

สายอากาศเส้นวกวนไดอิเล็กตริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ

MAGNETO DIELECTRIC MEANDER LINE ANTENNA  
FOR FOLDER-TYPE MOBILE PHONE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-061

สายอากาศเส้นววนไดอิเล็กตริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ

MAGNETO DIELECTRIC MEANDER LINE ANTENNA  
FOR FOLDER-TYPE MOBILE PHONE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-018-061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเส้นววนไดอิเล็กตริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ

MAGNETO DIELECTRIC MEANDER LINE ANTENNA  
FOR FOLDER-TYPE MOBILE PHONE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-018-061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETO DIELECTRIC MEANDER LINE ANTENNA  
FOR FOLDER-TYPE MOBILE PHONE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

KMITL-2018-EN-D-018-061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์


หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศเส้นทวนไดอิเล็กตริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ  
Thesis Title Megneto Dielectric Meander Line Antenna for Folder-type Mobile Phone  
นักศึกษา นายเรวัตน์ เสนาทอง  
รหัสประจำตัว 55610106  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-D-018-061

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.ประยูทธ	อัครเอกตมาสิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ผศ.ดร.ชินวัชร	สุรัสวดี	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-401 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศเส้นทวนไดอิเล็กทริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ
นักศึกษา	นายเรวัตน์ เสนาทอง
รหัสประจำตัว	55610106
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศเส้นทวนไดอิเล็กทริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ โดยมีย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ตั้งแต่ 467 MHz ถึง 1012 MHz โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่นซึ่งใช้เทคนิค (Meander line) ในการออกแบบเพื่อให้ได้คุณสมบัติแถบความถี่กว้าง อยู่บนวัสดุฐานรองแม่เหล็กเทียม (Eccosorb MF-124) เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็กโดยมีขนาดทางกายภาพเท่ากับ  $10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  และขนาดทางไฟฟ้าเท่ากับ  $0.15\lambda \times 0.039\lambda \times 0.0015\lambda$  เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 470 MHz ซึ่งวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกแม่เหล็กจะถูกออกแบบรวมอยู่กับระนาบกราวด์บนวัสดุฐานรอง FR4 โดยสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ที่ได้มีค่าต่ำกว่า  $-6 \text{ dB}$  ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 467 MHz ถึง 1017 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 73.6% โดยมีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นมากกว่า 90% และค่าประสิทธิภาพรวมมากกว่า 69.9% ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900

<b>Thesis</b>	Magneto Dielectric Meander Line Antenna for Folder-Type Mobile Phone
<b>Student</b>	Mr. Rewat Senathong
<b>Student ID.</b>	55610106
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

## ABSTRACT

This thesis proposes a miniaturized wideband meander line antenna (MLA) using a magneto dielectric (MD) material for folder-type mobile phone. The proposed MLA was attached to the lower and upper ground planes of the folder-type chassis, connected electrically by grounding strip. The MD material (Eccosorb MF-124) was subsequently loaded onto the coupling-element area of the MLA. The MD-laden MLA was ultra-compact (10 mm × 25 mm × 1 mm), with the electrical size of  $0.015\lambda \times 0.039\lambda \times 0.0015\lambda$  at 470 MHz. The surface current distribution was simulated to determine the optimal parameters of the MD-laden MLA. To verify, a prototype antenna was fabricated and the experiments was performed. The measured impedance bandwidth ( $|S_{11}| < -6$  dB) covered the frequency range of 467-1012 MHz (73.6%), with an omnidirectional radiation pattern. The radiation efficiency was in excess of 90%, total efficiency was in excess of 69.9%, rendering it suitable for the DVB-H/LTE13/GSM850/900 applications.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากรองศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ เป็นผู้ให้โอกาสในด้านการศึกษา เคี้ยวเชิญอบรมสั่งสอน ทั้งในเวลาและนอกละลาการ นอกจากนี้ ยังให้หลักการการดำเนินชีวิตได้อย่างมีความสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร ที่ได้ช่วยในด้านวิชาความรู้ แนะนำ ตรวจสอบ ที่มีประโยชน์ในงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ตลอดช่วงชีวิตการศึกษาของข้าพเจ้าที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจ และข้อคิดดี ๆ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านไป ขอขอบคุณ ดร. บัญชา เหลือแดง ผู้ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์และทดสอบ การร่วมศึกษา ให้กำลังใจ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านไป

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัย จงดลบันดาลให้ครอบครัวของข้าพเจ้ามีมารดา บิดา พี่ๆ และน้อง ที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนในทุกสิ่ง ตลอดจนคุณครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้วิชาความรู้ ได้มีความสุขพัฒนามงคล สมบูรณ์พูนผล ตลอดกาลนานเทอญ

เรวัฒน์ เสนาทอง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ระบบสื่อสารสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่.....	1
1.1.1.1 โทรศัพท์ระบบดิจิทัลสำหรับประเทศไทย.....	1
1.1.1.2 ระบบเซลลูลาร์.....	3
ระบบ GSM 850, 900.....	4
ระบบแอลทีอี (LTE - Long Term Evolution).....	5
1.1.2 ความสำคัญของปัญหา.....	5
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	6
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	7
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ทฤษฎีและหลักการ.....	8
2.3 การศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 งานวิจัยสายอากาศโทรทัศนระบบดิจิทัลที่มีมาก่อน.....	11
2.4 สรุป.....	21
บทที่ 3 การประยุกต์วัสดุแม่เหล็กกับสายอากาศ.....	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 วัสดุฐานรองแม่เหล็ก (MD).....	22
3.3 การศึกษาวิธีในการลดขนาดของสายอากาศ.....	24
3.3.1 สายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก (Magneto-Dielectric loaded antennas).....	26
3.4 งานวิจัยสายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก.....	27
3.5 สรุป.....	30
บทที่ 4 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ.....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ.....	31
4.2.1 คุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก.....	31
4.2.2 โครงสร้างของสายอากาศ.....	32
4.2.3 การศึกษาพารามิเตอร์.....	36
4.3 บทสรุป.....	38
บทที่ 5 การทดสอบ.....	39
5.1 บทนำ.....	39
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	39
5.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบ.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ผลการทดสอบ.....	40
5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern).....	41
5.3.3 อัตราขยาย (Gain).....	47
5.4 สรุป.....	49
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	50
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	52
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงมาตรฐานต่างๆ ของระบบเซลลูลาร์ GSM850/900 และ LTE13.....	4
2.2 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลของผลงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	22
3.1 ตารางคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....	24
3.2 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสายอากาศไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์กับความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (แทนเจนต์การสูญเสีย = 0.001).....	26
4.1 แสดงผลจำลองค่าสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพความยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก รุ่น Eccosorb MF-124.....	33
5.1 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ.....	49
6.1 เปรียบเทียบงานวิจัยสายอากาศแบบพกพากับสายอากาศที่ออกแบบ.....	52



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 มาตรฐานโทรทัศน์ระบบดิจิทัลจากสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) [1]...	2
1.2 ลักษณะโครงสร้างของระบบเซลลูลาร์ [2].....	3
1.3 โครงสร้างของสายอากาศ.....	6
2.1 สายอากาศโมโนโพลไมโครสติปพร้อมระนาบกราวด์ สำหรับประยุกต์ใช้งานโทรทัศน์ดิจิทัล [5].....	12
2.2 สายอากาศโมโนโพลรูปอักษรตัวเจสำหรับโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟ [6].....	13
2.3 สายอากาศแบบเกลียว สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [7].....	14
2.4 สายอากาศแบบโมโนโพลรูปร่างซ้อนสัมผัสสำหรับประยุกต์ใช้งานแบบยูเอสบี สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [8].....	15
2.5 สายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้วัสดุฐานรองเป็นเฟอร์ไรท์สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [9].....	16
2.6 สายอากาศแบบแผ่นพับและใช้การกลับลิ้งโดยใช้เฟอร์ไรท์ สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [10].....	17
2.7 สายอากาศขนาดเล็กใช้วัสดุเฟอร์ไรท์สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลในโทรศัพท์เคลื่อนที่ [11].....	18
2.8 สายอากาศแบบโมโนโพลสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [12].....	19
2.9 สายอากาศแบบโมโนโพลโดยใช้วารีเตอร์และการขดวงวนสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [13].....	20
2.10 สายอากาศแบบขดวงวนโมโนโพลกับพาราซิติกสตริปสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ [14]..	21
2.11 สายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลบรอดแบนด์โดยใช้วงจรมेटซิง [15].....	21
3.1 ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง.....	24
3.2 โครงสร้างของสายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก.....	26
3.3 แบนด์วิธของสายอากาศเมื่อทำการปรับความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก.....	27
3.4 สายอากาศขนาดเล็กย่านความถี่ UHF โดยใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก.....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 สายอากาศไมโครสตริปขนาดเล็กโดยใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กบางเป็นวัสดุฐานรอง.....	29
3.6 การออกแบบสายอากาศขนาดเล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือโดยใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก.....	29
3.7 สายอากาศขนาดเล็กและวัสดุนาโนเฟอร์ไรท์วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก MF114.....	30
4.1 แสดงผลจำลองค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง Eccosorb MF-124.....	33
4.2 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศ.....	34
4.3 ค่าจำลอง  S11  ของสายอากาศที่ยังไม่ติดตั้ง MD.....	35
4.4 แสดงรูปโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศที่นำเสนอ.....	35
4.5 แสดงค่า  S11  ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	36
4.6 ผลการจำลองกระแสเชิงผิวบริเวณบนเส้นกวนและระนาบกราวนด์.....	37
4.7 แสดงค่า  S11  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า $J_{fc1}$ - $J_{fc3}$ .....	37
4.8 แสดงค่า  S11  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า $I_c$ .....	38
4.9 แสดงค่า  S11  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า $N$ .....	38
4.10 แสดงค่า  S11  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า MD thicknesses.....	39
5.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	40
5.2 การติดตั้งเพื่อทำการทดสอบ  S11  ของสายอากาศ.....	41
5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  S11  ที่เป็นฟังก์ชันความถี่.....	41
5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมในระนาบ xy.....	43
5.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ xy.....	43
5.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมในระนาบ xz.....	44
5.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ xz.....	44
5.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมในระนาบ yz.....	45
5.9 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ yz.....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 แสดงทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ สายอากาศต้นแบบ.....	46
5.11 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบและค่า- ประสิทธิภาพ.....	49



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

#### 1.1.1 ระบบสื่อสารสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่

ปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมในวงกว้าง และได้รับการพัฒนาความสามารถในการรองรับการใช้งานในอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดเล็ก กระทบง่าย พกพาง่าย อย่างแพร่หลาย ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการใช้งานคอนเทนต์ต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับการแพร่กระจายข่าวสาร สื่อ สันทนาการ และอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว ได้อย่างดีเช่นกัน อาทิเช่น ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz) เป็นต้น ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานในประเทศไทย

##### 1.1.1.1 โทรทัศน์ระบบดิจิทัลสำหรับประเทศไทย

ในประเทศไทยนั้นได้ประกาศเริ่มกิจการโทรทัศน์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคมอย่างมาก เนื่องจากเป็นรากฐานอันสำคัญในการคงไว้ซึ่งอิสรภาพทางการสื่อสารในวงกว้าง และเป็นช่องทางในการส่งข้อมูลที่มีความจำเป็นในการดำรงชีวิต และปกครองคนหมู่มาก ดังจะเห็นได้ว่าผลประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นจากการบริโภคข้อมูลข่าวสารที่ทันสมัย นั้นสามารถช่วยให้สังคมถูกขับเคลื่อนไปได้โดยเร็ว และยั่งยืน

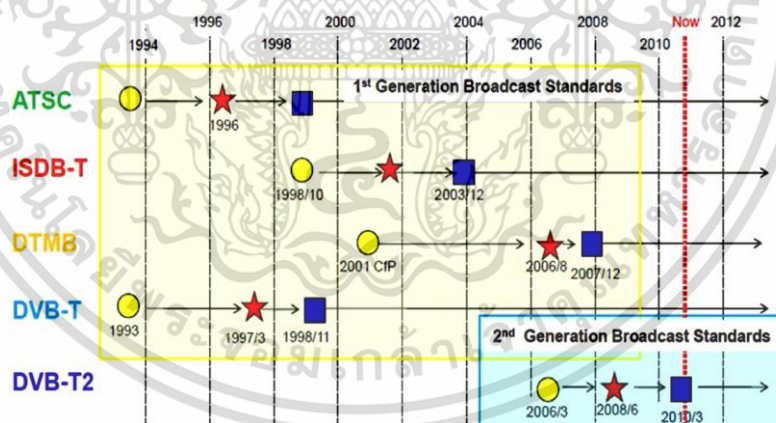
โดยกิจการโทรทัศน์ของประเทศไทยเริ่มออกอากาศระบบโทรทัศน์ขาวดำ เมื่อ ค.ศ. 1955 และระบบโทรทัศน์สีในปี ค.ศ. 1967 ซึ่งสามารถแพร่ภาพครอบคลุมทั่วประเทศ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีโทรทัศน์ระบบดิจิทัล นั้นมีความสำคัญมาก ในด้านการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่วิทยุให้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้น โดยเทคโนโลยีระบบดิจิทัลสามารถออกอากาศได้ 8-25 ช่องรายการ ต่างจากระบบอนาล็อกที่สามารถแพร่ภาพได้เพียง 1 ช่องรายการต่อช่วงความถี่เท่านั้น ทั้งนี้ยังสามารถเพิ่มมัลติมีเดียใหม่ ๆ และความคมชัดในระดับสูง ในขณะที่ลดการใช้พลังงานของประเทศลงในเวลาเดียวกัน เพราะระบบส่งสัญญาณและเครื่องรับโทรทัศน์ระบบดิจิทัลนั้นประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าดีกว่าระบบอนาล็อกอย่างมาก [1]

ปัจจัยของการประสบความสำเร็จของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล นั้นคือการกำหนดมาตรฐานโทรทัศน์ระบบดิจิทัล เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการส่งสัญญาณออกอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ และใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตสินค้าในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประชาชนให้ได้รับบริการโทรทัศน์ที่มีคุณภาพดีขึ้น มีความคมชัดสูงขึ้น มีจำนวนช่องรายการเพิ่มขึ้น และมีโอกาสที่จะเลือกรับบริการในสิ่งที่ตรงกับความต้องการของตนเองมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิจการโทรทัศน์ของประเทศไทยใช้คลื่นความถี่ภาคพื้นดิน แบ่งได้เป็น 3 ยุค (Generation) คือ ยุคที่ 1 คือ ยุคโทรทัศน์ขาว-ดำ (ค.ศ. 1947 – 1967) ยุคที่ 2 คือ ยุคโทรทัศน์สี (ค.ศ. 1967 – 2014) และยุคที่ 3 คือ ยุคโทรทัศน์ระบบดิจิทัล (ค.ศ. 2014 เป็นต้นไป) [2]

กิจการโทรทัศน์ในยุคที่ 3 เป็นยุคแห่งการพัฒนาเทคโนโลยีทางการรับ-ส่ง สัญญาณโทรทัศน์ ด้วยระบบดิจิทัล ทำให้ประสิทธิภาพและคุณภาพดีขึ้นมาก เนื่องจากมีเทคนิค พัฒนาการรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่หลากหลาย ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการหลอมรวมสื่อ (Convergence) การรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ ระบบดิจิทัล คือ การเปลี่ยนสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นรหัสสัญญาณแบบดิจิทัล และทำการส่งจากสถานีส่งสัญญาณโทรทัศน์ ซึ่งทางด้านเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์มีความจำเป็นต้องทำการถอดรหัสสัญญาณแบบดิจิทัลดังกล่าวกลับมาเป็นสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพเพื่อให้เครื่องรับโทรทัศน์สามารถแสดงผลเสียงและภาพที่ส่งมาได้ ซึ่งส่วนที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ ด้วยระบบดิจิทัล กับการรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ ด้วยระบบอนาล็อก คือ การรับ-ส่งสัญญาณโทรทัศน์ ด้วยระบบดิจิทัลมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีขึ้นมาก มีภาพคมชัดขึ้นมาก ถูกรบกวนน้อยลง ไม่มีคลื่นแทรก หรือการสะท้อน [3] ปัจจุบันมาตรฐานโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) ให้การรับรองมี 5 ระบบ คือ ระบบ ATSC DVB-T ISDB-T DTMB และ DVB-T2 ดังรูปที่ 1.1



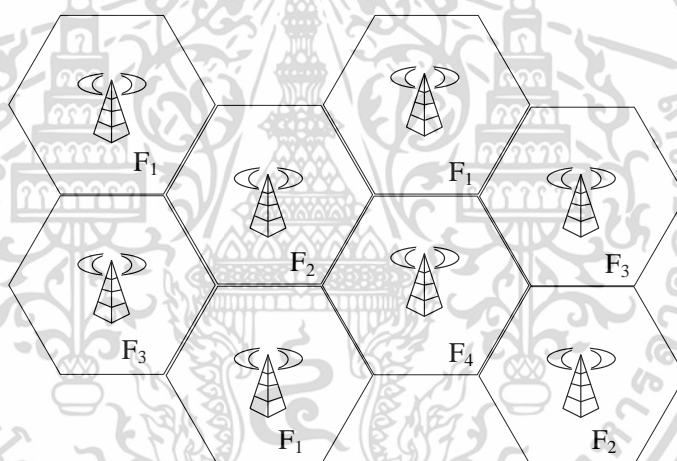
รูปที่ 1.1 มาตรฐานโทรทัศน์ระบบดิจิทัลจากสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) [1]

DVB-T2 หรือ Digital Video Broadcasting–Second Generation Terrestrial คือมาตรฐานที่องค์การ Digital Video Broadcasting Project (DVB) ปรับปรุงจากมาตรฐาน DVB-T ในปี ค.ศ. 2006 เป็นการนำเทคโนโลยีการผสมสัญญาณและการเข้ารหัสแบบใหม่มาใช้ส่งสัญญาณประเภทเสียง วิดีโอและข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่า DVB-T ประมาณ 1.5 เท่า ออกอากาศโดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 8 MHz จะมีความจุช่องสัญญาณสูงสุด 50.4 Mb/s สามารถบรรจุช่องรายการโทรทัศน์ปกติได้ประมาณ 25 ช่อง ระบบนี้เริ่มใช้งานจริงตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 ปัจจุบันมีประเทศที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ DVB-T2 ประมาณ 38 ประเทศทั่วโลก โดยส่วนหนึ่งเป็นประเทศที่ใช้ระบบ DVB-T อยู่แล้วและปรับเปลี่ยนไปเป็น DVB-T2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการใช้คลื่นความถี่มากกว่า อีกส่วนหนึ่งเป็นประเทศที่เปลี่ยนผ่านไปสู่โทรทัศน์ระบบ DVB-T2 โดยตรง ซึ่งการเปลี่ยนผ่านจากระบบโทรทัศน์อนาล็อกในระบบ PAL ไปสู่ระบบดิจิทัล DVB-T2 ที่เป็นมาตรฐานของยุโรปเหมือนกัน ก็สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว

### 1.1.1.2 ระบบเซลลูลาร์

ระบบเซลลูลาร์เป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่พัฒนาขึ้นมาให้มาครอบคลุมพื้นที่กว้างมากขึ้น สามารถขยายพื้นที่ให้บริการแก่ผู้ใช้ เช่น ในเขตเมืองหลวงที่มีความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในปริมาณมาก ระบบเซลลูลาร์ นั้นใช้หลักการติดตั้งเครื่องรับส่งวิทยุ ที่กำลังส่งต่ำกระจายเป็นจุด ๆ ไปทั่วพื้นที่เป้าหมาย จุดที่ติดตั้งเครื่องรับส่งวิทยุนั้นเรียกว่า สถานีฐาน หรือที่ตั้งเซลล์ ลักษณะโครงสร้างของระบบเซลลูลาร์ แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะโครงสร้างของระบบเซลลูลาร์ [2]

จากรูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างของเครือข่ายระบบเซลลูลาร์แต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกัน ซึ่งแต่ละเซลล์มีรัศมีกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับการออกแบบกำลังส่งสัญญาณที่ภาคส่งสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ ถ้ามีการใช้งานมากเซลล์จะมีการเพิ่มรัศมีของแต่ละเซลล์จะลดลง และถ้าการใช้โทรศัพท์เซลลูลาร์มีน้อยจำนวนเซลล์ลดลงมีรัศมีของแต่ละเซลล์ใหญ่ขึ้น มาตรฐานของรัศมีเซลล์ 250 เมตร ถึง 30 กิโลเมตร โดยให้ค่าความถี่ที่แตกต่างกันเพื่อป้องกันการแทรกสอดของสัญญาณที่มีพื้นที่ใกล้เคียงกัน

ซึ่งการสื่อสารของระบบเซลลูลาร์จะมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีการปรับปรุงความสามารถในการรองรับการสื่อสารข้อมูลที่มีปริมาณมากขึ้น ความรวดเร็วในการรับ และการส่งข้อมูลจากเครื่องใช้กับระบบเซลลูลาร์ได้มากยิ่งขึ้น รวมถึงความสามารถในการประหยัดพลังงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งทางส่วนของระบบส่ง และเครื่องรับในขณะเดียวกัน ดังสามารถแสดงเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ได้ดังตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** แสดงมาตรฐานต่างๆ ของระบบเซลลูลาร์ GSM850/900 และ LTE13

Band	Frecny (MHz)	Uplink (MHz) (Mobile to Base)	Downlink (MHz) (Base to Mobile)	Channel number	Equivalent LTE band
T-GSM-810	810	806.2 – 821.2	851.2 – 866.2	dynamic	27
GSM-850	850	824.2 – 848.8	869.2 – 893.8	128 – 251	5
P-GSM-900	900	890.0 – 915.0	935.0 – 960.0	1 – 124	N/A
E-GSM-900	900	880.0 – 915.0	925.0 – 960.0	975 – 1023 และ 0 - 124	8
R-GSM-900	900	876.0 – 915.0	921.0 – 960.0	955 – 1023 และ 0 - 124	N/A
T-GSM-900	900	870.4 – 876.0	915.4 – 921.0	dynamic	N/A
LTE-13	700	777.0 – 787.0	746.0 – 756.0	5 และ 10	N/A

ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอในส่วนของระบบ GSM850/900 และ LTE13 ซึ่งเป็นช่วงความถี่หลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### ระบบ GSM 850/900

GSM หรือ Global System for Mobile Communications นั้นถือเป็นมาตรฐานของเทคโนโลยีโทรศัพท์มือถือที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน รองรับผู้ใช้งานกว่า 2 พันล้านคนทั่วโลก คิดเป็น 84.2% ของมือถือทั่วโลก ทั้งนี้ผู้ใช้งานเมื่อเรียงตามจำนวนแล้วพบว่าในประเทศจีน มากกว่า 370 ล้านคน ประเทศรัสเซีย มากกว่า 145 ล้านคน ประเทศอินเดีย มากกว่า 83 ล้านคน และประเทศสหรัฐอเมริกา มากกว่า 78 ล้านคน GSM นั้นมีเทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับช่องสัญญาณควบคุมและสัญญาณเสียงแบบ Time-division multiple access (TDMA) จึงถือว่าเป็นโทรศัพท์มือถือในยุคที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

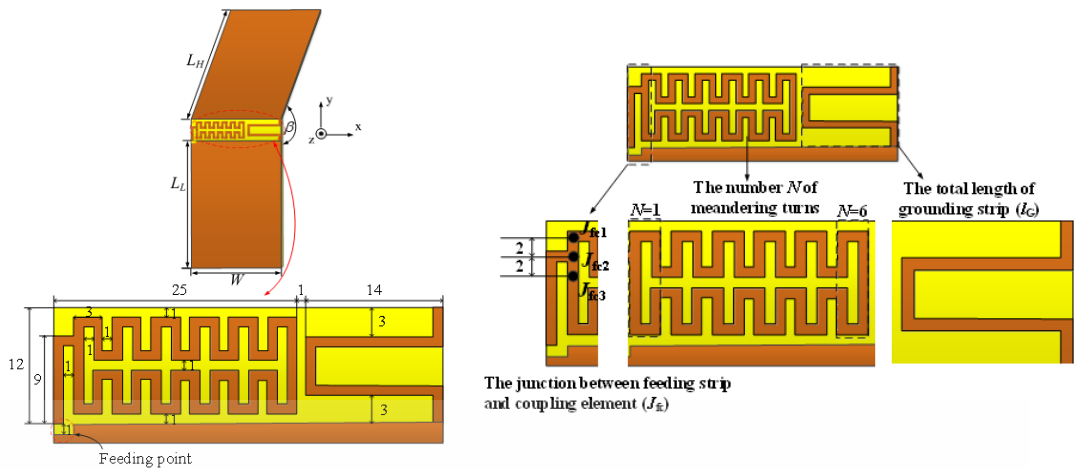
สอง หรือ 2G ซึ่งหมายถึง การพัฒนาระบบขึ้นไปอีกขั้นหนึ่ง ภายใต้การดูแลของ 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

### ระบบแอลทีอี (LTE - Long Term Evolution)

ระบบแอลทีอี (LTE - Long Term Evolution) คือโครงการระบบสื่อสารโทรศัพท์มือถือ โดยมีเป้าหมายให้มีความสามารถส่งผ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งด้านปริมาณและความเร็ว แอลทีอีเปิดตัว ในวันที่ 14 ธันวาคม 2552 โดยพัฒนาเพิ่มเติมจากระบบยูเอ็มทีเอส ของระบบ 3G โดยมีความสามารถดาวน์โหลดได้สูงถึง 100 Mbps ความเร็วอัปโหลด 50 Mbps และปิงต่ำกว่า 10 ms โดยมีแบนด์วิธอยู่ในช่วงระหว่างช่วง 1.4 MHz ถึง 20 MHz โดย LTE เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาทดลองใช้ในยุค 4G โดยเกิดจากความร่วมมือของ 3GPP โดยมีความสามารถในการส่งถ่ายข้อมูลและมัลติมีเดียในรูปแบบสตรีมมิ่งที่มีความเร็วอย่างน้อย 100 Mbps - 1 Gbps

#### 1.1.2 ความสำคัญของปัญหา

กิจการโทรศัพท์นั้นถือได้ว่าเป็นกิจการที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคมโดยรวมของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นสื่อที่มีอิทธิพลต่อประชาชนในหลายด้าน อาทิ ความคิด ความเชื่อ พฤติกรรม และ การใช้ชีวิต การเปลี่ยนไปสู่โทรศัพท์ระบบดิจิทัลจึงส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน จากความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านความเป็นอยู่ ความคิด ความเข้าใจต่อสังคมภายนอก และมีโอกาสที่จะเลือกในสิ่งที่ตรงกับความต้องการของตนเองมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันการสื่อสารในระบบโทรศัพท์ดิจิทัลได้กลายมาเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ชนิดพกพา โทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมไปถึงยานพาหนะเคลื่อนที่ สำหรับการใช้งานดังกล่าวจำเป็นต้องมีการพัฒนาสายอากาศเพื่อรับสัญญาณในระบบโทรศัพท์ดิจิทัลที่ดีพอ ไม่เพียงแต่ความต้องการสายอากาศที่มีขนาดเล็ก แต่ที่สำคัญสายอากาศจะต้องมีแบนด์วิธที่ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 510 MHz ถึง 790 MHz ของการสื่อสารในระบบโทรศัพท์ดิจิทัลด้วย ประเทศไทยได้นำมาตรฐาน DVB โดยใช้อย่านความถี่ตั้งแต่ 470 ถึง 862 MHz ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศรับสัญญาณโทรศัพท์ระบบดิจิทัลแบบพกพาที่ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว ดังแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของสายอากาศ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศเส้นทวนไดอิเล็กทริกแม่เหล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ

เพื่อลดขนาดของสายอากาศที่ใช้ในระบบ DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz)

เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานโทรศัพท์มือถือใช้บริการได้หลากหลายมากขึ้น

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สามารถลดขนาดของสายอากาศเพื่อให้สามารถติดตั้งบนโทรศัพท์มือถือแบบพับซึ่งมีพื้นที่จำกัดได้

สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัล DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz) ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานในประเทศไทยได้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ Magneto-dielectric มีคุณลักษณะประจำตัวเฉพาะโดดเด่นที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการลดขนาดของสายอากาศได้

ในปัจจุบันโทรศัพท์มือถือมีขนาดโดยรวมเล็กลงมาก และมีแนวโน้มที่โทรศัพท์มือถือแบบพับจะกลับมาได้รับความนิยมอีกครั้ง เนื่องจากมีเทคโนโลยีหน้าจอแบบงอได้ออกสู่ตลาด จึงทำให้สามารถใช้งานหน้าจอกว้างและขนาดกระทัดรัดเช่นเดิม

การทำความเข้าใจในหลักการและคุณสมบัติของการทวน

การทำความเข้าใจในหลักการและคุณสมบัติของโทรศัพท์แบบ Folder Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ใช้โปรแกรม CST® Microwave Studio เพื่อออกแบบและจำลองการทำงานของสายอากาศ วิเคราะห์ผลกระทบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศ และทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ

เปรียบเทียบค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและทดสอบต้องใกล้เคียงกัน

ศึกษาทฤษฎีการออกแบบ Integrated Antenna กับโทรศัพท์ Folder Type

ศึกษาทฤษฎีการลดขนาดสายอากาศกับโทรศัพท์มือถือ

ศึกษาทฤษฎีวัสดุฐานรองแบบ Dielectric แม่เหล็ก

ศึกษาทฤษฎีการออกแบบสายอากาศแบบระนาบ

ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของกับปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ศึกษาการประยุกต์ของสายอากาศ

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ศึกษาทฤษฎีและหลักการของโทรศัพท์ระบบดิจิตอล งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศ Integrate ชนิดพกพาและงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศรับสัญญาณ DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz)

ศึกษาทฤษฎีและหลักการของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกแม่เหล็กและงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศที่ใช้ Magneto-dielectric เป็นวัสดุฐานรอง

ศึกษาการออกแบบ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ และทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศ เริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO®[25] พร้อมทั้งศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่รองรับระบบ DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz) มีโพลาริซแบบวงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน

สรุปผลการสร้าง การทดสอบและวิจารณ์ผลสายอากาศ

สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งแนวทางการศึกษาสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

## 1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทดังนี้ บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของโทรทัศน์ระบบดิจิตอล DVB-H ระบบ LTE13 และ GSM850/900 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศ Integrate ชนิดพกพาและงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอล DVB-H ระบบ LTE13 และ GSM850/900

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศที่ใช้ Magneto-dielectric เป็นวัสดุฐานรอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ และทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศ เริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO®[25] พร้อมทั้งศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 470 ถึง 862 MHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน

บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้าง ทดสอบและวิจารณ์ผลสายอากาศ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งแนวทางการศึกษาสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการสื่อสารโทรทัศน์ระบบดิจิทัล DVB-H ระบบ LTE13 และ GSM850/900 โดยเริ่มจากความเป็นมา รูปแบบและแบนด์วิดท์ของโทรทัศน์ระบบดิจิทัลในประเทศไทย คุณสมบัติของเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล งานวิจัยที่มีมาก่อน สำหรับสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

### 2.2 ทฤษฎีและหลักการ

ปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้รับการพัฒนาในหลากหลายการใช้งาน ทั้งการพัฒนาด้านอุปกรณ์และด้านโปรแกรมรองรับการใช้งาน ทั้งนี้การพัฒนาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่อุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และพกพาสะดวก ดังนั้นการลดขนาดของอุปกรณ์เคลื่อนที่จึงเป็นปัจจัยสำคัญของการพัฒนาการอย่างยิ่ง ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อุปกรณ์ที่ออกสู่ตลาดในยุคหลังๆ นั้น จะมีความบาง เบา และราคาถูกลงเรื่อยๆ ส่งผลให้มีทางผู้จัดทำมีความสนใจในการลดขนาดของสายอากาศที่สามารถรองรับการใช้งานสำหรับ DVB-H ช่วงความถี่ 470-862 MHz และการใช้งานในระบบโทรศัพท์มือถือบ้านความถี่ LTE13 ช่วงความถี่ 746-787 MHz แลย่านความถี่ GSM850/900 ช่วงความถี่ 824-894 MHz และ 880-960 MHz ตามลำดับ ซึ่งมีความท้าทายอย่างมากในการออกแบบสายอากาศให้สามารถติดตั้งบนอุปกรณ์สื่อสารที่มีพื้นที่จำกัดให้ยังคงรองรับการใช้งานและคงประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีอยู่ ซึ่งส่วนที่ยากที่สุดคือการจัดวางองค์ประกอบของสายอากาศที่มีความถี่ต่ำ ในที่นี้จะเน้นช่วงความถี่ 470 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นเมื่อเทียบกับอากาศว่าง หรือ  $\lambda_0$  64 cm ซึ่งมีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับขนาดโดยรวมของอุปกรณ์ทั่วไปในปัจจุบัน

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบสายอากาศที่มีการลดขนาดของสายอากาศเป็นสำคัญ และน่าสนใจ โดยมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานกับโทรศัพท์มือถือ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ดังในเอกสารอ้างอิงที่ [1] ได้นำเสนอวิธีการลดขนาดสายอากาศโดยการปรับห้วงโลหะเพื่อทำให้เกิดการตอบสนองช่วงความถี่กว้างสำหรับการใช้งาน DVB-H ในขณะที่ห้วงโลหะจะประพฤติตัวเป็นตัวกั้นความถี่วิทยุที่มีความถี่สูงที่ระยะ  $\lambda_0/4$  จากจุดป้อนสัญญาณ ในเอกสาร [2] นำเสนอสายอากาศแบบ 4 พอร์ต โดยสามารถใช้งานได้ทั้งหมด 9 ช่วงความถี่สำหรับการใช้งานโทรศัพท์มือถือ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนของการติดตั้งสายอากาศกับโทรศัพท์มือถือ นั้น ยังคงต้องคำนึงถึงเรื่องของการแมทซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้วงจรแมทซ์เข้ามาช่วยในการออกแบบ แต่เนื่องจากการออกแบบที่ซับซ้อน และยังคงมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเอกสาร [3]-[5] สายอากาศใช้หลักการปรับความถี่ด้วยการป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไปที่แอคทีฟคอมโพเนนต์ ซึ่งสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้ทั้งหมดทุกย่านความถี่ ถึงกระนั้นการที่ต้องมีวงจรปรับค่าแรงดันกระแสตรงนั้นยังส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายต่ำอันเนื่องมาจากอัตราสูญเสียจากแอคทีฟคอมโพเนนต์นั่นเอง ในเอกสาร [6] นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศโดยการต่อขยายส่วนของเส้นป้อนสัญญาณบริเวณด้านบนของระนาบกราวด์ และปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในองค์ประกอบอื่น ๆ แต่ถึงกระนั้นสายอากาศก็รองรับการใช้งานได้เพียง DVB-H เท่านั้น จาก [7] สายอากาศสำหรับ DVB-H ได้ใช้วิธีการส่งผ่านพลังงานด้วยการเหนี่ยวนำสัญญาณด้วยองค์ประกอบแบบพบบนรูปแบบของโทรศัพท์แบบพับ ซึ่งสายอากาศนั้นใช้แกนกลางของโทรศัพท์มือถือเป็นจุดหมุน โดยใช้วัสดุฐานรองเป็นเฟอร์ไรท์เพียงเท่านั้น ก็เพียงพอที่จะทำให้สามารถใช้งานในย่านความถี่ DVB-H (468–719 MHz) ได้อย่างครอบคลุม จาก [8] สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่กว้างอย่างมาก คือรองรับการใช้งานในระบบ LTE 13 (746–787 MHz) รวมทั้งระบบ GSM850 (824–894 MHz) และระบบ GSM900 (880–960 MHz) แต่อย่างไรก็ดีสายอากาศเองยังไม่สามารถใช้งานได้ในระบบ DVB-H (470 MHz) โดยในทางทฤษฎีนั้นสายอากาศควรที่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยถึงน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่  $|S_{11}| < -10$  dB นั้นเป็นสิ่งที่ยาก สำหรับสายอากาศขนาดเล็ก จาก [9] เมื่ออ้างอิงสายอากาศที่ได้ทำการศึกษามาก่อนแล้วนั้น ส่วนใหญ่จะยอมรับการพิจารณาค่า  $|S_{11}| < -4.5$  dB และจาก [1] [3]-[4] [7]-[10] โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์เคลื่อนที่และโทรศัพท์มือถือที่มีขนาดเล็กนั้นยอมรับค่า  $|S_{11}| < -6$  dB และจาก [10] ทางผู้แต่งได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบเส้นทวนสำหรับใช้งานระบบสื่อสารไร้สายหลายย่านความถี่โดยใช้เส้นสตริปปรินต์และเส้นป้อนสัญญาณข้างเคียงสามารถรองรับการใช้งานที่ย่านความถี่กว้างมากถึง 101.7% จาก 440 MHz ถึง 1350 MHz เมื่อพิจารณาที่ค่า  $|S_{11}| < -3$  dB ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ได้อย่างครบถ้วน แต่ถึงอย่างไรก็ตามขนาดทางกายภาพของสายอากาศก็ยังคงมีขนาดใหญ่ (65 mm × 44 mm) ซึ่งไม่รองรับการติดตั้งในอุปกรณ์เคลื่อนที่ขนาดเล็ก

ในกรณีที่ต้องการคงค่าความสามารถในการรองรับการใช้งานในย่านความถี่กว้างในขณะที่มีขนาดเล็ก กระทั่งรัด เพราะฉะนั้นการลดขนาดสายอากาศจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาขีดความสามารถของการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ขนาดเล็ก จากการศึกษา งานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านั้นพบว่า การนำวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กมาใช้งานอ้างอิงจาก [11]–[18] ดังจะเห็นได้ว่าจะสามารถลดขนาดโดยรวมของสายอากาศได้ดีในขณะที่สามารถรองรับการใช้งานที่ย่านความถี่กว้างโดยใช้การควบคุมค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าสภาพยอมแม่เหล็ก จาก [11] ค่าความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$BW = \frac{96\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \times \frac{t}{\lambda_0}}{\sqrt{2(4+17\sqrt{\mu\epsilon})}} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 1.1 ค่าตัวแปรที่มีผลกระทบกับการลดขนาดของสายอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแฟคเตอร์หลักคือ  $\epsilon$  และ  $\mu$  ซึ่งเป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าและค่าสภาพความยอมแม่เหล็กของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก ทำให้ได้สมการของค่าความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ดังสมการที่ (2.2)

$$\lambda_{\text{resonant}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่นที่อากาศว่าง โดยค่าย่านความถี่อิมพีแดนซ์แบนด์วิธสามารถคำนวณได้จากค่าแฟคเตอร์ดังสมการที่ (2.3)

$$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, (\mu > \epsilon) \quad (2.3)$$

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการนำเสนอการลดขนาดสายอากาศโดยใช้เส้นทวนกับวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก สำหรับโทรศัพท์มือถือแบบพับ โดยการใช้วัสดุ MD-laden MLA สามารถลดขนาดโดยรวมของสายอากาศทางกายภาพได้อย่างดี โดยมีขนาดทางกายภาพโดยรวมที่  $10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  และมีขนาดทางไฟฟ้าที่  $0.015\lambda \times 0.039\lambda \times 0.0015\lambda$  ที่ความถี่ 470 MHz และสายอากาศสามารถรองรับการใช้งานที่  $|S_{11}| < -6 \text{ dB}$  ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 467-1012 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมในการใช้งานทั้งช่วงความถี่ระบบ DVB-H (470-960 MHz) ด้วยค่าประสิทธิภาพการแผ่พลังงานเท่ากับ 90% รวมทั้งยังสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ LTE13/GSM850/900 ได้อีกด้วย

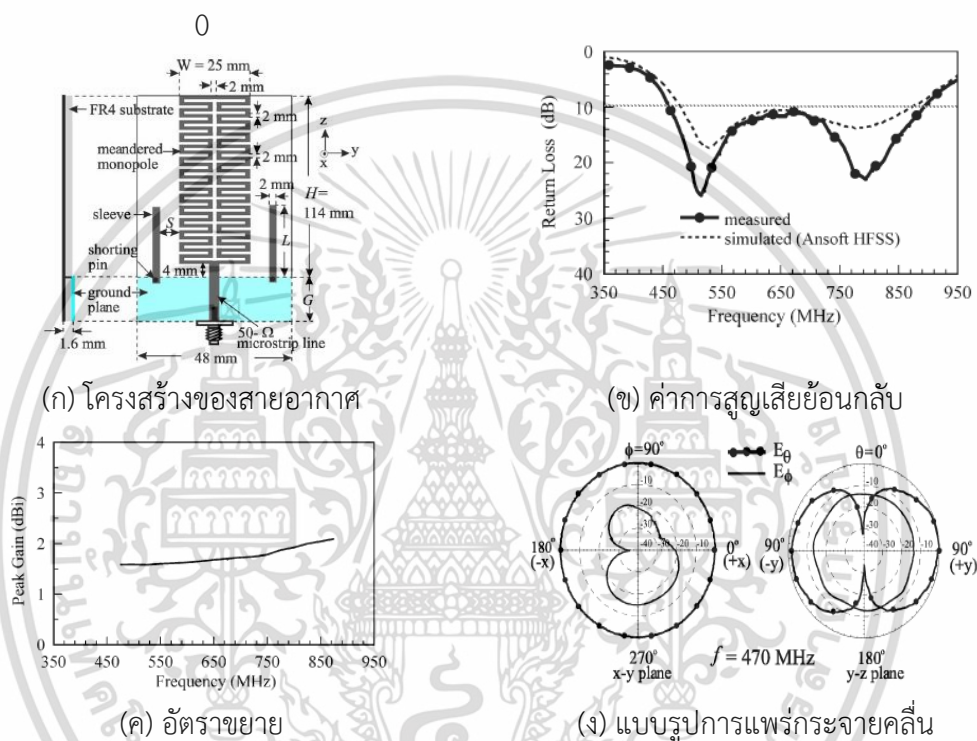
### 2.3 การศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน

หัวข้อนี้จะเป็นการศึกษางานวิจัยสายอากาศสำหรับโทรศัพท์ระบบดิจิทัล DVB-H (470-960 MHz) และระบบโทรศัพท์มือถือ LTE13/GSM850/900 รูปแบบต่าง ๆ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมุ่งเน้นที่สายอากาศภาครับที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว เพื่อพัฒนาให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์สายอากาศมือถือ โดยนำเอาโครงสร้างของสายอากาศที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ รวมถึงทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

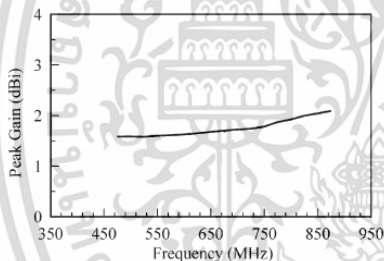
### 2.3.1 งานวิจัยสายอากาศโทรทัศนระบบดิจิทัลที่มีมาก่อน

งานวิจัยอ้างอิงที่ [5] เป็นผลงานของ H.-D. Chen และคณะ ได้รับการตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2008 ดังรูปที่ 2.1(ก) สายอากาศมีขนาดทางกายภาพ 114 mm × 25 mm × 3 mm รองรับการใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 459 MHz ถึง 891 MHz ส่วนของผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของค่า  $|S_{11}|$  ได้แสดงดังรูปที่ 2.1(ข) มีอัตราขยายสูงสุดที่ 2.1 dBi โดยประมาณตามรูปที่ 2.1(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัวที่มีโพลาริไซในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.1(ง)

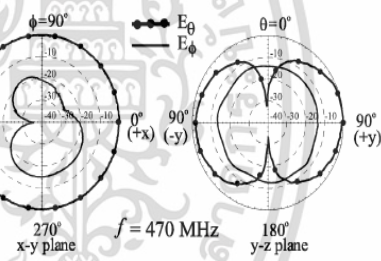


(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



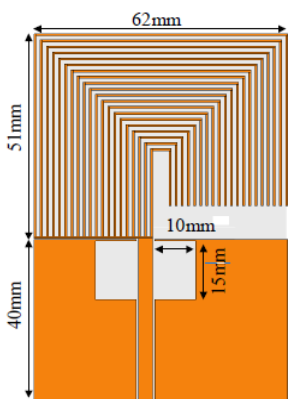
(ค) อัตราขยาย



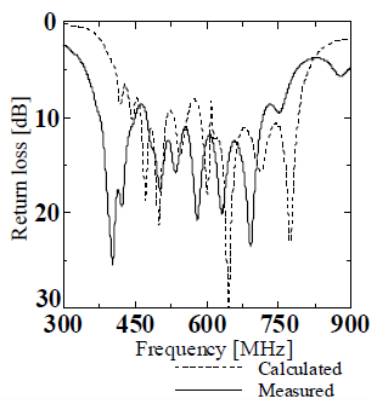
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.1 สายอากาศโมโนโพลไมโครสติปพร้อมระนาบกราวด์สำหรับประยุกต์ใช้งานโทรทัศนดิจิทัล [5]

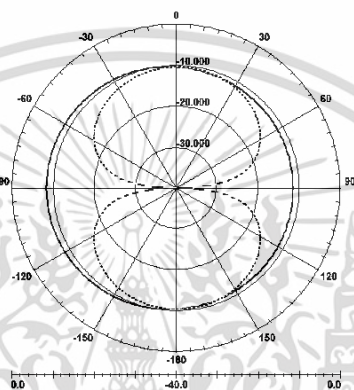
งานวิจัยอ้างอิงที่ [6] เป็นผลงานของ S. Kashihara และคณะ ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2009 ดังรูปที่ 2.2 (ก) สายอามีขนาดทางกายภาพ 91 mm × 62 mm × 1.6 mm ใช้งานที่ย่านความถี่ที่ตั้งแต่ 440 MHz ถึง 770 MHz ให้ผลการจำลองและผลการทดสอบของค่า  $|S_{11}|$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 (ข) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังรูปที่ 2.2 (ค)



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



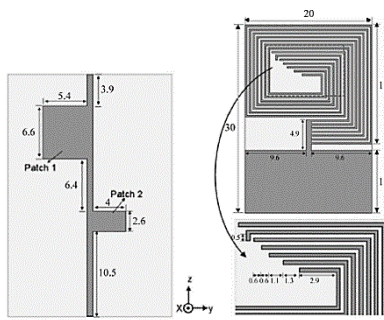
(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



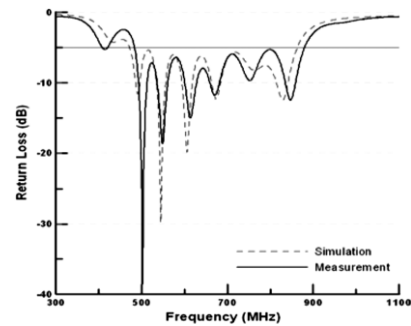
(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.2 สายอากาศโมโนโพลรูปอักษรตัวเจสำหรับโทรศัพท์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟ [6]

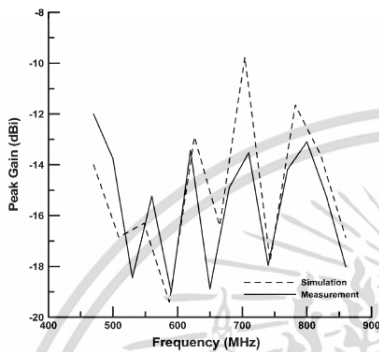
งานวิจัยอ้างอิงที่ [7] ซึ่งเป็นผลงานของ D-B. Lin และคณะ ในปี ค.ศ. 2010 โดยแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 2.3 (ก) มีขนาดทางกายภาพ 30 mm x 20 mm x 0.4 mm ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz ให้ผลการจำลองและผลการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 (ข) มีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ -12 dBi ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ในระนาบ xy xz และ yz ดังรูปที่ 2.3 (ง)



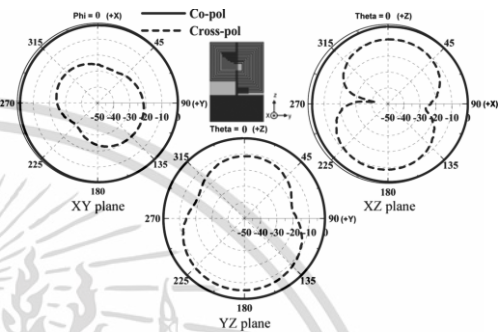
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ค) อัตราขยาย

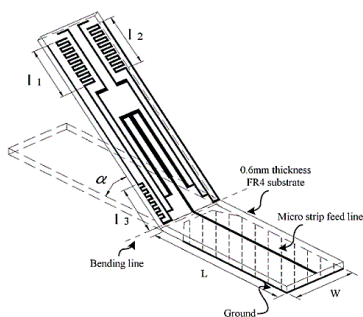


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

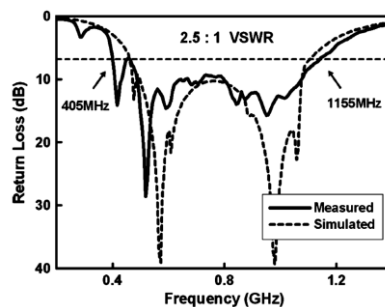
### รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบเกลียว สำหรับรับสัญญาณโทรศัพท์ระบบดิจิทัล [7]

งานวิจัยอ้างอิงที่ [8] ของ C-K. Hsu และคณะ ในปี ค.ศ. 2010 โดยสายอากาศถูกแสดงได้ดังรูปที่ 2.4(ก) มีขนาดทางกายภาพ 165 mm × 60 mm × 20 mm ตอบสนองย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470-860 MHz สำหรับรับสัญญาณระบบดิจิทัลทีวี และที่ความถี่ 860-1142 MHz สำหรับสื่อสารระบบ GSM โดยแสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.4(ข) มีอัตราขยายสูงสุดที่ 2.35 dBi และ 2.25 dBi ตามรูปที่ 2.4(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังรูปที่ 2.4(ง)

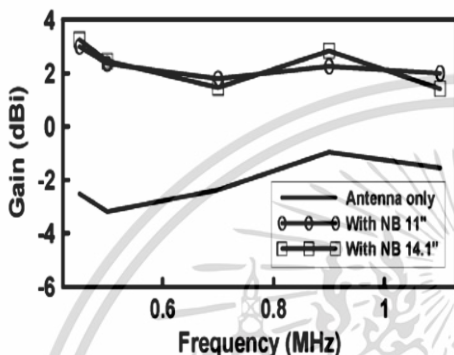
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



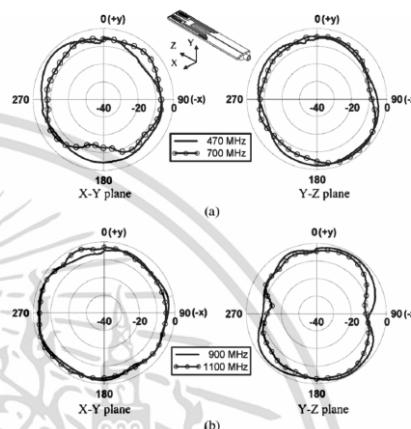
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



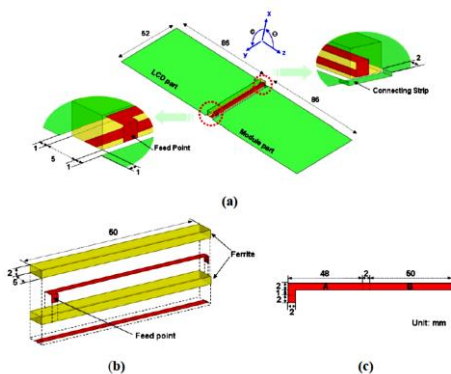
(ค) อัตราขยายสายอากาศ



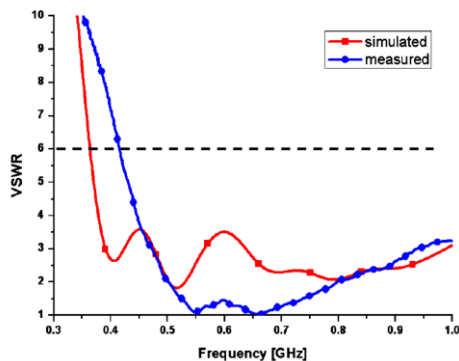
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบโมโนโพลรูปร่างข้อสัมผัสสำหรับประยุกต์ใช้งานแบบยูเอสบีสำหรับ  
รับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [8]

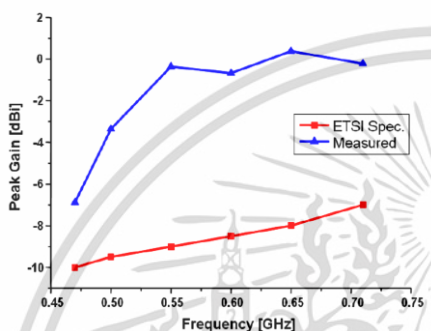
งานวิจัยอ้างอิงที่ [9] ของ Chang-Hyun Park และคณะ ในปี ค.ศ. 2008 มีโครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นพับดังรูปที่ 2.5(ก) มีขนาดทางกายภาพ 50 mm × 5 mm × 2 mm ใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 470-710 MHz โดยผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.5(ข) มีอัตราขยายสูงสุด 0.38 dBi โดยประมาณตามรูปที่ 2.5(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง แสดงดังรูปที่ 2.5(ง)



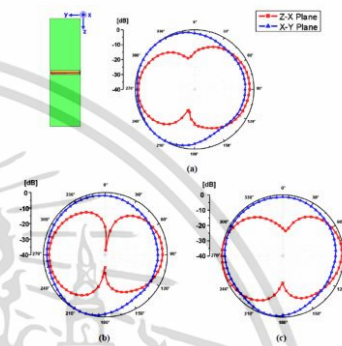
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) VSWR



(ค) อัตราขยายสูงสุด

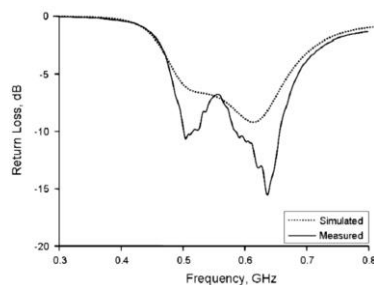
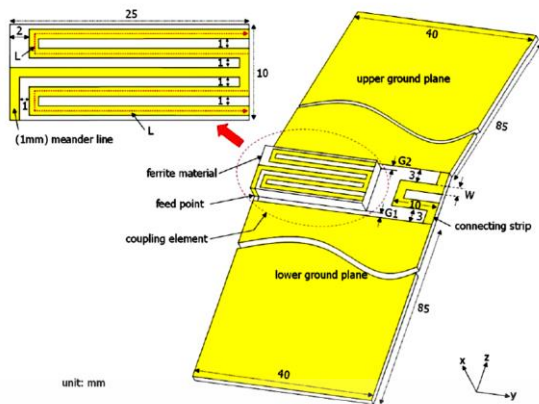


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.5 สายอากาศสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้วัสดุฐานรองเป็นเฟอร์ไรท์สำหรับรับสัญญาณโทรศัพท์ระบบดิจิทัล [9]

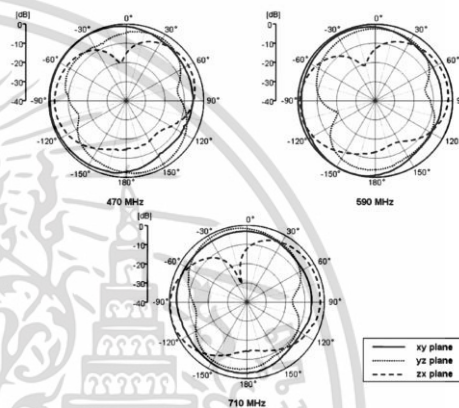
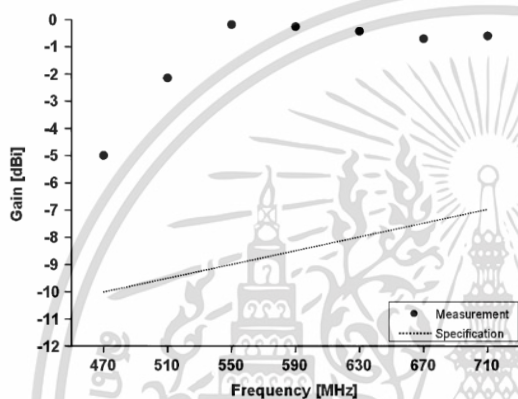
งานวิจัยอ้างอิงที่ [10] ของ H. Rhyu และคณะ ในปี ค.ศ. 2009 มีโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) มีขนาดทางกายภาพ 50 mm × 5 mm × 2 mm สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 468-719 MHz ดังรูปที่ 2.6(ข) ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.6(ค) มีอัตราขยายสูงสุด -7 dBi ตามรูปที่ 2.6(ง) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง แสดงดังรูปที่ 2.17(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



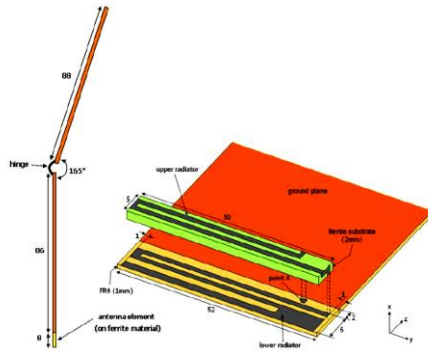
(ค) อัตราขยาย

(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

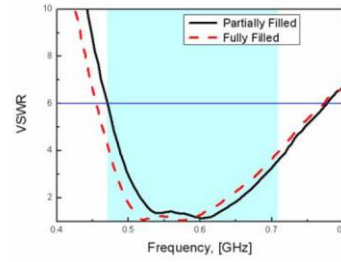
รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบแผ่นพับและใช้การคลັบลิ่งโดยใช้เฟอร์ไรท์ สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [10]

งานวิจัยอ้างอิงที่ [11] ของ Byeongkwan Kim และคณะ ในปี ค.ศ. 2009 โดยแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 2.7(ก) มีขนาดทางกายภาพ 50 mm × 8 mm × 2 mm สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 470-710 MHz โดยผลเปรียบเทียบกับระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.7(ข) มีอัตราขยายสูงสุด -7 dBi ตามรูปที่ 2.7(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ตามรูปที่ 2.7(ง)

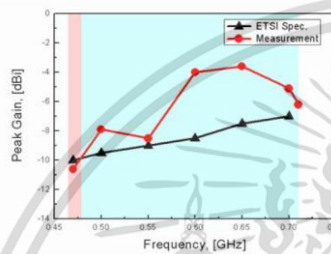
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



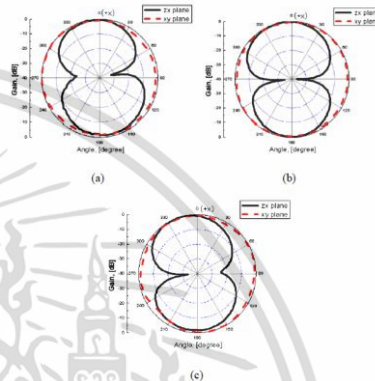
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ค) อัตราขยาย

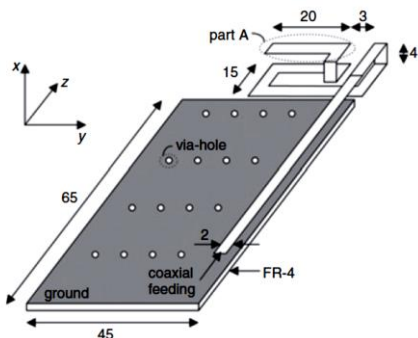


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

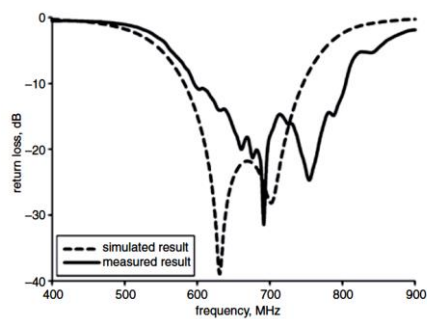
รูปที่ 2.7 สายอากาศขนาดเล็กใช้วัสดุเฟอร์ไรท์สำหรับรับสัญญาณโทรศัพท์ระบบดิจิทัลในโทรศัพท์เคลื่อนที่ [11]

งานวิจัยอ้างอิงที่ [12] ซึ่งเป็นผลงานของ D.H. Choi และคณะ ในปี ค.ศ. 2006 โดยมีโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.8(ก) มีขนาดทางกายภาพ 25 mm × 15 mm × 4 mm ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470-702 MHz ให้ผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของค่า  $|S_{11}|$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8(ข) มีอัตราขยาย สูงสุด -3 dBi แสดงดังรูปที่ 2.8(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบ xy xz และ yz ดังรูปที่ 2.8(ง)

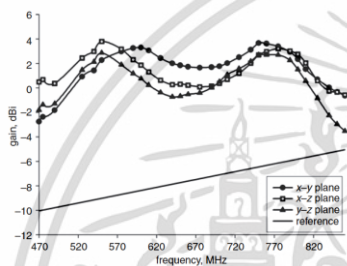
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



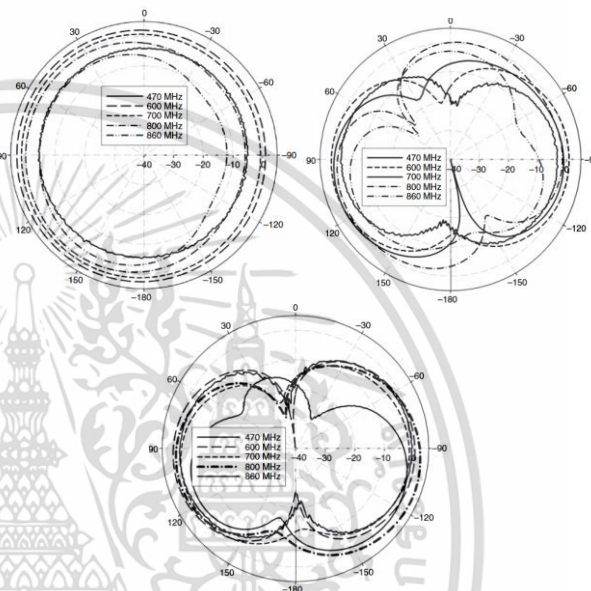
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ค) อัตราขยาย

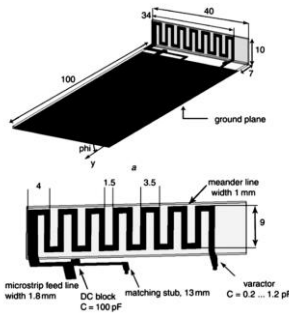


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

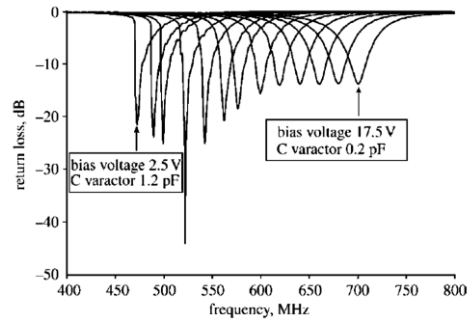
รูปที่ 2.8 สายอากาศแบบโนโพลสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [12]

งานวิจัยอ้างอิงที่ [13] ของ M. Komulainen และคณะ ในปี ค.ศ. 2007 โดยสายอากาศลูก แสดงดังรูปที่ 2.9(ก) มีขนาดทางกายภาพ 34 mm × 0.8 mm × 10 mm ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470 MHz ถึง 702 MHz ให้ผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของค่า  $|S_{11}|$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9(ข) มีอัตราขยายสูงสุด -8.5 dBi ที่ความถี่ 470 MHz และ 0.5 dBi ความถี่ 702 MHz แสดงดังรูปที่ 2.9(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ในระนาบ xy xz ดังรูปที่ 2.9(ง)

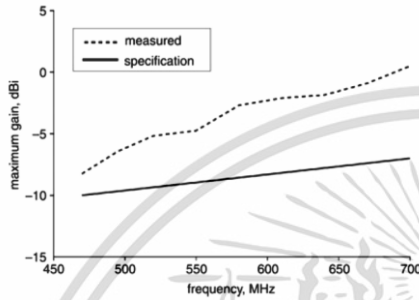
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



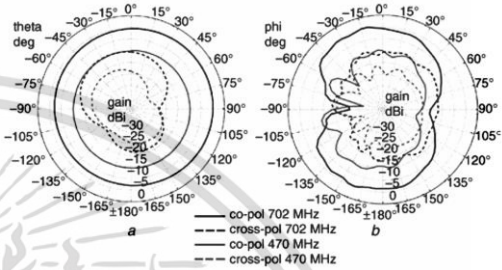
(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ค) อัตราขยาย



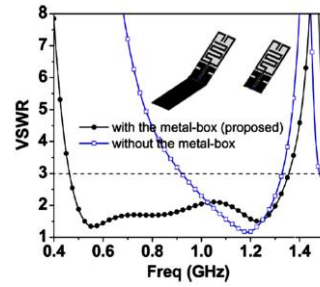
(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.9 สายอากาศแบบโมโนโพลโดยใช้วารีเตอร์และการชดววงวนสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล [13]

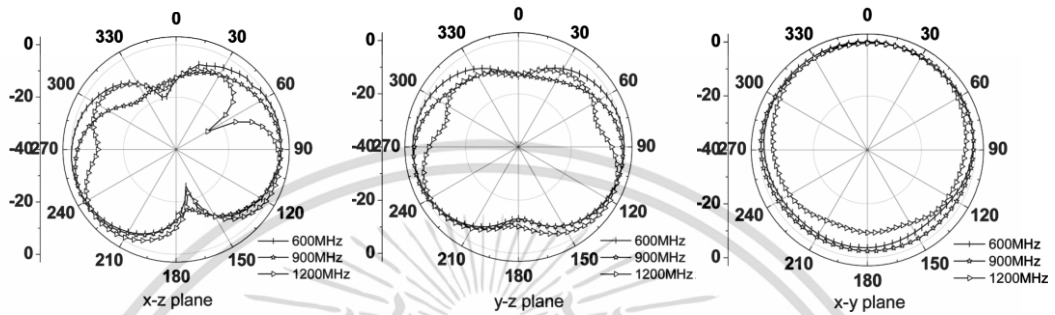
งานวิจัยอ้างอิงที่ [14] ของ Shao-Li Zuo และคณะ ในปี ค.ศ. 2013 โดยแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 2.10(ก) สายอากาศดังกล่าวมีขนาดทางกายภาพ 100 mm × 44 mm มีย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470 MHz ถึง 860 MHz สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล 746 MHz ถึง 787 MHz ความถี่ 824-894/890-960 MHz สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ให้ผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของค่า  $|S_{11}|$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.10(ข) มีอัตราขยายสูงสุด 2.1 ถึง 2.8 dBi ที่ความถี่ 470 MHz และ 0.5 dBi ที่ความถี่ 702 MHz แสดงดังรูปที่ 2.10(ค) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ในระนาบ xy xz และ yz ดังรูปที่ 2.10(ง)



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



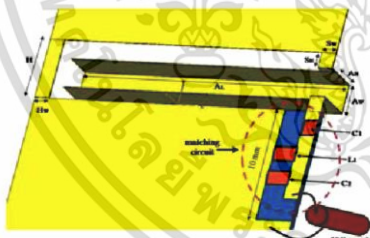
(ข) VSWR



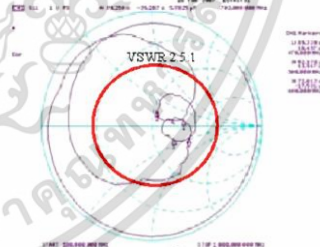
(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.10 สายอากาศแบบขดควมโนโนโพลกับพาราซิติคสตริปสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ [14]

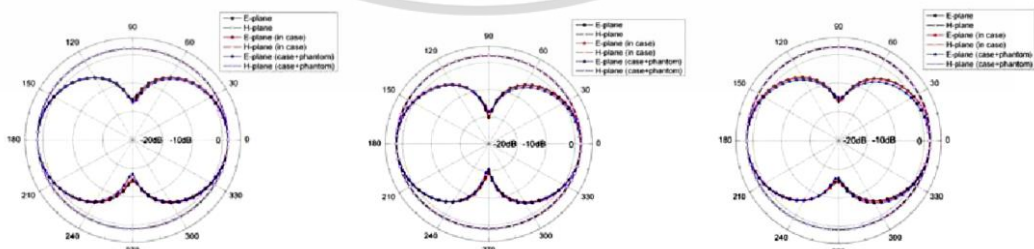
งานวิจัยอ้างอิงที่ [15] ของ Jung-Nam Lee และคณะ ในปี ค.ศ. 2007 แสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 2.11(ก) มีขนาดทางกายภาพ 100 mm x 44 mm ย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 470-702 MHz ผลโดยใช้วงจรแมตซิงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.11(ข) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังรูปที่ 2.11(ค)



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ผลของการวัดและวงจรมแมตซิง



(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.11 สายอากาศโทรทัศนระบบดิจิตอลโดยใช้วงจรแมตซิง [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศโทรทัศนระบบดิจิทัลของผลงานวิจัยที่มีมาก่อน

ผลงานวิจัย ที่มีมาก่อน	ขนาดของ สายอากาศ (mm)	ช่วงความถี่ใช้งาน (MHz)	แบบรูปการ แพร่กระจาย คลื่น	อัตรา ขยาย (dBi)
[5]	114 × 25 × 3	459 ถึง 891	รอบทิศทาง	1.5 ถึง 2.1
[6]	91 × 62 × 1.6	440 ถึง 770	รอบทิศทาง	-
[7]	30 × 20 × 0.4	470 ถึง 862	รอบทิศทาง	-12
[8]	165 × 60 × 20	470 ถึง 860	รอบทิศทาง	2.35
[9]	50 × 5 × 2	470 ถึง 710	รอบทิศทาง	-6.9 ถึง 0.38
[10]	50 × 5 × 2	468 ถึง 719	รอบทิศทาง	-10 ถึง -7
[11]	50 × 8 × 2	470 ถึง 710	รอบทิศทาง	-10 ถึง -7
[12]	25 × 15 × 4	470 ถึง 702	รอบทิศทาง	-3
[13]	34 × 0.8 × 10	470 ถึง 702	รอบทิศทาง	-8.5 ถึง 0.5
[14]	100 × 44	470 ถึง 860	รอบทิศทาง	2.1 ถึง 2.8

เมื่ออ้างอิงการศึกษางานวิจัยสายอากาศโทรทัศนระบบดิจิทัล [5]-[14] พบว่าเป็นการออกแบบสายอากาศรอบทิศทางที่ ซึ่งสายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมความถี่ใช้งานตามระบบ DVB-T2 และเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก มีแบนด์วิดท์กว้าง และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง โดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ อาทิเช่น การขบวนการ การเพิ่มวงจรแมตซิ่ง ในการออกแบบสายอากาศข้างต้น

## 2.4 สรุป

บทนี้ได้เสนอทฤษฎีและหลักการของระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 โดยเริ่มจากประวัติความเป็นมา ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้ออกอากาศโทรทัศนระบบดิจิทัลแล้ว ซึ่งได้รับความสนใจจากประชาชน รวมไปถึงผู้ประกอบการทางด้านกิจการโทรทัศน การออกแบบสายอากาศที่ใช้ทำงานกับระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ตั้งแต่ 467-1012 MHz โดยวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศแบบพกพาที่มีแบนด์วิดท์กว้าง ขนาดเล็ก ครอบคลุมความถี่ใช้งาน

## บทที่ 3

# การประยุกต์วัสดุแม่เหล็กกับสายอากาศ

### 3.1 บทนำ

ในปัจจุบันการใช้บริการสัญญาณโทรศัพท์ในระบบดิจิทัล เป็นที่สนใจใช้งานในอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา โทรศัพท์มือถือ และยานพาหนะทั่วไป ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีสายอากาศขนาดเล็ก และเป็นประเด็นที่ต้องวิจัยหาวิธีในการลดขนาดของสายอากาศให้มีประสิทธิภาพ และต้องคงความสามารถในการแพร่กระจายคลื่น และค่าสูญเสียของวัสดุ ได้แก่ ไดอิเล็กทริกแม่เหล็ก (Magneto-Dielectric) ไดอิเล็กทริก (Dielectric) เรโซเนเตอร์แบบแยกวงแหวน (Split ring resonators) และอภิวัด (Metamaterial) เป็นต้น [16]

### 3.2 วัสดุฐานรองแม่เหล็ก (MD)

โครงสร้างวัสดุ MD เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ได้จากคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโพลการตอบสนองจะถูกควบคุมโดยการดูดซึมสัมพัทธ์ที่สัมพันธ์กับความถี่และความสามารถในการซึมผ่านของวัสดุ ทั้งสภาพความยอมไฟฟ้า และสภาพความยอมแม่เหล็ก [19-24] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.1)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (3.2)$$

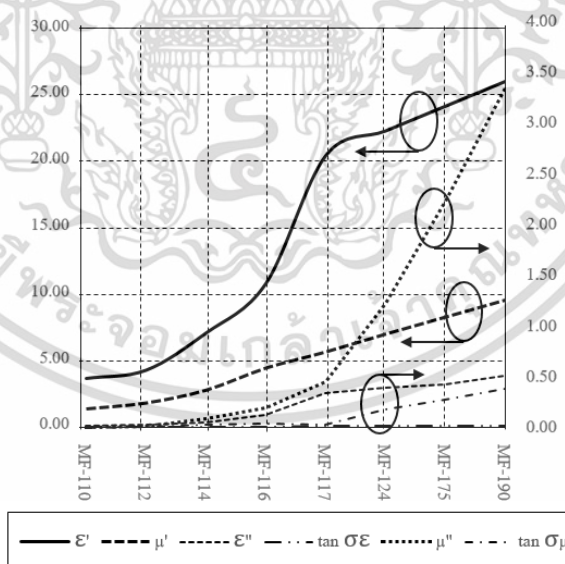
โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วัสดุฐานรอง Eccosorb MF-124 เป็นวัสดุ MD ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้แสดงค่าคุณลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุฐานรองที่ใช้ คือค่าสภาพยอมไฟฟ้า และสภาพยอมแม่เหล็ก ทั้งส่วนของค่าจริงและค่าจินตภาพ จากโปรแกรม CST Microwave Studio Suite [25] โดยวัสดุฐานรองชนิด Eccosorb MF-124 ได้ถูกกำหนดไว้แล้วในไลบรารีกลางของโปรแกรม [25] ซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ ( $\mu_r$ ) เท่ากับ  $22.25 - j0.4$  และ  $7.05 - j1.24$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็กต่างชนิดกันสามารถเปรียบเทียบค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์จากวัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็กยี่ห้อ Eccosorb รุ่น MF-110 MF-112 MF-114 MF-116 MF-117 MF-124 MF-175 และ MF-190 อ้างอิงสมการที่ 3.1-3.2 สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะได้ดังตารางที่ 3.1

จากค่าคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก ในตารางที่ 3.1 สามารถคำนวณหาแบนด์วิธเพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.1

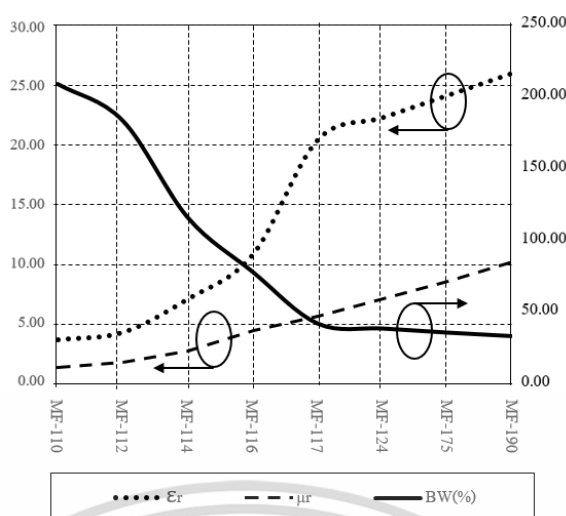
ตารางที่ 3.1 ตารางคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่างๆ

วัสดุ ไดอิเล็ก ตริก แม่เหล็ก	คุณลักษณะ								
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \sigma_\epsilon$	$\mu'$	$\mu''$	$\tan \sigma_\mu$	$\epsilon_r$	$\mu_r$	BW (%)
MF-110	3.71	0.02	0.01	1.41	0.00	0.00	3.71	1.41	92.74
MF-112	4.33	0.03	0.01	1.86	0.02	0.01	4.33	1.86	98.58
MF-114	7.11	0.06	0.01	2.82	0.09	0.03	7.11	2.82	94.76
MF-116	10.82	0.13	0.01	4.49	0.19	0.05	10.82	4.49	96.91
MF-117	20.40	0.35	0.02	5.70	0.46	0.03	20.40	5.72	79.66
MF-124	22.25	0.40	0.02	7.05	1.24	0.18	22.25	7.16	85.30
MF-175	24.10	0.43	0.02	8.33	2.27	0.28	24.11	8.63	90.01
MF-190	25.96	0.52	0.02	9.61	3.40	0.39	25.96	10.20	94.26



(ก) เปรียบเทียบคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

รูปที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ



(ข) เปรียบเทียบคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ (เพิ่มเติม)

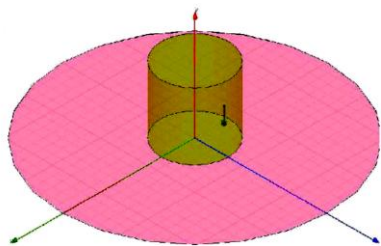
รูปที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

### 3.3 การศึกษาวิธีในการลดขนาดของสายอากาศ

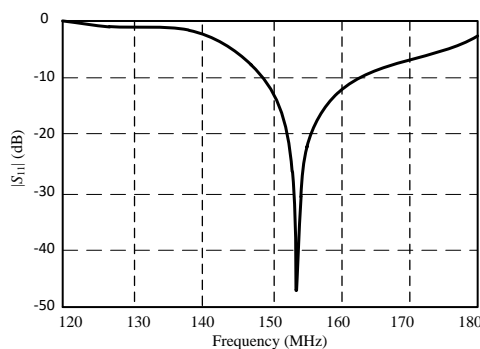
งานวิจัยอ้างอิงของ R. Hansen และ M. Burke [16] ทำการศึกษาสมรรถนะของสายอากาศเรื่องลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ประสิทธิภาพ อัตราขยาย และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศขนาดเล็ก โดยใช้ไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก (Magneto-Dielectric) ไดอิเล็กตริก (Dielectric) อภิวัตต์ (Metamaterial) และ เรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (CSSR) การศึกษาทั้งขนาดทางกายภาพ ขนาดทางไฟฟ้า และความถี่ นั้นมีวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ คือ การใช้ไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพความยอมทางไฟฟ้าสูง (high permittivity :  $\epsilon$ ) เพื่อลดความยาวของท่อนำคลื่นและขนาดโดยรวมของสายอากาศ แต่วิธีนี้มีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดข้อเสียตามมาคือทำให้ขนาดแบนด์วิดธ์ของสายอากาศลดลง จึงมีการนำไดอิเล็กตริกแม่เหล็กซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็กประดิษฐ์หรืออภิวัตต์ เช่น เรโซเนเตอร์แบบวงแหวนแยก (Split ring resonators : SSRs) นำมาเพื่อลดขนาดของสายอากาศและการปรับปรุงคุณภาพของแบนด์วิดธ์

สายอากาศแบบไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ถูกพบสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสายอากาศซึ่งข้อดีของสายอากาศแบบนี้ คือขนาดเล็ก โครงสร้างง่าย และมีความยืดหยุ่นของตำแหน่งจุดกระตุ้นสัญญาณสายอากาศดังกล่าวทำจากวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าความสูญเสียต่ำพบว่ามีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นสูง และมีแบนด์วิดธ์ที่กว้าง ก่อนหน้านี้เชื่อว่าสายอากาศแบบไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นและขนาดแบนด์วิดธ์มีขนาดเล็กบางโหมดระบุถึงค่า Q-factor มีค่าต่ำแสดงให้เห็นถึงความกว้างของแบนด์วิดธ์ดังรูปที่ 3.2 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r = 10$  และ  $\mu_r = 1$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 3.2 มีขนาดของสายอากาศไดอิเล็กตริกทรงกระบอกรัศมี 216 mm และความสูง 433 mm และมีรัศมีของระนาบกราวด์ 846 mm จากการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกขณะที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุดมีค่าคงที่ทำให้สามารถลดขนาดของสายอากาศได้ อย่างไรก็ตามสมรรถนะแบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศจะลดลงนั่นหมายถึงค่า Q-Factor ของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นดังตาราง 3.1 พบว่าเมื่อ  $\epsilon$  มีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าซึมซับทางแม่เหล็กและระนาบกราวด์มีค่าคงที่ ทำให้ค่า Q-Factor มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้แบนด์วิดท์และอัตราขยายของสายอากาศลดลง ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณา  $\epsilon = 10$  พบว่าค่า Q-factor มีค่าต่ำทำให้ค่าแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสายอากาศไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์กับความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (แทนเจนต์การสูญเสีย  $\tan \delta = 0.001$ )

Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ )	Freq. (MHz)	Antenna Radius (mm)	Q-Factor	Fractal Bandwidth (%)	Directivity (dB)	Gain (dB)	Eff. (%)
10	156.48	950.37	1.6	15.66	7.27	7.53	100
30	157.08	561.73	6.5	3.82	6.13	6.18	100
100	160.97	312.17	40.3	0.62	4.27	3.82	90.10
300	159.77	186.04	208.3	0.02	2.79	-0.41	47.79
1000	159.77	102.86	1,250	-	2.43	-7.10	11.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 สายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก (Magneto-Dielectric loaded antennas)

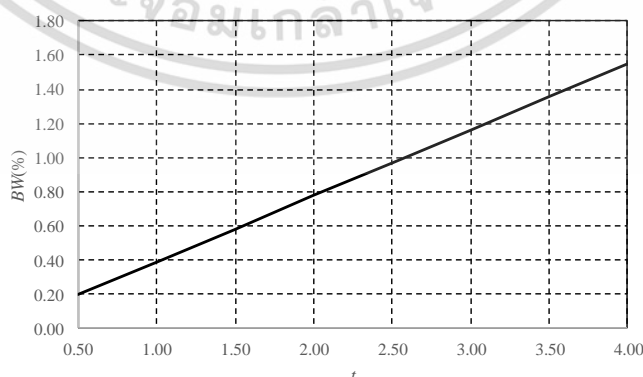
งานวิจัยของ Hansen and Burke [16] แสดงความสัมพันธ์ความกว้างของแบนด์วิธของสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองกับความหนาวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก โดยประมาณ ดังนี้

$$BW = \frac{96 \sqrt{\frac{\mu_r t}{\epsilon_r \lambda_0}}}{\sqrt{2} [4 + 17 \sqrt{\mu_r \epsilon_r}]} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 นั้นได้นำเสนอการใช้ค่าแฟคเตอร์การลดขนาดของสายอากาศคือ  $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$  ซึ่งส่งผลให้ค่าแบนด์วิธของสายอากาศโดยการเพิ่มค่า  $\mu_r / \epsilon_r$  เมื่อ  $\mu_r > \epsilon_r$  ตัวอย่างเช่นการใช้งานวัสดุฐานรองโดยใช้วัสดุ Z-type hexaferrite ซึ่งให้ค่า  $\mu_r = \epsilon_r = 16$  จะสามารถสร้างสายอากาศที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ประมาณ  $\lambda_0 / 32$  ที่แบนด์วิธที่สมเหตุสมผล (จะมีขนาดใหญ่กว่ามากเมื่อเทียบกับการออกแบบสายอากาศโดยใช้  $\epsilon_r = 256$  และแบนด์วิธจะสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเมื่อ  $\mu_r$  และ  $\epsilon_r$  ที่น้อยกว่า 16

ทั้งนี้ปัจจัยที่ทำให้อากาศมีขนาดแบนด์วิธที่กว้างขึ้นสามารถเพิ่มค่าให้  $\mu_r$  มากขึ้นในกรณีนี้ใช้คุณสมบัติของรีโซแนนต์เชิงความจุของสายอากาศลดลง คือการเพิ่มวัสดุแม่เหล็กและหนึ่งคือสามารถเลือกค่ากลางของค่ายินยอมทางไฟฟ้าสูง และวัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก สามารถลดขนาดของสายอากาศโดยใช้ค่าสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าสภาพความยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์

โดยเมื่อทำการคำนวณค่าแบนด์วิธจากสมการที่ 3.3 โดยการปรับความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กและคงที่ค่าของ  $\epsilon_r = 22.25$  และ  $\mu_r = 7.16$  จะได้ค่าแบนด์วิธของสายอากาศดังรูปที่ 3.3

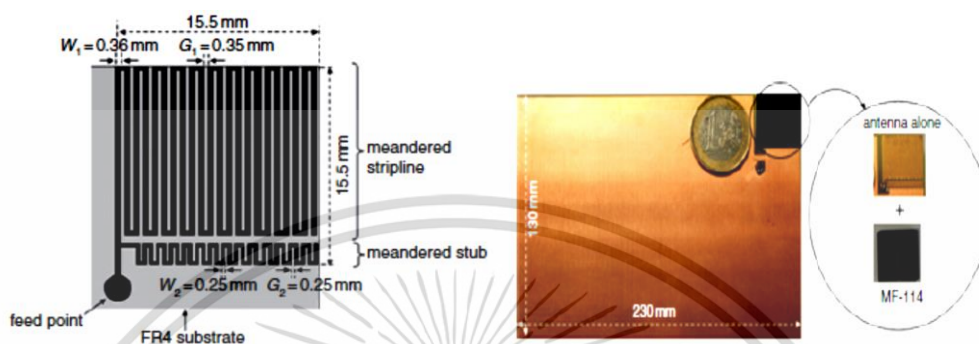


รูปที่ 3.3 แบนด์วิธของสายอากาศเมื่อทำการปรับความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก

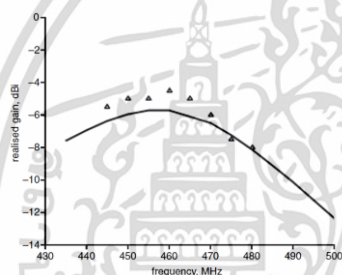
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 งานวิจัยสายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก

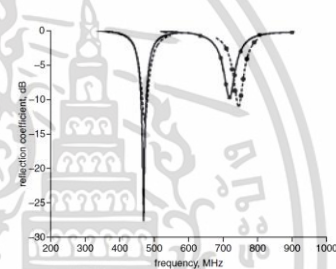
งานวิจัยอ้างอิงที่ [17] ของ C. Niamien และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 แสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.4(ก) และมีขนาดทางกายภาพ 15.5 mm x 15.5 mm x 3 mm ใช้งานตั้งแต่ 470 MHz 3.4(ข) มีอัตราขยายมากที่สุด -4.5 dBi และ 3.4(ค) ค่าสูญเสียการย้อนกลับ



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



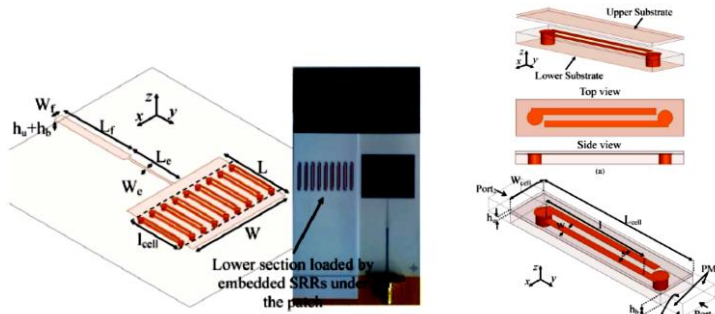
(ข) อัตราขยาย



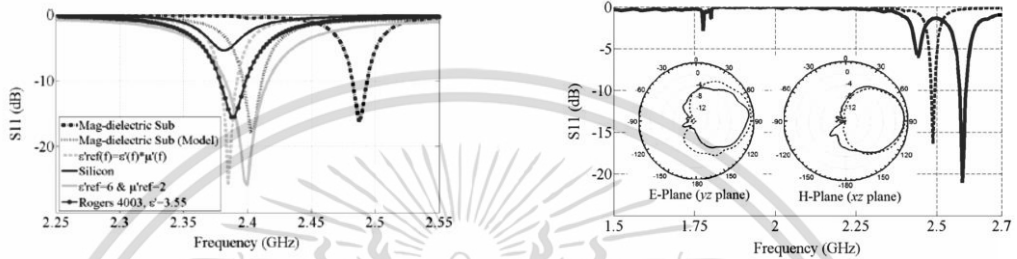
(ค) ค่าสูญเสียการย้อนกลับ

รูปที่ 3.4 สายอากาศขนาดเล็กย่านความถี่ UHF โดยใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก

งานวิจัยอ้างอิงที่ [18] ของ Farhad Farzamai และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 มีโครงสร้างสายอากาศดังรูป 3.5(ก) สายอากาศมีลักษณะทางกายภาพขนาด 41.5 mm x 32 mm ที่ความถี่ 2.4 GHz และมีค่า  $|S_{11}|$  ดังรูป 3.5(ข) โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางดังรูป 3.5(ค)



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

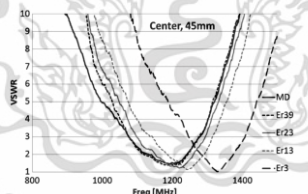


(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

(ค) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

**รูปที่ 3.5** สายอากาศไมโครสตริปขนาดเล็กโดยใช้วัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็กบางเป็นวัสดุฐานรอง

งานวิจัยอ้างอิงที่ [19] ของ Jungyub Lee และคณะ ในปี ค.ศ. 2012 โครงสร้างสายอากาศดังรูป 3.6(ก) สายอากาศมีขนาดทางกายภาพ 25 mm x 5 mm x 3 mm ที่ความถี่ 2 GHz โดยมีค่า VSWR ดังรูปที่ 3.6(ข) และรูปที่ 3.6(ค) แสดงการเปรียบเทียบแบนด์วิดท์และประสิทธิภาพของสายอากาศ



	Resonant frequency (MHz)	BW (%)	Eff. (%)	ΔL (mm)	BW2 (%)	Eff2 (%)
$\epsilon_r 3$	1326	12.22	81.53	0	14.05	77.74
$\epsilon_r 13$	1224	14.54	81.61	5	12.71	78.98
$\epsilon_r 23$	1196	16.30	80.41	6	12.61	80.14
$\epsilon_r 39$	1176	17.17	78.04	7	12.20	79.62
MD	1177	17.41	75.92	7	12.72	77.51

(ก) โครงสร้างของสายอากาศ

(ข) ค่า VSWR

(ค) การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์

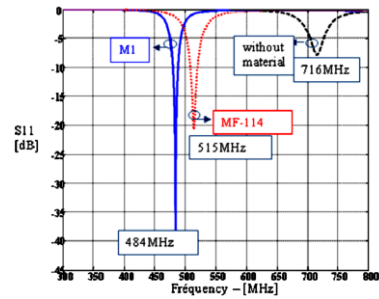
**รูปที่ 3.6** การออกแบบสายอากาศขนาดเล็กสำหรับโทรศัพท์มือถือโดยใช้วัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็ก

งานวิจัยอ้างอิงที่ [20] ของ David Souriou และคณะ ในปี ค.ศ. 2010 มีโครงสร้างสายอากาศดังรูป 3.7(ก) สายอากาศมีขนาดทางกายภาพเท่ากับ 15 mm x 15 mm รองรับความถี่ 300-700 MHz มีการเปรียบเทียบค่า  $|S_{11}|$  ของวัสดุดังรูปที่ 3.7(ข) และมีค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ ดังรูปที่ 3.7(ค)

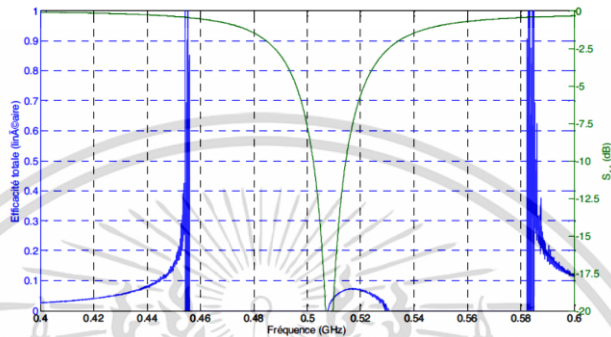
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างของสายอากาศ



(ข) ค่าการสูญเสียย้อนกลับ



(ค) ค่าการสูญเสียย้อนกลับและประสิทธิภาพ

### รูปที่ 3.7 สายอากาศขนาดเล็กและวัสดุนาโนเฟอร์ไรท์วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก MF114

โดยงานวิจัย [17] นั้นออกแบบสายอากาศขนาดเล็ก ใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก ร่วมกับ การขดลวด เป็นวัสดุฐานรอง และมีระนาบกราวด์ทำให้สายอากาศมีขนาดลดลงถึง 10 เท่า และมีแบนด์วิดท์ 15 MHz และมีค่าอัตราขยายสายอากาศเท่ากับ -4.5 dBi ส่วนงานวิจัย [18] นั้นออกแบบโดยใช้วัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กเป็นวัสดุฐานรองจุดประสงค์เพื่อให้โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเล็ก ใช้งานความถี่ 2.4 GHz มีการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายสายอากาศดีกว่าการใช้ไดอิเล็กตริกเป็นวัสดุฐานรอง ส่วนงานวิจัย [19] เป็นการนำวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กมาใช้งานกับสายอากาศเกิน 2 GHz ค่า  $\tan \delta$  ได้ถูกนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้งานสำหรับสายอากาศแบบมีอิมพีแดนซ์หลายย่านความถี่ และมีแบนด์วิดท์ที่ดี และงานวิจัย [20] แสดงถึงการนำวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กเพื่อเพิ่มสมรรถนะที่ย่านความถี่ UHF ซึ่งค่าสูญเสียของวัสดุที่ต่ำนั้นแสดงถึงประโยชน์ที่สามารถทำให้สายอากาศขนาดเล็ก

### 3.5 สรุป

การลดขนาดของสายอากาศอย่างมีประสิทธิภาพเป็นปัญหาที่ทำนายเพราะมักต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างขนาดและสมรรถนะของสายอากาศด้วยเหตุที่ว่าประสิทธิภาพของสายอากาศขึ้นอยู่กับข้อจำกัดขั้นพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ การลดขนาดของสายอากาศเป็นประเด็นสำคัญเนื่องจากองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาขนาดของอุปกรณ์พกพาคือตัวสายอากาศ การศึกษาในปัจจุบันเกี่ยวกับวัสดุใหม่ที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริกแม่เหล็ก เมื่อความถี่ที่ใช้งานต่ำ (ต่ำกว่า 30MHz) สารประกอบของ spinel ferrite และวัสดุ high-dielctric เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดที่จะทำให้เกิดค่าดัชนีการหักเหสูง เมื่อความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 30 MHz ถึง 100 MHz ควรใช้วัสดุ spinel-based วัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดค่าดัชนีการหักเหสูงและการสูญเสียต่ำ แต่เมื่อความถี่ที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 100 MHz ถึง 500 MHz การใช้วัสดุ hexagonal-based วัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็กจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า และเมื่อความถี่ที่ใช้งานมากกว่า 500 MHz การใช้สารประกอบของ hexaferrite และ organic medium จะทำให้ได้ค่าสภาพความยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าสภาพความยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่พอเหมาะกัน



## บทที่ 4

# การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

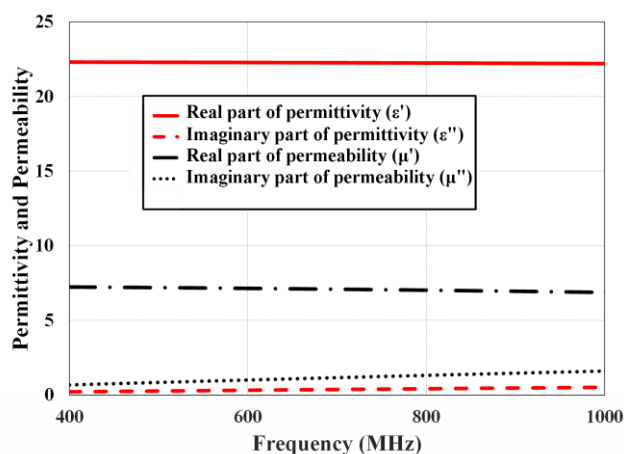
### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศ โดยใช้วัสดุฐานวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับการรับสัญญาณระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ตั้งแต่ 467 MHz ถึง 1012 MHz ซึ่งใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 3 จากนั้นจำลองผลโดยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [25] เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศ ประกอบด้วยค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย ซึ่งสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จะกำหนดให้มีคุณลักษณะของสายอากาศตามที่ต้องการ คือ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง โดยการออกแบบสายอากาศจะนำโครงสร้างสายอากาศ [10] ในบทที่ 2 เป็นโครงสร้างเริ่มต้น

### 4.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

#### 4.2.1 คุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เนื่องด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีคุณลักษณะพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะการตอบสนองความถี่จะถูกควบคุมโดยการคุณลักษณะคูตซิมัมพัทธ์ที่มีความสัมพันธ์กับความถี่และความสามารถในการซึมผ่านของวัสดุ ทั้งสภาพความยอมไฟฟ้า และสภาพความยอมแม่เหล็ก [19]-[24] จากการจำลองคุณลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็ก รุ่น Eccosorb MF-124 โดยพิจารณาช่วงความถี่ตั้งแต่ 400-1000 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะในแต่ละช่วงความถี่ที่ใช้งานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงผลจำลองค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง  
รุ่น Eccosorb MF-124

ตารางที่ 4.1 แสดงผลจำลองค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์  
ของวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กรุ่น Eccosorb MF-124

Operating band/(MHz)	$\epsilon'$	$\tan \delta_\epsilon$	$\mu'$	$\tan \delta_\mu$
DVB-H/470	22.30	0.011	7.22	0.111
DVB-H/666	22.27	0.016	7.12	0.157
DVB-H/862	22.25	0.018	7.05	0.180
LTE13/766	22.24	0.020	6.99	0.199
GSM/850	22.23	0.020	6.98	0.202
GSM/900	22.22	0.021	6.96	0.211

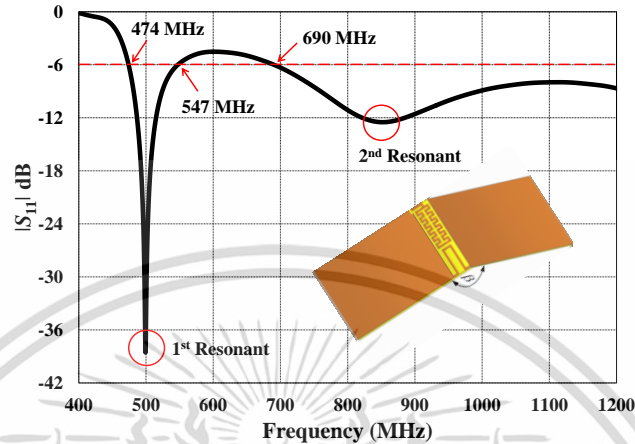
#### 4.2.2 โครงสร้างของสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยการใช้เส้นทวน [26] ต่อร่วมกับระนาบกราวนด์ ด้านบนและด้านล่างของโทรศัพท์แบบพับ โดยใช้แกนกลางของโทรศัพท์ เป็นแกนหมุน ทั้งนี้วัสดุฐานรองของโทรศัพท์เป็น FR-4 ซึ่งมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ และสภาพยอมแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 4.4 และ 0.02 ตามลำดับ

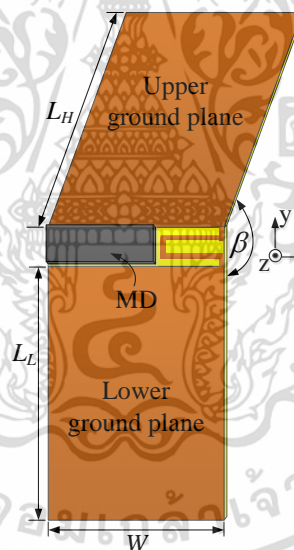
รูปที่ 4.2 แสดงรูปโครงสร้างของสายอากาศที่ได้รับการพัฒนามาจาก [10] โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีดังนี้ ความกว้าง 40 mm และความยาว  $\times$  85 mm สำหรับระนาบกราวนด์ ด้านบนและด้านล่าง และความยาว 25 mm ความกว้าง 10 mm สำหรับวัสดุ MD (Eccosorb MF-124) จะทำการเหนี่ยวนำพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับระนาบกราวนด์ ซึ่งจะส่งผลดีที่สุดเมื่อ



เนื่องจากวัสดุฐานรองชนิด Eccosorb MF-124 MD นั้นทำหน้าที่เป็นโหนดให้กับเส้นทวนกระทำกับวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ดังแสดงรูปโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศที่นำเสนอรูปที่ 4.4 และแสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 4.5 ตามลำดับ

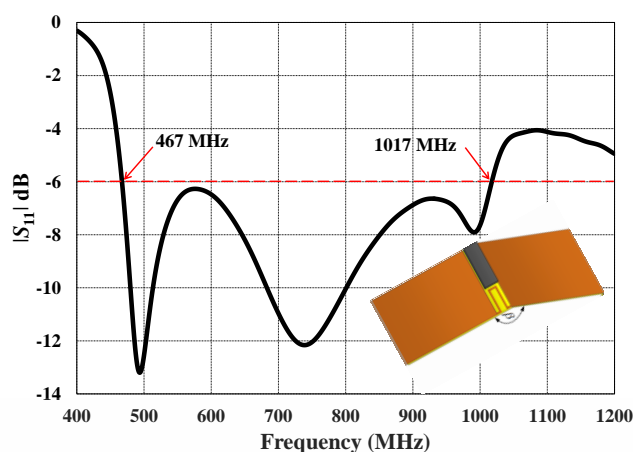


รูปที่ 4.3 การจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่ยังไม่ติดตั้งวัสดุ MD



รูปที่ 4.4 แสดงรูปโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศที่นำเสนอ

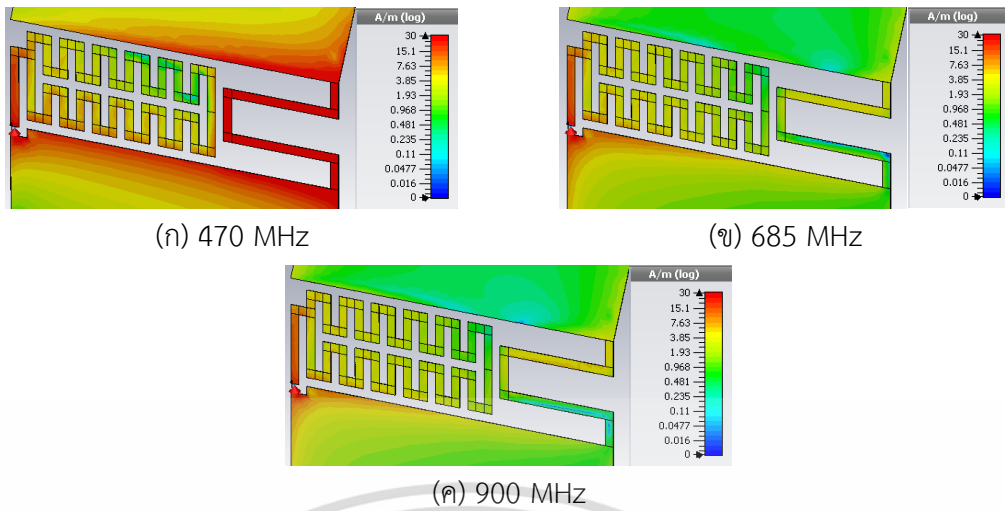
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอ พบว่าวัสดุฐานรองชนิด MD-laden MLA สามารถส่งผลให้เกิดอิมพีแดนซ์แบนด์วิธที่กว้างขึ้นเป็นอย่างมาก สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานในระหว่างความถี่ 467-1017 MHz, ซึ่งรองรับระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ได้ การปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่นำเสนอในรูปที่ 4.5 นั้นจะเน้นไปที่การสังเกตพฤติกรรมการไหลของกระแสเชิงผิวบริเวณเส้นววน และบริเวณเส้นไมโครสตริปที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานแทนที่ด้วยพารามิเตอร์  $J_c$  โดย  $N$  คือจำนวนรอบของเส้นววน และความยาวของระนาบกราวนด์แทนด้วยพารามิเตอร์  $L_g$

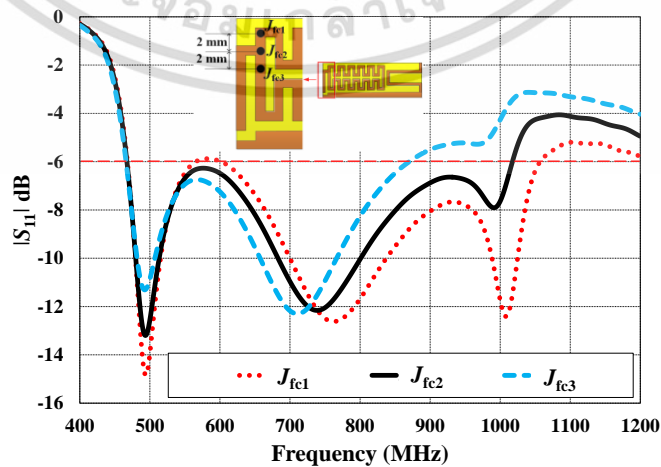
การสังเกตการไหลของกระแสเชิงผิวบริเวณ MD-laden MLA นั้นถูกจำลองด้วยโปรแกรม CST® Microwave Studio Suite โดยทำการสังเกตเพื่อศึกษาผลกระทบของโครงสร้างในแต่ละความถี่ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6(ก) ความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 470 MHz ในรูปที่ 4.6(ข) ช่วงความถี่กลางเท่ากับ 685 MHz และในรูปที่ 4.6(ค) ขอบความถี่ด้านสูงเท่ากับ 900 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกระแสเชิงผิวบริเวณบนเส้นทวนและระนาบกราวด์

### 4.2.3 การศึกษาพารามิเตอร์

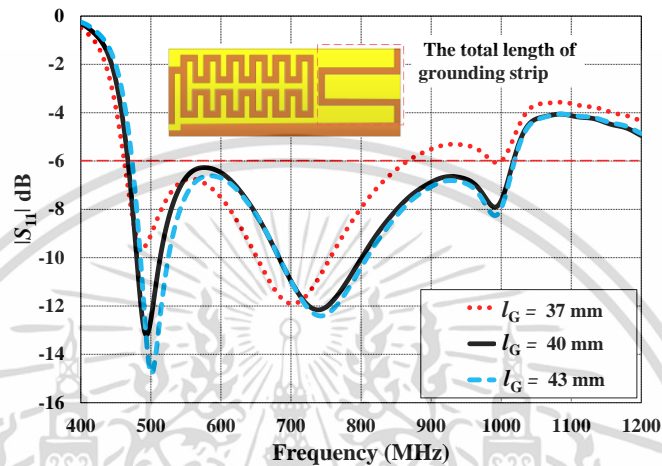
การศึกษาพารามิเตอร์ทำได้โดยเน้นไปที่การปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ บริเวณเส้นทวน จุดป้อนสัญญาณ และวัสดุฐานรองชนิด MD นั้นเอง โดยมีพารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจมีดังนี้  $J_{fc}$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อกับเส้นป้อนสัญญาณกับเส้นทวน  $l_c$  คือความของระนาบกราวด์  $N$  คือจำนวนรอบของเส้นทวน และ Thickness คือความหนาของวัสดุฐานรองชนิด MD ดังแสดงค่าผลการจำลอง  $|S_{11}|$  เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวดังรูปที่ 4.6(ก)-(ค) ซึ่งเส้นไมโครสตริปที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศมีผลกระทบอย่างยิ่งกับค่าความกว้างของอิมพีแดนซ์แบนด์วิธ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาที่  $|S_{11}| < -6$  dB โดยรูปที่ 4.6(ก) ความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 470 MHz รูปที่ 4.6(ข) ช่วงความถี่กลางเท่ากับ 685 MHz และ รูปที่ 4.6(ค) ขอบความถี่ด้านสูงเท่ากับ 900 MHz ตามลำดับ โดยให้ความกว้างของเส้นไมโครสตริปเท่ากับ 1 mm อ้างอิงเอกสารอ้างอิงที่ [7]



รูปที่ 4.7 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $J_{fc1} - J_{fc3}$

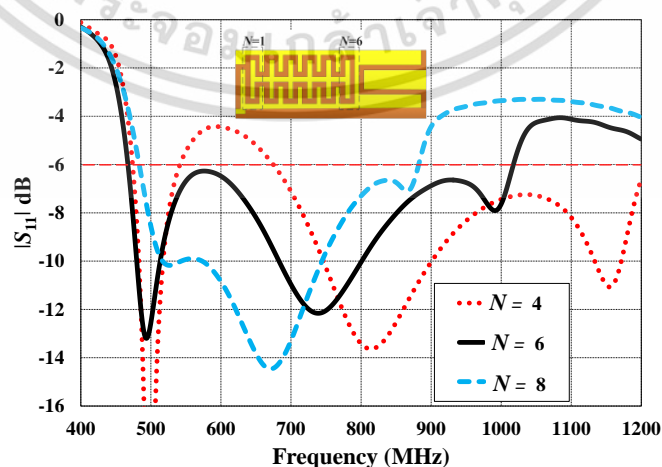
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $J_{fc1}$   $J_{fc2}$  และ  $J_{fc3}$  ที่ระยะ 2 mm ซึ่งได้ผลดังนี้คือ  $J_{fc1}$  ได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ที่ช่วงความถี่ 467-565 MHz และ 601-1057 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470-960 MHz แต่สำหรับ  $J_{fc2}$  และ  $J_{fc3}$  นั้นทำให้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ในช่วงความถี่ 467-1017 MHz และช่วงความถี่ 466-870 MHz ตามลำดับ ซึ่งได้เลือกใช้ค่า  $J_{fc2}$  เนื่องจากให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธที่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $l_G$

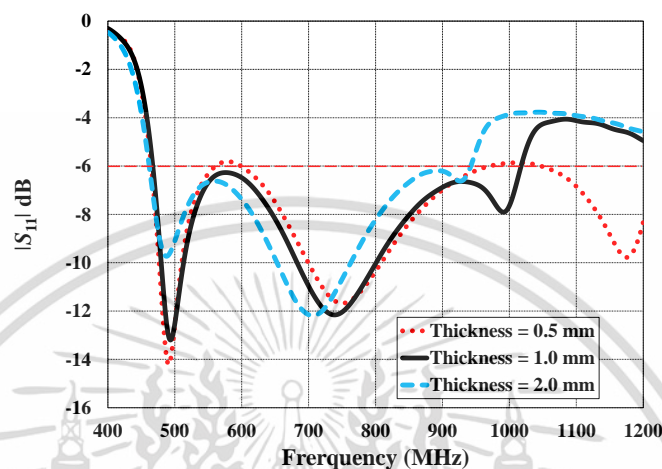
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $l_G$  ซึ่งได้ผลดังนี้คือ  $l_G=37$ mm ได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ที่ช่วงความถี่ 462-866 MHz ซึ่งไม่สามารถครอบคลุมย่านความใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470-960 MHz แต่สำหรับ  $l_G=40$  mm และ  $l_G=43$  mm นั้นได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ในช่วงความถี่ 467-1017 MHz และช่วงความถี่ 473-1019 MHz ตามลำดับ ซึ่งได้เลือกใช้ค่า  $l_G=40$  mm เนื่องจากให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธที่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน



จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $N$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า  $N$  ซึ่งได้ผลดังนี้คือ  $N = 4$  ได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ที่ช่วงความถี่ 457-514 MHz และ 677-1200 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470-960 MHz แต่สำหรับ  $N=6$  และ  $N=8$  นั้นได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ในช่วงความถี่ 467-1017 MHz และช่วงความถี่ 483-882 MHz ตามลำดับ ซึ่งได้เลือกใช้ค่า  $N=6$  เนื่องจากให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธที่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน



จากรูปที่ 4.10 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า MD thicknesses

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอเมื่อทำการปรับค่า MD thicknesses ซึ่งได้ผลดังนี้คือ MD thicknesses = 0.5 mm ได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ที่ช่วงความถี่ 464-561 MHz และ 600-970 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470-960 MHz แต่สำหรับ MD thicknesses = 1.0 mm และ MD thicknesses = 2.0 mm นั้นได้ผล  $|S_{11}| < -6$  dB ในช่วงความถี่ 467-1017 MHz และช่วงความถี่ 461-942 MHz ตามลำดับ ซึ่งได้เลือกใช้ค่า MD thicknesses = 1.0 mm เนื่องจากให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธที่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน

### 4.3 บทสรุป

ผลที่ได้จากจำลองสายอากาศมีค่าต่ำกว่า  $|S_{11}| < -6$  dB มีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการใช้งานในระบบโดยใช้เทคนิคของวัสดุฐานรองเป็นไดอิเล็กตริกแม่เหล็กที่ความหนา 1.0 mm มีผลทำให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กลง และเพิ่มความยาวของขดลวดวน เพื่อให้มีขนาดของแบนด์วิธครอบคลุมความถี่ที่ใช้งาน การเปลี่ยนแปลงสตริปความยาวของจุดกระตุ้นสัญญาณจะมีผลต่อช่วงความถี่สูง ความยาวของสตริปกราวนด์ และความกว้างของสตริปกราวนด์มีผลต่อความถี่ต่ำ ความหนาของไดอิเล็กตริกแม่เหล็กมีผลต่อความกว้างแถบคลื่นความถี่และค่า  $|S_{11}|$  การปรับค่าของมุมของระนาบกราวนด์มีผลทำให้ค่าโพลาไรซ์ไขว้ต่ำทำให้สายอากาศรับคลื่นความถี่ของโพลาไรซ์เครื่องส่ง โทรทัศน์ได้โพลาไรซ์เดียว และสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ที่ความถี่ 467-1017 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

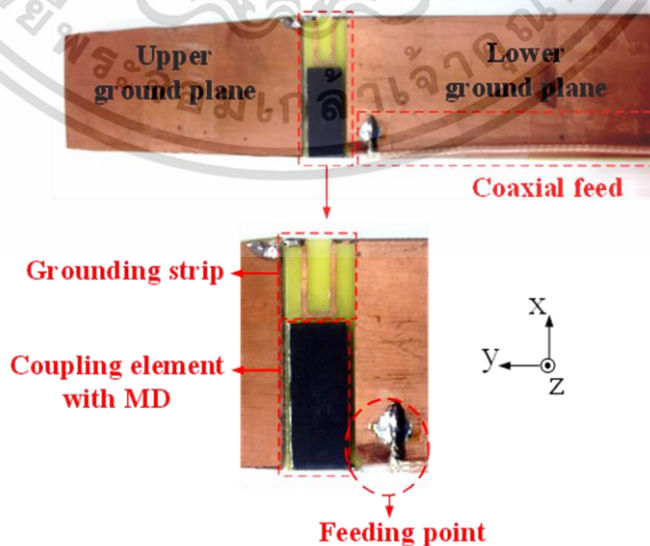
### การทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงผลการสร้างและทดสอบของสายอากาศ ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใน 3 ระนาบคือ xy xz และ yz รวมถึงอัตราขยายของสายอากาศ รวมทั้งค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ประกอบการออกแบบสายอากาศตาม ที่ได้นำเสนอไว้ใน บทที่ 4 และนำผลจากการศึกษาพารามิเตอร์ มาทำการสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบดังที่ได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศสายอากาศแบบพกพา เพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลในระบบ DVB-H ผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศคุณลักษณะ  $|S_{11}| < -6$  dB มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบแนวนอนมีอัตราขยายสูงสุดที่  $-5$  dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งาน DVB-H/LTE13/GSM850/900 โดยใช้เทคนิคของวัสดุฐานรองเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกแม่เหล็กที่ความหนา  $1.0$  mm มีผลทำให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กลง และเพิ่มความยาวขดลวดกวนเพื่อ ให้ขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งาน เพื่อยืนยันความถูกต้องจากผลการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่  $467 - 1017$  MHz สายอากาศถูกออกแบบอยู่บนไดอิเล็กตริกวัสดุฐานรองแม่เหล็ก เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบ

การทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสมเพื่อทดสอบสายอากาศ สำหรับประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่โทรทัศนระบบดิจิทัล มีดังนี้

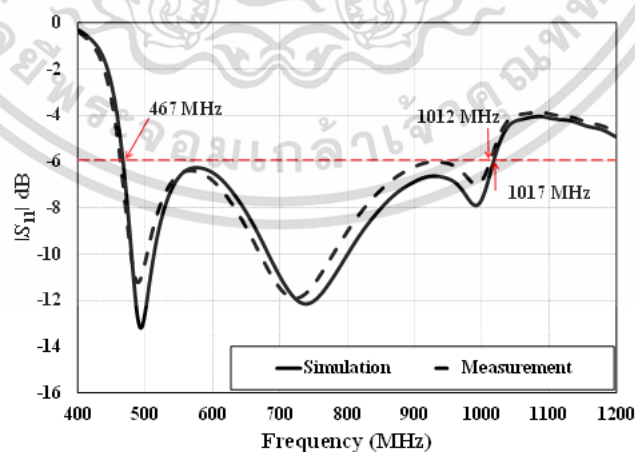
- ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Microwave anechoic chamber)
- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น HP-8720C
- สายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$

#### 5.3.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบ  $|S_{11}|$  ให้นำสายอากาศต่อกับสายนำสัญญาณที่พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยการทดสอบ  $|S_{11}|$  จะมีวิธีการติดตั้งสายอากาศร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยเชื่อมต่อสายนำสัญญาณที่ด้านหลังของสายอากาศ และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การติดตั้งเพื่อทำการทดสอบ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ที่เป็นฟังก์ชันความถี่

จากรูปที่ 5.3 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบมีค่า  $|S_{11}| < -6$  dB โดยมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 467-1017 MHz และมีแบนด์วิดท์ เท่ากับ 550 MHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้เห็นข้อบกพร่องในการแก้ไขไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานในระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ได้

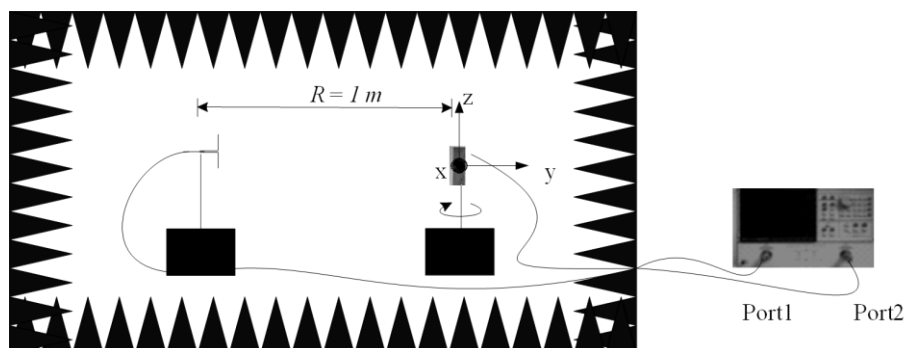
### 5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซที่แน่นอน จึงเหมาะสมกว่าที่จะใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบ โดยการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับสำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างมากพอที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะคงที่ หรือเรียกระยะดังกล่าวนี้ว่าระยะสนามระยะไกล (Far-field :  $R$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1

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

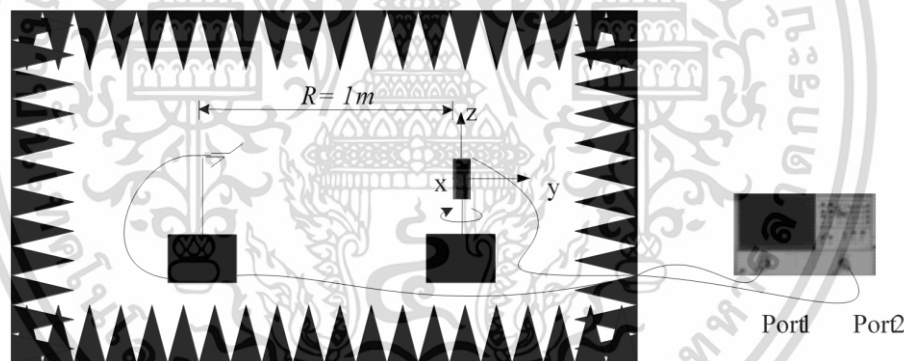
เมื่อ  $D$  คือ มิติยาวที่สุดของสายอากาศ (m)

โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะทดสอบในห้องไร้การสะท้อนซึ่งเป็นห้องที่มีสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงช่องว่างอิสระ (Free space) มากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 จากรูปดังกล่าวแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซร่วมและโพลาริซไขว้ในระนาบ  $xy$  ส่วนรูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซร่วมและโพลาริซไขว้ในระนาบ  $xz$  และรูปที่ 5.8 และ 5.9 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซร่วมและโพลาริซไขว้ในระนาบ  $yz$  โดยจะพิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ซึ่งการวางแผนในการทดสอบสายอากาศสามารถอ้างอิงได้จากรูปที่ 5.1 โดยผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 ถึง รูปที่ 5.12 ตามลำดับ



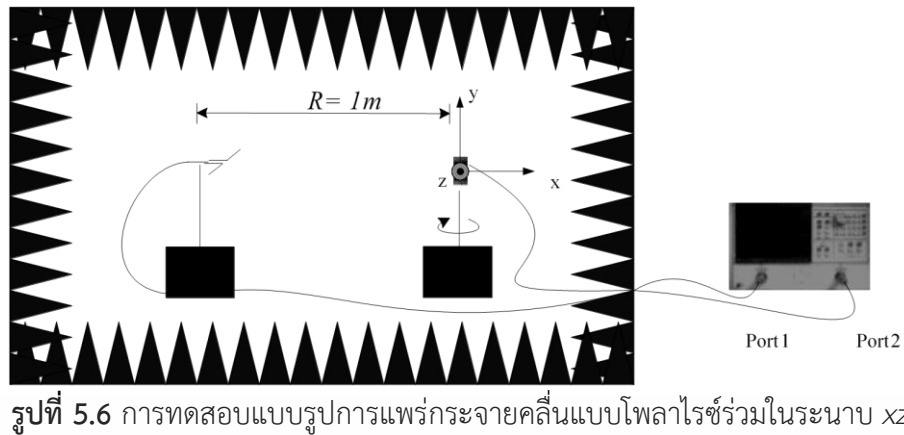
รูปที่ 5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ในระนาบ xy

จากรูปที่ 5.4 จะเป็นการแสดงวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ในระนาบ xy สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวนอน ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวนอน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$



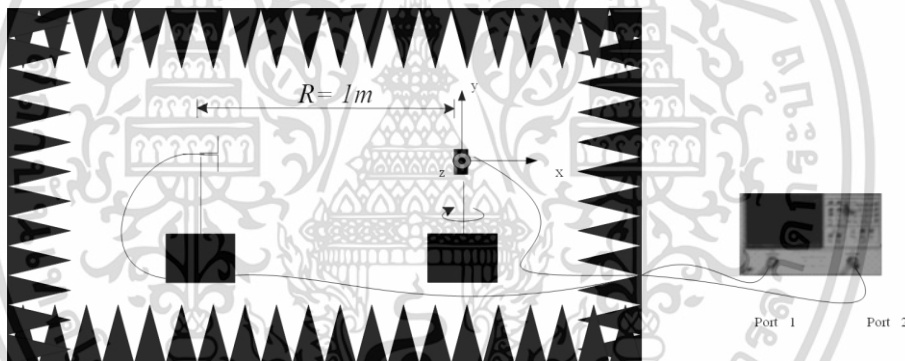
รูปที่ 5.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ในระนาบ xy

จากรูปที่ 5.5 จะเป็นการแสดงวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ในระนาบ xy สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวนอน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$



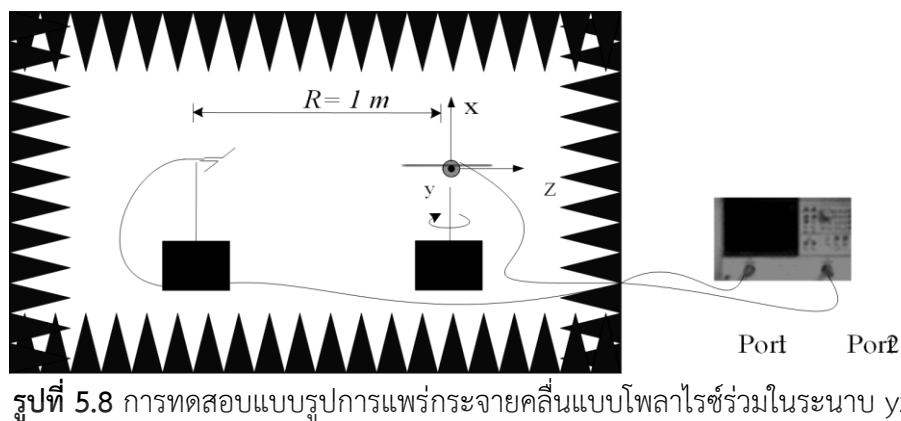
รูปที่ 5.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมในระนาบ  $xz$

จากรูปที่ 5.6 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ในระนาบ  $xz$  สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวตั้งเหมือนกัน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$



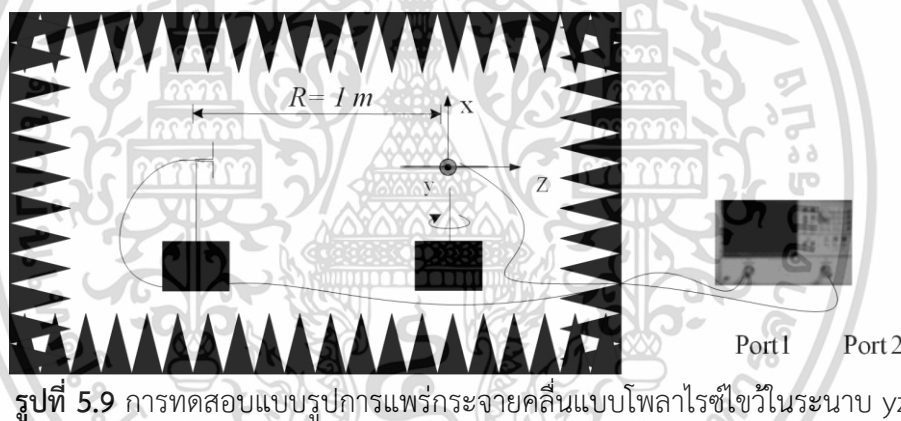
รูปที่ 5.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ  $xz$

จากรูปที่ 5.7 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ในระนาบ  $xz$  สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวนอน ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวตั้งจากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$



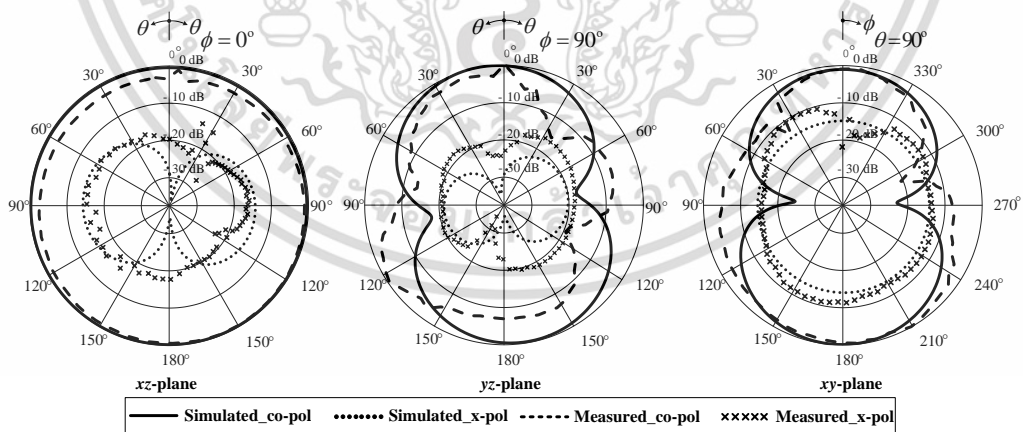
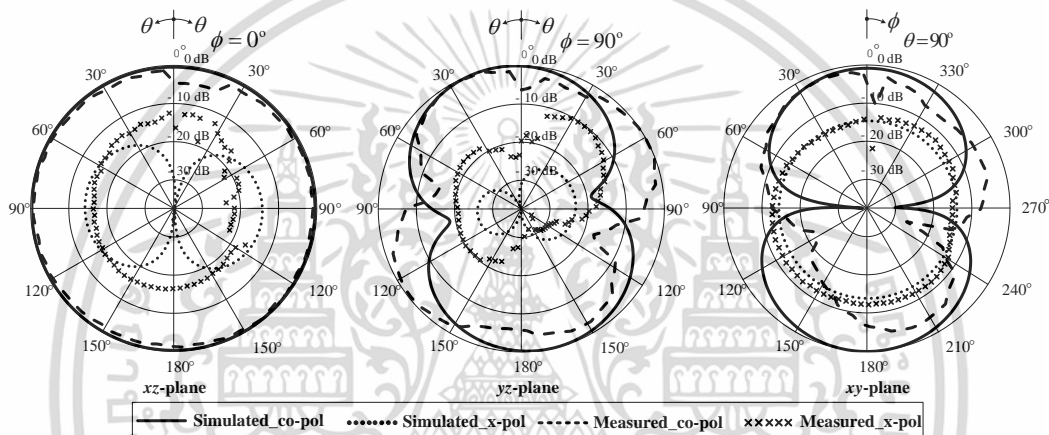
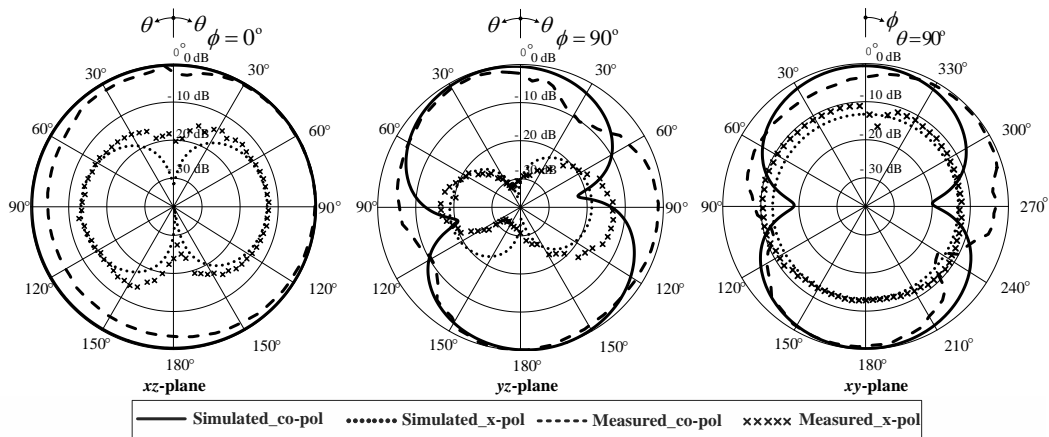
รูปที่ 5.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วมในระนาบ yz

จากรูปที่ 5.8 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ในระนาบ xz สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวตั้งเหมือนกัน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$ .



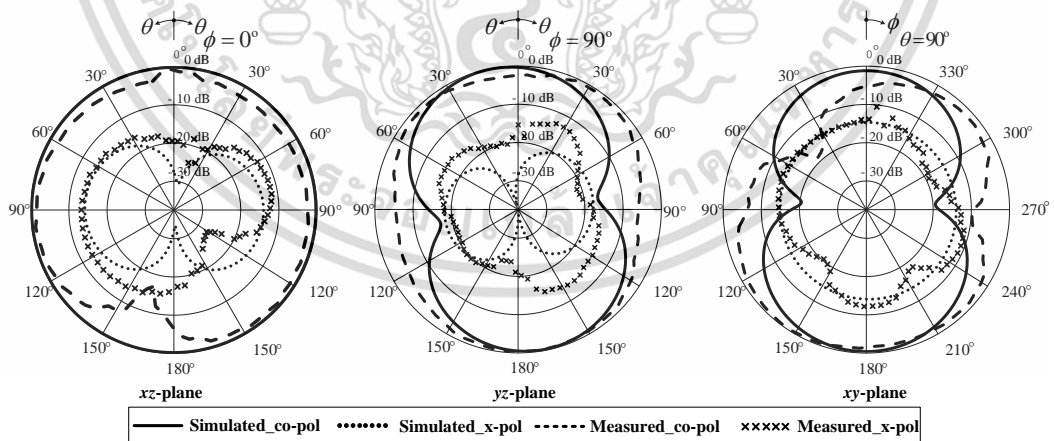
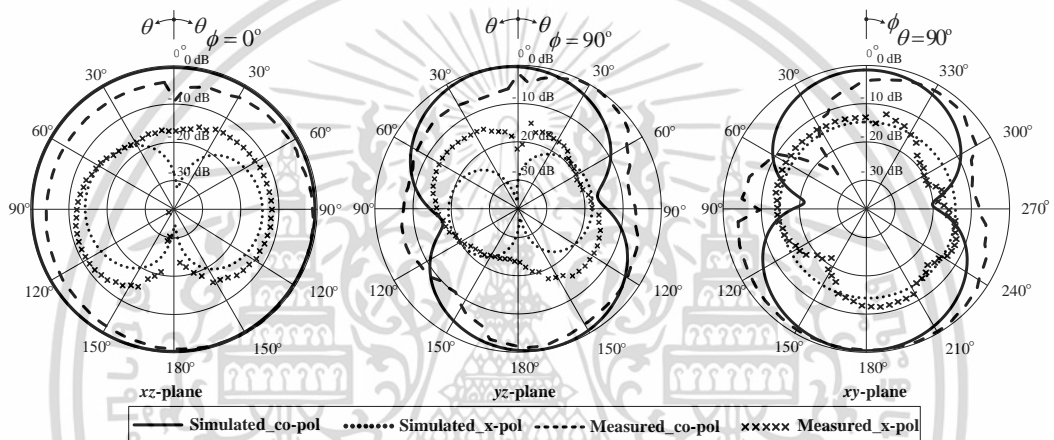
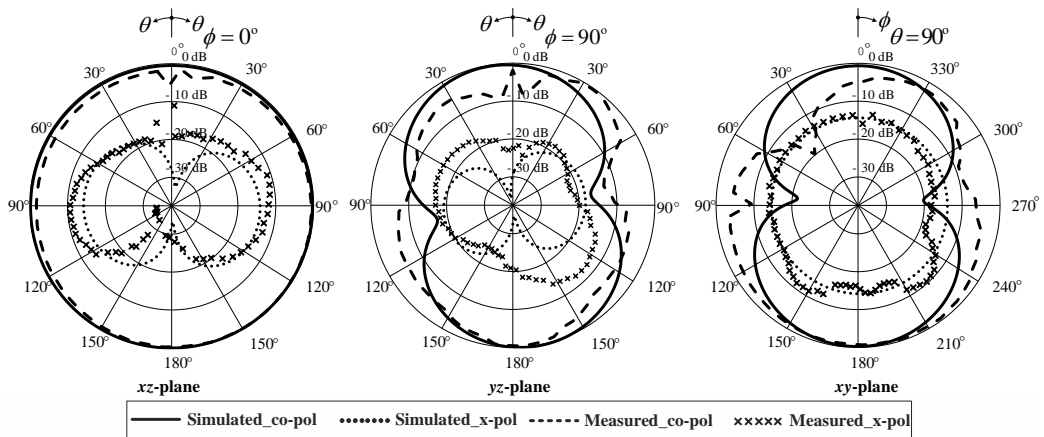
รูปที่ 5.9 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบ yz

จากรูปที่ 5.9 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ในระนาบ xz สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวนอน ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 5.1 จะวางในแนวตั้ง จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ  $360^\circ$  และทำการบันทึกค่า  $|S_{11}|$  จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 6 แบบ นั้น จะได้ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลอง  
ของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองของสายอากาศต้นแบบ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

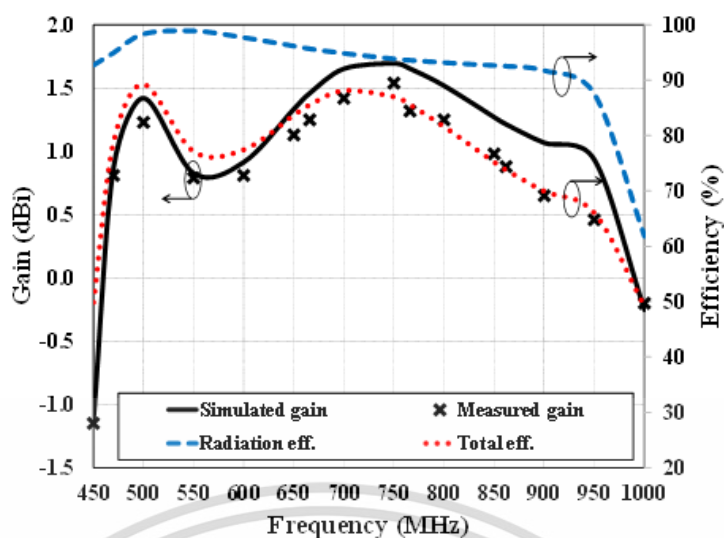
จากรูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy xz และ yz ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซร่วม และแบบโพลาริซไขว้ และพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มีความสอดคล้องคล้อยกัน มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่ในระนาบแนวนอนหรือระนาบ xz ตลอดย่านความถี่ใช้งานที่ (ก) 470MHz (ข) 666MHz (ค) 766MHz (ง) 850MHz (จ) 862MHz (ฉ) 900MHz ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างผลของการจำลองและผลการทดสอบไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขั้นตอนการสร้างในข้อจำกัดในเรื่องของโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดเล็กและผลเนื่องจากการทดสอบ

### 5.3.3 อัตราขยาย (Gain)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศสามารถใช้วิธีการติดตั้งดังรูปที่ 5.4 แต่จะไม่มี การหมุนที่สายอากาศภาครับ โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่งที่มีอัตราขยาย เท่ากับ 2 dBi และใช้สายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศภาครับเพื่อทดสอบหาอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยาย ของสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 และผลการทดสอบอัตราขยาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13

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

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



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบและค่าประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 5.13 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ โดยจะมีอัตราขยายอยู่ที่ 0.353 dBi ถึง 1.190 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งาน ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

ความถี่ (MHz)	HPBW of xy-plane (°)	HPBW of yz-plane (°)	คุณลักษณะ		
			Gain (dBi)	Radiation eff. (%)	Total eff. (%)
470	85.8	88.2	0.86	94.9	78.8
666	81.1	84.6	1.46	95.6	85.5
766	79.9	82.5	1.65	93.6	85.5
850	74.9	80.5	1.27	92.6	75.1
862	74.4	80.2	1.21	92.5	73.7
900	73	79.2	1.06	91.7	69.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 สรุป

จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 ที่ประกอบไปด้วยค่า  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลารไรซ์ และอัตราขยายของสายอากาศ โดยนำผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 นี้ พบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้ มีความสอดคล้องกัน โดยมีช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 467-1017 MHz และมีแบนด์วิดธ์ 550 MHz ซึ่งเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานตามข้อกำหนดของ กสทช. และการพิจารณาถึงคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่พิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz 766 MHz 850 MHz 862 MHz 900 MHz ตามลำดับ พบว่าที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทั้ง 6 ความถี่ดังกล่าวมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลอง โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ xz ทั้ง 6 ความถี่มีความแตกต่างของกำลังที่แพร่กระจายได้สูงสุดและต่ำสุดไม่เกิน 3 dB จึงสามารถจะกล่าวได้ว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบ xz และผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณที่ด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณร่วมกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง และการส่งสัญญาณที่มาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะต้องผ่านสายนำสัญญาณมาสู่สายอากาศ ที่มีจุดเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเนคเตอร์อยู่มาก และมีอัตราขยายในช่วงความถี่ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz พบว่าผลการทดสอบและผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยมีอัตราขยายน้อยที่สุดและมากที่สุดคือ 0.65 และ 1.54 dBi ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นและค่าประสิทธิภาพทั้งหมดคือ 91.7%-95.6% และ 69.9%-85.5% ตามลำดับ ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบ DVB-H/LTE13/GSM850/900 โดยมีวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบสายอากาศ คือ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถรับสัญญาณได้รอบทิศทาง และมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยเริ่มจากการหาค่าขนาดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้คุณลักษณะของสายอากาศนั้น เพื่อทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการพัฒนาใช้งานจริงต่อไป ในบทนี้จะกล่าวถึง พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศรอบตัว รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ และข้อเสนอแนะสำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

#### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศในช่วงความถี่โทรศัพท์ระบบดิจิทัล รวมถึงไปถึงวิธีการออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวการ โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [25] ในการจำลองผลเพื่อหาค่าขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้สร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและนำไปทดสอบคุณสมบัติต่อไป

มาตรฐานของโทรศัพท์ระบบดิจิทัลในระบบ DVB-H กำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน คือ ย่านความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอวิธีการออกแบบสายอากาศที่ใช้โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยตัวแพร่กระจายคลื่นซึ่งใช้เทคนิคการขดวงวนในการออกแบบ เพื่อให้ได้คุณสมบัติแถบความถี่กว้างอยู่บนวัสดุฐานรองแม่เหล็กเทียม โดยวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกแม่เหล็กจะถูกออกแบบรวมอยู่กับระนาบกราวด์ที่มีโครงสร้างติดกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในระบบดังกล่าว

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะถูกนำมาสรุปเป็นขั้นตอน โดยเริ่มจากขั้นตอนที่ 1-5 ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของโทรศัพท์ระบบดิจิทัล งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศ Integrate ชนิดพกพาและงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศรับสัญญาณ DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz)

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกแม่เหล็ก และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศที่ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกแม่เหล็กเป็นวัสดุฐานรอง

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาการออกแบบ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ และทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยเริ่มจากการคำนวณหาความยาวของสายอากาศเริ่มต้น เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO®[25] พร้อมทั้งศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีช่วงความถี่รองรับระบบ DVB-H (470-862 MHz) ระบบ LTE13 (746-787 MHz) และ GSM850/900 (824-894 MHz/880-960 MHz) มีโพลาไรซ์แบบวงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน

ขั้นตอนที่ 4 สรุปผลการสร้าง การทดสอบและวิจารณ์ผลสายอากาศ ดังตารางที่ 6.1

ขั้นตอนที่ 5 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งแนวทางการศึกษาสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบงานวิจัยสายอากาศแบบพหุภาคกับสายอากาศที่ออกแบบ

ผลงานวิจัยที่มีมาก่อน	ขนาดของสายอากาศ (mm)	ช่วงความถี่ใช้งาน (MHz)	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	อัตราขยาย (dBi)
[9]	50x5x2	470 ถึง 710	รอบทิศทาง	-6.9 ถึง 0.38
[10]	25x10x2	468 ถึง 719	รอบทิศทาง	-10 ถึง -7
[11]	50x8x2	470 ถึง 710	รอบทิศทาง	-10 ถึง -7
สายอากาศที่ออกแบบ	25x10x1	467 ถึง 1017	รอบทิศทาง	0.65 ถึง 1.54

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศพบว่า โครงสร้างสายอากาศสามารถที่จะออกแบบให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบDVB-H/LTE13/GSM850/900 มีอัตราขยายของสายอากาศมีค่าน้อยเนื่องจากสายอากาศมีขนาดเล็ก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการลดขนาดของสายอากาศร่วมกับการใช้เทคนิคแบบขดลวดวน ซึ่งการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์หลายค่านั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ของสายอากาศ ได้แก่ ความหนาของวัสดุฐานรอง จุดป้อนสัญญาณ ความหนาของทองแดง สตรีประหว่งระนาบกราวนด์ เป็นต้น ทั้งนี้ สามารถที่จะนำไปพัฒนาเพื่อก่อให้เกิดความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคต

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Printed Diamond Slot Antenna Fed by a Cross Microstrip Line for 5.5 GHz RFID Reader," *Proceeding of Joint International Conference on Information & Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering*, pp. 535-538, Dec 2010.
- [2] C. Phongcharoenpanich, and R. Senathong, "Printed diamond slot antenna with a bent microstrip line for 5.8 GHz RFID reader," *Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, pp. 243-244, Aug 2012.
- [3] R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Dual-band Bidirectional Patch Antenna with Truncated Square Aperture and Strips for WLAN Applications," *International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology*, pp. 74-76, Aug 2017.
- [4] R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Flat Antenna using Wide Aperture with Strips for WLAN Applications," *International Symposium on Multimedia and Communication Technology*, Aug 2017.
- [5] B. Luadang, R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Magneto Dielectric-laden Miniaturized Wideband Meander Line Antenna for Mobile Devices," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-19, 2018.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วารสาร กสทช. ประจำปี 2557 เล่ม 1 หน้า 023-048
- [2] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, “มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล,” เล่ม 129, หน้า 45, 2555
- [3] อสมท. 2012 ปฏิบัติการดิจิทัล อสมท. [Online] Available: <http://dtv.mcot.net/data/reportdtv.php>.
- [4] วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 พ.ค. – ส.ค 2554 หน้า 472-482.
- [5] H.-D. Chen, “Compact Broadband Microstrip-Line-Fed Sleeve Monopole Antenna for Dtv Application And Ground Plane Effect,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 497-500, 2008.
- [6] S. Kashihara, and F. Kuroki, “J-Shaped Monopole Antenna Array as An Antenna for Terrestrial Digital Broadcasting at UHF Band,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 293-296, 2009.
- [7] D.-B. Lin, P.-C.Tsai, I.-T.Tang, and P.-S.Chen, “Spiral and Multimode Antenna Miniaturization for DTV Signal Receptions,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 902-905, 2010.
- [8] C.-K. Hsu and S.-J. Chung, “A Wideband Dvb Forked Shape Monopole Antenna with Coupling Effect for Usb Dongle Application,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.58, no.9, pp. 3029-3036, 2010.
- [9] C. Park, H. Rhyu, S. Kim, C. Jung, and B. Lee, “Internal DTV Antenna on Multilayered Ferrite Substrate for Mobile Phone Applications,” *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1-4, 2008.
- [10] H. Rhyu, C. Jung, J. Byun, M. Park, Y. Chung, T. Kim, and B. Lee, “DVB-H Antenna Design Using Folder-Type Chassis and Coupling Element on a Ferrite,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009.
- [11] B. Kim, H. Rhyu, I.-Y. Lee, J. Byun, and B. Lee, “DVB-H Antenna Design Using Folder-Type Chassis and Coupling Element on a Ferrite,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 453-456, 2009.
- [12] D.H. Choi, H.S. Yun and S.O. Park, “Internal Antenna with Modified Monopole Type for DVB-H Applications,” *IET Electronics Letters*, vol. 42, pp. 1436-1438, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] M. Komulainen, M. Berg, and H. Jantunen, "Compact Varactor-Tuned Meander Line Monopole Antenna for DVB-H Signal Reception," *IET Electronics Letters*, vol. 43, pp. 1436-1438, 2007.
- [14] S. Zuo, Z. Zang, and J. Yang, "Planar Meander Monopole Antenna with Parasitic Strips and Sleeve Feed for DVB-H/LTE/GSM850/900 Operation in the Mobile Phone," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 12, 2013.
- [15] J. Lee, H. Nat, J. Park, and J. Kim "Design of the DVB-H Antenna Using Broadband Matching Circuit," *Microwave Conference*, vol. 42, pp 1-4, 2006.
- [16] R. Hansen, and M. Burke, "Antennas with Magneto-Dielectrics," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 26, no. 2, pp 75-78, 2000.
- [17] C. Niamien, S. Collardey, A. Sharaiha, and K. Mahdjoubi, "Ultra-miniature UHF Antenna Using Magneto-Dielectric Material," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 5, 2011.
- [18] F. Farzami, and K. Forooraghi, "Miniaturization of a Microstrip Antenna Using a Compact and Thin Magneto-Dielectric Substrate," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1540-1542, 2011.
- [19] J. Lee, J. Heo, J. Lee, and Y. Han, "Design of Small Antennas for Mobile Handsets Using Magneto-Dielectric Material," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 4, 2012.
- [20] D. Souriou, J. Mattei, S. Boucher<sup>1</sup>, A. Sharaiha, and A. Claude, "Antenna Miniaturization and Nanoferrite Magneto-Dielectric Materials," *Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference*, 2015.
- [21] K. Chang , H. Zhu, X. Zhang, and H. Xin, "Study of New Magneto-Dielectric Substrate for Compact Antenna Application," *International Workshop on Antenna Technology*, pp. 416-419, 2011.
- [22] ETSI, "Technical Report. Digital Video Broadcasting," *DVB-H Implementation Guidelines. European Broadcasting Union*, TR 102 377 V1.4.1 (2009-06).

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[23] [Online] Available: <http://www.thaidigitaltelevision.com>

[24] M. Kornfeld, “The DVB-H Mobile Broadcast Standard [Standards in a Nutshell],” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 118-122, 2008.

[25] CST-Microwave Studio, User’s Manual, 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายเรวัตน์ เสนาทอง
วัน เดือน ปีเกิด	13 พฤศจิกายน 2525
ประวัติการศึกษา	2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2561 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้