

การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่  
สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์

นายมนตรี ชินานุภรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**DESIGN OF DUAL BAND QUASI-RHOMBOID  
ANTENNA FOR HUMAN ON-BODY  
APPLICATIONS**

**Montree Chinanupakorn**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2012**

การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่  
สำหรับประยุกต์การใช้งานบนร่างกาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิช)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มนตรี ชินานุปกรณ์ : การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่  
สำหรับประยุกต์การใช้งานบนร่างกาย (DESIGN OF DUAL BAND QUASI-RHOMBOID  
ANTENNA FOR HUMAN ON-BODY APPLICATIONS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภณ, 99 หน้า.

ที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและขยายตัวอย่างรวดเร็ว  
เช่น ระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย รวมถึงระบบสื่อสารที่เป็น  
โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ (Wireless Body Area Network : WBAN) ซึ่งการสื่อสารบน  
ร่างกายมนุษย์ได้รับความสนใจสูง เนื่องจากการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์สามารถนำไปประยุกต์  
การใช้งานได้หลายด้าน งานด้านการทหาร การรักษาความปลอดภัย ด้านการแพทย์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ  
ชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะด้านการแพทย์สำหรับผู้ป่วยที่ต้องการดูแลรักษาอย่างใกล้ชิด ผู้ป่วย  
โรคหัวใจ ผู้ป่วยเบาหวาน ผู้ป่วยโรคชราภาพ สำหรับปัจจัยพื้นฐานในการตรวจสอบสุขภาพ อัตรา  
การเต้นของหัวใจ ความดันโลหิต อุณหภูมิ ระดับน้ำตาลในเลือด รวมไปถึง อุปกรณ์ตรวจวัด  
สัญญาณหรือเซนเซอร์ ที่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย การสื่อสารเครือข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์  
แบ่งเป็น การสื่อสารบนร่างกาย และการสื่อสารภายนอกร่างกาย ซึ่งการสื่อสารไร้สายจะต้องมี  
สายอากาศในการกระจายคลื่นสัญญาณ ในการรับส่งข้อมูล วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบ  
และสร้างสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ที่มีความถี่ปฏิบัติการ 2.4 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งสามารถ  
รองรับระบบการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15 โดยนำเสนอสายอากาศรูปคล้าย  
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

MONTREE CHINANUPAKORN : DESIGN OF DUAL BAND QUASI-  
RHOMBOID ANTENNA FOR HUMAN ON-BODY APPLICATIONS.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHANCHAI THONGSOPA,

Ph.D., 99 PP.

The wireless communication technology has been continuously developed and expanded, such as mobile communications, Wireless local area network systems. And s Wireless Body Area Network: (WBAN) Since communication on the human body can be applied to military. Security, medical around us Especially for patients who need medical care closely. with heart disease. diabetic patients. application of WBAN. For basic health check. Heart rate, blood pressure, temperature, blood sugar level, that systems has to be use for communication to various parts of the body communication on the human body to or communications inside body. Antenna has important part for WBAN sensor. This thesis, we propose to design and build an antenna on the human body has, operating on dual frequency 2.4 GHz, and 5.8 GHz, which can support wireless communication standard IEEE 802.15 by offering an antenna quasi-rhomboid shaped like a diamond, two frequency bands for applications on the human body.

School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ คุณปณิฎฐาท์ อาจหาญ เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพ ยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

มนตรี ชินานุปกรณ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย .....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.7 ปรัชญาหรือบรรณกรรม.....	4
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 หลักการของระบบเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ</b>	
<b>    สายอากาศ.....</b>	<b>6</b>
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 เครือข่ายบนร่างกายไร้สาย.....	7
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายบนร่างกาย และส่วนบุคคลไร้สาย .....	8
2.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศบนร่างกายมนุษย์.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ.....	13
2.5.1	อิมพีแดนซ์เบนคัวิตซ์.....	13
2.5.2	แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	16
2.5.3	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง.....	22
2.5.4	ความหนาแน่นการแผ่กระจายกำลังงาน.....	22
2.5.5	ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงาน.....	23
2.5.6	สภาพเจาะจงทิศทาง.....	24
2.5.7	อัตรายาย.....	26
2.5.8	ความกว้างแถบ.....	27
2.6	สายอากาศแบบไมโครสตริป.....	27
2.7	สรุป.....	33
3	การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายสื่อสารบนร่างกายไร้สาย.....	34
3.1	กล่าวนำ.....	34
3.2	การออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายสื่อสารบนร่างกายไร้สาย.....	34
3.3	ผลการจำลองแบบสายอากาศ.....	36
3.4	สรุป.....	50
4	การวัดและผลการทดลอง.....	51
4.1	กล่าวนำ.....	51
4.2	การสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	51
4.3	ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ.....	52
4.4	ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	58
4.5	ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	61
4.6	ผลการวัดทดสอบอัตรายาย.....	78
4.7	สรุป.....	84
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	85



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	85
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต .....	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	89
ประวัติผู้เขียน.....	99



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ค่าความชื้นซาบและค่าความนำของร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ 2.45 GHz..... 42
3.2	แบบจำลองขนาดแขนมนุษย์ ..... 43
3.3	แบบจำลองขนาดขามมนุษย์..... 43
3.4	แบบจำลองขนาดอกมนุษย์ ..... 43
4.1	ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ..... 59
4.2	ค่าอัตราขยายของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz ..... 84
4.3	ค่าอัตราขยายของสายอากาศความถี่ 5.8 GHz ..... 84



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระประยุคที่ใช้เครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย..... 7
2.2	ผลวัดค่า relative permittivity และ conductivity ของเนื้อเยื่อมนุษย์..... 11
2.3	แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่น..... 17
2.4	แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น ในระนาบสามมิติและแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติ ..... 18
2.5	แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว ..... 19
2.6	แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น หลักในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร ..... 20
2.7	แบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศที่ต้องการพิจารณา ..... 21
2.8	ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม ..... 29
2.9	กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์ ..... 30
2.10	ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ..... 32
3.1	โครงสร้างของสายอากาศที่จำลองผลด้วยโปรแกรม CST..... 35
3.2	โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ ..... 36
3.3	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่พารามิเตอร์เริ่มต้น ..... 37
3.4	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด $w$ ..... 38
3.5	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด $L1$ ..... 39
3.6	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด $L2$ ..... 40
3.7	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด $W2$ ..... 41
3.8	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับขนาดได้อย่างเหมาะสม ..... 41
3.9	สายอากาศบนแบบจำลองมนุษย์..... 42
3.10	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองแขนมนุษย์..... 44
3.11	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์ $W1$ ..... 44
3.12	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์ $L1$ ..... 45
3.13	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์ $L2$ ..... 46

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองที่ปรับขนาดอย่างเหมาะสม ..... 47
3.15	แบบรูปการแผ่กระจายระนาบสนามไฟฟ้าบนแบบจำลองร่างกายมนุษย์ ..... 48
3.16	แบบรูปการแผ่กระจายระนาบสนามแม่เหล็กบนแบบจำลองร่างกายมนุษย์ ..... 49
4.1	แสดงสายอากาศต้นแบบที่สร้างเสร็จ ..... 52
4.2	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง ขา ..... 53
4.3	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง แขน ..... 53
4.4	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง ออก ..... 54
4.5	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง ขา ..... 54
4.6	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง แขน ..... 55
4.7	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง ออก ..... 55
4.8	เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่งขา ..... 56
4.9	เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่งแขน ..... 56
4.10	เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่งออก ..... 57
4.11	เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศในอากาศว่าง ..... 58
4.12	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง ขา ..... 60
4.13	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง แขน ..... 60
4.14	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง ออก ..... 61
4.15	วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ..... 62
4.16	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา ..... 63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยม ขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม CST และ การวัดทดสอบระนาบแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา.....64
4.18	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยม ขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และ การวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขน ..... 65
4.19	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยม ขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และ การวัดทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขน.....66
4.20	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ออก..... 67
4.21	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ออก..... 68
4.22	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา ..... 69
4.23	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบแม่เหล็กที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา..... 70
4.24	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขน ..... 71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขน..... 72
4.26	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ออก..... 73
4.27	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และการวัดทดสอบ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ออก..... 74
4.28	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนม เปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งในอากาศว่าง.....75
4.29	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนม เปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งในอากาศว่าง.....76
4.30	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนม เปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งในอากาศว่าง.....77
4.31	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนม เปียกปูนสองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งในอากาศว่าง.....78
4.32	การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....80
4.33	การวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ..... 80

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$E$	=	electric field
$H$	=	magnetic field
$S/N$	=	signal to noise ratio
$h$	=	thickness of substrate
$l$	=	length of microstrip or patch antenna
$S_{11}$	=	input reflection coefficient
$\Gamma$	=	reflection coefficient
$\Gamma_{in}$	=	input reflection coefficient
$\Gamma_{out}$	=	output reflection coefficient
$\epsilon_{eff}$	=	effective dielectric constant
$\epsilon_r$	=	relative permittivity
$\epsilon_0$	=	permittivity of free space
$\sigma$	=	conductivity
$\mu_0$	=	permeability of free space
$f$	=	frequency
$f_r$	=	resonance frequency
$\omega$	=	angular frequency
$\lambda$	=	wavelength
$\lambda_0$	=	wavelength of electromagnetic wave in free space
$\lambda_d$	=	wavelength of electromagnetic wave in dielectric
$c$	=	velocity of light
$l$	=	length of the patch
$W$	=	width of the microstrip patch antenna
$Z_{in}$	=	input impedance
$Z_{out}$	=	output impedance
AR	=	augmented reality
BAN	=	body area network

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
PAN	=	personal area network
PCB	=	printed circuit board
S-parameter	=	scattering parameter
SNR	=	signal to noise ratio
SWR	=	standing wave ratio
VSWR	=	voltage standing wave ratio
WBAN	=	wireless body area network





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบสื่อสารไร้สายที่เป็นโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล รวมถึงระบบการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายเรียกว่า Wireless Body Area Network (WBAN) (Kamarudin Nechayev and Hall, 2005; Hall and Hao, 2006; Gareth and William, 2009) โดยโครงข่ายดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นโครงข่ายการสื่อสารสำหรับอุปกรณ์บนอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ เทคโนโลยี WBAN นั้นมุ่งเน้นสำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่บนร่างกายมนุษย์กับอุปกรณ์ภายนอก ดังนั้นเทคโนโลยี WBAN จึงมีประโยชน์ในการนำไปใช้งานด้านการรักษาความปลอดภัย ด้านการทหาร และด้านการศึกษา โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ที่ได้รับความนิยมอย่างมากเช่น ด้านการแพทย์สำหรับผู้ป่วยที่จำเป็นต้องมีการควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด ในการเฝ้าระวังและการวิเคราะห์หัตถการ เช่น หัวใจ ความดันโลหิต อุณหภูมิ และระดับน้ำตาลในโลหิต เป็นต้นซึ่งเป็นการเฝ้าติดตามดูอาการผู้ป่วย เพื่อให้การวินิจฉัยโรคที่มีความถูกต้องและทันเวลา ซึ่งปัจจุบันมีอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณหรือเซนเซอร์ (sensor) ที่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ได้แก่ การตรวจคลื่นสมอง (Electroencephalography : EEG) การตรวจคลื่นหัวใจ (Electrocardiography : ECG) และตรวจวัดการยึดหดตัวของกล้ามเนื้อ (Electromyography : EMG) โดยเมื่อพบว่าผู้ป่วยแสดงอาการผิดปกติระบบจะทำการส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อแจ้งให้แพทย์หรือเจ้าหน้าที่เพื่อให้ทำการดูแลรักษาได้อย่างทันท่วงที เพื่อให้การติดต่อสื่อสารดังกล่าวเป็นมาตรฐานเดียวกันจึงได้มีการกำหนดมาตรฐาน IEEE 802.15 (URL <http://www.ieee802.org/15/>) และพัฒนามาตรฐานของWBAN โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบการสื่อสารสำหรับระบบการสื่อสารแบบ WBAN ให้รองรับกับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์หรือที่ไม่ใช่ทางการแพทย์ ซึ่งรวมถึงการทำงานกับอุปกรณ์สื่อสารที่ใส่บนร่างกายมนุษย์ โดยในมาตรฐานดังกล่าว ได้กำหนดถึงความถี่การใช้งานกับย่านความถี่แคบ (narrowband) ในย่านความถี่แคบนั้นจะประกอบด้วย แถบความถี่ Medical Implant Communication Service หรือ MICS แถบความถี่ Industrial Scientific and Medical หรือ ISM แต่อย่างไรก็ตามการสื่อสารไร้สายทุกรูปแบบจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความถี่สำหรับกระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพ

มากที่สุดซึ่งทำให้นักวิจัยมีความสนใจในการออกแบบสายอากาศสำหรับรูปแบบการสื่อสารไร้สายดังกล่าว

ดังนั้นเพื่อให้การส่งข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้ทำการพัฒนาสายอากาศสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ โดยการออกแบบสายอากาศที่อยู่บนร่างกายมนุษย์นั้นควรมีขนาดที่เหมาะสม น้ำหนักเบา สร้างง่าย ราคาถูก รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นรอบตัวอีกทั้งยังมีอัตราขยายของสายอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้การติดต่อสื่อสารของระบบไร้สายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบการสื่อสารไร้สาย WBAN

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

1.2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่ออยู่บนร่างกายมนุษย์

1.2.4 เพื่อสร้างต้นแบบสายอากาศเพื่อประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ออกแบบสร้างสายอากาศแบบรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

1.3.1 วัดและวิเคราะห์สายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ได้แก่ แขน ขา และอก

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

1.4.2 ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศโดยใช้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

1.4.3 สร้างสายอากาศใช้บนร่างกายมนุษย์ตามอวัยวะร่างกายมนุษย์ได้แก่ แขน ขา อก

1.4.4 วิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนเมื่ออยู่บนร่างกายมนุษย์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- แนวทางการดำเนินงาน

สำรวจประสิทธิภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

ออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

สร้างสายอากาศต้นแบบรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่ความถี่ 2.45

GHz และ 5.8 GHz

ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศ

- ระเบียบวิธีวิจัย เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

สำรวจประสิทธิภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ออกแบบสร้างและวิเคราะห์สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ 2.45 GHz และ 5.8GHz เพื่อหาคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสองแถบความถี่

วิเคราะห์คุณสมบัติและปรับแต่งสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

- สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

- เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

โปรแกรมสำเร็จรูป CST

เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

- การเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้อง

เก็บรวบรวมผลจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปจากคอมพิวเตอร์

นำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์ เพื่อใช้ประกอบการออกแบบสายอากาศ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบสร้างและวัดทดสอบสายอากาศบนร่างกาย ที่ความถี่

2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

- การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการสร้างสายอากาศและผลกระทบของสายอากาศจากร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสองแถบความถี่ จะถูก

นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและทฤษฎี รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ไปแล้ว

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz สำหรับใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพ

1.6.2 ได้สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ที่เหมาะกับการใช้งานบนร่างกายมนุษย์

## 1.7 ปรัชญ์นวัตรกรรม

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินงาน ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อทำไปสู่วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยมีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่อยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังมีการสืบค้นจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย โดยผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ปรัชญ์นวัตรกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศต่าง ๆ และการออกแบบสายอากาศประยุกต์การใช้งานบนร่างกายมนุษย์สำหรับสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารเครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย โดยงานวิจัยในส่วนของสายอากาศนี้ถือเป็นการวิจัยพื้นฐานที่สำคัญมากสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ซึ่งสายอากาศเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายเนื่องจากเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นของระบบสื่อสารไร้สาย และการรับส่งสัญญาณของระบบจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสายอากาศด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการสื่อสารสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ เพื่อให้รองรับกับเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องสายอากาศต้องพัฒนาการทำงานให้สามารถทำงานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ ซึ่งงานวิจัยสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารระบบเครือข่ายบนร่างกายไร้สายได้กำหนดมาตรฐานการใช้งาน โดย IEEE 802.15

สำหรับงานวิจัยสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ สามารถแบ่งสายอากาศเป็น 2 ลักษณะคือ สายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ และสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานสำหรับฝังในร่างกายมนุษย์ โดยงานวิจัยสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานสำหรับฝังในร่างกาย เช่น (Takahashi and Saito, 2009) ซึ่งงานวิจัยสายอากาศเป็นแบบสายอากาศเซาะร่องและมีซิลิโคนคลุมสายอากาศอีกหนึ่งชั้น

มีการตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz และทดสอบในแบบจำลองมนุษย์ (Furse and Chung, 2004) งานวิจัยสายอากาศเป็นการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริป แล้วทดสอบสายอากาศในแบบจำลองร่างกายมนุษย์ จากการศึกษาสายอากาศแบบประยุกต์ใช้งานใช้งานแบบฝังในร่างกาย มีความยุ่งยากมากกว่าสายอากาศที่ประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ เช่น (Jong and Myung, 2008) เป็นการออกแบบสายอากาศแบบเส้นไมโครสตริปโมโนโพล และยังสามารถใช้วิธีการวัดสายอากาศ 3 กรณี คือ สายอากาศในอากาศว่าง สายอากาศมีการโค้งงอในอากาศว่าง และสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ งานวิจัยลำดับต่อมา (Salman and Talbi, 2010) สายอากาศรูปรางจี้ ตอบสนองสองแถบความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz รูปแบบสายอากาศมีลักษณะสองชั้น มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นรอบตัวและในงานวิจัยนี้ได้เลือกออกแบบสายอากาศเป็นการประยุกต์ระหว่างไมโครสตริปแพตช์และโมโนโพลเนื่องจากสายอากาศที่มีขนาดเหมาะสม น้ำหนักเบา โครงสร้างไม่ซับซ้อน ติดตั้งง่าย และมีราคาถูก

## 1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารเครือข่ายบนร่างกายมนุษย์ ทฤษฎีของสายอากาศเบื้องต้น

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์สองแถบความถี่ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ สำหรับประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลและคุณสมบัติของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์การใช้งานบนร่างกายมนุษย์ โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการสรุปผลการวิจัยของการออกแบบและผลกระทบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ ปัญหาที่เกิดขึ้นข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### หลักการของระบบเครือข่ายบนร่างกายไร้สายและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในการออกแบบสายอากาศ

#### 2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายนั้น เป็นสิ่งจำเป็นในการใช้งานรับส่งข้อมูลที่ต้องการผู้ใช้สามารถระบุข้อมูลที่ต้องการได้ เพื่อให้มั่นใจว่าการรับส่งข้อมูลไม่มีความผิดพลาดจากเครือข่ายต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกัน ซึ่งการสื่อสารของระบบเครือข่ายบนร่างกายไร้สาย มีสายอากาศเป็นส่วนสำคัญของการสื่อสารระบบเครือข่ายบนร่างกายไร้สาย โดยความซับซ้อนขึ้นอยู่กับความต้องการของตัวรับส่งสัญญาณวิทยุและนอกจากนี้ปัจจัยจากคุณลักษณะคลื่นในสภาพแวดล้อมโดยรอบสำหรับการสื่อสารคลื่นวิทยุทั่วไปมีระยะไกลและระยะใกล้ สายอากาศทั่วไปมีการพิสูจน์ว่าให้ประสิทธิภาพการทำงานตามที่ต้องการ ลดค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการผลิต ในอีกด้านสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารในปัจจุบันและอนาคตสายอากาศมีความจำเป็นที่ต้องทำงานได้มากกว่าหนึ่งความถี่ เพราะสายอากาศต้องไปทำงานที่ความถี่ที่แตกต่างกันสำหรับรองรับเทคโนโลยีใหม่ที่เพิ่มขึ้นและบริการที่มีให้กับผู้ใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องพัฒนาการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์บนร่างกาย ซึ่งจะต้องที่ขนาดเหมาะสมและน้ำหนักเบา

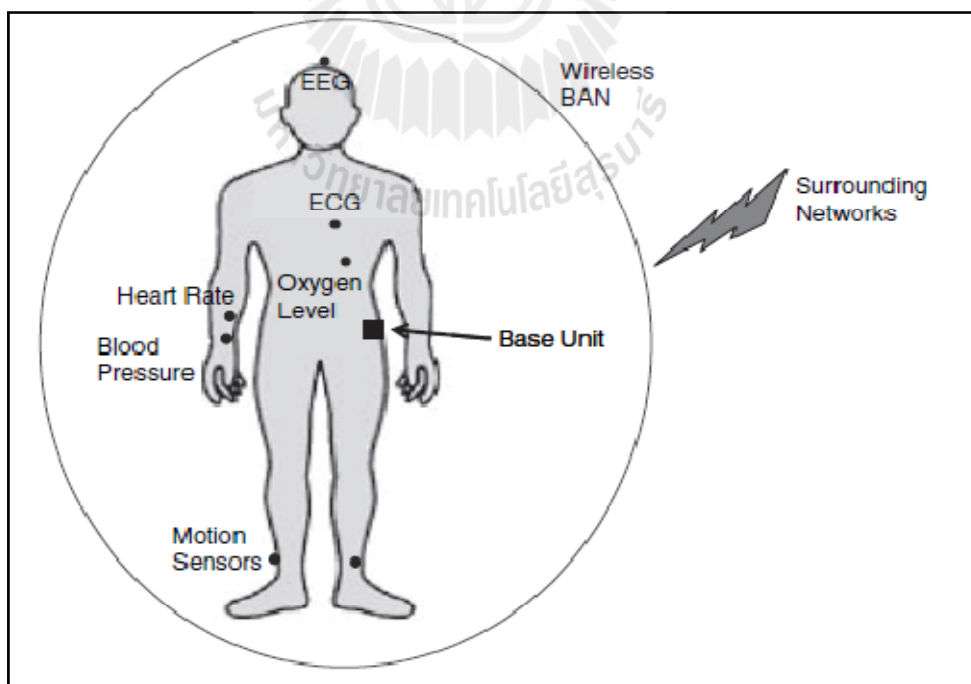
สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะได้นำเสนอเกี่ยวกับพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล โดยจะเน้น ไปยังคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานบนเครือข่ายดังกล่าว ลักษณะสำคัญของสายอากาศสามใส่จะกล่าวถึงความต้องการของการออกแบบสายอากาศ และการพิจารณาทางทฤษฎีต่อผลกระทบของพารามิเตอร์และชนิดของสายอากาศบนช่องสัญญาณวิทยุในร่างกายเป็นศูนย์กลางเครือข่าย จะแสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของการพิจารณาการทำงานที่จำเป็นในการออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์สามใส่ใช้งานสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์การวิเคราะห์โดยละเอียดและการตรวจสอบของการออกแบบสายอากาศ และประสิทธิภาพการทำงานด้านการดูแลสุขภาพ

เพื่อให้เข้าใจถึงความต้องการของสายอากาศสำหรับสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ และข้อจำกัดในการใช้งานระบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายบนร่างกาย คุณสมบัติของเครือข่ายบนร่างกายไร้สาย (WBAN)

## 2.2 เครือข่ายบนร่างกายไร้สาย (WBAN)

เครือข่ายบนร่างกาย (Body Area Network) เป็นการพัฒนาการแนวคิดเครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคล (PAN) และเครือข่ายไร้สายกับจุดที่อยู่ตามร่างกายหรือบริเวณใกล้เคียง ความก้าวหน้าของการสื่อสารและเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ขนาดกะทัดรัดและอัจฉริยะที่สามารถถูกวางไว้บนร่างกายของมนุษย์หรือฝังอยู่ภายในร่างกาย ในอนาคต BANs จะมีการประมวลผลที่สูงและมีความซับซ้อนที่จะให้ฟังก์ชันของการคำนวณที่มีประสิทธิภาพเพื่อรองรับสำหรับการใช้งานที่สูงขึ้น เมื่อความต้องการมากขึ้นจึงได้นำไปสู่การวิจัยและการพัฒนาที่เพิ่มขึ้นในส่วนของการใช้งานด้าน WBAN สำหรับการประยุกต์ต่าง ๆ โดยที่มีความน่าสนใจของด้านการดูแลสุขภาพและเครื่องที่สวมใส่ได้

ความคิดของเครือข่ายพื้นที่ร่างกายเริ่มต้นเพื่อวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ สำหรับการจับเก็บและบันทึกข้อมูลสุขภาพของผู้ป่วยอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเซนเซอร์ที่มีอยู่ตามจุดต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและส่งสัญญาณในร่างกาย เช่น ความดันโลหิต สัญญาณการเต้นของหัวใจ ระดับน้ำตาล และอุณหภูมิ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลหรือสัญญาณคำสั่งไปยังเซนเซอร์ตามจุดต่าง ๆ ของร่างกาย เพื่อที่จะให้ดำเนินตามคำสั่งที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูป 2.1 กระประยุกต์ใช้เครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย

เครือข่ายบนร่างกายไร้สายสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น

1. ความช่วยเหลือในการบริการฉุกเฉิน เช่น ตำรวจ การรักษาทางการแพทย์และเจ้าหน้าที่ดับเพลิง
2. ประยุกต์การใช้งานด้านทหารรวมถึงการติดตามตำแหน่งของสถานที่ การส่งภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่ส่งภาพการสื่อสารในเวลาจริง
3. ระบบเสมือนจริง ( Augmented Reality-AR)
4. การเข้าถึงระบบหรือระบุตัวตนโดยระบุที่อุปกรณ์ต่อพ่วงของรายบุคคล
5. การสนับสนุนระบบนำทางในรถหรือในขณะที่เดิน
6. การตรวจสอบอัตราชีพจรในการเล่นกีฬา

โดยเครือข่ายบนร่างกายไร้สาย (WBAN) ที่ดีควรให้ผู้ใช้สนุกกับการใช้งานดังกล่าวที่มีการรบกวนต่ำกำลังส่งน้อยและไม่ซับซ้อน

เครือข่ายบนร่างกายมีคุณสมบัติที่โดดเด่นและความต้องการที่ทำให้เทคโนโลยีเครือข่ายบนร่างกายที่มีความแตกต่างจากเครือข่ายไร้สายอื่น ๆ ซึ่งรวมถึงข้อจำกัดเกี่ยวกับผลกระทบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากความใกล้ชิดกับร่างกายมนุษย์ที่ต้องใช้กำลังส่งที่ต่ำมาก อุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านเครือข่ายพื้นที่ร่างกายได้มีการจำกัดแหล่งที่มาของพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก อุปกรณ์บางอย่างมีการปลูกถ่ายในร่างกายซึ่งหมายความว่าแบตเตอรี่รีชาร์จไฟแบบปกติไม่ได้ รวมถึงจำนวนโหนดที่จุดต่าง ๆ ของร่างกายที่มีการใช้งานเฉพาะด้านที่วางอยู่บนร่างกายของมนุษย์ มีการรบกวนที่ค่อนข้างแรง นอกจากนี้เนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์เป็นตัวกลางที่มีความสูญเสียด้วยเหตุนี้การแพร่กระจายคลื่นของเครือข่ายบนร่างกายไร้สายด้านหน้าของคลื่นจะเกิดการลดทอนมากก่อนจะถึงผู้รับคลื่น เครือข่ายบนร่างกายเป็นเครือข่ายโครงสร้างพิเศษและคุณสมบัติที่ถูกกำหนดโดยร่างกายมนุษย์และมีการเปรียบเทียบช่องสัญญาณการแพร่กระจายในร่ม ผลกระทบของร่างกายนำทำให้กำหนดรูปแบบช่องสัญญาณวิทยุที่จะใช้ในการออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

### 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายบนร่างกาย และส่วนบุคคลไร้สาย

สายอากาศมีบทบาทสำคัญในการกำหนดการออกแบบที่เหมาะสมของระบบวิทยุเนื่องจากสายอากาศจะนำมาใช้ในการส่งและรับสัญญาณผ่านพื้นที่ว่างหรืออากาศเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังปลายทางที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามคุณลักษณะและการทำงานของสายอากาศที่ต้องการให้เป็นไปตามข้อกำหนดซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานการสื่อสารไร้สายหรือตามความต้องการของ



ระบบเทคโนโลยีซึ่งหมายความว่า การรับและส่งสัญญาณของแต่ละย่านความถี่จะถูกกำหนดไว้ พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกประการคือ อัตราขยายของสายอากาศที่มีผลโดยตรงต่อกำลังส่ง เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับระดับของพลังงานที่ร่างกายมนุษย์สามารถสัมผัสได้ การออกแบบสายอากาศและ ส่วนประกอบความถี่วิทยุซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบครอบ

การออกแบบสายอากาศสำหรับสวมใส่และการใช้งานแบบพกพา โดยปฏิบัติการ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายอากาศของอุปกรณ์และร่างกายมนุษย์เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้อง พิจารณา ซึ่งข้อกำหนดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้จำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบครอบของการ กำหนดค่าสายอากาศที่แตกต่างกัน สำหรับเครือข่ายบนร่างกายไร้สายเป็นที่ยอมรับทั่วไปสายอากาศ สำหรับอุปกรณ์สวมใส่จะต้องไม่ซับซ้อน สร้างง่าย และยังมีความเป็นไปได้ในการรวมระบบ เครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สายเข้ากับชีวิตประจำวัน

## 2.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศบนร่างกายมนุษย์

สำหรับพารามิเตอร์สายอากาศทั่วไปมี ค่าอิมพีแดนซ์ แบนด์วิดท์ รูปแบบการแผ่กระจาย คลื่น ทิศทางการแผ่กระจายคลื่น ประสิทธิภาพ และอัตราขยาย เป็นคุณลักษณะของสายอากาศ ทั่วไป โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกพิจารณาในสถานการณ์ปกติ เมื่อสายอากาศส่งและรับสัญญาณ ในอากาศว่าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสายอากาศอยู่ในบริเวณใกล้เคียงตัวกลางที่มีการสูญเสีย เช่นเนื้อเยื่อของมนุษย์ คุณลักษณะของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และพารามิเตอร์ของสายอากาศซึ่งต้องทบทวนและนิยามใหม่

ในตัวกลางจะมีค่าความซึมซาบเชิงซ้อนและค่าความนำที่ไม่เป็นศูนย์ ประสิทธิภาพ ของความซึมซาบ  $\epsilon_{eff}$  และประสิทธิภาพของค่าความนำ  $\sigma_{eff}$  ซึ่งจะแสดงในสมการ (Zhi Ning Chen, 2007)

$$\epsilon_{eff} = \epsilon - \frac{\sigma''}{\omega} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{eff} = \sigma' - \omega\epsilon'' \quad (2.2)$$

เมื่อค่าความซึมซาบ และ ค่าความนำจะประกอบด้วยจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (2.4)$$

ค่าความซึมซาบของตัวกลางจะมีขนาดปกติที่สูญญากาศสำหรับแบบง่าย

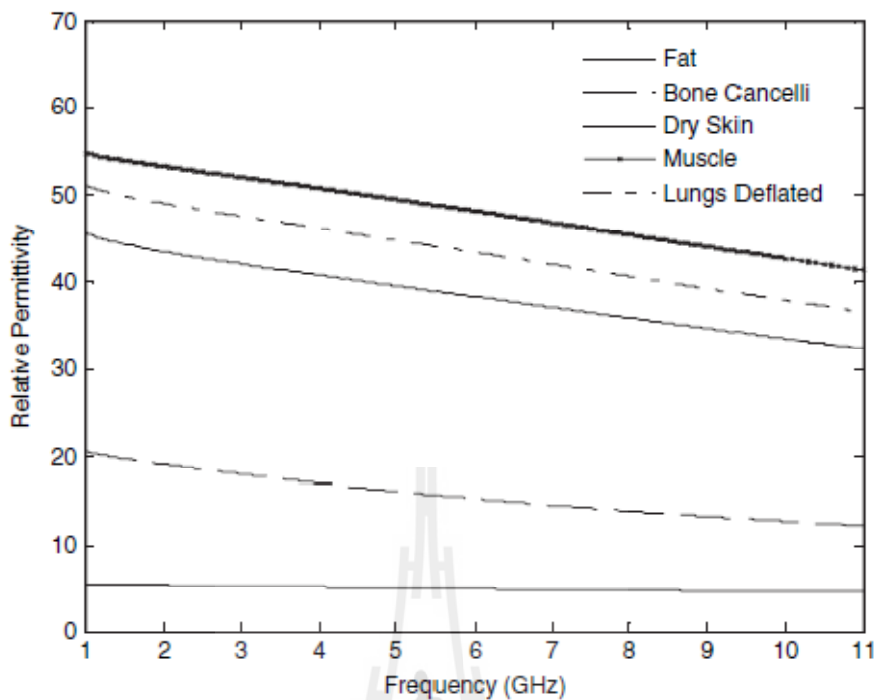
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

กำหนดให้  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m.

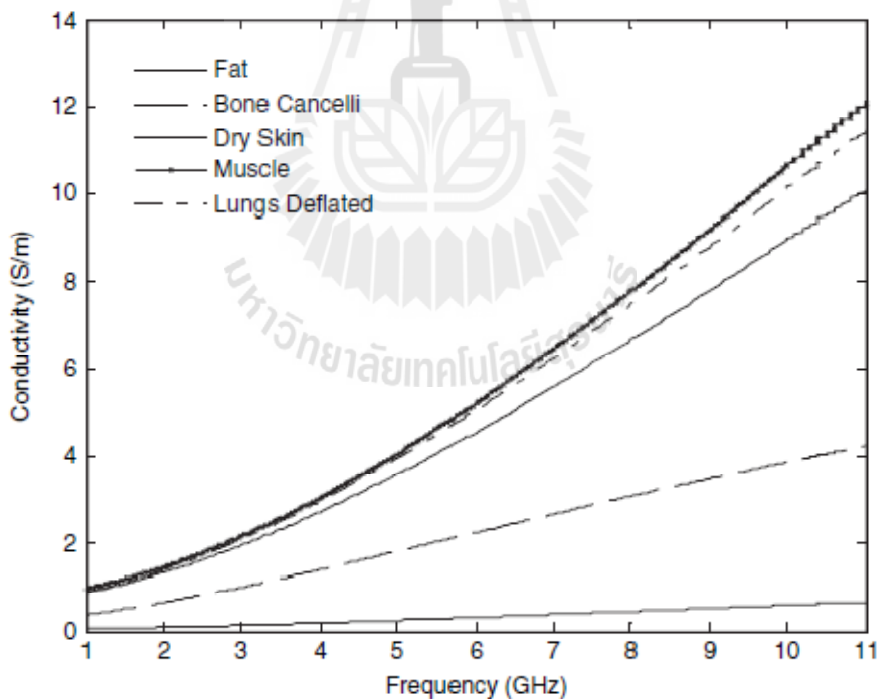
สมการข้างต้นบ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่างพื้นที่ว่างหรืออากาศและวัตถุที่มีการสูญเสียในส่วยจินตภาพของค่าความซึมซาบ รวมถึงค่าความนำของวัตถุที่กำหนดค่าความสูญเสียซึ่งได้กำหนดการสูญเสียที่แสดงในรูปแบบการกระจายหรือลอสเทนเจนซ์

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{eff}}{\omega \epsilon_{eff}} \quad (2.6)$$

ระบบทางชีวภาพของร่างกายมนุษย์เป็นตัวอย่างไดเรกติกที่มีรูปร่างไม่สมมาตรที่มีความถี่ขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบและค่าความนำ การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในและพลังงานที่กระจายขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาของร่างกายที่เป็นรูปทรงเลขาคณิต เช่นเดียวกับความถี่และการโพลาไรซ์ของคลื่นที่เกิดขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงผลวัดค่าความซึมซาบ และค่าความนำสำหรับจำนวนเนื้อเยื่อของมนุษย์ในแถบความถี่ 1-11 GHz ผลการวิจัยได้จากการศึกษารวบรวม (<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>; Gabriel and Gabriel, 1999) ซึ่งครอบคลุมเนื้อเยื่อที่มีหลายประเภทของร่างกายที่แตกต่างกัน ดังนั้นความแตกต่างที่สำคัญถึงหนึ่งที่สามารถระบุได้โดยตรงเมื่อมีการวางสายอากาศบนตัวกลางที่มีความสูญเสีย ในกรณีนี้ในร่างกายมนุษย์เป็นค่าความเบี่ยงเบนค่าความยาวคลื่นจากพื้นที่ว่างหนึ่ง



(ก) Relative permittivity



(ข) Conductivity

รูป 2.2 ผลวัดค่า relative permittivity และ conductivity ของเนื้อเยื่อมนุษย์

ประสิทธิภาพความยาวคลื่น ( $\lambda_{eff}$ ) ที่กำหนดความถี่จะกลายเป็นคลื่นที่สั้นลงเนื่องจากคลื่นเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีความสูญเสีย

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_0}{\text{Re}\left[\sqrt{\epsilon_r - j\sigma_e / \omega\epsilon_0}\right]} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\lambda_0$  เป็นความยาวคลื่นในพื้นที่ว่างหรืออากาศ อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพความถี่ซิมซอบ โดยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับร่างกาย และยังเกี่ยวกับสถานที่เนื่องจากความหนาและชนิดของเนื้อเยื่อต่าง ๆ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศ โครงสร้าง และการแมตซ์ซิ่งของสายอากาศ

สายอากาศทำงานได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นร่วมและสายอากาศระนาบแบบพื้นผิวสัมผัสโดยตรงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นและด้วยเหตุนี้การเบี่ยงเบนของความถี่เรโซแนนซ์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากร่างกายเช่นกัน

ปัจจัยสำคัญในการอธิบายลักษณะของสายอากาศเป็นรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นคืออัตราขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศ การนิยามรูปแบบสายอากาศและประสิทธิภาพมีความไม่ชัดเจนไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนจากลักษณะรูปแบบสายอากาศทั่วไปเมื่ออยู่ในหรือบนตัวกลางที่มีความสูญเสียซึ่งเป็นผลกระทบของตัวกลางที่มีความสูญเสียทำให้คลื่นในสนามระยะไกลมีการลดทอนอย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพสายอากาศเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราขยายของสายอากาศ (Balanis, 1997)

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ตัวประกอบสัมประสิทธิ์ (the efficiency factor) และ  $D(\theta, \phi)$  คือทิศทางของสายอากาศ  $P_n$  คือรูปแบบการแผ่กระจายกำลังของสายอากาศ ซึ่งสัมพันธ์กับแอมพลิจูดของสนามระยะไกล  $F$

$$D(\theta, \phi) = \frac{P_n(\theta, \phi)}{P_n(\theta, \phi)_{average}} = \frac{|F(\theta, \phi)|^2}{|F(\theta, \phi)|_{average}^2} \quad (2.9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สายอากาศบนร่างกายเป็นความแตกต่างจากในพื้นที่ว่างรวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นสนามไกลของสายอากาศ และการเปลี่ยนแปลงการกระจายสนามไฟฟ้าที่ระยะทางต่าง ๆ จากร่างกาย อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของสายอากาศในการสูญเสียอื่น ๆ หรือตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$Efficiency_{radiation} = \frac{RadiatedPower}{DeliveredPower} \quad (2.10)$$

ปริมาณที่สำคัญซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปแบบสายอากาศและน่าสนใจมากในการออกแบบสายอากาศที่สวมใส่ได้เป็นอัตราส่วนที่ด้านหน้าต่อด้านหลัง อัตราส่วนนี้จะกำหนดความแตกต่างในพลังงานคลื่นในสองทิศทางตรงข้ามกับที่ใดก็ตามที่สายอากาศที่มีการวางอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสายอากาศบนร่างกายและยังเกี่ยวกับโครงสร้างสายอากาศ

## 2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ

สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่ง จำเป็นต้องทราบคำนิยามของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเป็นอย่างมาก สิ่งที่เป็นปัจจัยพื้นฐานของสายอากาศคืออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ประสิทธิภาพ (Efficiency) และอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ รวมถึงคุณลักษณะของปัจจัยอื่น ๆ ที่จะได้กล่าวถึงคือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beamwidth) การแยกขั้วคลื่น (Polarization) ทุก ๆ ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วนั้นคือสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการแสดงคุณลักษณะของสายอากาศ และไม่ว่าจะเป็นการออกแบบสายอากาศหรือการกำหนดสายอากาศให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน

### 2.5.1 อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์นั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าของแบนด์วิดท์สำหรับสายอากาศที่มีการแมตช์อย่างเพียงพอกับสายส่ง เช่น 10% หรือน้อยกว่าซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นสัญญาณที่สูญเสียเนื่องจากการสะท้อน โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์รวมถึงค่าคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตลอดย่านที่สนใจ โดยค่า VSWR และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นการกำหนดอัตราส่วนของคลื่นที่สะท้อนกลับ ( $V_0^-$ ) กับคลื่นที่ตกกระทบ ( $V_0^+$ ) ที่โหนดของสายส่ง และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.11

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{line} - Z_{load}}{Z_{line} + Z_{load}} \quad (2.11)$$

$Z_{line}$  และ  $Z_{load}$  เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งและอิมพีแดนซ์ของโหลด (สายอากาศ) ซึ่งแรงดันและกระแสที่ผ่านสายส่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากโหลด  $Z$  แสดงได้ดังนี้

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} = V_0^+ (e^{-j\beta z} + \Gamma e^{j\beta z}) \quad (2.12)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-j\beta z} - V_0^- e^{j\beta z}) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} - \Gamma e^{j\beta z}) \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\Gamma$  ซึ่งมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์  $S_{11}$  ของ scattering matrix และกรณีที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์แบบจะทำให้  $\Gamma = 0$  และให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่แย่ที่สุดมีค่า  $\Gamma = -1$  หรือ  $1$  ซึ่งเหมือนกันกับความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ที่โหลดของการ short และ open ซึ่งกำลังงานที่มีการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อของสายอากาศเป็นเป็นเรื่องที่สำคัญซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยกำลังงานของช่วงเวลาเฉลี่ยเป็นการวัดตามปกติไปยังสายส่งที่มีอิทธิพลกับค่ากำลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด ให้กำลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

$$P_{ave}^i = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.14)$$

และกำลังงานที่สะท้อนกลับเป็นสัดส่วนกับกำลังงานที่เกิดขึ้น โดยคูณกับ ตัวประกอบ ของ  $|\Gamma|^2$  แสดงได้โดย

$$P_{ave}^r = -|\Gamma|^2 \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.15)$$

ค่ากำลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด ดังนั้นเป็นผลรวมของกำลังงานที่เกิดขึ้นและกำลังงานเฉลี่ยที่สะท้อนกลับ

$$P_{ave} = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma|^2] \quad (2.16)$$

เนื่องจากกำลังงานที่ส่งไปยังโหลดเป็นสัดส่วนกับ  $(1 - |\Gamma|^2)$  โดยค่าที่สามารถยอมรับได้ของ  $\Gamma$  เพียงแค่ 10 % เท่านั้น จึงจะสามารถคำนวณค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับได้ ส่งผลให้  $\Gamma$  มีค่าเท่ากับ 0.3162

เมื่อโหลดไม่แมตช์กับสายส่งแล้วจะเกิดการสะท้อนกลับที่โหลด เพราะว่าการเคลื่อนที่เดินทางไปในสายส่งเป็น negative ทำยที่สุดแล้วก็จะเกิดเป็นคลื่นนิ่งในสายส่งที่เราไม่ต้องการ ซึ่งการวัดค่า VSWR นั้นเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งกับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.17)

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.17)$$

สำหรับค่าที่ต้องการของ VSWR คือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.0 ซึ่งบ่งบอกถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดี โดยของ VSWR ที่กำหนดสามารถคำนวณได้จากค่าของ  $\Gamma$  ตามสมการที่ (2.17)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นการวัดคุณลักษณะของการแมตช์อิมพีแดนซ์อีกแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์เหมือนกับค่าของ  $\Gamma$  หรือ  $S_{11}$  โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศคำนวณได้จากสมการที่ 2.18

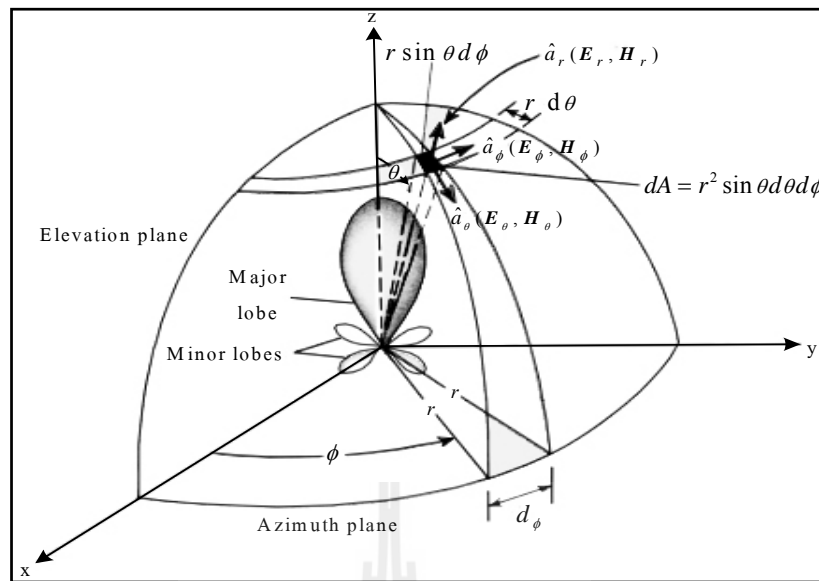
$$\text{Return Loss} = -10 \log |S_{11}|^2 = -20 \log (|\Gamma|) \quad (2.18)$$

การแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีเป็นการบ่งบอกว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับต้องน้อยกว่า -10 dB สรุปว่าสายอากาศที่ดีนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า 0.3162 มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 และมี ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB

### 2.5.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

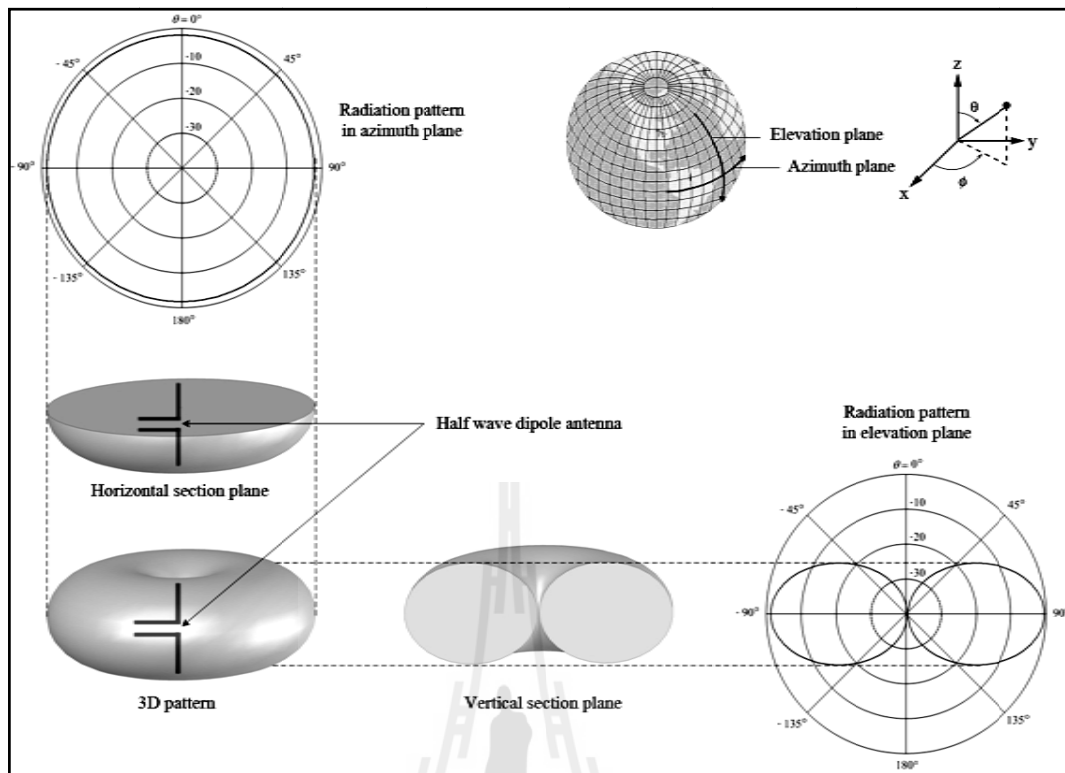
คุณลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งที่สำคัญสำหรับการอธิบายคุณลักษณะของสายอากาศรูปแบบต่าง ๆ นั้นคือแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน (radiation pattern) เนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดสเปซ (space coordinates function) ของค่าความแรงของสนาม (field strength) เฟส (phase) หรือ โพลาริเซชัน (polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงคุณสมบัติของสายอากาศในรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสามมิติโดยมีรัศมีคงที่ ซึ่งมีการใช้เส้นเพื่อแสดงพลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ โดยมีชื่อเรียกว่า แบบรูปพลังงาน (power pattern) ของสายอากาศ และรูปภาพที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปสนาม (field pattern) ของสายอากาศ โดยระบบพิกัดที่นิยมนำมาใช้สำหรับการแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นนั้นจะนิยมพิจารณาในพิกัดทรงกลม เนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในสามมิติเป็นการวัดในระบบของพิกัดทรงกลม ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มการแผ่กระจายพลังงานในสนามระยะไกลที่ล้อมรอบสายอากาศในลักษณะที่เป็นทรงกลม โดยในระบบพิกัดของทรงกลม ระนาบ x-z (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง  $\theta$  เมื่อ  $\phi = 0^\circ$ ) เป็นการชี้บ่งบอกถึงระนาบมุมเงย ส่วนระนาบ x-y (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง  $\phi$  เมื่อ  $\theta = 90^\circ$ ) เป็นการชี้บ่งบอกถึงระนาบมุมแอซิมัท โดยในระนาบของมุมเงยนั้นจะมีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าอยู่ (E-plane) และมีทิศทางของการแผ่กระจายพลังงานสูงสุด ส่วนในระนาบของแอซิมัทนั้นจะมีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กอยู่ (H-plane) และมีทิศทางของการแผ่กระจายพลังงานสูงสุด ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานทั้งสองระนาบนั้นเป็นการพล็อตในเชิงขั้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\theta$  หรือ  $\phi$  และคงที่ค่า  $\phi$  และ  $\theta$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3





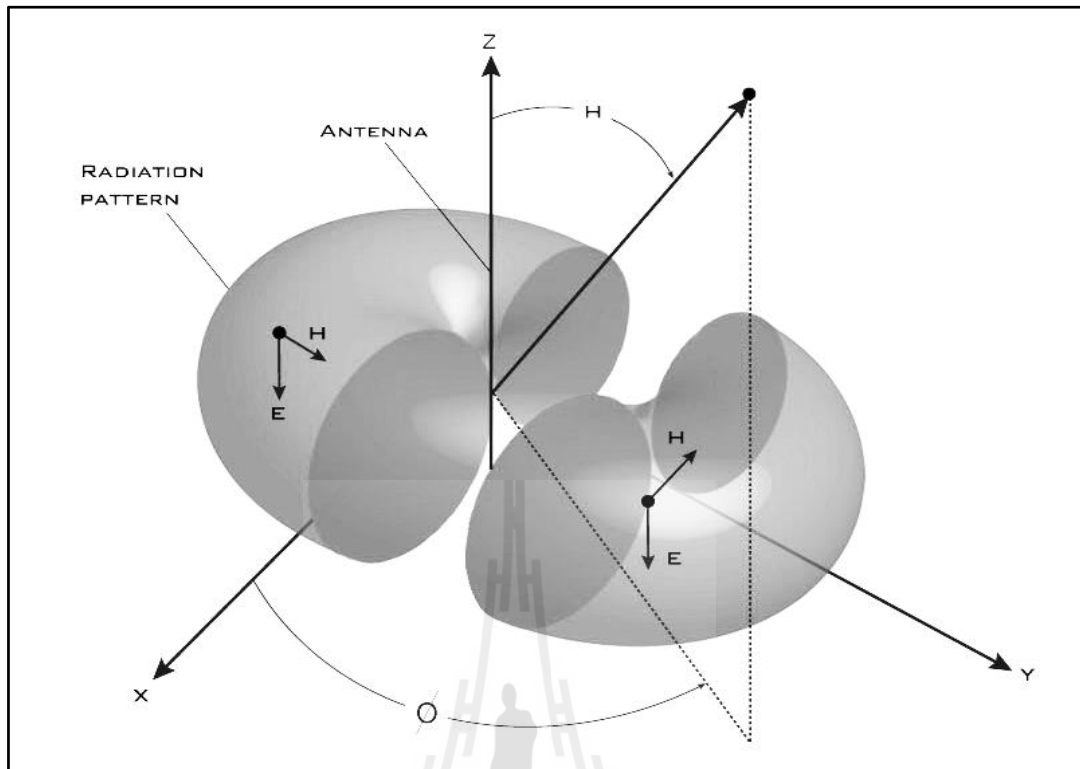
รูปที่ 2.3 แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่น

ซึ่งการวิเคราะห์คุณลักษณะในเชิงขั้วของสายอากาศเป็นการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ โดยให้ระนาบแอสิมัททิงที่และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของมุมเงย (เปลี่ยนแปลงค่า  $\theta$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามไฟฟ้า ส่วนการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ โดยให้ระนาบของมุมเงยคงที่ที่มีการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดนั้นคือ  $\theta = 90^\circ$  และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของแอสิมัท (เปลี่ยนแปลงค่า  $\phi$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามแม่เหล็ก โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2. ซึ่งเป็นการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติ และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติโดยเปลี่ยนแปลงค่า  $\theta$  โดยให้  $\phi = 0^\circ$  และเปลี่ยนแปลงค่า  $\phi$  โดยให้  $\theta = 90^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีการพิจารณาร่วมกันทั้งในระนาบสามมิติและระนาบสองมิติแล้วจะทำให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น และพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดอยู่ที่  $\theta = 90^\circ$  สำหรับทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่า  $\phi$  ในระนาบของแอสิมัท และค่าที่เป็นศูนย์ของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานอยู่ในส่วนปลายของไดโพลตามแนวแกน  $z$  (หรือที่  $\theta = 0^\circ$  และ  $180^\circ$ )



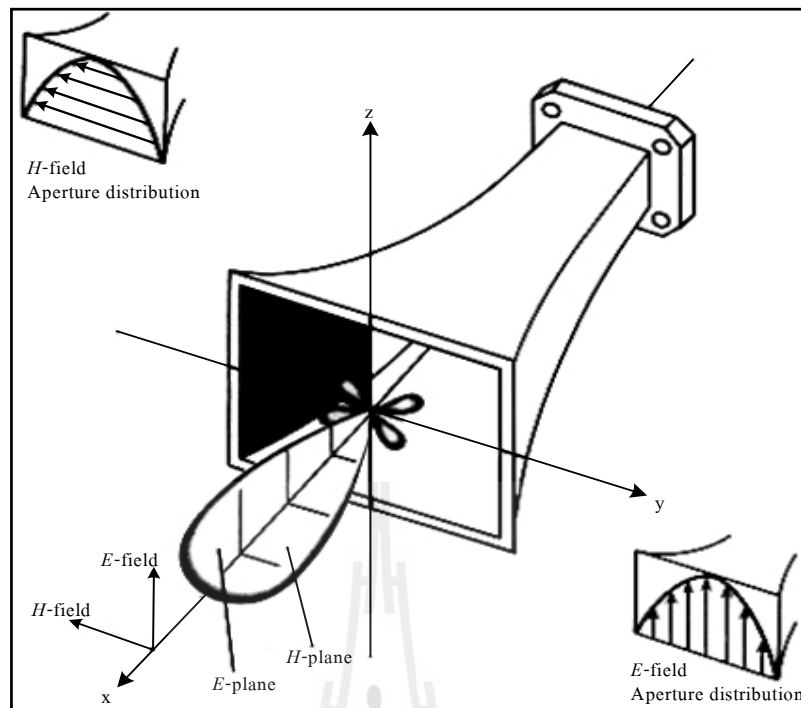
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติ และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติ

ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ สายอากาศที่มีการแผ่กระจายพลังงานแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) และสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง (directional antenna) โดยสายอากาศแบบไอโซทรอปิกคือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่ง ที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omni-directional antenna) คือสายอากาศแบบไดโพลความยาวครึ่งคลื่น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นจะมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว (omni-directional pattern) โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมแอสซิมาท (azimuth) นั่นเอง และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานเป็นแบบมีทิศทาง ซึ่งคือมุมเงย (elevation) โดยคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

โดยจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบแนวราบ (azimuth plane,  $[f(\phi), \theta = \pi/2]$ ) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบแนวตั้ง (elevation plane,  $[\theta = 0, \phi = \text{ค่าคงที่}]$ ) แบบรูปสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวนี้ เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปสายอากาศแบบมีทิศทาง ส่วนสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง (directional antenna) นั้นจะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก (principal pattern) ในเทอมของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น เช่น สายอากาศโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (linearly polarization) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบแม่เหล็กจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามแม่เหล็กที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ  $x-z$  (ระนาบแนวราบ  $\theta = \pi/2$ ) หรือระนาบสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.6

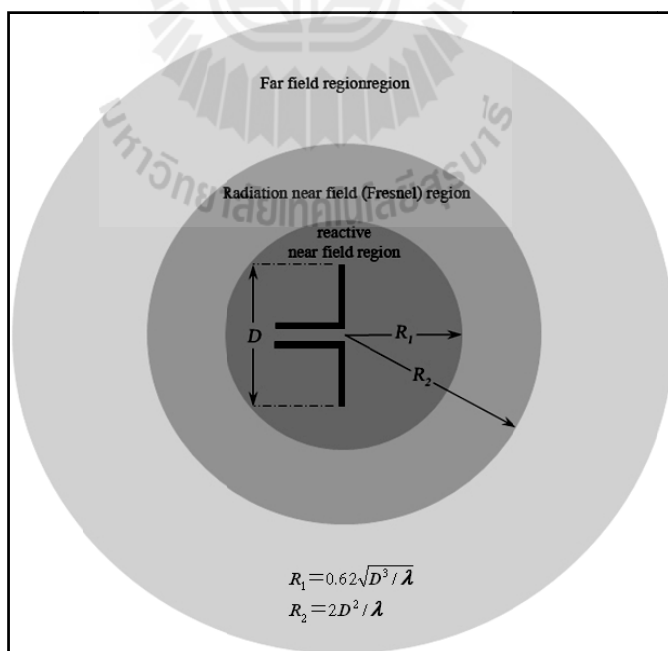


รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก  
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร

โดยแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานนี้เป็นตัวบ่งบอกสำหรับการเลือกสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้กับดาวเทียมหรือการเชื่อมต่อสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างจุดจะต้องเลือกใช้สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูง มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานไปในทิศทางที่เจาะจงรู้ตำแหน่งที่แน่นอน ส่วนการสื่อสารของเทคโนโลยีเครือข่ายพื้นร่างกายไร้สายที่จะต้องใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัว เป็นต้น ดังนั้นการแผ่กระจายพลังงานจะต้องแผ่กระจายออกอย่างสม่ำเสมอโดยรอบของผู้ใช้ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีมาตรฐานที่ยอมรับกันเป็นสากล ซึ่งสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (The Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) ได้กำหนดในส่วนของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไว้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือกราฟที่เป็นการแสดงถึงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ เป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง

บริเวณสนามของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณแรกเป็นสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (reactive near field region) เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด ซึ่งสนามที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะเป็นสนามรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ โดยบริเวณนี้จะมีระยะทางคือ  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  จากผิวของสายอากาศ เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของ

สายอากาศ บริเวณที่สองเป็นสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่ (radiating near field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟกับบริเวณแผ่พลังงานสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นจะแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศซึ่งถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นสนามบริเวณนี้จะไม่เกิดขึ้น และในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < R < 2D^2/\lambda$  สุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล (far field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่มีการกระจายของสนามเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทางที่ห่างออกมาจากตัวสายอากาศ โดยถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณแผ่พลังงานสนามไกล จะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R > 2D^2/\lambda$  จากสายอากาศ ซึ่งบริเวณสนามสำหรับการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานส่วนใหญ่นั้นจะต้องกระทำในสนามระยะไกล และเป็นการอธิบายถึงลักษณะฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทางเสมอ ซึ่งคุณลักษณะการแผ่กระจายพลังงานประกอบด้วย ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (power flux density) ความหนาแน่นของพลังงานที่แผ่กระจาย (radiation power density) ความเข้มของสนาม (field intensity) สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) เฟสของการชี้หน้า (directivity phase) หรือการแยกขั้วคลื่น (polarization) โดยบริเวณสนามของสายอากาศที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศที่ต้องการพิจารณา

### 2.5.3 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth) เป็นการกำหนดมุมจากกึ่งกลางของโพลหลักไปยังจุดที่การแผ่กระจายกำลังงานลดลง 3 dB คือ ในระนาบหนึ่ง ๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุด และมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทางซึ่งความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และคำว่าความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างลำคลื่นที่มีค่า 3 dB เสมอ (3 dB Beamwidth) นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศยังถูกนำมาใช้ในการอธิบายถึงความสามารถในการแยกแยะของสายอากาศ เพื่อแยกแยะระหว่างแหล่งกำเนิดสองตัวซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเป็นศูนย์กลางแรก โดยมักจะนำไปใช้ในการประมาณค่าของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

### 2.5.4 ความหนาแน่นการแผ่กระจายกำลังงาน

ปริมาณที่ใช้ในการอธิบายกำลังที่เกิดจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือเวกเตอร์พอยต์ติง (Pointing Vector) ซึ่งกำหนดโดย

$$W = E \times H \quad (2.19)$$

เมื่อ  $W$  คือเวกเตอร์พอยต์ติงซึ่งมีหน่วยเป็น  $W/m^2$   $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งมีหน่วยเป็น  $V/m$  และ  $H$  คือความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น  $A/m$  เนื่องจากเวกเตอร์พอยต์ติงก็คือความหนาแน่นกำลังรวมที่ตัดผ่านพื้นที่ผิวปิด สามารถหาได้โดยการอินทิเกรตองค์ประกอบที่ตั้งฉากของเวกเตอร์พอยต์ติงที่อยู่เหนือพื้นผิวทั้งหมดในรูปของสมการ

$$P = \oint_S W \cdot ds \quad (2.20)$$

โดยที่  $P$  คือกำลังงานรวมซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์

และสำหรับรูปแบบที่ใช้แสดงการเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิกเชิงเวลา สามารถที่จะกำหนดสนามเชิงซ้อนของ  $E$  และ  $H$  ได้ซึ่งจะสัมพันธ์กับส่วนที่เกิดขึ้นแบบชั่วขณะของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{H}$  ซึ่งค่าเวกเตอร์พอยต์ติงเฉลี่ยเชิงเวลา ก็คือความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \vec{E} \times \vec{H}^* \right] \quad (2.21)$$

เมื่อ  $W_{av}$  คือความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยมีหน่วยเป็น  $W/m^2$  ซึ่งจากสมการแสดงว่ากำลังที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศในบริเวณสนามระยะไกลส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นจำนวนจริง และสามารถกล่าวได้ว่าส่วนนี้เป็นเสมือนความหนาแน่นการแผ่กระจายคลื่น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.21) ค่ากำลังงานเฉลี่ยที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศสามารถหาได้จากการอินทิเกรตองค์ประกอบของความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยปกติบนพื้นผิวปิดทั้งหมด และกำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{rad} = P_{av} &= \frac{1}{2} \oint_S \operatorname{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{s} \\ &= \oint_S W_{rad} \cdot d\vec{s} \end{aligned} \quad (2.22)$$

### 2.5.5 ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงาน

ค่าความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานถูกกำหนดด้วยมาตรฐานของ IEEE โดยค่าความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังที่คลื่นแผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหนึ่งหน่วยมุมตัน โดยรูปแบบอย่างง่ายคือ ค่าความหนาแน่นของการแผ่กระจายกำลังงาน ( $W_{rad}$ ) คูณกับระยะทาง ( $r$ ) ยกกำลังสอง แสดงได้ดังสมการ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $U$  คือความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานมีหน่วยเป็น  $W/\text{unit solid angle}$  และ  $W_{rad}$  คือความหนาแน่นของการแผ่กระจายกำลังงานมีหน่วยเป็น  $W/m^2$  นอกจากนี้ความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานยังมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าในระยะไกลของสายอากาศด้วยนั่นคือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |\vec{E}(r, \theta, \phi)|^2 = \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\vec{E}$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศ  $\eta$  คือค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริงของตัวกลาง  $E_\theta$  และ  $E_\phi$  คือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศ โดยค่ากำลังงานรวมที่ได้จากการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตลอดมุมตันขนาด  $4\pi$  ทั้งหมดได้ดังนี้

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.25)$$

โดยที่  $d\Omega$  คือส่วนประกอบของมุมตันเท่ากับ  $\sin \theta d\theta d\phi$  สำหรับแหล่งกำเนิดที่เป็นไอโซทรอปิก  $U$  จะไม่ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ซึ่งเหมือนกับกรณีของ  $W_{rad}$  ดังนั้นสมการที่ 2.23 สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.26)

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U_0 d\Omega = U_0 \iint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0 \quad (2.26)$$

ดังนั้นความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานของแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกจะหาได้จาก

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.27)$$

### 2.5.6 สภาพเจาะจงทิศทาง

สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity) คือ อัตราส่วนความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้จากตัวสายอากาศกับความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานเฉลี่ยที่ออกไปทุกทิศทาง โดยค่าความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานเฉลี่ยจะเท่ากับกำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกไปจากตัวสายอากาศหารด้วย 4 ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางให้กับสายอากาศ ก็จะถือว่าทิศทางที่มีการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุด คือทิศทางที่จะกำหนดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง สภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดที่ไม่ใช่แบบไอโซทรอปิก จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานของแหล่งกำเนิดนั้นในทิศทางที่กำหนดให้กับความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานของแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.28)$$

ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางให้ถือว่าทิศทางที่มีความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุด คือสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดที่ต้องการหา นั่นคือ



$$D_{\max} = D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.29)$$

โดยสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดที่เป็นไอโซทรอปิกมีค่าเท่ากับ 1 คือเท่ากับทุกทิศทาง และในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบของการแยกขั้วคลื่นตั้งฉากกันจะมีการกำหนดสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเป็นแบบเฉพาะส่วนตามการแยกขั้วคลื่นและทิศทางที่กำหนดให้ นั่นคือ ส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานตามการแยกขั้วคลื่นที่กำหนดให้หารด้วยความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานรวมเฉลี่ยในทุกทิศทาง ดังนั้นเมื่อพิจารณาสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีองค์ประกอบทั้งสองของการแยกขั้วคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้จะต้องพิจารณาจาก สภาพเจาะจงทิศทางรวมของสายอากาศแบบมีการแยกขั้วคลื่นตั้งฉากกัน ซึ่งจะเป็นผลรวมของสภาพเจาะจงทิศทางแบบเฉพาะส่วนที่เกิดจากการแยกขั้วคลื่นทั้งสองขั้ว ในกรณีพิกัดของทรงกลมจะได้

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (2.30)$$

โดยที่สภาพเจาะจงทิศทางเฉพาะส่วนของการแยกขั้วคลื่นทั้งสองขั้ว คือ  $D_\theta$  และ  $D_\phi$  และมีค่าดังต่อไปนี้

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.31)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $U_\theta$  และ  $U_\phi$  คือความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ส่วน  $(P_{rad})_\theta$  และ  $(P_{rad})_\phi$  คือกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง

### 2.5.7 อัตราขยาย

การวัดอัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการวัดสภาพเจาะจงทิศทางตลอดจนประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ โดยอัตราขยายจริงของสายอากาศเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.33)$$

และถ้ากำลังงานที่รับเข้ามาโดยสายอากาศนั้น มีการแผ่กระจายกำลังงานในลักษณะของไอโซทรอปิกแล้ว ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในลักษณะนี้จะมีค่าเท่ากับกำลังงานที่สายอากาศรับเข้ามาที่ขั้วอินพุทหารด้วย  $4\pi$  ส่วนอัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น ซึ่งกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุทของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นจะเป็นสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสียคั้งนั้นจะได้

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in} \text{ (isotropic Source)}} \quad (2.34)$$

หรือการวัดอัตราขยายโดยวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (Two-antenna method) สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับและอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง โดยมีลักษณะทุกอย่างที่เหมือนกันสามารถนำสมการพื้นฐาน (Friis transmission equation) มาคำนวณคือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (2.35)$$

เมื่อ  $P_t$  คือ กำลังงานอินพุทที่ป้อนให้สายอากาศส่ง  $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง  $P_r$  คือกำลังงานเอาต์พุทของสายอากาศรับ  $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ และ  $r$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เมื่อสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

เป็นสายอากาศรูปแบบเดียวกัน ดังนั้น  $G_r = G_t = G$  เมื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (2.36)$$

### 2.5.8 ความกว้างแถบ

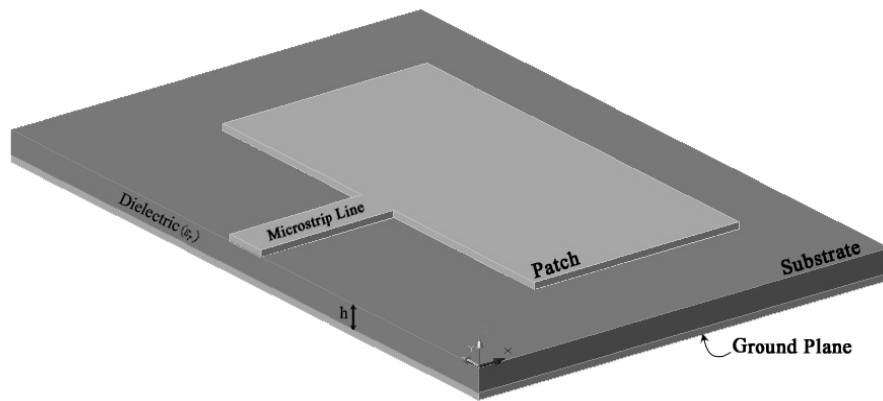
ความกว้างแถบ (Bandwidth) คือ ย่านของความถี่ที่ยังอยู่ในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ ซึ่งจะพิจารณาจากคุณลักษณะบางตัวของสายอากาศและให้เป็นไปตามข้อกำหนด โดยความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นี้ ในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบกว้าง ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ และในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบแคบ ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ และเนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศ ที่ถูกใช้ในการพิจารณาความกว้างแถบไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงหรือมีผลต่อความถี่เหมือนกัน จึงไม่มีการกำหนดคุณลักษณะโดยเฉพาะเพื่อนำมาหาความกว้างแถบของสายอากาศ ดังนั้นวิธีกำหนดความกว้างแถบ จึงมักจะแบ่งตามกลุ่มของคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณา คือ ความกว้างแถบจากแบบรูป ซึ่งเป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากอัตราขยาย ระดับของโวลต์ด้านข้าง ความกว้างลำคลื่น การแยกขั้วคลื่น และทิศทางของลำคลื่น ส่วนความกว้างแถบจากค่าอิมพีแดนซ์ เป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจาก ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และค่าประสิทธิภาพของการแผ่กระจายกำลังงาน

## 2.6 สายอากาศแบบไมโครสตริป

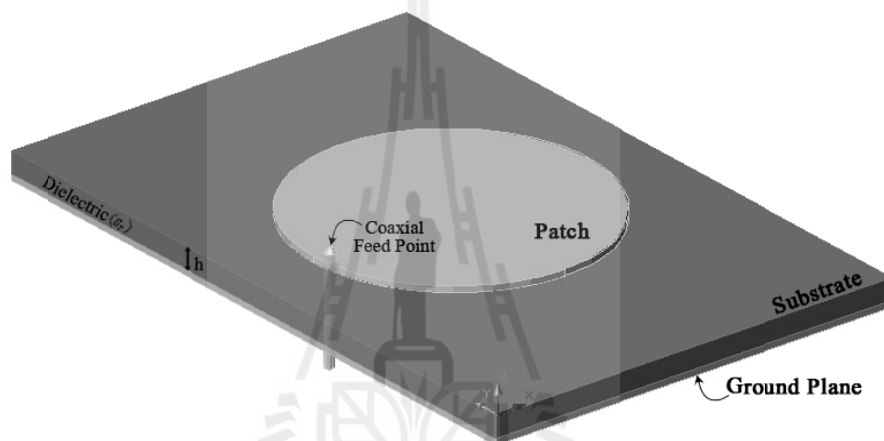
สำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย แนวทางการออกแบบสายอากาศที่ใช้มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของอุปกรณ์ที่ต้องการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ซึ่งยากที่จะกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่ตายตัว ในปัจจุบันสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากที่สุดคือสายอากาศแบบโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และสายอากาศแบบสัญญาณต่ำ (low-profile antenna) เช่น สายอากาศไมโครสตริปแพตช์ และสายอากาศระนาบอินเวอร์ตเอฟ (planar inverted F antenna : PIFA) ซึ่งทั้งสามแบบนี้ก็นิยมนำมาใช้งานสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสายอากาศแบบแรกคือสายอากาศแบบโมโนโพล

นิยม ซึ่งเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะสายอากาศมีคุณลักษณะเป็นสายอากาศแถบกว้าง (broadband) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก หรือบางครั้งสายอากาศชนิดนี้จะถูกเรียกว่าสายอากาศแบบแส้ (whip antenna) โดยส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นนั้นจะถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล แต่ไม่ได้หมายความว่า จะมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพล เนื่องจากในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวไม่ใช่ครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ส่วนสายอากาศแบบที่สองคือสายอากาศแบบปลอกมีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยขนาดที่เล็กสุดของตัวนำจะเท่ากับตัวนำภายในสายโคแอกเซียลที่ป้อนให้กับสายอากาศ และขนาดที่ใหญ่จะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกมัดตัวจรกับลวดลัดที่เป็นตาข่ายอยู่รอบ ๆ สายโคแอกเซียลสายอากาศนี้มีคุณลักษณะเหมือนกับสายอากาศโมโนโพล ที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์ แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสียเมื่อนำไปใช้งาน โดยที่ต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่างๆ ที่เป็นโลหะทำให้อัตราการขยายของสายอากาศลดลง ข้อเสียอีกอย่างของสายอากาศโมโนโพลคือสามารถใช้งานได้เพียงแถบความถี่เดียว และไม่สะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน สุดท้ายคือสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ โดยสายอากาศชนิดนี้มีโครงสร้างสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นส่วนที่ใช้สำหรับการแผ่กระจายคลื่น โดยมีส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่ชั้นกลางระหว่างระนาบกราวด์กับส่วนของการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ แต่สายอากาศทั้งแบบไมโครสตริปและสายอากาศแบบอินเวิร์สออฟ มีข้อเสียคือ เป็นสายอากาศที่มีความกว้างแถบแคบมาก ดังนั้นการใช้สายอากาศในการแผ่กระจายพลังงานให้ครอบคลุมพื้นที่การใช้งานสายอากาศโมโนโพลจึงเป็นทางเลือกที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างเพื่อลดข้อเสียดังกล่าว มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก น้ำหนักเบา ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ที่ต้องการ

สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เรียกว่าแพตช์ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากแผ่นระนาบกราวด์ (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นวัสดุฐานรอง (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ต้านลม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่ที่ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง โดยโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



ก. แพตช์ของไมโครสตริปที่ป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป



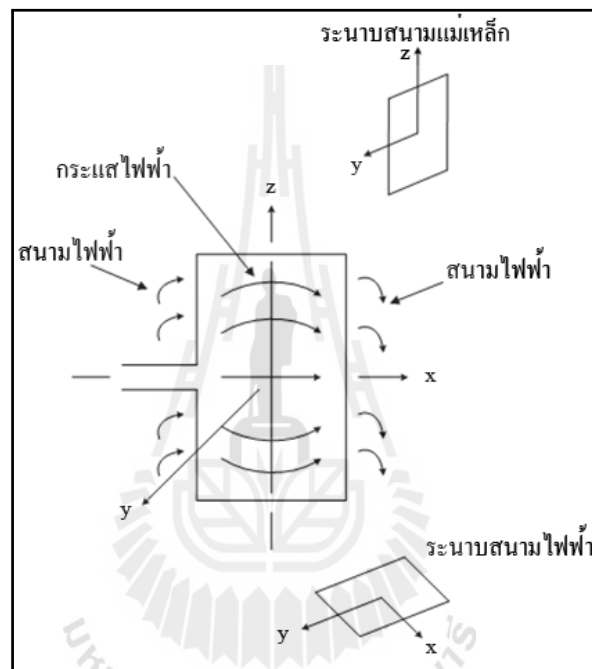
ข. แพตช์ของไมโครสตริปวงกลมที่มีการป้อนผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 2.8 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม

โดยจากรูปที่ 2.8 ก และรูปที่ 2.8 ข เป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปวงกลม ซึ่งสายอากาศดังกล่าวนี้มีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ โดยแพตช์จะถูกวางไว้ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นระนาบกราวด์ (ground plane) รูปที่ 2.8 ก เป็นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากโดยสัญญาณความถี่วิทยุจะถูกป้อนเข้าที่สายป้อนสัญญาณที่เป็นสตริปโลหะแคบ ๆ และในรูปที่ 2.8 ข. แสดงแพตช์รูปวงกลมที่ป้อนด้วยตัวนำผ่านช่องในระนาบกราวด์ ซึ่งการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้จะเรียกว่าการเชื่อมต่อแบบช่องเปิดผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ ในระนาบกราวด์

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการแสดงคุณลักษณะของ

แพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (characteristics of a rectangular patch) แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการแสดงกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงของสนามไฟฟ้าทั้งภายในและบริเวณรอบ ๆ แพตช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพตช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบนั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศคลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.9 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง



รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์

โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มียาว  $\lambda/2$  จะแสดงในรูปของค่าความต้านทานที่มีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นที่ดี ซึ่งค่าความต้านทานที่อินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Balanis, 1997) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.37)

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (2.37)$$

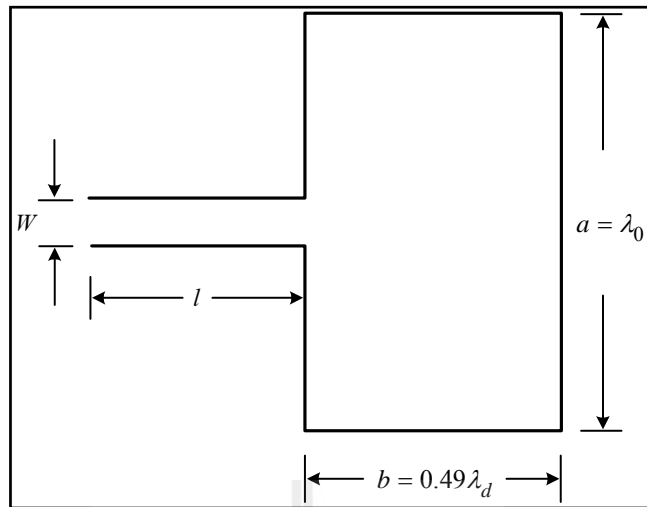
เมื่อ  $G_1$  คือ ค่าความนำ (conductance) โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$G_1 = \frac{1}{90} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right)^2 \quad W \ll \lambda_0 \quad (2.38)$$

$$G_1 = \frac{1}{120} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right)^2 \quad W \gg \lambda_0 \quad (2.39)$$

โดยที่  $W$  เป็นความกว้างสายอากาศ  
 $\lambda_0$  เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ตัวป้อนสัญญาณที่นำมาต่อกับสายอากาศควรมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย โดยสายนำสัญญาณที่จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและทดสอบสายอากาศนั้นส่วนใหญ่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม จึงจำเป็นต้องทำการแมตซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ เพื่อให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์นั้น มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ ( $f_c$ ) หรือความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) และความสูงของไดอิเล็กตริกหรือวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ยกตัวอย่าง เช่น การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากได้แบ่งเป็นสองส่วนคือ การออกแบบสายอากาศแพตช์และการออกแบบการป้อนสัญญาณ (รังสรรค์ วงศ์สรรค, 2548) โดยสามารถหาความกว้าง (a) และความยาว (b) ของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปแพตช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยที่ค่าความนำของสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์นั้นจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง (a) และความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว (b) ซึ่งกำหนดได้ดังสมการที่ (2.40) และสมการที่ (2.41) ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$a = \lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.40)$$

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.41)$$

โดยที่  $\lambda_d$  คือความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก  
 $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นในอากาศอิสระ  
 $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง

โดยการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป (microstrip line) สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล (coaxial line) โพรบแบบโคแอกเซียล (coaxial probe) และการเหนี่ยวนำผ่านช่องเปิด (aperture coupling)



## 2.7 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์นั้นสิ่งสำคัญของเทคโนโลยีคือสายอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องเรียนรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์และหลักการของการออกแบบสายอากาศ ซึ่งสายอากาศเมื่ออยู่บนร่างกายจะมีผลกระทบจากร่างกาย เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีตามคุณลักษณะ โดยใช้หลักการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความกว้างแถบ อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้จะได้ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศ



## บทที่ 3

### การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายสื่อสาร บนร่างกายไร้สาย

#### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อจำลองผลลัพธ์ของสายอากาศคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ โดยออกแบบสายอากาศคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ต้นแบบมิให้คุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบตัว เพื่อให้มีรูปแบบการแผ่พลังงานครอบคลุมพื้นที่ที่เป็นบริเวณกว้างในระนาบอะซิมุท ในขั้นตอนแรกได้ออกแบบสายอากาศและจำลองผลสายอากาศคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ในอากาศว่าง (Free space) ให้ได้สายอากาศที่สามารถใช้งานสองแถบความถี่ คือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยอาศัยการพิจารณาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับรูปแบบการแผ่พลังงาน และอัตราขยายของสายอากาศ จากนั้นจึงทำการปรับปรุงสายอากาศคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ให้สามารถใช้งานได้โดยจำลองผลบนรูปแบบจำลองร่างกายมนุษย์

#### 3.2 การออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายสื่อสารบนร่างกายไร้สาย

##### การศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST

โปรแกรม CST เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และหาคำตอบด้วยการใช้สมการอินทิกรัลในอากาศแบบสามมิติ ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูป CST เป็นโปรแกรมที่ให้ความถูกต้องแม่นยำ แต่จะใช้หน่วยความจำในการจำลองผลมากและใช้เวลานานมากขึ้น จากการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้าง และสามารถทำงานได้สองแถบความถี่

โดยการออกแบบสายอากาศได้เลือกใช้แผ่นทองแดง มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งการออกแบบสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสายส่งความยาว  $\lambda/4$  โดยเริ่มต้นออกแบบสายอากาศที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ด้วยการให้หลักการของสายอากาศ

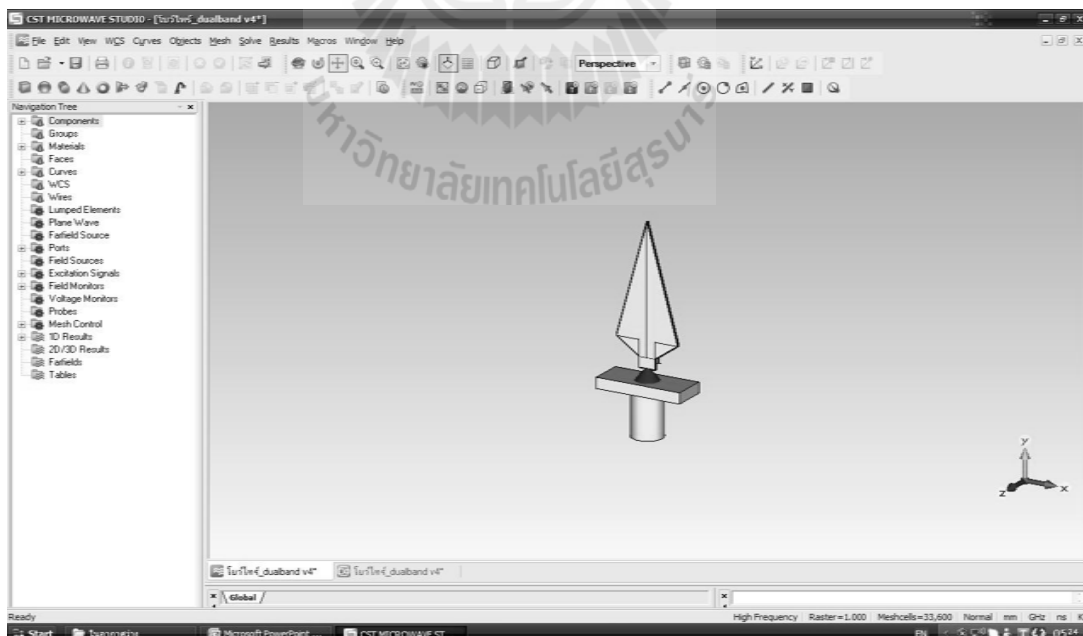
ไดโพลแบบครึ่งคลื่น  $\lambda/2$  โดยสามารถคำนวณหาความยาวของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้วยสายส่ง ความยาว  $\lambda/4$  ที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้ดังสมการที่ (3.3)

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (3.1)$$

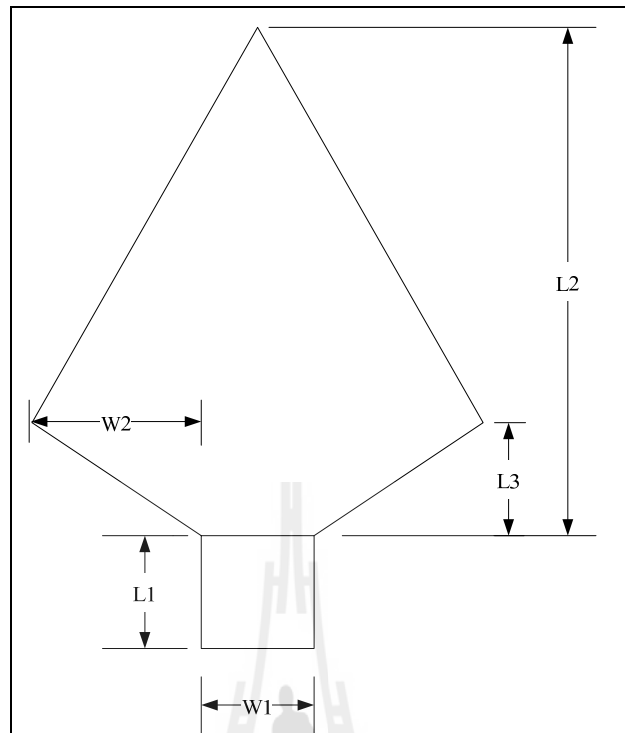
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (3.2)$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

โดยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้นที่ W1 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร W2 เท่ากับ 5.5 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร L2 เท่ากับ 31 มิลลิเมตร L3 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยมีการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST ซึ่งใช้แผ่นทองแดงในการจำลองรูปแบบสายอากาศ และสามารถหาข้อได้ง่ายตามที่ออดิตลาด โดยสายอากาศที่ได้นั้นเป็นสายอากาศรูปแบบใหม่ที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



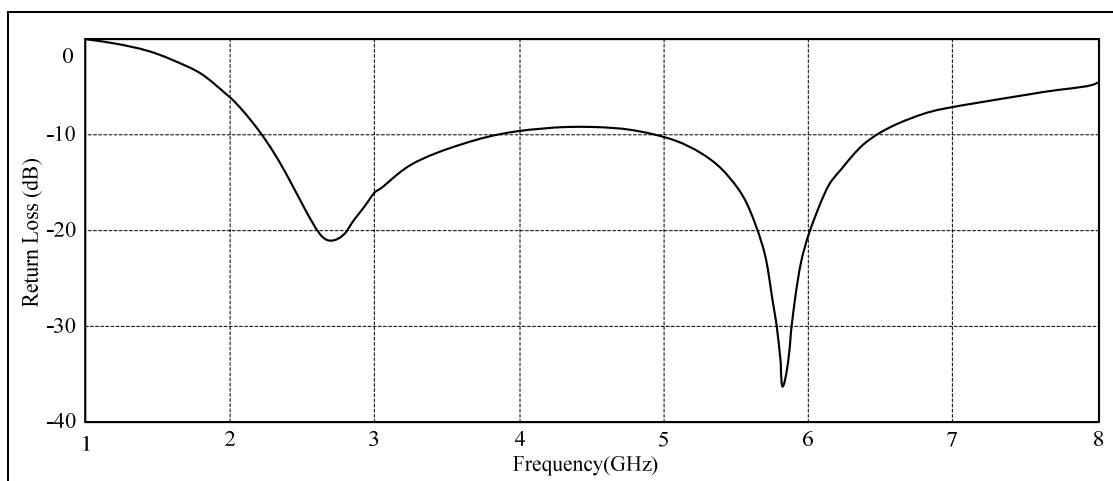
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศที่จำลองผลด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

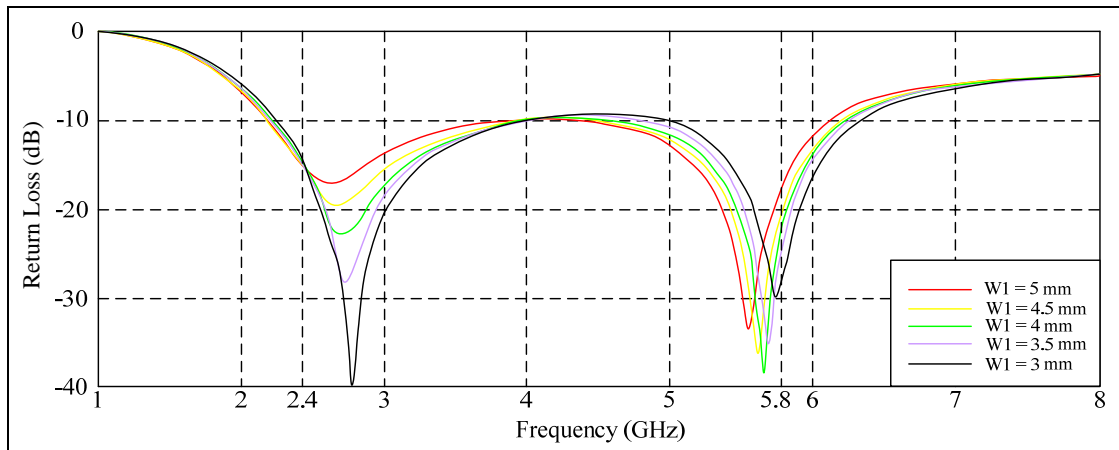
### 3.3 ผลการจำลองแบบสายอากาศ

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST ตามรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในช่วงที่ต่ำกว่า -10 dB พบว่าความถี่สองแถบความถี่ที่ต้องการออกแบบมียังมีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ดีมากนัก โดยหลังจากที่ทำการพิจารณาผลของการจำลองแบบด้วยพารามิเตอร์เริ่มต้นจากรูปที่ 3.3 ซึ่งขั้นตอนแรกจะทำการปรับพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศตามลำดับความสำคัญต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่พารามิเตอร์เริ่มต้น

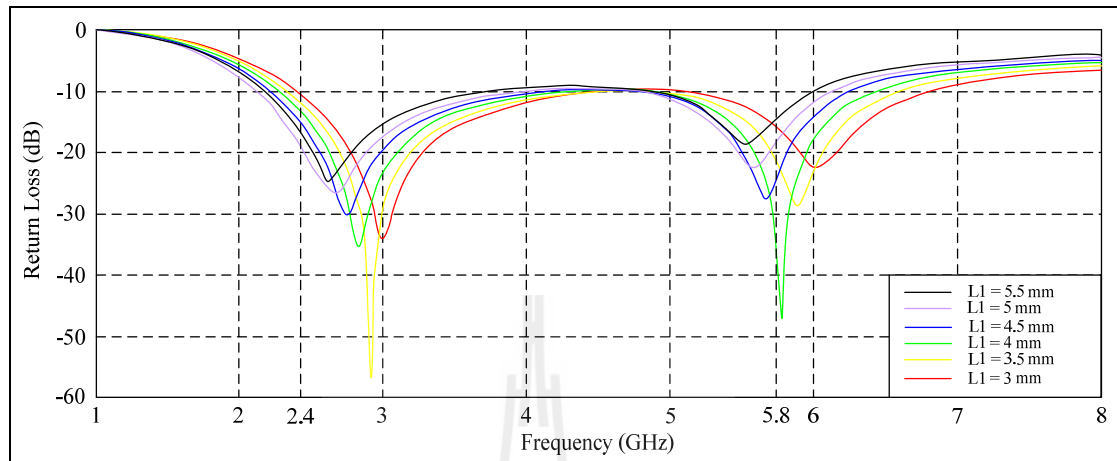
จากการปรับพารามิเตอร์ของสายส่ง W1 เป็นพารามิเตอร์เริ่มแรกเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศว่ามีแนวโน้มในทิศทางใด ซึ่งค่าพารามิเตอร์เริ่มแรก W1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งจะคงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ แล้วทำการพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมพบว่า เมื่อ W1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตรหรือมีค่าความกว้างที่น้อยลง ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงขึ้น และในทำนองเดียวกัน เมื่อ W1 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร หรือมีค่าความกว้างมากขึ้นพบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายส่งจะมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 3.4 พบว่าพารามิเตอร์ W1 เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีความเหมาะสม ที่ความถี่ 5.7 GHz ในส่วนความถี่ 2.4 GHz พบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับยังไม่เหมาะสม ซึ่งจะต้องทำการปรับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่ส่งผลกับคุณลักษณะของสายอากาศ โดยจากการปรับพารามิเตอร์ความกว้างของสายส่ง W1 เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร สามารถแสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด  $w$

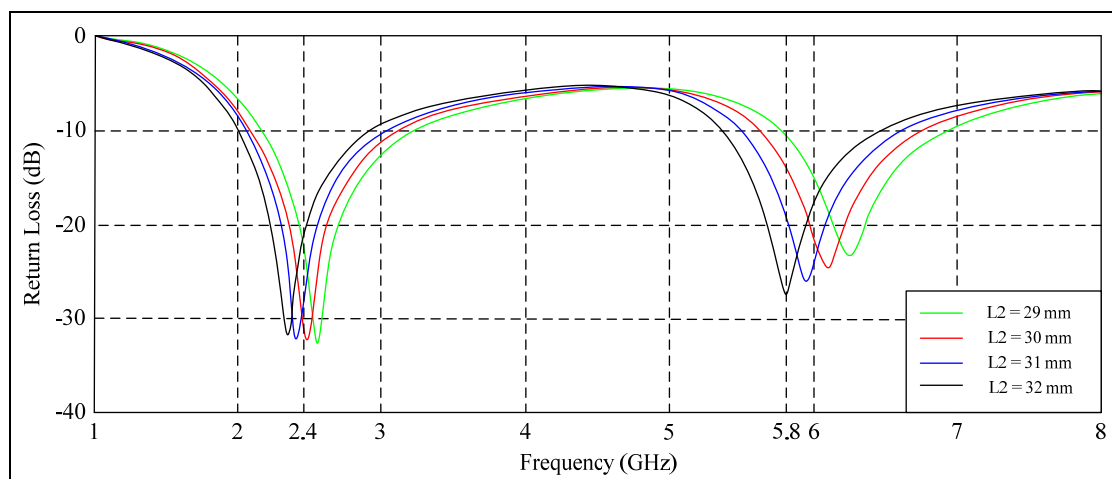
จากการพิจารณาการปรับค่าพารามิเตอร์ของ  $W1$  แล้ว ผลที่ได้นั้นยังไม่ตรงตามข้อกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับการสื่อสารสองแถบความถี่ ดังนั้นลำดับต่อไปจะได้ทำการปรับพารามิเตอร์ในส่วนของความยาว  $L1$  เนื่องจากขนาดของสายส่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมาก ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยเทคนิคของสายส่งความยาว  $\lambda/4$  โดยเริ่มทำการปรับความยาวของพารามิเตอร์  $L1$  จากค่าเริ่มต้นเป็น 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะคงที่ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ไว้ และพารามิเตอร์ของ  $W1$  จะคงค่าที่ดีที่สุดไว้นั้นคือ 4.5 มิลลิเมตร โดยหลังจากการทดลองปรับขนาดของ  $L1$  เป็น 3 มิลลิเมตรแล้วพบว่าผลที่ได้สายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3 และ 6 GHz ซึ่งไม่ตรงกับความต้องการของความถี่ที่ต้องการใช้งาน จึงปรับพารามิเตอร์  $L1$  ให้มีความยาวเพิ่มขึ้น มีค่าพารามิเตอร์  $L1$  เท่ากับ 5.5 มิลลิเมตรพบว่าด้านความถี่ต่ำของสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz ด้านความถี่สูงของสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5.6 GHz จากนั้นทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของ  $L1$  เป็น 5 มิลลิเมตร และ 3.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศให้ผลของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในทางที่ดีขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของ  $L1$  ในช่วง 5 มิลลิเมตร ถึง 3.5 มิลลิเมตร โดยจากการจำลองแบบพบว่าผลที่ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในด้านความถี่สูง และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศด้านความถี่ต่ำยังไม่ดีมากนัก จากกราฟจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของ  $L1$  เป็น 4.5 มิลลิเมตร มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านความถี่ต่ำ 2.8 GHz และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านความถี่สูงที่ 5.8 GHz สามารถแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจากผลการจำลองแบบจะเห็น

ว่าการปรับขนาดของพารามิเตอร์ของ W1 และ L1 ถึงแม้ว่าผลที่ได้สายอากาศสามารถที่ทำงานได้สองแถบความถี่ แต่ผลที่ได้นั้นสายอากาศมีประสิทธิภาพของสายอากาศยังไม่ดีมาก



รูปที่ 3.5 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด L1

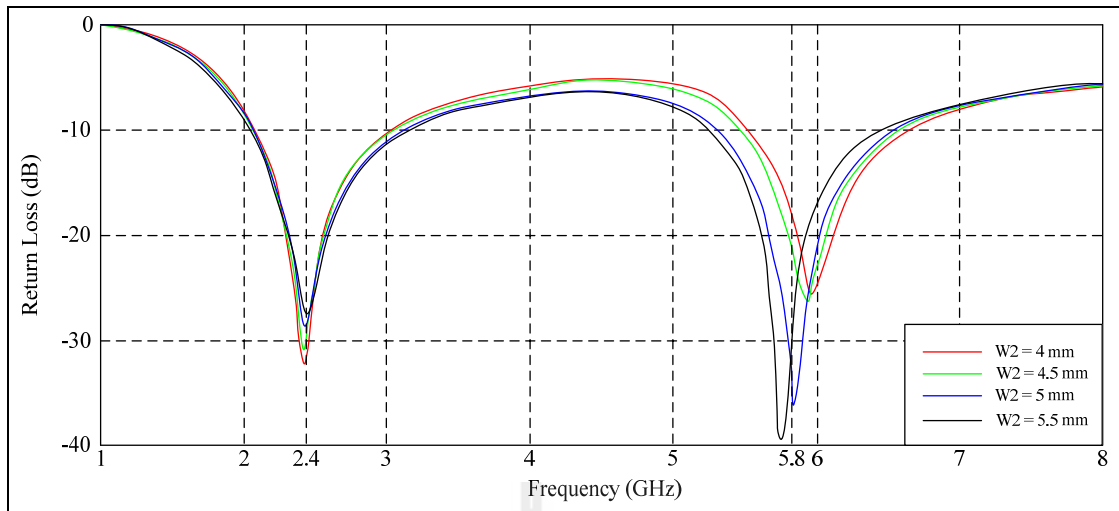
โดยจะต้องทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่คิดว่าจะส่งผลกับคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการออกแบบในลำดับต่อมาคือ ค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาวของสายอากาศ L2 ซึ่งพบว่า การปรับพารามิเตอร์ความยาวของ L2 จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ ซึ่งส่วนนี้จะเป็นการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ดังนั้นจึงเริ่มทำการปรับความยาวของ L2 ซึ่งจะคงที่ค่าพารามิเตอร์ W1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร เพื่อไม่ให้เกิดความยุ่งยากและสับสน โดยเริ่มทำการปรับความยาวพารามิเตอร์ L2 เป็น 28 มิลลิเมตร แล้วพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากผลของการปรับพารามิเตอร์ L2 เป็น 32 มิลลิเมตร และจากผลที่ได้พบว่าเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้สายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำลงมา ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับพารามิเตอร์ L2 เป็น 29 มิลลิเมตร ส่งผลให้สายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูงขึ้น พบว่าเมื่อ L2 เป็น 30 มิลลิเมตร สายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 6.1 GHz เมื่อ L2 เป็น 32 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.2 GHz และ 5.8 GHz โดยที่พิจารณาการความถี่ที่ต้องการใช้งานคือ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ดังนั้นความยาวของสายอากาศที่ค่า L2 เท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีแนวโน้มที่ดีขึ้นหลังจากปรับค่าพารามิเตอร์ L2 ดังแสดงรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด L2

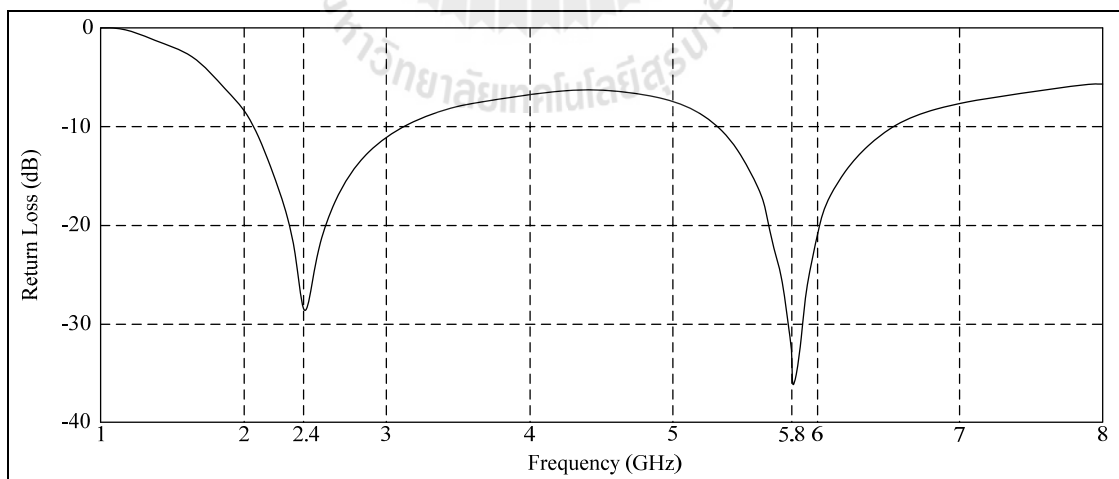
ต่อมาได้ทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นของสายอากาศ ที่จะส่งผลกับคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำงานออกแบบในลำดับต่อมาคือ ค่าพารามิเตอร์ขนาดของความกว้างของสายอากาศ W2 ซึ่งในส่วนของพารามิเตอร์ W2 นี้ โดยค่าพารามิเตอร์ W2 เสมือนเป็นการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จึงได้ทำการปรับค่าเล็กน้อยเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง เมื่อปรับแล้วจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และส่งผลต่อค่าความถี่ต่ำ จะส่งผลต่อค่าความถี่สูงมาก พบว่าเมื่อ W2 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร สายอากาศจะแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 และ 6 GHz จึงได้ทำการเพื่อค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสำหรับการจำลองแบบพบว่าเมื่อความกว้างของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น ความถี่ 2.45 GHz จะมีการเลื่อนความถี่ไปด้านต่ำเพียงเล็กน้อย แต่ด้านความถี่สูงจะมีการเลื่อนมาด้านความถี่ต่ำมากกว่า ซึ่งพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ W2 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ดังแสดงรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด W2

ในขั้นตอนสุดท้ายของการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบ ซึ่งได้ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังนี้ W1 เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร W2 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร L2 เท่ากับ 30 มิลลิเมตร โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีค่าต่ำกว่า -20 dB ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8

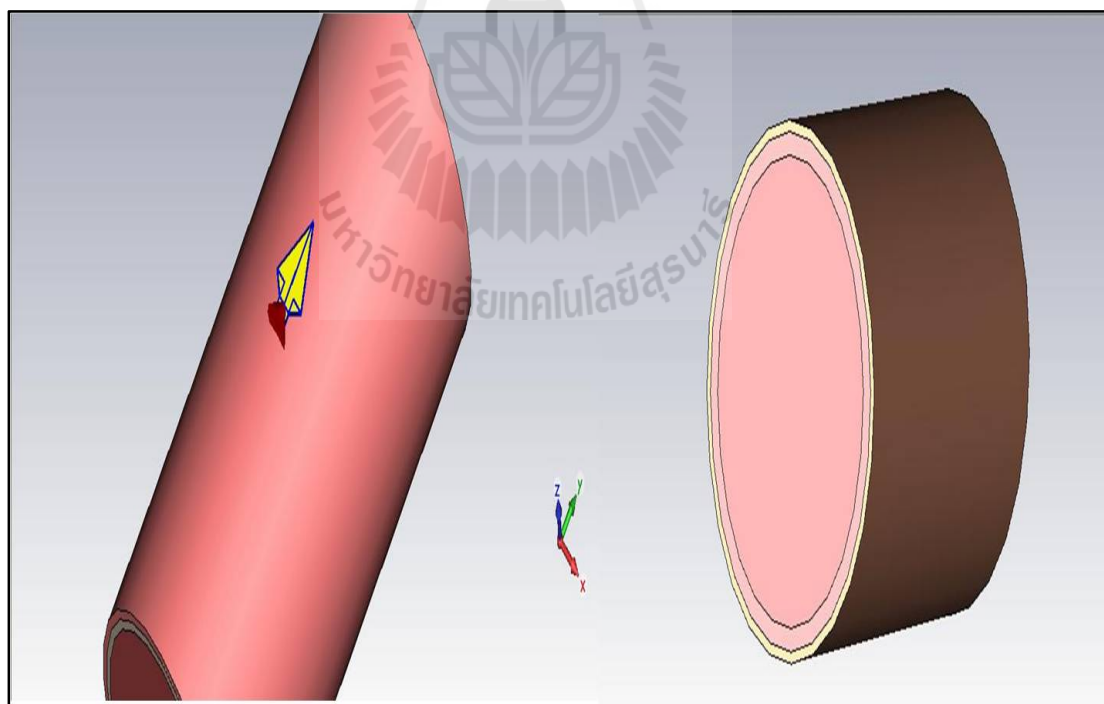


รูปที่ 3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับขนาดได้อย่างเหมาะสม

จากผลจากการจำลองข้างต้นเป็นการจำลองในสภาวะอากาศว่างสำหรับการประยุกต์การใช้งานสายอากาศผ่านเครือข่าย WBAN อย่างไรก็ตามการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์นั้นต้องการสายอากาศที่ออกแบบสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ และได้จำลองสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนบนแบบจำลองร่างกายมนุษย์ โดยแบบจำลองมนุษย์แบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ กล้ามเนื้อ ไขมัน ผิวหนัง ตามลำดับ (Sukino and Kokubun, 1990) ซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ค่าความชื้นชาบและค่าความนำ ดังตารางที่ 3.1 (Pething,1984, S.Gabriel, 1996; Vyacheslav and Komarov, 2012)

ตารางที่ 3.1 ค่าความชื้นชาบและค่าความนำของร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ 2.45 GHz

	ค่าความชื้นชาบ	ค่าความนำ (S/m)	ความหนา (mm)
กล้ามเนื้อ	52.7	1.73	40
ไขมัน	5.1	0.18	3
ผิวหนัง	38	1.46	2



รูปที่ 3.9 สายอากาศบนแบบจำลองมนุษย์

โดยแบบจำลองมนุษย์แบ่งออกเป็น 3 ชั้น มีลักษณะทรงกระบอกดังแสดงรูปที่ 3.9 มีขนาดของแบบจำลองอวัยวะมนุษย์แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.2 – 3.4

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองขนาดแขนมนุษย์

	รัศมี (mm)	ยาว (mm)
กล้ามเนื้อ	40	240
ไขมัน	43	240
ผิวหนัง	45	240

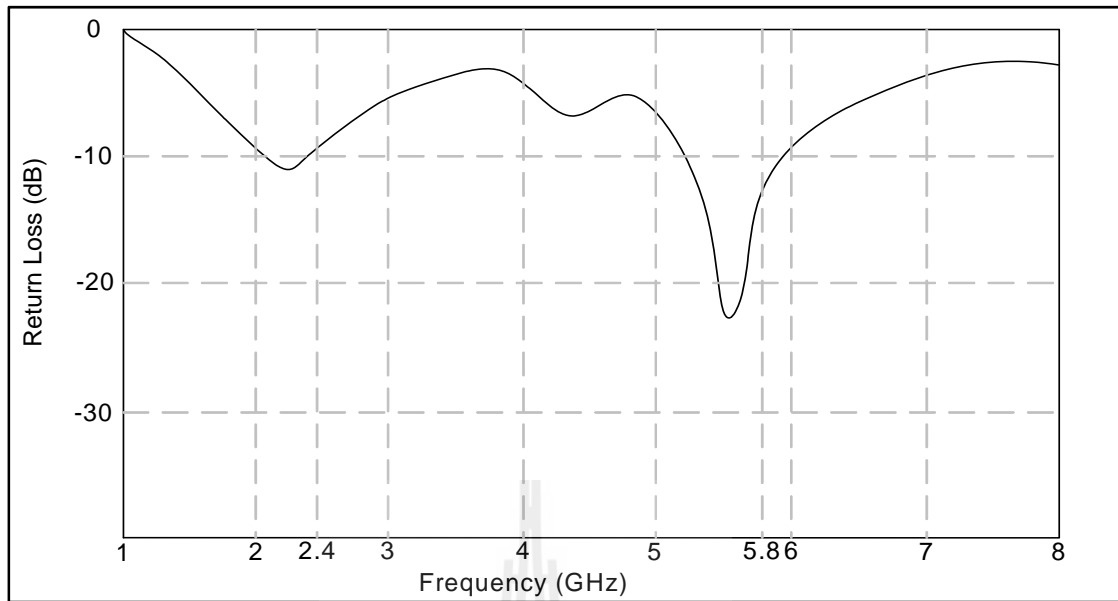
ตารางที่ 3.3 แบบจำลองขนาดขามมนุษย์

	รัศมี (mm)	ยาว (mm)
กล้ามเนื้อ	55	240
ไขมัน	58	240
ผิวหนัง	60	240

ตารางที่ 3.4 แบบจำลองขนาดอกมนุษย์

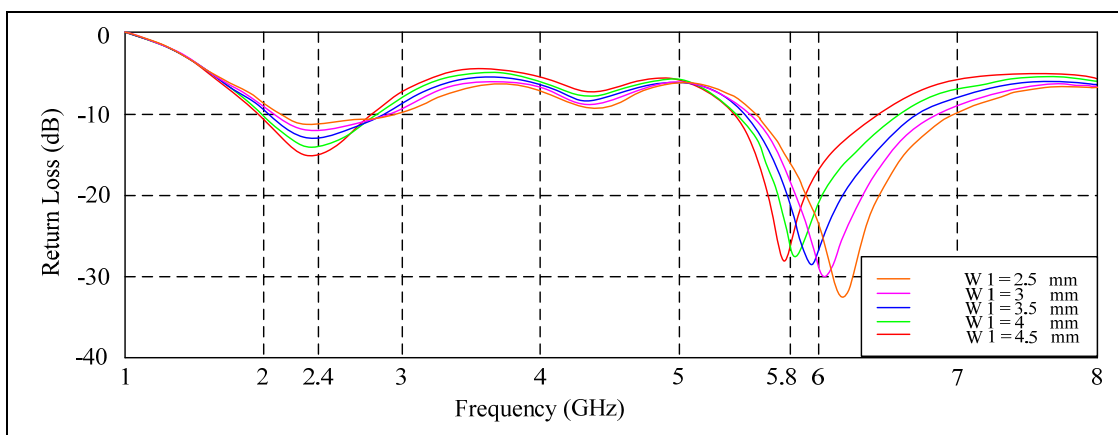
	รัศมี (mm)	ยาว (mm)
กล้ามเนื้อ	180	490
ไขมัน	183	490
ผิวหนัง	185	490

เมื่อนำสายอากาศที่จำลองในสภาวะอากาศว่าง วางอยู่บนแบบจำลองแขนมนุษย์ โดยสายอากาศมีระยะห่างจากแบบจำลองแขนมนุษย์ 1 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศได้รับผลกระทบจากแบบจำลองแขนมนุษย์ ซึ่งสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ไปยังด้านความถี่ต่ำที่ความถี่ 2.35 GHz และ 5.6 GHz ดังแสดงรูปที่ 3.10



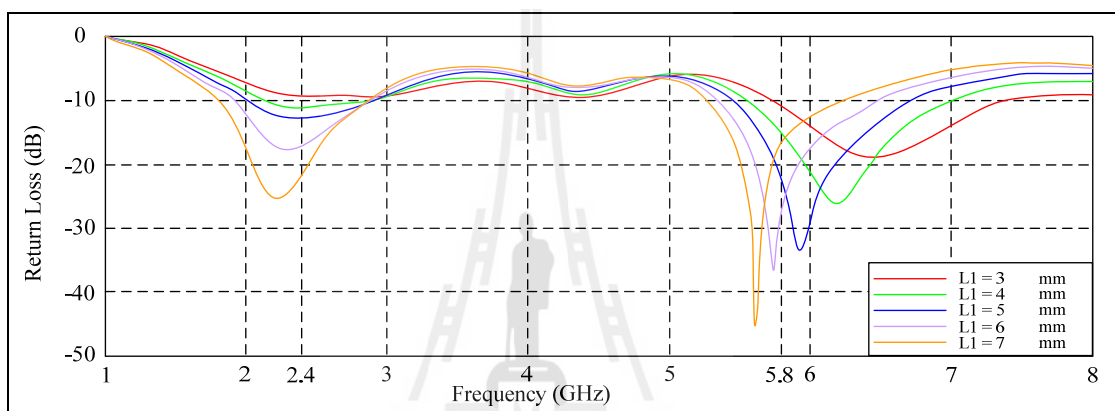
รูปที่ 3.10 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองแบนมนุษย์

จากนั้นจึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งพารามิเตอร์ตัวแรกที่ทำกรปรับ คือ  $W_1$  พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ เมื่อ  $W_1$  เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.4 GHz และ 6.1 GHz ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มขนาดของ  $W_1$  พบว่าเมื่อปรับขนาดของ  $W_1$  เท่ากับ 4 มิลลิเมตร สายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.75 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ -13 dB -27 dB ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 3.11



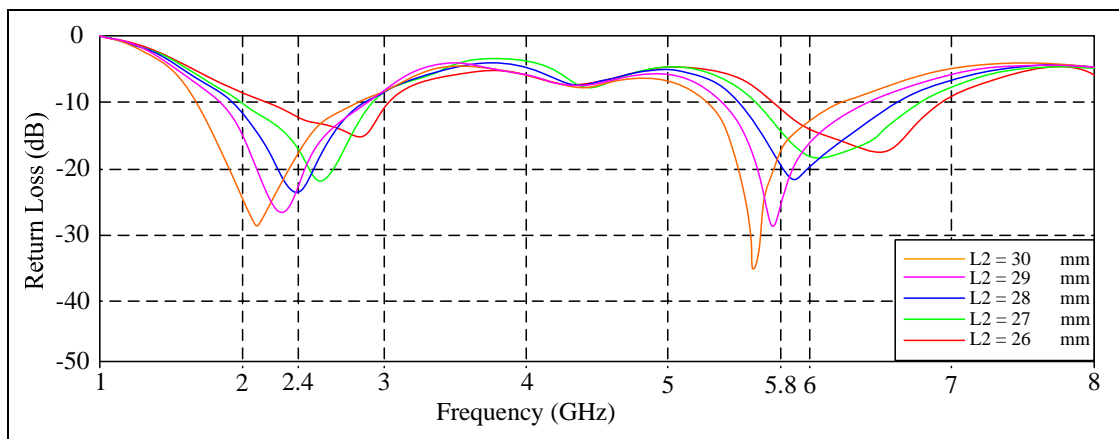
รูปที่ 3.11 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์  $W_1$

เพื่อให้ได้สายอากาศสำหรับการประยุกต์การใช้งานบนร่างกายอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ L1 โดยคงพารามิเตอร์ของ W1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งจากการปรับพารามิเตอร์ L1 พบว่า เมื่อพารามิเตอร์ L1 เท่ากับ 3 มิลลิเมตร สายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.8 GHz และ 6.5 GHz ซึ่งมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับประมาณ -9 dB และ -18 dB ตามลำดับ ดังนั้นจึงทำการปรับพารามิเตอร์ L1 ซึ่งให้มีขนาดเพิ่มขึ้นพบว่า เมื่อพารามิเตอร์ L1 เท่ากับ 7 มิลลิเมตร สายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.3 GHz และ 5.7 GHz มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับประมาณ -25 dB และ -45 dB ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 3.12



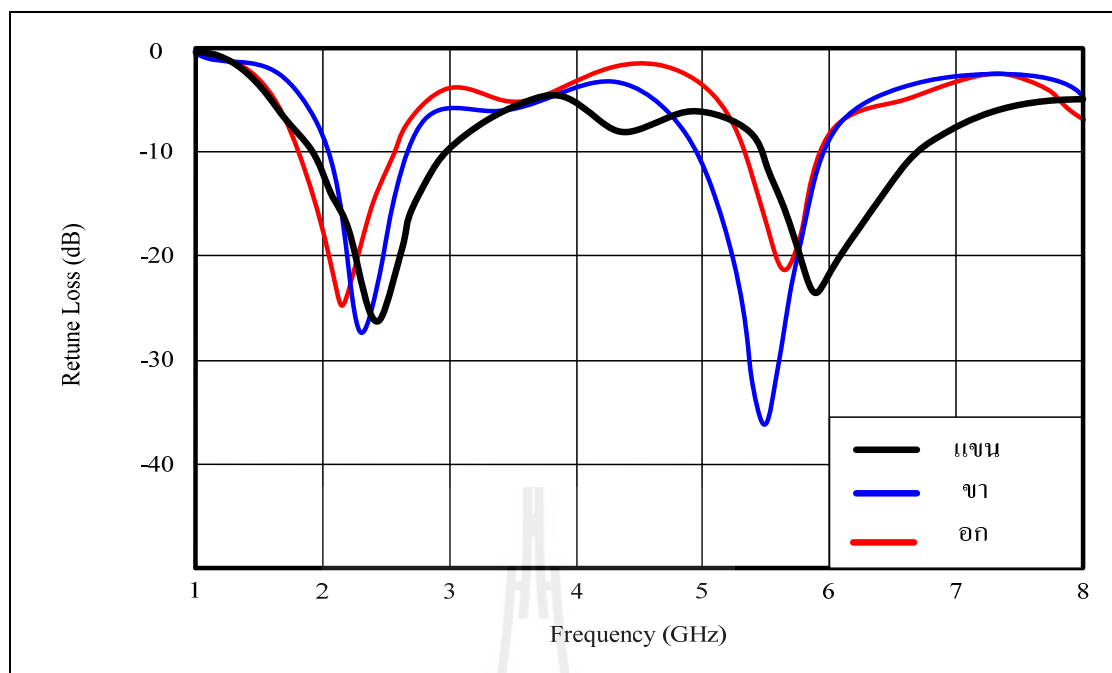
รูปที่ 3.12 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์ L1

เมื่อสายอากาศที่ทำการออกแบบยังไม่ตอบสนองตรงตามความถี่ที่ต้องการลำดับต่อมาจึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ L2 และยังคงพารามิเตอร์ W1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ L1 เท่ากับ 7 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ L2 เท่ากับ 30 มิลลิเมตร สายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.1 GHz และ 5.7 GHz ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศประมาณ -29 dB และ -34 dB ดังนั้นจึงทำการปรับลดขนาดของพารามิเตอร์ L2 เท่ากับ 27 มิลลิเมตร พบว่าสายอากาศตอบสนองที่ความถี่ 2.5 GHz และ 6 GHz ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีค่าประมาณ 21 dB และ -19 dB ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 3.13



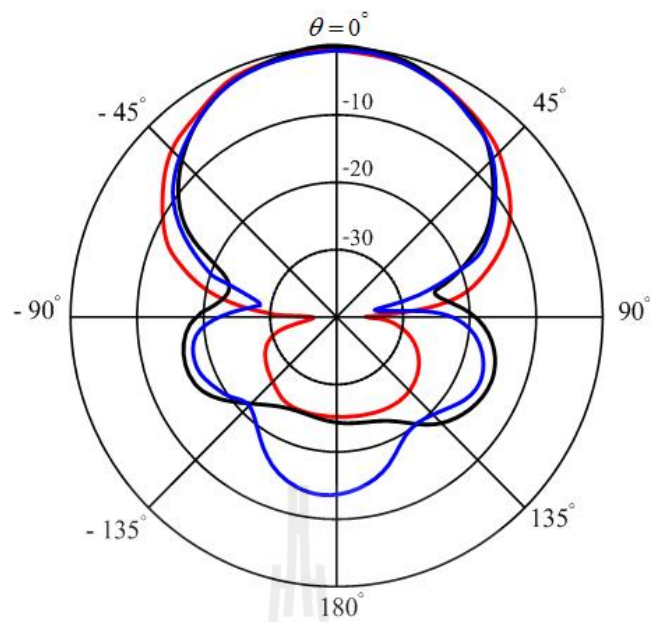
รูปที่ 3.13 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลองพารามิเตอร์ L2

จากนั้นจึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ L2 โดย เมื่อพารามิเตอร์ L2 เท่ากับ 28 มิลลิเมตร พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ ประมาณ -22 dB และ -20 dB จากขั้นตอนสุดท้ายของการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบบนแบบจำลองแขนมนุษย์ จะได้ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศดังนี้ W1 เท่ากับ 4 มิลลิเมตร W2 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร L1 เท่ากับ 7 มิลลิเมตร L2 เท่ากับ 28 มิลลิเมตร L3 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร เมื่อได้ขนาดพารามิเตอร์สุดท้ายของสายอากาศบนแบบจำลองแขนมนุษย์ และได้ นำพารามิเตอร์ของสายอากาศดังกล่าวไปจำลองผลบนแบบจำลองขาและอก โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.14

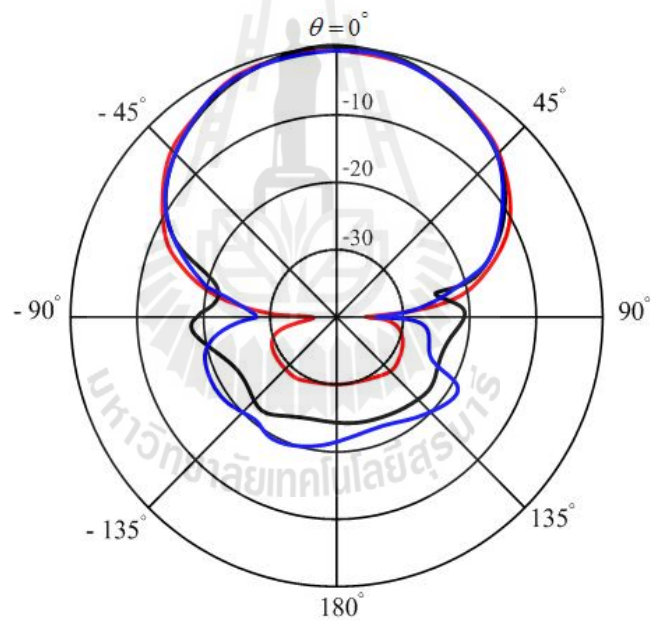


รูปที่ 3.14 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลอง  
ที่ปรับขนาดอย่างเหมาะสม

ซึ่งจากผลการจำลองแบบของโปรแกรม CST พบว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศบนแบบจำลอง แขน ขา และออก ของมนุษย์ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz และสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายการจำลองผลระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ในสภาวะบนแบบจำลอง แขน ขา ออก ของมนุษย์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และแบบรูปการแผ่กระจายการจำลองผลระนาบสนามแม่เหล็กในสภาวะอากาศว่าง (H-plane) แสดงได้ดังรูปที่ 3.16



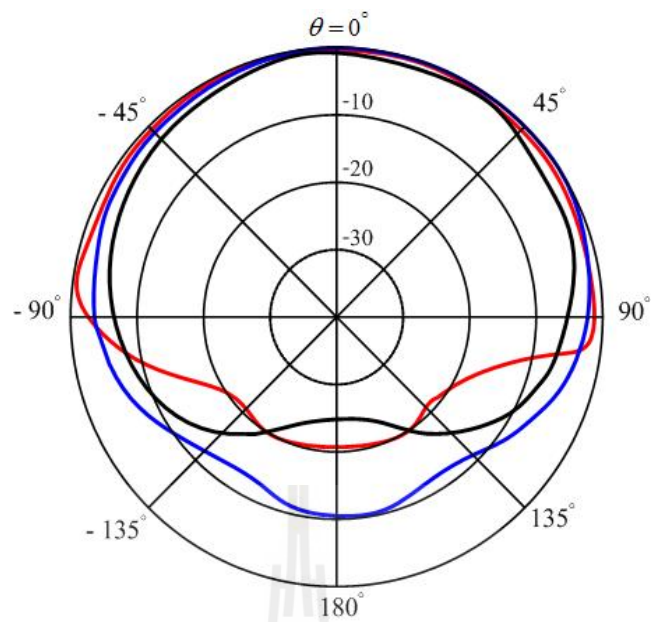
(ก) ที่ความถี่ 2.45 GHz



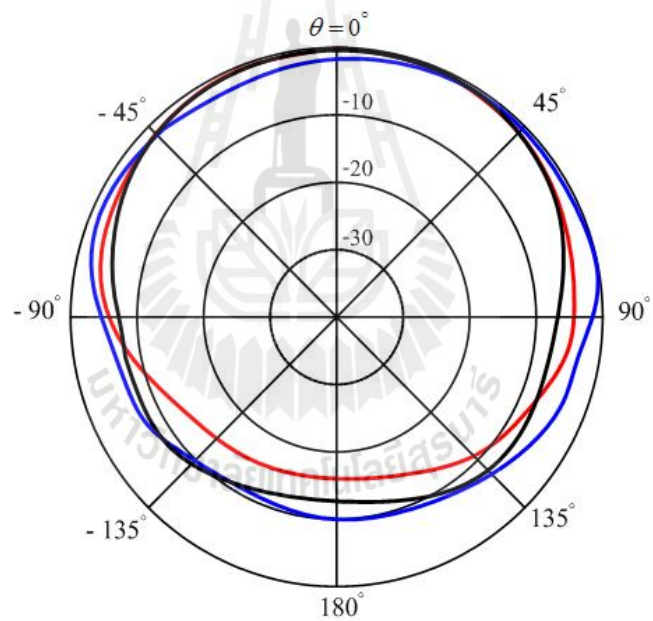
(ข) ที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่กระจายระนาบสนามไฟฟ้าบนแบบจำลองร่างกายมนุษย์





(ก) ที่ความถี่ 2.4 GHz



(ข) ที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่กระจายระนาบสนามแม่เหล็กบนแบบจำลองร่างกายมนุษย์

### 3.4 สรุป

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยการออกแบบสายอากาศดังกล่าวนี้ใช้โปรแกรม CST ในการจำลองแบบ เพื่อหาค่าขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz สำหรับประยุกต์ใช้งานสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ ประกอบกับการออกแบบตัวป้อนสัญญาณของสายอากาศด้วยการแปลงอิมพีแดนซ์สายส่งความยาว  $\lambda/4$  และในการออกแบบสายอากาศใช้แผ่นทองแดง โดยจากผลการจำลองแบบของสายอากาศพบว่า สายอากาศมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต่ำกว่า -20 dB ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศเป็นแบบรอบตัวในระนาบเดียว และจากผลการจำลองแบบนั้นพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังที่ดีแต่แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ได้นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปบ้างในสภาวะอากาศว่างกับในสภาวะบนแบบจำลองแขนมนุษย์



## บทที่ 4

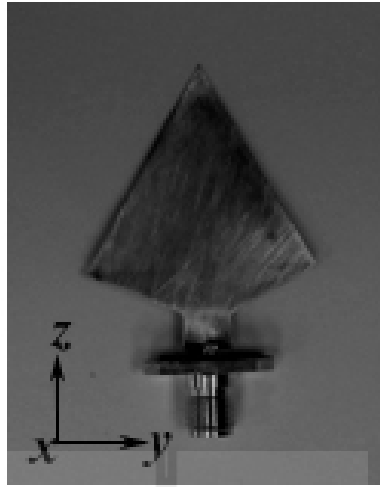
### การวัดและผลทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

จากการกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เมื่อพิจารณาจากการออกแบบและจำลองผล พบว่าผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับทฤษฎี เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้ จะกล่าวถึงการนำทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมาเพื่อให้สำหรับการออกแบบสร้างชิ้นงาน รวมถึงการทดลองวัดค่าคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแบบแพตช์ สำหรับประยุกต์ใช้งานการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ โดยทำการทดลองวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (input reflection coefficient :  $S_{11}$ ) วัดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) วัดค่าอัตราขยาย (gain) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio : SWR) วัดแบบรูปการแพร่กระจายกำลังงานของสายอากาศ ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (network analyzer) รุ่น HP8722D เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST และผลวัดของสายอากาศ

#### 4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

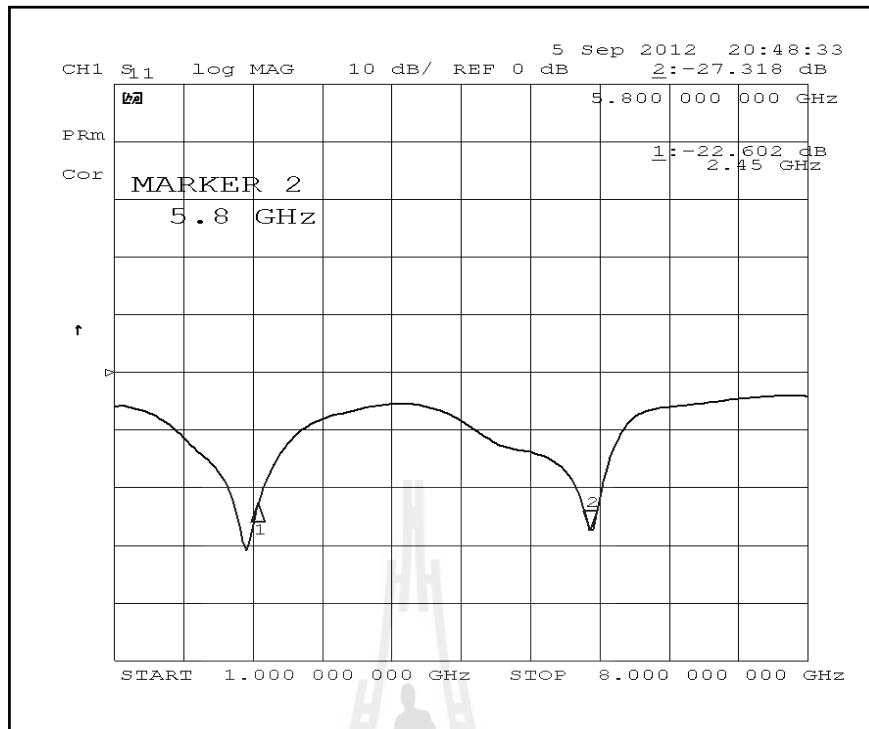
จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เมื่อได้ขนาดและรูปแบบของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยผลจากการจำลองจะมีนามสกุลเพิ่มข้อมูล คือ MOD ซึ่งจะต้องนำไฟล์ออก (export file) จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลเพิ่มข้อมูลที่ได้คือ ชื่อเพิ่มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้เพิ่มข้อมูลแล้ว ได้นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม Auto CAD ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้ใช้แผ่นทองแดง จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์ม โดยรูปที่ 4.1 แสดงสายอากาศต้นแบบที่สร้างเสร็จ



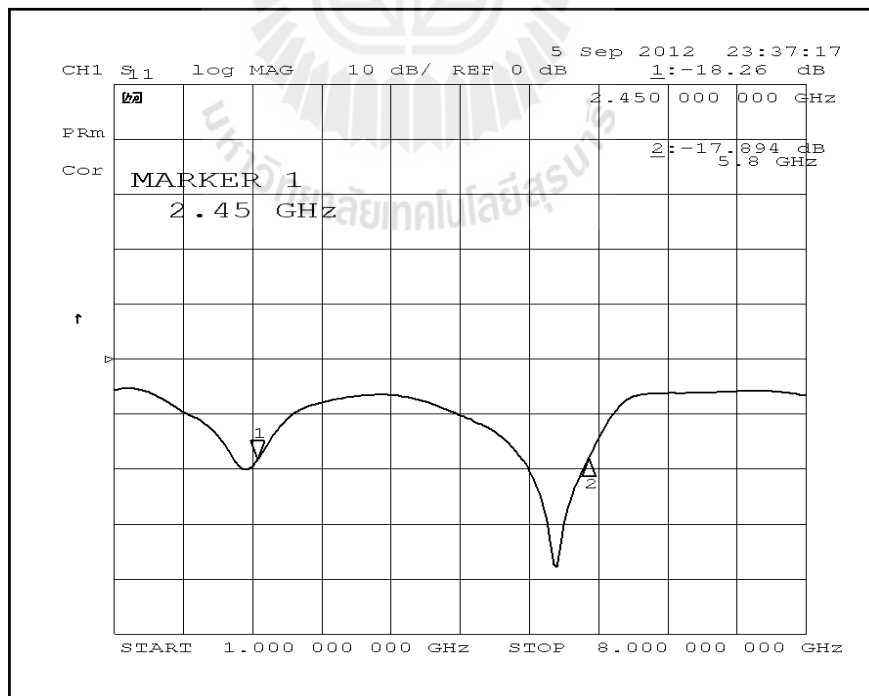
รูปที่ 4.1 แสดงสายอากาศต้นแบบที่สร้างเสร็จ

### 4.3 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

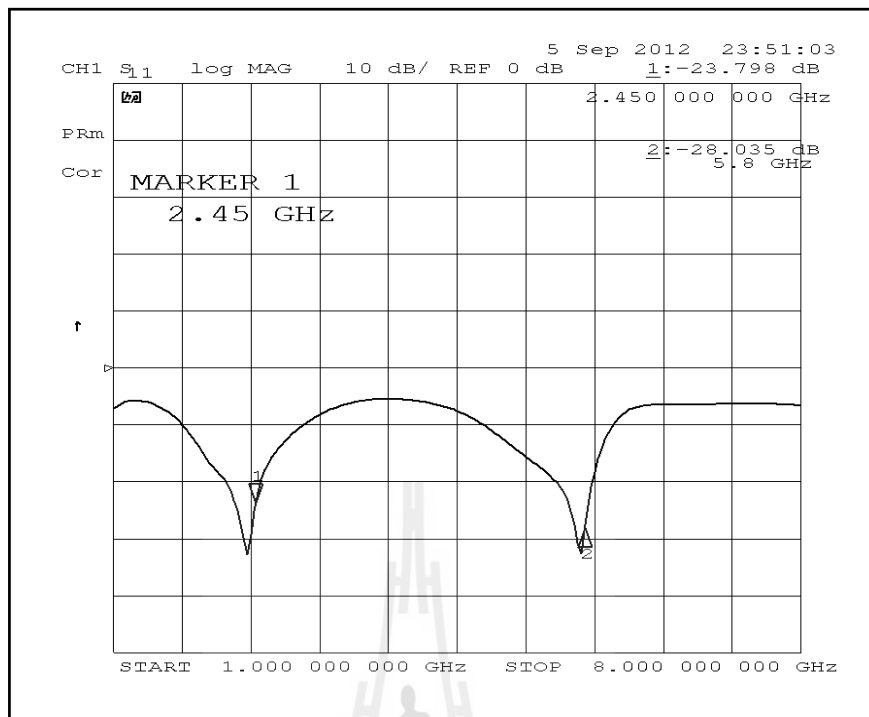
สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) หรือ ในรูปของพารามิเตอร์  $S_{11}$  และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  หมายถึง การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า ของสายอากาศ ซึ่งขนาดของ  $S_{11}$  อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึงลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่า สายอากาศ ไม่แมตซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด (รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงศ์, ม.ป.ป) สำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์หมายความว่ากำลังไฟฟ้า ด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้า สายอากาศมีค่า SWR เท่ากันอนันต์ หมายความว่า สายอากาศนั้นไม่แมตซ์ทำให้กำลังไฟฟ้า ที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ ในงานประยุกต์ ต่าง ๆ ค่าของ  $S_{11}$  จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตซ์ที่ดี จากรูปที่ 4.2 -4.4 แสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ ที่ตำแหน่ง ขา แขน ออก ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า พารามิเตอร์  $S_{11}$  ต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่า SWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz เช่นดังรูปที่ 4.5 -4.7



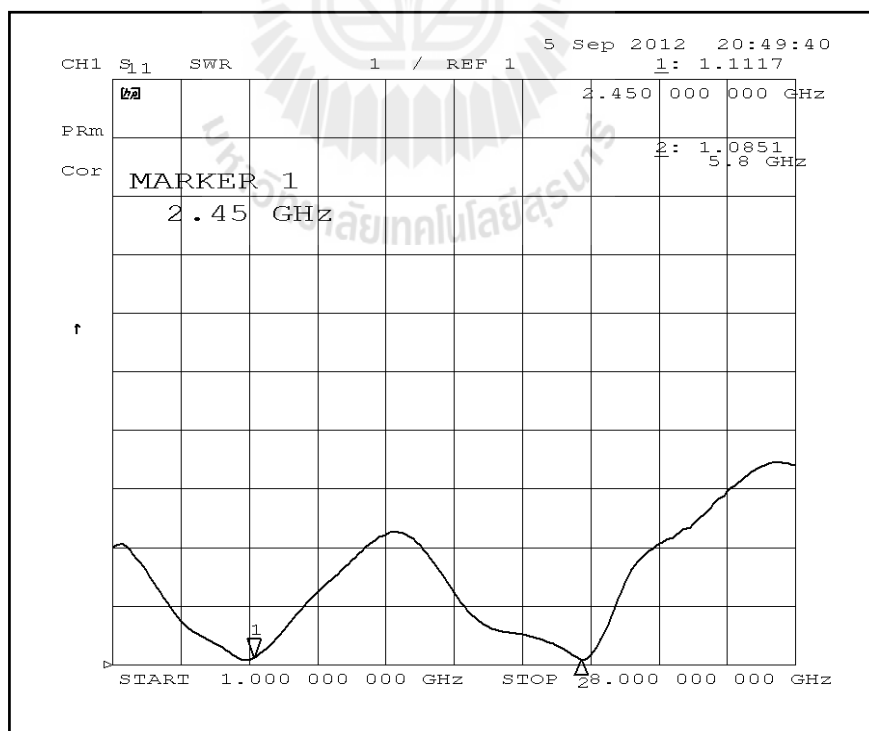
รูปที่ 4.2 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง ขา



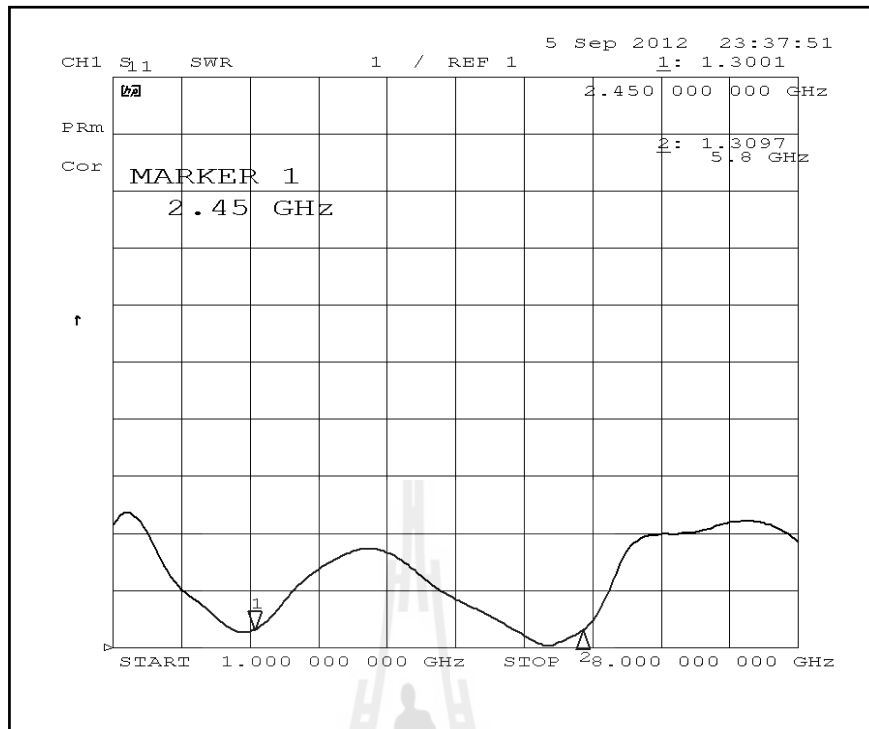
รูปที่ 4.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง แขน



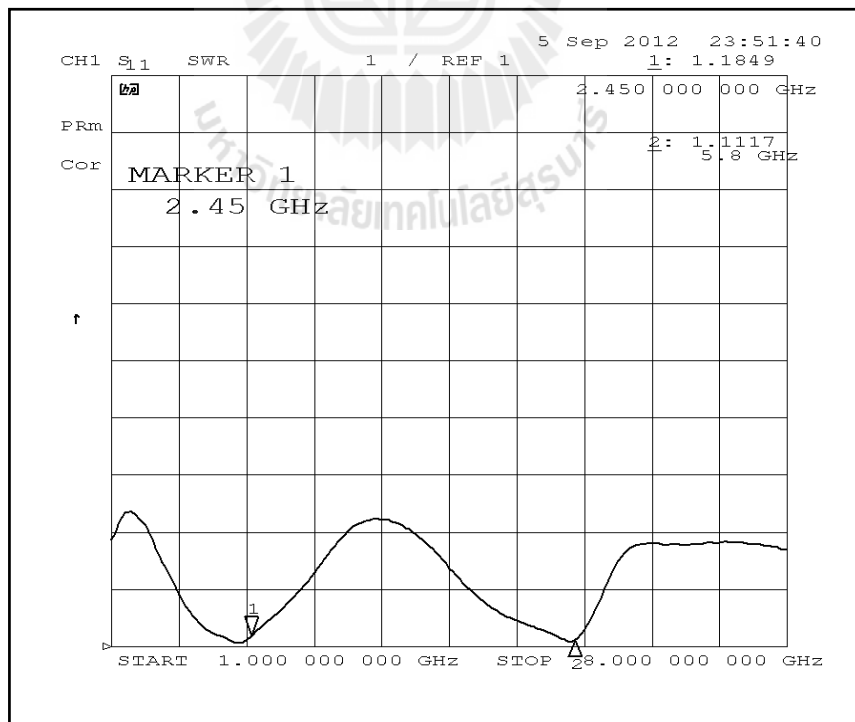
รูปที่ 4.4 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ตำแหน่ง ออก



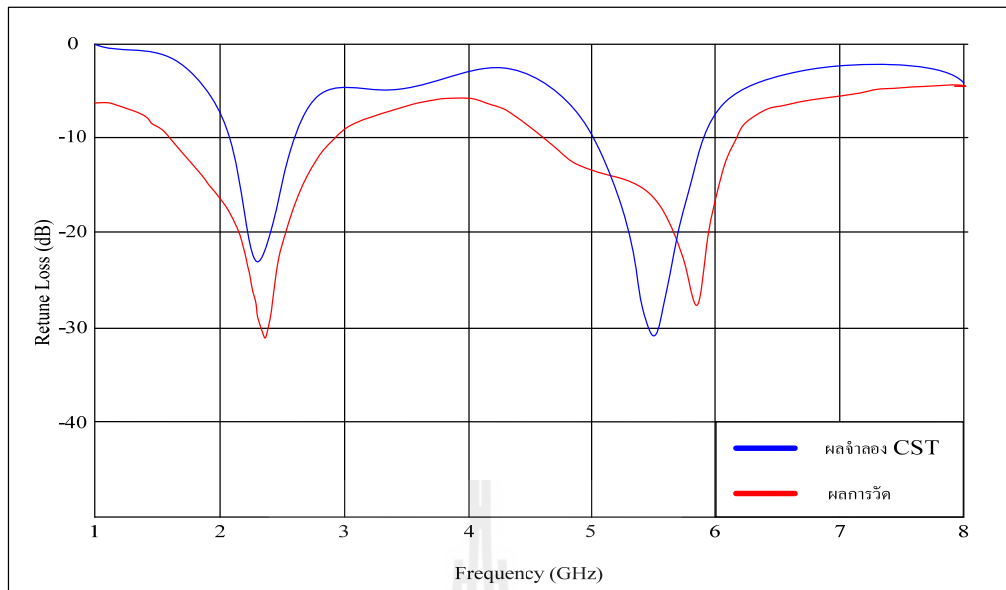
รูปที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง ขา



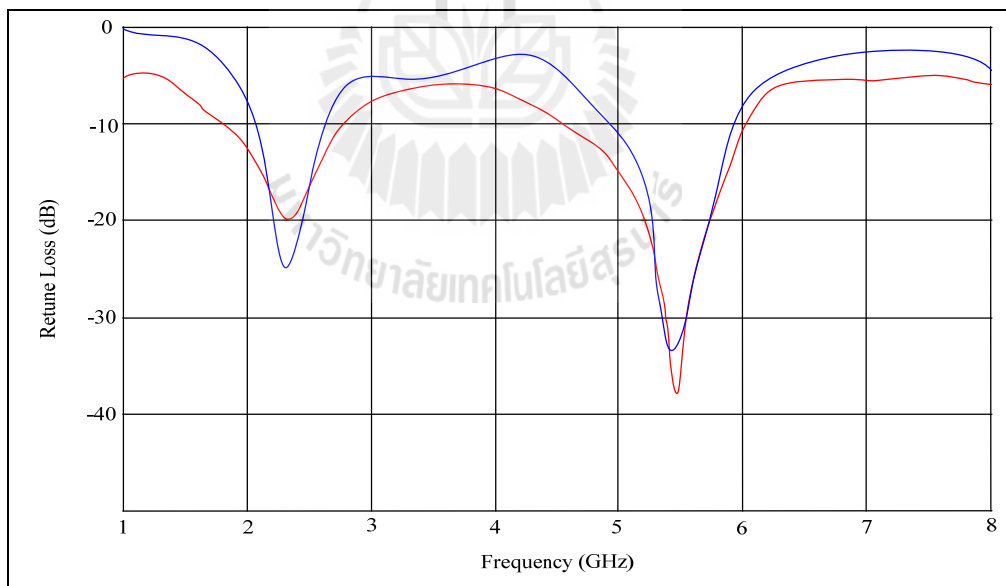
รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง แขน



รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ตำแหน่ง ออก

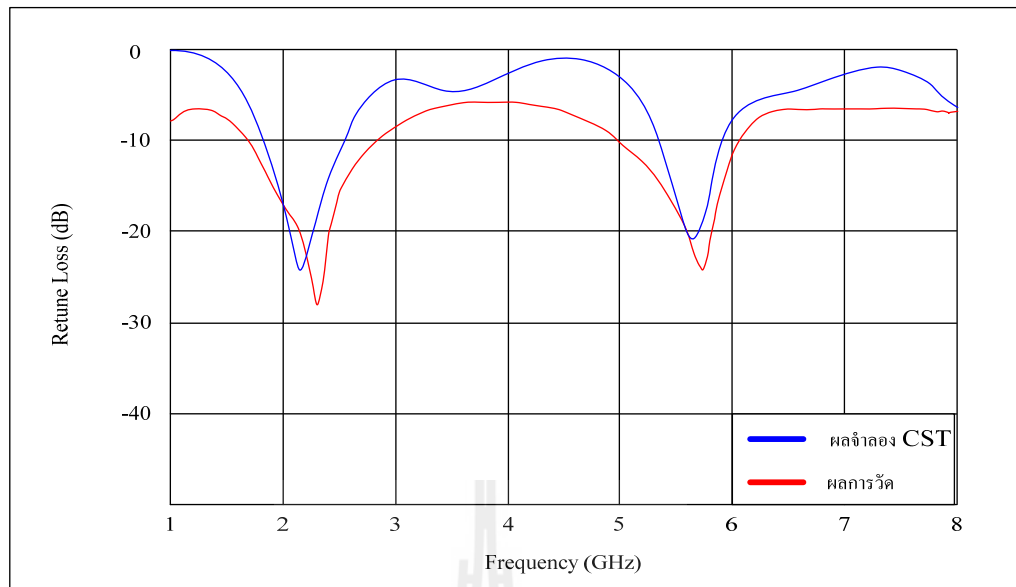


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่ง ข



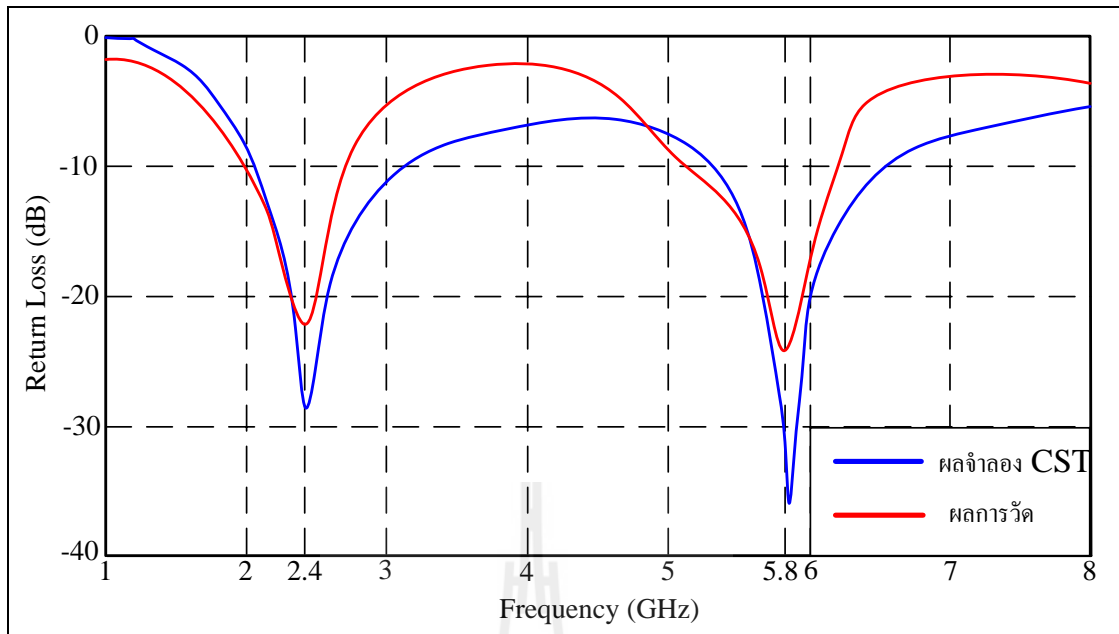
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่ง แขน





รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศที่ตำแหน่ง ออก

รูปที่ 4.8 -4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST ของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ตำแหน่ง ขา แขน และอก ตามลำดับ โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบ ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา แขน อก ได้  $-18.13$  dB  $-18.26$  dB และ  $-20.272$  dB ตามลำดับ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบ ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา แขน อก ได้  $-17.894$  dB  $-24.726$  dB และ  $23.716$  dB ตามลำดับ สำหรับค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของผลการจำลองด้วยโปรแกรม ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา แขน อก ได้  $-17.1$  dB  $-18.3$  dB. และ  $-14.7$  dB ตามลำดับ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของผลการจำลองด้วยโปรแกรม ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา แขน อก ได้  $-18.6$  dB  $-22.3$  dB และ  $-19.1$  dB ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของสายอากาศในอากาศว่าง

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST ของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในอากาศว่าง จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ  $-28$  dB และ  $-36$  dB ตอบสนองที่ความถี่  $2.45$  GHz และ  $5.8$  GHz ตามลำดับ และจากผลวัดการทดสอบพบว่าสายอากาศมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ  $-22$  dB และ  $-24$  dB ตอบสนองที่ความถี่  $2.45$  GHz และ  $5.8$  GHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามการออกแบบ

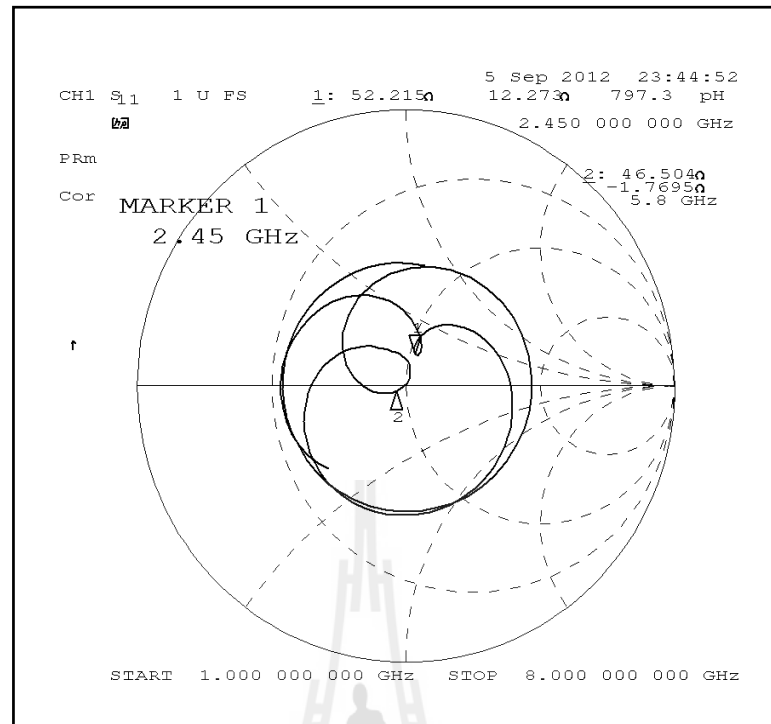
#### 4.4 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสองแถบความถี่ โดยทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ ซึ่งทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นจะแสดงผล 2 ความถี่ เนื่องจากเป็นความถี่ที่จะนำไปวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน และจากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบพบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งขาความถี่  $2.45$  GHz เท่ากับ  $52.21+j12.27 \Omega$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ตำแหน่งขาความถี่  $5.8$  GHz มีค่าเท่ากับ  $46.50-j1.76 \Omega$  สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งแขนความถี่  $2.45$  GHz เท่ากับ  $52.66+j10.69 \Omega$  ค่าอิมพีแดนซ์

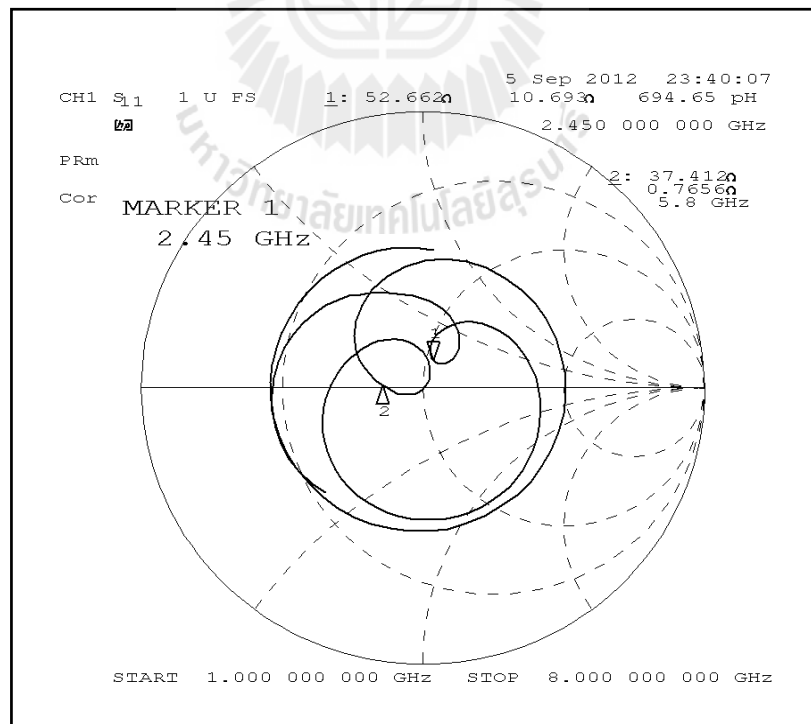
ของสายอากาศที่ตำแหน่งแกนความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ  $37.41+j1.76 \Omega$  สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งอกความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ  $44.43+j8.45 \Omega$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ตำแหน่งอกความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ  $49.29-j6.44 \Omega$  สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งอากาศความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ  $46.61+j5.12 \Omega$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ตำแหน่งอากาศความถี่ 5.8 GHz มีค่าเท่ากับ  $53.47-j3.44 \Omega$  แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.13 โดยจากการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง  $40 \Omega$  ถึง  $60 \Omega$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่ทำการออกแบบนั้น มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีในช่วงความถี่ใช้งาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสองแถบความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz

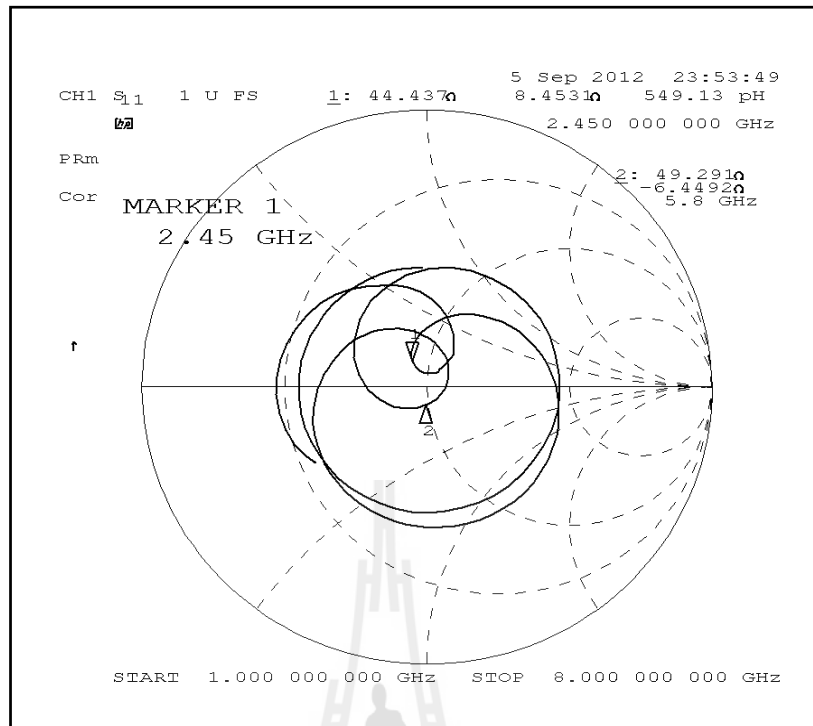
	สายอากาศ ตำแหน่งขา	สายอากาศ ตำแหน่งแกน	สายอากาศ ตำแหน่งอก
อิมพีแดนซ์สายอากาศ ที่ความถี่ 2.45 GHz	$52.21+j12.27$	$52.66+j10.69$	$44.43+j8.45$
อิมพีแดนซ์สายอากาศ ที่ความถี่ 5.8 GHz	$46.50-j1.76$	$37.41+j0.76$	$49.29-j6.44$



รูปที่ 4.12 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง ขา



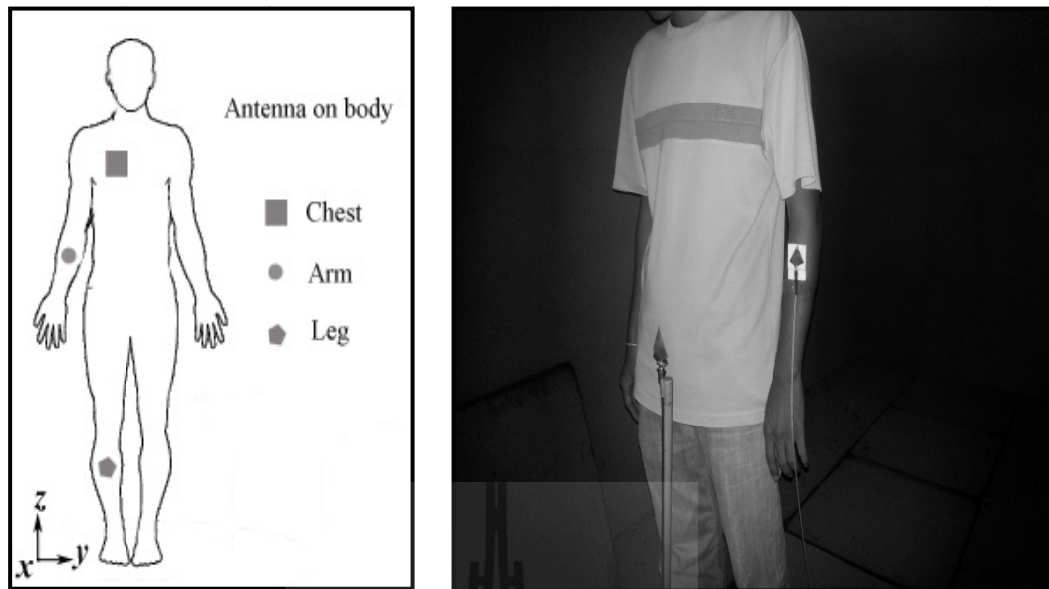
รูปที่ 4.13 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง แขน



รูปที่ 4.14 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศตำแหน่ง ออก

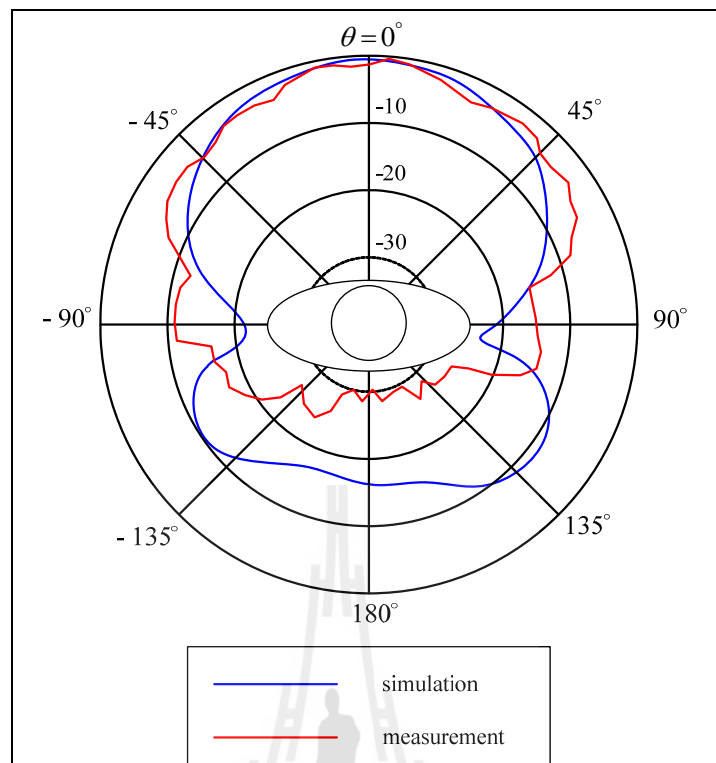
#### 4.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ คือ รูปที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง โดยการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศนั้นจะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far field region) ทั้งในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์  $R \geq 2D/\lambda$  โดยที่  $R$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับที่ทำการทดสอบที่ความถี่ต่ำสุด ส่วน  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 28 มิลลิเมตร และ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้คำนวณ โดยใช้ทดสอบอ้างอิงที่ความถี่ต่ำสุด 2.45 GHz ดังนั้นที่สนามระยะไกลจะกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับเท่ากับ 4.57 เซนติเมตร ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการหมุนสายอากาศต้นแบบเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศา จนถึง 360 องศา



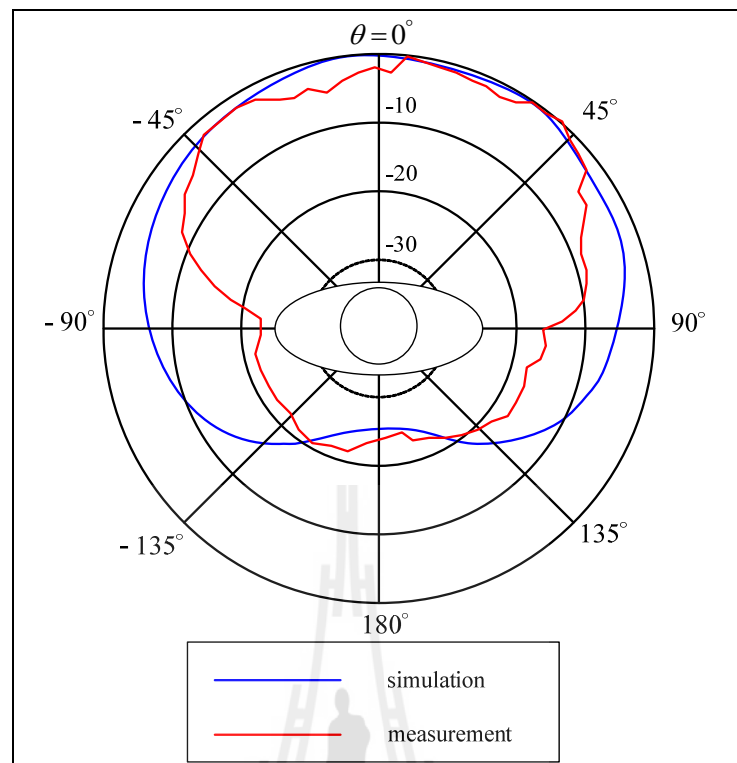
รูปที่ 4.15 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

โดยการวัดสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ มีการติดตั้งสายอากาศของตัวรับและส่ง เป็นระยะห่าง 0.8 เมตร และสายอากาศบนร่างกายมนุษย์ติดอยู่ที่ตำแหน่งแขนข้างซ้าย ขาข้างซ้าย และอกข้างซ้าย แสดงดังรูปที่ 4.15 จากผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งร่างกายต่างๆ



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา

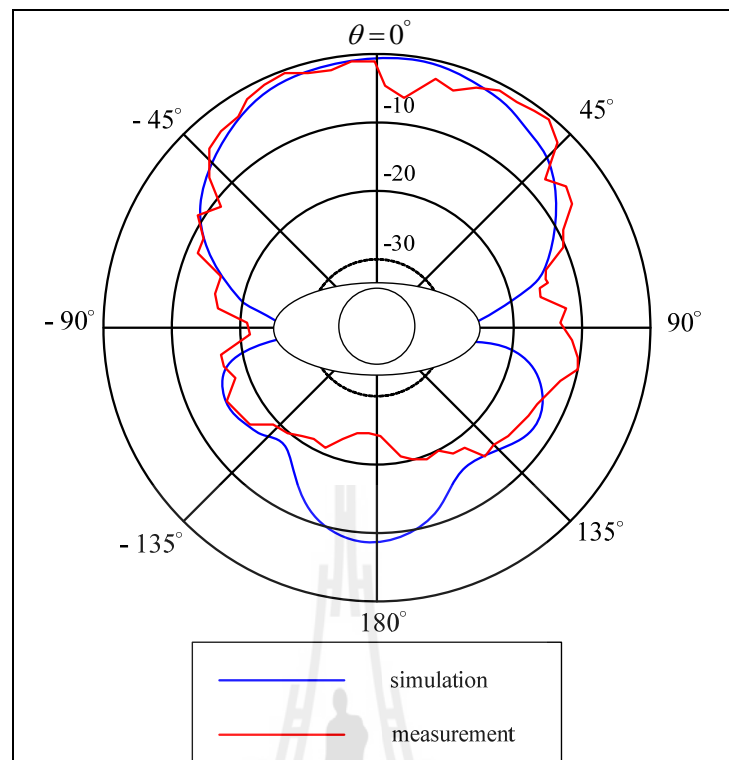
จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งขาซ้ายวัดจากต่ำกว่าเข้าประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรมและผลการวัด มีค่า 67.8 องศา 87 องศา ตามลำดับ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นด้านหลังมีการแผ่กระจายต่ำมีสาเหตุจากร่างกายมนุษย์มีการดูดซับ แสดงให้เห็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นต่ำแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา

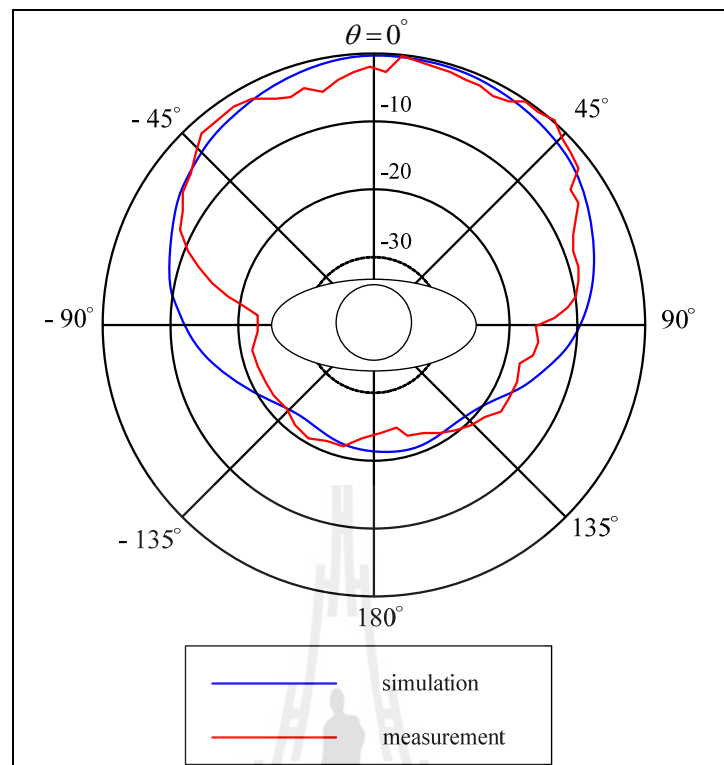
จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบ สนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งขาซ้ายวัดจากต่ำกว่าเข้าประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้น สีน้ำเงินเป็นผลการจำลอง โปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวนอนพบว่าแบบ รูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการ จำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 181.3 องศา 107 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.17





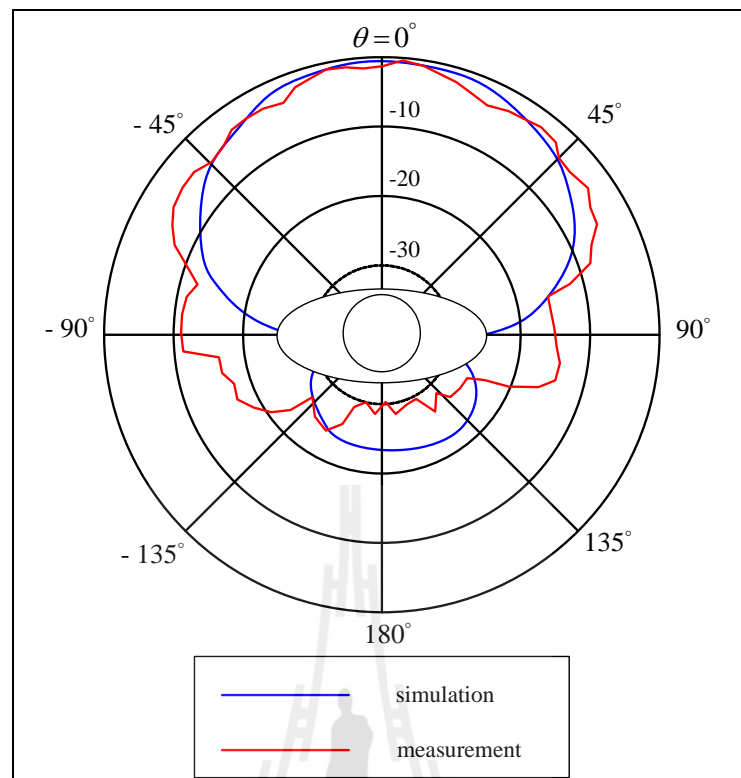
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ ระบายสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขน

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระบายสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขนซ้ายวัดจากต่ำกว่าข้อศอกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงิน เป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลอง โปรแกรม และผลการวัด มีค่า 69 องศา 91 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18



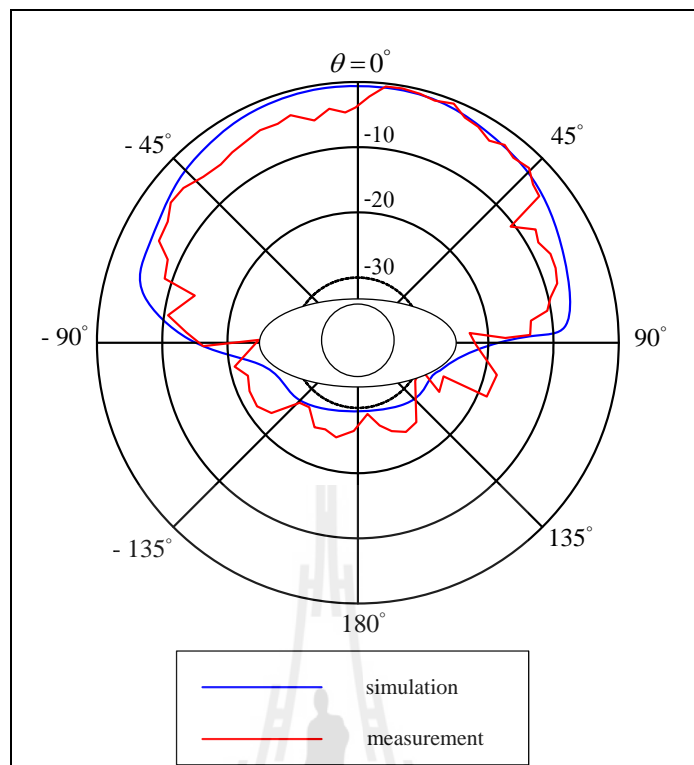
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขน

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขนซ้ายวัดจากต่ำกว่าข้อศอกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงิน เป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวนอนพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลอง โปรแกรม และผลการวัด มีค่า 160 องศา 120 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.19



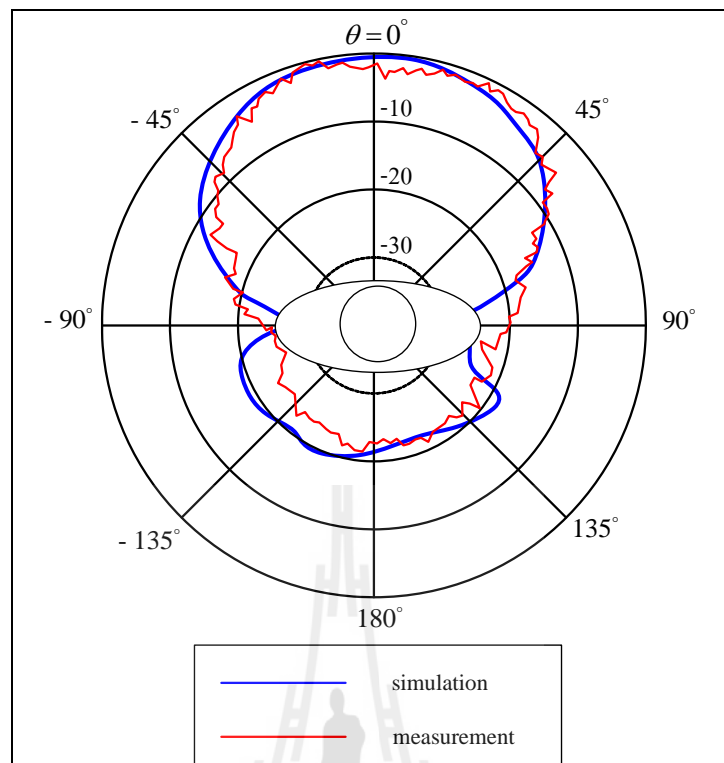
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ออก

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งออกซ้ายต่ำจากไหล่ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการ จำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น แบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 72.3 องศา 81 องศา ตามลำดับ.แสดงดังรูปที่ 4.20



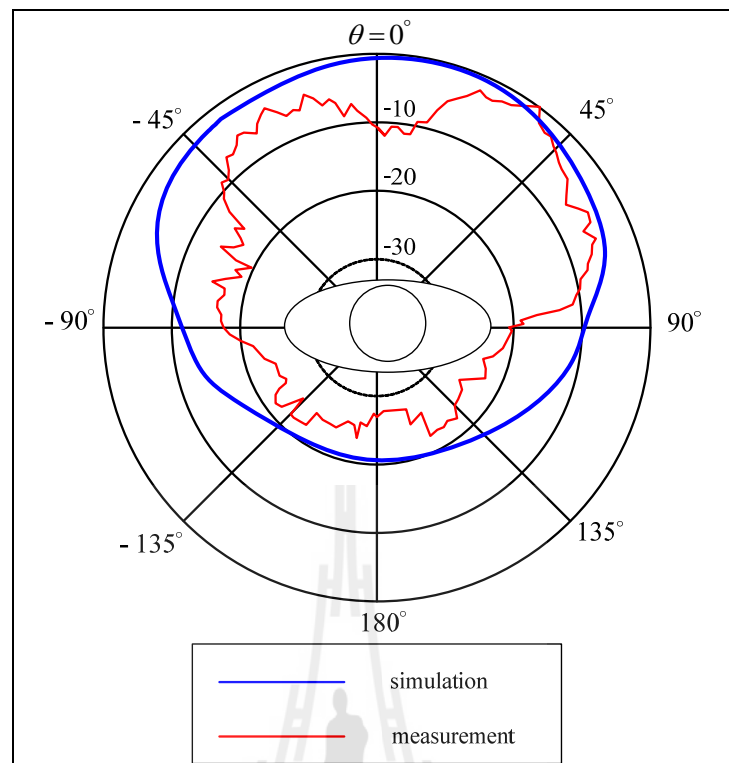
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ออก

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่งออกซ้ายต่ำจากไหล่ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวนอนพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 162.5 องศา 157 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.21



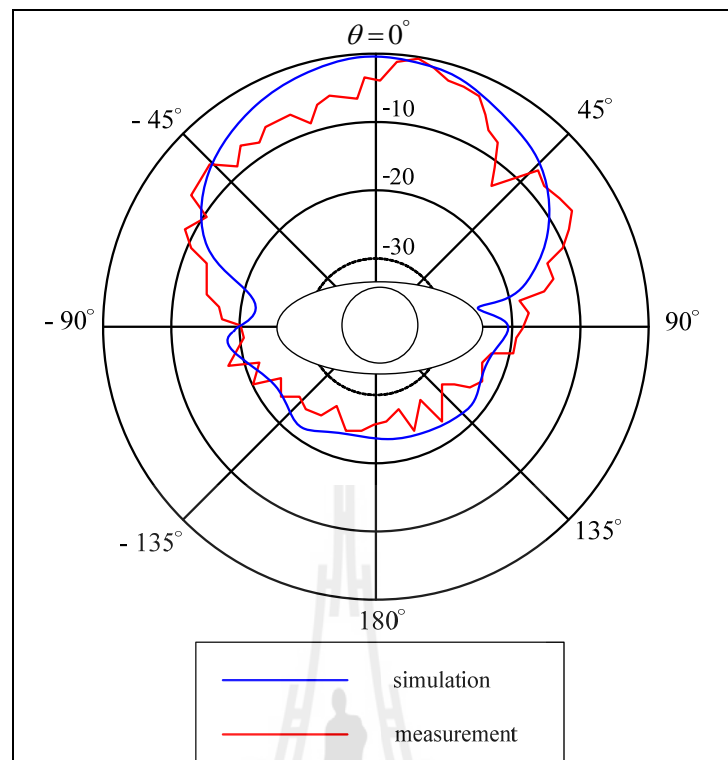
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8GHz ตำแหน่ง ขา

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งขาซ้ายวัดจากต่ำกว่าเข้าประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 73.7 องศา 72 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22



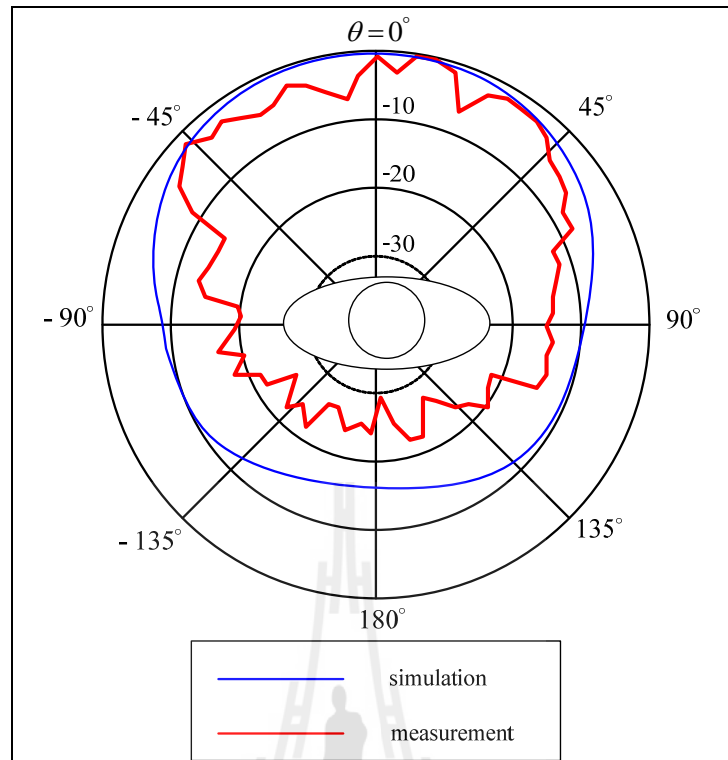
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งขาซ้ายวัดจากต่ำกว่าเข้าประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวนอนพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 157.3 องศา 109 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขน

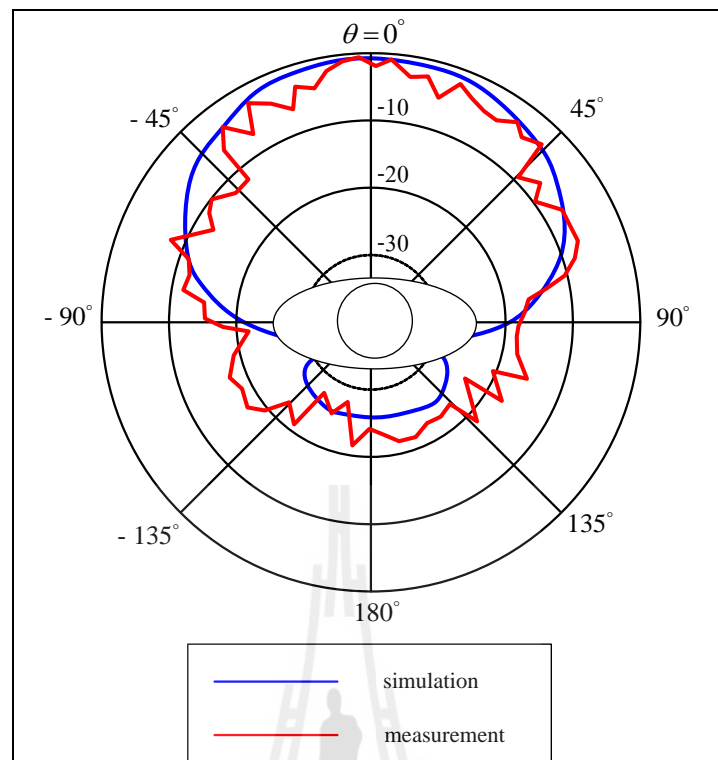
จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขนซ้ายวัดจากต่ำกว่าข้อศอกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงิน เป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลอง โปรแกรม และผลการวัด มีค่า 70.7 องศา 65 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขน

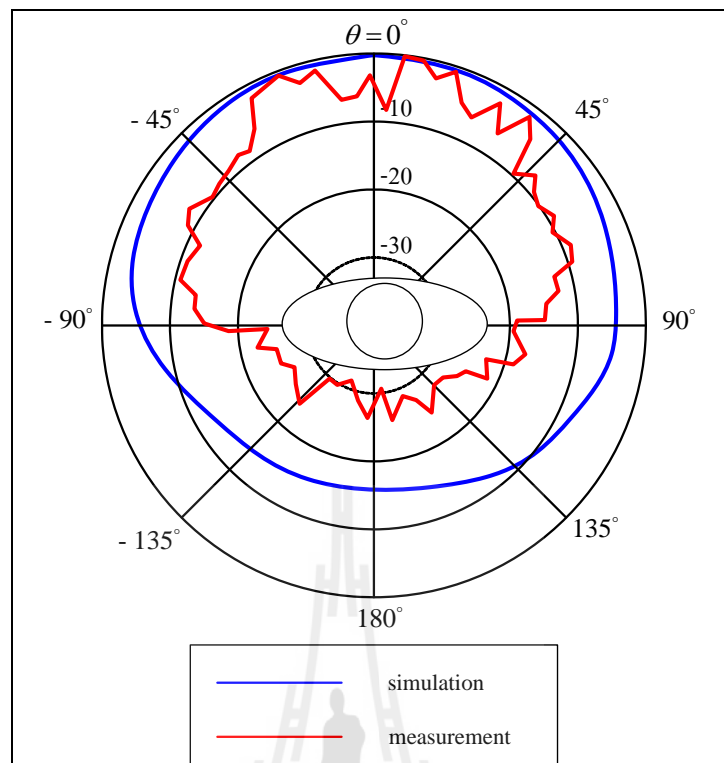
จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งแขนซ้ายวัดจากต่ำกว่าข้อศอกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงิน เป็นผลการจำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวนอนพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลอง โปรแกรม และผลการวัด มีค่า 117.2 องศา 90 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.25





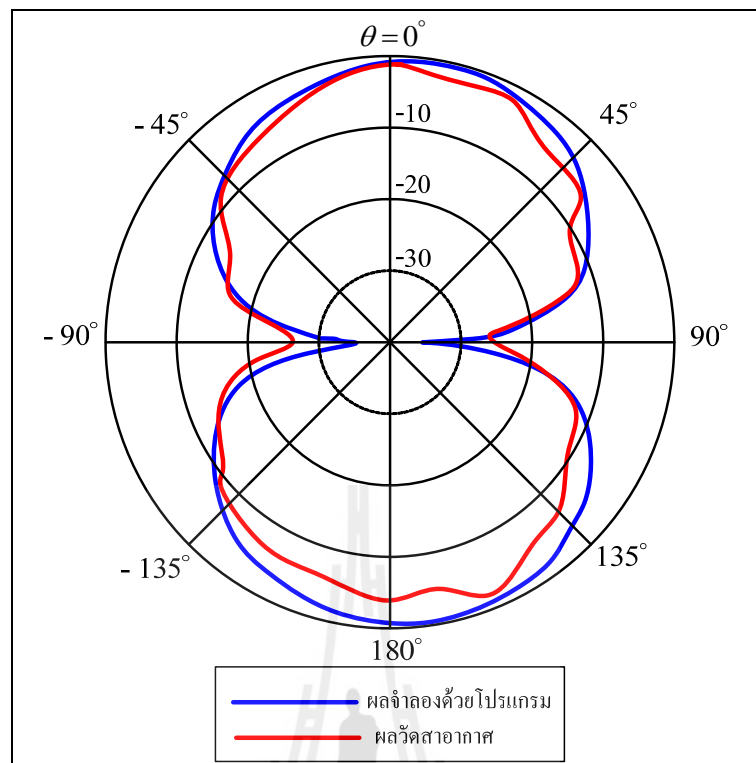
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ออก

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งออกซ้ายต่ำจากไหล่ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการ จำลองโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น แบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 68.4 องศา 95 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26



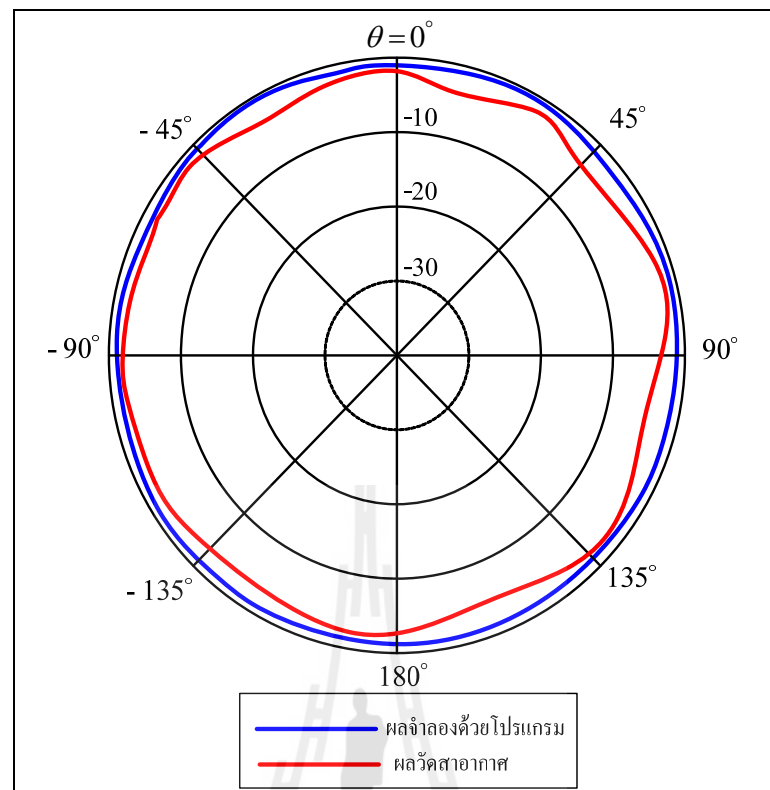
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ออก

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่งออกซ้ายต่ำจากไหล่ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการ จำลอง โปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลการวัดสายอากาศในแนวตั้งพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น แบบมีทิศทาง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นของผลการจำลองโปรแกรม และผลการวัด มีค่า 178.9 องศา 75 องศา ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.27



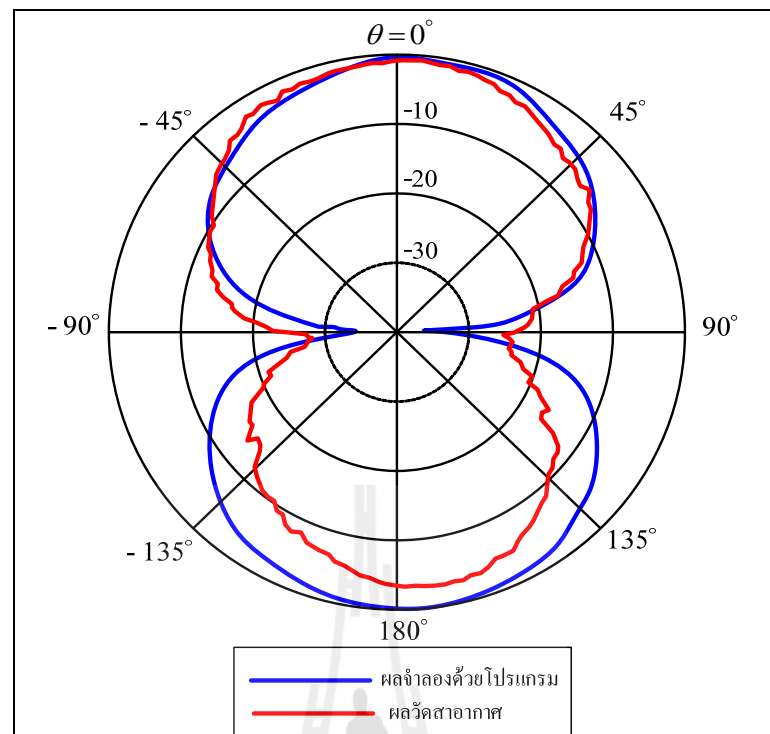
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ในอากาศว่าง

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเส้นสีน้ำเงินคือผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลจากการ วัดสายอากาศจริง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายสายอากาศไดโพล



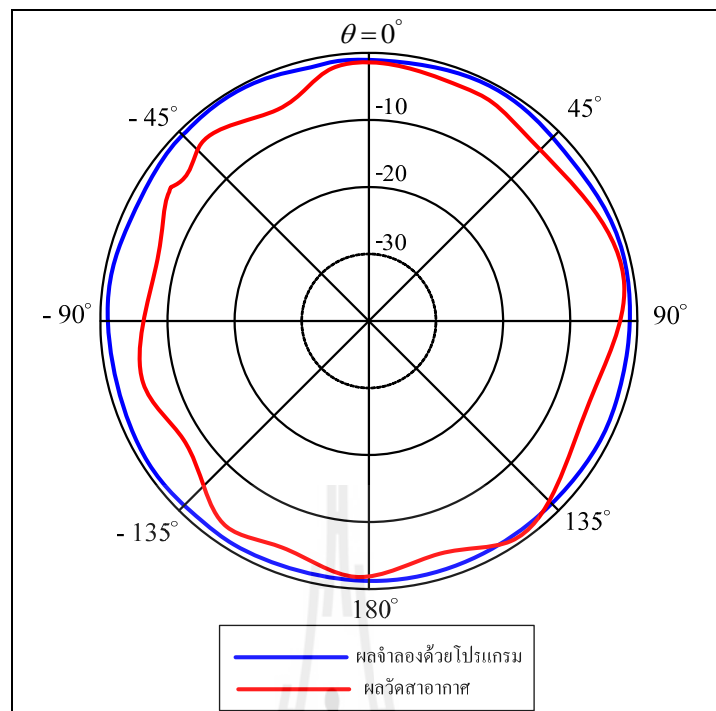
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ในอากาศว่าง

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเส้นสีน้ำเงินคือผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลจากการวัดสายอากาศจริง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะรอบทิศทาง



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ในอากาศว่าง

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามไฟฟ้า ที่ความถี่ 5.8 GHz โดยเส้นสีน้ำเงินคือผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลจากการ วัดสายอากาศจริง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะคล้ายสายอากาศไดโพล



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัด ทดสอบระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ในอากาศว่าง

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สองแถบความถี่ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมและผลการวัดสายอากาศ ระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 5.8 GHz โดยเส้นสีน้ำเงินคือผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม เส้นสีแดงเป็นผลจากการวัด สายอากาศจริง ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีลักษณะรอบทิศทาง

#### 4.6 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ในอากาศว่าง เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่บนร่างกาย ซึ่งมี สายอากาศตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ สามารถ นำสมการพื้นฐานของ Friis (Friis transmission equation) มาทำการคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.1)$$

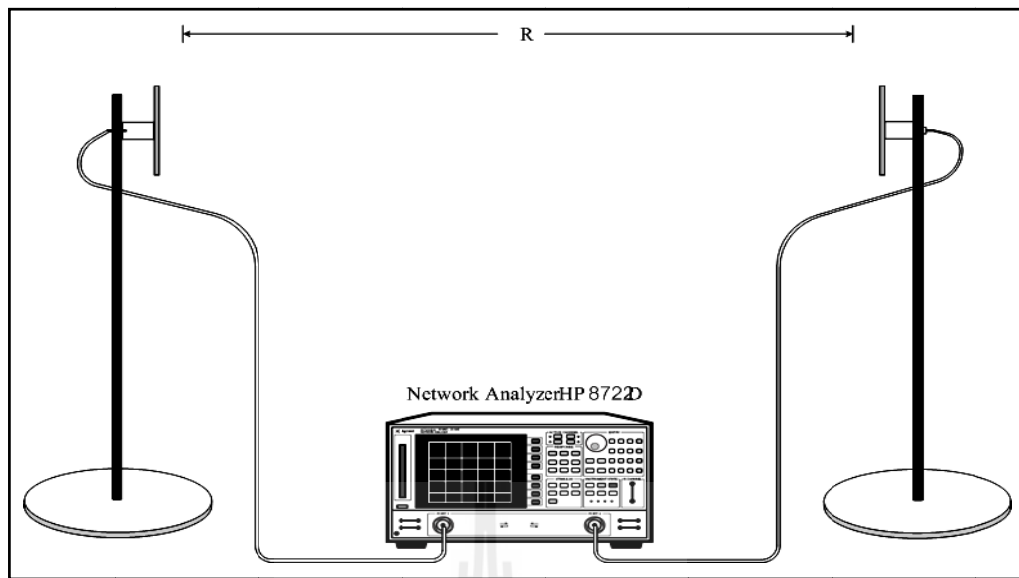
$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + Loss}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.4)$$

- โดยที่  $P_t$  คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง  
 $P_r$  คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศรับ  
 $G_{dB}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ  
 เมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน  
 $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง  
 $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ  
 $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (80เซนติเมตร)

สำหรับการวัดอัตราการขยายของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย  
 เวกเตอร์วัดพลังงานที่รับได้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.32 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศต้นแบบ

ในขั้นตอนต่อมาได้ทำการวัดอัตรายายของสายอากาศโดยกำหนดระยะทางระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเท่ากับ 0.8 เมตร ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่งเท่ากับ 0 dB ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.33 การวัดอัตรายายของสายอากาศต้นแบบ



#### 4.6.1 ผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

จากสมการ (4.3) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศในพื้นที่ว่างได้ดังนี้  
ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$G_{dB} = \left( \frac{P_r - P_i + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (R)}{\lambda} \right)}{2} \right)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{-34.79 + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right)}{2} \right)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{-34.79 + 20 \log(82.1)}{2} \right) = 1.75 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz

$$G_{dB} = \left( \frac{P_r - P_i + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (R)}{\lambda} \right)}{2} \right)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{-42.092 + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right)}{2} \right)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{-42.092 + 20 \log(194.36)}{2} \right) = 1.84 \text{ dB}$$

ผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ จากสมการ (4.4) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ได้ดังนี้

ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง แขน

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.076) - 1.75 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.076) - 1.75 + 20 \log(82.1) = 3.46 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ขา

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.016) - 1.75 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.016) - 1.75 + 20 \log(82.1) = 3.52 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 2.45 GHz ตำแหน่ง ออก

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.336) - 1.75 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-33.336) - 1.75 + 20 \log(82.1) = 3.2 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง แขน

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.302) - 1.84 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.302) - 1.84 + 20 \log(194.36) = 3.63 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ขา

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.152) - 1.84 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.152) - 1.84 + 20 \log(194.36) = 3.78 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz ตำแหน่ง ออก

$$G_{r_{db}} = P_{r_{db}} - P_{t_{db}} - G_{t_{db}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.552) - 1.84 + 20 \log \left( \frac{4\pi \times 0.8}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right)$$

$$G_{r_{db}} = (-40.552) - 1.84 + 20 \log(194.36) = 3.41 \text{ dB}$$

จากผลการคำนวณจะได้สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเป็ยกปุ่นสองแถบความถี่ สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศความถี่ 2.45 GHz

คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ 2.45 GHz		
	ขา	แขน	อก
อัตราขยาย (dB)	3.52	3.46	3.2

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายของสายอากาศความถี่ 5.8 GHz

คุณลักษณะของสายอากาศ	ความถี่ 5.8 GHz		
	ขา	แขน	อก
อัตราขยาย (dB)	3.78	3.63	3.41

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบ และจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกลทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีการเลื่อนความถี่ไปยังด้านความถี่ต่ำเมื่อเทียบกับสายอากาศที่วัดในสภาพอากาศ รวมถึงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ มีผลการวัดคล้ายคลึงกับแบบจำลอง ส่วนสาเหตุที่แตกต่างกันไปอาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองผล ตลอดจนผลที่เกิดขึ้นจากการวัดทดสอบในสภาพจริง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสองแถบความถี่ของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบนร่างกาย เพื่อศึกษาคุณลักษณะของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบตัวในระนาบเดียว ซึ่งมีลักษณะของการกระจายคลื่นรอบ ๆ สายอากาศ สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศสองแถบความถี่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศสองแถบความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ในเครือข่ายไร้สาย

สำหรับการออกแบบสายอากาศสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ในวิทยานิพนธ์นี้ ในเบื้องต้นได้ออกแบบสายอากาศสองแถบความถี่ต้นแบบในสภาวะอากาศว่าง โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สายอากาศสองแถบความถี่ที่มีความถี่ปฏิบัติการที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบในสภาวะอากาศเปรียบเทียบกับสายอากาศสองแถบความถี่เมื่ออยู่บนร่างกายมนุษย์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศสองแถบความถี่ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการออกแบบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ สำหรับรายละเอียดในการออกแบบสายอากาศและการวิเคราะห์ทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จากตารางที่ 5.1 เป็นการสรุปคุณลักษณะคุณสมบัติของสายอากาศสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับบนร่างกายมนุษย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราขยาย เป็นผลที่ได้จากการวัดผลของสายอากาศเมื่ออยู่ในสภาวะอากาศและบนร่างกายมนุษย์

#### 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาที่พบในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ คือ สายอากาศสองแถบความถี่สำหรับประยุกต์ใช้บนร่างกายมนุษย์สร้างจากแผ่นทองแดง เมื่อสร้างสายอากาศเป็นเวลานานแผ่นทองแดงจะเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นออกไซด์ ดังนั้นจึงทำการแก้ปัญหาโดยการเคลือบแผ่นทองแดง

เพื่อไม่ให้แผ่นทองแดงเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นออกไซด์ และสายอากาศไม่สามารถโค้งงอเข้ากับร่างกายให้เข้ารูปได้ จึงทำการแก้ปัญหาโดยนำสายอากาศวัดที่ร่างกายในตำแหน่งที่เรียบ

### 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แนวทางการพัฒนาต่อไปของเสาอากาศสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้คนร่างกายมนุษย์ที่ทำการออกแบบนี้ อาจจะมีการทดสอบเสาอากาศด้วยการสร้างบนแผ่นวัสดุที่มีฐานรองชนิดโค้งงอได้ และนอกจากนี้จะเห็นว่าสายอากาศมีอัตราขยายที่ต่ำ ซึ่งเราสามารถที่จะทำให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงขึ้นด้วยการนำสายอากาศออกแบบเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสองแถบความถี่

ในลำดับสุดท้ายผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบเสาอากาศ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของเสาอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้บนร่างกายมนุษย์ ทั้งในโครงสร้างที่นำเสนอในงานวิจัยนี้หรือโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



## รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์ (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ.** สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์. (2548). **วิศวกรรมสายอากาศ.** [ออนไลน์]. ได้จาก : [www.sut.ac.th/E-texte/Eng/Antennas/index.html](http://www.sut.ac.th/E-texte/Eng/Antennas/index.html)
- Balanis, C.A., (1997). **Antenna Theory : Analysis and Design.** John Wiley & Sons, Inc.
- Furse, C.M., and You, C.C. (2004). “ **Design of implantable microstrip antenna for communication with medical implants** ” *Microwave Theory and Techniques, IEEE* vol. 52, Issue: 8, pp. 1944-1951.
- Gabriel, C. (1996). **Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies,** Brooks Air Force Technical Report, AL/OE-TR-1996-0037
- Gabriel, S. (1996). “**The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz,**” *Phys. Med. Biol.* 41 pp.2251-2269,
- Gareth, A., and William, G. (2009). “ **Antennas for Over-Body-Surface Communication at 2.45 GHz** ” *IEEE Transactions on antennas and propag.*, vol. 57, No. 4, pp. 844-855  
URL <http://www.ieee802.org/15/>
- Gabriel, C., and Gabriel, S. (1999). “**Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies,**” <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/dielectric/Title/Title.html>
- Hall, P.S. and Hao, Y. (2006). “**Antennas and Propagation for Body Centric Wireless Communications**”, European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), November 2006
- Kamarudin, M.R., Nechayev, Y.I., and Hall, P.S. (2005). “**Antennas for on-body Communication systems**” *IEEE international Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2005. IWAT 2005, 7-9 March 2005,* Page (s); 17-20
- Komarov, V.V., Wang, S., and Tang, J. (2005). “**Permittivity and Measurement,**” *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, Vol. 4,* Hoboken, NJ: Wiley and Sons, 2005, pp. 3694-3711.

- Lin, J.C, and Gandhi, O.P. (1987). “**Computational methods for predicting field intensity,**” in Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Field. Boca Raton, FL: CRC Press, 1987, ch. 9, pp. 338–401.
- Pethig, R. (1984). “**Dielectric Properties of Biological Materials: Biophysical and Medical Applications,**” IEEE transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-19, No. 5, 1984, pp. 453-474
- Salman, L.K.H., and Talbi, L. (2010). “**Dual band G-shape wearable cuff button antenna for ism bands applications,**” antennas and propagation society international symposium (APSURSI), pp 1-4,
- Sukino, A., and Kokubun, K. (1990). “**Numerical analysis of microwave energy absorption in a multilayered cylindrical human model,**” IEICE, Japan, Tech. Rep. EMCJ89-91, pp. 15–20.
- Wei, X., Takahashi, M. and Saito, K. (2009). “ **An implanted cavity slot antenna for medical communication systems** ” Antennas and Propagation, 2009. EuCAP. 3<sup>rd</sup> Eueopean Conference. pp. 718-721.
- Woo, J.M. (2008). “**Microstrip line monopole antenna for the wearable applications.**” Microwave conference, 2008. EuMC 2008 pp. 1277-1279.
- Yacheslav, V. and Komarov, V. (2012). **Handbook of Dielectric and Thermal Properties Of Materials at Microwave Frequencies.** St. John





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Chinanupakorn, Ch. Thosdee, P. and Thongsopa, C. (2011). **Dual Band Quasi-Rhomboid Antenna for Bio-medical Monitoring Applications**. Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2011 Korea

Chinanupakorn, Ch. Thosdee, P. and Thongsopa, C. (2011). **Design of Dual band Quasi-Rhomboid Antenna for Human On-body Applications**. Proceedings of the Electrical Engineering Conference, Pattaya, Thailand



# Dual Band Quasi-Rhomboid Antenna for Bio-medical Monitoring Applications

<sup>#</sup>Montree Chinanupakorn, Phairat Thosdee and Chanchai Thongsopa  
<sup>#</sup>School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology  
 Nakhon Ratchasima 30000, Thailand  
[ch\\_montree53@hotmail.com](mailto:ch_montree53@hotmail.com)

## Abstract

In this paper, we propose a dual band quasi rhomboid antenna for bio-medical monitoring applications. The proposed antenna consists of quasi rhomboid shaped element antenna on free space and human arm. This antenna is designed on copperplate and antenna analysis was conducted by using the CST program.

**Keywords :** Quasi rhomboid antenna, bio-medical

## 1. Introduction

In recent years, the increasing interest in antennas and propagations research for body communication systems [1]. IEEE 802.15 standardization group has been established to standardize applications intended for on-body, off-body or in-body communication. Body-centric communications takes its place firmly within the sphere of personal area networks (PANs) and body area networks (BANs). A link from an on-body device to external off-body system – off-body, links in an on-body network consisted of wearable devices – on-body, and links to medical implants and sensor network – in-body. The health care services are deployed the range of medical devices and systems being used on the human body is increasing rapidly are of special interest in new sensing and monitoring device for healthcare. Body communication is communications between wireless medical implants and on body node [2-3]. For example, important in Hospital health status of patients suffering from chronic diseases or heart disease to monitor real-time. The health parameters that may be transmitted wirelessly to remote stations (off body mode) in medical systems range from simple heart rate, pressure, temperature, glucose levels. Therefore, the antenna required small size, light weight, low manufacturing cost and easy method of fabrication. Antenna is proposed for the wearable or implanted antenna, monopole, microstrip, patch, cavity slot antenna, textile antenna. However, antennas have narrow bandwidth.

In this paper presents a dual band quasi rhomboid antenna for bio-medical monitoring applications. The proposed antenna consists of single element antenna on free space and on human arm. This antenna is designed on Copperplate and antenna analysis was conducted by using the CST Microwave Studio Suite. The proposed antenna is realized and experimentally examined, since it is small size, light weight, easy method fabrication and low manufacturing cost. In measurement, it is found that both antennas have bandwidth covered the frequency range of 2 – 2.8 GHz and 5.3-6.2 GHz, respectively. The resonant frequency is shift of 200 MHz compared to free space and human arm which covered wideband spectrum range with average gain of 3.5 and 3 dB at free space and on human arm for single element, respectively. This antenna has a return loss than -10 dB all over the operating frequency and Omni-directional patterns in azimuth plane. The proposed antennas are suitable for medical monitoring application.

## 2. On-body Antennas Concept

Antenna on the body required is Omni-directional patterns since the movement of the body looked different. However, the human body are important parameters that effect the antenna is

permittivity so we assume that the human arm model has homogeneous and muscle-equivalent tissue. The dielectric dispersion of the tissue was approximated by the single-pole Debye equation.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

Where  $\epsilon_0$  is the free-space permittivity,  $\epsilon_s$  is the static permittivity at zero frequency,  $\epsilon_\infty$  is the optical permittivity at infinite frequency,  $\tau$  is the relaxation time, and  $\sigma$  is the static conductivity. Since the Debye equation cannot fully approximate the actual value of muscle over the range, the parameters are individually defined on three ranges of 3-30 MHz, 30-300 MHz, and 300 MHz- 3 GHz, so as to be continuous at boundaries. Discrepancy between the literature [4] and approximated values is within +10% over the whole frequency range.

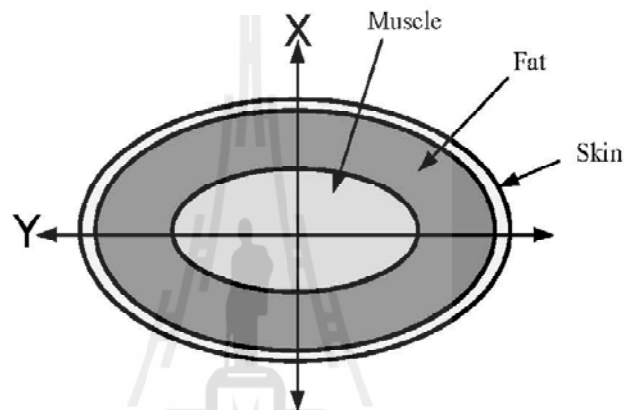


Figure 1: Human arm phantom model

### 3. Antenna Design

The main objective of this antenna designed is to provide dual bandwidth. The proposed antenna design was performed for copperplate. The analysis and design of antenna dimensions were optimized by using the CST Microwave Studio program. The simulation result by using CST program, include impedance matching antenna length  $\lambda/4$  ( $\lambda$  it mean wavelength in air.). The antenna dimensional parameters after adjustments are  $w1 = 37.41$ ,  $w2 = 6.12$ ,  $w3 = 4.27$ ,  $l1 = 24.68$ ,  $l2 = 5.75$  unit in millimeter. This antenna consists of two identical printed patches, one on the top and one on the bottom the substrate material. The detailed geometry and parameters of the proposed antenna are illustrated in Fig.2.

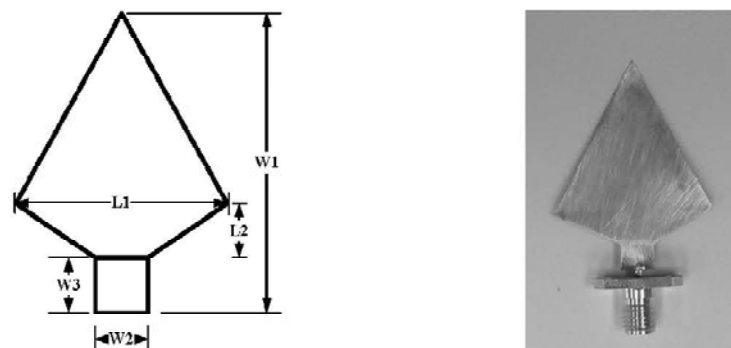


Figure 2: Structure and parameter of the proposed antenna.

## 4. Measurement and Result

### 4.1 Return loss

Fig.3 shows that the measured input return losses as a operation of frequency. The return loss of the proposed antenna is measured by using a HP 8772D vector network analyzer. The two resonances have been found that about 2.5 GHz and 5.8 GHz with the input return loss of more than -20 dB.

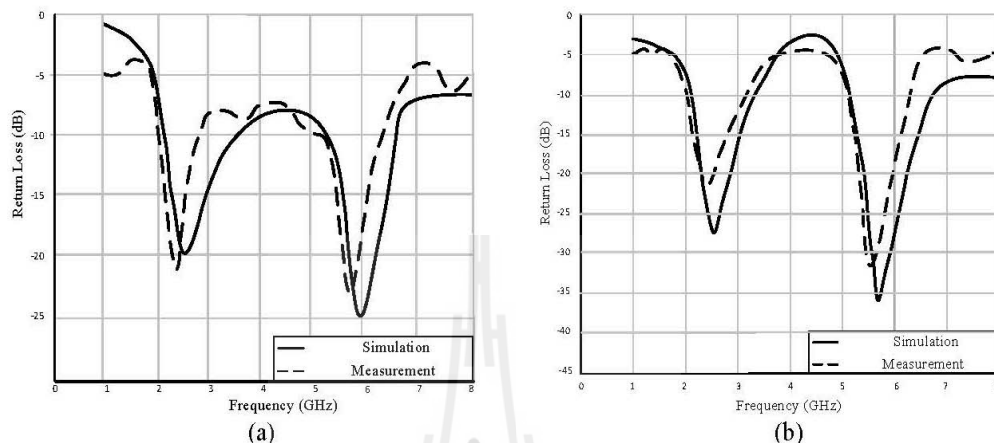


Figure 3 : The simulation and measured return loss (a) The return loss for free space, (b) the return loss for human arm.

### 4.2 Gain

Fig.4 shows the gain of the proposed antenna is measured by using vector network analyzer. From this figure, average gain is about 3.5 dB and 3 dB for antenna on free space and on human arm, respectively. The antenna gain in single element on free space is not same single element on human arm of antenna. In measurement, it found that an antenna on human arm has average gain less than antenna on free space about 0.5 dB.

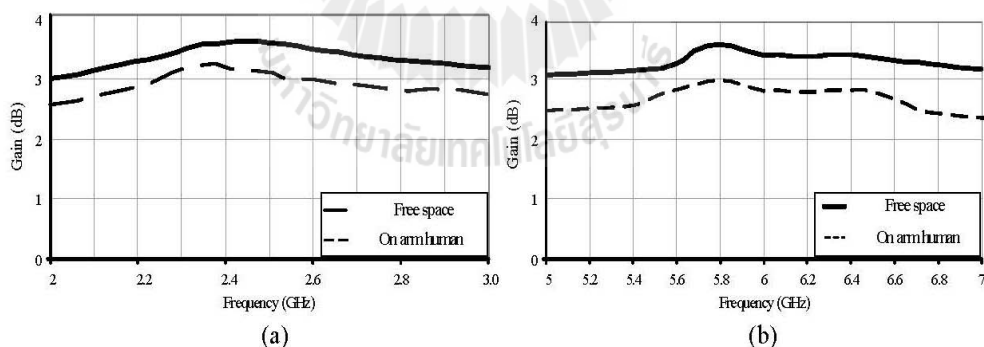


Figure 4: The measured gain (a) gain at frequency 2 to 3 GHz (b) gain at frequency 5 to 7 GHz

### 4.3 Radiation patterns

The far-field radiation patterns were measured in an anechoic chamber. The antenna patterns are measured at selective frequencies that cover the entire operating frequency, and the results are presented in Fig.5 for the E-plane and H-plane at frequency 2.45 GHz and 5.8 GHz respectively. When is received at 70 cm from the transmitting antenna for an antenna on free space and human arm structure, respectively. The proposed antenna is their stable radiation patterns. It can be seen that the antenna is satisfactorily in the considered frequency band. Referring to Fig.5 the measured E and H planes cross-polarization is not show because it is very low.

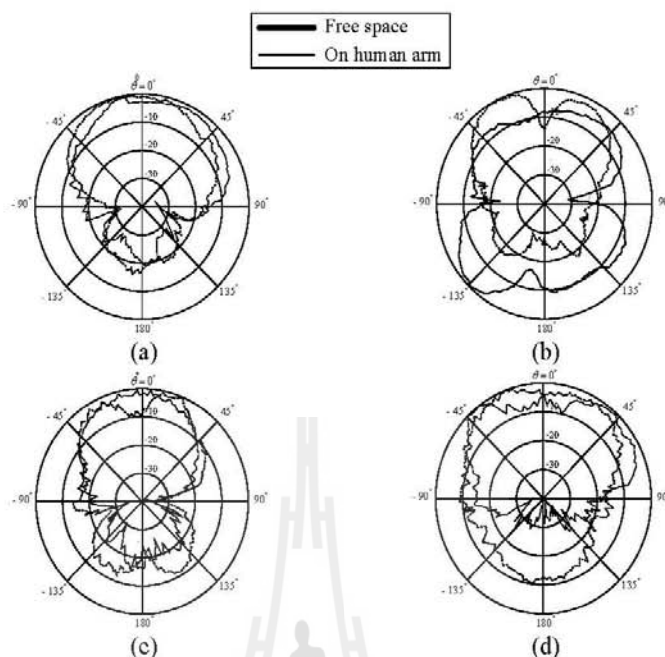


Figure 5: The measured E and H plane radiation patterns (a) E-plane at 2.45 GHz (b) H-plane at 2.45 GHz (c) E-plane at 5.8 GHz (d) H-plane at 5.8 GHz.

## 5. Conclusions

In this paper, a novel quasi rhomboid antenna is presented. The proposed antenna consists of single element on free space and single element on human arm. The proposed antenna provides covered frequency range 2-2.8 GHz and 5.3-6.2 GHz for a single element on free space and single element on human arm, respectively. The proposed antenna has a measured return loss less than -10 dB over the operating frequency for dual band bio-medical Monitoring applications. This antenna pattern is satisfactorily Omni-directional in azimuth in the considered frequency band. The average gain for single element on free space is around 3.5 dB, while for single elements on human arm the average is around 3 dB. The proposed antenna is fabricated on copperplate, since it is small size, easy construction and very low cost. For lead to use benefit in designed impulse receive transmit system of dual-band technology.

## References

- [1] Kamarudin, M.R.; Nechayev, Y.I.; Hall, P.S.; "Antennas for on-body communication systems" IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2005. IWAT 2005, 7-9 March 2005, Page(s): 17 – 20.
- [2] Hall, P S and Hao, Y., "Antennas and Propagation for Body Centric Wireless Communications", European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), November 2006.
- [3] A. Gareth, G. William "Antennas for Over-Body-Surface Communication at 2.45 GHz" IEEE Transactions on antennas and propaga., vol. 57, No. 4, pp. 844-855 Apr. 2009.
- [4] S. Gabriel et al., "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, Phys. Med. Biol. 41 pp.2251-2269, Apr. 1996.

## Acknowledgments

This work was supported by the Research Department Institute of Engineering Suranaree University of Technology Thailand.

## การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์

### Design of Dual band Quasi-Rhomboid Antenna for Human On-body Applications

มนตรี ชินานาโกรม<sup>1</sup> ไพรัตน์ ทศศิริ<sup>1</sup> และ ชาญชัย ทองโสภา<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ. มหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-4422-3000 E-Mail: ch\_montree53@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสองความถี่รูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกาย โดยสายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบบนแผ่นทองแดงบาง ซึ่งสายอากาศที่ได้มีขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และน้ำหนักเบา สำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST และขึ้นต้นผลการจำลองแบบจากโปรแกรมด้วยการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการวัดทดสอบจริง ซึ่งจากการทดสอบสายอากาศต้นแบบได้มีการจัดวางสายอากาศตามจุดต่าง ๆ บนร่างกายพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีย่านความถี่ปฏิบัติการที่สองย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ 2-2.8 GHz และ 5.3-6.2 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB และมีอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 3.5 dB นอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่มีเสถียรภาพ เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** สายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน, การสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์

#### Abstract

In this paper presents a dual band quasi rhomboid antenna for human on body applications. This antenna is designed on Copperplate and analyzed by the CST Microwave Studio Suite. The proposed antenna is realized and experimentally examined, since it is small size, light weight, easy method fabrication and low cost. In measurement, it is found that both antennas have bandwidth covered the frequency range of 2.0 -2.8 GHz and 5.3-6.2 GHz, respectively. The resonant frequency is shift of 100 MHz compared to Arm, Leg and Chest which covered wideband spectrum range with average gain of 3.5 dB 3.3 dB and 3 dB at Arm, Leg and Chest respectively. This antenna has a return loss lower than 10 dB all over the operating frequency and omni-directional patterns in azimuth plane.

**Keywords :** Quasi-rhomboid antennae, Dual band, human on-body

#### 1. บทนำ

ที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่และระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย รวมถึงระบบสื่อสารที่เป็นโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล โดยเฉพาะระบบการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์ที่กำลังได้รับความสนใจสูงมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถบรรลุประยุกต์ใช้งานด้านการทหาร ด้านการรักษาความปลอดภัย และด้านการแพทย์สำหรับผู้ป่วยที่ต้องการควบคุมการรักษาและดูแลอย่างใกล้ชิด อีกทั้งยังเป็นตัวแปรพื้นฐานในการวิเคราะห์หัตถการเห็นหัวใจ ความดันโลหิต อุณหภูมิ และระดับน้ำตาลในโลหิต เป็นต้น เพื่อให้แพทย์สามารถควบคุมตรวจสอบและตัดสินใจในการรักษาผู้ป่วยได้ทันทั่วทั้งผ่านระบบโครงข่ายไร้สายดังกล่าว และไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารไร้สายรูปแบบใดจำเป็นอย่างไรก็ตามจะต้องมีสายอากาศสำหรับแพร่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งทำให้นักวิจัยมีความสนใจในการออกแบบสายอากาศสำหรับรูปแบบการสื่อสารไร้สายดังกล่าวอย่างแพร่หลาย เพื่อให้เป็นมาตรฐานสำหรับการสื่อสารสำหรับการสื่อสารภายในร่างกาย (in-body) การสื่อสารบนร่างกาย (on body) หรือการสื่อสารภายนอกร่างกาย (off body) โดยหลักการของการสื่อสารภายในร่างกายนั้นจะเป็นการเชื่อมโยงกันระหว่างอุปกรณ์และโครงข่ายเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ฝังอยู่ภายในร่างกาย ส่วนการสื่อสารภายนอกร่างกายนั้นจะเป็นการเชื่อมโยงเครือข่ายภายนอกร่างกายกับอุปกรณ์ที่อยู่ภายในร่างกาย แต่เป็นการสื่อสารภายนอกร่างกายนั้นจะเป็นการเชื่อมโยงจากอุปกรณ์บนร่างกายไปยังระบบหรือหน่วยประมวลผลที่ควบคุมด้วยไมโครอิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ต่อไป

ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสองความถี่รูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสำหรับประยุกต์ใช้งานบนร่างกาย โดยสายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบบนแผ่นทองแดงบาง ซึ่งสายอากาศที่ได้มีขนาดเหมาะสมเล็กสร้างง่าย ต้นทุนต่ำ และน้ำหนักเบา อีกทั้งสามารถใช้งานได้ในสองความถี่ โดยการออกแบบสายอากาศนั้นมีการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST และสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการวัดทดสอบจริง ซึ่งจากการทดสอบสายอากาศพบว่าสายอากาศนั้นสามารถใช้งานได้ที่ 2 ความถี่ ที่ค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบโดยนำมารวมตามจุดต่าง ๆ บนร่างกายพบว่า

สายอากาศที่นำเสนอมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ตลอดย่านความถี่ปฏิบัติการที่ส่งผ่านความถี่ โดยแต่ละตำแหน่งนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงการทำงานของสายอากาศนั่นคือ ย่านความถี่ 2-2.8 GHz และ 5.3-6.2 GHz อีกทั้งสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่มีเสถียรภาพ และมีอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 3 dB เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายบนร่างกายนมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2. แนวคิดสายอากาศบนร่างกาย

สายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้บนร่างกายนั้นมีสองกรณีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากนักวิจัย นั่นคือ กรณีของการสื่อสารภายนอก่างกายและการสื่อสารบนร่างกาย โดยที่การสื่อสารบนร่างกายนั้นจะเป็นการเชื่อมโยงเครือข่ายต่าง ๆ บนร่างกายกับอุปกรณ์ภายในร่างกาย แต่ดำเนินการสื่อสารภายนอก่างกายนั้นจะหมายถึงการเชื่อมโยงจากอุปกรณ์บนร่างกายไปยังระบบหรือหน่วยประมวลผลที่ควบคุมด้วยไมโครอิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ในระบบไกล ดังนั้นสายอากาศที่ใช้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพ นั่นคือสายอากาศจะต้องมีอัตราการขยายที่ต่ำที่แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะต้องมีเสถียรภาพ เพื่อให้ครอบคลุมเครือข่ายต่างๆที่อยู่บนร่างกาย

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

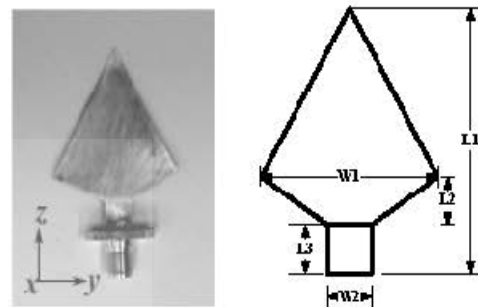
- เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ The free-space permittivity
- $\epsilon_s$  คือ The static permittivity at zero frequency
- $\epsilon_\infty$  คือ The optical permittivity at infinite frequency
- $\tau$  คือ The relaxation time
- $\sigma$  คือ The static conductivity

นอกจากนั้นการออกแบบสายอากาศที่ใช้งานบนวัสดุต่างๆ ที่มีค่าการสูญเสียและความสามารถในการดูดซับ (Permittivity) กำลังงานของวัสดุ นั้นๆ ซึ่งการออกแบบสายอากาศที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนั้นมีจุดประสงค์เพื่อนำไปใช้งานสำหรับการสื่อสารบนร่างกายมนุษย์ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสีย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาความสัมพันธ์พื้นฐานของตัวกลางที่มีการสูญเสีย ดังสมการที่ (1) เนื่องจากค่าการสูญเสียคือ  $\sigma$  ดังนั้นจะส่งผลกระทบต่อขนาดของสมการที่ (1) ในขอบเขต

3. การออกแบบสายอากาศ

สำหรับหลักการออกแบบสายอากาศแบบสองความถี่นั้นได้เลือกใช้แผ่นทองแดงบางขนาด 0.1 มิลลิเมตร และพิจารณาว่าวัสดุฐานรองที่มีการสูญเสียที่ต่ำที่สุดคือ FR4 โดยที่ การกระจายคลื่นของโปรเซสเซอร์ CS1 ซึ่งพบคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการสื่อสารร่างกาย ซึ่งในการจำลองแบบนั้นได้ใช้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย 1/4 (λ หมายถึงความยาวคลื่นในอากาศ) โดยขนาดของสายอากาศหลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วจะได้  $w1 = 24.68$  มิลลิเมตร,  $w2 = 6.12$  มิลลิเมตร,  $L1 = 27.41$  มิลลิเมตร,  $L2 = 5.75$ ,  $L3 = 4.27$  มิลลิเมตร มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศและพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

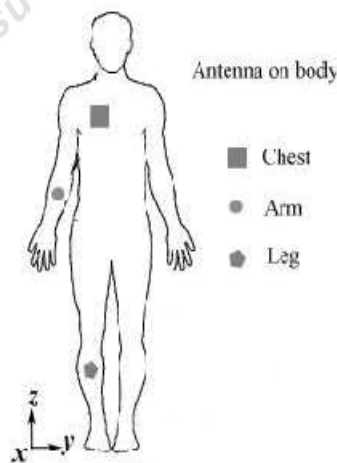


รูปที่ 1 โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ

4. การวัดและผลลัพท์

4.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

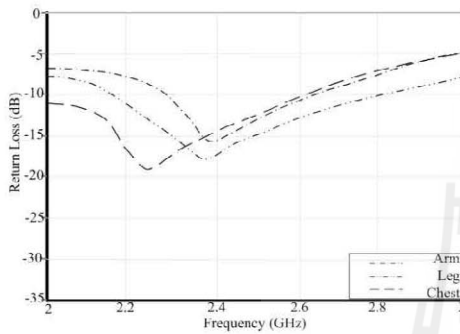
รูปที่ 3 แสดงผลวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งเป็นผลการวัดสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ HP 8722C โดยมีแผ่นโฟม มีความหนา 3 มิลลิเมตร กว้างระหว่างสายอากาศกับเรจกอมพิวเตอร์ ณ จุดต่างๆคือ แสดงในรูปที่ 2



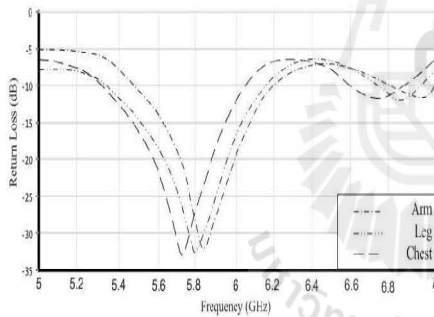
รูปที่ 2 ตำแหน่งการจัดวางสายอากาศบนร่างกาย



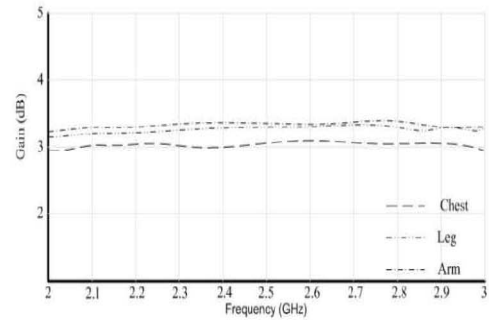
ผลที่ได้จากการวัดพบว่าสายอากาศทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งสายอากาศภาคส่งห่างจากสายอากาศรับที่อยู่บนร่างกายเป็นระยะทาง 100 เซนติเมตร จากผลการวัดตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้แก่ แขน ขา และหน้าอก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์และมีการเลื่อนความถี่อยู่ในช่วง 2-2.8 GHz และ 5.3-6.2 GHz โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า 20 dB ตลอดย่านการใช้งานของสายอากาศ



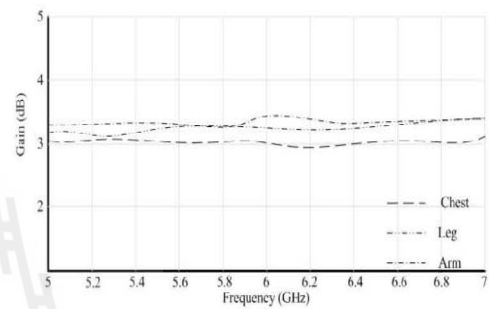
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4 อัตราการขยายของสายอากาศบนร่างกายที่ตำแหน่งทดสอบ (ก) อัตราการขยายบนร่างกายที่ย่านความถี่ 2-3 GHz (ข) อัตราขยายบนร่างกายที่ย่านความถี่ 5-7 GHz

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2-3 GHz เปรียบเทียบอัตราขยายที่ย่านความถี่ 5-7 GHz มีอัตราขยายที่ใกล้เคียงกัน

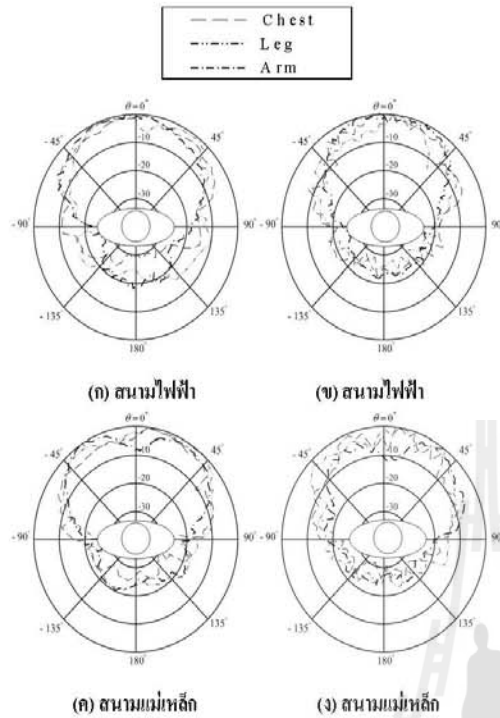
รูปที่ 3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศบนร่างกาย (ก) การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ย่านความถี่ 2-3 GHz (ข) การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ย่านความถี่ 5-7 GHz

**4.2 อัตราการขยาย**

**สำหรับผลการวัด** อัตราการขยายของสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์ไคร่งข่ายเวกเตอร์ พบว่ามีอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 3.5 dB 3.3 dB และ 3 dB สำหรับการวัดวางตำแหน่งของสายอากาศต้นแบบบนแขน ขา และบนหน้าอก ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบสายอากาศต้นแบบทั้ง 3 กรณีนั้นพบว่ามีการขยายต่างกันอยู่ 0.5 dB โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 4

**4.3 การแผ่กระจายกำลังงาน**

การแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในระยะไกลเป็นการวัดสายอากาศในห้องปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไร้คลื่นสะท้อน โดยรูปแบบของการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศนั้นจะทำการวัด โดยเลือกย่านความถี่ให้ครอบคลุมความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศที่ทำการออกแบบ และผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศนั้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ตามลำดับ เมื่อสายอากาศภาครับอยู่ห่างกับสายอากาศภาคส่งเป็นระยะทาง 100 เซนติเมตร สำหรับสายอากาศบนแขน สายอากาศที่อยู่บนขา และสายอากาศที่อยู่บนอก ซึ่งผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งสองความถี่ของสายอากาศต้นแบบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศที่นำเสนอ (ก) ระยะเวลาไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz (ข) ระยะเวลาไฟฟ้าที่ความถี่ 5.8 GHz (ค) ระยะเวลาแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz (ง) ระยะเวลาแม่เหล็กที่ความถี่ 5.8 GHz

**5. สรุป**

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศสองความถี่รูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์ โดยได้นำเสนอผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าสายอากาศครอบคลุมย่านความถี่ 2-2.8 GHz และ 5.3-6 GHz วัดที่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB เมื่อพิจารณารูปแบบการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบตัว และมีอัตราการขยายเฉลี่ยประมาณ 3.5 dB 3.3 dB และ 3 dB สำหรับการทดสอบบนแขน ขา และหน้าอก ตามลำดับ โดยสายอากาศที่นำเสนอนั้นสร้างจากแผ่นทองแดง ซึ่งมีขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารไร้สายบนร่างกายมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ทั้งด้านการแพทย์ต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**6. กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Kamarudin, M.R.; Nechayev, Y.I.; Hall, P.S.; "Antennas for on-body communication systems" IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2005. IWAT 2005, 7-9 March 2005, Page(s): 17 – 20.  
 [2] Hall, P S and Hao, Y., 'Antennas and Propagation for Body Centric Wireless Communications', European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), November 2006  
 [3] A. Gareth, G. William "Antennas for Over-Body-Surface Communication at 2.45 GHz" IEEE Transactions on antennas and propaga., vol. 57, No. 4, pp. 844-855 Apr. 2009  
 [4] S. Gabriel et al., "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," Phys. Med. Biol. 41 pp.2251-2269, Apr. 1996.



**มนตรี ชินานุภรณ์** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี 2552 ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย และการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง



**ไพรัตน์ ทศดี** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2549 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2551 ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายอัลตราไวด์แบนด์ และการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง



**ชาญชัย ทองโสภะ** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2535 ปริญญาโท วิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปี 2539 และปริญญาเอก วิทยาศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2542 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้าน วงจรทางด้านความถี่สูง สายอากาศแอลทีพี และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี ชินานุปกรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2555 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ โดยในปี 2555 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในระดับชาติ 1 ฉบับ ในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EECON 34) ในหัวข้อ “การออกแบบสายอากาศรูปคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสองแถบความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนร่างกายมนุษย์” และในปี 2555 ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ 1 ฉบับ ในงาน Interantional Sumposium on Antennas & Propagation (ISAP) ในหัวข้อ “Dual Band Quasi-Rhomboid Antenna for Bio-medical Monitoring Applications”