังสามารถส่งเสริมทิศทางที่ต้องการจะใช้งานได้อีกด้วย ซึ่งจะกล่าวในผลการทดลองถัดไป

4.1.4 จำลองการทำงานของสายอากาศความถี่ 915 MHz และสายอากาศ 2.45 GHz นำมาวางซ้อนกันโดยใช้แผ่นสะท้อน



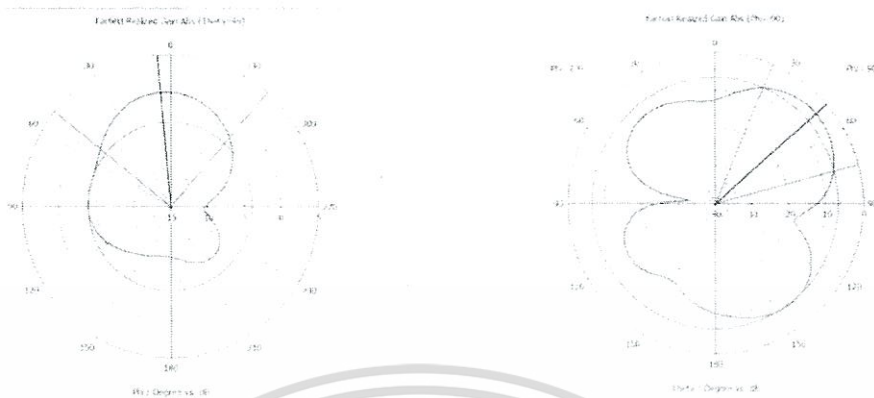
รูปที่ 4.1.4.1 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกัน โดยมีแผ่นสะท้อน

ได้นำผลการจำลองของการทดลองที่ 4.1.3 มาประกอบกับแผ่นสะท้อนด้วยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกันระหว่างมีแผ่นสะท้อนและไม่มีแผ่นสะท้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างไร ขนาดแผ่นสะท้อนมีค่า 232.5\*232.5 mm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.1.4.2 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed แกน X สายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 4.1.4.2 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นไม่ได้มีความสมมาตรอย่างผลการทดลองที่ผ่านๆมาเนื่องจากมีแผ่นสะท้อน แสดงให้เห็นว่าแผ่นสะท้อนสามารถสะท้อนลำคลื่นบางส่วนออกไปได้และมีอัตราการขยายแกนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม  $\pm Y$  เท่ากับ  $-3.41$  dBi เป็น  $+Y$   $0.107$  dBi



รูปที่ 4.1.4.3 การจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz เมื่อ Feed แกน Y สายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

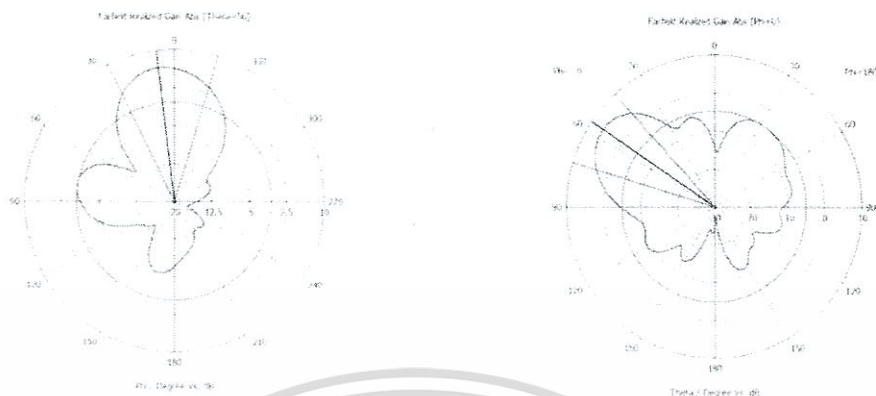
จากรูปที่ 4.1.4.3 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นไม่ได้มีความสมมาตรอย่างผลการทดลองที่ผ่านๆมาเนื่องจากมีแผ่นสะท้อน แสดงให้เห็นว่าแผ่นสะท้อนสามารถสะท้อนลำคลื่นบางส่วนออกไปได้และมีอัตราการขยายแกนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม  $\pm X$  เท่ากับ  $-3.41$  dBi เป็น  $+X$  0.107 dBi



รูปที่ 4.1.4.4 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน X สายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 4.1.4.4 จะสังเกตได้ว่าลักษณะลำคลื่นไม่ได้มีความสมมาตรอย่างผลการทดลองที่ผ่านๆมาเนื่องจากมีแผ่นสะท้อน แสดงให้เห็นว่าแผ่นสะท้อนสามารถสะท้อนลำคลื่นบางส่วนออกไปได้และมีอัตราการขยายแกนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม  $\pm Y$  เท่ากับ  $2.44$  dBi เป็น  $+Y$  6.59 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.4.5 การจำลองสายอากาศความถี่ 2.45 GHz เมื่อ Feed แกน Y บนสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 4.1.4.5 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะลำคลื่นไม่ได้มีความสมมาตรอย่างผลการทดลองที่ผ่านๆมาเนื่องจากมีแผ่นสะท้อน แสดงให้เห็นว่าแผ่นสะท้อนสามารถสะท้อนลำคลื่นบางส่วนออกไปได้และมีอัตราการขยายแกนที่เพิ่มขึ้นจากเดิม  $\pm X$  เท่ากับ 2.44 dBi เป็น  $+X$  6.59 dBi



รูปที่ 4.1.4.6 ค่า  $S_{11}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 4.1.4.6 จะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz นั้นมีค่า  $S_{11}$  คือ -8.9857 dB เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน X ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 915 MHz ได้ไม่ตึง ซึ่งการที่เพิ่มแผ่นสะท้อนลงไปบนสายอากาศจะส่งผลต่อค่า  $S_{11}$  พอสมควรเมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ 4.1.2 จากเดิมคือ -10.141 dB เป็น -8.9857 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.4.7 ค่า  $S_{22}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz  
มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

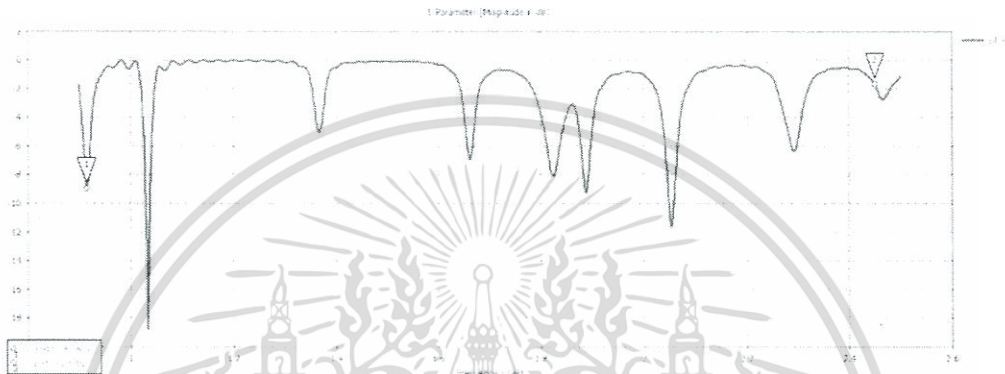
จากรูปที่ 4.1.4.7 จะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่า  $S_{22}$  คือ -15.292 dB เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน X ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ดี ซึ่งการที่เพิ่มแผ่นสะท้อนลงไปในสายอากาศจะส่งผลต่อค่า  $S_{11}$  เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.1.2 จากเดิม -15.108 dB เป็น -15.292 dB



รูปที่ 4.1.4.8 ค่า  $S_{33}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz  
มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1.4.8 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่า  $S_{33}$  คือ -15.292 dB เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน Y ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ดี ซึ่งการที่เพิ่มแผ่นสะท้อนลงไปในสายอากาศจะส่งผลต่อค่า  $S_{11}$  เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบกับผลการทดลองที่ 4.1.2 จากเดิม -15.108 dB เป็น -15.292 dB



รูปที่ 4.1.4.9 ค่า  $S_{44}$  จากการจำลองสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 4.1.3.6 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz นั้นมีค่า  $S_{44}$  คือ -8.9857 dB เมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตแกน Y ซึ่งถือว่าสายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 915 MHz ได้ไม่ดัดนัก ซึ่งการที่เพิ่มแผ่นสะท้อนลงไปในสายอากาศจะส่งผลต่อค่า  $S_{11}$  พอสมควรเมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ 4.1.2 จากเดิมคือ -10.141 dB เป็น -8.9857 dB

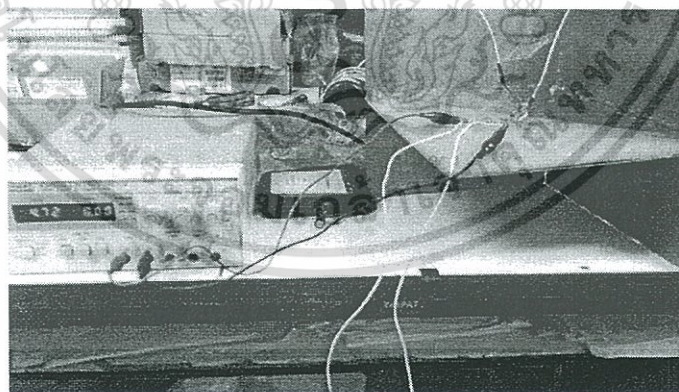
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz มาวางซ้อนกันและมีแผ่นสะท้อนที่จำลองไว้

พารามิเตอร์	mm.
$W_l$	155
$W_h$	58.75
$f_{xl}$	17
$f_{yl}$	17
$f_{xh}$	38
$f_{xy}$	38
G	232.5

จากผลการทดลองนี้พบว่าแผ่นสะท้อนสามารถลดอิทธิพลของทิศทางที่เราไม่ต้องการอีกทั้งยังเสริมให้ทิศทางที่ใช้งานด้วย แต่จะส่งผลต่อค่ากำลังการสะท้อนโดยเฉพาะที่แพทช์ความถี่ต่ำซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิคสตัดป์แมชชิง

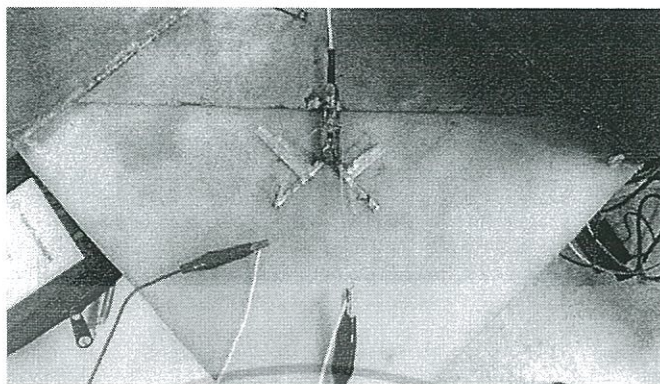
#### 4.2 ผลการวัดค่าสะท้อนของสายอากาศภาคส่งเมื่อทำการไบแอสพอร์ตต่างๆ



รูปที่ 4.2.1 การไบแอสวงจรสวิตช์ความถี่

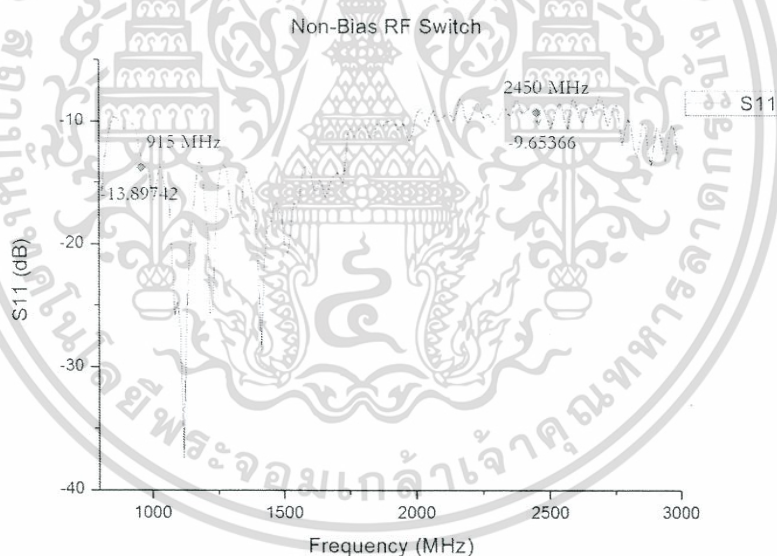
จากรูปที่ 4.2.1 เป็นภาพรวมของระบบในการไบแอสวงจรสวิตช์ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.2 การต่อวงจรเลือกทิศทางสวิตช์

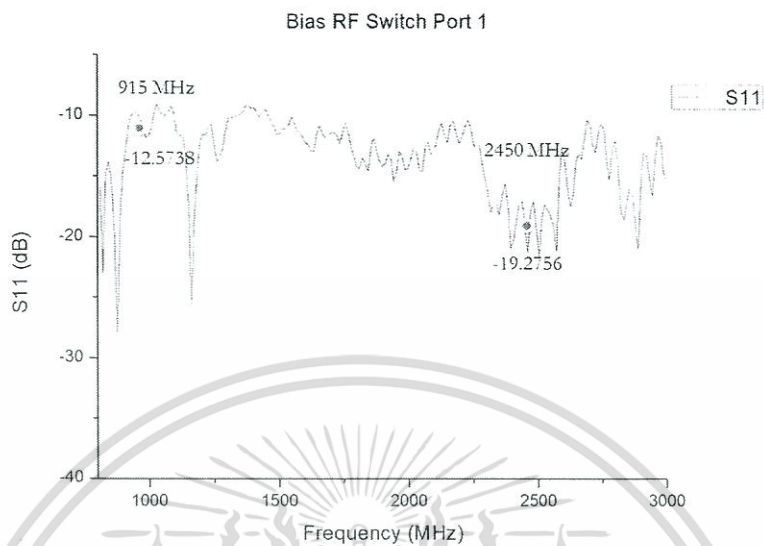
จากรูปที่ 4.2.2 เป็นวิธีการไบแอสวงจรสวิตช์ความถี่วิธีการคือเลือกพอร์ตที่ต้องการไบแอสแล้วทำการจ่ายไฟ 5 V เพื่อให้พอร์ตนั้นทำงาน โดยที่อีกพอร์ตต้องเชื่อมกับกราวด์ (0 V)



รูปที่ 4.2.3 ค่า  $S_{11}$  เมื่อยังไม่ทำการไบแอสสวิตช์

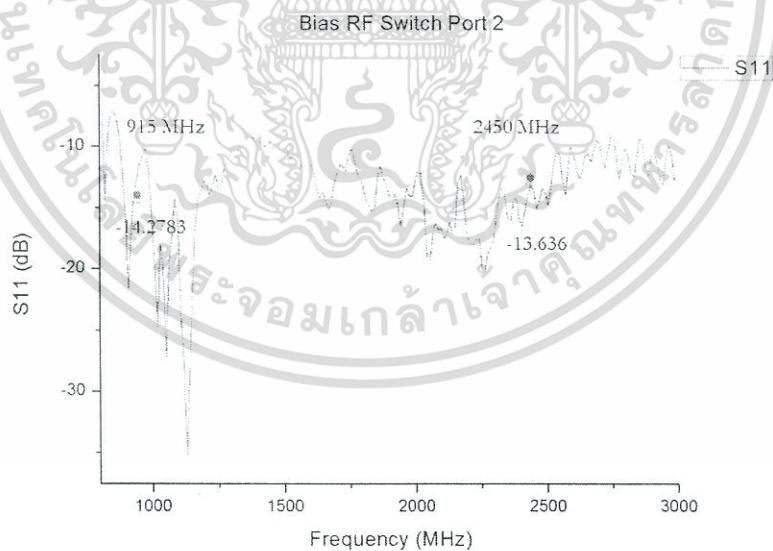
จากรูปที่ 4.2.3 เป็นการต่อวงจรสวิตช์ความถี่โดยขณะที่ยังไม่เลือกพอร์ตที่ต้องการจ่ายไฟ 5V เพื่อทำการไบแอส จะให้ค่ากำลังการสะท้อนคือที่ 915 MHz และ 2.45 GHz เท่ากับ -13.89742 dB และ -9.65366 dB ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.4 ค่า  $S_{11}$  เมื่อทำการไบแอสสวิตช์ที่พอร์ต 1

จากรูปที่ 4.2.4 เมื่อทำการป้อนไฟ 5 V ให้กับพอร์ตที่ 1 จะให้ค่ากำลังการสะท้อนคือที่ 915 MHz และ 2.45 GHz เท่ากับ -12.5738 dB และ -19.2756 dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.2.5 ค่า  $S_{11}$  เมื่อทำการไบแอสสวิตช์ที่พอร์ต 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2.5 เมื่อทำการป้อนไฟ 5 V ให้กับพอร์ตที่ 2 จะให้ค่ากำลังการสะท้อนคือที่ 915 MHz และ 2.45 GHz เท่ากับ -14.2783 dB และ -13.636 dB ตามลำดับ

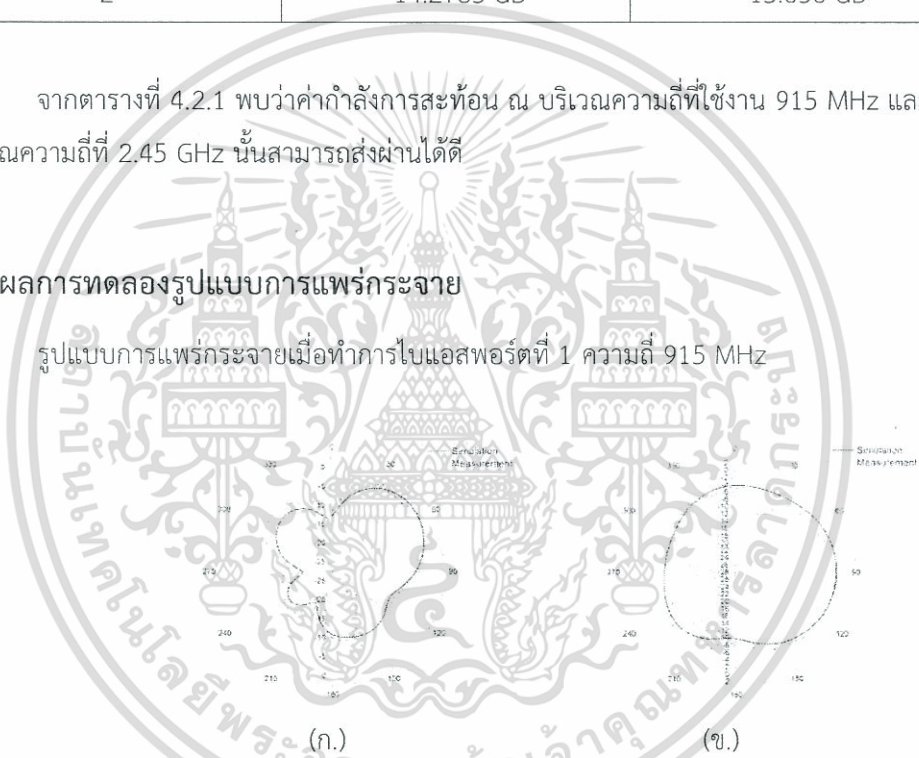
ตารางที่ 4.2.1 สรุปค่ากำลังการสะท้อนที่ความถี่ 915 MHz และ 2.45 GHz ที่ตำแหน่งพอร์ตต่างๆ

ตำแหน่งพอร์ตที่ไบแอส	915 MHz	2.45 GHz
1	-12.5738 dB	-19.2756 dB
2	-14.2783 dB	-13.636 dB

จากตารางที่ 4.2.1 พบว่าค่ากำลังการสะท้อน ณ บริเวณความถี่ที่ใช้งาน 915 MHz และ บริเวณความถี่ที่ 2.45 GHz นั้นสามารถส่งผ่านได้ดี

#### 4.3 ผลการทดลองรูปแบบการแพร่กระจาย

รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อทำการไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 915 MHz



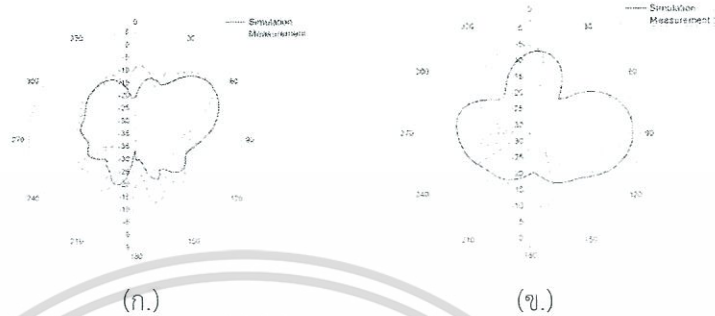
รูปที่ 4.3.1 รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 915 MHz

(ก.) E-Plane (ข.) H-Plane

อัตราขยายแกน +Y คือ -6.958 dBi ณ ความถี่ 915 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อทำการไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 2450 MHz



รูปที่ 4.3.2 รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 1 ความถี่ 2.45 GHz

(ก.) E-Plane (ข.) H-Plane

อัตราขยายแกน +Y คือ -4.445 dBi ณ ความถี่ 2450 MHz

รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อทำการไบแอสพอร์ตที่ 2 ความถี่ 915 MHz



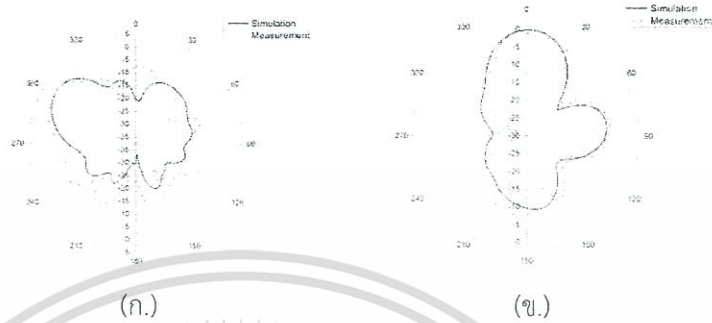
รูปที่ 4.3.3 รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 2 ความถี่ 915 MHz

(ก.) E-Plane (ข.) H-Plane

อัตราขยายแกน +X คือ -7.235 dBi ณ ความถี่ 915 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อทำการไบแอสพอร์ตที่ 2 ความถี่ 2450 MHz

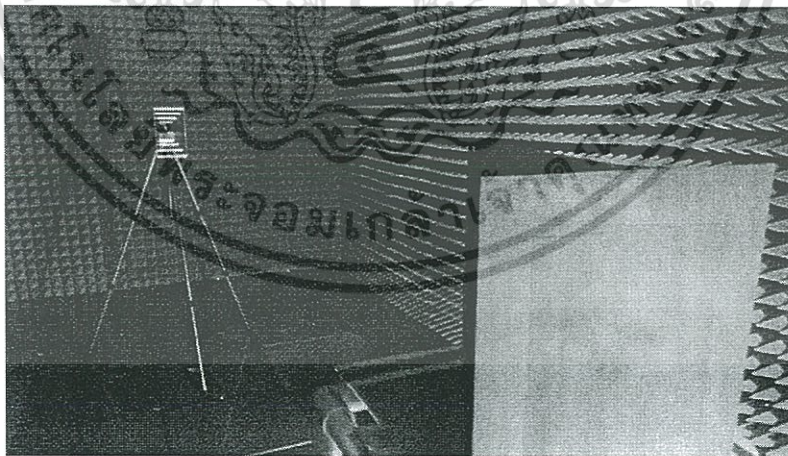


รูปที่ 4.3.4 รูปแบบการแพร่กระจายเมื่อไบแอสพอร์ตที่ 2

(ก.) E-Plane (ข.) H-Plane

อัตราขยายแกน +Y คือ -5.523 dBi ณ ความถี่ 2450 MHz

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3.1 – 4.3.4 พบว่ารูปแบบการแพร่กระจายเป็นไปตามที่คาดการณ์คือสามารถใช้แผ่นสะท้อน สะท้อนคลื่นได้ ที่ความถี่ที่ 915 MHz และความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับทิศทางคลื่นได้โดยทิศทางของคลื่นสามารถเห็นแตกต่างได้อย่างชัดเจน และพบว่ารูปแบบการแพร่กระจายมีรูปแบบที่คล้ายกับการจำลองโดยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.3.5 การทดลองวัดรูปแบบการแพร่กระจาย

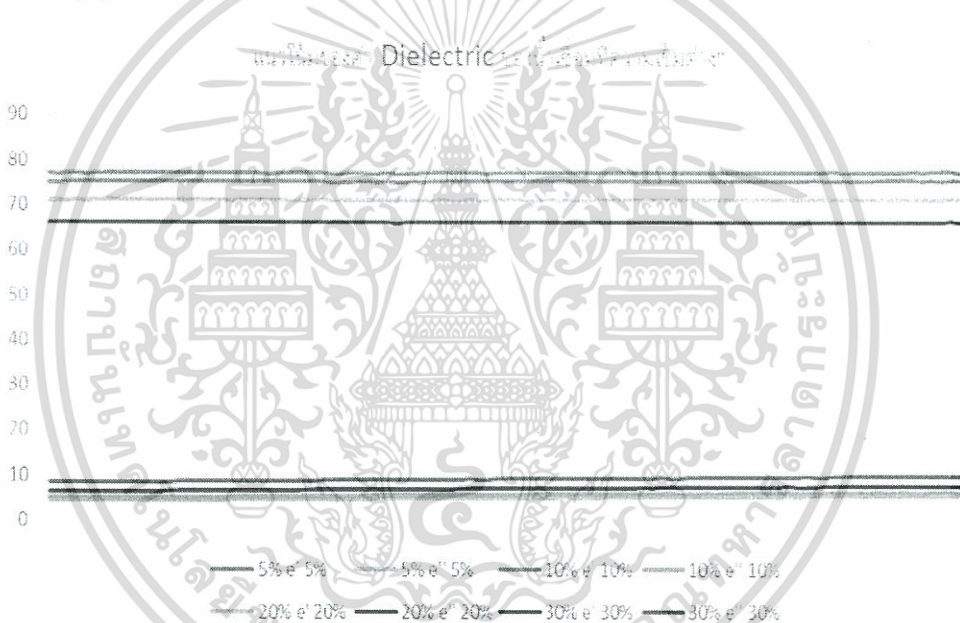
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

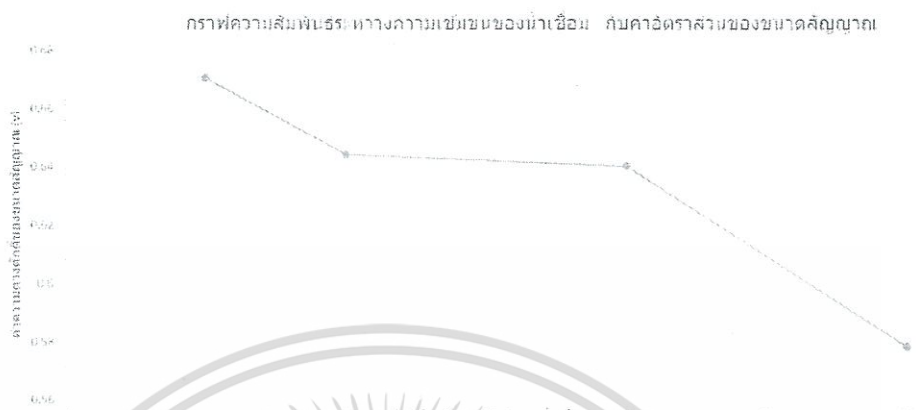
สายอากาศมีค่ากำลังการสะท้อน ณ บริเวณความถี่ที่ใช้งาน 915 MHz และบริเวณความถี่ที่ 2.45 GHz นั้นสามารถส่งผ่านได้ดีและมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสามารถเห็นทิศทางได้อย่างชัดเจน แต่สายอากาศนี้มีอัตราการขยายที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการสูญเสียในวงจรสวิตช์และในสายนำสัญญาณ ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งานได้



รูปที่ 5.1.1 ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก [5]

จากรูปที่ 5.1.1 พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในน้ำโดยทั่วไปแล้วคือ 80 แต่เมื่อเจือปนกับน้ำเชื่อมจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง ซึ่งเกิดจากค่าคงที่ในน้ำเชื่อมนั้นไม่ถึง 80 ดังนั้นยิ่งเข้มข้นมากยิ่งขึ้นส่งผลต่อค่า  $\epsilon'$  (ค่าส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก) อย่างชัดเจน กล่าวคือยิ่งเข้มข้นมาก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง ซึ่งคาดการณ์ว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันของสัญญาณที่รับได้ จากผลการทดลอง [5] พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมและค่าอัตราส่วนของสัญญาณเป็นไปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกับอัตราส่วนขนาดของสัญญาณ [5]

จากรูปที่ 5.1.2 ความเข้มข้นส่งผลต่ออัตราส่วนอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลเกิดจากค่าคงที่ไดเรกตริก เมื่อเข้มข้นมากขึ้นอัตราส่วนระหว่างขนาดสัญญาณที่สะท้อนจากขดน้ำเชื่อมกับขนาดของสัญญาณเริ่มต้น ยังมีค่าที่ลดลงจึงสามารถพอที่จะแยกแยะความเข้มข้นของน้ำเชื่อมได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างสายอากาศ พบว่ามีปัญหาที่เกิดขึ้นคือมีอัตราการขยายที่ต่ำ จึงมีข้อเสนอแนะดังนี้ ให้ทำการตรวจสอบว่าแผ่นพีซีบีที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศมีค่าคงที่ไดเรกตริกเท่าใดเนื่องจากว่าค่าไดเรกตริกมีผลต่อการออกแบบสายอากาศ ลดการสูญเสียในสายนำสัญญาณ ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศขนาดการออกแบบกับการสร้างสายอากาศจริงหากค่าผิดไปจากที่คำนวณ จะทำให้ทั้งค่ากำลังการสะท้อนและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] นางสาวสวยา ภาระน้อย. “สายอากาศไมโครสตริบแบบอาร์เรย์สำหรับประยุกต์ใช้ใน WLAN”, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต,มหาวิทยาลัยขอนแก่น,.2554.
- [2] Constantine A., Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. 3<sup>rd</sup> ed. United States of America : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
- [3] Balanis, C.A, *Antenna Theory*, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, John Wiley & Son, Inc., 1982.
- [4] Jukkrit TAGAPANIJ, Pobsook SOOKSUMRARN, Tanawut TANTISOPHARAK, Suwan JANIN and Monai KRAIRIKSH, “A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna for WLAN Application” , IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E91-B, NO.6 JUNE 2008
- [5] Pongsakorn SATHORN, Mahasan KOETKHLAI, Rattana ARUN and Monai-KRAIRIKSH, “Dual-band Reflectometer”. TELECOMMUNICATION ENGINEERING, KMITL, April 2016

