

การศึกษาอิทธิพลของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวแบบต่างๆ



นายจรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**STUDY OF IMPEDANCE OF RFID TAG
ON VARIOUS SURFACES**

Charinsak Saetiaw



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

การศึกษาอิมพีแดนซ์ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอติดบนพื้นผิวแบบต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุยฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ชุตินา พรหมมาก)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

กรรมการ

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ้านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว : การศึกษาอิมพีแดนซ์ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวแบบต่างๆ
(STUDY OF IMPEDANCE OF RFID TAG ON VARIOUS SURFACES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 122 หน้า.

ระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification : RFID) เป็นระบบที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยจะประกอบด้วยส่วนเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี และแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สามารถแบ่งออกเป็นสองวงจรรวมหรือไอซีที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและควบคุมการทำงาน และส่วนสายอากาศที่เป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้พื้นที่ส่วนใหญ่ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในการรวบรวมพลังงานจากการแผ่กระจายคลื่นที่ได้รับ เพื่อใช้สื่อสารตอบกลับไปยังเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี การใช้งานแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี อาจจะถูกติดบนวัตถุที่มีขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของวัสดุที่แตกต่างกัน ทำให้สายอากาศมีการเปลี่ยนรูป ซึ่งจะส่งผลถึงค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไป

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยอาศัยเทคนิคการทับซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ที่จะทำให้นิวเคลียสความยาวของสายอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้เองขณะตัดโค้ง ซึ่งจะไปชดเชยผลกระทบจากการตัดโค้งที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ โดยผลจากการจำลองแบบพบว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีหลายชั้น เมื่อมีการตัดโค้งที่ความโค้งขนาดต่าง ๆ จะมีค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงลดลง นอกจากนี้แล้วได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบโดยใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวงจรรวมแบบบางที่สามารถตัดโค้งได้ เพื่อทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ขณะติดตั้งกับวัสดุที่มีผิวโค้งขนาดต่าง ๆ ซึ่งสามารถใช้ยืนยันผลลัพธ์จากการจำลองแบบได้

CHARINSAK SAETIAW : STUDY OF IMPEDANCE OF RFID TAG ON
VARIOUS SURFACES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHANCHAI
THONGSOPA, Ph.D., 122 PP.

RFID TAG ANTENNA/MULTIPLE LAYERS STRIP DIPOLE

Radio Frequency Identification (RFID) system has been widely used in many services in the industry in the past decade. RFID system consists of RFID tags and a reader. The RFID tags can be divided into a tag antenna and a chip. The chip contains information about goods while the tag antenna is used for tag-to-reader communication as well as energy harvesting. Since the tag antenna is used for harvesting energy, it occupies most of the tag area. The tag antenna may be mounted on various size and shape objects that will alter the tag antenna properties such as impedance and resonance frequency.

In this research, a stacking technique of antenna was proposed to automatically adjust the length of a strip dipole antenna for compensating the changes in impedance and resonance frequency due to the tag bending. The proposed stacked strip dipole antenna was simulated on the various curvature surfaces and it was found that the impedance and the resonant frequency of the multiple layers strip dipole were slightly changed. Moreover, the proposed stacked strip dipole was fabricated on flexible printed circuit board (PCB) and mounted on various curvature surfaces and the impedance and resonance frequency are measured. The measured results agree very well with the simulated results.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2013

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ รวมทั้งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และ ข้อมูลต่าง ๆ ที่ทำให้มีเข้าใจเพิ่มขึ้นอย่างมากต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ และรวมทั้งคุณปณิฏฐาท์ อัจหาญ เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยดูแลเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรัก ความห่วงใย และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

จรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ฑ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย | 3 |
| 1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น..... | 3 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 3 |
| 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน | 3 |
| 1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย | 4 |
| 1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย..... | 4 |
| 1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... | 4 |
| 1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล | 4 |
| 1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล..... | 4 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 5 |
| 1.7 ปรัชญาหรือบรรณกรรม..... | 5 |
| 1.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี | 5 |
| 1.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านระบบอาร์เอฟไอดี..... | 13 |
| 1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ | 14 |

สารบัญ (ต่อ)

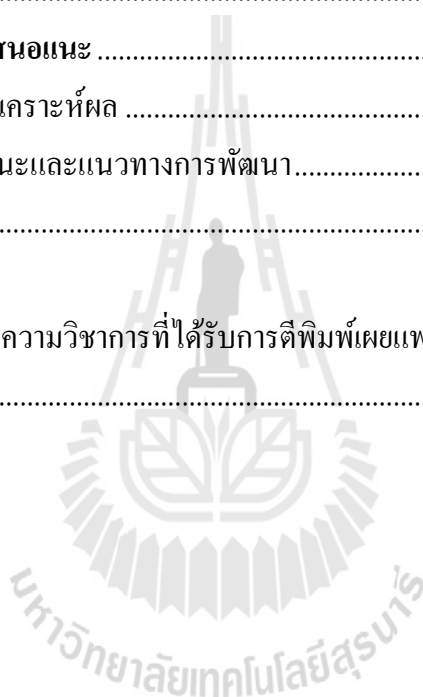
หน้า

| | | |
|----------|--|----|
| 2 | ทฤษฎีพื้นฐานระบบอาร์เอฟไอดี | 15 |
| 2.1 | บทนำ..... | 15 |
| 2.2 | องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี | 15 |
| 2.3 | คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี | 16 |
| 2.3.1 | ชนิดการส่งข้อมูล..... | 17 |
| 2.3.2 | ความจุข้อมูล | 17 |
| 2.3.3 | ความสามารถในการเขียนข้อมูล | 17 |
| 2.3.4 | แหล่งจ่ายพลังงาน | 18 |
| 2.3.5 | ความถี่ปฏิบัติการและระยะในการใช้งาน | 19 |
| 2.4 | การแมตซ์อิงพีแอนด์ซีสายอากาศและการถ่ายโอนกำลังงาน..... | 20 |
| 2.5 | สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น | 27 |
| 2.6 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน | 31 |
| 2.7 | สรุป | 41 |
| 3 | การออกแบบสายอากาศและผลการจำลองแบบ | 42 |
| 3.1 | บทนำ..... | 42 |
| 3.2 | การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น..... | 42 |
| 3.3 | การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น..... | 47 |
| 3.4 | ผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น..... | 52 |
| 3.4.1 | ค่าความถี่เรโซแนนซ์และอิมพีแดนซ์..... | 56 |
| 3.4.2 | อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น..... | 62 |
| 3.5 | สรุป | 70 |
| 4 | การสร้างสายอากาศต้นแบบและการวัดผล | 72 |
| 4.1 | บทนำ..... | 72 |
| 4.2 | การสร้างสายอากาศต้นแบบ | 72 |
| 4.3 | การวัดผลสายอากาศต้นแบบ | 75 |
| 4.3.1 | บาลัน | 75 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3.2 | การวัดผลค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ..... | 78 |
| 4.3.3 | การวัดผลค่าอิมพีแดนซ์ | 86 |
| 4.3.4 | การวัดผลอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น | 91 |
| 4.4 | สรุป | 99 |
| 5 | บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 100 |
| 5.1 | สรุปและวิเคราะห์ผล | 100 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา..... | 102 |
| | รายการอ้างอิง | 103 |
| | ภาคผนวก | |
| | ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ | 107 |
| | ประวัติผู้เขียน..... | 122 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 1.1 | จำนวนงานวิจัย RFID ที่ปรากฏในฐานข้อมูล IEEE.....2 |
| 2.1 | ค่ามุมความโค้งเทียบกับรัศมีความโค้งที่ความยาวของสายอากาศประมาณจากครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ 920 MHz39 |
| 3.1 | ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแบบหลายชั้นทำจากแผ่นวงจรพิมพ์แบบแผ่นบาง51 |
| 3.2 | ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนขณะตัดโค้ง61 |
| 3.3 | ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง.....61 |
| 3.4 | ค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง.....69 |
| 3.5 | ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง.....69 |
| 4.1 | ผลจากการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบ85 |
| 4.2 | ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดผลสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง.....86 |
| 4.3 | ผลจากการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ94 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 1.1 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศไดโพลแบบพับ (folded dipole) ที่เกิดการบิดงอของสายอากาศที่ระยะห่างและมุมการหักงอค่าต่าง ๆ 6 |
| 1.2 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศไดโพลที่เกิดการตัดโค้งของสายอากาศที่ค่าต่าง ๆ 7 |
| 1.3 | ผลการศึกษาการใช้ช่อง (Slit) แบบวงกลมทดแทนแบบสี่เหลี่ยม 7 |
| 1.4 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อมีการตัดโค้ง 8 |
| 1.5 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับการใช้งานบนแผ่นผ้าที่มีความโค้งต่างกัน 8 |
| 1.6 | ผลการออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแพตช์สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีการโค้งบนร่างกายมนุษย์ 9 |
| 1.7 | ผลการศึกษาออกแบบสายอากาศให้มีลักษณะเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษเป็นส่วนประกอบของสายอากาศ 10 |
| 1.8 | การศึกษาและออกแบบสายอากาศลักษณะคล้ายไดโพลร่วมกับ EBG 10 |
| 1.9 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เปรียบเทียบระหว่างสายอากาศที่มีความกว้างค่าต่าง ๆ 11 |
| 1.10 | ผลการศึกษาคูณสมบัติสายอากาศอาร์เอฟไอดี ด้วยการเพิ่มชั้นฟิล์มที่เป็นโลหะแม่เหล็ก 12 |
| 1.11 | ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยการเปลี่ยนค่า Permittivity และความหนา 13 |
| 2.1 | ส่วนประกอบระบบอาร์เอฟไอดี 15 |
| 2.2 | โครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี 16 |
| 2.3 | แหล่งจ่ายแรงดันกับความต้านทานแหล่งจ่าย R_S และ ความต้านทานโหลด R_L 21 |
| 2.4 | วงจรสมมูลของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับไอซี 24 |
| 2.5 | สายอากาศไดโพลแบบต่าง ๆ 28 |
| 2.6 | สายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด 29 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.7 | แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด เทียบกับความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน..... 31 |
| 2.8 | โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหรือไมโครสตริปไดโพล 32 |
| 2.9 | ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ที่ความกว้าง (W) ค่าต่าง ๆ 33 |
| 2.10 | ผลการจำลองแบบค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน 34 |
| 2.11 | ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ที่อัตราส่วนความยาวสายอากาศ (X) ค่าต่าง ๆ..... 35 |
| 2.12 | ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่อัตราส่วน ความยาวสายอากาศ (X) ค่าต่าง ๆ 36 |
| 2.13 | ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่อัตราส่วน ความยาวสายอากาศเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น (X) ค่าต่าง ๆ 36 |
| 2.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเทียบกับ ความยาวสายอากาศค่าต่าง ๆ 37 |
| 2.15 | แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าความโค้งกับความยาวส่วนโค้งรองรับมุมที่จุดศูนย์กลาง วงกลมและรัศมีวงกลม..... 38 |
| 2.16 | ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ที่มุมของความโค้งที่จุดศูนย์กลางวงกลมค่าต่าง ๆ 40 |
| 2.17 | ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น 40 |
| 2.18 | ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น 41 |
| 3.1 | วัสดุแผ่นแบนซ้อนทับกันขณะยึดตรงและตัดโค้ง 43 |
| 3.2 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 43 |
| 3.3 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 44 |
| 3.4 | ความยาวสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงขณะตัดโค้งที่มุมความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศ ไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 44 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.5 ความยาวสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงขณะตัดโค้งที่มุมความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศ ไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 | 45 |
| 3.6 ความยาวสัมพัทธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 | 45 |
| 3.7 ความยาวสัมพัทธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 | 46 |
| 3.8 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง | 48 |
| 3.9 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง | 49 |
| 3.10 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง | 50 |
| 3.11 แบบจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง | 52 |
| 3.12 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีผิวชั้นนอกปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง | 53 |
| 3.13 แบบจำลองสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีผิวชั้นนอกปิดทับด้วยกระดาษ ขาวบาง โดยมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS | 54 |
| 3.14 ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน หนึ่งชั้นวางบน โฟม EPS และปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง | 54 |
| 3.15 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วย กระดาษขาวบางวางติดกับวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS | 55 |
| 3.16 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนชั้นเดียวมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ | 56 |
| 3.17 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ | 57 |
| 3.18 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ | 57 |
| 3.19 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีวัสดุ ฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 58 |
| 3.20 ผลการจำลองแบบค่ารีเอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีวัสดุ ฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 58 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.21 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 59 |
| 3.22 ผลการจำลองแบบค่ารีเอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 59 |
| 3.23 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 60 |
| 3.24 ผลการจำลองแบบค่ารีเอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 60 |
| 3.25 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 63 |
| 3.26 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ YZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 64 |
| 3.27 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 65 |
| 3.28 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ YZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 66 |
| 3.29 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 67 |
| 3.30 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ YZ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ | 68 |
| 4.1 ส่วนปลายของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น | 73 |
| 4.2 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | 73 |
| 4.3 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น | 74 |
| 4.4 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น | 74 |
| 4.5 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแต่ละแบบหลังประกอบ | 75 |
| 4.6 โครงสร้างสายอากาศแบบสมมาตรและสายนำสัญญาณแบบไม่สมมาตร | 76 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|--|----|
| 4.7 | ค่ากระแสที่เกิดขึ้นกับสายอากาศไดโพลเมื่อถูกป้อนสัญญาณ โดยตรงจากสายโคแอกเซียล | 76 |
| 4.8 | บาลันแบบความยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น | 77 |
| 4.9 | บาลันสำหรับการวัดผลที่ทำจากสายโคแอกเซียล RG178 | 78 |
| 4.10 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นประกอบด้วยบาลัน | 79 |
| 4.11 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นประกอบด้วยบาลัน | 79 |
| 4.12 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นประกอบด้วยบาลัน | 80 |
| 4.13 | โฟม EPS แบบโค้งขนาดต่าง ๆ | 80 |
| 4.14 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหุ้มด้วยกระดาษขาวบางวางบน โฟม EPS แบบเรียบ | 81 |
| 4.15 | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหุ้มด้วยกระดาษขาวบางวางบน โฟม EPS แบบโค้ง ขนาดความโค้ง 60 องศาหรือรัศมี 126 มิลลิเมตร | 81 |
| 4.16 | ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ | 82 |
| 4.17 | ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ | 83 |
| 4.18 | ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ | 84 |
| 4.19 | ค่าความถี่เรโซแนนซ์เทียบกับมุมการตัดโค้งที่ได้จากการวัดค่า | 85 |
| 4.20 | ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วยกระดาษ ขาวบางมีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่างๆ | 87 |
| 4.21 | ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นปิดทับด้วยกระดาษ ขาวบางมีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่างๆ | 88 |
| 4.22 | ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นปิดทับด้วยกระดาษ ขาวบางมีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่างๆ | 89 |
| 4.23 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าริชิสแดนซ์ที่วัดได้ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ชนิดต่าง ๆ เทียบกับค่าความโค้งมุมต่าง ๆ | 90 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ที่วัดได้ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ชนิดต่าง ๆ เทียบกับค่าความโค้งมุมต่าง ๆ..... | 90 |
| 4.25 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของ สายอากาศต้นแบบ | 92 |
| 4.26 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนทำจากแผ่นทองแดงบาง 0.1 มิลลิเมตร | 93 |
| 4.27 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นขณะยึดตรง จากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ | 95 |
| 4.28 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นขณะตัดโค้ง มุมความโค้ง 150 องศา จากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ | 96 |
| 4.29 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะยึดตรง จากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ | 97 |
| 4.30 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะตัดโค้ง มุมความโค้ง 150 องศา จากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ | 98 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|------------------|---|---|
| A | = | magnetic vector potential |
| l | = | length |
| ϵ | = | dielectric constant |
| ϵ_{eff} | = | effective dielectric constant |
| ϵ_r | = | relative permittivity |
| η | = | intrinsic impedance |
| μ_0 | = | permeability of free space |
| ϵ_0 | = | permittivity of free space |
| E | = | electric field |
| H | = | magnetic field |
| P | = | power |
| I | = | current |
| V | = | voltage |
| R | = | resistance |
| Z | = | impedance |
| G | = | antenna gain |
| f | = | frequency |
| ω | = | angular frequency |
| λ | = | wavelength |
| IEEE | = | the Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IEICE | = | the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers |
| HPBW | = | half power beam width |
| PCB | = | printed circuit board |
| RFID | = | radio frequency identification |
| rms | = | root mean square |
| DC | = | direct current |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบระบุตัวตนอัตโนมัติ (Auto-ID) เป็นที่นิยมอย่างมาก ทั้งในอุตสาหกรรม การจัดซื้อ การขนส่ง การกระจายสินค้า รวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตต่าง ๆ ระบบระบุตัวตนอัตโนมัติ ได้ถูกนำไปใช้ในการจัดเก็บข้อมูลบุคคล สัตว์ สินค้า และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเริ่มจากการใช้ระบบรหัสแท่ง (Barcode) ซึ่งได้รับการยอมรับและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม ระบบรหัสแท่ง แม้จะมีราคาที่ถูก แต่ก็มีข้อด้อยในเรื่องความจุในการจัดเก็บข้อมูลที่ต่ำ และไม่สามารถแก้ไขข้อมูลได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลลงในชิปซิลิคอนที่เรียกว่า บัตรสมาร์ทการ์ด (Smart Card) แต่ก็ยังมีข้อด้อยที่ต้องอาศัยการสัมผัสของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งค่อนข้างไม่เหมาะสมนักในทางปฏิบัติ ดังนั้นการที่สามารถส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลและอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าในระยะห่างที่เหมาะสม น่าจะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า จากลักษณะที่ใช้สำหรับการส่งผ่านพลังงานและรับส่งข้อมูลของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจึงถูกเรียกว่า ระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification - RFID)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอาร์เอฟไอดี ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 (Finkenzerler K., 2003) โดยในช่วงหลังจากปี ค.ศ. 2000 เริ่มมีจำนวนงานวิจัยเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงหลังปี ค.ศ. 2005 เนื่องจากจำนวนบริษัทที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและขายอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่เพิ่มมากขึ้น โดยจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอาร์เอฟไอดีที่ปรากฏในฐานข้อมูล IEEE (IEEE Xplore, 2014) แสดงได้ดังตารางที่ 1.1

นอกจากนี้ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ระบบอาร์เอฟไอดี ได้รับการพัฒนาเป็นวิทยาการสาขาใหม่ที่อิสระ ซึ่งไม่ได้รวมกับกลุ่มพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีก่อนหน้านี้ โดยจะเป็นการนำองค์ความรู้จากวิทยาการด้านต่าง ๆ ทั้งเทคโนโลยีความถี่สูง เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ การปกป้องข้อมูล การเข้ารหัส การสื่อสารโทรคมนาคม และเทคโนโลยีการผลิต โดยสามารถจัดกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารด้านโทรคมนาคมได้หลายกลุ่ม อาทิ กลุ่มที่ศึกษาการพัฒนาออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายและเครื่องรับส่งอาร์เอฟไอดี กลุ่มที่ศึกษาแบบจำลองการแผ่กระจายคลื่นสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 จำนวนงานวิจัย RFID ที่ปรากฏในฐานข้อมูล IEEE

| ปี ค.ศ. | จำนวนงานวิจัย |
|---------|---------------|
| 2001 | 10 |
| 2002 | 21 |
| 2003 | 40 |
| 2004 | 112 |
| 2005 | 275 |
| 2006 | 621 |
| 2007 | 1,040 |
| 2008 | 1,144 |
| 2009 | 1,440 |
| 2010 | 1,593 |
| 2011 | 1,403 |
| 2012 | 1,284 |
| 2013 | 1,093 |

สำหรับการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะเป็นการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง ๆ เช่น การใช้งานบนวัสดุที่เป็นโลหะ (Foster, P.R., and Burberry, R.A., 1999) แก้ว พลาสติก หรือไม้ จึงทำให้การนำไปใช้งานขาดความยืดหยุ่น และมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นในการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับวัสดุชนิดต่าง ๆ รวมทั้งรูปทรงของวัสดุในแต่ละลักษณะการใช้งาน

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่มีกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่เกิดจากการนำเอาแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานบนวัสดุที่มีพื้นผิวโค้ง โดยจะเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ขณะนำไปใช้งานบนวัสดุที่มีพื้นผิวโค้ง เพื่อจะได้เทคนิคการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ที่เหมาะกับลักษณะพื้นผิววัสดุที่มีพื้นผิวโค้งขนาดต่าง ๆ โดยอาศัยการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าสายอากาศต้นแบบด้วยเครื่องมือวัด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่มีพื้นผิวโค้งขนาดต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อจะได้เทคนิคการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่เหมาะสมกับลักษณะพื้นผิววัตถุที่มีพื้นผิวโค้งขนาดต่าง ๆ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.2 ลักษณะของพื้นผิววัตถุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นเนื้อเดียวกันตลอดและมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่สามารถกำหนดได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3.3 ทำการออกแบบและทดสอบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีต้นแบบ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากพื้นผิวโค้งที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่นำไปใช้งาน

1.4.2 ออกแบบและทดสอบความสัมพันธ์ค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่นำไปใช้งาน

1.4.3 วิเคราะห์ผลเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่นำไปใช้งานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดผลด้วยเครื่องมือวัด

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุแบบโค้ง

- 3) ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF)
- 4) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) สำรวจบริษัทผู้จำหน่าย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) วิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุแบบโค้ง
- 3) ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF)
- 4) วิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ออกแบบ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

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

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel computer)
- 2) โปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม CST Microwave Studio™
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)
- 4) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer)
- 5) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzer)

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจบริษัทผู้จำหน่ายที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์ เพื่อใช้ประกอบการออกแบบสายอากาศ
- 3) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบสร้างและวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเกี่ยวกับค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศบนพื้นผิวโค้งค่าต่าง ๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองแบบและผลจากการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากพื้นผิวโค้งที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศ

1.6.2 ได้เทคนิคการออกแบบสายอากาศ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศที่สามารถลดผลกระทบจากการค้ดโค้ง

1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม

ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้ศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยอาศัยฐานข้อมูลต่าง ๆ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย ผลการสืบค้นที่ได้ จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยระบบอาร์เอฟไอดีที่ผ่านมา ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

1) งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

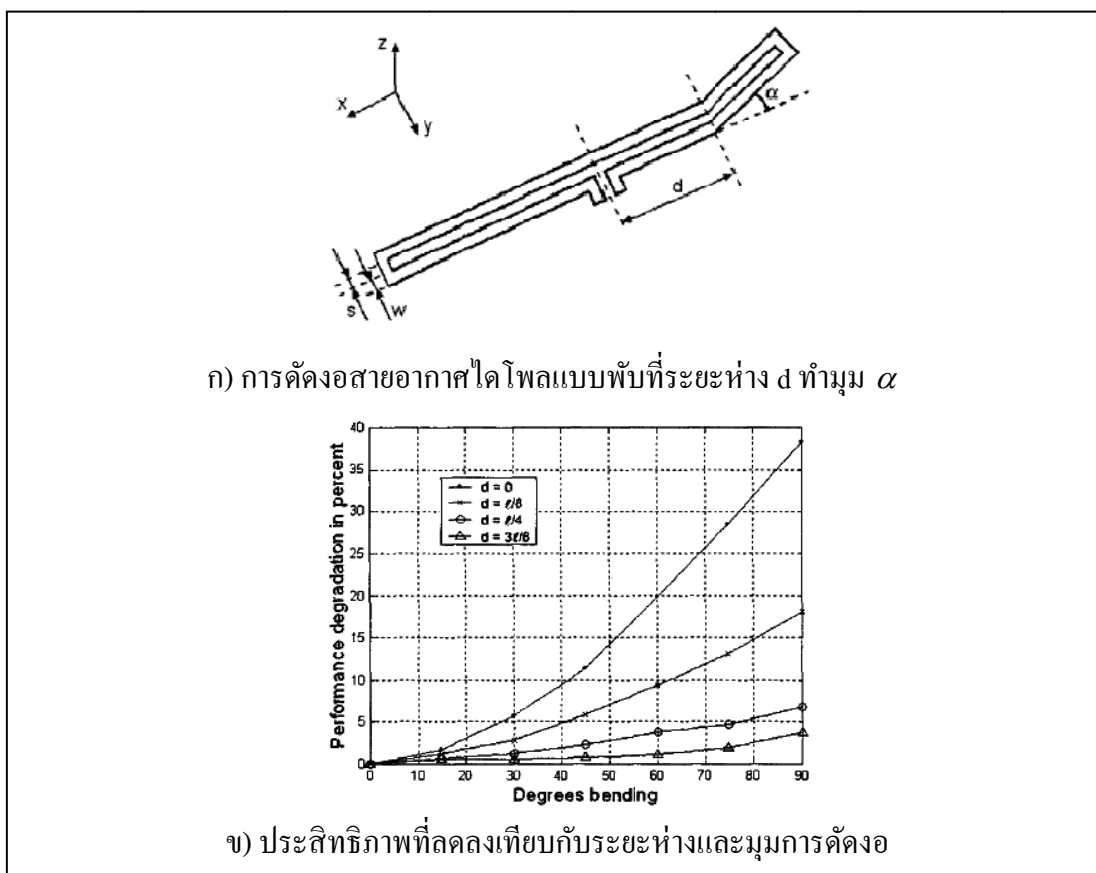
2) งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านระบบอาร์เอฟไอดี

ซึ่งข้อมูลในรายละเอียดงานวิจัยของแต่ละกลุ่มจะได้อธิบายต่อไปดังนี้

1.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

งานวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี มีค่อนข้างหลากหลายตามลักษณะประเภทของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี อาทิ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแผ่นแบนสำหรับการใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่ง เป็นต้น จึงขอยกตัวอย่าง รวมถึงบทสรุปของงานวิจัยในแต่ละหัวข้อที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัย ที่จะทำการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบกับคุณสมบัติของสายอากาศ ทั้งค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจากการนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งการออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่

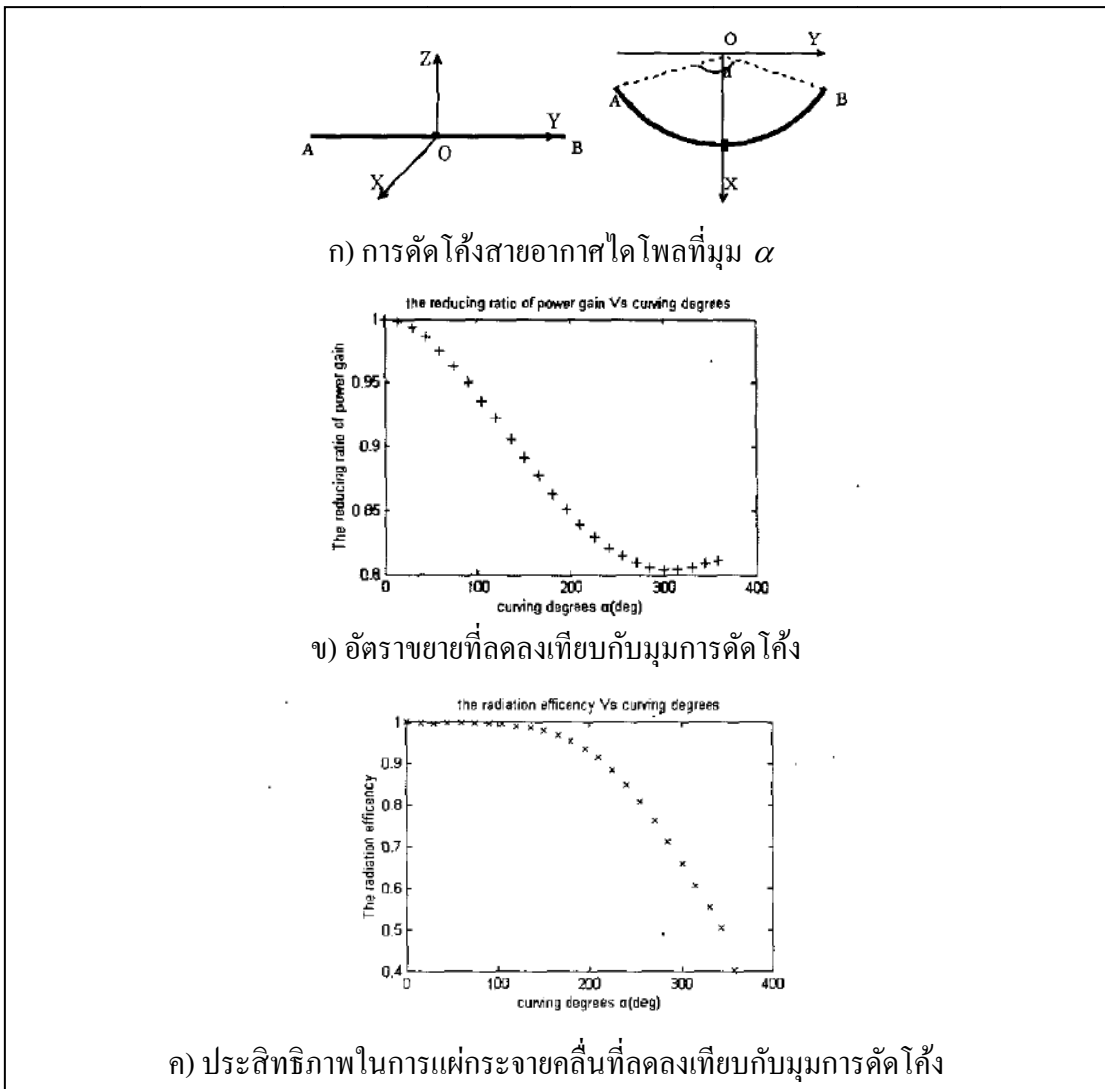
1. งานวิจัยหัวข้อ “Performance degradation of RFID system due to the distortion in RFID Tag antenna” ในปี ค.ศ. 2001 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศไดโพลแบบพับ (folded dipole) ที่เกิดการบิดงอของสายอากาศที่ระยะห่างและมุมการหักงอค่าต่าง ๆ (รูปที่ 1.1) โดยพบว่าการค้ดงอที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางที่มากขึ้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศทำให้มีค่าลดลง และมุมของการค้ดงอที่มากขึ้น จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพลดลง (Siden, J., Jonsson, P., Olsson, T., and Wang, G., 2001)



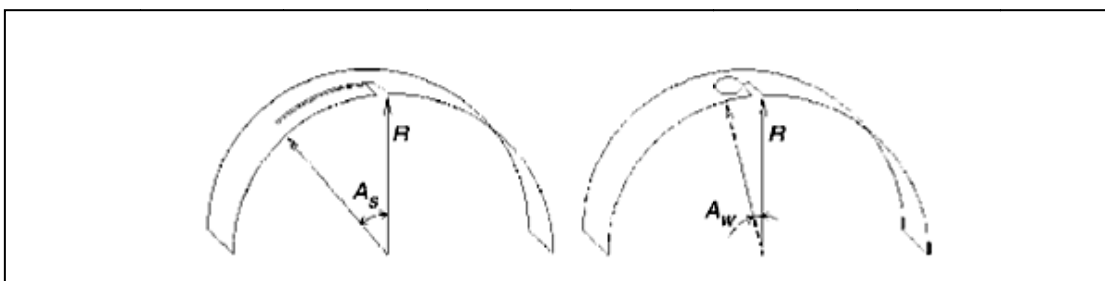
รูปที่ 1.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศไดโพลแบบพับ (folded dipole) ที่เกิดการบิดงอของสายอากาศที่ระยะห่างและมุมการหักงอค่าต่าง ๆ

2. งานวิจัยหัวข้อ “Study on the influence of curving of tag antennas on performance of RFID system” ในปี ค.ศ. 2004 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโค้งงอของสายอากาศไดโพลชนิดต่าง ๆ (รูปที่ 1.2) โดยพบว่าเมื่อสายอากาศมีการค้ดโค้งที่มากขึ้นจะทำให้ค่าอัตราขยายและประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศลดลง (Xiang Zhou, and Gang Wang, 2004)

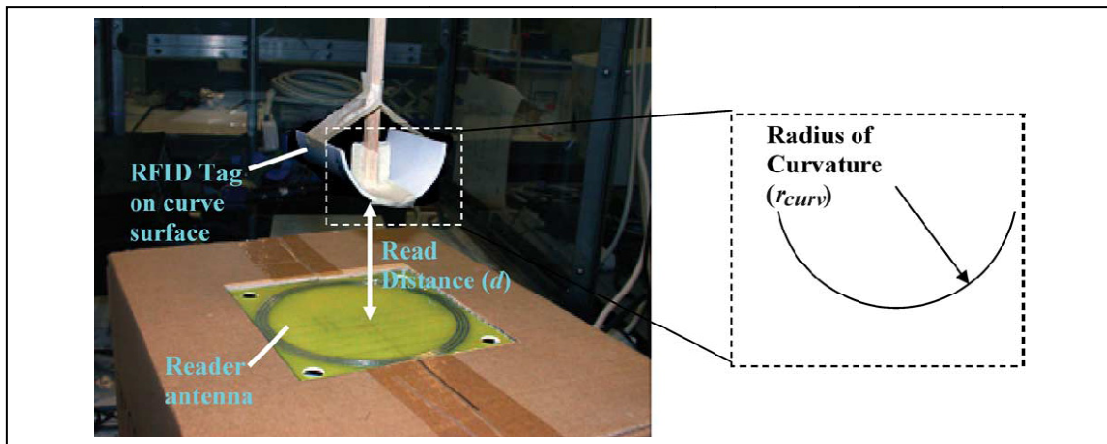
3. งานวิจัยหัวข้อ “Impedance-matching arrangement for microwave transponder operating over plurality of bent installations of antenna” ในปี ค.ศ. 2004 เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ช่อง (Slit) แบบวงกลมทดแทนแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อมีการค้ดโค้ง (รูปที่ 1.3) โดยสายอากาศที่ใช้ช่องแบบวงกลม จะมีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ย่านความถี่ 2.4GHz มากกว่า 6dB เมื่อทำการค้ดโค้งทำมุม 180 องศา (Tikhov, Y., and Won, J.H., 2004)



รูปที่ 1.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศไดโพลที่เกิดการดัดโค้งของสายอากาศที่ค่าต่าง ๆ

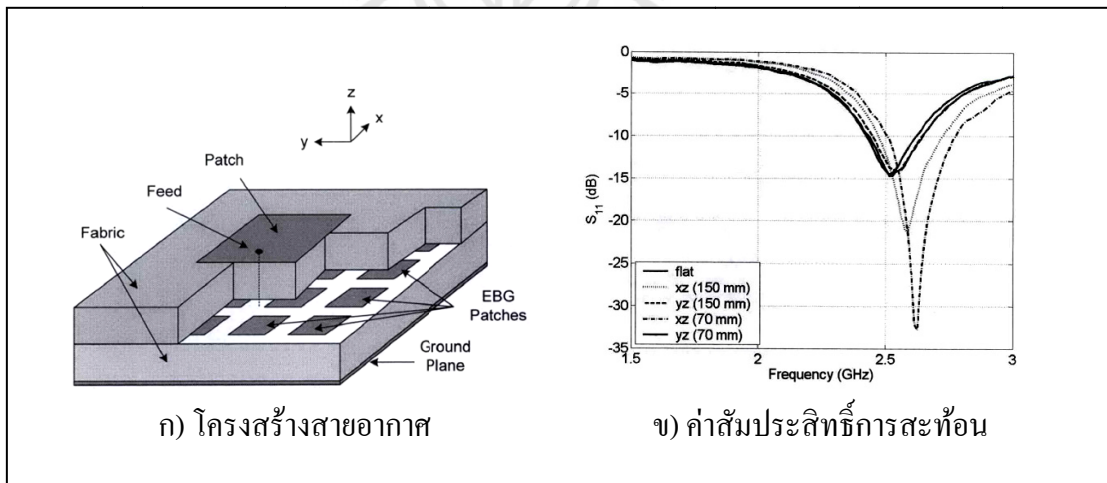


รูปที่ 1.3 ผลการศึกษาการใช้ช่อง (Slot) แบบวงกลมทดแทนแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 1.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อมีการโค้ง

4. งานวิจัยหัวข้อ “Performance of Printed Polymer-Based RFID Antenna on Curvilinear Surface” ในปี ค.ศ. 2007 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อมีการโค้ง (รูปที่ 1.4) ซึ่งพบว่าค่าอินดักแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการโค้งขดลวดตัวนำ (Leung, S.Y.Y., and Lam, D.C.C., 2007)

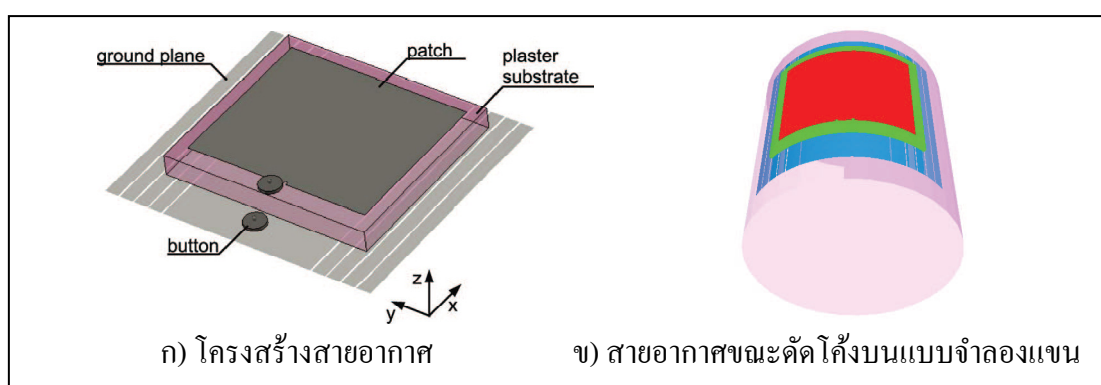


ก) โครงสร้างสายอากาศ

ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

รูปที่ 1.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอไฟอิดี สำหรับการใช้งานบนแผ่นผ้าที่มีความโค้งต่างกัน

5. งานวิจัยหัวข้อ “Textile Antennas: Effects of Antenna Bending on Input Matching and Impedance Bandwidth” ในปี ค.ศ. 2007 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับการใช้งานบนแผ่นผ้าที่มีความโค้งต่างกัน (รูปที่ 1.5) โดยผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดัดโค้งสายอากาศแบบแพทช์สี่เหลี่ยมที่ติดตั้งบนแผ่นผ้าแล้วทำการดัดโค้ง จะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น โดยมีการศึกษาการดัดโค้งทั้งในระนาบแนวตั้ง (XZ) และในระนาบแนวนอน (YZ) (Salonen, P., and Rahmat-Samii, Y., 2006)

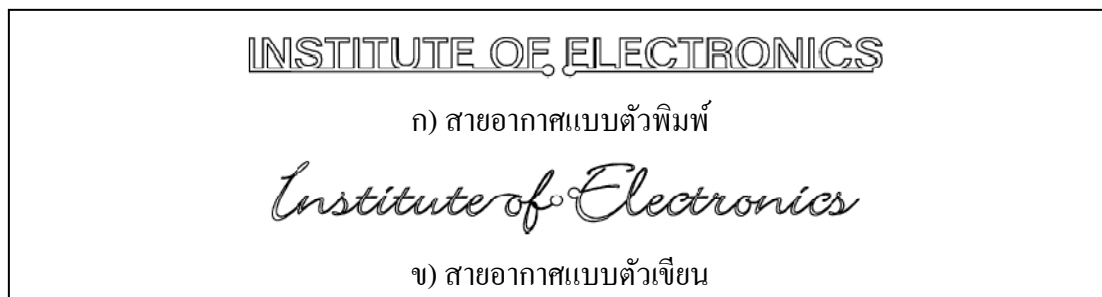


รูปที่ 1.6 ผลการออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแพทช์สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีการโค้งบนร่างกายมนุษย์

6. งานวิจัยหัวข้อ “Bendable Plaster Antenna for 2.45 GHz Applications” ในปี ค.ศ. 2010 เป็นการออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแพทช์สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีการโค้งบนร่างกายมนุษย์ โดยมีการเจาะช่องว่างที่ชั้นกราวนด์เพื่อให้สามารถโค้งงอได้ (รูปที่ 1.6) โดยจะทำให้ชั้นกราวนด์มีการเลื่อนเข้ามาติดกันขณะดัดโค้ง ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการดัดโค้งสายอากาศขณะใช้งานบนแขนมนุษย์ (Kellomaki, T., and Whittow, W.G., 2010)

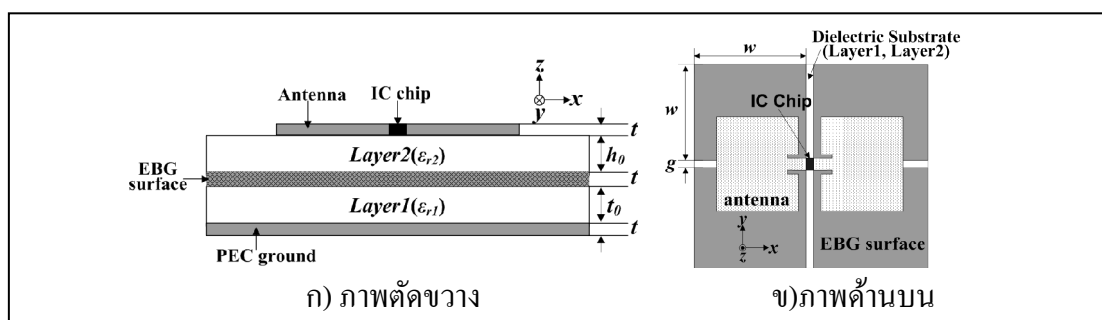
7. งานวิจัยหัวข้อ “Using Text as a Meander Line for RFID Transponder Antennas” ในปี ค.ศ. 2004 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยออกแบบสายอากาศให้มีลักษณะเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษเป็นส่วนประกอบของสายอากาศ และมีโครงสร้างเป็นสายอากาศสองชั้นมีจุดเชื่อมต่อกับวงจรรวมที่จุดกึ่งกลางเช่นเดียวกับสายอากาศไดโพล (รูปที่ 1.7) ในงานวิจัยได้มีการศึกษาผลของการลดขนาดของสายอากาศให้สั้นลงโดยการตัดไปมา ตามลักษณะรูปแบบของตัวอักษรที่นำมาใช้ ทั้งที่เป็นแบบหักมุมแบบสี่เหลี่ยม

(อักษรตัวพิมพ์ใหญ่) และการตัดโค้งไปมาเป็นเส้นโค้ง (อักษรแบบเขียน) (Keskilammi, M., and Kivikoski, M., 2004)

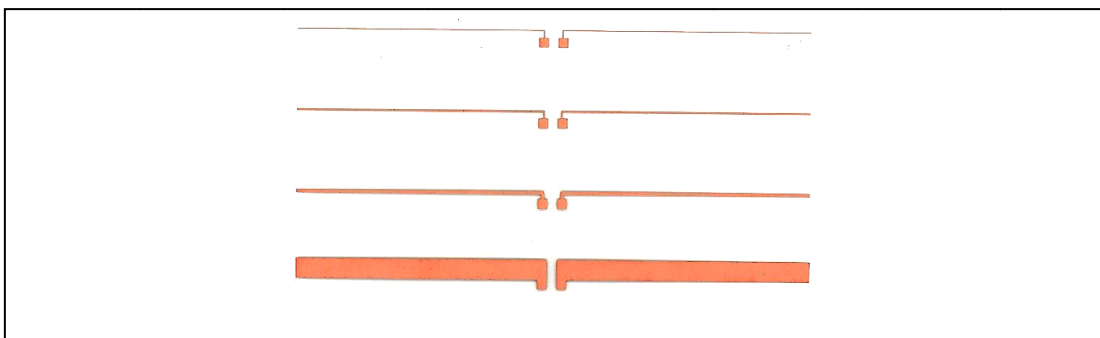


รูปที่ 1.7 ผลการศึกษาออกแบบสายอากาศให้มีลักษณะเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษเป็นส่วนประกอบของสายอากาศ

8. งานวิจัยหัวข้อ “Design of Novel Dipole-Type Tag Antennas using Electromagnetic Bandgap (EBG) Surface for Passive RFID Applications” .ในปี ค.ศ. 2007 เป็นการศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบแพทช์สี่เหลี่ยมเชื่อมต่อกันสองชิ้น มีลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบน (รูปที่ 1.8) โดยมีการเพิ่มชั้นของวัสดุฐานรองที่เรียกว่า EBG เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับการใช้งานบนวัสดุที่เป็นโลหะโดยผลของการเพิ่มชั้นวัสดุที่เป็น EBG จะช่วยลดผลกระทบของชั้นโลหะที่จะนำไปใช้งานที่มีต่อตัวสายอากาศ และทำให้อิมพีแดนซ์สายอากาศเหมาะกับวงจรรวมที่ใช้งานกับสายอากาศที่ได้ออกแบบมากขึ้น (Dong-Uk Sim, Dong-Ho Kim, Jae-Ick Choi, and Hyung-Do Choi., 2007)



รูปที่ 1.8 ผลการศึกษาและออกแบบสายอากาศลักษณะคล้ายไดโพลร่วมกับ EBG



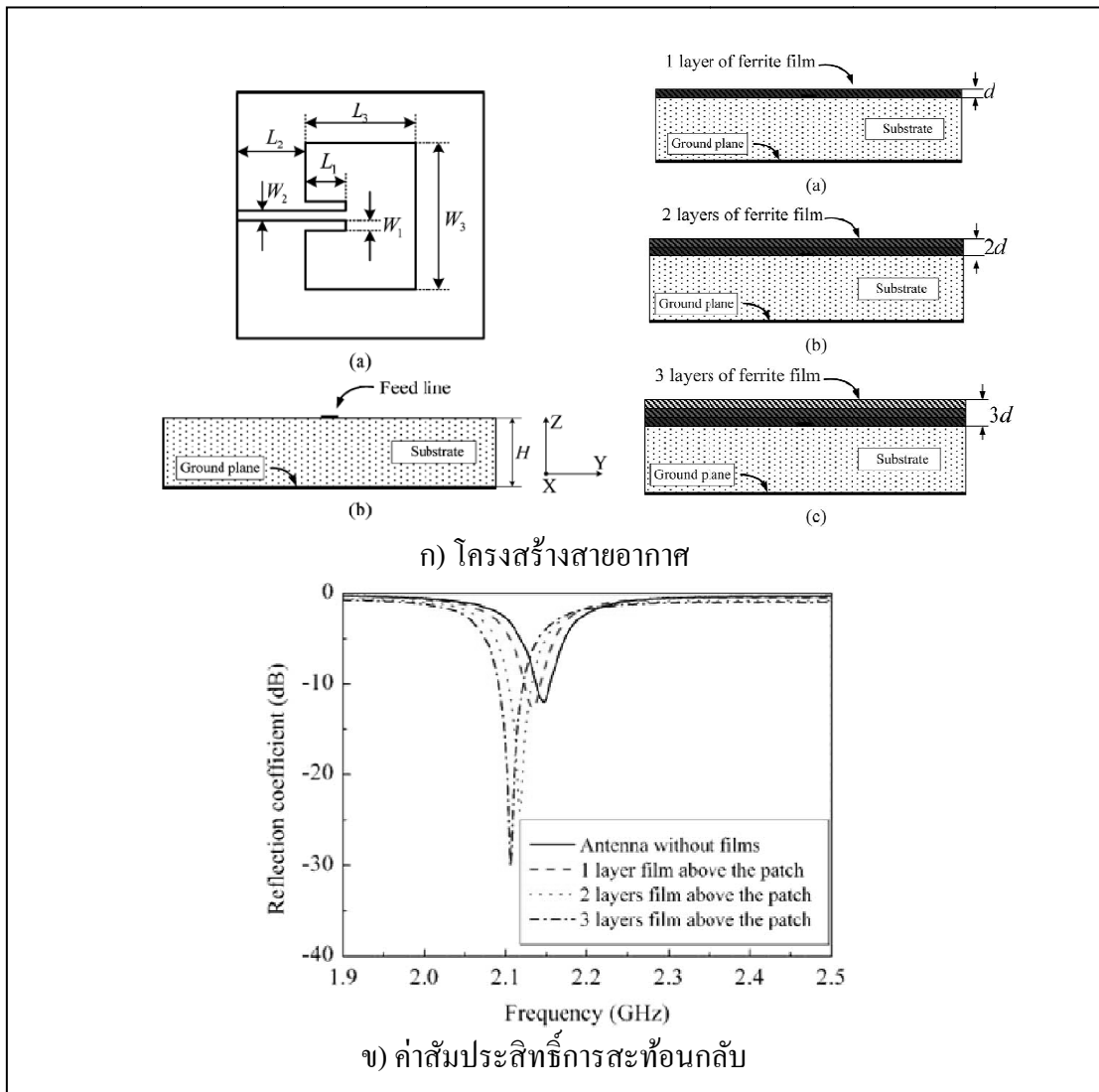
รูปที่ 1.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศที่มีความกว้างค่าต่าง ๆ

9. งานวิจัยหัวข้อ “Effects of Antenna Material on the Performance of UHF RFID Tags” ในปี ค.ศ. 2007 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเปรียบเทียบกันระหว่างสายอากาศที่มีความกว้างค่าต่าง ๆ และเปรียบเทียบการใช้วัสดุที่เป็นแผ่นทองแดงและการใช้ผงหมึกตัวนำที่มีส่วนผสมของเงิน (Silver Ink) ที่ความหนาต่าง ๆ (รูปที่ 1.9) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากผลการคำนวณค่าเชิงวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดผล พบว่าการใช้วัสดุทั้งสองชนิดให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้ (Syed, A., Demarest, K., and Deavours, D.D., 2007)

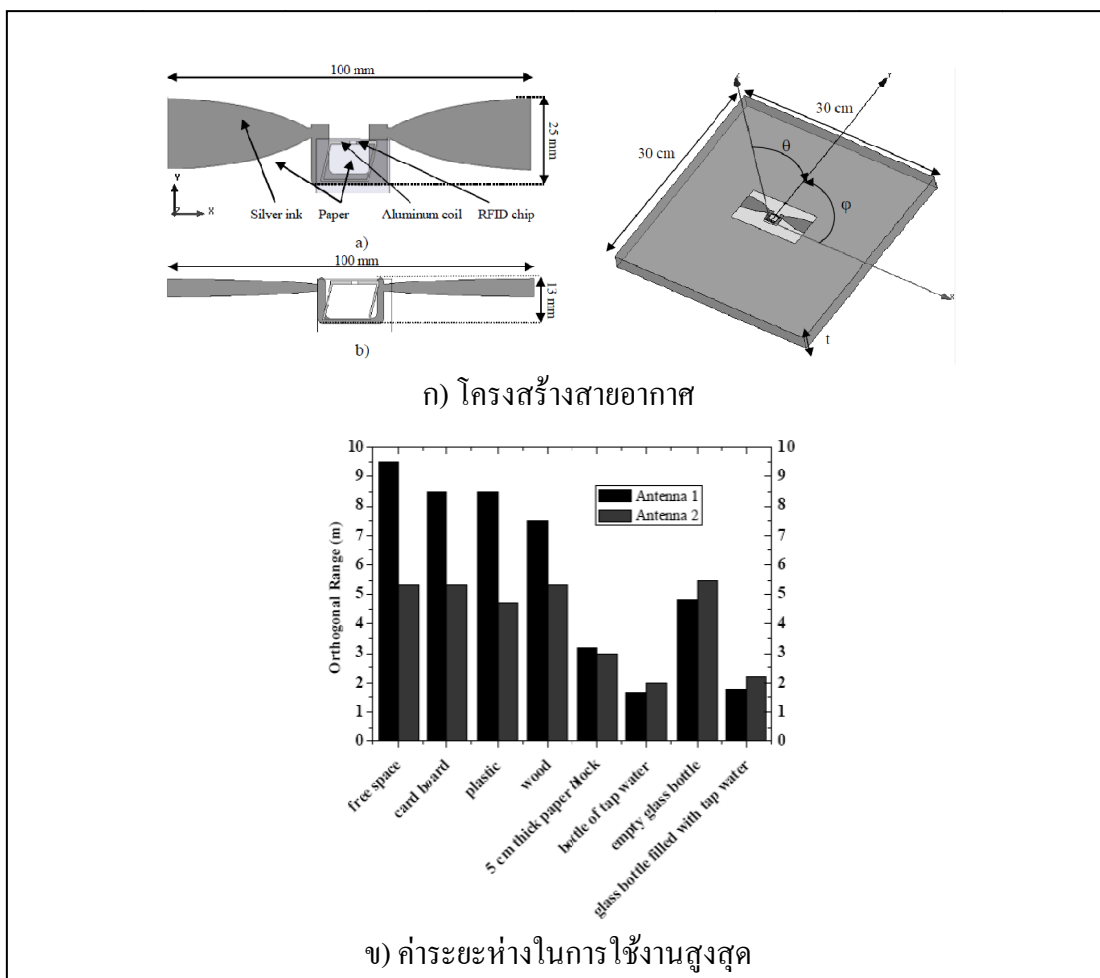
10. งานวิจัยหัวข้อ “Tunable Miniaturized Patch Antennas With Self-Biased Multilayer Magnetic Films” ในปี ค.ศ. 2009 เป็นการศึกษาคุณสมบัติสายอากาศอาร์เอฟไอดี โดยการเพิ่มชั้นฟิล์มที่เป็นโลหะแม่เหล็ก (รูปที่ 1.10) โดยทำการเปรียบเทียบผล ระหว่างสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม ที่ไม่มีการเคลือบผิว กับสายอากาศที่มีการเคลือบผิวด้านบนด้วยชั้นฟิล์มที่เป็นโลหะแม่เหล็ก ซึ่งผลการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มที่เป็นโลหะแม่เหล็กหลาย ๆ ชั้น จะทำให้สายอากาศมีการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์ไปที่ความถี่ที่ต่ำกว่าตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น และให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีกว่า (Guo-Min Yang, et al., 2009)

11. งานวิจัยหัวข้อ “RFID Tag Antennas with Stable Impedance to Mounted Material” ในปี ค.ศ. 2010 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมในการใช้งานระหว่างสายอากาศสองแบบสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนค่า Permittivity และความหนาต่าง ๆ (รูปที่ 1.11) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสายอากาศแบบแรก จะให้ผลตอบสนองต่อค่า Permittivity ที่เปลี่ยนไปมากกว่า นั่นคือ สายอากาศแบบแรกจะให้ผลการวัดค่าระยะห่างในการใช้งานสูงสุด ที่มากกว่า สำหรับค่า Permittivity ที่ต่ำ

กว่า และสายอากาศแบบที่สองจะให้ผลการวัดค่าระยะห่างในการใช้งานสูงสุด ที่ดีกว่าสายอากาศแบบแรกสำหรับค่า Permittivity ที่มีค่าสูง ๆ (Deleruyelle, T., Pannier, P., Alarcon, J., Egels, M., and Bergeret, E., 2010)



รูปที่ 1.10 ผลการศึกษาคุณสมบัติสายอากาศอาร์เอฟไอดีด้วยการเพิ่มชั้นฟิล์มที่เป็น โลหะแม่เหล็ก



รูปที่ 1.11 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีโดยการเปลี่ยนค่า Permittivity และความหนา

1.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านระบบอาร์เอฟไอดี

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านระบบอาร์เอฟไอดี จะเป็นการออกแบบสายอากาศให้มีอัตราขยายสูงเป็นหลัก เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดที่น้อยกว่าการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี นอกจากนี้งานวิจัยด้านสายอากาศแล้วนั้น ยังมีงานวิจัยด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบอาร์เอฟไอดีที่ค่อนข้างหลากหลาย ได้แก่ การออกแบบแบบจำลองระบบอาร์เอฟไอดี ระบบการปกป้องข้อมูล การศึกษาการเข้ารหัสข้อมูล การออกแบบวงจรรวมสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี การใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีบนร่างกายมนุษย์ การศึกษาด้านวัสดุศาสตร์ การนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นการใช้ความรู้ด้านต่าง ๆ นำมาปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะขอไม่กล่าวถึงในรายละเอียด

จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่มากมาย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการพิจารณาการออกแบบสายอากาศให้ลดผลกระทบจากการใช้งานกับวัสดุชนิดต่าง ๆ เป็นการเฉพาะ หรือเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น สำหรับสภาวะหรือเงื่อนไขต่าง ๆ รวมทั้งยังมีการศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบจากการตัดโค้ง โดยอาศัยการเพิ่มขึ้นวัสดุหรือชั้นกราวด์ ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานกับสภาวะที่ใช้ในการออกแบบเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาคูณลักษณะที่สำคัญต่าง ๆ ของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงขณะถูกนำไปใช้งาน โดยเฉพาะในการใช้งานกับวัสดุที่มีผิวโค้ง เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมในสภาวะที่มีการตัดโค้งที่ค่าต่าง ๆ กัน

1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 1 ภาคผนวก โดยบทที่ 1 เป็นบทนำ จะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย และปริทัศน์วรรณกรรม รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วย เนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบอาร์เอฟไอดี ได้แก่ ประวัติความเป็นมา ความรู้เบื้องต้นของระบบอาร์เอฟไอดี การแมตซ์อิมพีแดนซ์สายอากาศและการถ่ายโอนกำลังงาน ข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และการพัฒนาออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

บทที่ 3 และ 4 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองรวมทั้งวิเคราะห์ผล คุณลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งที่ได้จากการจำลองแบบ จากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงการสร้างสายอากาศต้นแบบ ผลที่ได้การวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดและการวิเคราะห์ผล เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลจากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จากการจำลองแบบและการวัดค่าที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งขอเสนอแนะในการทำศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่าง ๆ ในโอกาสต่อไป

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานระบบอาร์เอฟไอดี

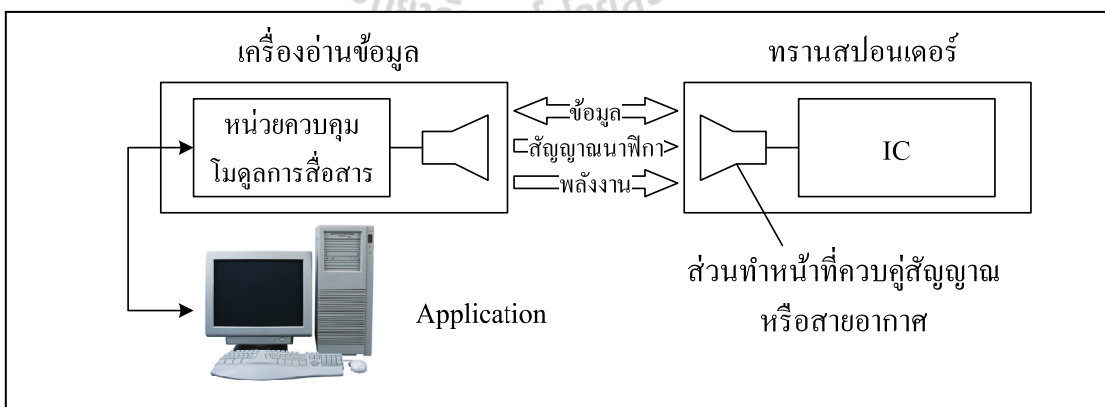
2.1 บทนำ

จากการที่ระบบอาร์เอฟไอดีมีการใช้งานที่กว้างขวาง รวมทั้งมีลักษณะปลีกย่อยอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบถึงการทำงาน ส่วนประกอบ และคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบอาร์เอฟไอดีในเบื้องต้นก่อน รวมทั้งได้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และทฤษฎีการแมตซ์ซิ่งและการส่งผ่านกำลังงาน ที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในเบื้องต้น

2.2 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดี โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน (รูปที่ 2.1) (Finkenzeller K., 2003)

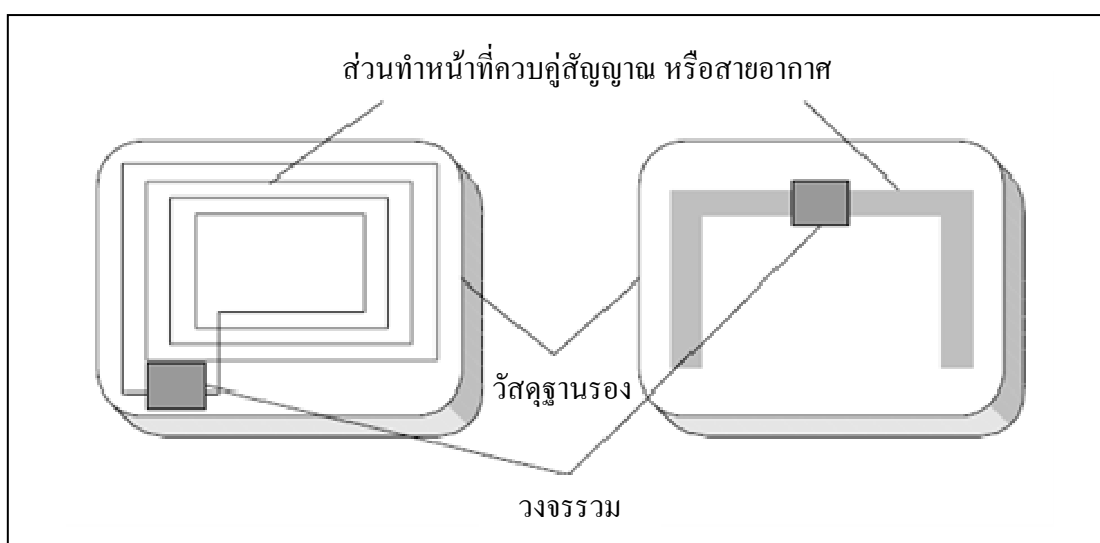
- เครื่องอ่านข้อมูล (Interrogator)
- ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) หรือ แผ่นป้าย (Tag)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบระบบอาร์เอฟไอดี

สำหรับเครื่องอ่านข้อมูล จะประกอบด้วย หน่วยควบคุม โมดูลการสื่อสาร และส่วนทำหน้าทีส่งผ่านสัญญาณแบบไร้สายไปที่แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ซึ่งอาจจะเป็นขดลวดหรือสายอากาศ นอกจากนี้ เครื่องอ่านข้อมูลโดยทั่วไป อาจจะมีส่วนเชื่อมต่อภายนอก เพื่อให้สามารถส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังระบบควบคุมส่วนอื่น ๆ ต่อไปได้

ทรานสปอนเดอร์ หรือ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยส่วนขดลวดหรือสายอากาศทำหน้าที่รับส่งสัญญาณ และส่วนวงจรรวม (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีทั่วไปที่ไม่มีแหล่งจ่ายกำลังงานหรือแบตเตอรี่ จะทำตัวเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ นั่นคือ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะเปิดใช้งานเฉพาะเมื่ออยู่ในพื้นที่ที่เครื่องอ่านสามารถส่งผ่านพลังงานไปถึงได้ พลังงานที่จำเป็นในการเปิดใช้งานแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะถูกส่งผ่านให้กับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีผ่านการควบคู่ (Coupling) หรือการกระจายกลับ (Backscattering) ไปพร้อม ๆ กับการส่งสัญญาณนาฬิกาและข้อมูล

2.3 คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดีในปัจจุบันมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากถูกผลิตจากผู้ผลิตที่หลากหลาย หากเราจะอธิบายถึงภาพรวมของระบบอาร์เอฟไอดี เราจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำแนกความแตกต่างของระบบอาร์เอฟไอดี ดังต่อไปนี้

2.3.1 ชนิดการส่งข้อมูล

ระบบอาร์เอฟไอดีทำงานรับส่งข้อมูลได้ในลักษณะพื้นฐานสองแบบคือ แบบขนาน แบ่งออกเป็น Full Duplex (FDX) และ Half Duplex (HDX) และระบบแบบอนุกรม (Sequential - SEQ) โดยระบบที่เป็นแบบขนาน FDX/HDX จะมีผลตอบสนองของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีส่งออกมาเมื่อสัญญาณจากเครื่องอ่านเดินทางมาถึง เนื่องจากสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ส่งไปยังสายอากาศที่เครื่องอ่าน จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่าน วิธีการรับส่งที่ใช้จะต้องสามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จากสัญญาณของเครื่องอ่านได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วการถ่ายโอนข้อมูลจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปยังเครื่องอ่าน จะอาศัยเทคนิคการปรับโหลด (Load modulation) โดยอาศัยคลื่นพาห่อย่อยที่เป็นฮาร์มอนิกเดียวกับความถี่ของคลื่นที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่าน

ในทางตรงกันข้ามระบบแบบอนุกรมจะอาศัยสัญญาณในช่วงที่เครื่องอ่านหยุดส่งสัญญาณในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะใช้สำหรับส่งข้อมูลกลับให้เครื่องอ่าน ข้อดีของการทำงานระบบแบบอนุกรม คือ การขาดหายของพลังงานในช่วงที่เครื่องอ่านหยุดส่งสัญญาณ ซึ่งต้องมีการจัดเก็บพลังงาน โดยอาศัยตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่

2.3.2 ความจุข้อมูล

ความจุข้อมูลของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยทั่วไปมีค่าตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ จนถึงระดับหลายกิโลไบต์ สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบหนึ่งบิต ถือว่าเป็นข้อยกเว้น เนื่องจากข้อมูลขนาดหนึ่งบิตก็เพียงพอสำหรับที่จะใช้ในการบอกว่า แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่ในระยะของเครื่องอ่านหรือไม่ ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการเฝ้าระวังหรือเพียงตรวจสอบการส่งสัญญาณ และจากการที่แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบหนึ่งบิตไม่จำเป็นต้องมีชิพอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบนี้ จึงสามารถผลิตได้ในราคาที่ถูกลงอย่างมาก ด้วยเหตุนี้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบหนึ่งบิต จึงถูกใช้ในระบบตรวจสอบทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Article Surveillance - EAS) เพื่อป้องกันสินค้าในร้านค้า และธุรกิจ

2.3.3 ความสามารถในการเขียนข้อมูล

ความสามารถในการเขียนข้อมูลไปยังแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้เราสามารถจำแนกชนิดของระบบอาร์เอฟไอดีในระบบแบบง่าย ๆ ข้อมูลที่บันทึกในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะเป็นหมายเลขอ้างอิงสินค้า ซึ่งจะถูกระบุที่มาจากโรงงานเมื่อมีการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่สามารถเขียนได้ เครื่องอ่านจะสามารถเขียนข้อมูลลงในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีได้ โดยมีวิธีที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสามแบบหลัก ๆ คือ

- เมมโมรีแบบ EEPROMs (electrically erasable programmable read-only memory) จะใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีแบบการเหนี่ยวนำควบคู่ (Inductive coupling) อย่างไรก็ตามจะมีข้อเสีย คือ มีการใช้พลังงานที่สูงในระหว่างดำเนินการเขียน และจำนวนครั้งในการเขียนที่จำกัด (โดยปกติสามารถเขียนซ้ำได้ประมาณ 100,000-1,000,000 ครั้ง)
- เมมโมรีแบบ FRAMs (ferromagnetic random access memory) มีการใช้งานที่เฉพาะโดยใช้พลังงานในการอ่านต่ำกว่า EEPROMs ประมาณ 100 ถึง 1000 เท่า แต่เนื่องจากปัญหาในการผลิต จึงทำให้การใช้งานยังไม่แพร่หลายมากนัก
- เมมโมรีแบบ SRAMs (static random access memory) ถือเป็นหน่วยจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ใช้กันในระบบย่านความถี่ไมโครเวฟ และมีความเสถียรเร็วมากในการเขียน แต่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าสำรองจากแบตเตอรี่ช่วยในการจัดเก็บข้อมูล

ในระบบที่สามารถตั้งโปรแกรมได้ วิธีการเขียนและอ่านหน่วยความจำและคำสั่งใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเขียนและอ่าน จะถูกควบคุมโดยชุดตรรกะภายในที่ให้บริการข้อมูลในเบื้องต้น ฟังก์ชันเหล่านี้จะถูกตรวจสอบโดยชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะ (State machine) ที่มีลำดับการทำงานที่ซับซ้อนมาก และสามารถใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะในการตรวจสอบการทำงานได้ แต่ผลเสียของชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะ คือ ไม่มีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชัน หรือโปรแกรมการทำงาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงในระดับวงจรของชิปซิลิคอน โดยในทางปฏิบัติหมายถึงต้องมีการออกแบบวงจรภายในไอซีใหม่ทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้แล้ว ยังมีแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่เก็บข้อมูลโดยอาศัยผลกระทบทางกายภาพ ได้แก่ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบอ่านอย่างเดียวโดยอาศัยคลื่นผิว (Surface wave) และแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบหนึ่งบิตที่สามารถยกเลิกการใช้งานได้ แต่จะไม่สามารถกลับมาเปิดใช้งานได้

2.3.4 แหล่งจ่ายพลังงาน

หนึ่งในคุณสมบัติสำคัญของระบบ อาร์เอฟไอดี คือ แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟ จะไม่มีแหล่งจ่ายพลังงานของตนเอง ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะได้มาจากสนามไฟฟ้าและหรือสนามแม่เหล็กจากเครื่องอ่าน แตกต่างจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอคทีฟ

ซึ่งมีแบตเตอรี่ภายในสำหรับจ่ายพลังงานทั้งหมดหรือบางส่วนของพลังงานสำหรับการทำงานของไอซีภายใน

2.3.5 ความถี่ปฏิบัติการและระยะในการใช้งาน

นอกจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความแตกต่างกันที่สำคัญของระบบอาร์เอฟไอดี คือ ความถี่ปฏิบัติการของเครื่องอ่าน ซึ่งจะส่งผลต่อวิธีการติดต่อสื่อสารและระยะการใช้งานของระบบ โดยระบบอาร์เอฟไอดีจะสามารถดำเนินการได้ที่หลายความถี่ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 135kHz จนถึงที่ 5.8GHz โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะถูกใช้ในการส่งผ่านสัญญาณและกำลังงาน ซึ่งจะทำให้ระยะการใช้งานมีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรจนถึงกว่า 15 เมตร

ความถี่ในการส่งสัญญาณของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีส่วนใหญ่ จะเป็นความถี่เดียวกับการส่งของเครื่องอ่าน แต่กำลังส่งของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะมีค่าน้อยกว่ากำลังส่งของเครื่องอ่านกว่าสิบเท่า โดยจะสามารถแบ่งเป็นย่านความถี่หลัก ๆ ได้เป็น (Finkenzeller K., 2003)

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency - LF) 30 - 300kHz
- ย่านความถี่สูง (High Frequency - HF) 3 - 30MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency - UHF) 300MHz - 3GHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ ตั้งแต่ 3GHz ขึ้นไป

นอกจากความถี่แล้ว เราสามารถแบ่งชนิดระบบอาร์เอฟไอดีโดยอาศัยระยะในการใช้งาน ซึ่งจะสัมพันธ์กับย่านความถี่ที่ใช้งานด้วย ได้แก่ ช่วงการควบคู่สนามใกล้ (close-coupling) และช่วงการควบคู่ระยะไกล (long-range) โดยระบบที่ระยะการใช้งานเป็นแบบควบคู่สนามใกล้ จะมีช่วงการใช้งานที่สั้นมากไม่เกิน 1 เซนติเมตร ซึ่งในการใช้งานแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะต้องถูกใส่เข้าไปในเครื่องอ่าน หรือวางบนพื้นผิวของเครื่องอ่านเพื่อให้ใช้งานได้ ในระบบควบคู่สนามใกล้ระบบจะใช้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตั้งแต่สัญญาณกระแสตรง จนถึงย่านความถี่ 30MHz เนื่องจากในการทำงาน ไม่ได้อยู่ในช่วงที่มีการแผ่กระจายคลื่น ทำให้การใช้งานส่วนใหญ่ จะเป็นแบบที่มีไอซีอยู่ภายใน จึงใช้พลังงานค่อนข้างสูง โดยจะพบมากในระบบที่ต้องการความปลอดภัยสูง โดยที่ระยะการใช้งานมีค่อนข้างจำกัด ตัวอย่างเช่น ระบบประตูอิเล็กทรอนิกส์แบบสัมผัส ระบบบัตรเครดิตที่ใช้ในการชำระเงิน เป็นต้น

ระบบอาร์เอฟไอดีที่สามารถใช้งานที่ระยะมากกว่า 1 เมตรขึ้นไป จะเรียกว่า ระบบควบคู่ระยะไกล (long-range systems) ระบบทั้งหมดจะดำเนินการโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงยิ่ง และย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยส่วนใหญ่ระบบดังกล่าวจะเรียกว่า ระบบการกระจายสะท้อนกลับ (back-scatter system) เนื่องจากลักษณะพื้นฐานการทำงานของระบบ และมีการใช้งาน

สายอากาศแทนขดลวดในการส่งผ่านข้อมูลและกำลังงานระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นปายอาร์เอฟไอดี

2.4 การแมตซ์อิมพีแดนซ์สายอากาศและการถ่ายโอนกำลังงาน

ระบบอาร์เอฟไอดี เป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ให้ความสนใจในเรื่องการสื่อสารข้อมูลและการส่งผ่านกำลังงานจากเครื่องอ่านไปยังแผ่นปายอาร์เอฟไอดีเป็นหลัก โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หลักในการนี้คือ ขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับระบบที่ใช้การควบคู่สนามใกล้ (ย่านความถี่ต่ำ : 30Hz-30MHZ) และสายอากาศสำหรับระบบที่ใช้การควบคู่ระยะไกล (ย่านความถี่สูงยิ่ง : 300MHZ-3GHZ) ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจถึงการที่สายอากาศจะสามารถรับและส่งผ่านกำลังงานนั้นไปให้กับวงจรภายในแผ่นปายอาร์เอฟไอดี ซึ่งการที่จะส่งผ่านกำลังงานระหว่างสายอากาศและวงจรรวมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ต้องเข้าใจถึงพื้นฐานของการแมตซ์อิมพีแดนซ์และการถ่ายโอนกำลังงาน

สำหรับการศึกษาและออกแบบให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าที่เหมาะสมนั้น จะเริ่มจากการศึกษาพื้นฐานการแผ่กระจายคลื่น โดยสัญญาณจะอยู่ในรูปกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบคาบ ที่ทำให้มีการแผ่กระจายคลื่นออกไปหรือจากคลื่นที่ได้รับจากสายอากาศ ดังนั้นแรงดันของสัญญาณที่เวลา (t) จะเขียนได้เป็นผลคูณของขนาดของแรงดัน (v_0) และฟังก์ชันคาบโคไซน์ได้ดังนี้

$$V(t) = v_0 \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

โดยที่ ω แทนความถี่เชิงมุมมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (มีค่าเป็น 2π คูณกับความถี่ f) และค่ากระแสที่กระจายไปที่โหลดจะเป็นผลคูณของแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน หากพิจารณาเฉพาะค่ารีซิสแตนซ์ของโหลด ก็กับการไหลของกระแสจะได้ว่า

$$P = I \cdot V = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

เพื่อให้ได้พลังงานเฉลี่ย (P_{av}) ของสัญญาณแบบคาบ เราสามารถพิจารณาค่ากำลังงานรวมตลอดช่วงเวลาหนึ่งรอบและหารด้วยระยะเวลาหนึ่งรอบ ผลที่ได้จะมีสัดส่วนเป็นครึ่งหนึ่ง นั่นคือ

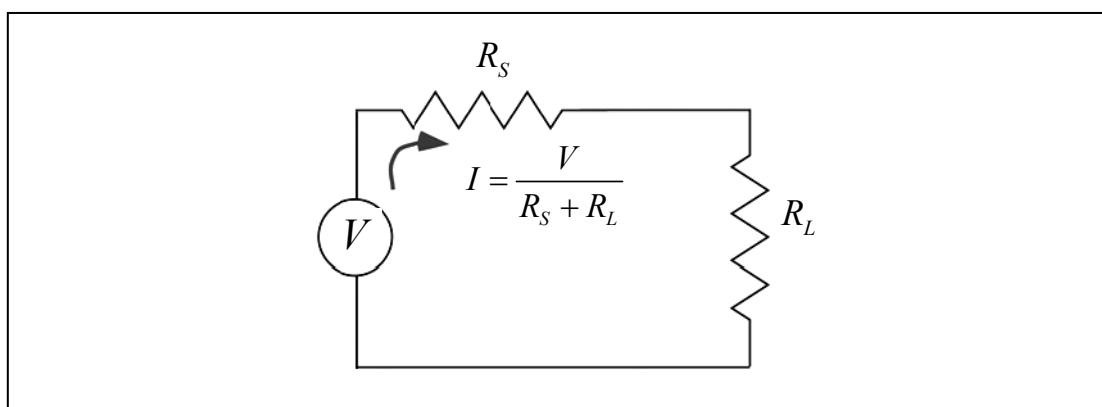
$$P_{av} = \frac{v_0^2}{2R} \quad (2.3)$$

บางครั้งมีการใช้งานค่าแรงดันรากเฉลี่ยยกกำลังสอง (root mean square : rms) แทนด้วย $v_{rms} = v_0 / \sqrt{2}$ เพื่อที่จะกำจัดสัดส่วนที่เป็นครึ่งหนึ่งจากสมการ 2.3 เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$P_{av} = \frac{v_{rms}^2}{R} \quad (2.4)$$

สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ดี จะต้องสามารถส่งผ่านกำลังงานที่ได้รับจากสายอากาศที่จะทำให้ไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเริ่มทำงานได้ โดยเราสามารถตรวจสอบได้ว่า กำลังงานที่ได้รับได้มีค่าเท่าใด สำหรับสายอากาศที่ทราบอัตราขยายโดยใช้ สมการของฟรีสส์ (Friis Equation) โดยที่ อัตราขยาย (G) และกำลังส่งของสายอากาศ (P) มีหน่วยวัดเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศ มีหน่วย dBi สำหรับกำลังงานที่ได้รับจากสายอากาศส่ง (P_{TX}) โดยสายอากาศรับ (P_{RX}) หากเราทราบอัตราขยายสายอากาศทั้งคู่และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง (r) เราสามารถเขียนสมการทั่วไปได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 (Balanis, C., 2005)

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 แหล่งจ่ายแรงดันกับความต้านทานแหล่งจ่าย R_S และความต้านทานโหลด R_L

โดยที่กำลังงานที่แท้จริงที่ส่งผ่านจากสายอากาศไปยังไอซี อาจจะมีการสูญเสียไประหว่างทางได้ ดังนั้นวิธีการที่คำนวณกำลังงานไฟฟ้า จะถูกส่งผ่านไปยังโหลดหรือไอซีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหรือกระแส จะมีข้อจำกัดบางอย่างที่เชื่อมโยงกับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสที่สามารถจ่ายได้ ในกรณีของสายอากาศ จะใช้รูปแบบของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายเป็นแบบเชิงเส้น เมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมีเฉพาะค่าความต้านทานแบบรีซิสแตนซ์เพียงอย่างเดียว จะพบว่ากำลังงานสูงสุดจะถ่ายโอนให้กับความต้านทานโหลดที่มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Dobkin, D. M., 2008) โดยค่ากระแสที่ไหลสำหรับวงจรในรูปที่ 2.3 สามารถหาได้มาจากกฎของโอห์ม :

$$I = \frac{V}{R_S + R_L} \quad (2.6)$$

กำลังงานที่กระจายไปที่ความต้านทานแบบรีซิสแตนซ์ (P_S, P_L) แต่ละตัวหาได้จาก

$$P_S = \frac{V_S^2}{2R_S}; P_L = \frac{V_L^2}{2R_L} \quad (2.7)$$

แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในตัวรีซิสแตนซ์แต่ละตัวมีค่าเป็น IR จากกฎของโอห์ม โดยที่กระแสก็จะเหมือนกันทั้งที่แหล่งจ่ายและ โหลด เราสามารถแสดงได้เป็น

$$P_S = \frac{I^2 R_S}{2}; P_L = \frac{I^2 R_L}{2} \quad (2.8)$$

แทนค่ากระแสจากสมการ (2.6) ลงในสมการแสดงกำลังงาน (2.8) เราจะพบว่า

$$P_L = \frac{R_L V^2}{2(R_S + R_L)^2} = \frac{1}{R_S} \frac{\left(\frac{R_L}{R_S}\right) V^2}{2\left[1 + \left(\frac{R_L}{R_S}\right)\right]^2} \quad (2.9)$$

โดยที่กำลังงานที่โหลดสำหรับความต้านทานแหล่งจ่ายที่คงที่ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อความต้านทานแหล่งจ่ายและความต้านทานโหลดมีค่าเท่ากัน เมื่อเราเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแหล่งจ่าย ขณะที่ความต้านทานโหลดคงที่ การถ่ายโอนกำลังงานที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อความต้านทานแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเหมือนกัน

แต่ในความเป็นจริงแล้วอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดจะมีค่ารีแอคแตนซ์ที่เป็นส่วนของค่าเชิงซ้อน ที่อาจเป็นค่าอินดักแตนซ์หรือค่าคาปาซิแตนซ์หรือทั้งคู่ มีค่าเป็น $Z = R + jX$ ดังนั้น สมการกระแส สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบเดียวกัน แต่เพิ่มส่วนที่เป็นค่าเชิงซ้อนเข้ามาได้เป็น

$$I = \frac{V}{(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)} \quad (2.10)$$

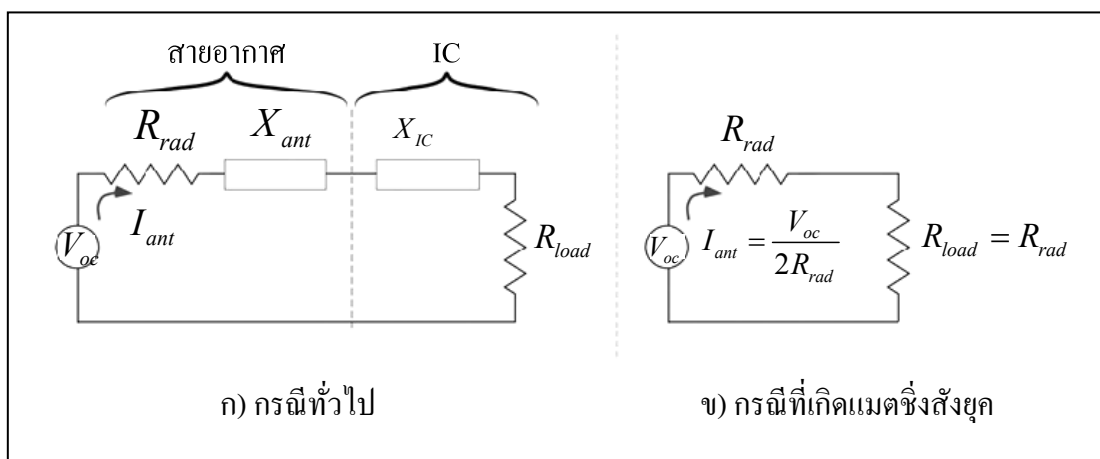
สำหรับค่ารีซิสแตนซ์ จะไม่สนใจว่ามุมหรือเฟสของกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร และกำลังงานที่ได้จะมีผลเฉพาะต่อขนาดของกระแสเขียนได้เป็น

$$P_L = \frac{|I|^2 R_L}{2} = \frac{V^2 R_L}{2|(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)|^2} = \frac{V^2 R_L}{2|Z_S + Z_L|^2} \quad (2.11)$$

โดยที่สัญลักษณ์ $| \cdot |$ หมายถึง โมดูลัสของปริมาณเชิงซ้อน ซึ่งก็คือ ความยาวของเวกเตอร์ในระนาบเชิงซ้อน ค่ากำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อตัวส่วนมีค่าน้อย นั่นคือ ตัวส่วนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อส่วนจินตภาพมีค่าเป็น 0 สำหรับค่าจริงของแหล่งจ่ายและโหลดที่คงที่ กล่าวคือ เมื่อค่ารีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่าย (X_S) และค่ารีแอคแตนซ์โหลด (X_L) มีการหักล้างค่ากันหมด การหักล้างนี้สามารถเกิดขึ้นได้โดยการให้ค่ารีแอคแตนซ์มีเครื่องหมายแตกต่างกัน นั่นคือ ถ้าโหลดเป็นค่าคาปาซิทีฟ (ค่ารีแอคแตนซ์เป็นลบ) แหล่งจ่ายต้องเป็นค่าอินดักทีฟ (ค่ารีแอคแตนซ์เป็นบวก) และมีขนาดเท่ากัน เมื่อส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเหมือนกัน และส่วนค่าเชิงซ้อนมีขนาดเท่ากัน แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม ค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองจะเป็นค่าสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugates) ที่แตกต่างกันเฉพาะเครื่องหมายของส่วนจินตภาพ ดังนั้นสถานะของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น จะเรียกว่า การแมตชิ่งสังยุค (conjugate matching)

เราสามารถพิจารณาสาขาอากาศของแผ่นปายอาร์เอฟไอดีเป็นแหล่งแรงดันแบบวงจรเปิด (V_{oc}) เชื่อมต่อผ่านความต้านทานเชิงซ้อน ประกอบด้วยความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (R_{rad})

และค่าอินดักแตนซ์หรือค่าคาปาซิแตนซ์ เรียงรวมกันว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ (X_{ant}) เราสามารถพิจารณาอิมพีแดนซ์ของไอซีในแบบเชิงเส้น โดยมีค่าความต้านทานแบบเชิงซ้อนเป็น (R_{load}) และ (X_{IC}) ดังรูปที่ 2.4 (ก)



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับไอซี

การถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายหรือสายอากาศ และค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดหรือไอซีมีค่าเป็นแมตซ์ซิงส์ยัค ซึ่งจะเป็นกรณีที่แสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ดังนั้นกำลังงานที่ได้รับ จะถูกส่งผ่านไปยังไอซี เมื่ออยู่ในเงื่อนไขที่มีการแมตซ์ซิงส์ยัคเกิดขึ้น นั่นคือ กำลังงานที่กระจายไปที่โหลดจะมีค่าเท่ากับกำลังงานที่ได้รับจากค่าความต้านทานสายอากาศ แทนด้วย ค่ากำลังงานที่ใช้ได้ (Available Power : P_{Av})

$$P_{Av} = \frac{I_{ant}^2 R_{load}}{2} = \frac{V_{oc}^2}{8R_{rad}} \quad (2.12)$$

เมื่อการแมตซ์ซิงส์ที่สมบูรณ์แบบไม่มีอยู่จริง กำลังงานที่ส่งผ่านไปให้ไอซีจึงมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณไว้ เราสามารถใช้สมการ (2.11) ในการหาอัตราส่วนของกำลังงานที่ส่งผ่านไปให้กับไอซีต่อกำลังงานสูงสุดที่ได้รับจากค่าความต้านทานสายอากาศ หรือค่ากำลังงานที่ใช้ได้ นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่าน (τ) จะหาได้จาก

$$\tau = \frac{P_L}{P_{Av}} = \frac{V_{oc}^2 R_{load}}{2|Z_{ant} + Z_{load}|^2} \frac{8R_{rad}}{V_{oc}^2} = \frac{4R_{load}R_{rad}}{|Z_{ant} + Z_{load}|^2} \quad (2.13)$$

ค่ากำลังงานถ่ายโอนไปยังไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และทำให้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีมีระยะห่างในการอ่านสูงสุดที่ $\tau = 1$ และเมื่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่านมีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้ระยะห่างที่อ่านได้จะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่าน τ ดังนั้นปัญหาของการออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จึงเป็นปัญหาของการสร้างสายอากาศที่เชื่อมต่อกันได้ตรงกับอิมพีแดนซ์ของไอซี

หลังจากเราพิจารณาในเรื่องการถ่ายโอนพลังงานที่ได้รับจากสายอากาศมายังอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซีแล้ว ยังจำเป็นต้องพิจารณาเรื่องของการส่งสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกลับไปยังเครื่องอ่าน ซึ่งจะพิจารณาย้อนกลับระหว่างอุปกรณ์วงจรรวมและสายอากาศ ซึ่งจะสามารถพิจารณาได้เป็นค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและสายนำสัญญาณ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงอุปกรณ์วงจรรวมที่เชื่อมต่อกับอิมพีแดนซ์ของโหลดหรือสายอากาศ โดยสามารถวัดอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นการกำหนดอัตราส่วนของคลื่นที่สะท้อนกลับ (V_0^-) กับคลื่นที่ตกกระทบ (V_0^+) ที่สายอากาศหรือโหลด สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Bogatin, E., 2011)

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{line} - Z_{load}}{Z_{line} + Z_{load}} \quad (2.14)$$

โดยที่ Z_{line} และ Z_{load} เป็นอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ และอิมพีแดนซ์ของโหลดหรือสายอากาศ ซึ่งแรงดันและกระแสที่ผ่านสายนำสัญญาณ จะเป็นฟังก์ชันของระยะทาง (z) จากโหลด แสดงได้ดังนี้

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{-j\beta z} = V_0^+ (e^{-j\beta z} + \Gamma e^{j\beta z}) \quad (2.15)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-j\beta z} - V_0^- e^{-j\beta z}) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} - \Gamma e^{j\beta z}) \quad (2.16)$$

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

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์การกระจาย (Scattering Matrix) โดยที่ S_{NM} จะแทนค่ากำลังงานที่ส่งผ่านจากพอร์ต M ไปยังพอร์ต N นั่นคือ พารามิเตอร์ S_{11} ของเมตริกซ์การกระจายจะมีค่าสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ ที่สามารถหาได้จากอัตราส่วนของคลื่นที่สะท้อนกลับกับคลื่นที่ตกกระทบที่สายอากาศ กรณีที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์แบบจะทำให้ $\Gamma = 0$ และการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ไม่สมบูรณ์ที่สุดมีค่า $\Gamma = 1, -1$ ซึ่งจะเกิดขึ้นกรณีที่อิมพีแดนซ์ที่โหลดเป็นอิมพีแดนซ์แบบลัดวงจร (short load) และโหลดแบบเปิด (open load) ซึ่งกำลังงานที่มีการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อของสายอากาศถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญ และมีความสัมพันธ์กับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ค่ากำลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด (P_{Av}) จะเป็นผลรวมของกำลังงานที่เกิดขึ้นที่โหลดที่เป็นสายอากาศ (P_T) และกำลังงานเฉลี่ยที่สะท้อนกลับ (P_R) โดยค่ากำลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลด จะเป็นการวัดค่ากำลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลดที่เป็นสายอากาศ ให้กำลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

$$P_T = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.17)$$

และกำลังงานที่สะท้อนกลับเป็นสัดส่วนกับกำลังงานที่เกิดขึ้น โดยคูณกับตัวประกอบของ $|\Gamma|^2$ แสดงได้โดย

$$P_R = -|\Gamma|^2 \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.18)$$

นั่นคือ

$$P_{Av} = P_T + P_R = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma|^2] \quad (2.19)$$

เนื่องจากกำลังงานที่ส่งไปยังโหลดเป็นสัดส่วนกับ $(1-|\Gamma|^2)$ โดยค่าที่สามารถยอมรับได้ของ Γ อยู่ที่ประมาณ 10% จึงจะสามารถคำนวณค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับได้ ส่งผลให้ Γ มีค่าเท่ากับ 0.3162 เมื่อโหลดไม่แมตช์กับสายส่งและจะเกิดการสะท้อนกลับที่โหลด ซึ่งการวัดค่าสามารถวัดให้อยู่ในรูปของค่าแรงดันของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) โดยสามารถหาได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งกับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่ง หรือคำนวณได้จากสมการ

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.20)$$

ค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นการวัดคุณลักษณะของการแมตช์อิมพีแดนซ์อีกแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์เหมือนกับค่าของ Γ หรือ S_{11} โดยค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Return Loss} = -10 \log |S_{11}|^2 = -20 \log (|\Gamma|) \quad (2.21)$$

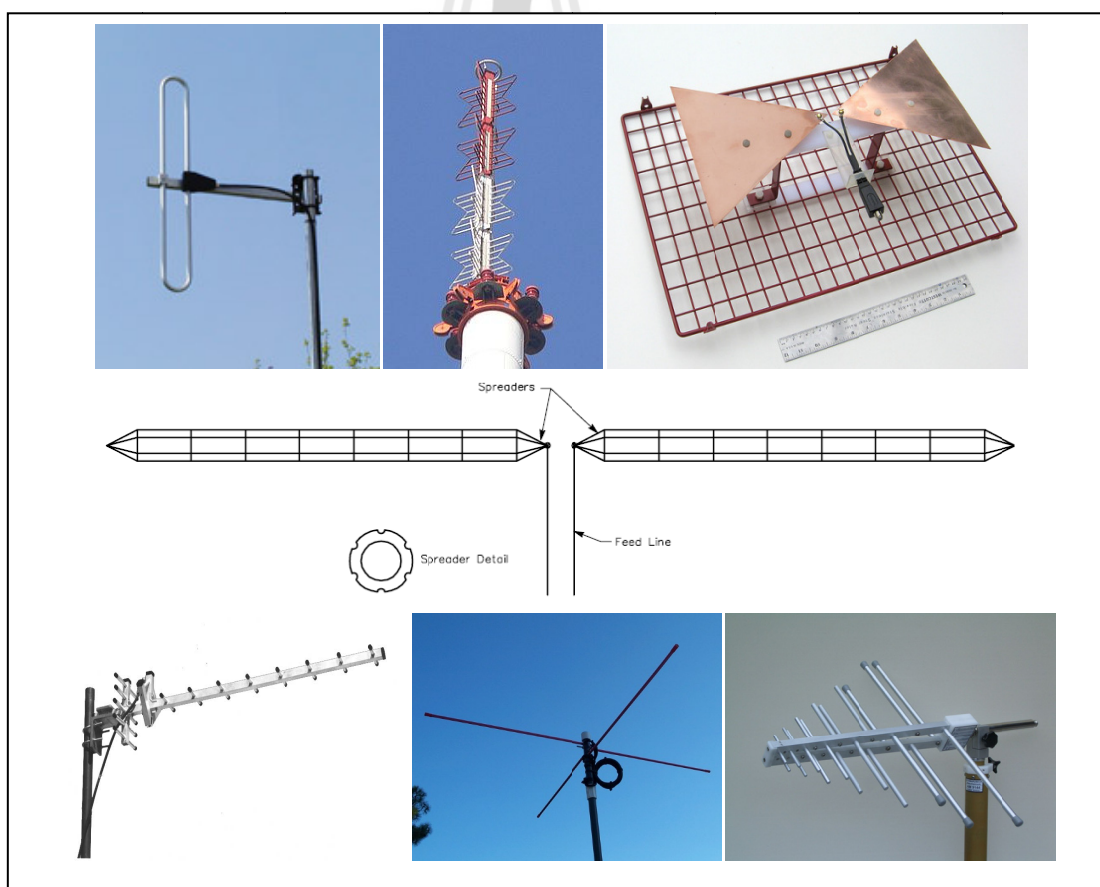
เราสามารถบอกได้ว่า สายอากาศที่ได้ออกแบบจะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ใดได้จากการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศมีการแมตช์กับสายนำสัญญาณ ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีเฉพาะค่าจริง (คาร์ริซิแตนซ์) หรือ $Z_{in} = R + j*0$ ในกรณีนี้ ค่าแรงดันและกระแสจะมีเฟสตรงกันที่จุดเชื่อมต่อสายอากาศ ทำให้การแมตช์สายอากาศกับสายนำสัญญาณทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากไม่ต้องนำค่ารีแอกแตนซ์มาพิจารณา กล่าวคือไม่จำเป็นต้องปรับค่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ และหากเราพิจารณาค่า S_{11} ของสายอากาศที่มีหน่วยเป็น dB จะพบว่าจะมีขนาดติดลบที่สูงมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ นั่นคือ สายอากาศจะมีการแผ่กระจายคลื่นที่ดีที่ความถี่นั้น ๆ กล่าวโดยสรุปได้ว่า สายอากาศที่มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีนั้น จะต้องมีการอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์

2.5 สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น

สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยสายอากาศไดโพลทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นตัวนำสองชิ้นที่เหมือนกัน เช่น ลวดโลหะหรือแท่งโลหะ ซึ่งมักจะมีลักษณะทั้งสองข้างสมมาตรกัน

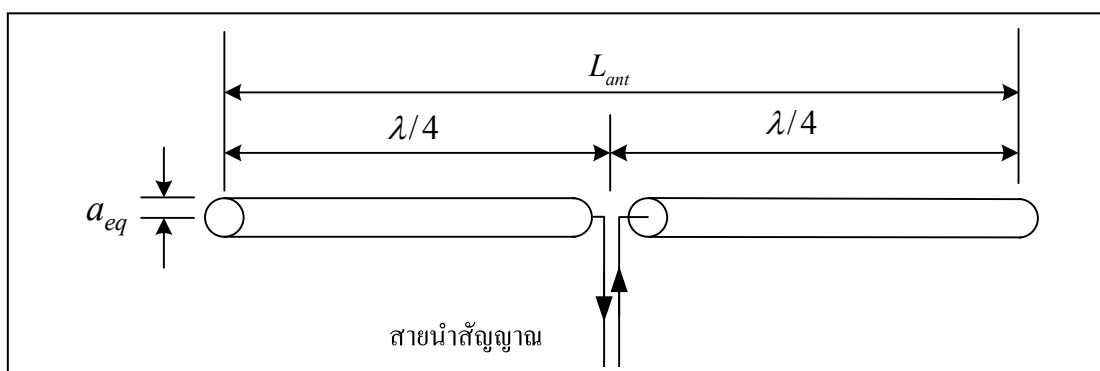
สายอากาศไดโพลมีการพัฒนาให้มีรูปแบบที่แตกต่างกันหลายแบบ เช่น สายอากาศไดโพลแบบพับ (folded dipole) สายอากาศปีกค้างคาว (batwing antenna) สายอากาศรูปโบว์ (bow-tie antenna) และสายอากาศไดโพลแบบกรง (cage dipole) นอกจากนี้แล้ว ยังถูกนำมาประยุกต์เป็นสายอากาศรูปแบบอื่น ๆ ที่มีการใช้งานที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น สายอากาศแบบยาเกิ (Yagi antenna) สายอากาศแบบหมุนไขว้ (turnstile antenna) สายอากาศไดโพลแบบล็อกพีริอดิก (Log-periodic dipole antenna : LPD) เป็นต้น

สายอากาศไดโพลถูกคิดค้นโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Heinrich Hertz Rudolph ในปี ค.ศ. 1886 เพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นวิทยุ (Kraus, J. D., 1988) สายอากาศไดโพลถือว่าเป็นสายอากาศพื้นฐานสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อกล่าวถึงสายอากาศไดโพล โดยทั่วไปจะหมายถึงสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น (half-wave dipole) ที่มีขนาดความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยมีจุดป้อนสัญญาณอยู่ที่จุดกึ่งกลางสายอากาศ (center-fed)



รูปที่ 2.5 สายอากาศไดโพลแบบต่าง ๆ

ในการศึกษาสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น เราจะพิจารณาค่าความยาวของสายอากาศ ได้จากการพิจารณาค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายอากาศ โดยให้สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น ประกอบด้วยเส้นลวดสองเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น $2a_{eq}$ ที่มีความยาวทั้งหมดมีค่าเป็น L_{ant} ที่มีขนาดความยาวเป็นครึ่งหนึ่งความยาวคลื่น วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.6 โดยจุดกึ่งกลางของสายอากาศไดโพล จะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายนำสัญญาณเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ โดยที่กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังหัวหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมาจากอีกหัวหนึ่งของไดโพล



รูปที่ 2.6 สายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด

โดยทั่วไปจากทฤษฎีการออกแบบสายอากาศไดโพลจะพบว่า ความยาวของสายอากาศ (L_{ant}) จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่น (λ_0) ในอากาศว่างที่ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศที่ต้องการ นำสายอากาศไปใช้ แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศ จะมีค่าที่น้อยกว่าความเร็วของคลื่นในอากาศว่าง ทำให้ขนาดความยาวของสายอากาศจะมีค่าน้อยกว่า โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น

$$L_{ant} = \frac{1}{2} \lambda_d = \frac{1}{2} k_f \lambda_0 = \frac{1}{2} k_f \frac{c}{f} \quad (2.22)$$

- โดยที่ λ_d แทนความยาวคลื่นในตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศ
 λ_0 แทนความยาวคลื่นในอากาศว่าง
 c แทนความเร็วแสงในอากาศว่าง (299,792,458 เมตรต่อวินาที)
 k_f แทนค่าคงที่ที่ใช้ปรับขนาด

นอกจากนี้แล้ว สายอากาศไดโพลยังมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นค่ารีแอคแตนซ์กระจาย (distributed reactance) ที่ประกอบด้วยค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์รวมอยู่ด้วย ทำให้ค่า k_f โดยทั่วไปจะมีค่าเป็น 0.95 สำหรับสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวดที่รัศมีมีขนาดเป็น 0.000001 เท่าของความยาวคลื่น จะมีค่า k_f มีค่าประมาณ 0.981 และสำหรับสายอากาศไดโพลที่มีรัศมีของเส้นลวดเป็น 0.01 เท่าของความยาวคลื่นค่า k_f จะลดลงไปมีค่าประมาณ 0.915

สำหรับการหาค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด เราสามารถใช้วิธีการหาผลรวมของอนุกรมที่ขยายออก (series expansion) ในการคำนวณค่าของความต้านทานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น ($R_{\lambda/2}$) ได้เป็น (Kraus, J. D., 1988)

$$\begin{aligned} R_{\lambda/2} &= \frac{Z_0}{4\pi} [\ln(2\pi\gamma) - \text{Ci}(2\pi)] \\ &= \frac{Z_0}{4\pi} \text{Cin}(2\pi) \\ &= \frac{Z_0}{4\pi} \left(\frac{(2\pi)^2}{2!2} - \frac{(2\pi)^4}{4!4} + \frac{(2\pi)^6}{6!6} - \dots \right) \\ &\approx 73.079\Omega; \end{aligned} \tag{2.23}$$

โดยที่ $\text{Cin}(x) = \ln(\gamma x) - \text{Ci}(x)$ และ γ เป็นค่าคงที่ของออยเลอร์ (Euler constant) มีค่าเป็น 1.781 ($\gamma = e^\gamma$) สำหรับ Cin และ Ci เป็นฟังก์ชันอินทิกรัลของโคไซน์สามารถเขียนในรูปผลรวมของอนุกรมที่ขยายออกได้เป็น

$$\text{Cin}(x) = \int_0^x \frac{1 - \cos(v)}{v} dv = \frac{x^2}{2!2} - \frac{x^4}{4!4} + \frac{x^6}{6!6} - \dots \tag{2.24}$$

ค่าความต้านทานหรือค่ารีซิสแตนซ์ที่คำนวณได้ ยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ทั้งหมด เนื่องจากยังมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจินตภาพหรือค่ารีแอคแตนซ์ประกอบอยู่ด้วย ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ สามารถพิจารณาใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบคลื่นเต็ม (full wave analysis techniques) เช่น ระเบียบวิธีเชิงโมเมนต์ (Method of Moments : MOM) (Gibson, W. C., 2008) ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite-difference time-domain) (Yee, K., 1966) เทคนิคการอินทิเกรชันแบบจำกัด (Finite Integration Technique : FIT) (Clemens, M. and Wieland, T., 2001) ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแต่โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า หรือ เทคนิคระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

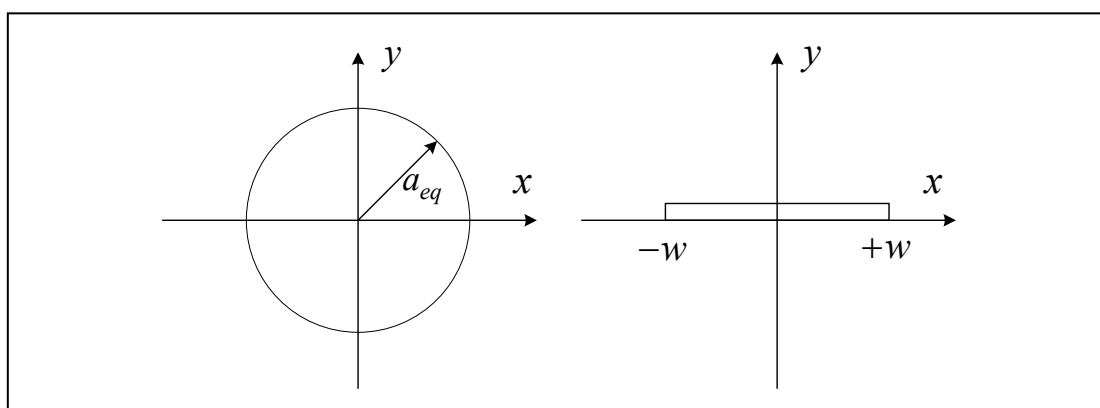
วิธีการต่าง ๆ อาทิ วิธีการเหนี่ยวนำคลื่น โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (the induced EMF method) (Otto, D., 1969) วิธีการสมการอินทิกรัลของเฮลเลน (the Hallen's integral equation : HIE) (Kevanishvili, G.S., 2000) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิควิธีการจะมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิค การอินทิเกรชันแบบจำกัดร่วมกับ Perfect Boundary Approximation (PBA)[®] ในโปรแกรม CST Microwave Studio[™] (CST Microwave Studio, 2009) ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน เพื่อแสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่จะทำการศึกษาและออกแบบ รวมทั้งใช้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย

2.6 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จากการใช้งานบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ จะทำการศึกษายาอากาศบนพื้นผิวโค้งทรงกระบอก โดยจะศึกษาผลกระทบที่มีต่อสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความโค้งของพื้นผิวทรงกระบอกที่ค่าความโค้งหรือรัศมีของความโค้งมีขนาดต่าง ๆ กัน และเพื่อให้สามารถศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสายอากาศบนวัตถุที่มีผิวโค้งได้ จำเป็นต้องมีสายอากาศต้นแบบ สำหรับใช้ในการทดสอบและวัดผล ที่สามารถดัดโค้งไปตามพื้นผิววัตถุได้ง่าย จึงได้เลือกใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนมาใช้เป็นสายอากาศต้นแบบในการศึกษา เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถพัฒนาสร้างสายอากาศต้นแบบในการทดสอบและวัดค่าขณะดัดโค้งตามพื้นผิวทรงกระบอกได้

สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนนั้น จะเป็นการพัฒนาโดยอาศัยพื้นฐานของสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด ที่มีความยาวทั้งหมดมีค่าเป็น L_{ant} วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.6



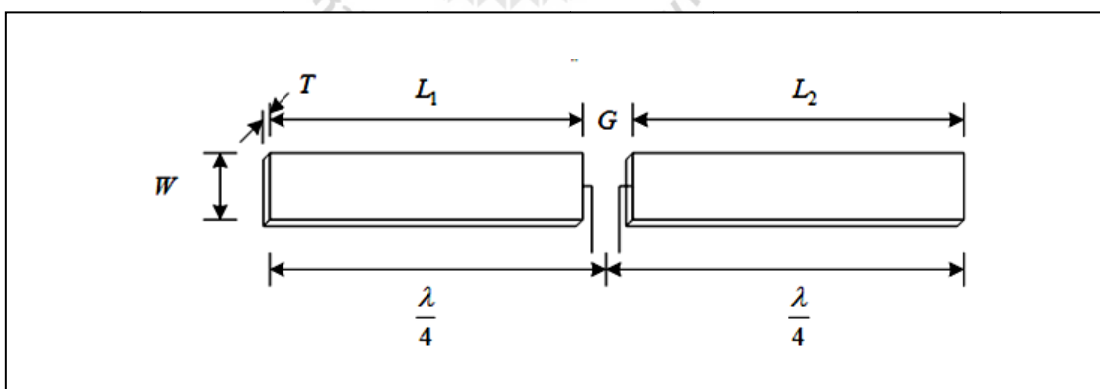
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด เทียบกับความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

จากนั้นพิจารณาค่าความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน (รูปที่ 2.7) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางหรือรัศมีของสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด (a_{eq}) เทียบกับความกว้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน (w) ได้จาก (Butler, C.M., 1982)

$$a_{eq} = \frac{2w}{4} \quad (2.25)$$

โดยทั่วไปสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของสายอากาศ สายอากาศที่มีลักษณะเป็นแถบสี่เหลี่ยมแคบ ๆ (โดยทั่วไปมีความกว้างน้อยกว่า $0.05\lambda_0$) จะเรียกว่า สายอากาศแบบไมโครสตริป (microstrip antenna) และสายอากาศที่มีความกว้างมากขึ้นจะเรียกว่า สายอากาศแบบแพทช์ (patch antenna) สำหรับสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนทั้งสองแบบ ความกว้างของสายอากาศจะมีผลกระทบต่อความถี่ โชนานซ์และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยที่ความกว้างของสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่มีขนาดใหญ่กว่า จะช่วยเพิ่มกำลังงานในการแผ่กระจายคลื่น โดยการทำให้ความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศลดลง รวมทั้งทำให้มีแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นด้วย (Jamaluddin, M. H., Rahim, M. K A, Aziz, M.Z.A.A.; and Asrokin, A., 2005)

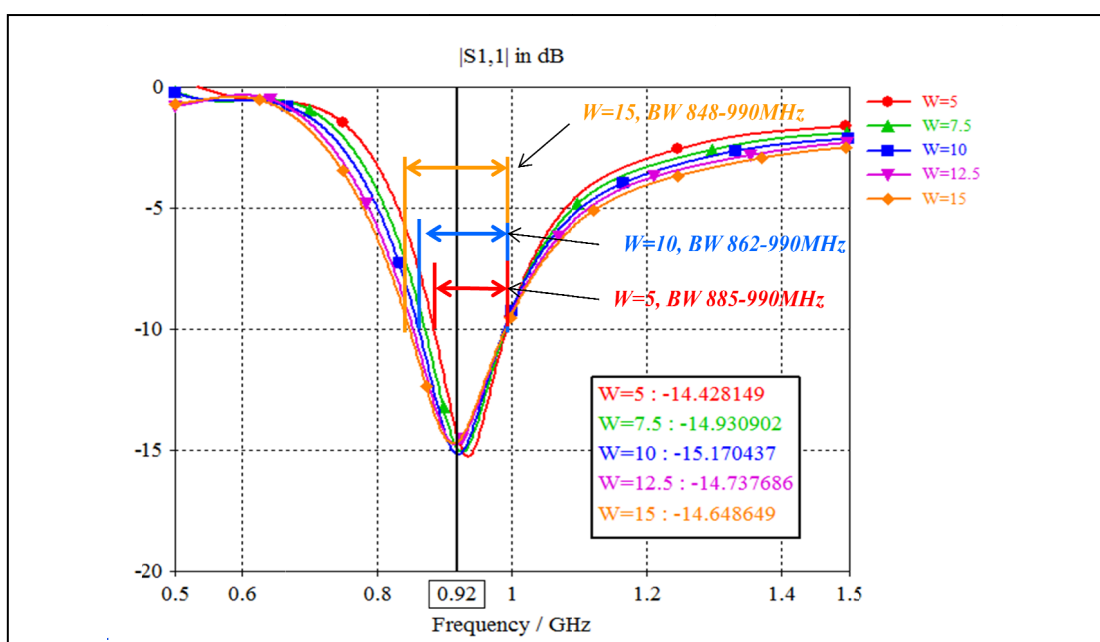
สำหรับการศึกษายสายอากาศไดโพลแบบไมโครสตริป หรือสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน เบื้องต้นออกแบบให้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหรือไมโครสตริปไดโพล

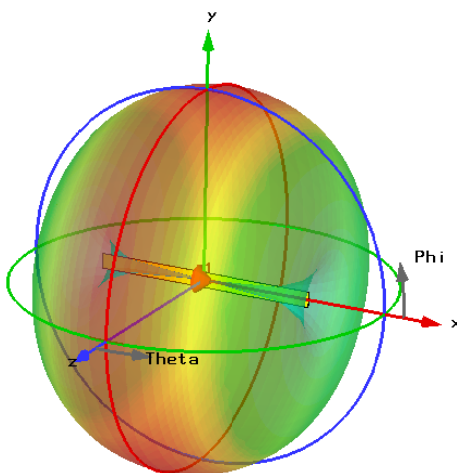
ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงความถี่ 860MHz ถึง 960MHz และสำหรับในประเทศไทยระบบอาร์เอฟไอดี

ในย่านความถี่สูงซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ 920MHz ถึง 926MHz จึงเลือกออกแบบสายอากาศไดโพล ที่ความถี่ 920MHz สำหรับสายอากาศไมโครสตริปไดโพล หรือไดโพลแบบแผ่นแบนจะมีความกว้างน้อยกว่า $0.05\lambda_0$ นั่นคือ ที่ความถี่ 920MHz สายอากาศจะต้องมีความกว้างน้อยกว่า 16.3 มิลลิเมตร จึงได้ทำการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ขนาดความกว้างต่าง ๆ โดยผลจากการจำลองแบบที่ความกว้างค่าต่าง ๆ ได้ผลลัพธ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) มีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความกว้างของสายอากาศที่มีต่อแบนด์วิดธ์ของสายอากาศ นั่นคือ สายอากาศที่มีความกว้างมากกว่าจะมีแบนด์วิดธ์ที่กว้างกว่าด้วย

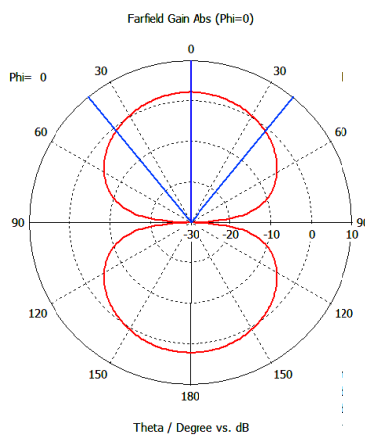


รูปที่ 2.9 ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ที่ความกว้าง (W) ค่าต่าง ๆ

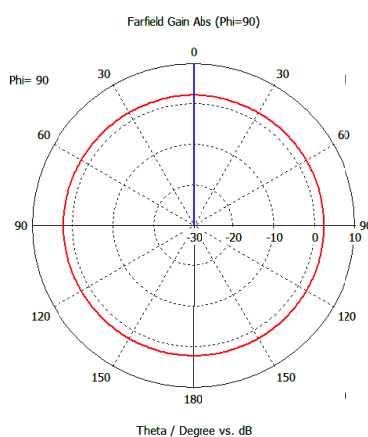
จากนั้นทำการศึกษาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น โดยจากการจำลองแบบโดยให้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนวางตัวในระนาบ XY ผลที่ได้สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยจะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางรอบแกน X ในระนาบ YZ และมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบมีทิศทางในระนาบ XY และ XZ จากนั้นนำเอาแบบจำลองสายอากาศมาศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศอันเนื่องจากขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศ



ก) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสามมิติ



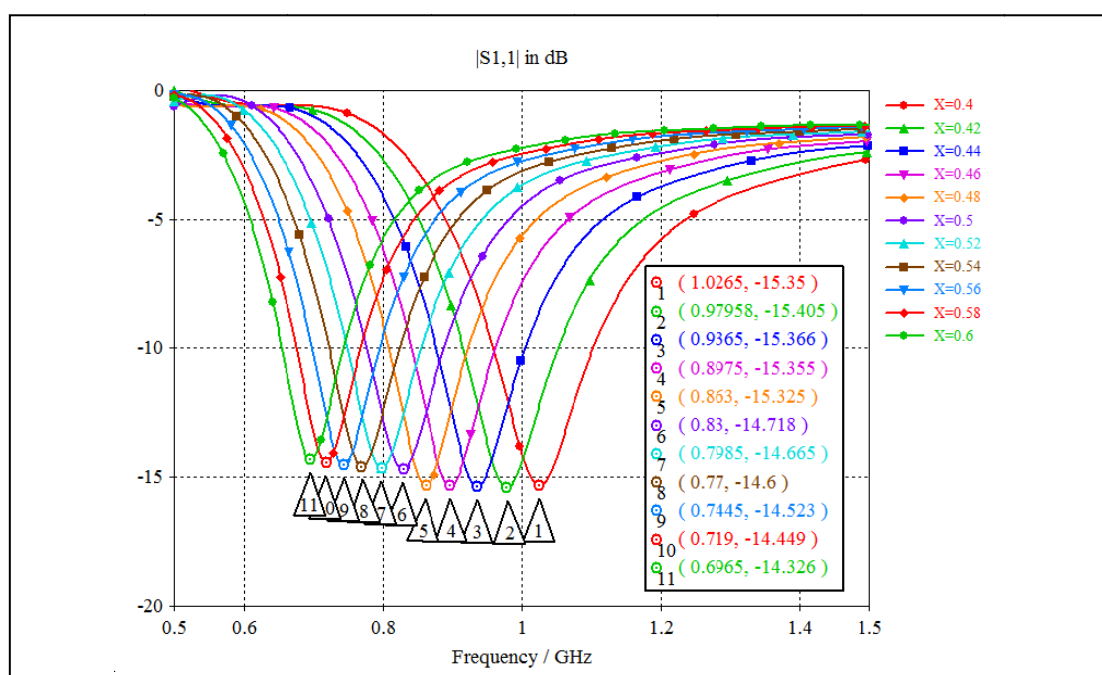
ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ XZ



ค) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ YZ

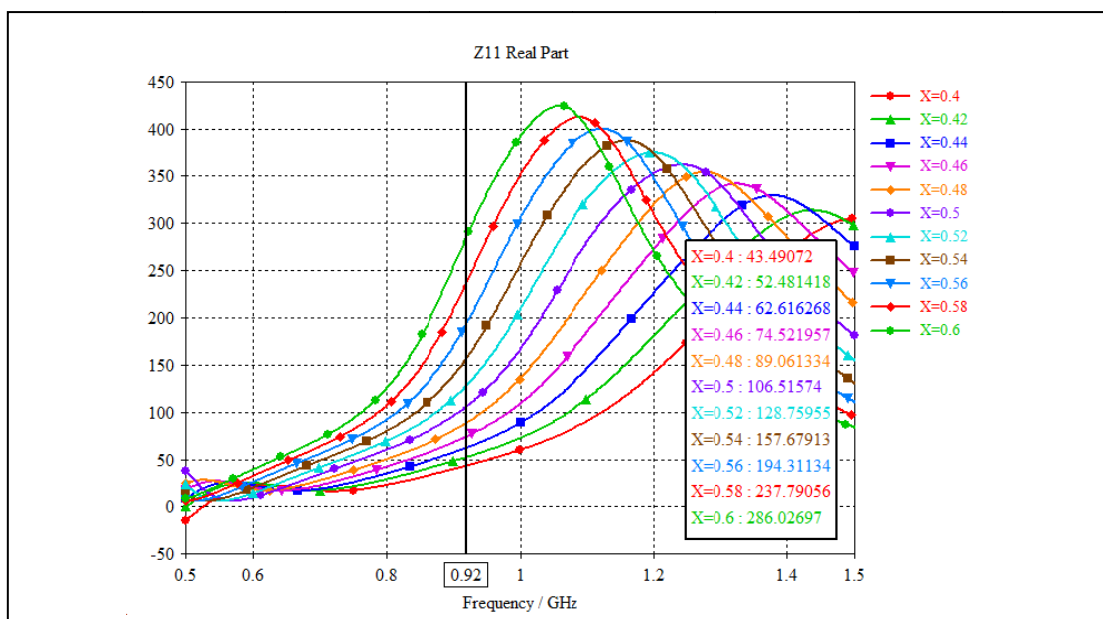
รูปที่ 2.10 ผลการจำลองแบบค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

โดยนอกจากความกว้างของสายอากาศจะมีผลต่อแบนวิดท์แล้ว อีกคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญคือ ความยาวของสายอากาศ โดยจากทฤษฎีสายอากาศไดโพล จะพบว่าความยาวของสายอากาศสำหรับสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นที่ทำจากเส้นลวดจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่น (λ_0) ที่ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศดังที่ได้อธิบายมาแล้ว จึงได้ทำการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ความยาวขนาดต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลลัพธ์และหาขนาดที่เหมาะสม โดยได้ผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ความยาวต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11

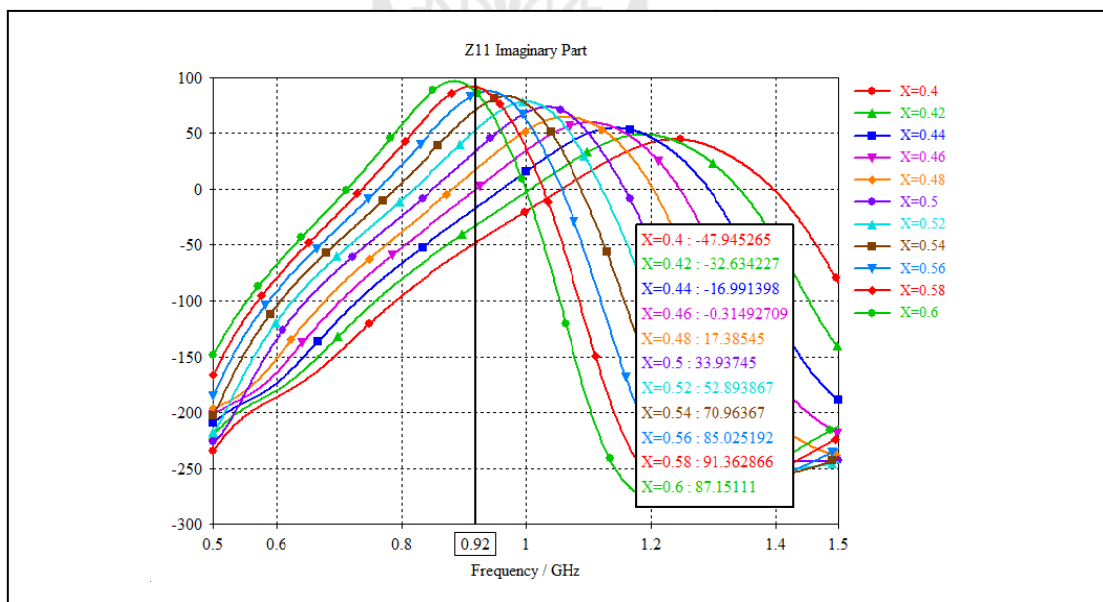


รูปที่ 2.11 ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่อัตราส่วนความยาวสายอากาศ (X) ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.11 เราให้ X แทนค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวสายอากาศ (L_{ant}) เทียบกับความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ (λ_0) นั่นคือ ความยาวจริงของสายอากาศจะมีค่าเป็นอัตราส่วนความยาวสายอากาศคูณกับความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ จากผลการจำลองแบบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะพบว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนจะมีความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อความยาวของสายอากาศมีขนาดลดลง เช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด

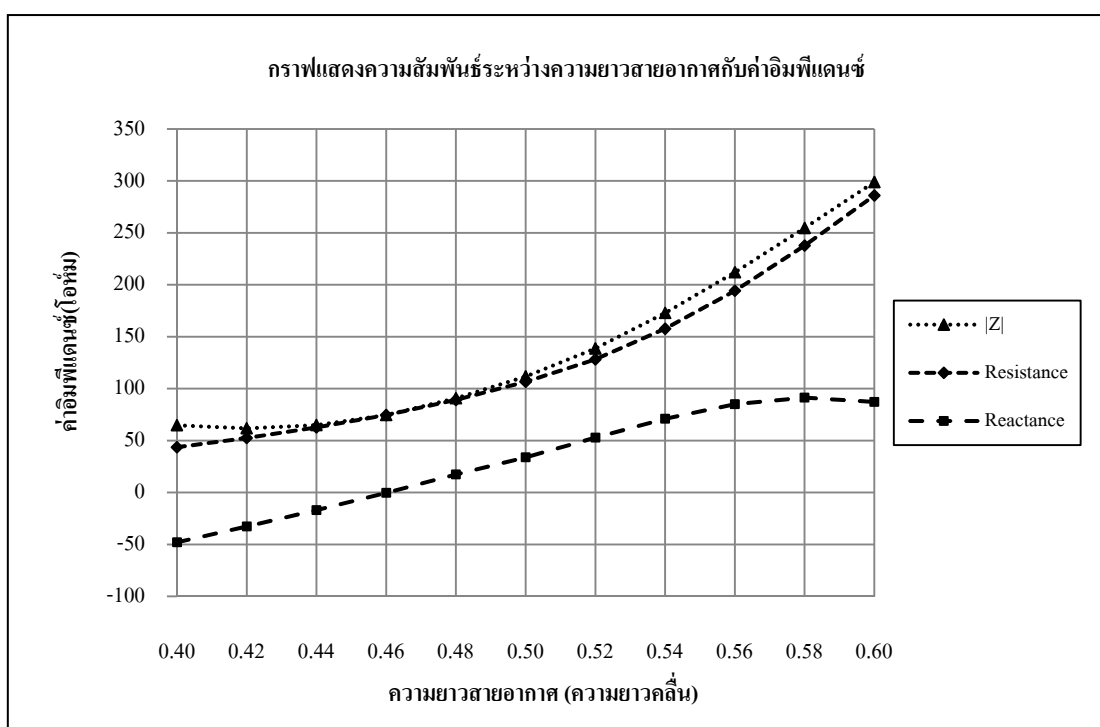


รูปที่ 2.12 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่อัตราส่วนความยาวสายอากาศ (X) ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.13 ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่อัตราส่วนความยาวสายอากาศ (X) ค่าต่าง ๆ

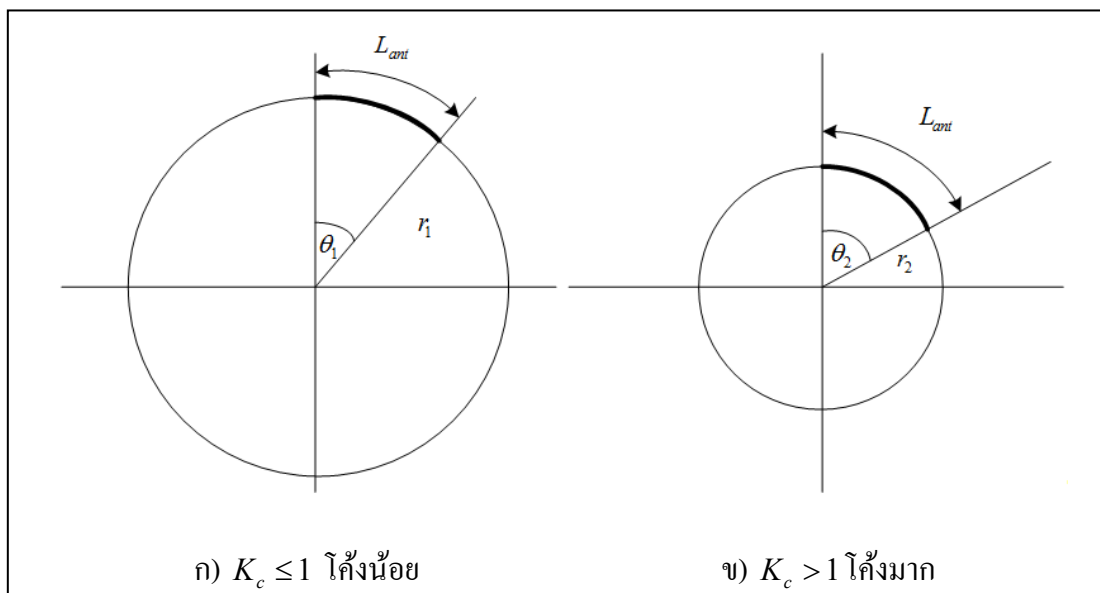
หากเราพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากผลการจำลองแบบที่ค่าอัตราส่วนความยาวสายอากาศค่าต่าง ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 สำหรับค่ารีซิสแตนซ์ (ส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์) และรูปที่ 2.13 สำหรับค่ารีแอกแตนซ์ (ส่วนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์) ตามลำดับ เราสามารถนำค่าที่ได้จากการจำลองแบบมาพล็อตแสดงความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวของสายอากาศได้ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวของสายอากาศที่ได้นี้จะได้นำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อแก้ปัญหาจากการใช้งานบนพื้นผิวโค้งต่อไป



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ โพลแบบแผ่นแบนเทียบกับความยาวสายอากาศค่าต่าง ๆ

สำหรับการตัดโค้งของสายอากาศ เราสามารถพิจารณาความโค้งของสายอากาศได้จากค่าอัตราส่วนความโค้ง (K_c) หากเราให้ความยาวส่วนโค้งแทนความยาวสายอากาศ (L_{ant}) มีค่าคงที่จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุม (θ) (มีหน่วยเป็นองศา) ที่ทำให้เกิดส่วนโค้งที่ยาวเท่ากันที่เท่ากับความยาวสายอากาศ จะสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดรัศมีของวงกลมนั้น นั่นคือ ความโค้ง

ของสายอากาศที่เกิดจากมุมที่จุดศูนย์กลางที่มีค่ามากขึ้นจะทำให้สายอากาศมีความโค้งมากขึ้นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความโค้งกับความยาวส่วนโค้งรองรับมุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมีวงกลม

จากรูปที่ 2.15 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$L_{ant} = 2\pi r \frac{\theta}{360} \quad (2.26)$$

เราสามารถพิจารณาส่วนกลับของรัศมี หรือค่าอัตราส่วนความโค้ง (K_c) ดังนี้

$$K_c = \frac{1}{r} \quad (2.27)$$

ดังนั้นมุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมจะสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความโค้งและรัศมีเขียนได้เป็น

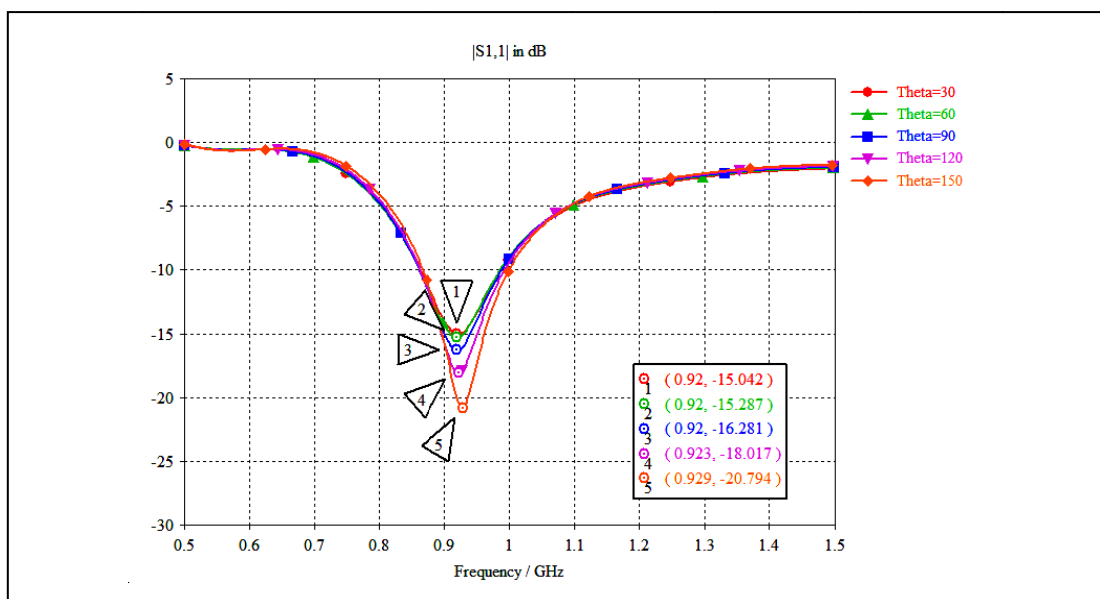
$$\theta = K_c L_{ant} \frac{360}{2\pi} = \frac{L_{ant}}{r} \frac{360}{2\pi} \quad (2.28)$$

จะเห็นได้ว่า หากเราให้ความยาวสายอากาศ (L_{ant}) หรือความยาวส่วนโค้งมีค่าคงที่ มุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมจะแปรผกผันกับค่ารัศมี กล่าวคือ รัศมีวงกลมมีค่าลดลงจะทำให้มุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมมีค่ามากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าอัตราส่วนความโค้งหรือค่ามุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมที่มากขึ้น แสดงถึงความโค้งที่มากขึ้นด้วย ในทำนองเดียวกัน ค่ารัศมีที่ลดลง ก็แสดงถึงความโค้งที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามในการสร้างแบบจำลองจะใช้การเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมแทนค่าอัตราส่วนความโค้ง ซึ่งจะทำให้ความสะดวกในการเปรียบเทียบกันมากกว่า โดยเราสามารถคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งในการตัดโค้งสำหรับการสร้างแบบจำลองเทียบกับค่ามุมความโค้งของสายอากาศได้จากสมการที่ (2.28) เมื่อกำหนดให้ความยาวของสายอากาศมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ได้ผลลัพธ์มุมความโค้งและรัศมีความโค้งค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

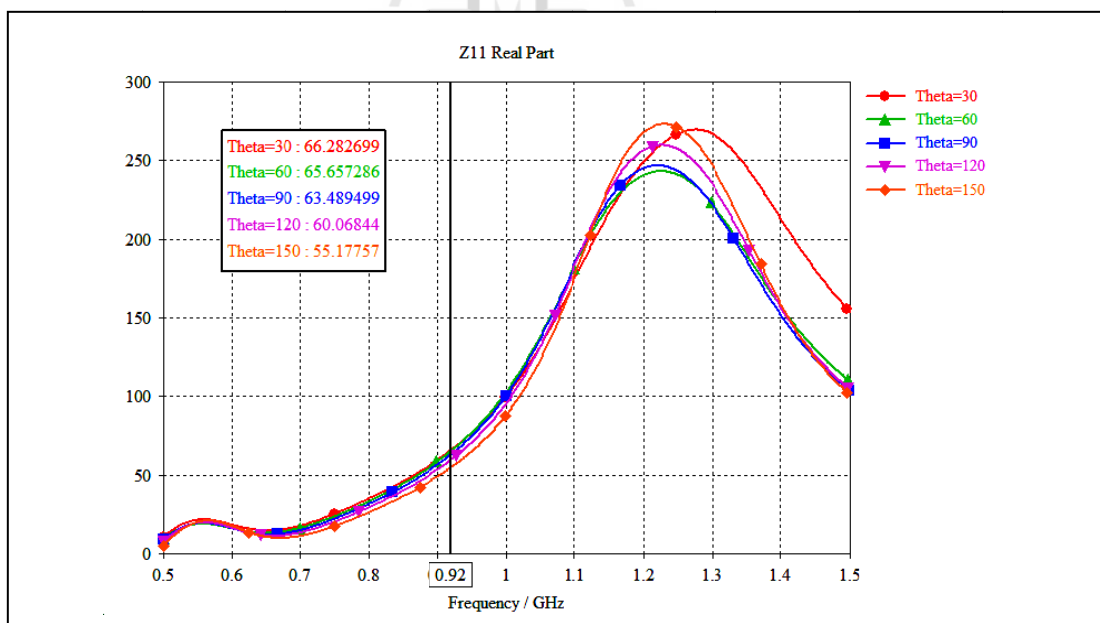
ตารางที่ 2.1 ค่ามุมความโค้งเทียบกับรัศมีความโค้งที่ความยาวของสายอากาศประมาณจากครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ 920MHz

| ค่ามุมความโค้ง (องศา) | รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร) |
|-----------------------|---------------------------|
| 30 | 286 |
| 60 | 143 |
| 90 | 95 |
| 120 | 71 |
| 150 | 57 |

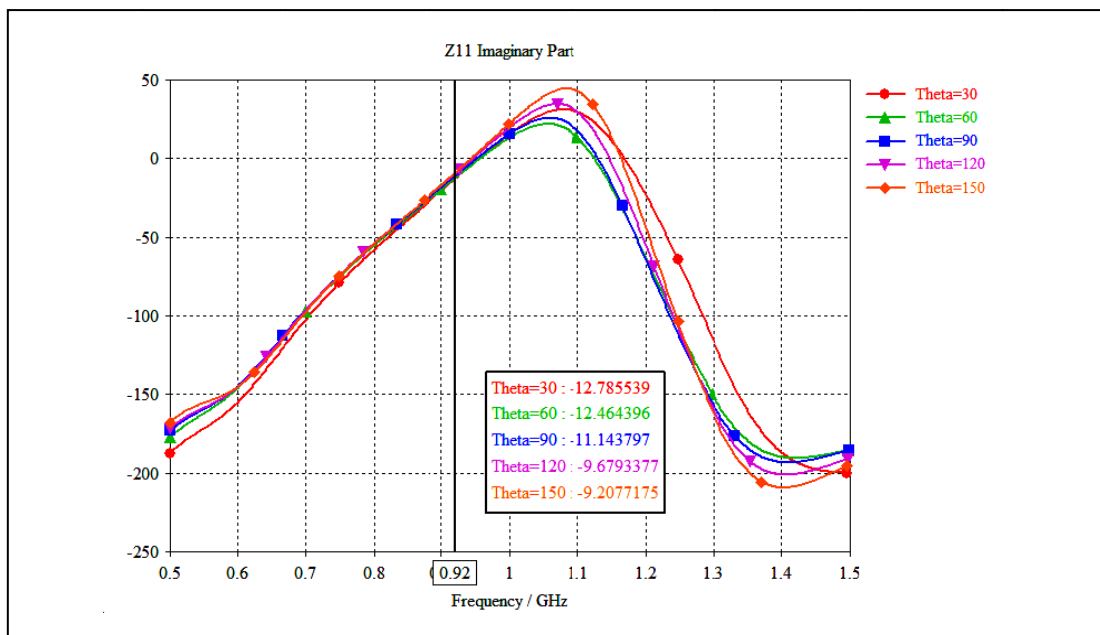
สำหรับการใช้งานสายอากาศบนวัตถุที่มีผิวโค้ง ได้ทำการจำลองแบบโดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่จุดศูนย์กลางวงกลมในการตัดโค้งสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนให้มีค่าต่าง ๆ โดยผลที่ได้จากการจำลองแบบพบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนมีคุณสมบัติตอบสนองกับการตัดโค้ง สำหรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนจะมีการเลื่อนของค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศที่เป็นค่ารีซิสแตนซ์มีค่าลดลงส่วนค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่ามุมความโค้งมีค่ามากขึ้น หรือมีการตัดโค้งมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ที่มุมของความโค้งที่จุดศูนย์กลางวงกลมค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.17 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น



รูปที่ 2.18 ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น

2.7 สรุป

สำหรับบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงส่วนประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องของระบบอาร์เอฟไอดี ได้แก่ ชุดอ่านข้อมูลและแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้แยกความแตกต่างของระบบอาร์เอฟไอดีตั้งแต่ ชนิดการส่งข้อมูล ความจุข้อมูล รูปแบบการเขียนข้อมูล ชนิดของแหล่งจ่ายพลังงาน รวมทั้งย่านความถี่ที่ใช้งาน เพื่อให้เข้าใจถึงที่มาของการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ และลักษณะที่แตกต่างกันของระบบอาร์เอฟไอดีแต่ละชนิด จากนั้นเราได้ อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี การแมตซ์อิมพีแดนซ์และการถ่ายโอนกำลังงาน ค่าความสูญเสียย้อนกลับ รวมทั้งปัญหาและเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยยกตัวอย่างการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและการติดตั้ง

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศและผลการจำลองแบบ

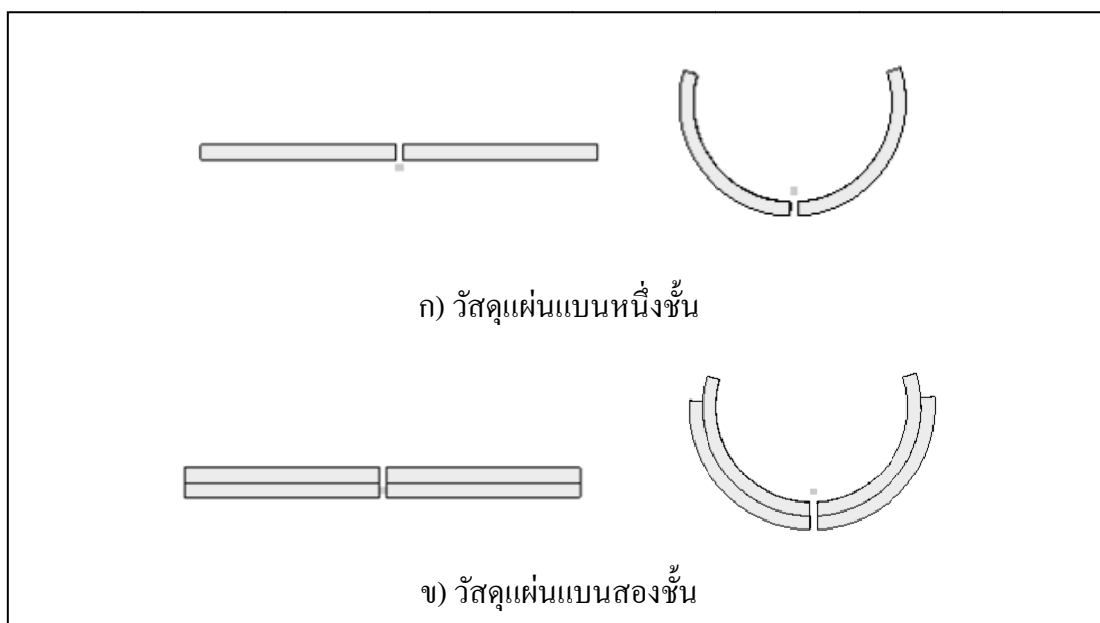
3.1 บทนำ

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเป็นสายอากาศต้นแบบในการศึกษาออกแบบ รวมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจากการใช้งานบนพื้นผิวโค้ง โดยในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ด้วยเทคนิคการออกแบบสายอากาศซ้อนกันแบบสองชั้นและแบบหลายชั้น เพื่อศึกษาการออกแบบ และผลกระทบเมื่อมีการตัดโค้งบนพื้นผิวรูปทรงระบอบ นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio™

3.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น

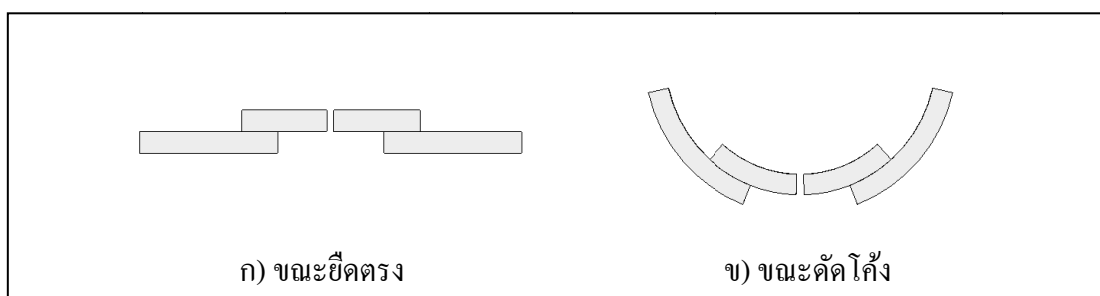
ผลจากการศึกษาการตัดโค้งสายอากาศด้วยการจำลองแบบสายอากาศแบบแผ่นแบนในบทที่ผ่านมา พบว่าเมื่อมีการตัดโค้งสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศที่เป็นค่ารีซิสแตนซ์จะมีค่าลดลงส่วนค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่ามุมความโค้งมีค่ามากขึ้น หรือมีการตัดโค้งมากขึ้น รวมทั้งจะทำให้คุณสมบัติค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ที่สูงขึ้นสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนและจากทฤษฎีที่ได้อธิบายเกี่ยวกับความยาวของสายอากาศ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น แต่จะมีผลกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบตรงข้ามกัน นั่นคือ สำหรับสายอากาศที่มีความยาวเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีค่าลดลง

จากผลดังกล่าว จึงนำเอาความสัมพันธ์ของความยาวของสายอากาศ มาใช้แก้ปัญหาที่เกิดจากการตัดโค้งของสายอากาศ ที่ทำให้สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ และมีการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์ไป โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศเป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เท่ากันเมื่อมีการตัดโค้ง กล่าวคือ เมื่อมีการตัดโค้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซ้อนทับกัน จะทำให้เกิดความแตกต่างกันของความยาวสำหรับวัสดุแต่ละชั้น อันเนื่องมาจากรัศมีของการตัดโค้งที่ไม่เท่ากันของวัสดุแต่ละชั้น โดยพบว่าวัสดุชั้นนอกจะมีขนาดความยาวสัมพัทธ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของวัสดุที่อยู่ชั้นในขณะที่มีการตัดโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

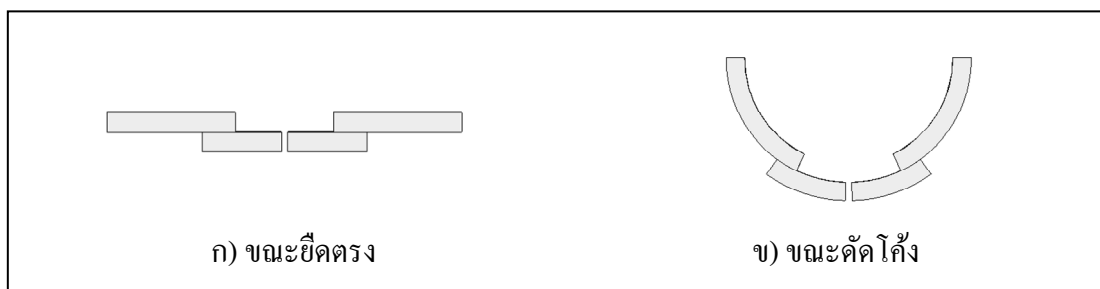


รูปที่ 3.1 วัสดุแผ่นแบนซ้อนทับกันขณะยืดตรงและดัดโค้ง

ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวสัมพัทธ์ที่ไม่เท่ากันของชั้นวัสดุแต่ละชั้นเมื่อมีการดัดโค้ง จึงได้นำมาใช้ออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยทั้งสองแบบจะให้คุณสมบัติของความยาวสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่ารัศมีการดัดโค้งของสายอากาศที่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

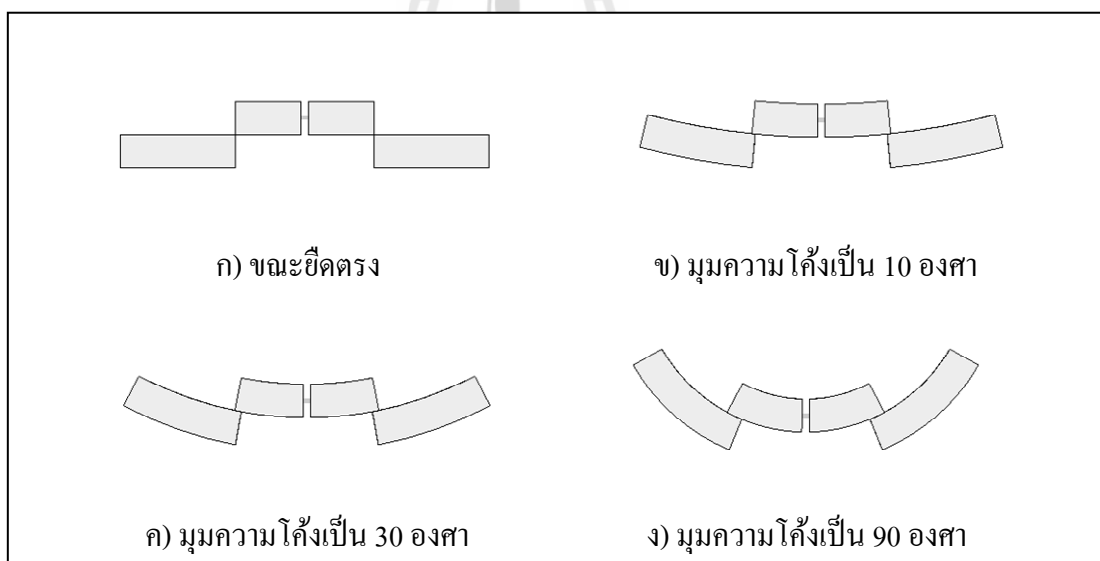


รูปที่ 3.2 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1



รูปที่ 3.3 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2

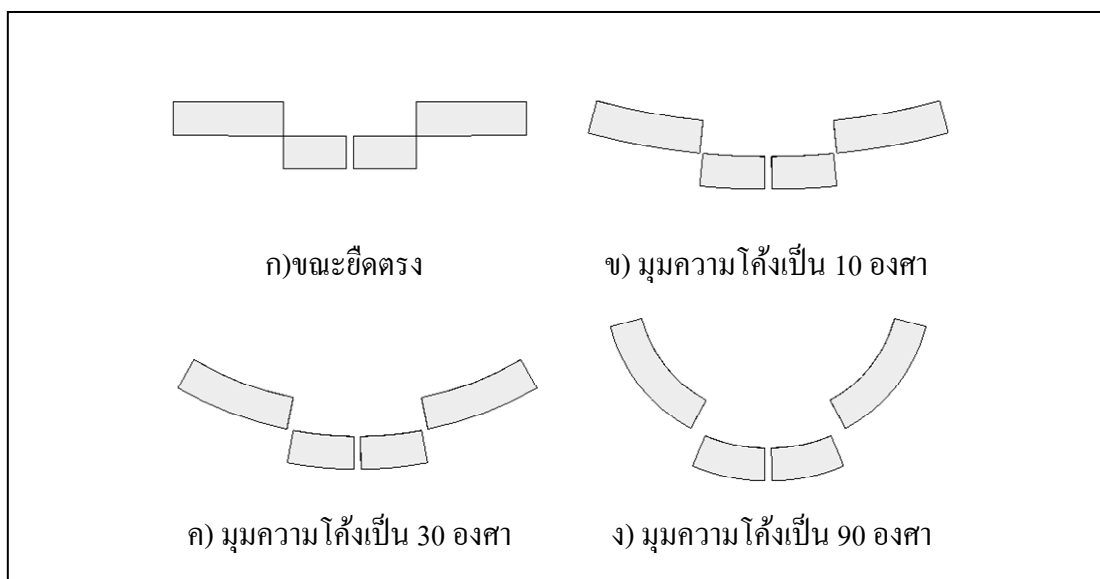
จากรูปที่ 3.2 เราสามารถแสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าสายอากาศชั้นที่อยู่ด้านนอกเมื่อมีการดัดโค้งมากขึ้นจะทำให้เกิดการทับซ้อนกับสายอากาศชั้นในมากขึ้น นั่นคือ เมื่อมีการดัดโค้งจะทำให้ความยาวโดยรวมของสายอากาศสั้นลง



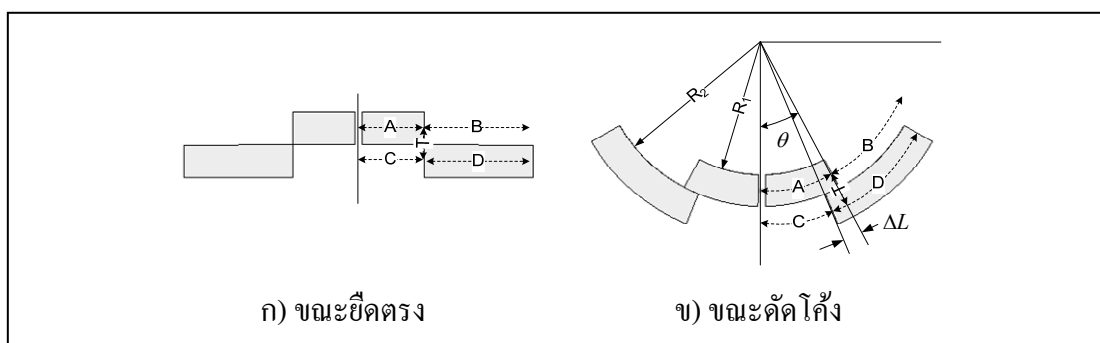
รูปที่ 3.4 ความยาวสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงขณะดัดโค้งที่มุมความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1

และในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.3 สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 จะเห็นได้ว่าสายอากาศด้านนอกเมื่อมีการดัดโค้งมากขึ้นจะมีผลต่างที่เกิดจากการดัดโค้งที่ไม่

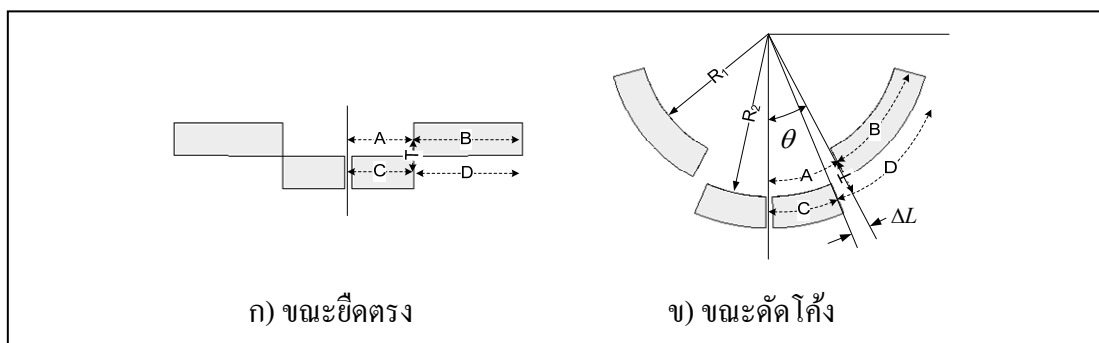
เท่ากันของสายอากาศทั้งสองชั้นทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้นในการออกแบบ จึงต้องมีการเพิ่มความยาวส่วนทับซ้อนของสายอากาศด้านนอกให้มากขึ้นเพื่อรองรับความแตกต่างที่เกิดขึ้นและเพื่อให้สายอากาศมีความต่อเนื่องทางไฟฟ้าตลอดความยาวของสายอากาศ นั่นทำให้ความยาวสัมพันธ์มากกว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นเมื่อมีการตัดโค้งสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2



รูปที่ 3.5 ความยาวสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงขณะตัดโค้งที่มุมความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2



รูปที่ 3.6 ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1



รูปที่ 3.7 ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2

จากผลดังกล่าวเราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสัมพันธ์แทนด้วย L_{eff} ของสายอากาศทั้งสองแบบขณะที่ยังไม่มีการดัดโค้งจากรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ได้ดังสมการ

$$L_{eff} = L_{ant} = 2 * (A + B + T) = 2 * (C + D + T) \quad (3.1)$$

สำหรับผลต่างความยาวที่เกิดจากการดัดโค้งที่เกิดขึ้น (ΔL) สามารถคำนวณได้จากผลต่างความยาวเส้นโค้งของสายอากาศชั้นในกับความยาวเส้นโค้งของสายอากาศชั้นนอกดังนี้

$$A = \frac{2\pi R_1 \theta}{360} \quad (3.2)$$

$$C + \Delta L = \frac{2\pi R_2 \theta}{360} \quad (3.3)$$

โดยที่ R_1 , R_2 แทนรัศมีความโค้งของสายอากาศชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เนื่องจาก A และ C มีค่าเท่ากัน แทนที่ C ด้วย A จากสมการที่ 3.2 ลงในสมการที่ 3.3 และจัดรูปสมการจะได้ว่า

$$\Delta L = \frac{2\pi\theta}{360} (R_2 - R_1) = \frac{2\pi\theta}{360} (T) \quad (3.4)$$

โดยที่ผลต่างระหว่างรัศมี R_1 , R_2 มีค่าเท่ากับความหนาของสายอากาศแต่ละชั้น (T) และจากสมการที่ 3.2 เราสามารถเขียนได้เป็น

$$\theta = \frac{360}{2\pi} * \frac{A}{R_1} \quad (3.5)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\Delta L = \frac{A * T}{R_1} \quad (3.6)$$

จะเห็นได้ว่าการใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศขณะมีการดัดโค้งที่ค่าต่าง ๆ ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ โดยความยาวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะสัมพันธ์กับค่าความหนาของสายอากาศและมุมของความโค้ง และจะเป็นส่วนกลับกับค่ารัศมีความโค้ง ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศทั้งสองแบบขณะที่มีการดัดโค้งได้ดังสมการ

$$L_{eff, Type I} = 2 * (A + D + T - \Delta L) \quad (3.7)$$

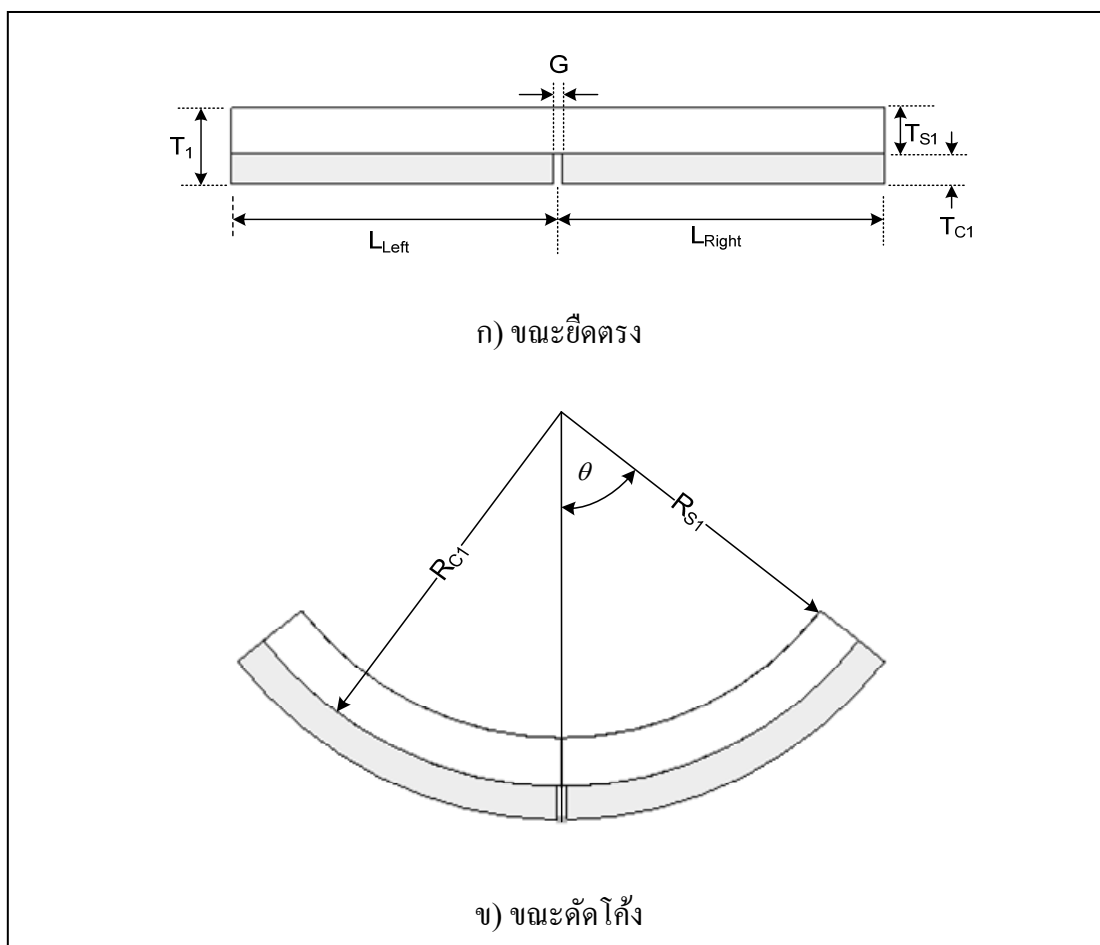
$$L_{eff, Type II} = 2 * (C + B + T + \Delta L) \quad (3.8)$$

3.3 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น

จากการศึกษาออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น จะพบปัญหาในการทำให้สายอากาศแต่ละชั้นมีการเชื่อมต่อกันระหว่างขณะดัดโค้งไปตามพื้นผิวของวัตถุที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีชั้นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดสายอากาศแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน จึงได้ทำการออกแบบให้สายอากาศมีชั้นของฉนวนเพื่อเป็นวัสดุเชื่อมต่อระหว่างแต่ละชั้น โดยเลือกใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบบางยี่ห้อ Pyralux รุ่น AP9121R จากบริษัท DuPont (DuPont , 2013) ที่ทำจากแผ่นทองแดงเคลือบบนแผ่นฉนวนที่ทำจากโพลีอิมายด์ (polyimide) ที่สามารถดัดโค้งได้

โดยมีชั้นทองแดงหนา 0.035 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นฉนวนโพลีมาดเป็น 0.051 มิลลิเมตร และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นฉนวนโพลีมาดมีค่าเป็น 3.4

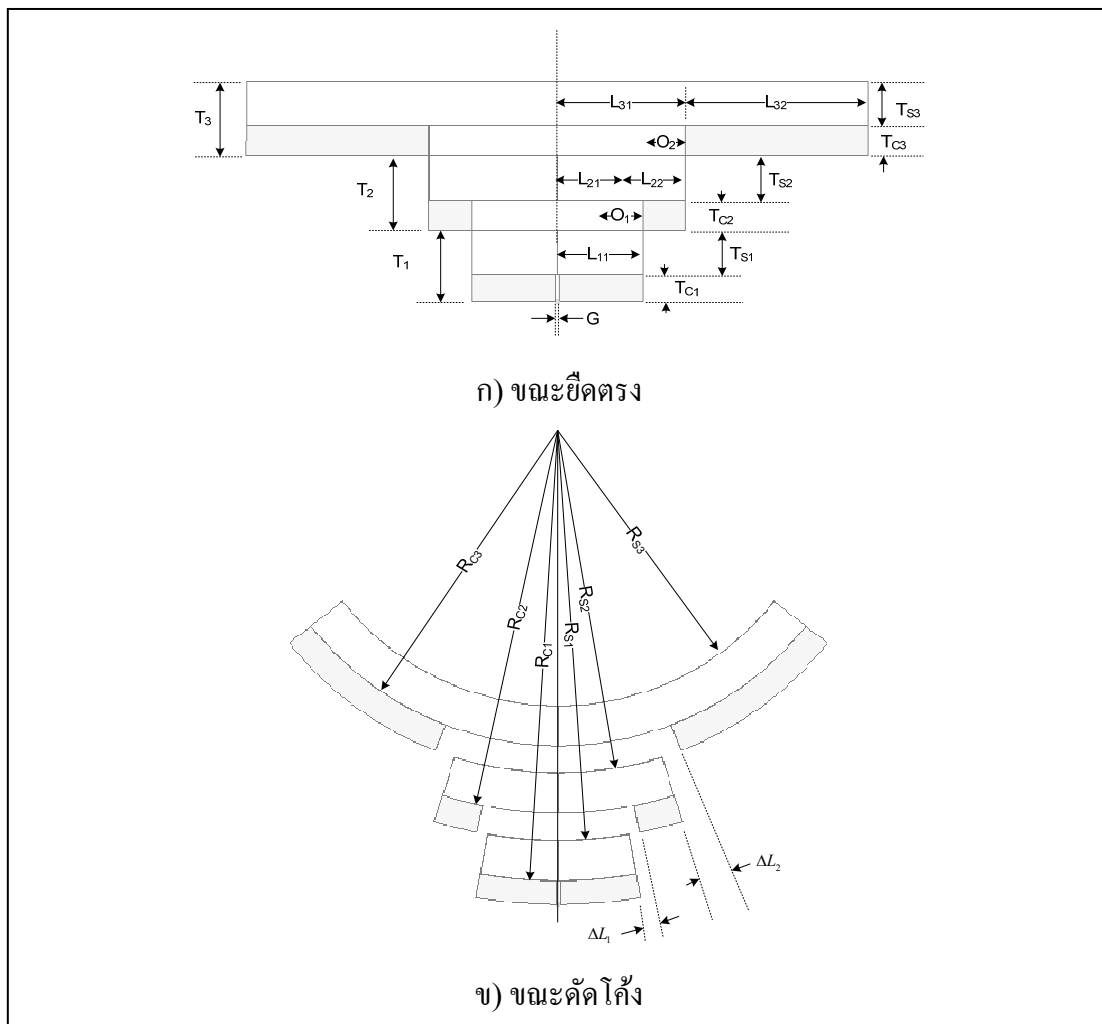
เพื่อให้สามารถนำผลการออกแบบที่ได้นำไปสร้างสายอากาศต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นที่ทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง เพื่อใช้เป็นสายอากาศอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง

ได้ทำการปรับปรุงสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 ให้มีหลายชั้นมากขึ้น เพื่อเพิ่มขนาดความยาวสัมพันธ์ขณะดัดโค้ง ในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณค่าความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นด้วยสายอากาศสองแบบ คือ สายอากาศไดโพลแบบ

แผ่นแบนสามชั้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.9 และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นในรูปที่ 3.10 ตามลำดับ

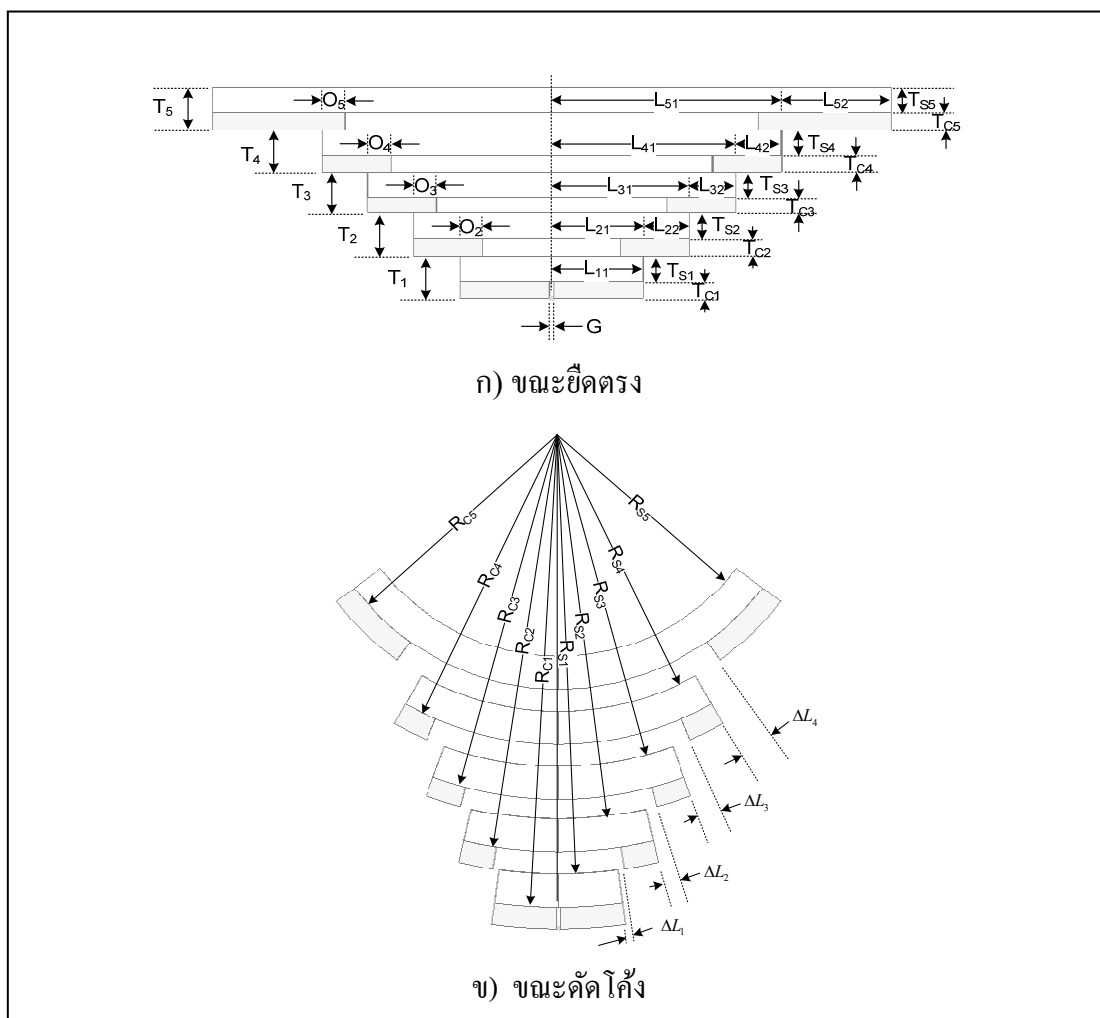


รูปที่ 3.9 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นทำจากแผ่นวงจรมพิมพ์แบบแผ่นบาง

และจากรูปที่ 3.9 เราสามารถหาค่าความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นได้เป็น

$$L_{eff} = 2 * \{L_{11} + \Delta L_1 + T_1 + L_{22} + \Delta L_2 + T_2 + L_{32}\} \tag{3.9}$$

$$\Delta L_1 = \frac{T_1 L_{21}}{R_{C2}}, \quad \Delta L_2 = \frac{T_2 L_{31}}{R_{C3}} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.10 สายอากาศไคโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นทำจากแผ่นวงจรมิมพ์แบบแผ่นบาง

ทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.10 สำหรับสายอากาศไคโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น สามารถหาความยาวสัมพัทธ์ได้เป็น

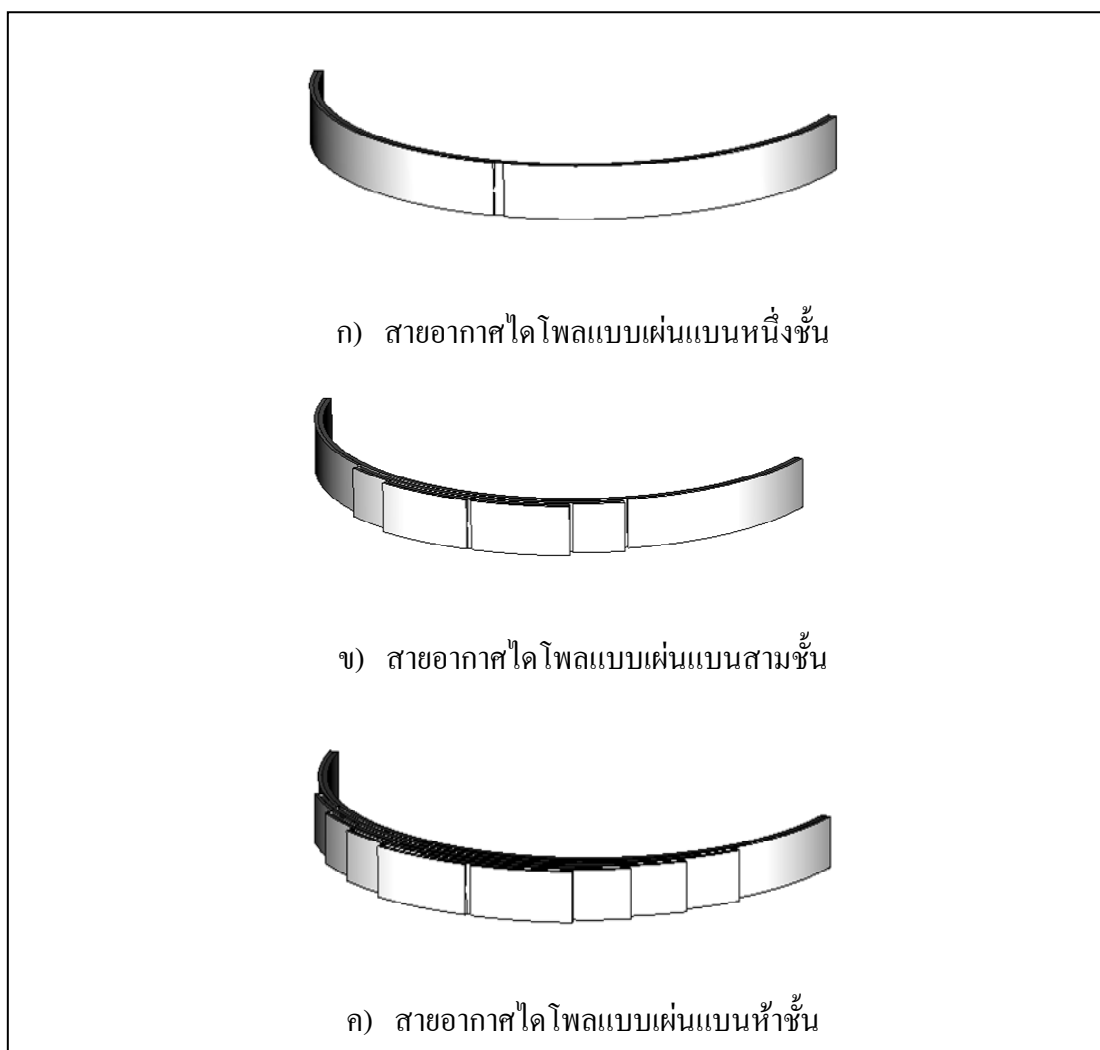
$$L_{eff} = 2 * \left\{ \begin{array}{l} L_{11} + \Delta L_1 + T_1 + L_{22} + \Delta L_2 + T_2 + L_{32} \\ + \Delta L_3 + T_3 + L_{42} + \Delta L_4 + T_4 + L_{52} \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

$$\Delta L_1 = \frac{T_1 L_{21}}{R_{C2}}, \Delta L_2 = \frac{T_2 L_{31}}{R_{C3}}, \Delta L_3 = \frac{T_3 L_{41}}{R_{C4}}, \Delta L_4 = \frac{T_4 L_{51}}{R_{C5}} \quad (3.12)$$

โดยที่ M คือหมายเลขชั้นของสายอากาศ และสำหรับความหนาของแต่ละชั้น (T_M) สามารถคำนวณได้จากความหนาของชั้นทองแดง (T_{CM}) บวกกับความหนาของชั้นแผ่นฉนวนที่ทำจากโพลีเมทิล (T_{SM}) และรัศมีความโค้งในแต่ละชั้น จะใช้เป็นรัศมีของชั้นทองแดง (R_{CM}) ความยาวของสายอากาศส่วนที่อยู่ตรงกลางแต่ละชั้นแทนด้วย T_{M1} ความยาวของสายอากาศส่วนที่อยู่ส่วนปลายแต่ละชั้นแทนด้วย T_{M2} ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการตัดโค้งในแต่ละชั้น แทนด้วย ΔL_M จากนั้นนำผลที่ได้มาออกแบบสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแบบหลายชั้นทำจากแผ่นวงจรพิมพ์แบบแผ่นบาง

| ชื่อพารามิเตอร์ | ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง (มิลลิเมตร) | | |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| | สายอากาศแบบหนึ่งชั้น | สายอากาศแบบสามชั้น | สายอากาศแบบห้าชั้น |
| W | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| T_{C1-C5} | 0.035 | 0.035 | 0.035 |
| T_{S1-S5} | 0.051 | 0.051 | 0.051 |
| G | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| O_{1-4} | 0.00 | 5.00 | 5.00 |
| L_{11} | 81.25 | 15.00 | 15.00 |
| L_{21} | | 15.00 | 15.00 |
| L_{22} | | 10.00 | 10.00 |
| L_{31} | | 25.00 | 25.00 |
| L_{32} | | 56.25 | 10.00 |
| L_{41} | | | 35.00 |
| L_{42} | | | 10.00 |
| L_{51} | | | 45.00 |
| L_{52} | | | 36.25 |

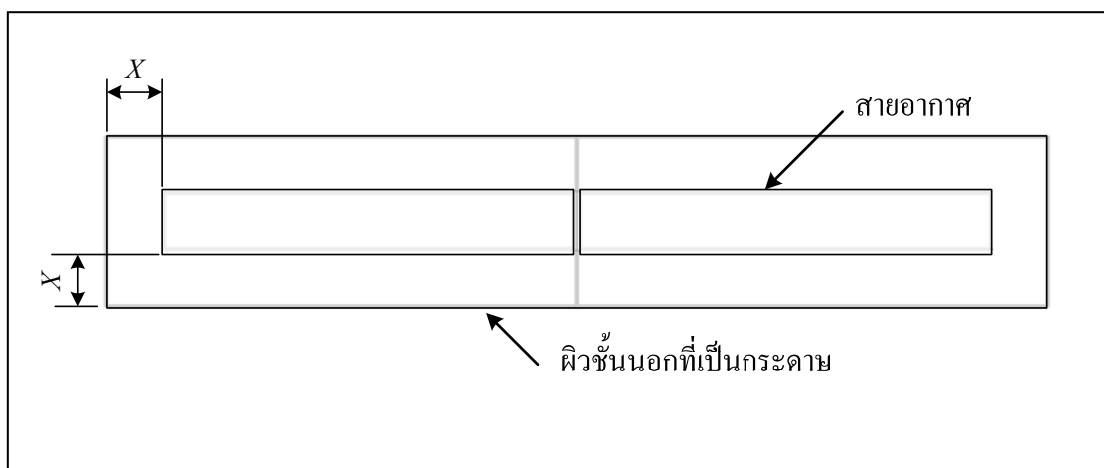


รูปที่ 3.11 แบบจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นทำจากแผ่นวงจรมพิมพ์แบบแผ่นบาง

3.4 ผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น

โดยทั่วไปแล้วในการนำสายอากาศไปใช้งานเป็นแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีร่วมกับส่วนประกอบต่าง ๆ อาทิ วงจรรวม หรือ ไอซี สำหรับใช้งานบนวัสดุที่มีพื้นผิวแบบต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องมีส่วนที่เป็นแผ่นปิดชั้นนอกและชั้นกาว เพื่อให้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ได้ มีการติดตั้งแนบติดไปกับพื้นผิวที่มีลักษณะโค้ง โดยส่วนประกอบโดยทั่วไปของวัสดุที่ใช้ทำผิวด้านนอกสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ส่วนใหญ่จะทำจากวัสดุที่เป็นพลาสติก หรือกระดาษ ที่สามารถพิมพ์ข้อมูลที่จำเป็นอื่น ๆ ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งอาจมีข้อมูลแถบรหัสแท่งดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันกับระบบการอ่านข้อมูลแบบเดิมได้ ดังนั้นในการออกแบบและ

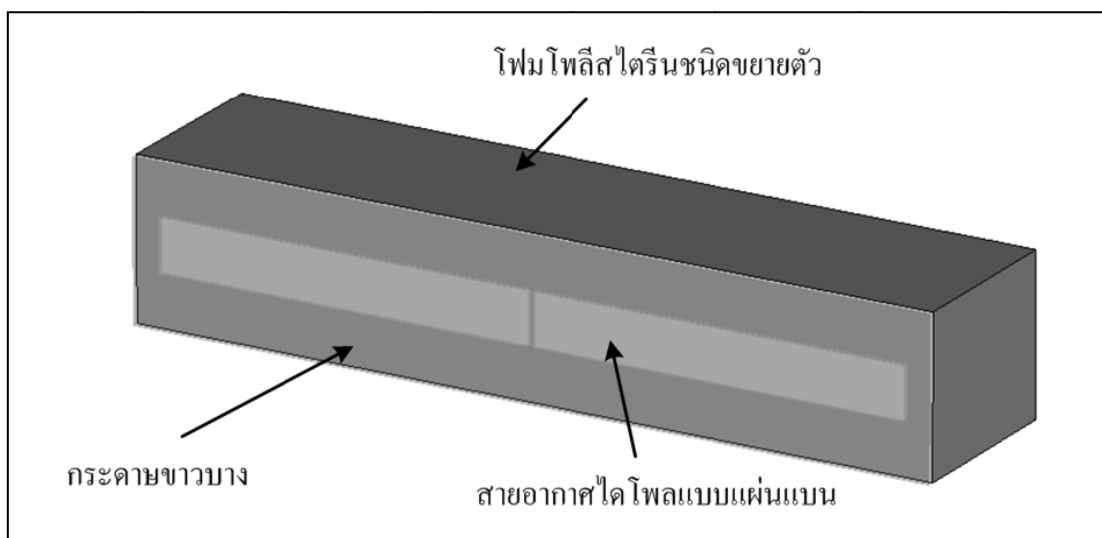
ทดสอบสายอากาศ จึงออกแบบให้มีชั้นของวัสดุชั้นนอกเป็นแผ่นกระดาษขาวบาง โดยทั่วไปจะมีความหนา 0.038 มิลลิเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 2.31 โดยให้ความกว้างและความยาวมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศ เพื่อที่จะสามารถปิดทับสายอากาศได้ โดยบริเวณขอบโดยรอบขนาด X ดังรูปที่ 3.12



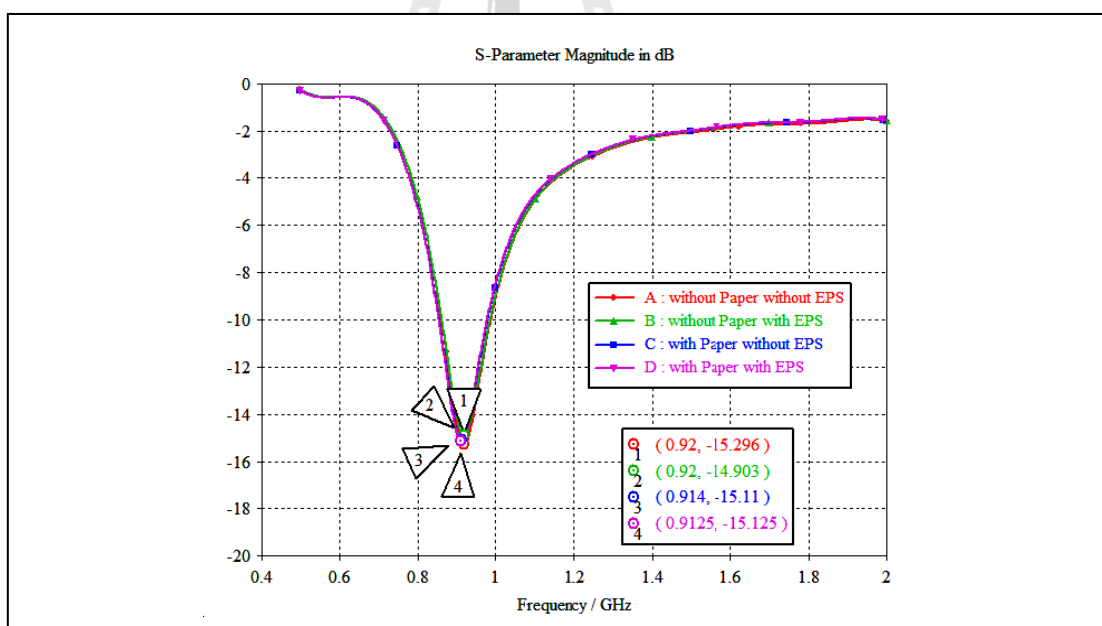
รูปที่ 3.12 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีผิวชั้นนอกปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง

นอกจากนี้แล้ว การที่สายอากาศจะติดตั้งได้จำเป็นต้องทำการติดตั้งติดกับวัสดุอื่นที่มีความโค้ง ดังนั้นในการศึกษาการจำลองแบบและวัดผล จำเป็นจะต้องทำการติดตั้งสายอากาศติดกับวัสดุฐานรองที่มีความโค้งค่าต่าง ๆ โดยเลือกใช้วัสดุฐานรองที่ทำจากโฟมโพลีสไตรีนชนิดขยายตัว (Expanded polystyrene: EPS) เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นอากาศในสัดส่วน 98% ของปริมาตร และมีเพียง 2% เท่านั้นที่เป็นเนื้อพลาสติก ทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอากาศ โดยจะมีค่าเป็น 1.033 (Kempf, R. A., 1951) จากนั้นได้นำไปสร้างแบบจำลองให้มีวัสดุฐานรองวางภายในสายอากาศที่จะทำการศึกษาดังรูปที่ 3.13

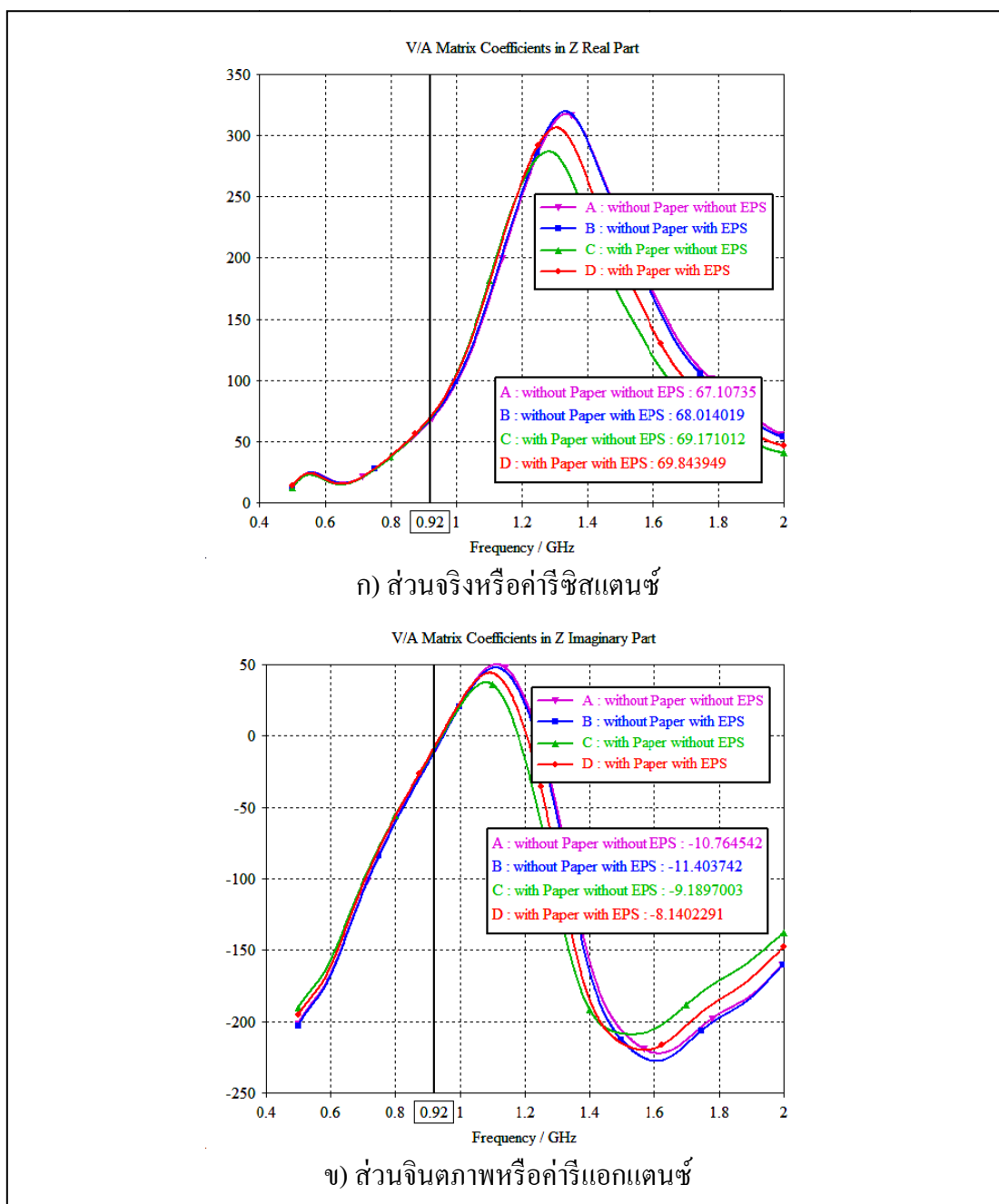
โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีผิวชั้นนอกปิดทับด้วยกระดาษขาวบางวางติดกับวัสดุฐานรองที่ทำจากโฟม EPS จะทำให้สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เรโซแนนซ์ รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แบบจำลองสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีผิวชั้นนอกปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง โดยมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นวางบนโฟม EPS และปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง



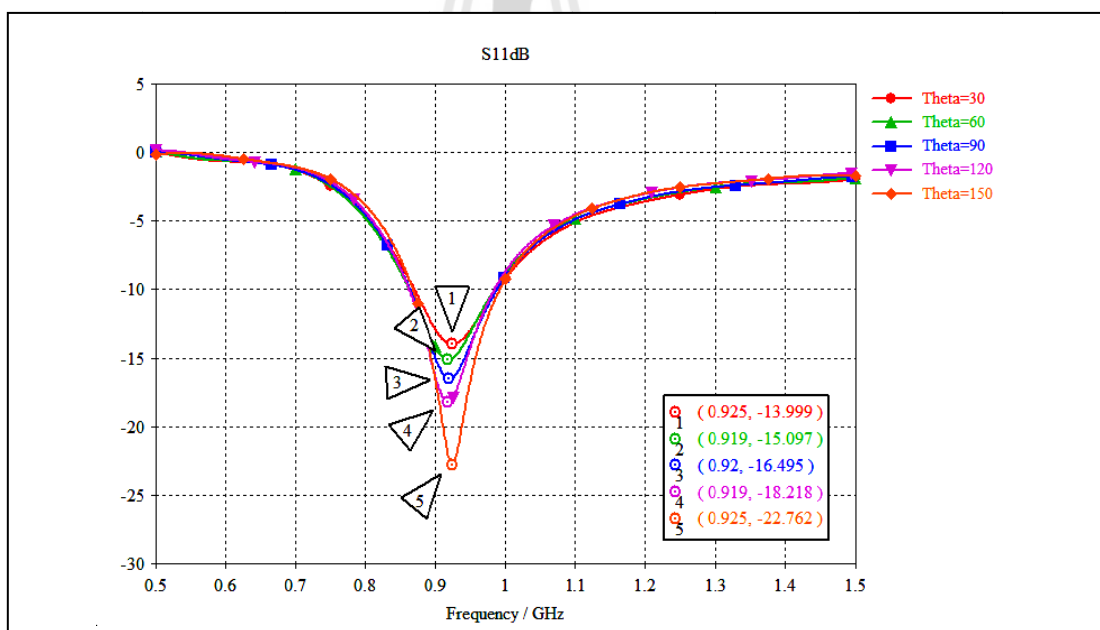
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาววางวางติดกับวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS

จากผลการจำลองแบบจะเห็นได้ว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นจะได้รับผลกระทบจากกระดาษที่ปิดที่ผิวหน้ามากกว่าวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ดังนั้นในการจำลอง

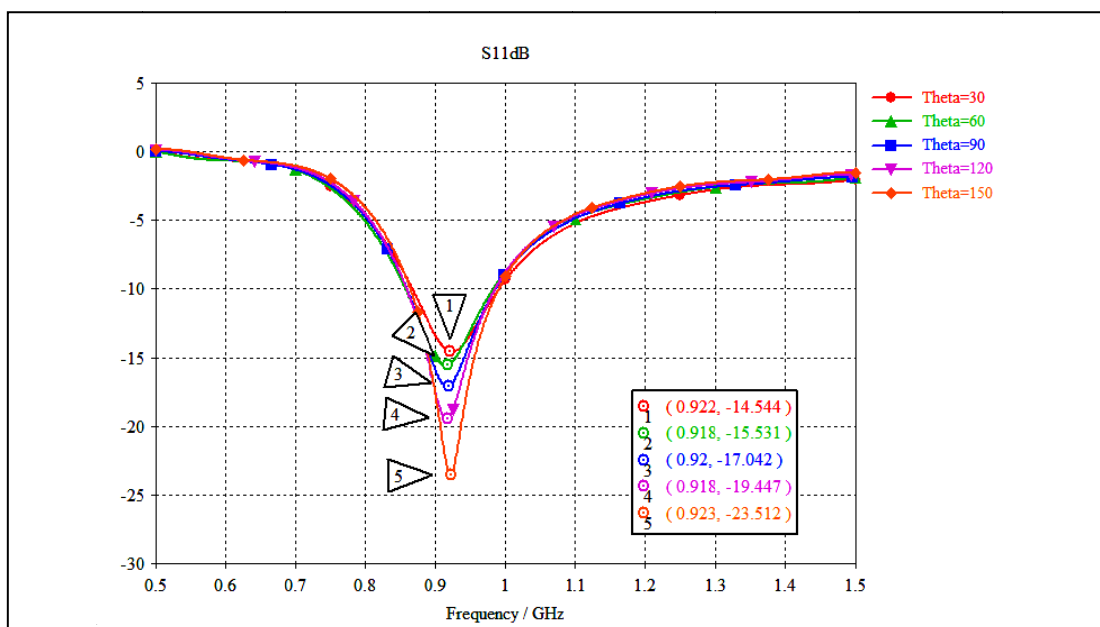
แบบจึงต้องนำผลจากแผ่นกระดาษที่ปิดผิวด้านนอกมาพิจารณาด้วย นั่นคือ ต้องมีการปรับขนาดของสายอากาศหลังจากมีแผ่นกระดาษปิดทับ เพื่อให้สายอากาศมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ขณะยึดตรงยังคงมีค่าอยู่ที่ 920MHz

3.4.1 ค่าความถี่เรโซแนนซ์และอิมพีแดนซ์

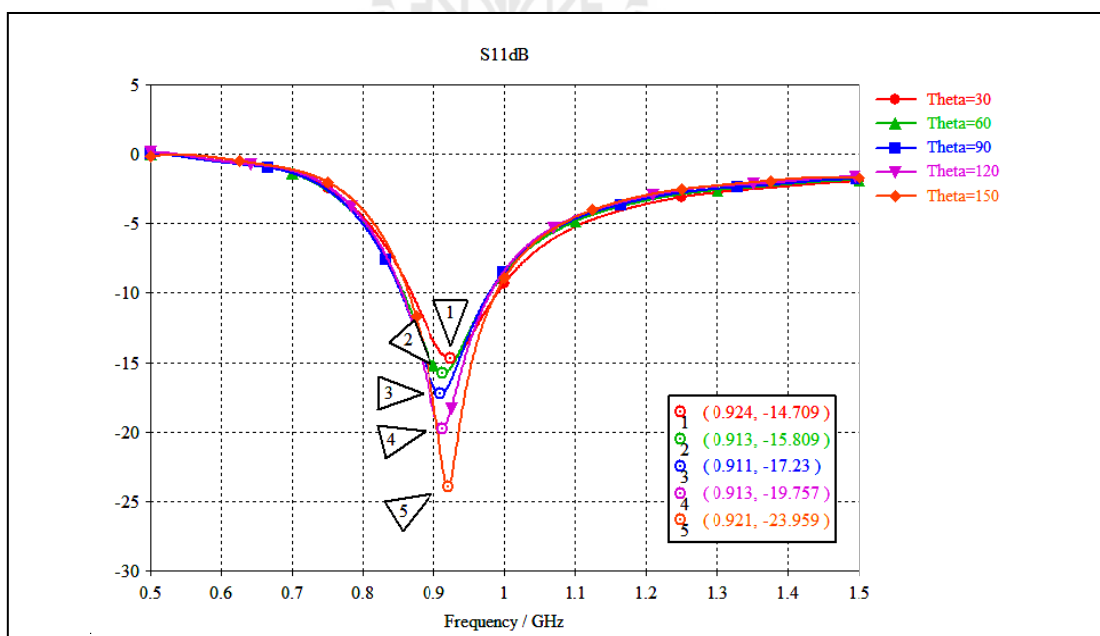
เมื่อได้แบบจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนทั้งสามแบบแล้ว ได้นำมาทำการทดสอบผลของการตัดโค้งของสายอากาศ โดยผลที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีการปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS เมื่อมีการตัดโค้งค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 - 3.18 สำหรับสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สามชั้นและห้าชั้นตามลำดับ จากนั้นได้ทำการจำลองแบบเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขณะตัดโค้ง ได้ผลการจำลองแบบดังรูปที่ 3.19 - 3.21 สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น รูปที่ 3.22 - 3.24 สำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และรูปที่ 3.25 - 3.27 สำหรับสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นตามลำดับ



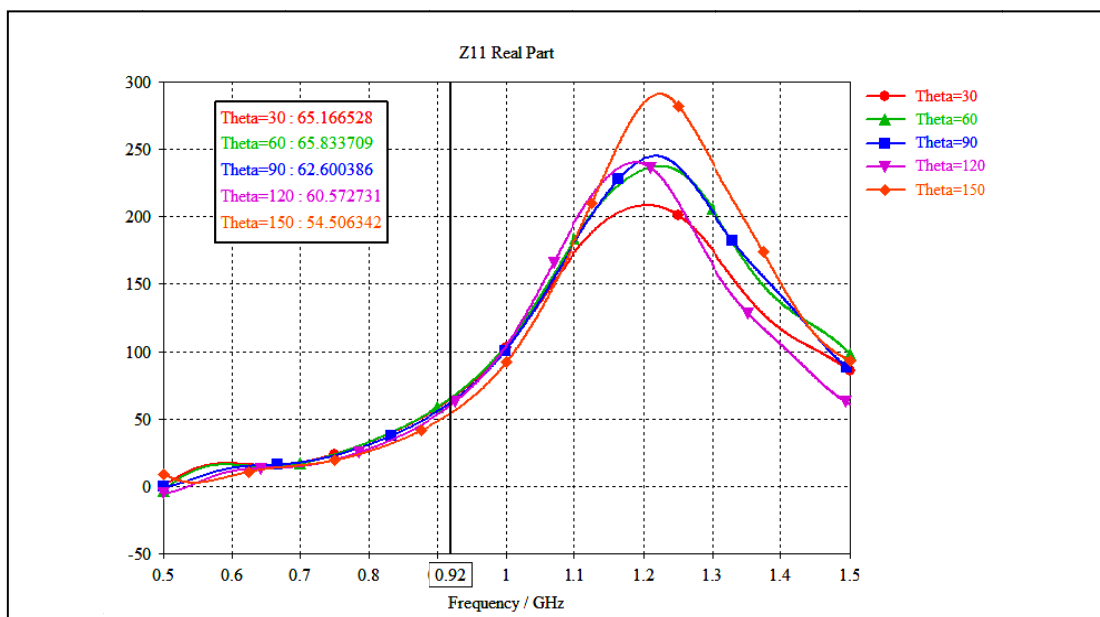
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ



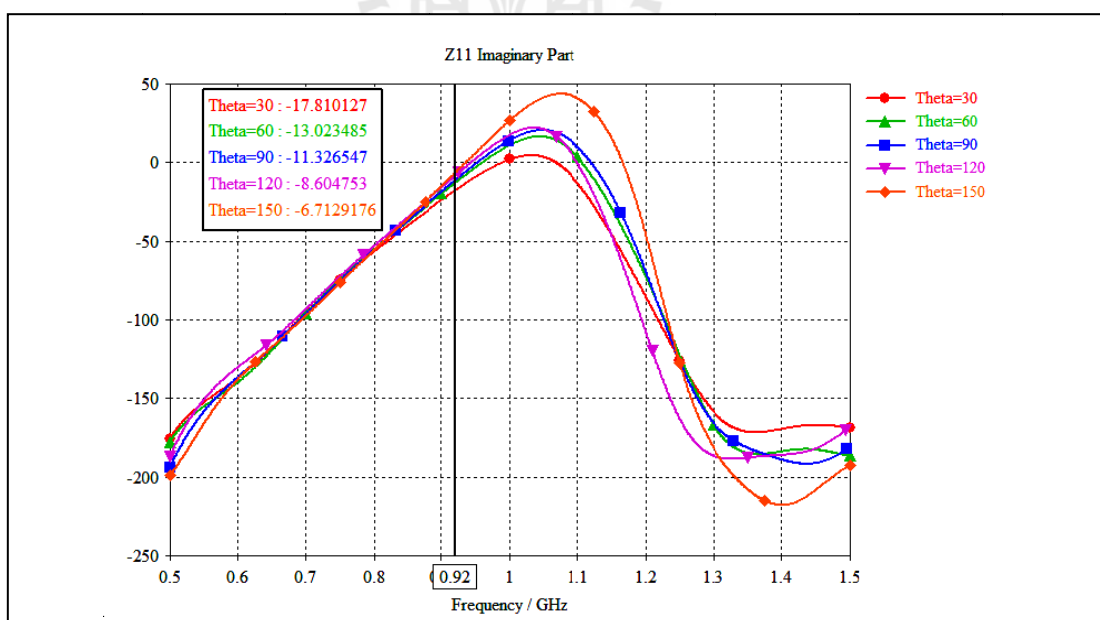
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ



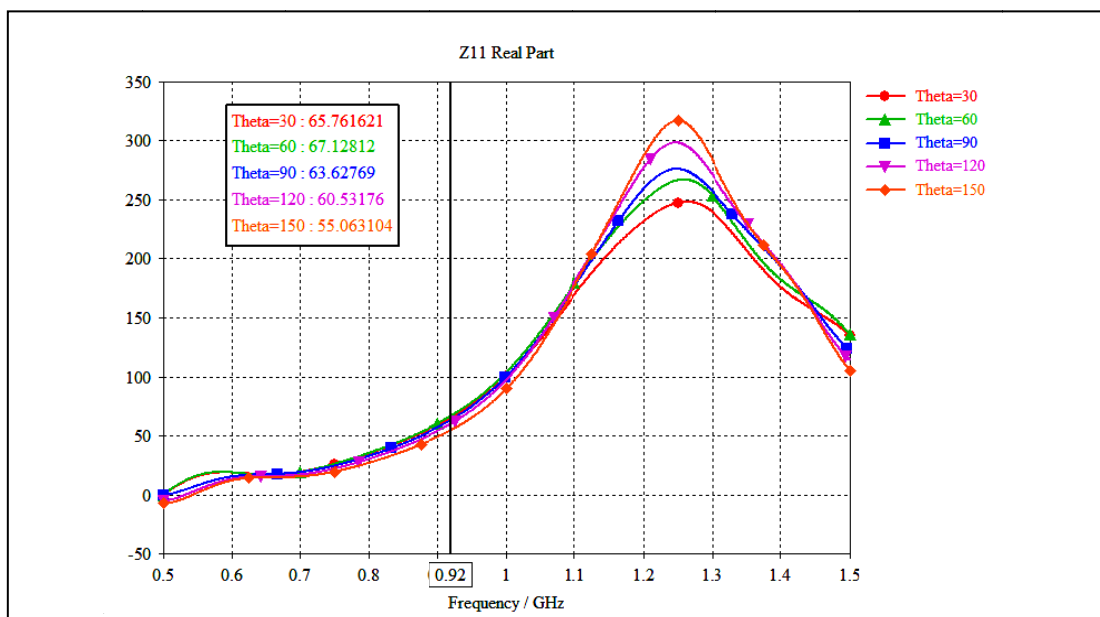
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองแบบค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็น โฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งต่าง ๆ



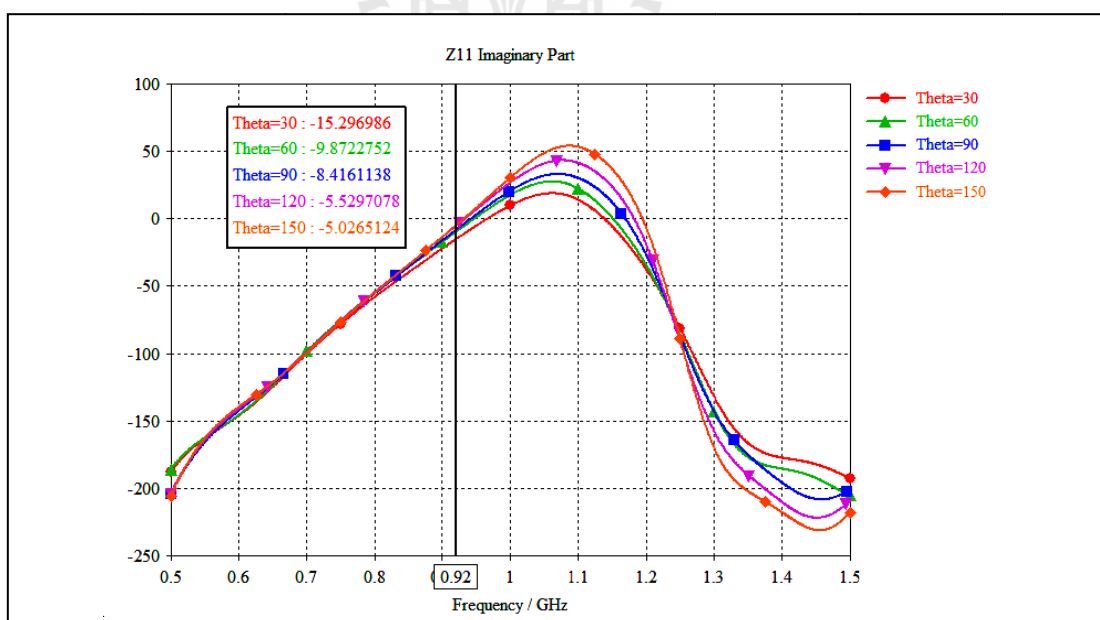
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



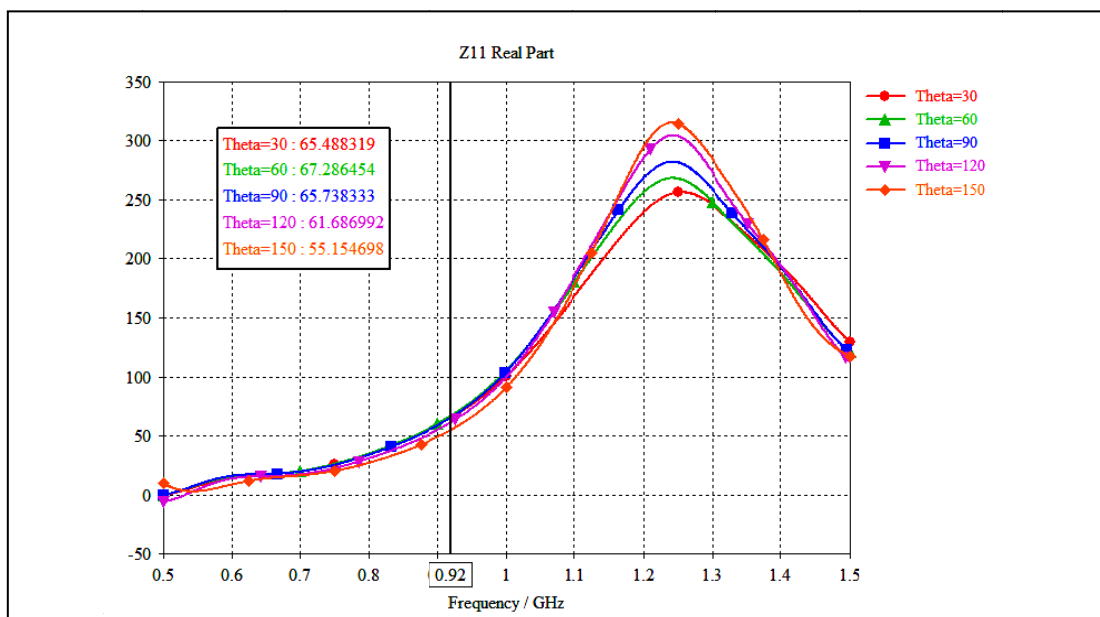
รูปที่ 3.20 ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



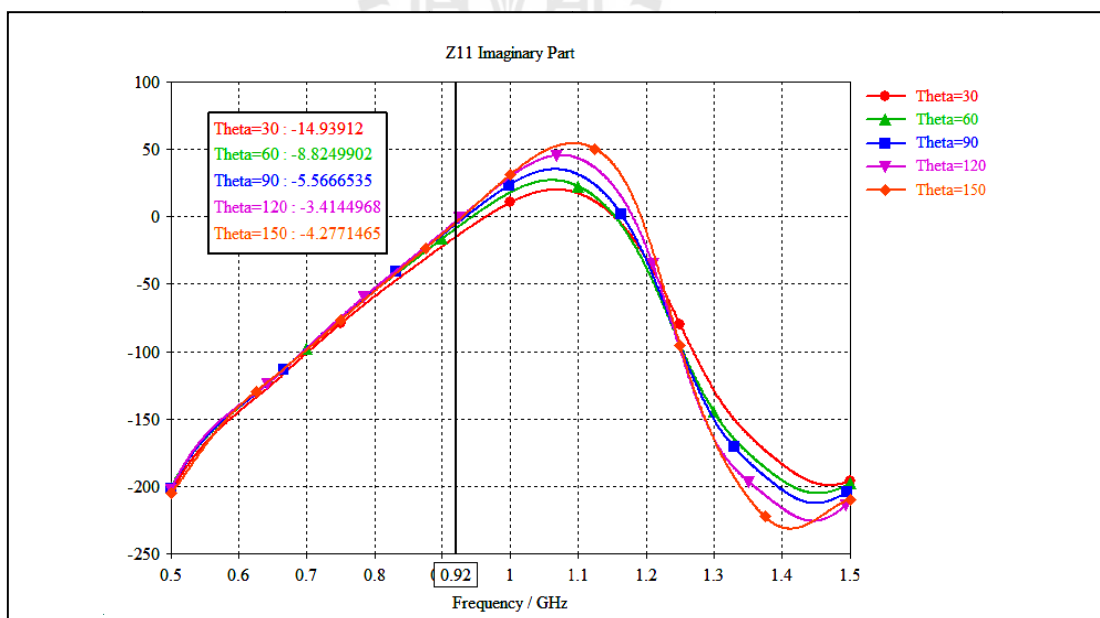
รูปที่ 3.21 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองแบบค่ารีซิสแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแบบค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ

โดยผลลัพธ์และผลการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการตัดโค้งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนขณะตัดโค้ง

| มุมการตัดโค้ง (องศา) | ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ (MHz) | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนสามชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนห้าชั้น |
| 30 | 925 | 922 | 924 |
| 60 | 919 | 918 | 913 |
| 90 | 920 | 920 | 911 |
| 120 | 919 | 918 | 913 |
| 150 | 925 | 923 | 921 |
| ค่าเฉลี่ย | 921.6 | 920.2 | 916.4 |
| ค่าความเบี่ยงเบน มาตรฐาน | 3.13 | 2.28 | 5.73 |

ตารางที่ 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง

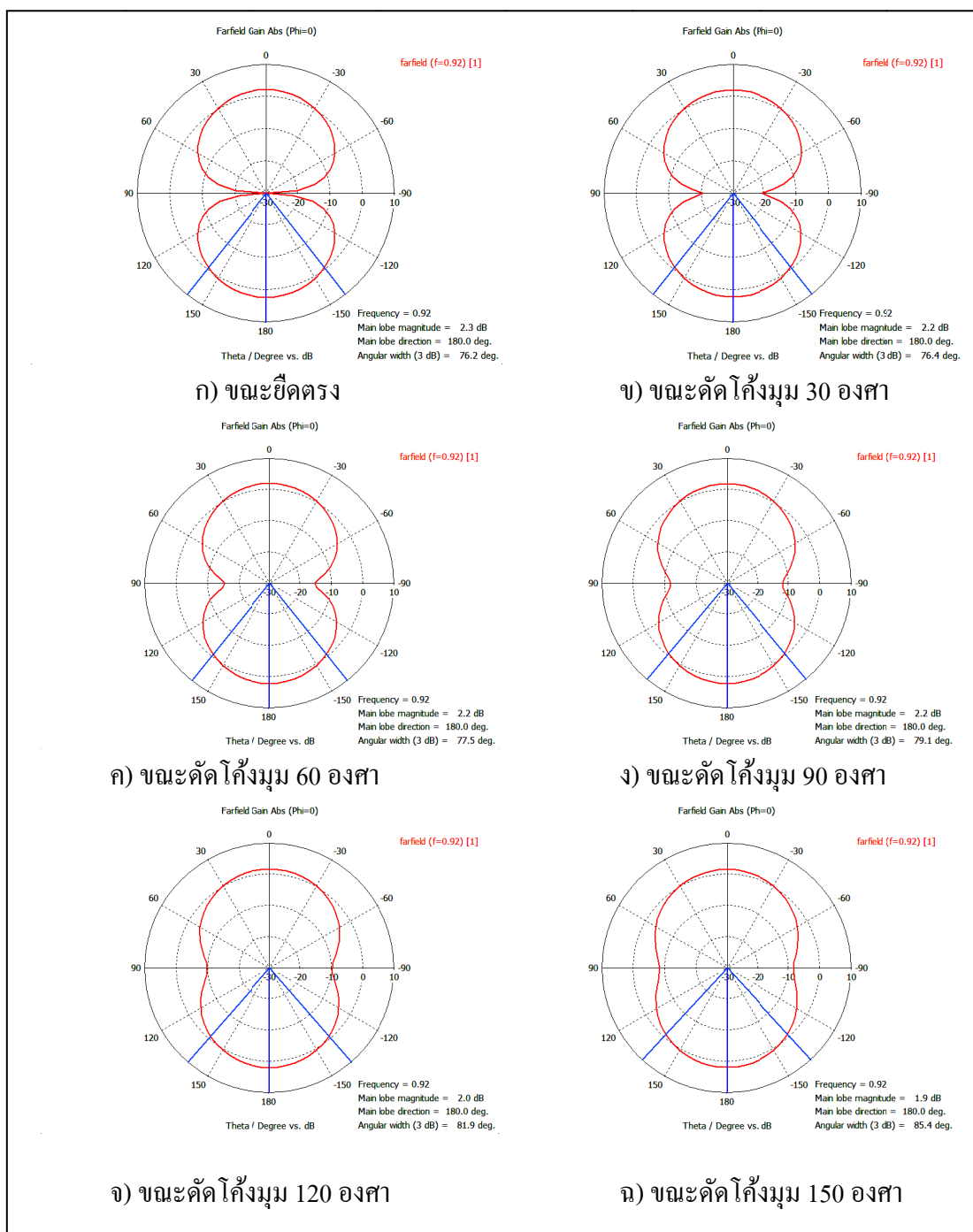
| มุมการตัด โค้ง (องศา) | ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศ (โอห์ม) | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|
| | สายอากาศไดโพลแบบ แผ่นแบนหนึ่งชั้น | | สายอากาศไดโพลแบบ แผ่นแบนสามชั้น | | สายอากาศไดโพลแบบ แผ่นแบนห้าชั้น | |
| | Z | Z | Z | Z | Z | Z |
| 30 | 65.16-j17.81 | 67.5501 | 65.76-j15.29 | 67.5142 | 65.48-j13.93 | 66.9453 |
| 60 | 65.83-j13.02 | 67.1052 | 67.12-j9.87 | 67.8418 | 67.28-j8.82 | 67.8557 |
| 90 | 62.60-j11.32 | 63.6153 | 63.12-j8.41 | 63.6778 | 65.73-j5.56 | 65.9647 |
| 120 | 60.57-j8.60 | 61.1775 | 60.53-j5.52 | 60.7812 | 61.68-j3.41 | 61.7742 |
| 150 | 53.50-j6.71 | 53.9191 | 55.06-j5.02 | 55.2884 | 55.15-j3.27 | 55.2469 |
| $\Delta Z /\Delta\theta$ | -0.1136 | | -0.1019 | | -0.0975 | |

จะเห็นได้ว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น มีค่าเฉลี่ยของค่าความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ที่ความถี่ 920MHz มากที่สุด รวมทั้งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด นั่นคือ มีความเปลี่ยนแปลงจากความถี่ที่ออกแบบไว้น้อยที่สุด

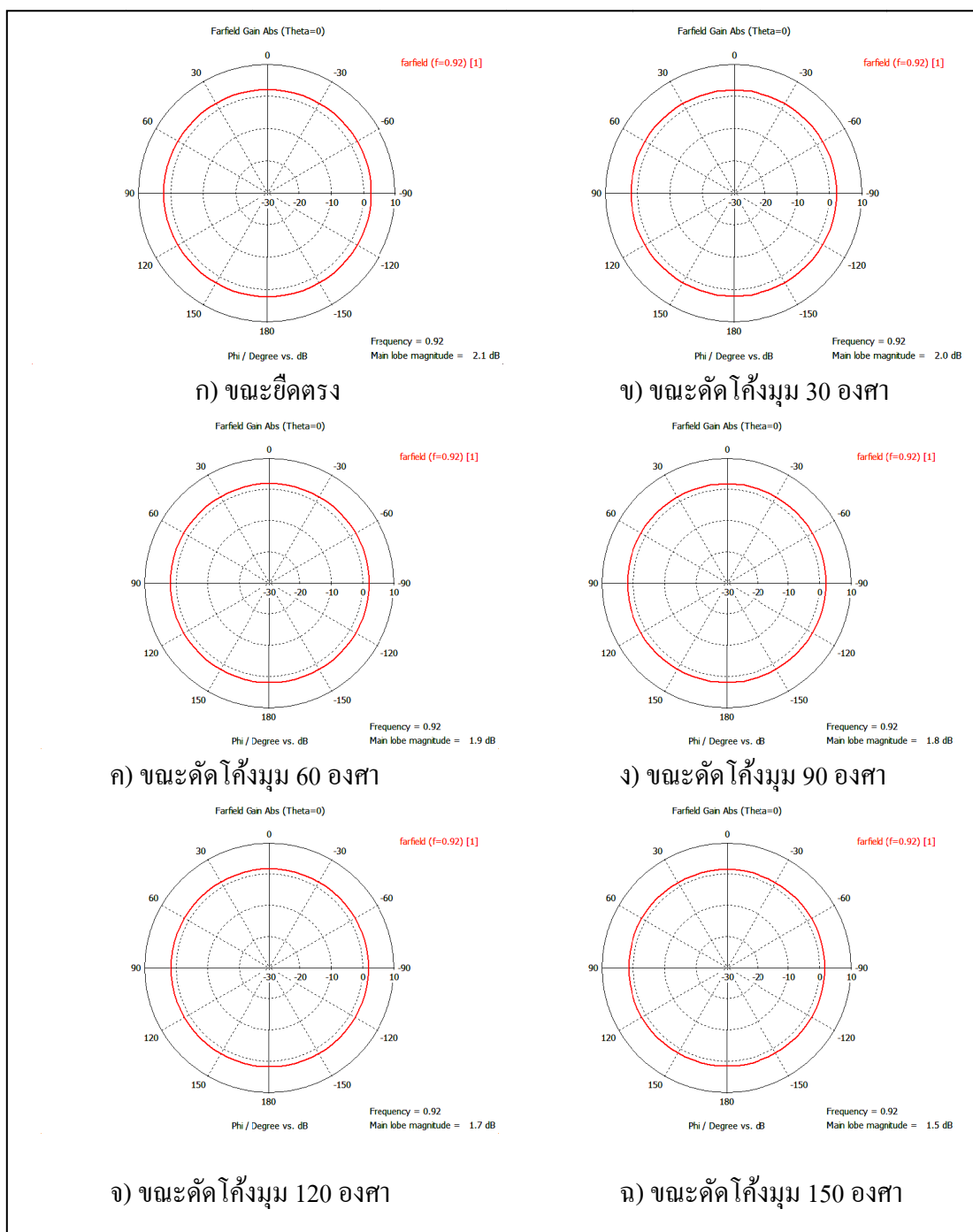
สำหรับค่าอิมพีแดนซ์นั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนทั้งสามชนิด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่ารีซิสแตนซ์มีค่าลดลง และค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อมีการตัดโค้งมากขึ้น และจะเห็นได้ว่า สายอากาศที่มีจำนวนชั้นที่มากกว่า จะมีค่ารีแอกแตนซ์ที่เป็นลบน้อยกว่า นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของสายอากาศจะไปช่วยลดค่ารีแอกแตนซ์ลงได้ หากพิจารณาเฉพาะค่ารีซิสแตนซ์ จะพบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สามชั้นและห้าชั้น มีการเปลี่ยนแปลงค่ารีซิสแตนซ์ที่เป็นผลจากการตัดโค้งอยู่ที่ 11.66 โอห์ม 10.70 โอห์ม และ 10.33 โอห์มตามลำดับ และหากพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์ จะพบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สามชั้นและห้าชั้น มีการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์ที่เป็นผลจากการตัดโค้งอยู่ที่ 11.10 โอห์ม 10.27 โอห์ม และ 10.69 โอห์ม และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าขนาดของอิมพีแดนซ์และพิจารณาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของอิมพีแดนซ์เทียบกับค่ามุมที่ทำการตัดโค้งจะพบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์น้อยที่สุด โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลง 0.0975 โอห์มต่อการตัดโค้งหนึ่งองศา และสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น และสามชั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง 0.1136 โอห์ม และ 0.1019 โอห์มต่อการตัดโค้งหนึ่งองศา ตามลำดับ

3.4.2 อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

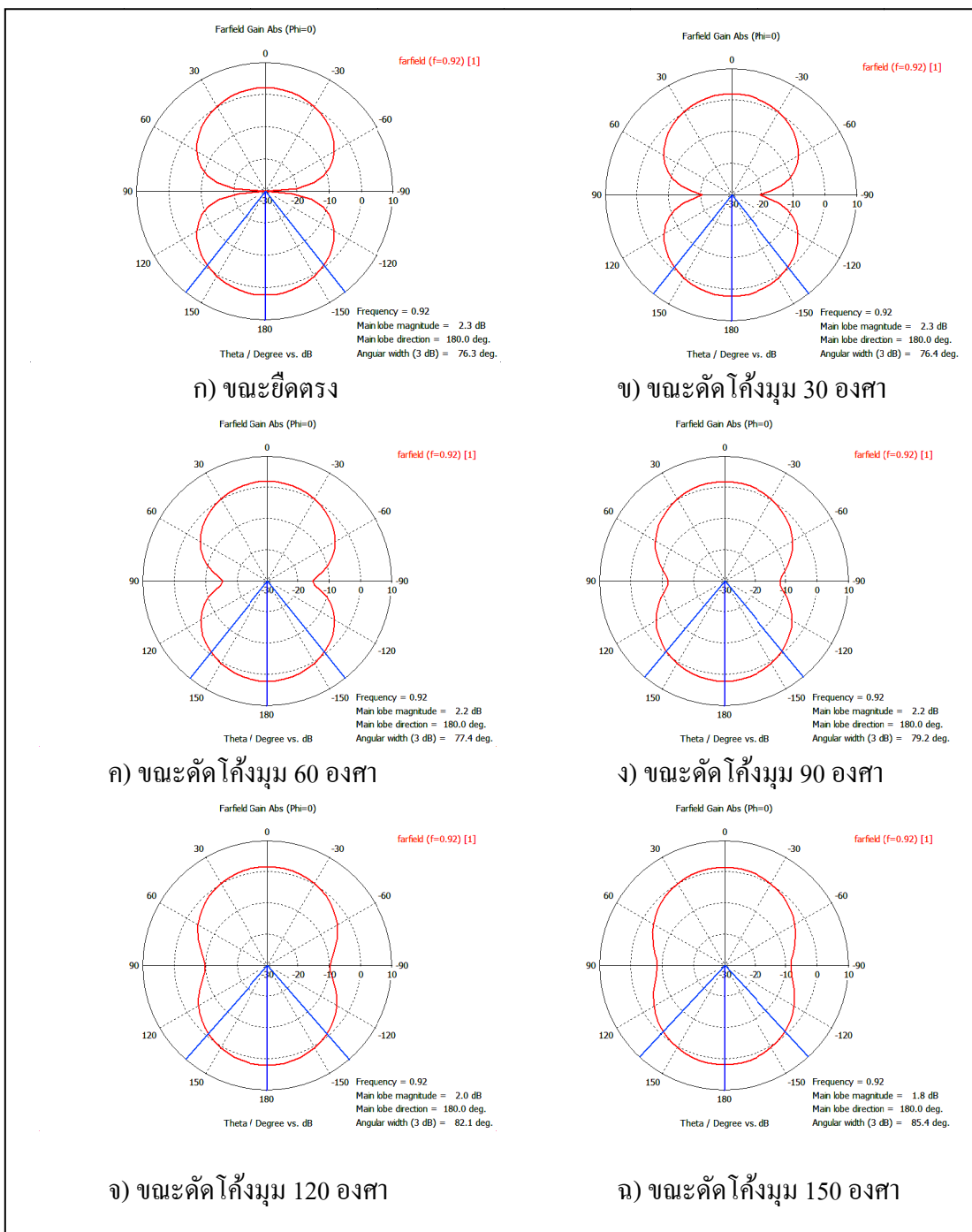
สำหรับในการออกแบบสายอากาศนั้น นอกจากจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์แล้ว คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศ คือ อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เนื่องจากอัตราขยายจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของสายอากาศที่จะบอกได้ว่าสายอากาศที่ออกแบบมานั้นจะสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับสายอากาศอ้างอิงมาตรฐาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นไดโพลขนาดครึ่งความยาวคลื่น หรือสายอากาศไอโซทรอปิก และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของการใช้งานสายอากาศ ว่าจะสามารถใช้งานในทิศทางรอบตัว หรือเหมาะกับการใช้งานแบบมีทิศทาง รวมทั้งลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณได้ดีที่สุด สำหรับผลลัพธ์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 - 3.30 ตามลำดับ



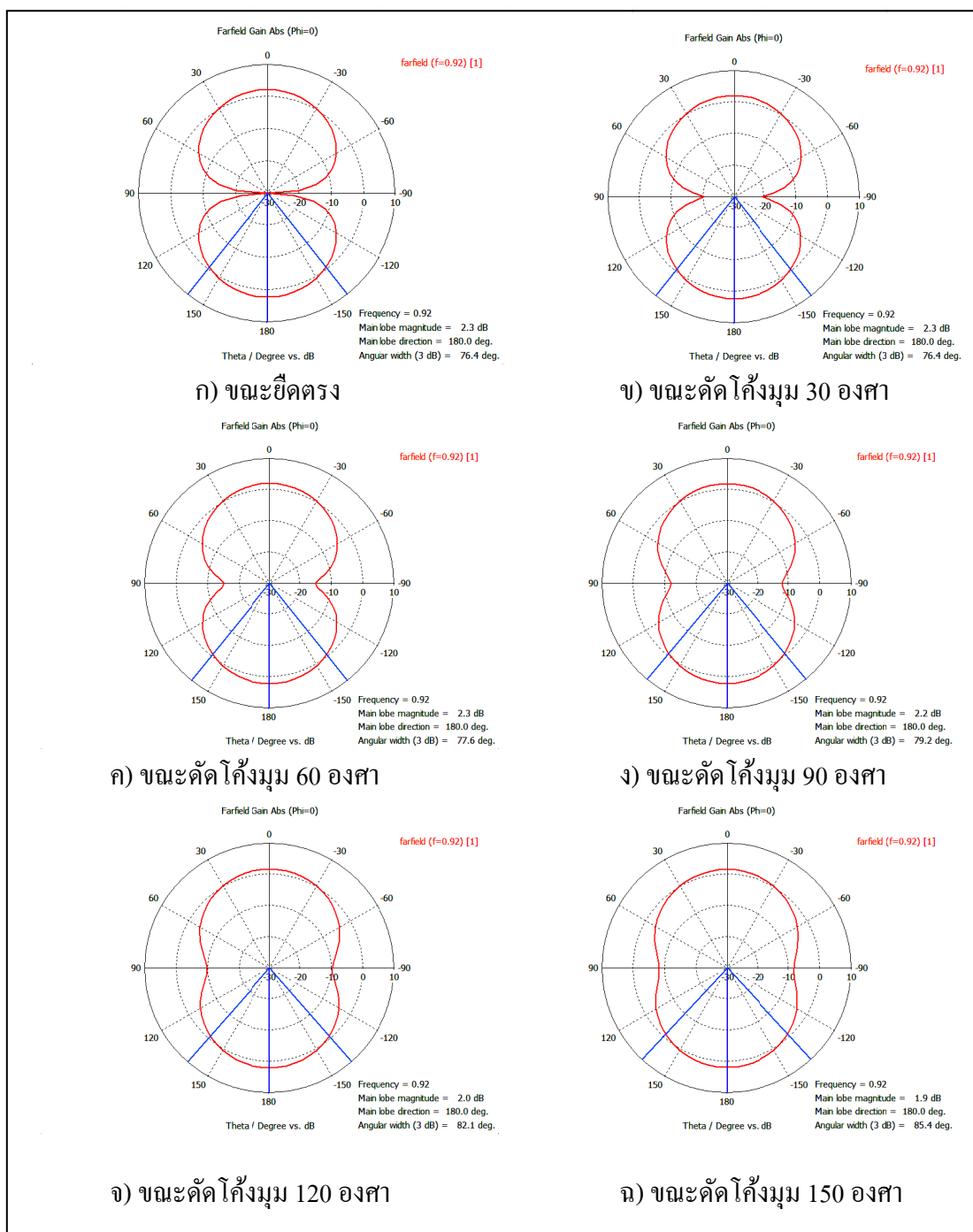
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.26 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ YZ ของสายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนสามชั้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.29 ผลการจำลองแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ XZ ของสายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนห้าชิ้นที่มุมความโค้งค่าต่าง ๆ

สำหรับผลลัพธ์อัตราขยายและค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth : HPBW) ที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น จะแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง

| มุมการตัดโค้ง (องศา) | ค่าอัตราขยาย (dB) | | |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนสามชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนห้าชั้น |
| 30 | 2.007 | 2.012 | 2.049 |
| 60 | 1.894 | 1.898 | 1.934 |
| 90 | 1.817 | 1.82 | 1.827 |
| 120 | 1.662 | 1.663 | 1.664 |
| 150 | 1.488 | 1.456 | 1.485 |

ตารางที่ 3.5 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ได้จากการจำลองแบบสำหรับของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง

| มุมการตัดโค้ง (องศา) | ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (องศา) | | |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนสามชั้น | สายอากาศไดโพล แบบแผ่นแบนห้าชั้น |
| 30 | 76.4 | 76.4 | 76.4 |
| 60 | 77.5 | 77.4 | 77.6 |
| 90 | 79.1 | 79.2 | 79.2 |
| 120 | 81.9 | 82.1 | 82.1 |
| 150 | 85.4 | 85.4 | 85.4 |

สำหรับผลลัพธ์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

ห้าชั้น พบว่ามีรูปแบบใกล้เคียงกัน โดยจะพบว่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นจะมีค่าที่มากกว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น แต่ก็ถือว่าแตกต่างกันไม่มากนัก

3.5 สรุป

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเป็นสายอากาศต้นแบบในการศึกษาออกแบบ รวมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจากการใช้งานบนพื้นผิวโค้ง โดยนำเสนอการพัฒนาเทคนิคการออกแบบสำหรับใช้แก้ปัญหาที่คุณสมบัติของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการโค้งงอของสายอากาศ ด้วยเทคนิคการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนซ้อนกันแบบสองชั้น และแบบหลายชั้น

จากผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น พบว่าเมื่อมีการโค้งงอของสายอากาศจะทำให้ค่าขนาดของอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการออกแบบสายอากาศเป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้น และแบบหลายชั้น อย่างไรก็ตามการทำให้สายอากาศแต่ละชั้นมีการเชื่อมต่อกันระหว่างขณะโค้งงอไปตามพื้นผิวของวัตถุที่จะนำไปใช้งานได้ จำเป็นต้องมีชิ้นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดสายอากาศแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน จึงได้ทำการออกแบบให้สายอากาศมีชั้นของฉนวนเพื่อเป็นวัสดุเชื่อมต่อระหว่างแต่ละชั้น โดยเลือกใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบแผ่นบาง โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เท่ากันเมื่อมีการโค้งงอ กล่าวคือ เมื่อมีการโค้งงอวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนซ้อนทับกัน จะทำให้เกิดความแตกต่างกันของความยาวสำหรับวัสดุแต่ละชั้น อันเนื่องมาจากรัศมีของการโค้งงอที่ไม่เท่ากันของวัสดุแต่ละชั้น โดยพบว่าวัสดุชั้นนอกจะมีขนาดความยาวสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับชั้นที่ไม่มีมีการโค้งงอลดลง และวัสดุที่อยู่ชั้นในจะมีความยาวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้จากการออกแบบสายอากาศแบบหลายชั้นแสดงแทนได้ด้วย สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นและห้าชั้น พบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นและสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เรโซแนนซ์น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นและห้าชั้น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับสมการที่ใช้คำนวณความยาวส่วนต่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการโค้งงอ ที่หากมีจำนวนชั้นสายอากาศที่มากก็จะส่งผลให้ความยาวส่วนต่างขณะโค้งงอมีมากตามไปด้วย เมื่อความยาวส่วนต่างของสายอากาศมีมากกว่า จึงมีการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์จากการโค้งงอได้มากกว่า และสำหรับความถี่เรโซแนนซ์นั้น

สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น ค่าความยาวส่วนเกินที่ได้มีความเหมาะสมกว่าจึงมีการเลื่อนค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีกว่านั่นเอง และเมื่อมีความยาวส่วนเกินของสายอากาศมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปที่ความถี่ที่ต่ำกว่า ดังเช่นผลลัพท์จากสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นที่ความยาวส่วนต่างของสายอากาศมีมากเกินไปในการชดเชยความถี่จากการคัดโค้ง และสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นค่าความยาวส่วนต่างที่ได้มีความเหมาะสมกว่าจึงมีการเลื่อนค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่น้อยกว่านั่นเอง

สำหรับผลลัพท์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น พบว่ามีรูปแบบใกล้เคียงกันโดยจะพบว่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นจะมีค่าที่มากกว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น แต่ก็ถือว่าแตกต่างกันไม่มากนัก



บทที่ 4

การสร้างสายอากาศต้นแบบและการวัดผล

4.1 บทนำ

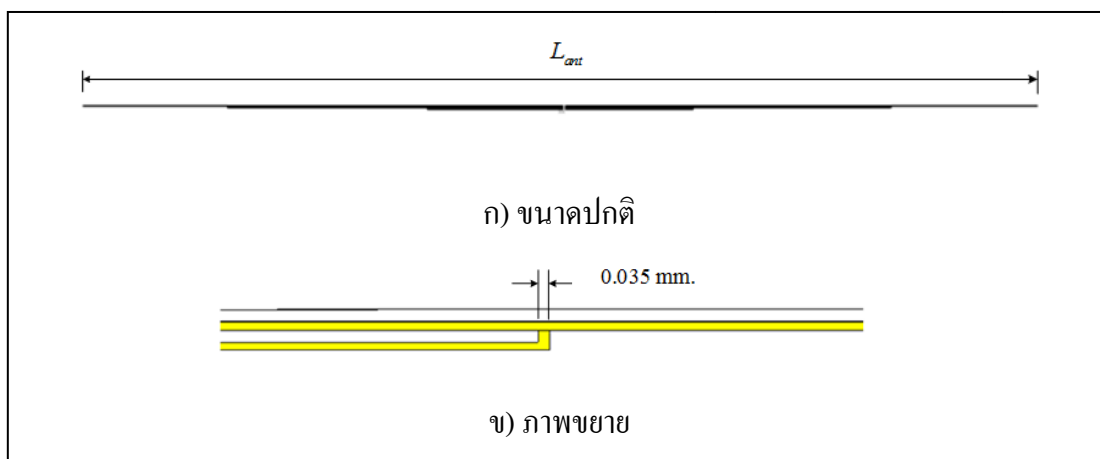
ในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบสายอากาศ โดยการนำทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ รวมทั้งผลลัพธ์จากการจำลองแบบที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา เพื่อใช้สำหรับการออกแบบสร้างชิ้นงาน รวมถึงการทดสอบวัดค่าคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสำหรับใช้งานกับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ค่าอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นและค่าอัตราขยายของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายรุ่น HP8722D เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการวัดค่าต่าง ๆ จากสายอากาศต้นแบบ

4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

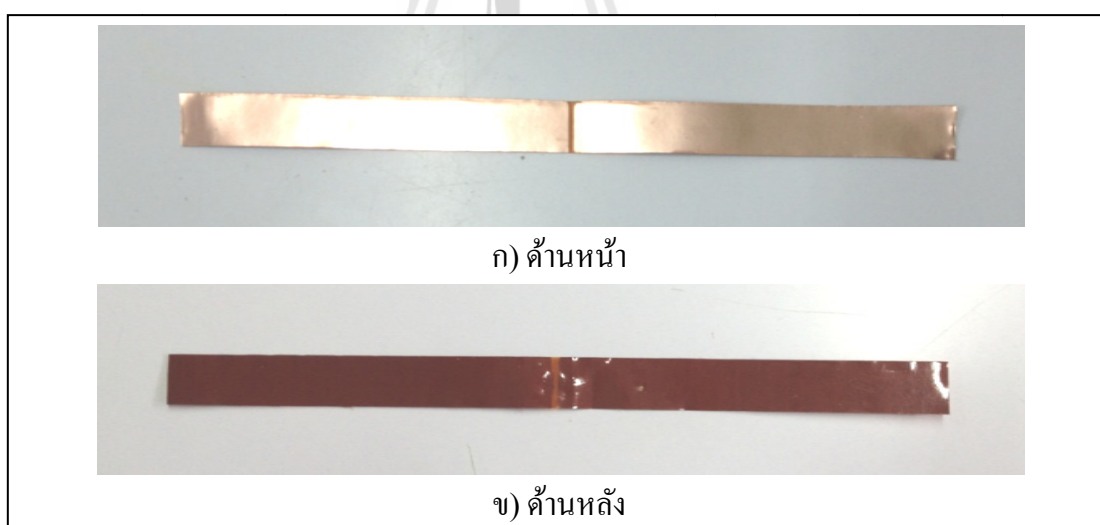
จากผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น จะให้ผลลัพธ์จากการตัดโค้งที่แตกต่างกันตามจำนวนชั้นของสายอากาศ ดังนั้นสำหรับการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ จึงต้องสร้างสายอากาศที่มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ในแบบจำลอง โดยในการสร้างสายอากาศต้นแบบจะทำการสร้างสายอากาศสามชนิดคือ สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น โดยใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวงจรมิพิมพ์แบบแผ่นบางยี่ห้อ Pyralux รุ่น AP9121R จากบริษัท DuPont (DuPont, 2013) ที่ทำจากแผ่นทองแดงเคลือบบนแผ่นฉนวนที่ทำจากโพลีไมด์ที่สามารถตัดโค้งได้ โดยมีชั้นทองแดงหนา 0.035 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นฉนวนโพลีไมด์เป็น 0.051 มิลลิเมตร และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นฉนวนโพลีไมด์มีค่าเป็น 3.4

อย่างไรก็ตามในแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้นั้น จะมีส่วนที่ทำให้สายอากาศแต่ละชั้นเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้าที่ส่วนปลายของสายอากาศชั้นบนแต่ละชั้น โดยจะมีการหักงอและพับลงไปหาสายอากาศที่อยู่ชั้นล่างดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งในการสร้างสายอากาศต้นแบบจะใช้การพับให้

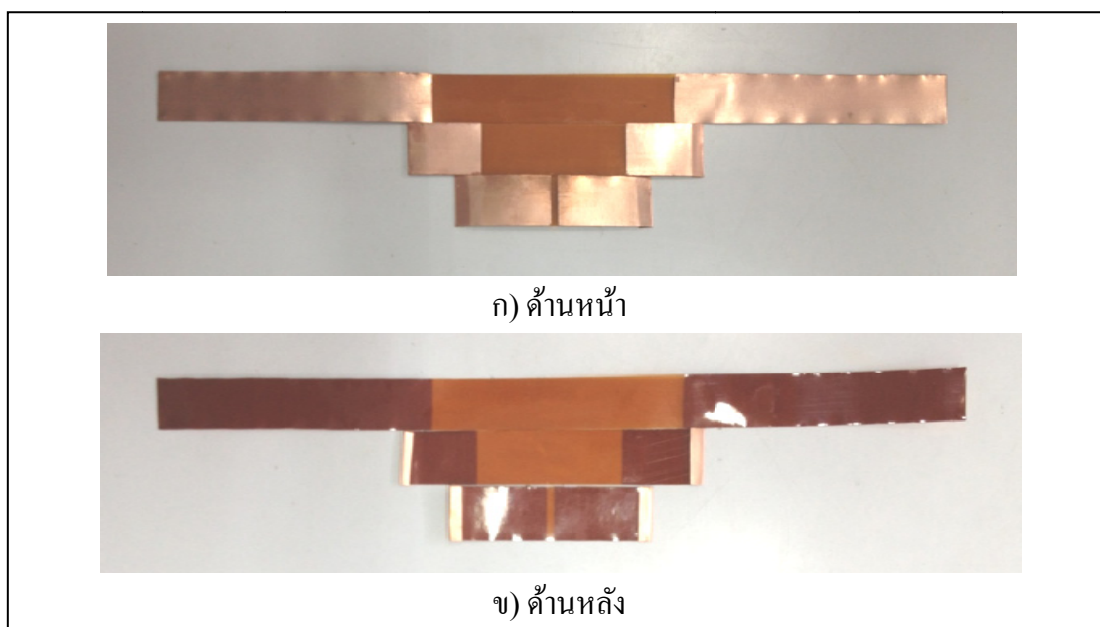
ส่วนปลายของสายอากาศแต่ละชั้นหักงอและพับกลับไปด้านหลังโดยให้ส่วนที่พับกลับไปมีขนาดยาว 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.5



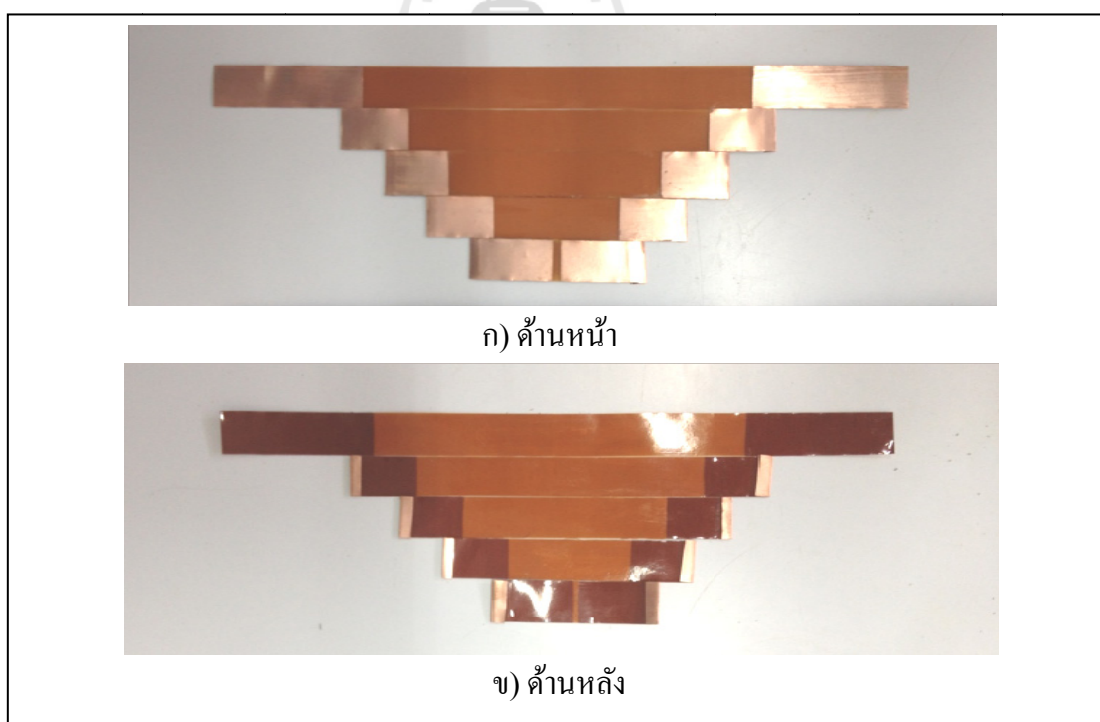
รูปที่ 4.1 ส่วนปลายของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น



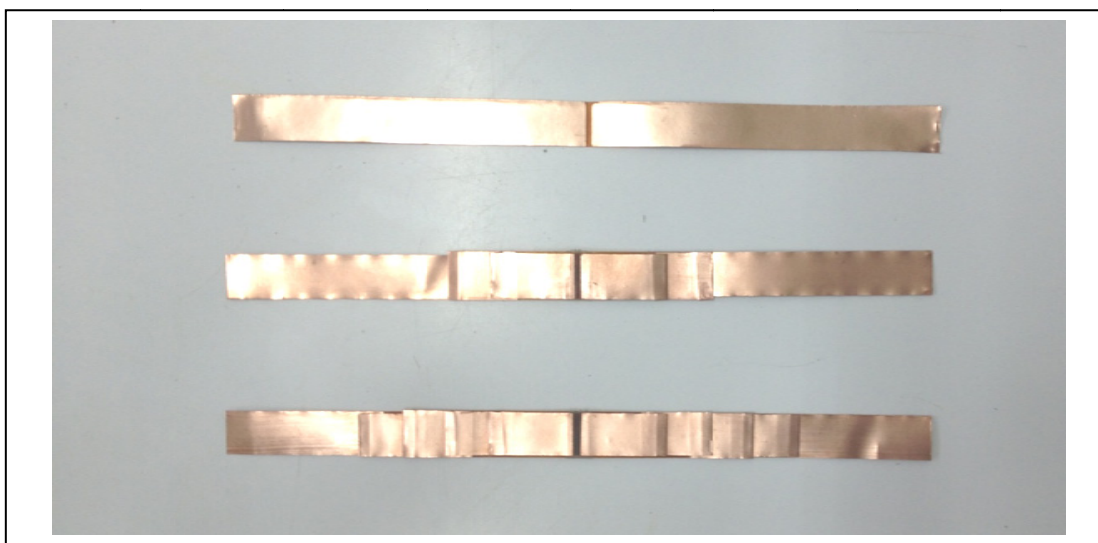
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศโคโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น



รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบต้นแบบสายอากาศโคโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น



รูปที่ 4.5 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแต่ละแบบหลังประกอบ

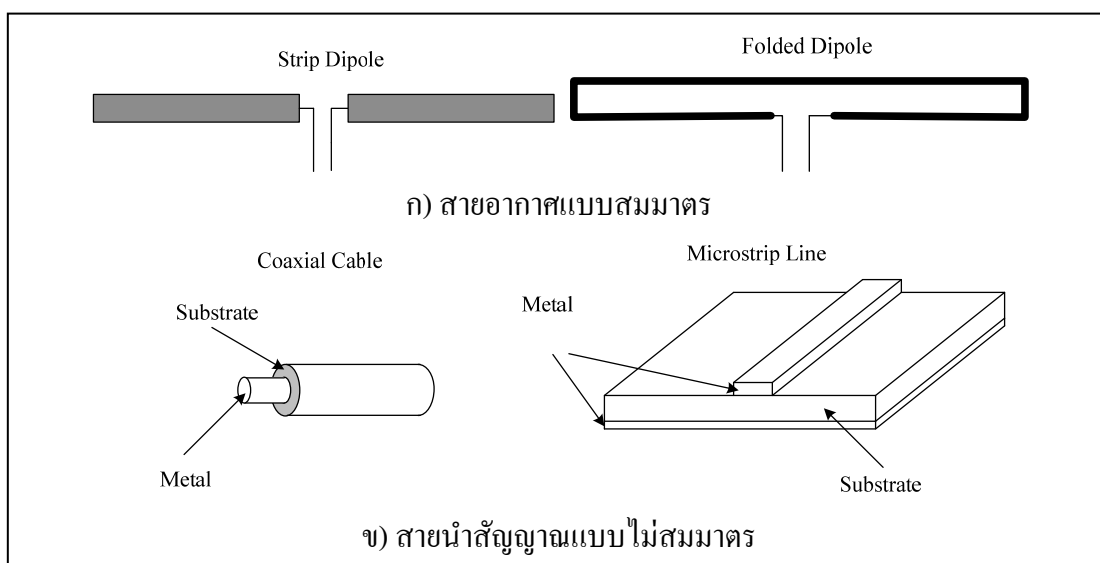
4.3 การวัดผลสายอากาศต้นแบบ

สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่มีคุณลักษณะของตัวนำ และรูปแบบ โครงสร้างเป็นแบบสมดุล (Balance) ดังนั้นในการที่เราจะทำการวัดผลสายอากาศไดโพลโดยการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องมือวัดที่มีขั้วต่อที่เป็นสายโคแอกเซียลที่มีลักษณะ โครงสร้างตัวนำเป็นแบบไม่สมดุลนั้น จำเป็นต้องทำการแปลงคุณสมบัติดังกล่าว ให้สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า บาลัน (Balun)

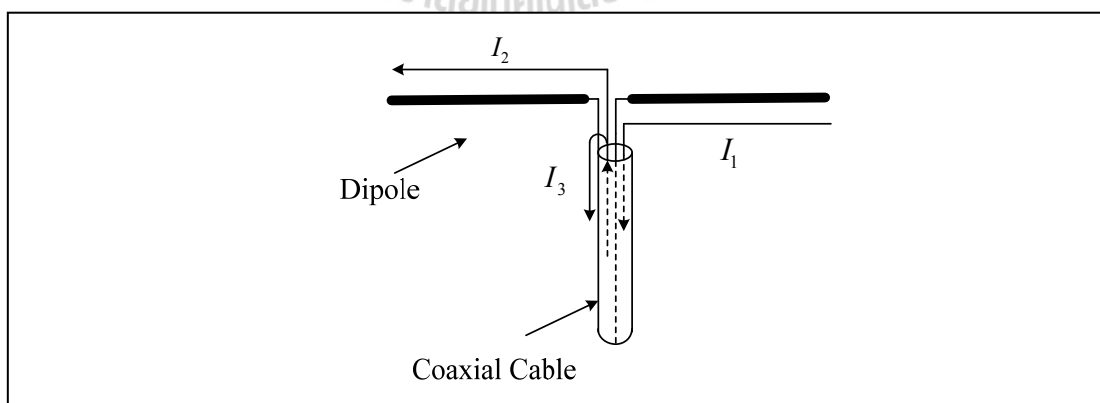
4.3.1 บาลัน

สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล เป็นสายนำสัญญาณที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูกและมีอิมพีแดนซ์ให้เลือกใช้ให้เหมาะกับการใช้งาน ทั้งที่เป็นสายนำสัญญาณแบบ 50 โอห์ม และ 75 โอห์ม และโดยทั่วไปแล้วเครื่องมือวัดที่ใช้งานส่วนใหญ่จะมีขั้วต่อที่เป็นสายโคแอกเซียลที่มีโครงสร้างตัวนำเป็นแบบไม่สมดุล อย่างไรก็ตามในการใช้งานสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลมาเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีโครงสร้างตัวนำในลักษณะสมมาตร อาทิ สายอากาศไดโพล จะต้องพบกับปัญหาหลัก ๆ สองประการ โดยปัญหาอย่างแรก คือ การไม่เข้ากันของอิมพีแดนซ์ (impedance mismatch) กล่าวคือ การใช้สายนำสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม มาต่อเข้ากับสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า เช่น สายอากาศไดโพลแบบพับ ที่มีอิมพีแดนซ์ประมาณ 200 โอห์ม จะทำให้สายนำสัญญาณไม่สามารถส่งผ่านกำลังงานไปยังสายอากาศได้อย่างเต็มที่ และ

หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน พบว่าจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณอย่างมากจนไม่สามารถใช้งานได้ และปัญหาที่สอง คือ ปัญหาเนื่องจากสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลเป็นสายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร เมื่อนำไปต่อเชื่อมกับสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบสมมาตร จะทำให้การส่งผ่านสัญญาณไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่แปลงระหว่างโครงสร้างที่เป็นแบบสมมาตรให้ต่อเข้ากับโครงสร้างที่ไม่สมมาตรดังรูปที่ 4.6 โดยที่การแปลงดังกล่าวต้องทำให้อิมพีแดนซ์ทั้งสองด้านมีค่าที่เข้ากันได้



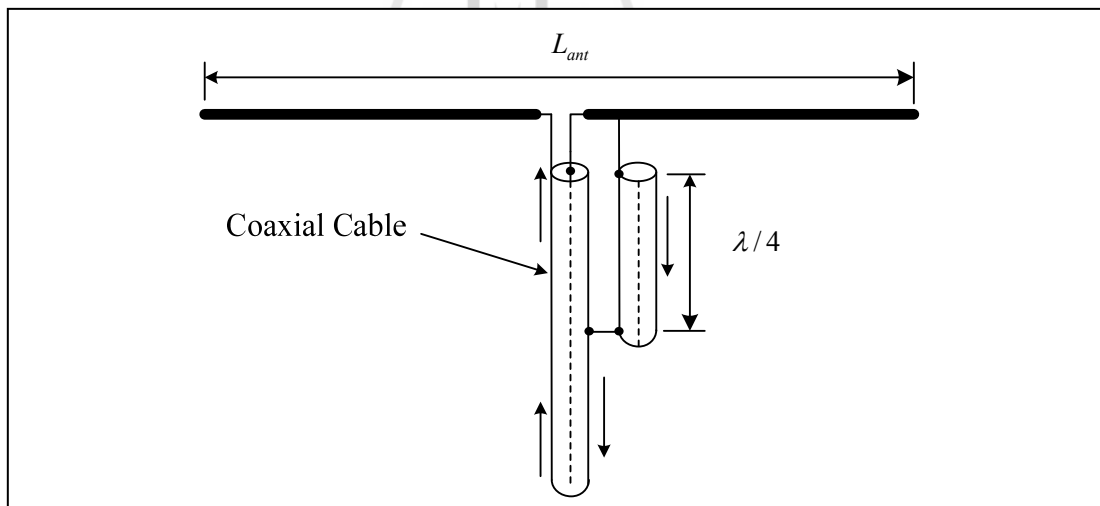
รูปที่ 4.6 โครงสร้างสายอากาศแบบสมมาตรและสายนำสัญญาณแบบไม่สมมาตร



รูปที่ 4.7 ค่ากระแสที่เกิดขึ้นกับสายอากาศไดโพลเมื่อถูกป้อนสัญญาณโดยตรงจากสายโคแอกเซียล

รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างกรณีสายอากาศไดโพลวางตัวในแนวระนาบ ถูกป้อนสัญญาณที่บริเวณกึ่งกลางของสายอากาศด้วยสายโคแอกเซียล โดยทำการต่อเข้าโดยตรงแบบง่าย ๆ กล่าวคือ ที่ตัวนำภายใน (inner conductor) ได้ทำการเชื่อมต่อกับแกนด้านขวาของไดโพล ในขณะที่ตัวนำภายนอก (outer conductor) ถูกเชื่อมต่อกับแกนฝั่งซ้ายของสายอากาศไดโพล ผลจากการต่อเชื่อมดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดกระแสที่ไม่สมดุลจากลักษณะของกระแสที่ไหลภายในสายโคแอกเซียล กล่าวคือ เมื่อส่งสัญญาณป้อนให้กับสายโคแอกเซียล จะเกิดกระแส I_1 ซึ่งมีทิศทางการไหลของกระแสไปตามตัวนำภายใน และเกิดการเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดกระแส I_2 ที่มีทิศทางการไหลของกระแสไปตามตัวนำภายนอก นอกจากนี้ยังเกิดกระแส I_3 ที่ซึ่งไหลวนกลับในทิศทางตรงกันข้าม ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้ขนาดของกระแสมีค่าสูงสุดที่แกนด้านขวาของสายอากาศไดโพลเท่านั้น ส่วนแกนด้านซ้ายจะมีขนาดของกระแสที่ลดต่ำลง ทำให้สายอากาศไดโพลเกิดความไม่สมดุลเนื่องจากไม่ใช้บาลัน

สำหรับการออกแบบบาลันสามารถทำได้หลายลักษณะ โดยที่มีการใช้งานกันมากได้แก่ บาลันแบบความยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น (quarter wave length balun) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.8 (Balanis, C., 2005)

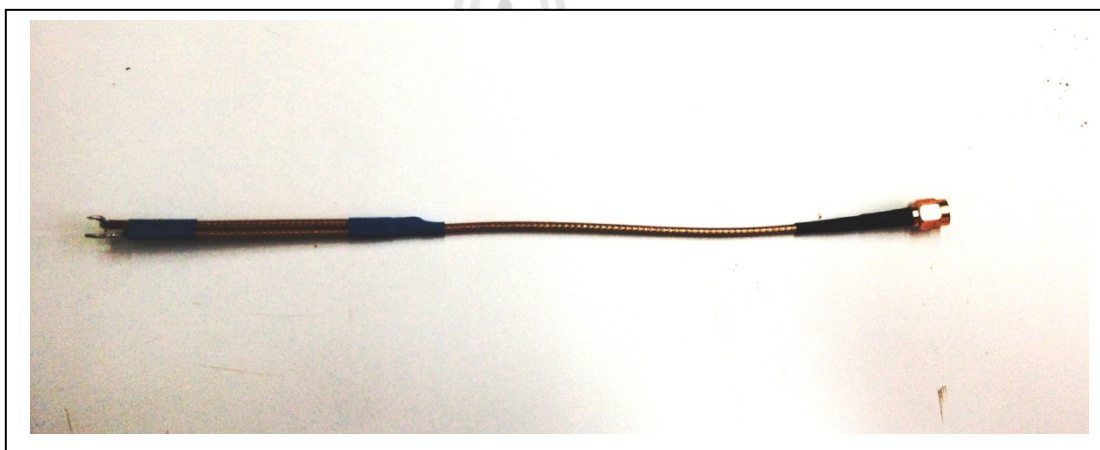


รูปที่ 4.8 บาลันแบบความยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น

จะเห็นว่าการสร้างบาลันสามารถทำได้โดยการเพิ่มสายนำสัญญาณขนาดความยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น มาทำการเชื่อมต่อส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณที่ปลายข้างหนึ่งและเชื่อมต่อที่ชั้นกราวด์ของสายนำสัญญาณที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะก่อให้เกิดผลของการต่อขนานของ

อิมพีแดนซ์ที่มีค่าเป็นอนันต์เข้ากับสายอากาศ ซึ่งผลจากการใช้บาลันลักษณะนี้ จะไม่ส่งผลกับอิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance) ของสายอากาศ และส่วนของสายนำสัญญาณที่ต่อเพิ่มเข้ามานี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสที่จะไปหักล้างกระแสที่ไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณ ซึ่งผลดังกล่าวทำให้จะไม่มีกระแสไหลที่ส่วนภายนอกที่อยู่ระหว่างจุดที่เชื่อมต่อเพิ่มเข้ามาในท้ายที่สุด

ในการใช้สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล มาใช้ในการสร้างบาลัน เราต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนความเร็วในการเดินทางของคลื่นในสายนำสัญญาณเทียบกับความเร็วแสง (Velocity Factor : VF) ของสายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล โดยจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียล RG178 ซึ่งจะมีค่า VF เป็น 0.69 (Wellshow Technology, 2014) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ว่า สายนำสัญญาณที่นำมาใช้ทำบาลันส่วนที่มีความยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น จะมีความยาวเท่ากับ 54.235 มิลลิเมตร จากนั้นทำการประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน โดยมีปลายข้างหนึ่งต่อเข้ากับคอนเน็คเตอร์แบบ SMA ดังแสดงในรูปที่ 4.9

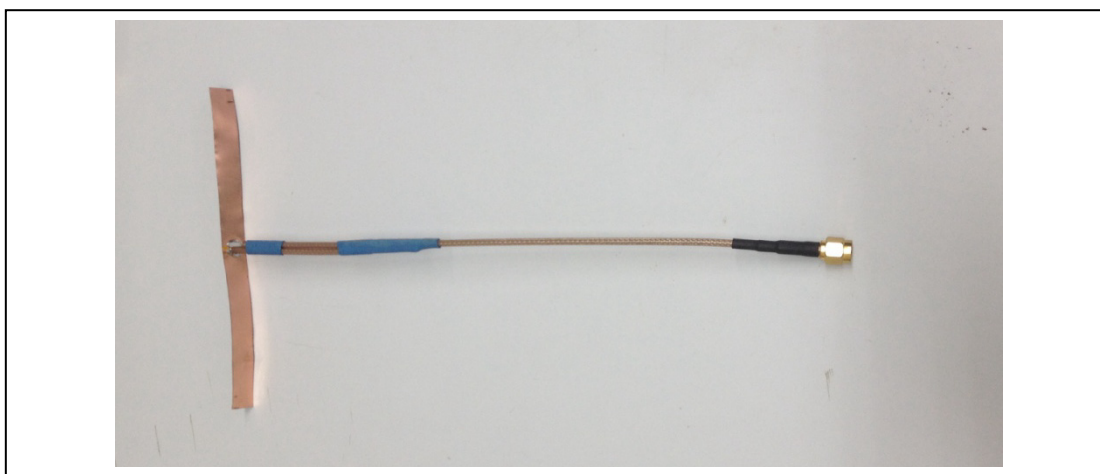


รูปที่ 4.9 บาลันสำหรับการวัดผลที่ทำจากสายโคแอกเซียล RG178

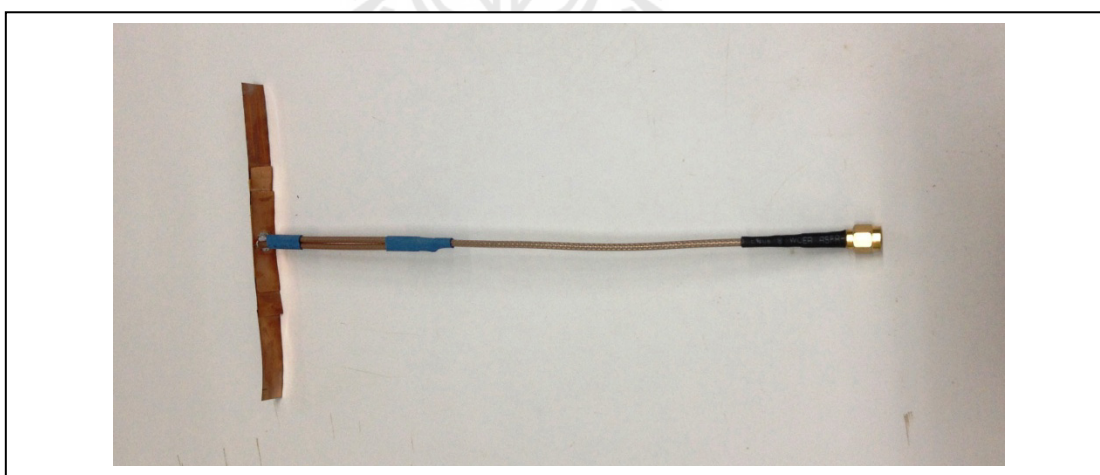
4.3.2 การวัดผลค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

ในการวัดผลค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ สามารถทำได้โดยทำการต่อสายอากาศต้นแบบที่ต่อกับบาลันแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12 เข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D และสำหรับการตัดโค้งสายอากาศจำเป็นต้องมีชั้นปิดด้านนอกที่ทำจากกระดาษขาวบาง เพื่อให้สายอากาศแต่ละชั้นแนบสนิทกัน และทำการยึดติดสายอากาศเข้ากับวัสดุโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้ง ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา

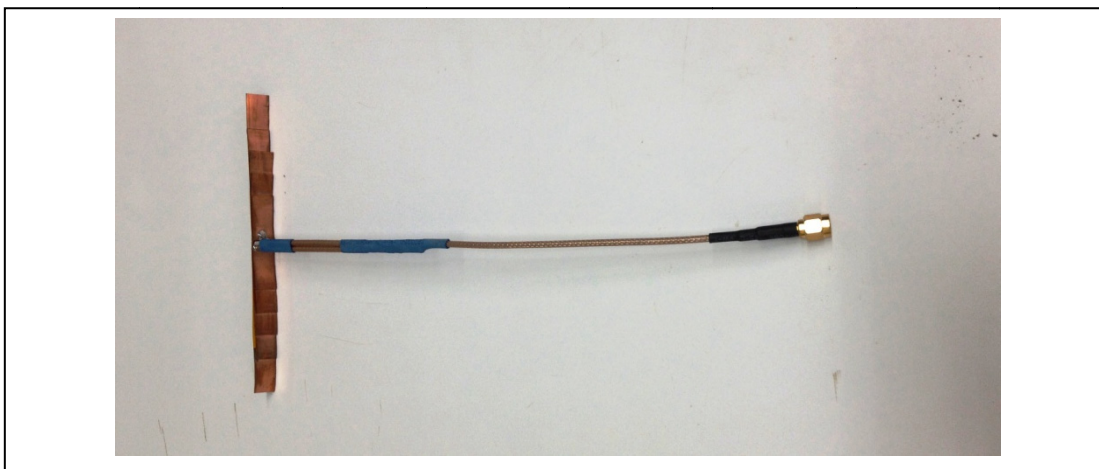
สำหรับวัสดุโฟม EPS ได้ทำการตัดให้มีความโค้งขนาดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากนั้นทำการติดตั้งสายอากาศกับโฟม EPS สำหรับแบบแผ่นเรียบดังแสดงในรูปที่ 4.14 และทำการติดตั้งสายอากาศกับโฟม EPS ตัดโค้งโดยได้แสดงตัวอย่างการติดตั้งกับโฟม EPS ขนาดมุมความโค้ง 60 องศา หรือรัศมี 126 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15



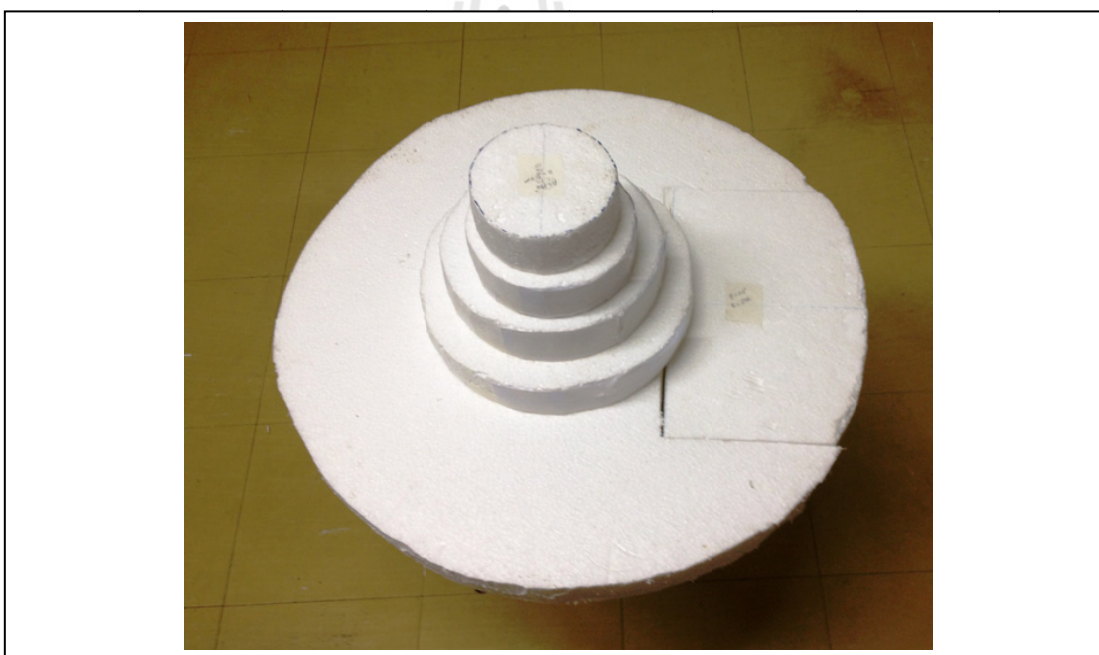
รูปที่ 4.10 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นประกอบกับบาลัน



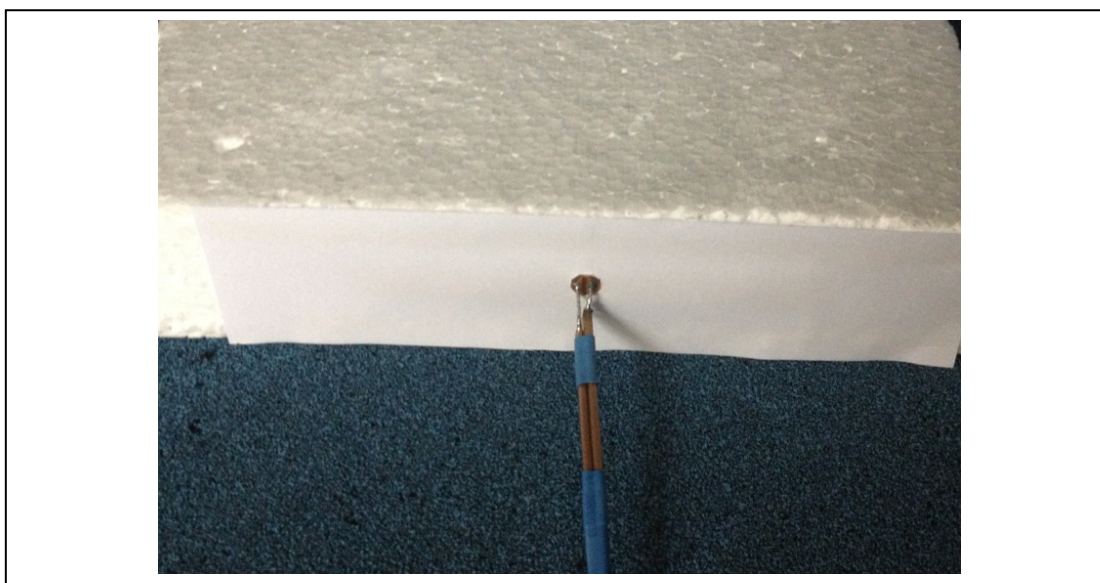
รูปที่ 4.11 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นประกอบกับบาลัน



รูปที่ 4.12 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นประกอบด้วยบازلัน



รูปที่ 4.13 โฟม EPS แบบโค้งขนาดต่าง ๆ

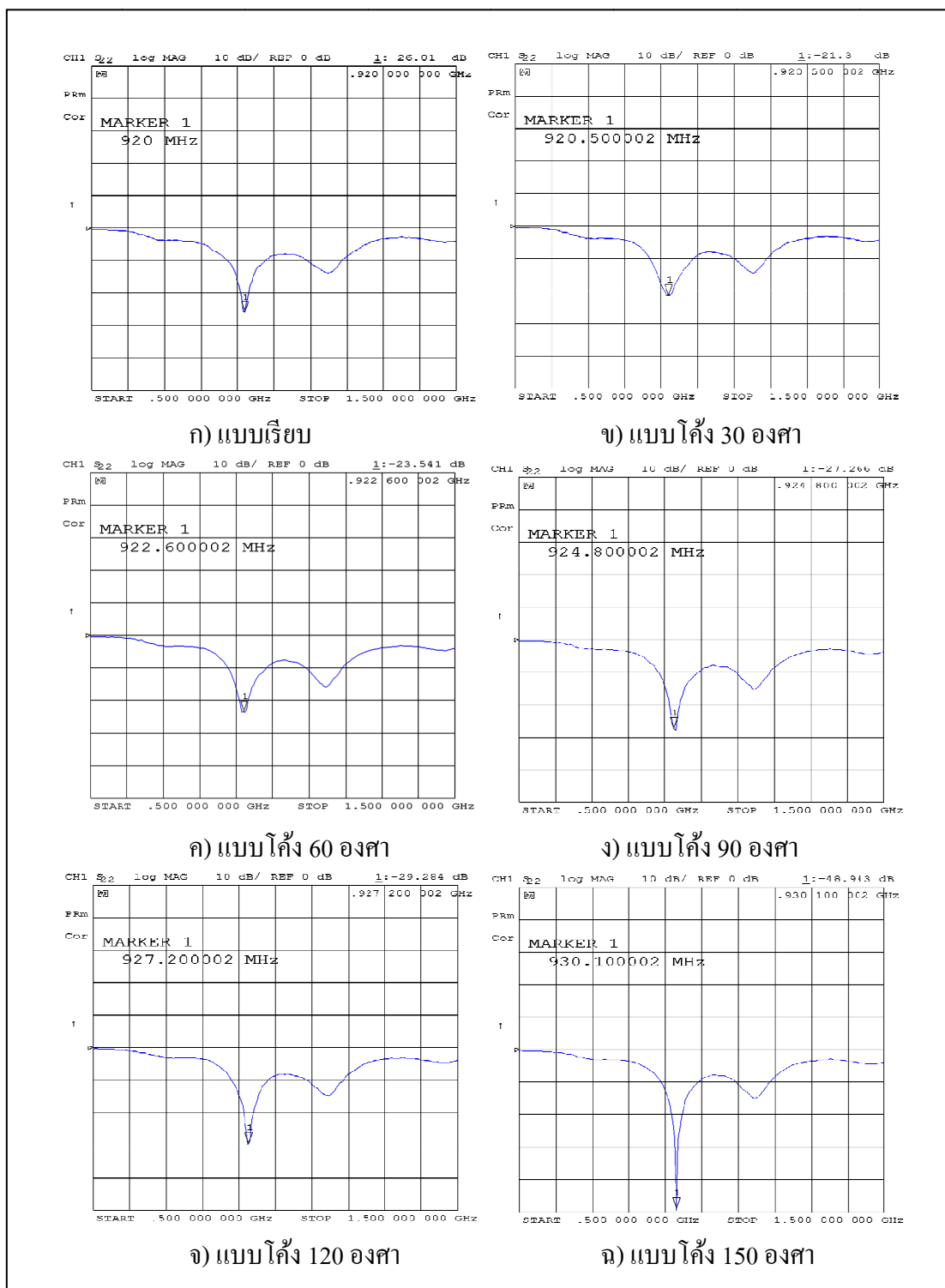


รูปที่ 4.14 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหุ้มด้วยกระดาษวางบนโฟม EPS แบบเรียบ

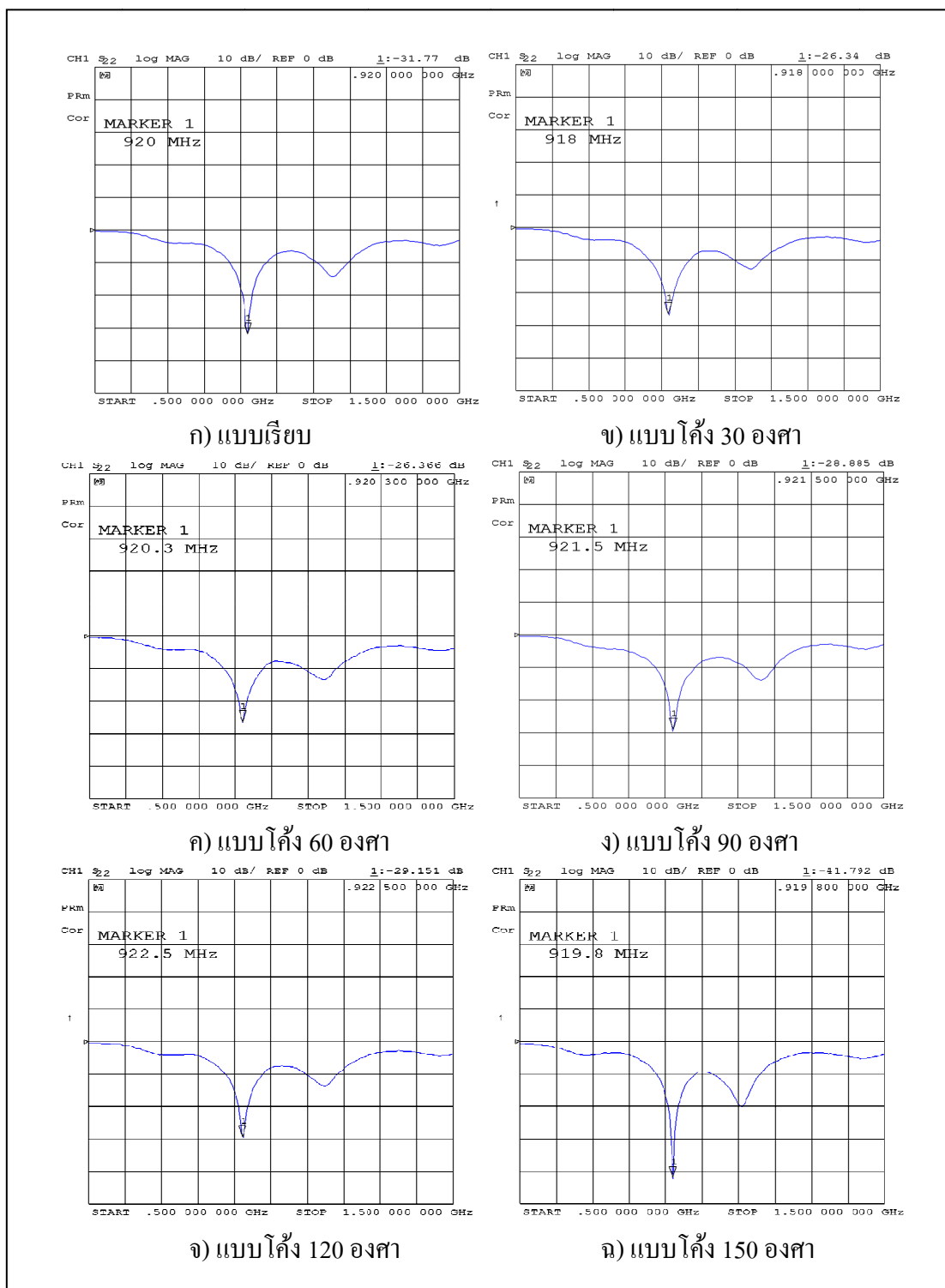


รูปที่ 4.15 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหุ้มด้วยกระดาษวางบนโฟม EPS แบบโค้ง
ขนาดความโค้ง 60 องศาหรือรัศมี 126 มิลลิเมตร

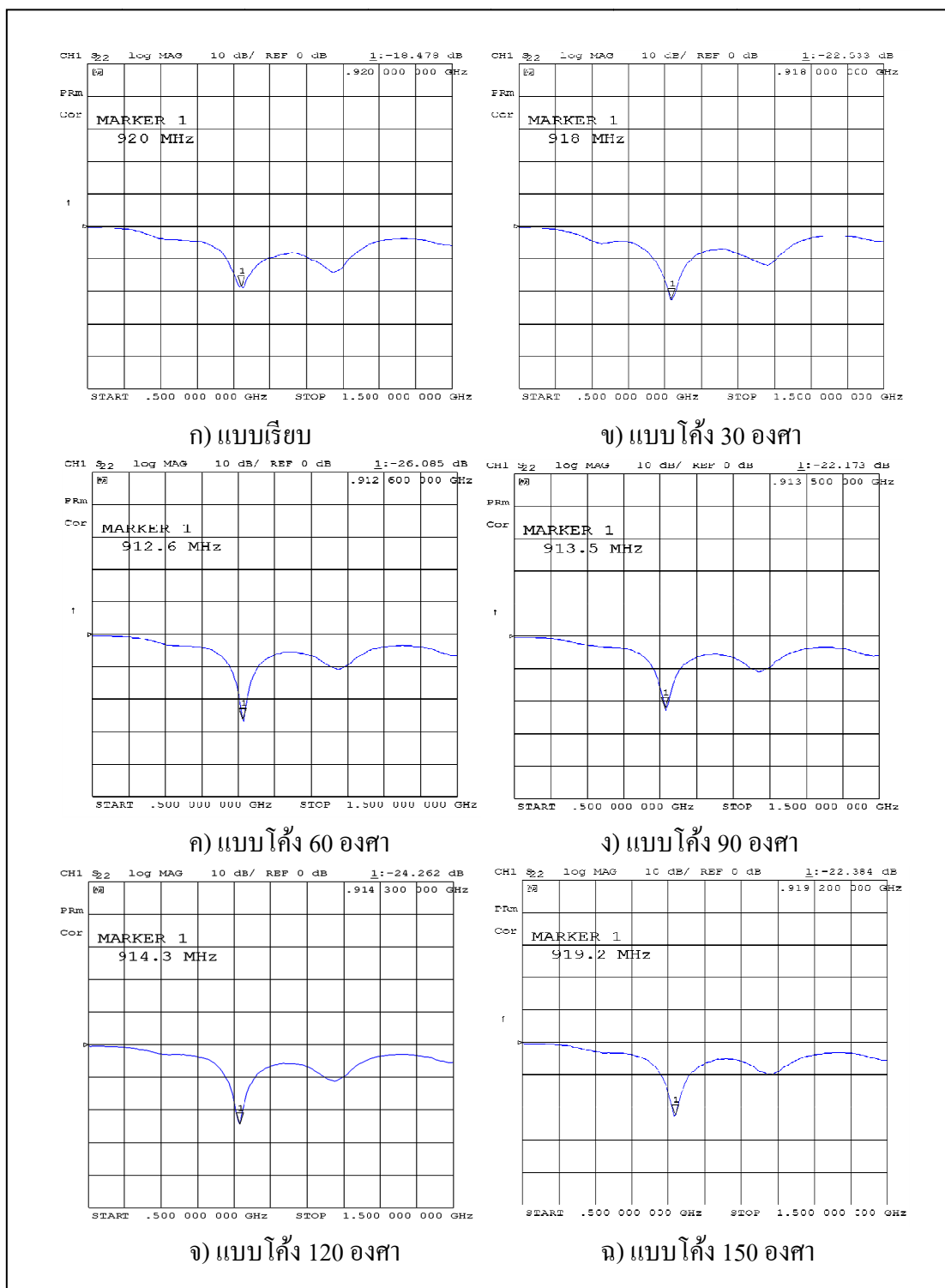
ผลจากการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.16-4.18 โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบที่วัดได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.16 ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรอง เป็น โฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ

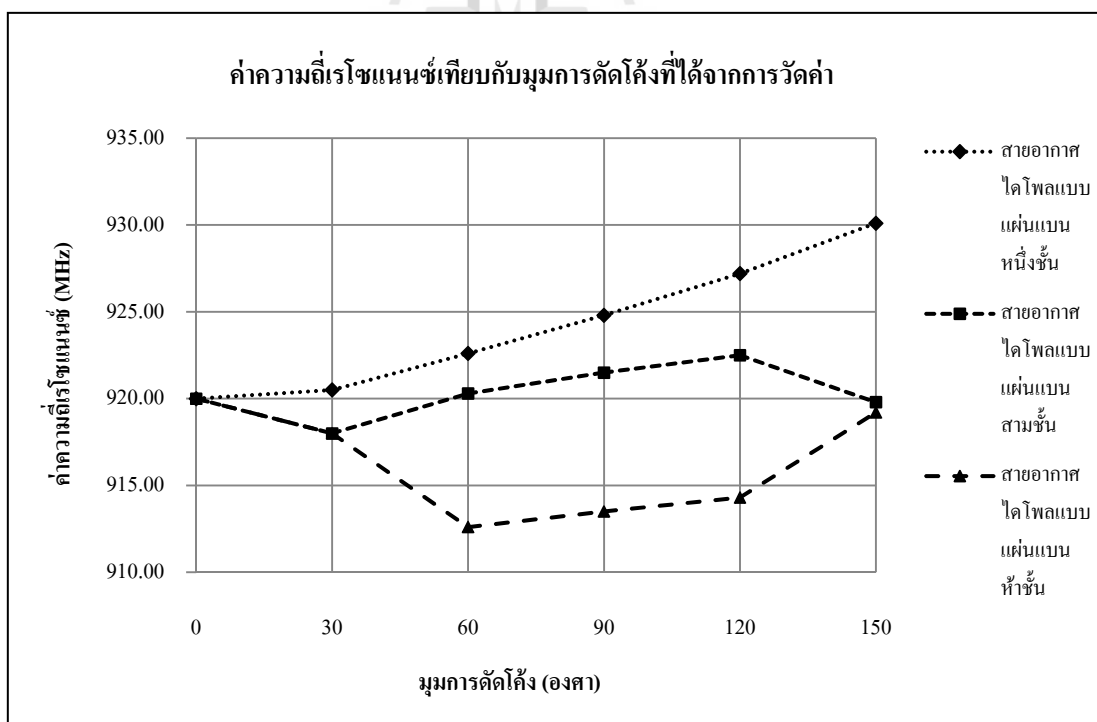


รูปที่ 4.18 ผลการวัดค่า S_{11} ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นปิดทับด้วยกระดาษขาวบาง มีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 ผลจากการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบ

| มุมความโค้ง : θ (องศา) | ความถี่เรโซแนนซ์ (MHz) | | |
|----------------------------------|--|--|--|
| | สายอากาศ ไดโพลแบบ แผ่นแบนหนึ่งชั้น | สายอากาศ ไดโพลแบบ แผ่นแบนสามชั้น | สายอากาศ ไดโพลแบบแผ่น แบนห้าชั้น |
| แบบเรียบ | 920.0 | 920.0 | 920.0 |
| 30 | 920.5 | 918.0 | 918.0 |
| 60 | 922.6 | 920.3 | 912.6 |
| 90 | 924.8 | 921.5 | 913.5 |
| 120 | 927.2 | 922.5 | 914.3 |
| 150 | 930.1 | 919.8 | 919.2 |

สำหรับผลการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และสามารถนำผลที่ได้มาแสดงค่าเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ค่าความถี่เรโซแนนซ์เทียบกับมุมการตัดโค้งที่ได้จากการวัดค่า

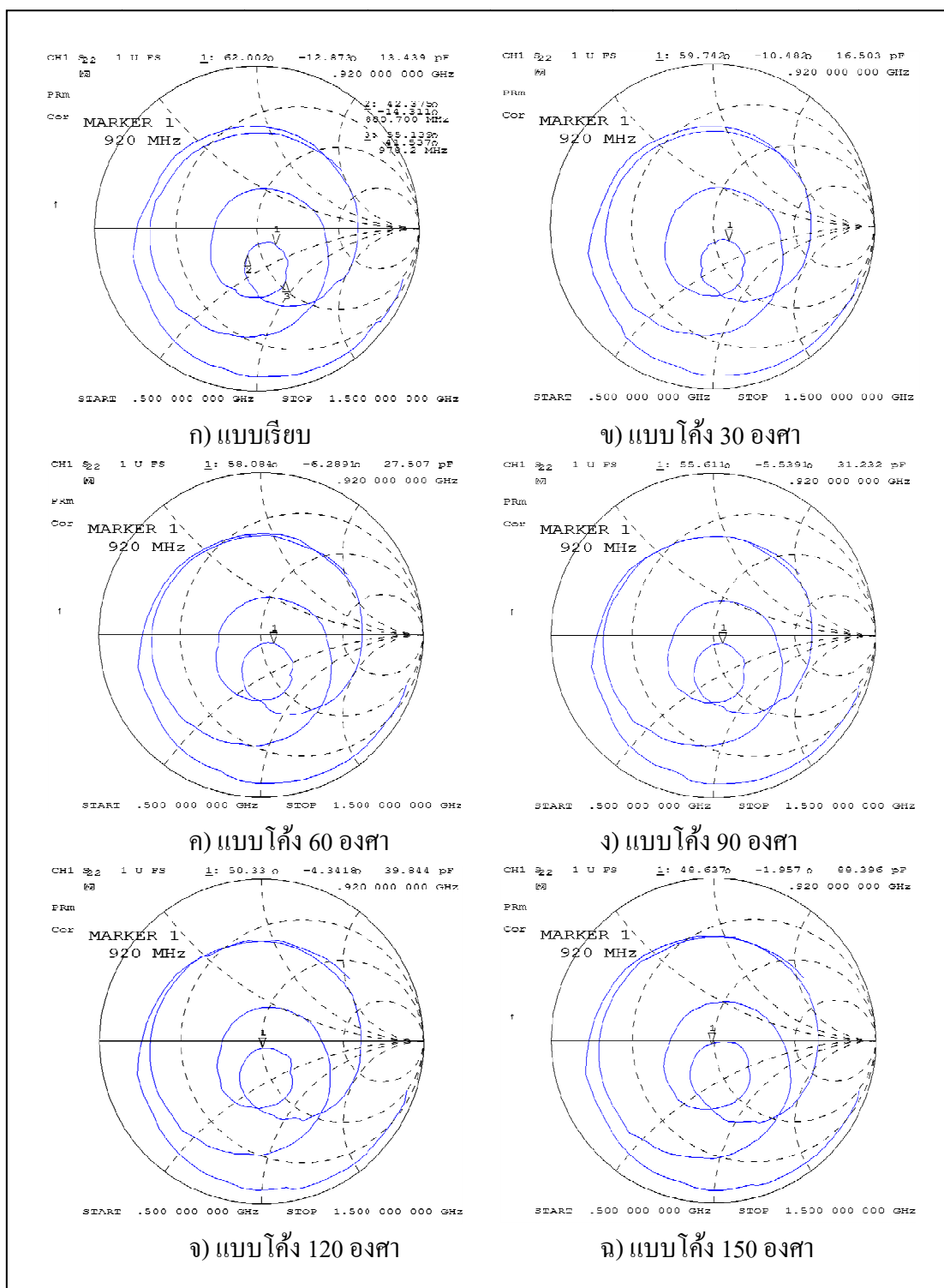
เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดค่าเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ พบว่าการตัดโค้งสายอากาศจะส่งผลให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเพิ่มขึ้นตามค่ามุมความโค้งที่เพิ่มขึ้น โดยตรงข้ามกับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น ที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเลื่อนไปที่ความถี่ที่ต่ำกว่า และสำหรับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นมีการเลื่อนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ อยู่ในช่วงที่น้อยกว่าสายอากาศทั้งสองแบบ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในผลที่ได้จากการวัดค่าและการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการวัดค่าที่คลาดเคลื่อนจากปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ขณะทำการวัดค่าและสำหรับสายอากาศแบบหลายชั้น ผลการวัดค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการจำลองแบบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมามากกว่า

4.3.3 การวัดผลค่าอิมพีแดนซ์

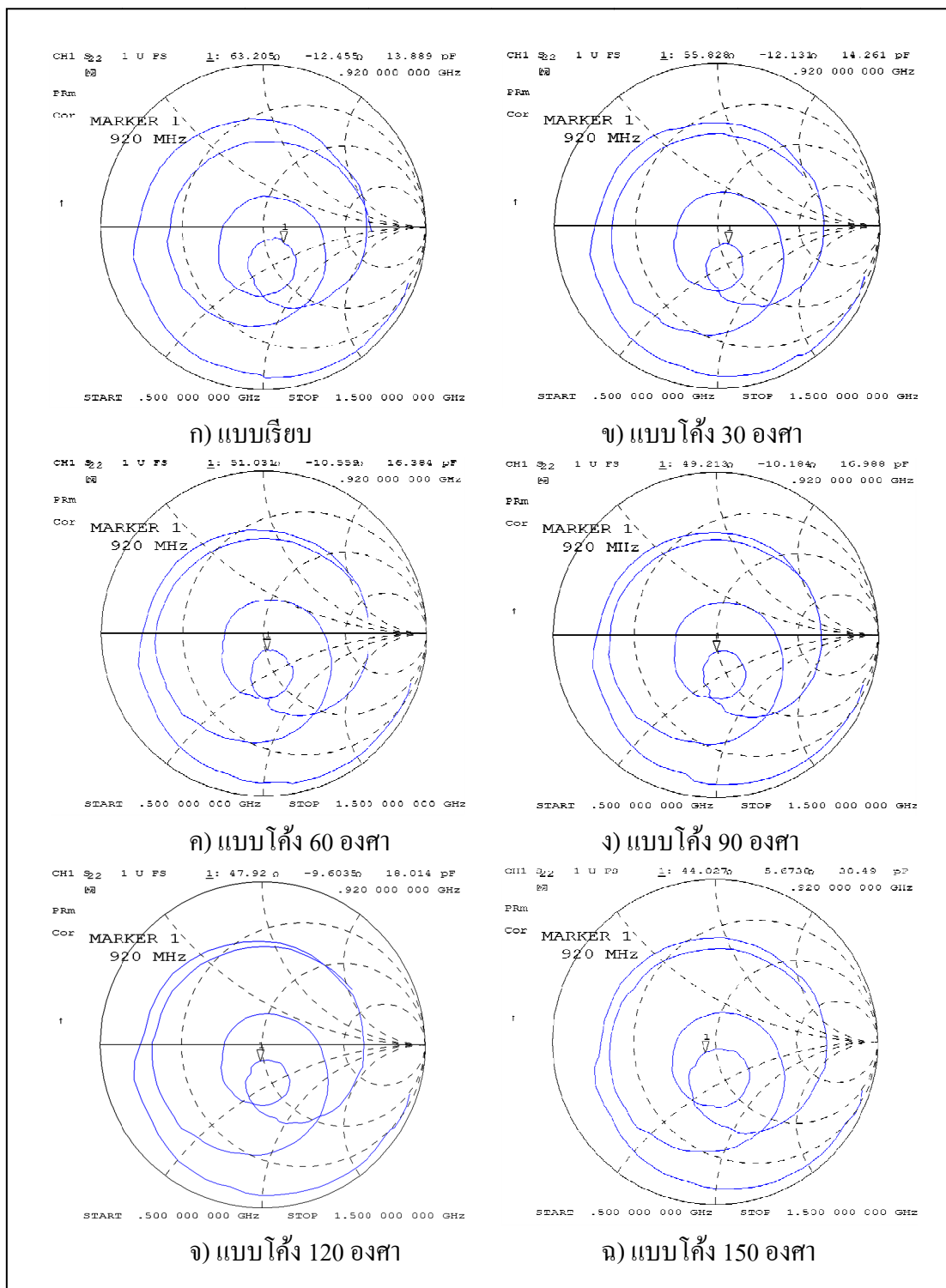
สำหรับการวัดผลค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ ได้ทำการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D เช่นเดียวกับการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดที่วัดได้ของสายอากาศต้นแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.20-4.22 โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบที่วัดได้ สรุปไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดผลสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ปิดทับด้วยกระดาษขาวบางบนวัสดุฐานรองที่เป็นโฟม EPS ขณะตัดโค้ง

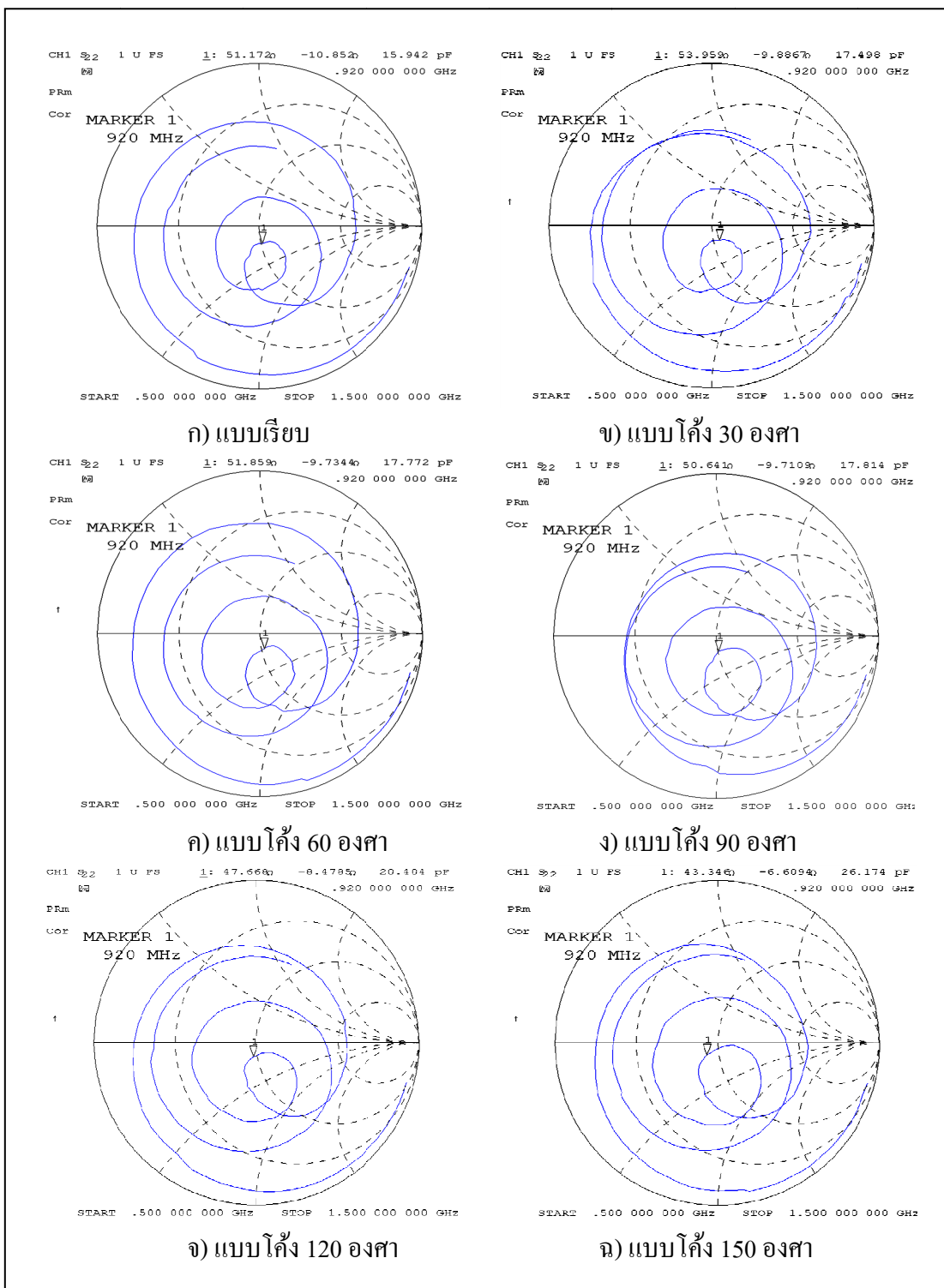
| มุมการตัดโค้ง (องศา) | ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศ (โอห์ม) | | | | | |
|--------------------------|----------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น | | สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น | |
| | Z | Z | Z | Z | Z | Z |
| 30 | 59.74-j10.48 | 60.654 | 55.82-j12.13 | 57.130 | 51.17-j10.85 | 54.857 |
| 60 | 58.08-j6.28 | 58.423 | 51.03-j10.55 | 52.111 | 53.95-j9.88 | 52.764 |
| 90 | 55.61-j5.53 | 55.886 | 49.21-j10.18 | 50.255 | 51.85-j9.73 | 51.563 |
| 120 | 50.33-j4.34 | 50.516 | 47.92-j9.60 | 48.872 | 50.64-j9.71 | 48.416 |
| 150 | 48.63-j1.95 | 48.676 | 44.02-j5.67 | 44.390 | 47.66-j8.47 | 43.846 |
| $\Delta Z /\Delta\theta$ | -0.0998 | | -0.1061 | | -0.0917 | |



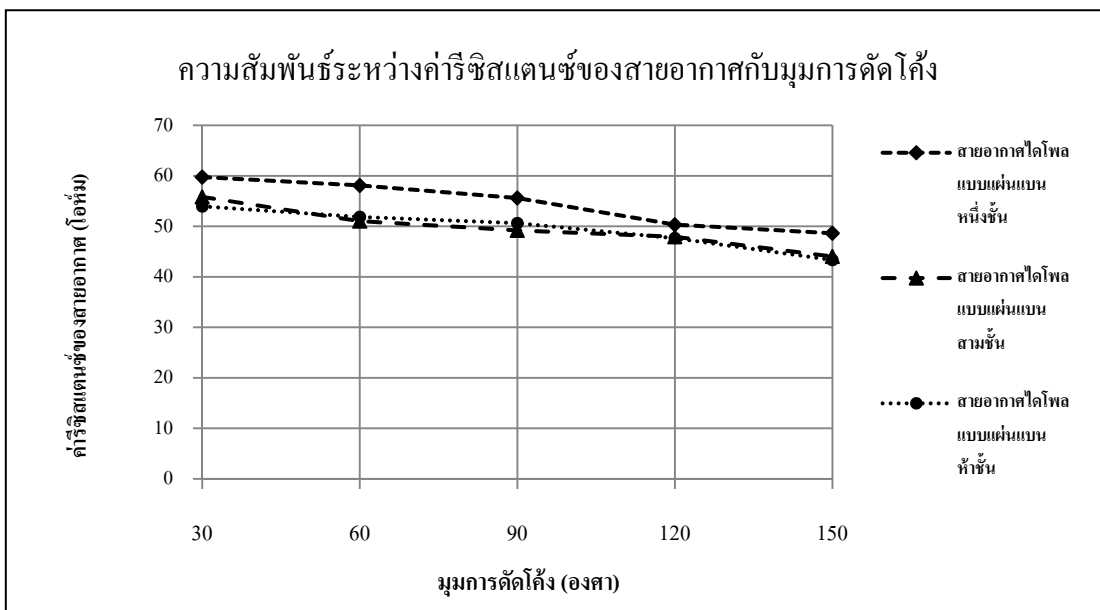
รูปที่ 4.20 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นปิดทับด้วยกระดาษ
ขาวบางมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ



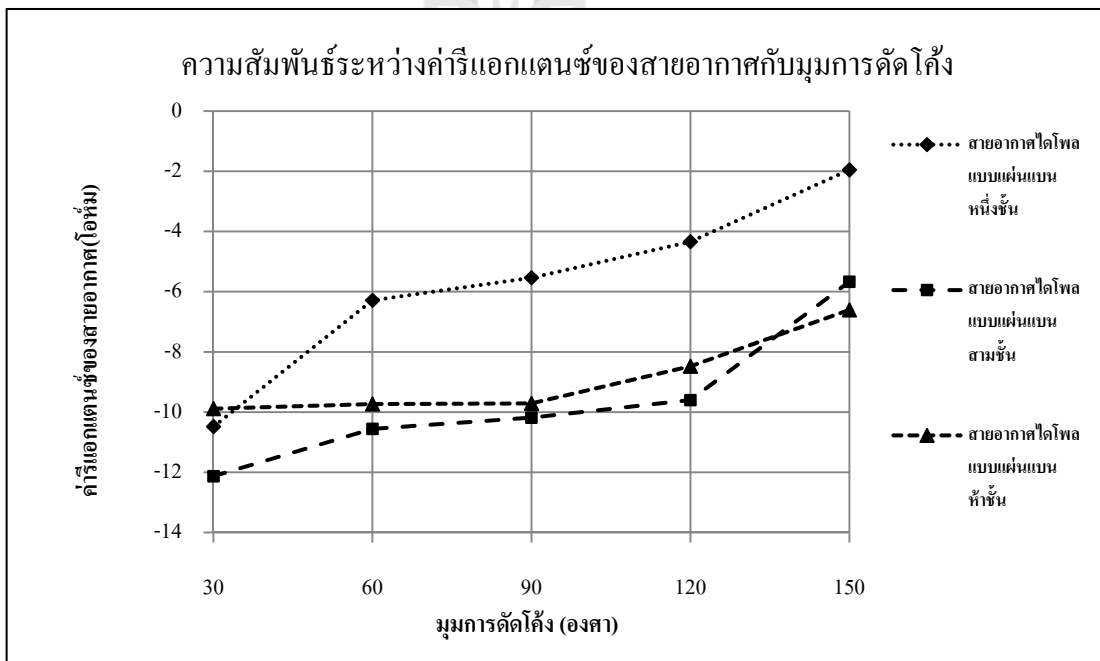
รูปที่ 4.21 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นปิดทับด้วยกระดาษ
 ขาวบางมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นปิดทับด้วยกระดาษ
 ขาวบางมีวัสดุฐานรองเป็นโฟม EPS แบบเรียบและแบบโค้งมุมความโค้งต่าง ๆ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าริชชีสแดนซ์ที่วัดได้ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนชนิดต่าง ๆ เทียบกับค่าความโค้งมุมต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าริแอกแดนซ์ที่วัดได้ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนชนิดต่าง ๆ เทียบกับค่าความโค้งมุมต่าง ๆ

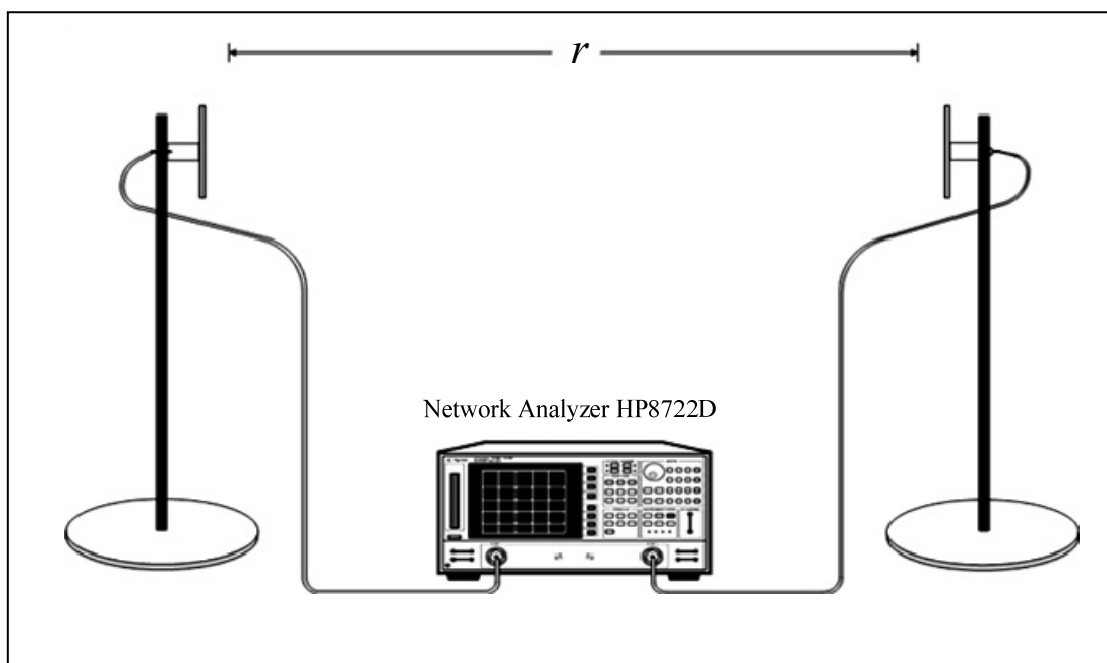
สำหรับการวัดผลค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ ที่ได้จากรายที่ 4.2 นำมาพล็อตเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีซิสแตนซ์ และค่ารีแอกแตนซ์ เทียบกับค่าความโค้งมุมต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.23-4.24 ตามลำดับ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากสายอากาศทั้งสามแบบ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่ารีซิสแตนซ์มีค่าลดลง และค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อมีการดัดโค้งมากขึ้น และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าขนาดของอิมพีแดนซ์และพิจารณาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของอิมพีแดนซ์เทียบกับค่ามุมที่ทำการดัดโค้งจะพบว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองแบบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมา

4.3.4 การวัดผลอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D วัดค่ากำลังงานที่สายอากาศรับได้ เพื่อใช้คำนวณอัตราขยายของสายอากาศโดยกำหนดระยะทางระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับที่ระยะห่างสนามไกล โดยสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $r \geq 2D^2 / \lambda$ โดยที่ r คือระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับที่ทำการทดสอบที่ความถี่ต่ำสุด ส่วน D คือ ขนาดของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 165 มิลลิเมตร (คิดที่ความยาวสายอากาศไดโพล เท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) และ λ คือความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้วัด โดยใช้ทดสอบอ้างอิงที่ความถี่ 920MHz ดังนั้นที่ระยะห่างสนามไกล ค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับต้องมากกว่า 16.61 เซนติเมตรจึงได้กำหนดให้มีระยะห่างในการทดสอบวัดผลเท่ากับ 0.5 เมตร ที่ความถี่ 920MHz มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่งเท่ากับ 0dB ซึ่งมีสายอากาศตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 4.25

เราสามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศจากค่าที่วัดได้โดยใช้สมการ (2.5) มาทำการคำนวณ หากเราใช้สายอากาศชนิดเดียวกันที่มีขนาดเท่ากันเป็นสายอากาศส่งและรับ นั่นคือ จะสามารถพิจารณาให้อัตราขยายสายอากาศทั้งสองด้านจะมีค่าเท่ากัน และพิจารณาหน่วยการวัดเป็น dB จะได้ว่า

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{RXdB} - P_{TXdB} + (\text{Free Space Loss})_{dB}}{2} \right); G_{TX} = G_{RX} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.25 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตรารายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{RXdB} - P_{TXdB} + 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (4.2)$$

และสำหรับกรณีที่ใช้สายอากาศชนิดที่มีอัตรารายไม่เท่ากันเป็นสายอากาศส่งและรับจะได้ว่า

$$G_{RXdB} = P_{RXdB} - P_{TXdB} - G_{TXdB} + 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \quad (4.3)$$

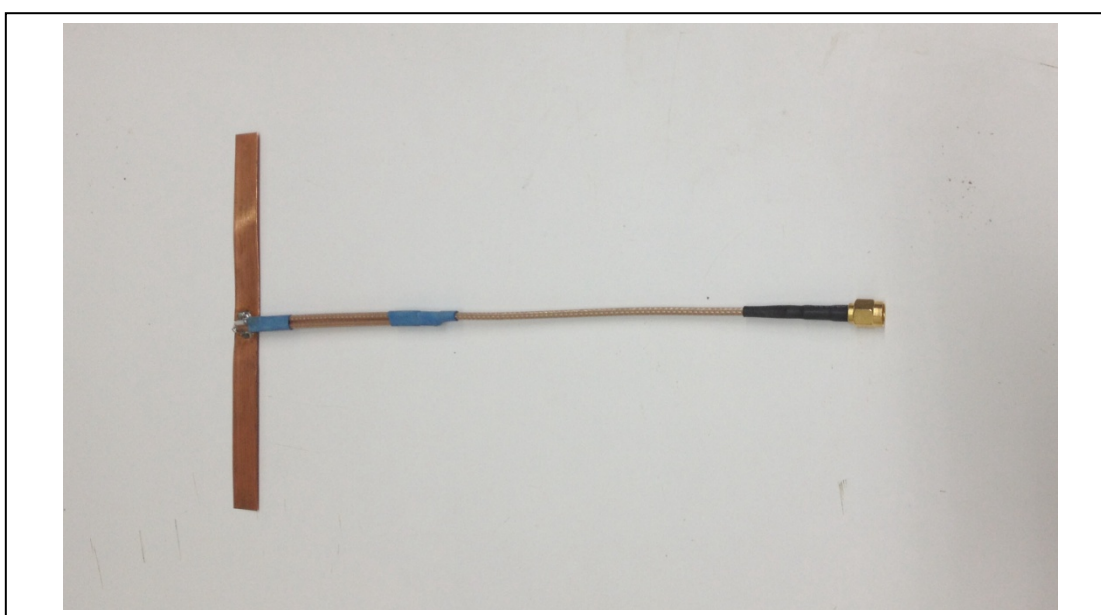
โดยที่ P_{TXdB} คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่งในหน่วย dB

P_{RXdB} คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับในหน่วย dB

G_{dB} คือ อัตรารายของสายอากาศที่เหมือนกันทั้งภาคส่งและภาครับในหน่วย dB

- G_{TxdB} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งในหน่วย dB
 G_{RxdB} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับในหน่วย dB
 r คือ ระยะห่างสนามไกล ระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)

สำหรับสายอากาศภาคส่งได้ใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบาง 0.1 มิลลิเมตรกว้าง 10 มิลลิเมตรยาว 146 มิลลิเมตรระยะห่างตรงจุดกึ่งกลาง 0.1 มิลลิเมตรเป็นสายอากาศอ้างอิง (รูปที่ 4.26)



รูปที่ 4.26 สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบาง 0.1 มิลลิเมตร

โดยได้ทำการวัดค่าเพื่อหาอัตราขยายโดยใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบางที่มีขนาดเท่ากันเป็นสายอากาศส่งและรับ จากนั้นคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบางที่ความถี่ 920 MHz จากสมการ (4.2) ได้ดังนี้

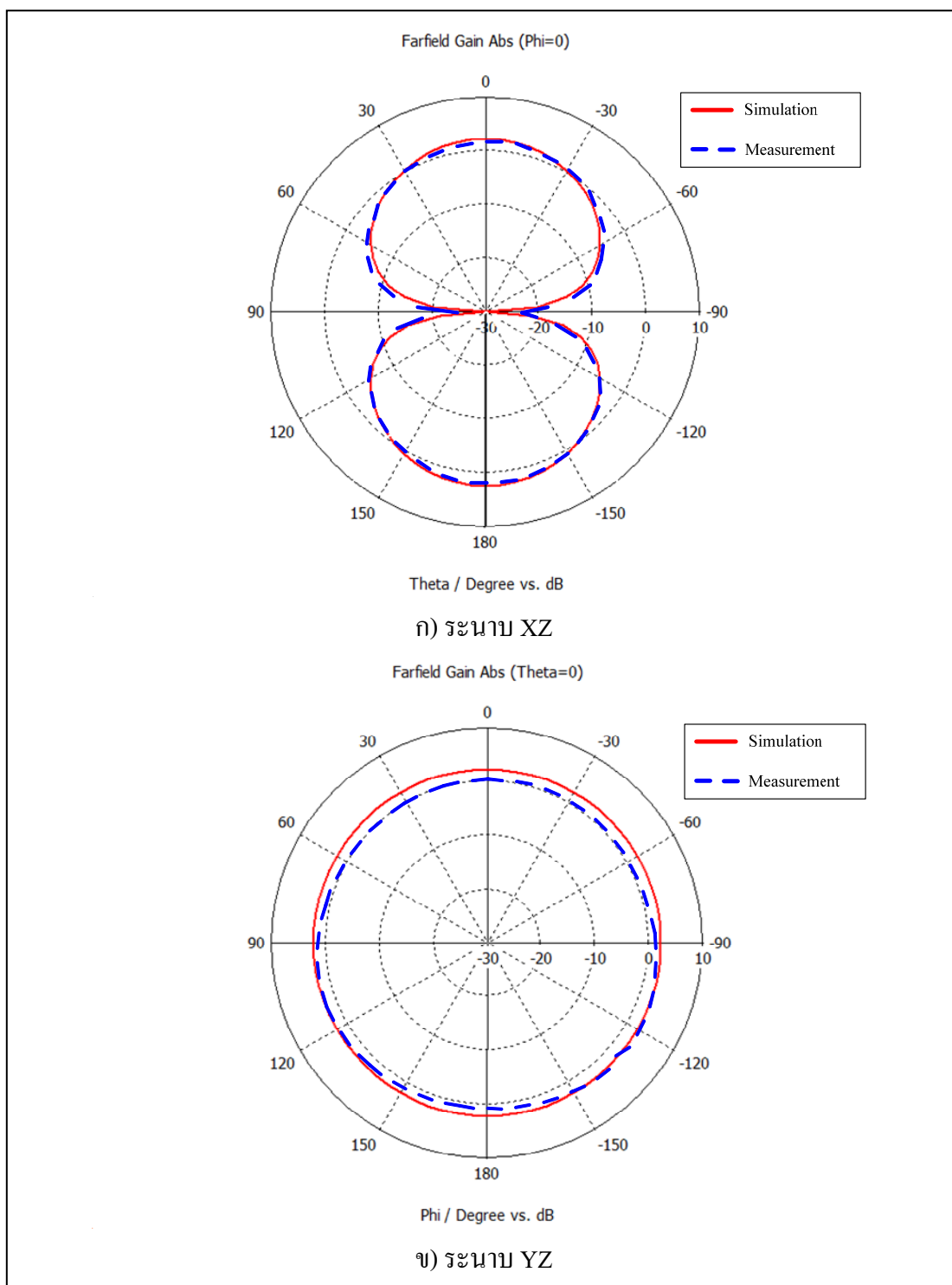
$$G_{dB} = \left(\frac{-20.73 + 20 \log \left(\frac{4 \times \pi \times 0.5}{3 \times 10^8 / 0.92 \times 10^9} \right)}{2} \right) = 2.48 \text{ dB}$$

จากนั้นจึงนำสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบาง ไปใช้ในการวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศต้นแบบ โดยทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น หรือสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ สำหรับการวัดค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นนั้น เนื่องจากผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศมีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย จึงพิจารณาวัดค่าสายอากาศเฉพาะขณะยึดตรง และขณะตัดโค้งที่มุมความโค้งสูงสุด คือ 150 องศา โดยผลการวัดค่าอัตราขยายที่ได้ สามารถนำมาคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการ (4.3) โดยให้ค่าอัตราขยายสายอากาศภาคส่ง เป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่ทำจากแผ่นทองแดงบางมีค่าเป็น 2.48 dB ผลลัพธ์สรุปได้ในตารางที่ 4.3

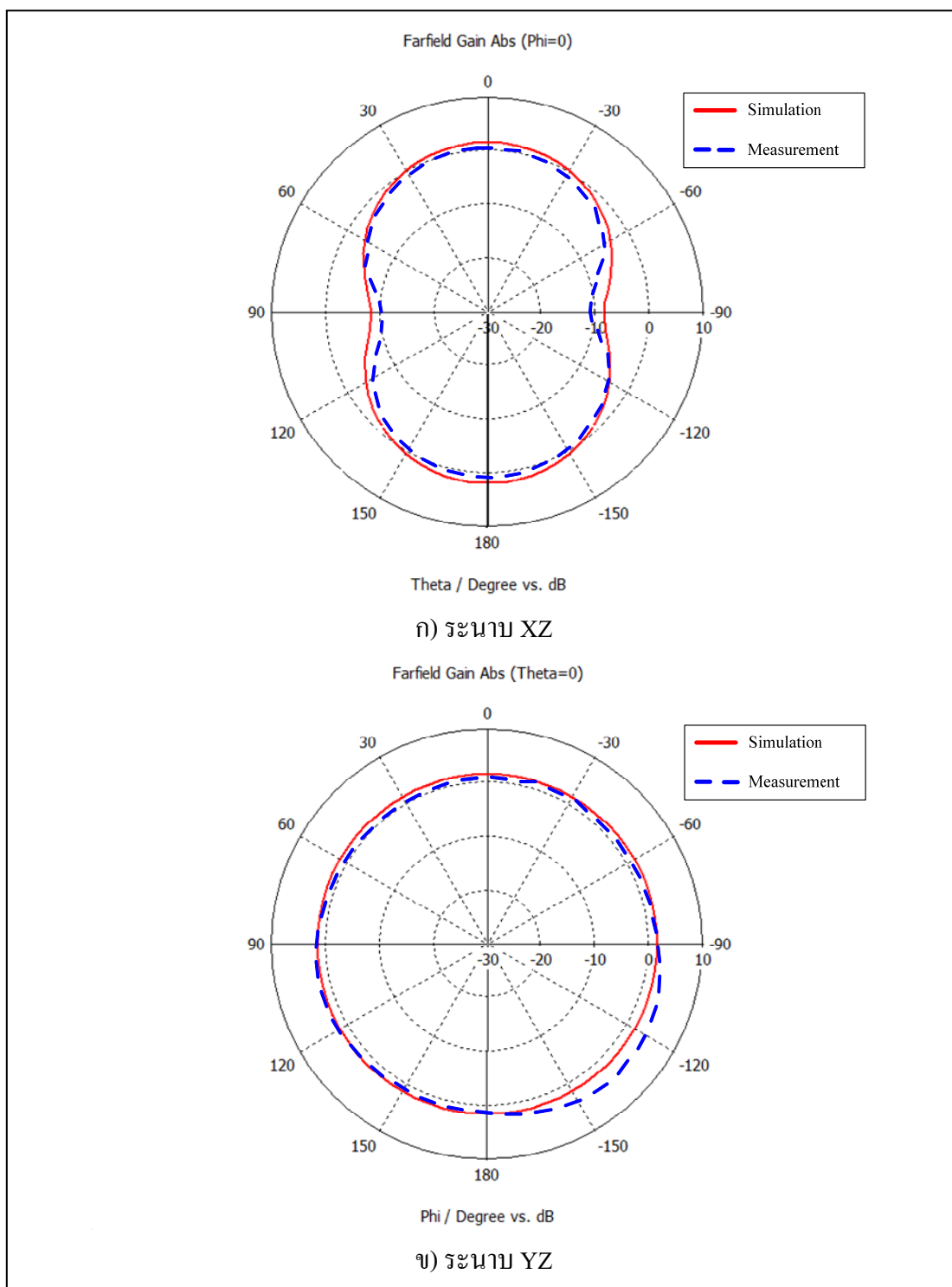
ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

| สายอากาศ | อัตราขยาย (dB) | |
|--------------------------|----------------|---|
| | ขณะยึดตรง | ขณะตัดโค้ง 150 องศา (รัศมี 57 มิลลิเมตร) |
| ไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้น | 1.28 | 0.88 |
| ไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น | 1.41 | 1.20 |
| ไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้น | 1.35 | 1.13 |

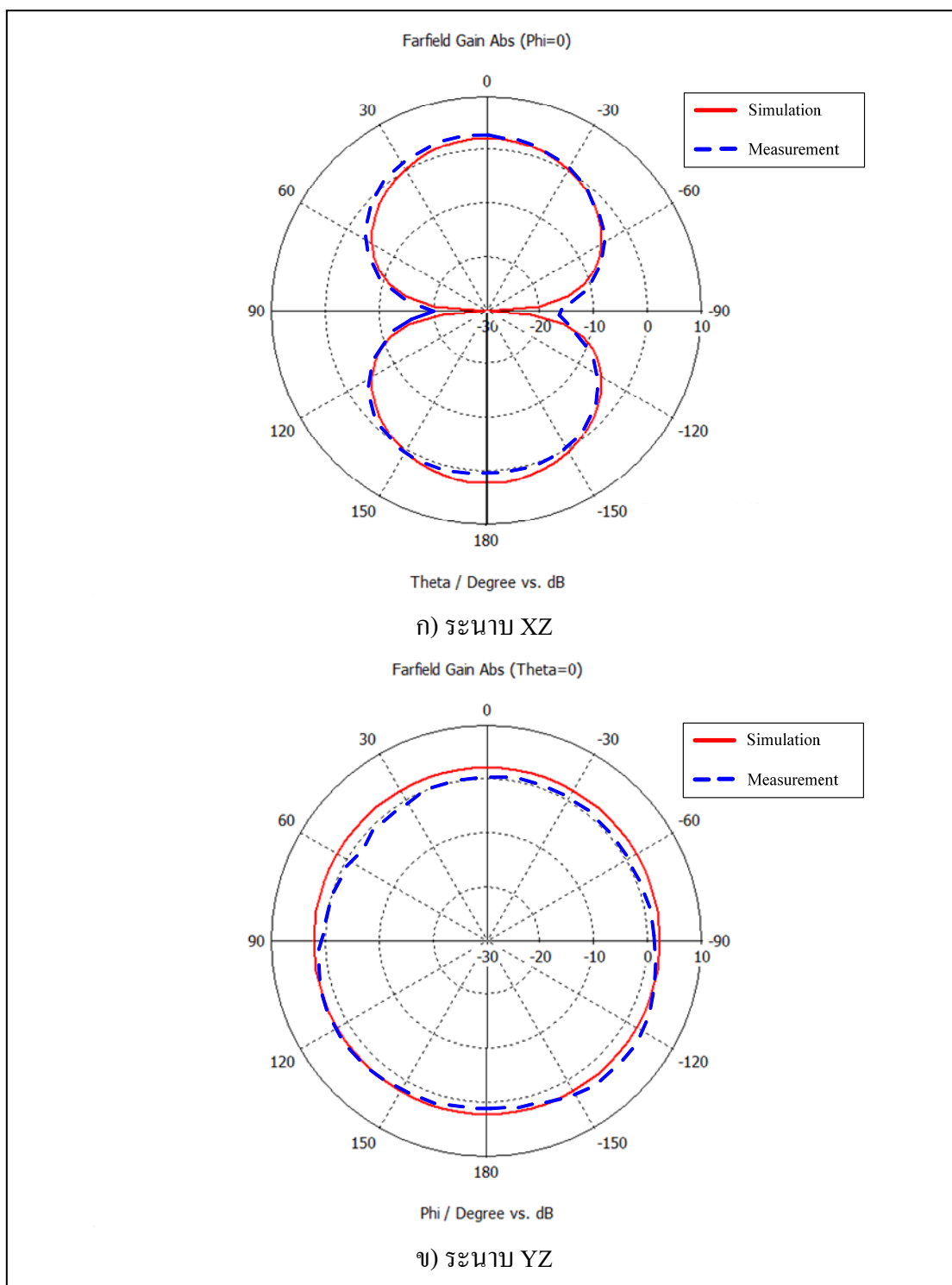
ในการวัดค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานที่รับได้ โดยจะทำการหมุนสายอากาศต้นแบบเพื่อรับคลื่นจากมุม 0 องศา จนถึง 360 องศา อย่างไรก็ตามผลของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นก็มีความแตกต่างกันไม่มากนัก จึงเลือกทำการวัดค่าเปรียบเทียบกันเฉพาะสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นเทียบกับสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะยึดตรงและขณะตัดโค้งที่มุมความโค้งสูงสุดคือ 150 องศา โดยผลการวัดค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นขณะยึดตรงและตัดโค้งเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 และผลการวัดค่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะยึดตรงและตัดโค้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



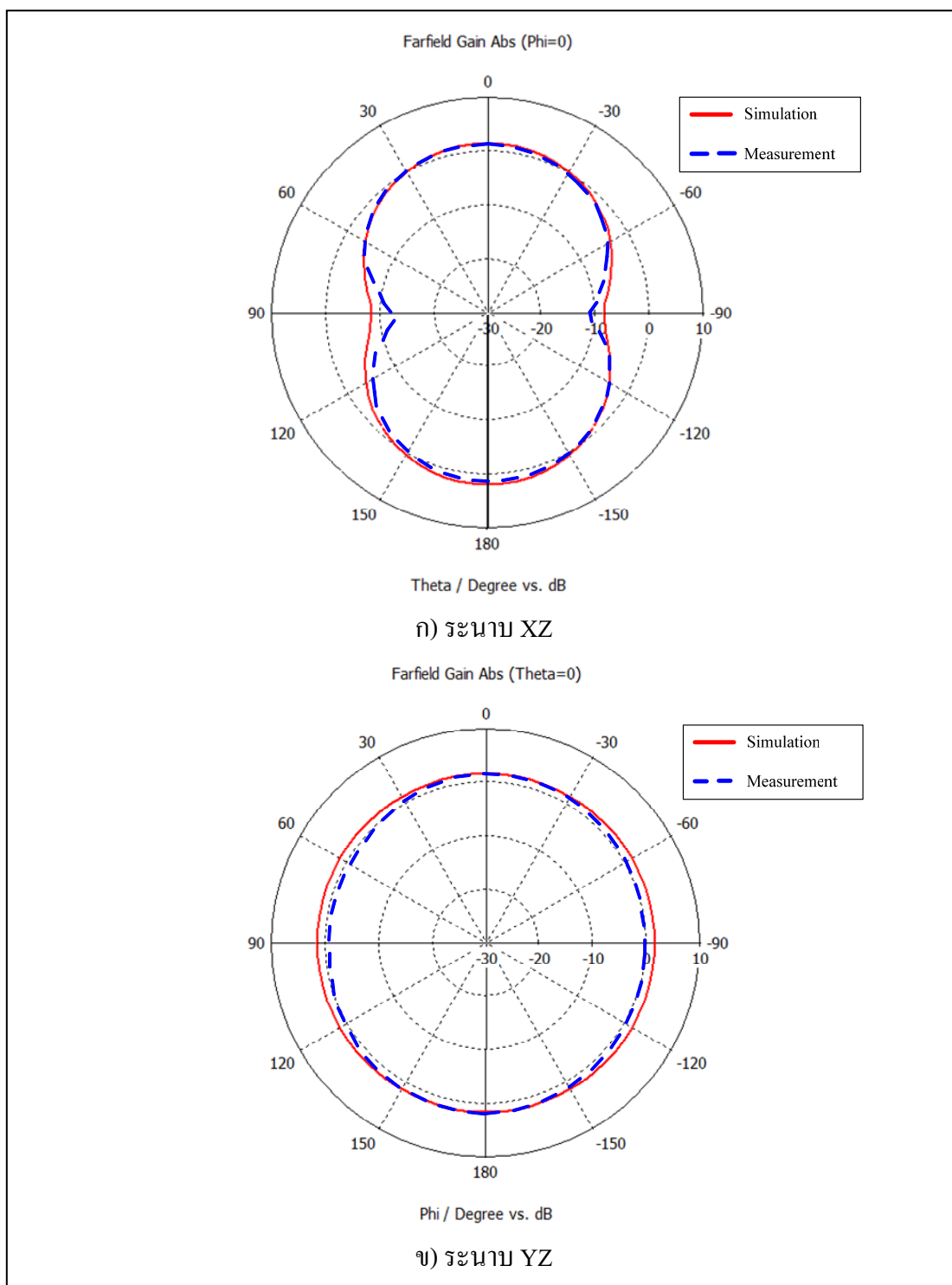
รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นขณะยึดตรงจากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ



รูปที่ 4.28 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหนึ่งชั้นขณะตัดโค้งมุม ความโค้ง 150 องศาจากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ



รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะยึดตรงจากการวัดค่าเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ



รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้นขณะตัดโค้งมุม ความโค้ง 150 องศา จากการวัดค่า เทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

จากผลการวัดค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบทั้งสามชนิด จะพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วัดได้มีลักษณะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ และสำหรับอัตราขยายสายอากาศที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการจำลองแบบ อันเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดผล รวมทั้งการต่อสายอากาศผ่านบาลันซึ่งทำให้เกิดค่าความสูญเสียที่มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบที่ไม่มีบาลัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าแนวโน้มของอัตราขยายของสายอากาศก็มีทิศทางสอดคล้องกับผลการจำลองแบบกล่าวคือ สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบหนึ่งชั้นจะมีค่าอัตราขยายน้อยกว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบสามชั้นและห้าชั้น รวมทั้งเมื่อมีการตัดโค้งสายอากาศ จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศทั้งสามแบบมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดกว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบ จึงสามารถสรุปได้ว่าผลจากการตัดโค้งส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศเป็นไปตามผลที่ได้จากการจำลองแบบ โดยสามารถยืนยันได้ด้วยผลจากการวัดค่าด้วยสายอากาศต้นแบบ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้างสายอากาศต้นแบบและการวัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยได้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบหนึ่งชั้น และแบบหลายชั้น เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและจากผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความถี่เรโซแนนซ์จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในสนามระยะไกล และอัตราขยาย พบว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์มีการเลื่อนความถี่ไปยังความถี่สูงเมื่อสายอากาศมีการตัดโค้ง รวมถึงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีผลการวัดใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากสายอากาศทั้งสามแบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่ารีซิสแตนซ์มีค่าลดลงและค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นลบน้อยลง) เมื่อมีการตัดโค้งมากขึ้น และเมื่อนำมาคำนวณหาขนาดของอิมพีแดนซ์และพิจารณาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของอิมพีแดนซ์เทียบกับค่ามุมที่ทำการตัดโค้ง จะพบว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นห้าชั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองแบบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ผ่านมา ส่วนสาเหตุที่ผลการวัดมีค่าแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองแบบ อาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองผล ตลอดจนผลที่เกิดขึ้นจากการวัดทดสอบในสภาพจริง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่มีกับค่าอิมพีแดนซ์และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสำหรับแผ่นปายอาร์เอฟไอดี ที่เกิดจากการนำเอาแผ่นปายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานบนวัตถุที่มีพื้นผิวโค้ง เพื่อจะได้นำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นปายอาร์เอฟไอดีให้เหมาะกับลักษณะพื้นผิววัตถุที่แผ่นปายอาร์เอฟไอดีจะถูกนำไปใช้ เนื่องจากค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพขณะนำไปใช้งานได้

ผลจากการศึกษาวิจัย โดยทำการศึกษายสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสำหรับแผ่นปายอาร์เอฟไอดี สำหรับใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มความยาวของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนไป โดยค่ารีซิสแตนซ์ และรีแอกแตนซ์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดความยาวสายอากาศที่เพิ่มขึ้น
2. การตัดโค้งสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มากขึ้นจะทำให้ขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าลดลง โดยส่วนที่เป็นค่ารีซิสแตนซ์มีค่าลดลง แต่ส่วนค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น
3. ความยาวของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศมีการเลื่อนไปที่ความถี่ที่ต่ำกว่าจากที่ออกแบบไว้
4. การตัดโค้งสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มากขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น

จากผลลัพธ์ที่ได้จากศึกษาจึงได้นำเอาเทคนิคการเพิ่มขึ้นของสายอากาศแบบแผ่นแบนมาใช้ในการออกแบบสายอากาศ เพื่อให้ผลของการตัดโค้ง ทำให้มีการเพิ่มความยาวโดยรวมของสายอากาศ โดยอาศัยคุณสมบัติของการที่วัสดุแบบบางที่วางซ้อนทับกันจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นขณะที่มีการตัดโค้ง กล่าวคือ วัสดุแบบบางที่วางอยู่ชั้นในที่มีการตัดโค้งน้อยกว่าจะทำให้มีการเพิ่มความยาวมากกว่าวัสดุแบบบางชั้นนอกที่มีความโค้งน้อยกว่า ทำให้เกิดผลต่างของความยาวของวัสดุแต่ละชั้นที่มีการตัดโค้ง

และจากผลลัพธ์ของเทคนิคการเพิ่มขึ้นของสายอากาศได้นำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสองชั้นสองแบบ โดยแบบแรกออกแบบให้มีชั้นวัสดุด้านในอยู่ที่ส่วนกึ่งกลางและวัสดุชั้นนอกอยู่ที่ส่วนปลายของสายอากาศ และแบบที่สองออกแบบให้มีชั้นวัสดุชั้นนอกอยู่ที่ส่วนกึ่งกลางและวัสดุชั้นในอยู่ที่ส่วนปลายของสายอากาศ ผลที่ได้จากการออกแบบทั้งสองแบบจะทำให้ความยาวสัมพัทธ์ของสายอากาศมีค่าลดลงสำหรับสายอากาศแบบแรก และมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับสายอากาศแบบที่สอง และเมื่อนำมาออกแบบและทำการจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบจากการตัดโค้งพบว่า สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแบบที่สองให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยกว่าแบบแรก

อย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศเพียงสองชั้น ยังไม่สามารถชดเชยผลจากการตัดโค้งได้ทั้งหมด จึงได้ออกแบบให้มีจำนวนชั้นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเพิ่มขึ้นเป็นสามชั้นและห้าชั้น โดยใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวงจรมิพม์แบบบางที่สามารถตัดโค้งได้ โดยผลลัพธ์จากการจำลองแบบให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลที่ได้จากสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่สอง กล่าวคือ สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น เมื่อทำการตัดโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ที่น้อยที่สุด และสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยที่สุด และจากผลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า

1. การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นนั้น จะให้ผลลัพธ์ในการชดเชยการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากการตัดโค้งที่ดีกว่า เมื่อทำการออกแบบสายอากาศให้มีจำนวนชั้นที่เหมาะสมกับความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งจากผลการวิจัยคือ สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสามชั้น

2. การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นเพื่อต้องการชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการตัดโค้งนั้น การมีจำนวนชั้นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มากขึ้นจะสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์จากการตัดโค้งได้มากกว่า ซึ่งผลจากการวิจัยคือ สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนห้าชั้นจะสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการตัดโค้งได้มากที่สุด

ดังนั้นในการเลือกจำนวนชั้นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน หากต้องการให้สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการตัดโค้งให้น้อยที่สุด จะต้องออกแบบให้สายอากาศมีจำนวนชั้นให้มากที่สุด แต่หากต้องการให้สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากการตัดโค้งที่น้อยที่สุด จะต้องมีการเลือกจำนวนชั้นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนให้เหมาะสมกับความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ นั้น ทำให้เราสามารถเข้าใจถึงความเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์รวมทั้งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเมื่อมีการตัดโค้ง ซึ่งได้นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้นที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จากการที่เราทราบผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศเมื่อมีการตัดโค้ง ทำให้เราสามารถนำไปประยุกต์ผลการออกแบบสายอากาศแบบหลายชั้นกับสายอากาศแบบอื่น ๆ อาทิ สายอากาศแบบร่อง (Slot antenna) สายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม สายอากาศแพทช์วงกลม เป็นต้น รวมทั้งยังสามารถศึกษาผลของขนาดความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ทำของสายอากาศที่จะทำให้เทคนิคการออกแบบที่ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการขยายขนาดความยาวของสายอากาศด้วยเทคนิคสายอากาศแบบหลายชั้นนั้น ความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ทำสายอากาศจะมีผลกระทบต่อความยาวที่เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนหลายชั้น ยังต้องมีการพิจารณา ถึงความหนาของวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานและออกแบบสายอากาศด้วย เนื่องจากหากใช้วัสดุที่บางเกินไป ก็จะทำให้ผลการชดเชยความถี่เรโซแนนซ์มีค่าน้อยจนไม่สามารถนำไปชดเชยกับผลที่เกิดจากการตัดโค้งโดยตรงได้ และในทำนองเดียวกันการใช้วัสดุที่หนามากเกินไปจะทำให้การชดเชยมีมากเกินไป ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป รวมทั้งการทำให้สายอากาศมีความหนามากเกินไป จะทำให้เกิดการสั่นเปลื้องของวัสดุที่นำมาใช้ และยังทำให้สายอากาศตัดโค้งได้น้อยลง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิธีการศึกษาวิจัยพัฒนา การวิเคราะห์และผลการวัดค่าจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับค่าอิมพีแดนซ์ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ และการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแบบหลายชั้นสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เพื่อใช้งานกับวัสดุที่มีพื้นผิวที่โค้งที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป

รายการอ้างอิง

- Bai, Q., and Langley, R. (2010), Textile antenna bending and crumpling. **Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2010**, (pp.1-4).
- Balanis, C. (2005), **Antenna Theory** (3rd Edition). Wiley.
- Bogatin, E. (2011), Essential Principles of Signal Integrity. **IEEE Microwave Magazine**. 12(5) : 34-41.
- Butler, C.M. (1982), The equivalent radius of a narrow conducting strip. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 30(4) : 755-758.
- Clemens, M. and Wieland, T. (2001), Discrete electromagnetism with the finite integration technique. **Progress In Electromagnetic Research**. 32 : 65-87.
- CST Microwave Studio** [Computer software] (2014)., CST Computer Simulation Technology AG.
- Deleruyelle, T., Pannier, P., Alarcon, J., Egels, M., and Bergeret, E. (2010), RFID tag antennas with stable impedance to mounted material. **European Microwave Conference 2010 (EuMC)**, (pp.1090-1093).
- Dobkin, D. M. (2008), **The RF in RFID Passive UHF RFID in Practice**. Elsevier Inc.
- Dong-Uk Sim, Dong-Ho Kim, Jae-Ick Choi, and Hyung-Do Choi (2007), Design of novel dipole-type tag antennas using electromagnetic bandgap (EBG) surface for passive RFID applications. **2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. (pp.1333-1336), 9-15 June 2007.
- DuPont™., **Flexible circuit materials: Technical Data Sheet** [Online]. Available : http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical-materials/assets/Pyralux_TK_DataSheet.pdf
- Finkenzeller K. (2003), **RFID Handbook** (2nd Editions), Wiley & Sons.
- Foster, P.R., and Burberry, R.A. (1999), Antenna problems in RFID systems. **IEE Colloquium on RFID Technology** (Ref. No. 1999/123), (pp.3/1-3/5).

- Gibson, W. C. (2008), **The Method of Moments in Electromagnetic.**, Chapman & Hall CRC, Boca Raton (FL, USA).
- Guo-Min Yang, et al.(2009), Tunable Miniaturized Patch Antennas With Self-Biased Multilayer Magnetic Films. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 57(7) : 2190-2193.
- IEEE Xplore (2014), Keyword “RFID” [Online], Available : <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>
- Jamaluddin, M. H., Rahim, M. K A, Aziz, M.Z.A.A.; and Asrokin, A. (2005), Microstrip dipole antenna analysis with different width and length at 2.4 GHz. **Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic 2005 (APACE2005)**, (pp.4), 20-21 Dec. 2005.
- Kellomaki, T., and Whittow, W.G. (2009), Bendable plaster antenna for 2.45 GHz applications. **Loughborough Antennas & Propagation Conference 2009 (LAPC2009)**., (pp.453-456), 16-17 Nov. 2009
- Kempf, R. A. (1951), Coaxial impedance standards. **Bell System Technical Journal**, : 689-705.
- Keskilammi, M., and Kivikoski, M. (2004), Using text as a meander line for RFID transponder antennas. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, 3(1) : 372-374.
- Kevanishvili, G.S. (2000), On the theory of Hallen integral equation. **Proceedings of the 5th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, 2000 (DIPED2000)**, (pp.9-11).
- Kraus, J. D. (1988), Heinrich Hertz-theorist and experimenter. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 36(5) : 824–829.
- Leung, S.Y.Y., and Lam, D.C.C. (2007), Performance of Printed Polymer-Based RFID Antenna on Curvilinear Surface. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing** , 30(3) : 200-205.
- Otto, D. (1969), A note on the induced EMF method for antenna impedance. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 17(1) : 101-102.
- Salonen, P., and Rahmat-Samii, Y. (2006), Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth. **First European Conference on Antennas and Propagation 2006. (EuCAP2006)**, (pp.1-5), 6-10 Nov. 2006

- Siden, J., Jonsson, P., Olsson, T., and Wang, G. (2001), Performance degradation of RFID system due to the distortion in RFID tag antenna. **11th International Conference on Microwave and Telecommunication Technology 2001**, (pp.371-373), 14-14 September 2001.
- Syed, A., Demarest, K., and Deavours, D.D. (2007), Effects of Antenna Material on the Performance of UHF RFID Tags. **IEEE International Conference on RFID 2007**, (pp.57-62), 26-28 March 2007
- Tikhov, Y., and Won, J.H.(2004), Impedance-matching arrangement for microwave transponder operating over plurality of bent installations of antenna. **IET Electronics Letters** , 40(10) : 574- 575.
- Wellshow Technology (2014), RG-178 Coaxial Cable [Online] , Available : <http://www.wellshow.com/spec/cable/D1780WS5AS.pdf>
- Xiang Zhou, and Gang Wang (2004), Study on the influence of curving of tag antennas on performance of RFID system. **Proceedings on Asia-Pacific Radio Science Conference 2004.**, (pp. 54- 57), 24-27 Aug. 2004.
- Yee, K. (1966), Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.**, 14(3) : 302 - 307.



ภาคผนวก ก

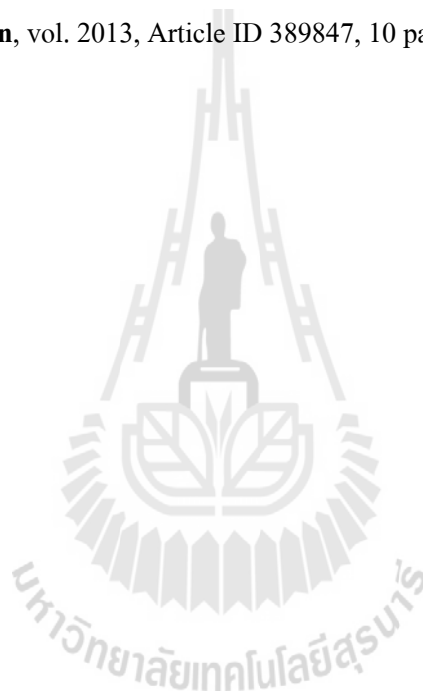
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Saetiaw, C., Thongsopa, C. and Intarapanich, A. (2011). RFID tag antenna design using flexible double-layer strip dipole antenna, **Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation 2011**, Lotte Hotel Jeju, Jeju, Republic of Korea, 25 Oct-28 Oct 2011.

Saetiaw, C. and Thongsopa, C. (2013). Multilayer Strip Dipole Antenna Using Stacking Technique and Its Application for Curved Surface. **International Journal of Antennas and Propagation**, vol. 2013, Article ID 389847, 10 pages.



RFID Tag Antenna Design Using Flexible Double-Layer Strip Dipole Antenna

#Charinsak Saetiaw¹, Chanchai Thongsopa¹ and Apichart Intarapanich²

¹School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima THAILAND, charinsak_s@m.ieice.org

²National Electronic and Computers Technology Center
Phatumtani, THAILAND, apichart.intarapanich@nectec.or.th

Abstract

This paper presents the RFID tag antenna design for use on cylindrical object. Our proposed Double-Layer antenna has physical change itself for better performance than modern antenna. An importance concept of the design is each layer of antenna can freely change to make a physical tuning.

Keywords : RFID Tag Antenna

1. Introduction

The advancement of radio frequency identification (RFID) systems has made them attractive for various applications including logistics, inventory management and human monitoring [1]. The non-line-of sight operation, longer read range, capability and ability to store information make these RFID systems ideal candidates to replace barcode technology.

In supply chain system, many RFID antennas designed for different types and shape of products. One problem when using RFID antennas on the product is various shapes and sizes. The flexible surfaces of the tag antenna has effected by various distortions such as bending when the product is attached to flexible package (Such as plastic and paper). Structural distortion changes the performance of the tag antenna and the performance decline especially when operating in microwave frequencies. By the way, the most used for tag RFID is dipole antenna [2, 3]. This paper will discuss the optimization reduced by simulating curving the RFID tag antenna models by using a double-layer antenna. The result of curving will change the resonance frequency of antenna. Double-layer antenna will reduce the effect of curving based on relative changes in length on each layers. Caused by curving of the antenna is not the same for both layer of antenna. Result of changes to compensate for the resonance frequency which allows the antenna performance increasing. So result of this a little length will be prove a resonance frequency on antenna and make it has better efficiency compares to modern antenna.

This paper is organized as follows. In the next section, the proposed antenna design structure and discussed for both single-layer and double-layer antennas. In section 3, simulations of the reflection coefficient in various radius of curved antenna are presented. The measurement results of the single-layer and double-layer prototype antennas with strength and curved are presented in section 4. Section 5 concludes the paper.

2. Proposed Antenna Design Structure

In this section, a brief review of single layer antenna model is given. Then, the proposed double layer model of Strip Dipole with the effect of curving antenna is discussed.

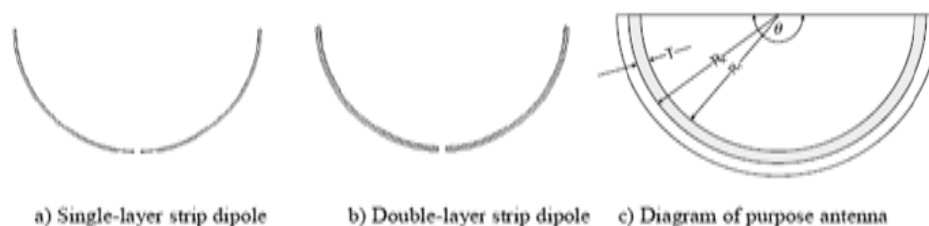


Figure 1: Schematic of the flexible strip dipole antenna

In Fig. 1, show structure of single-layer strip dipole compare to double-layer strip dipole antenna. Each layer has the same length but when it curving, the inner layer will be little shorter than outer layer because of radius of each layer not the same, as show in Fig 1c. An inner layer has length equal to $(2\pi\theta/360)R_1$ where θ is an angle of each layer in degree and R_1 is inner radius of curving antenna. The difference length of each layer is equal to $(2\pi\theta/360)(R_2 - R_1)$. So, we can use this physical change for tuning it own properties of antenna. Normally, when a strip dipole has more length it's resonance frequency will change to a lower frequency [3]. In opposite way, if it length shorter than the original, it will shift to a higher resonance frequency. From this behavior, we design a model for study effect of double-layer strip dipole antenna with two difference type. Double-layer type-I used an inner layer shorter than outer layer and Double-layer type-II is used an outer layer shorter than inner layer as show in Fig.2.

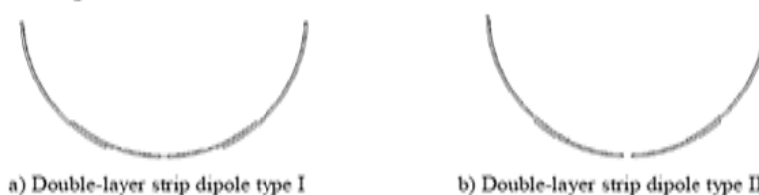


Figure 2: Structure of Double-layer strip dipole with curving radius used in simulation

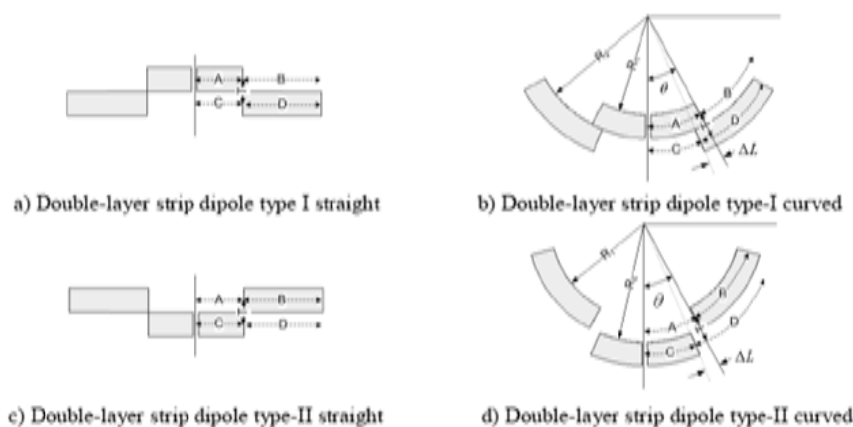


Figure 3: Diagram of double-layer strip dipole for calculate effective length

In Fig.3, it is a demonstrate diagram to show how we can calculate effective length of antenna when it straight and curved without overlap length as

$$L_{eff} = L_{ant} = 2 * (A + B + T) = 2 * (C + D + T) \quad (1)$$

The effective length (L_{eff}) of antenna from equation (1) is the same for both types. However, the effective length has change when antenna has curved. We can write the effective length of double-layer strip dipole type-I and double-layer strip dipole type-II as

$$L_{eff, TypeI} = 2 * (A + D + T - \Delta L) \quad (3)$$

$$L_{eff, TypeII} = 2 * (C + B + T + \Delta L) \quad (4)$$

From equation (3) and Fig. 3(b), length of section C was fixed by physical structure. So, it makes length of section A is reduce cause of curved. The same result for equation (4) and Fig. 3(d), where length of section A was fixed by physical structure. So, it makes section C will be extended. A difference length for both types can calculate by

$$\Delta L = \frac{2\pi\theta}{360} (R_2 - R_1) \quad (5)$$

A negative sign in equation (3) mean to an effective length is decrease from normally length and positive sign in equation (4) mean to it extended from normally length of the first section of antenna's center.

However, Fig. 2 show that section A and C in both type of antenna must have some extended length to cover a difference length that occurred from curved effect for make both layer contacted to each other.

3. Simulation Results

In Fig. 2, a structure of the double-layer strip dipole antenna simulated by using CST [4]. All tag antenna lie on XY-plane and curving in XZ-plane. We curve it for radius 20, 50 and 1000 mm. From Fig. 3, length of section A and C is 10 mm, 18 mm. for section B and D, 1 mm. for overlap on each layer, 4mm. for a strip width and thickness is 0.3 mm. We changed the radius and observe result of reflective coefficient (S11) and resonance frequency. Result from simulation show in Fig. 4.

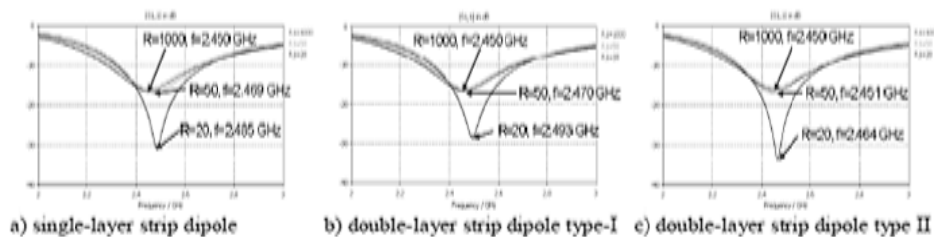


Figure 4: Reflection coefficient (S11) for difference radius of curving

From Fig. 4(a). Single-layer strip dipole has resonance frequency at 2.450 GHz, 2.469 GHz and 2.485 GHz when curving radius was 1000, 50 and 20 mm. respectively. A frequency shift to higher resonance frequency when it curved was report in [5]. So, a double-layer strips dipole type I has resonance frequency at 2.450 GHz, 2.470 GHz and 2.493 GHz in Fig. 4(b). Finally, double-layer strips dipole type II in Fig 4(c) has resonance frequency at 2.450 GHz, 2.451 GHz and 2.464 GHz when curving radius was 1000, 50 and 20 mm. respectively. All of this shows that a double-layer strip dipole type II has most stable resonance frequency than the others. For single layer strip dipole antenna, it shifts resonance frequency with 19MHz and 35MH compare to straight antenna. Next, a

double-layer strip dipole antenna type-I change it resonance frequency for 20MHz and 43MHz. Then, a double-layer strip dipole antenna type-II change it resonance frequency for 1MHz and 14MHz.

4. Measurement Results

The prototype antenna is fabricated from copper sheet thickness 0.3 mm, and other size is same as simulation model. A network analyzer HP8722D used for measurement S11 result in anechoic chamber. From measurement results, double-layer antenna must have a structural supported sheet cover on front and back of antenna. We used a thin PVC film for this purpose. Property of PVC dielectric constant is 3 and thickness around 0.1 mm. So, it makes a small frequency shift when we compare to an original antenna without PVC cover. However, we can adjust it length for matching in the same resonance frequency. For single-layer antenna with PVC cover as show in Fig. 5(a) has a frequency resonance at 2.45 GHz. After curved, a resonance frequency has shift to 2.69 GHz with curving radius 20 mm. For double-layer strip dipole antenna type-II, a resonance frequency is 2.45 GHz for straight antenna. Next, the resonance frequency shift to 2.49 GHz when it curved at radius 20 mm. This result agree with simulation result in section 3 that double-layer strip dipole has improve resonance frequency shifted cause by curved antenna.

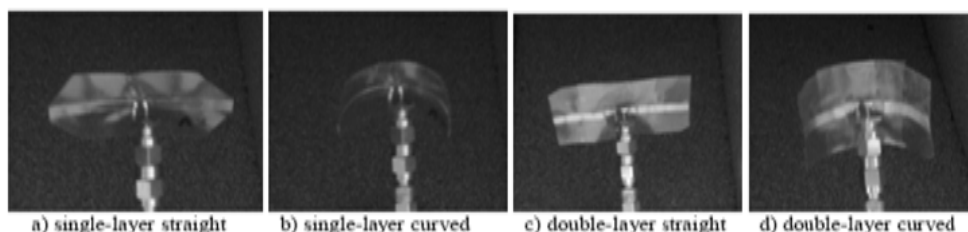


Figure 5: Prototype antennas used for measurement

5. Conclusion

We have shown a design of double-layer strip dipole antenna can improve the performance of RFID tag when the antenna was curved. Result of improvement can be achieved when the RFID tag has curving characteristic. We have shown that double-layer strip dipole antenna type-II are more attractive than double-layer strip dipole antenna type-I for improvement because of resonance frequency was more stable when curving. Hence, the antenna has to be design to match specific object surface so that the RFID performance is improved.

References

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, 3th edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2010
- [2] Z. N. Chen, *RFID tag antenna, Antennas for Portable Devices*, England, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] D. M. Dobkin, *The RF in RFID Passive UHF RFID in Practice*, Elsevier Inc., 2008
- [4] CST-Microwave Studio, 2009
- [5] P. Salonen and Y. Rahmat-Samli, "Textile Antennas: Effects of Antenna Bending on Input Matching and Impedance Bandwidth", *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, IEEE, vol.22, no.3, pp.10-14, March 2007

Acknowledgments

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

Research Article

Multilayer Strip Dipole Antenna Using Stacking Technique and Its Application for Curved Surface

Charinsak Saetiaw and Chanchai Thongsopa

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

Correspondence should be addressed to Charinsak Saetiaw; charinsak_s@yahoo.co.th and Chanchai Thongsopa; chan@sut.ac.th

Received 31 July 2013; Revised 14 November 2013; Accepted 20 November 2013

Academic Editor: Z. N. Chen

Copyright © 2013 C. Saetiaw and C. Thongsopa. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper presents the design of multilayer strip dipole antenna by stacking a flexible copper-clad laminate utilized for curved surface on the cylindrical objects. The designed antenna will reduce the effects of curving based on relative lengths that are changed in each stacking flexible copper-clad laminate layer. Curving is different from each layer of the antenna, so the resonance frequency that resulted from an extended antenna provides better frequency response stability compared to modern antenna when it is curved or attached to cylindrical objects. The frequency of multilayer antenna is designed at 920 MHz for UHF RFID applications.

1. Introduction

In the last decade, the technology of Radio Frequency Identification (RFID) has been used in many aspects of daily life including the logistic system, object tracking system, inventory management, human monitoring, and electronic banking [1]. RFID is a very valuable technology tool that holds the promise of replacing existing identification technologies like the bar code because it can provide longer reading distance, better reading speed, and large information storage capability. RFID system consist of reader and tag. A reader broadcasts a radio signal in its wireless transmission range for queried information contained in tag. After that, the tag will reply with required information. The detection range and accuracy are directly dependent on the performance of reader/tag antennas. However, RFID tag antenna has a lot of different types and shapes applicable with various kinds of products. The tag antenna can be printed onto flexible substrates (or the so-called inlays). The flexible substrates of the tag antenna have been affected by various distortions when applying to different packages on nonflat surface. This distortion in the structure will usually change the performance of the RFID tag antenna and the performance degradation in the RFID system, especially when operating in very high frequency.

A problem of antenna design is that it is difficult to cover all requirements, especially on different types of surface used

if there are techniques to make an antenna tune itself by changing some properties depending on different environments. This technique will be efficient for a manufacturer and eventually for user as it is easily used in all types of application. A technique of stacking layer called multilayer antenna has been purposed. The proposed RFID tag antenna is operated in the ultra-high frequency (UHF) industrial-scientific-medical (ISM) band around 900 MHz. UHF RFID is most popular because of its best appropriate properties such as size and reading range especially low cost and easy fabricate. A design of multilayer strip dipole antenna has been demonstrated of a purpose of this technique used in antenna design that make an antenna tune itself on different types of surface especially on curved surface.

In this paper, we purpose a novel UHF tag antenna with stacking technique suitable to be applied to curved surface or cylindrical object to resolve the performance degradation. We introduced a flexible material structure of copper clad laminate with dielectric substrate stacking on layer by layer that has better frequency response stability than single layer and suitable for RFID applications. However, the tag RFID is mostly used as strip dipole antenna [2, 3]. Practically, strip dipole antenna property and efficiency including resonance frequency will be changed depending on the surface of the object on which it is laid, which may be rough or curved surfaces [4]. The result of curving will change the effective

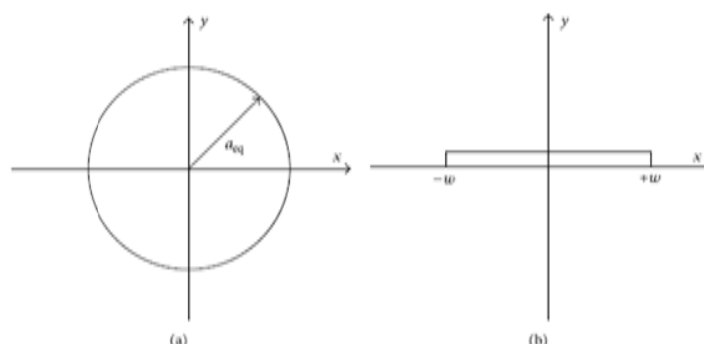


FIGURE 1: Schematic of cross section for thin-wire dipole antenna and microstrip dipole antenna.

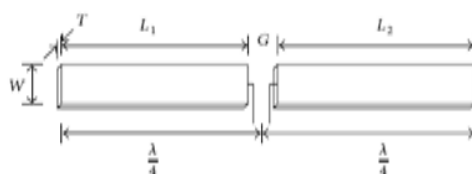


FIGURE 2: Schematic of strip dipole antenna.

length of antenna and affect the resonance frequency of antenna [5]. Multilayer strip dipole antenna will reduce the effect of curving based on relative changes in length on each layer caused by curving of the antenna which is not the same on each layer of antenna. So, the result of an extended length will prove a resonance frequency of antenna and better efficiency compared to modern antenna. The simulation and measurement of curving the RFID tag antenna models by using a multilayer strip dipole antenna will be discussed.

This paper is organized as follows. The first section is an introduction of RFID as already mentioned above. The second section is a demonstration of the antenna structural design and discussion on single-layer strip dipole antenna and multilayer strip dipole antenna. In simulation section, a reflection coefficient of curved antenna in various radiuses and different types of antenna are presented as a result of simulations. The next section presents a measurement result from prototype of the single-layer, triple-layers and five-layers antennas with straight and curved. The last section is the conclusion of the paper.

2. Multilayer Strip Dipole Antenna

In this section, a brief review of strip dipole antenna model and design is given. Then, the proposed multilayer strip dipole antenna with the effect of curving antenna is discussed.

Dipole antenna was designed in the late 19th century by Heinrich Hertz Rudolph [6]. The components of the dipole

antenna connector consist of two straight lines of equal length lying on the same axis, separated by a small gap. The main factor for determining the frequency is the length of the antenna. The number of half wave length will be used for this purpose. After that, a design of thin-wire dipole antenna can be adapted to strip dipole antenna as shown in Figure 1.

From [7] we will have the relation of thin-wire dipole diameter (a_{eq}) compared to strip dipole antenna width (w) as

$$a_{eq} = \frac{2w}{4}. \quad (1)$$

By this equation, we can design any strip dipole antenna that has some properties related to thin-wire dipole. Otherwise, the strip dipole antenna length will relate to their frequency designed.

Basically, rectangular strip antenna can be classified into two main categories depending on their length-to-width ratio. An antenna with a narrow rectangular strip (typically strip width less than $0.05\lambda_0$) is called a microstrip dipole and a broad rectangular antenna is called microstrip patch. Microstrip width has a minor effect on the resonant frequency and radiation pattern of antenna. A larger strip width increases the power radiated and thus decreases resonance resistance and increases bandwidth [8]. We can model a microstrip dipole antenna or a strip dipole antenna that its dimensions related to thin-wire dipole model as shown in Figure 2.

Microstrip dipole can be designed for the lowest resonant frequency using transmission line model. Thus, $L_1 = L_2 = \lambda/4$ and the gap between each arm of antenna is too small compared to total length of antenna.

Figures 3(a) and 3(b) present a demonstration structure of strip dipole antenna called single-layer strip dipole antenna. Single-layer strip dipole antenna can be added with more layer stack into a structure. This is called double-layers strip dipole antenna, as shown in Figures 3(c) and 3(d). Each layer has the same length when it is straightened but the inner layer will be little longer than the outer layer because the radius of each layer is not the same when it is curved. Accordingly,

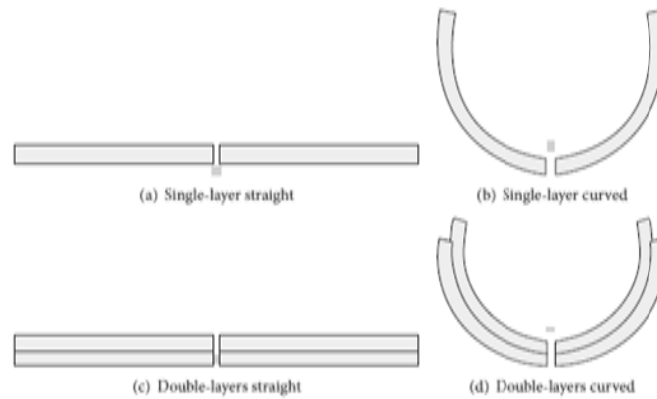


FIGURE 3: Schematic of strip dipole antenna.

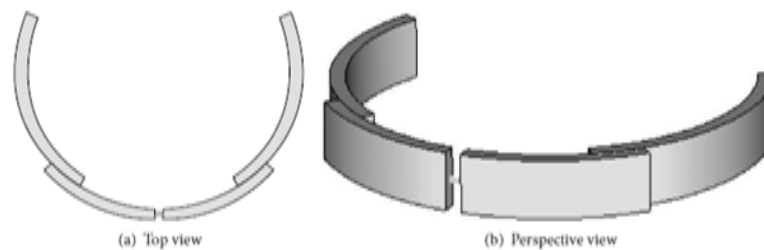


FIGURE 4: Double-layers strip dipole antenna schematic.

we can implement this changeable characteristic for suitable tuning properties of antenna. Normally, when a strip dipole has more length, its resonance frequency will decrease as well [9]. On the other hand, if the length is shorter than the original, the resonance frequency will increase. So, we design a double-layers strip dipole antenna that uses this physical change to compensate curving of antenna. Normally, double-layers strip dipole antenna has been designed to have shorter outer layer than inner layer as shown in Figure 4 [10].

From Figure 5, the schematic is created to demonstrate how we can calculate effective length when it is curved. The effective length (L_{eff}) of slot antenna and double-layers strip dipole antenna when being straightened and curved was reported in [5, 10] as

$$L_{\text{eff}} = 2 * (L_{11} + \Delta L_1 + T_1 + L_{22}), \quad (2)$$

where L_{mn} is the length of strip on layer m section n and T_m is thickness of strip on layer m . From (2), the effective length of antenna is the same on the left arm and right arm. However,

ΔL_1 is an expanded length on layer 1 that came from the effect of difference curving on each layer shown as

$$\Delta L_1 = T_1 \theta_1 = \frac{T_1 L_{21}}{R_2}, \quad (3)$$

where $L_{21} = R_2 \theta_1$ and T is equal to an antenna thickness on inner layer.

From Figure 5(b), the length of section L_{11} was fixed by physical with supporting structure. So, it would make section L_{12} move away from the center rather than section L_{22} . This functioning affects on extension of length ΔL_m occurred on layer m . A positive sign of ΔL_m in (2) mean to the normal length has been extended. Figure 5 shows that sections L_{11} and L_{22} must have some extended length (X_1) to cover a difference length that occurred from curved effect for making both layers contacted to each other.

Next, we adapted a flexible copper-clad laminate as raw material because of flexibility and it is easy to be fabricated. There are many types of materials that are normally used for RFID antenna. For our design, a Pyralux AP9121R of

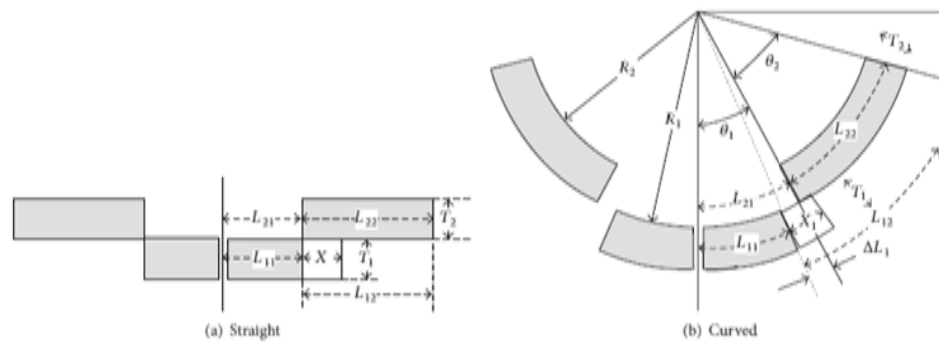


FIGURE 5: Schematic of double-layers strip dipole.

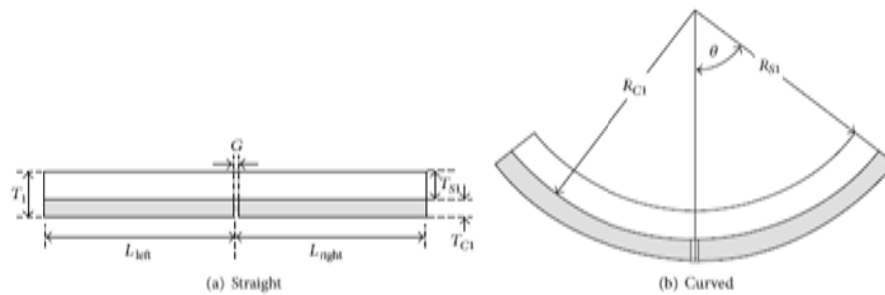


FIGURE 6: Schematic of single-layer strip dipole antenna design with flexible copper-clad laminate.

TABLE 1: The dimension parameters of multilayer strip dipole antenna (unit : millimeter(s)).

| Parameter name | Antenna type | | | | |
|----------------|--------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| | Single-layer | Double-layers | Triple-layers | Four-layers | Five-layers |
| W | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| T_{Cl-C3} | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 |
| T_{31-33} | 0.051 | 0.051 | 0.051 | 0.051 | 0.051 |
| G | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| O_{2-3} | 0.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| L_{11} | 72.625* | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 |
| L_{21} | — | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 |
| L_{22} | — | 51.87* | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| L_{31} | — | — | 25.00 | 25.00 | 25.00 |
| L_{32} | — | — | 42.62* | 10.00 | 10.00 |
| L_{41} | — | — | — | 35.00 | 35.00 |
| L_{42} | — | — | — | 33.30* | 10.00 |
| L_{51} | — | — | — | — | 45.00 |
| L_{52} | — | — | — | — | 23.27* |

* optimized value from simulation at 920 MHz.

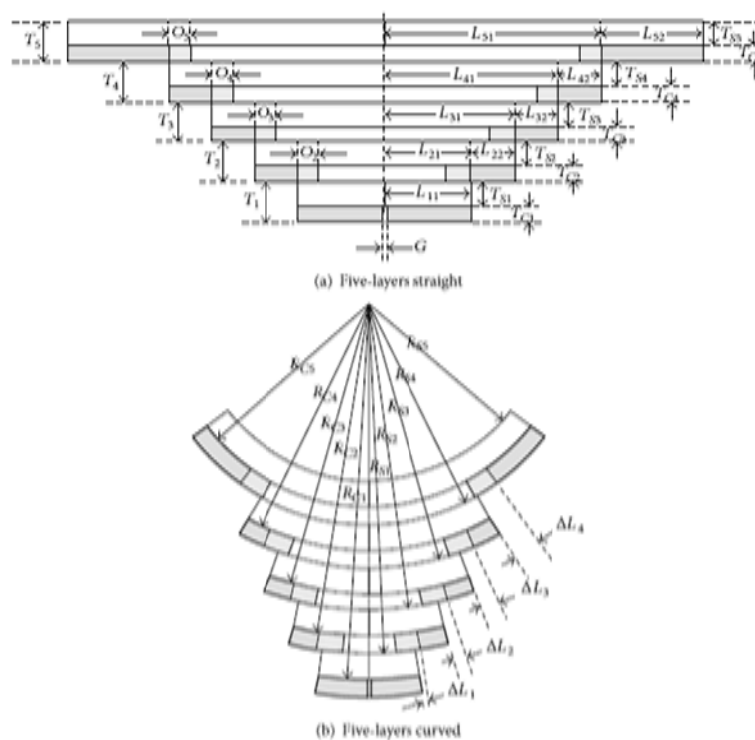


FIGURE 7: Five-layers strip dipole antenna schematic.

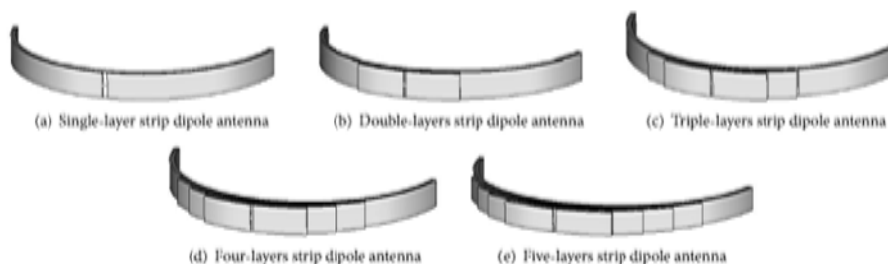


FIGURE 8: Multilayers strip dipole antenna model (not true scale).

DuPont is selected [11]. A copper-clad laminate is an all-polyimide composite of polyimide film bonded to copper foil. This material system is ideal for multilayer flex and rigid flex applications which require advanced material performance, temperature resistance, and high reliability. It has dielectric constant, dielectric thickness, and copper clad thickness equal to 3.4, 0.051 millimeters and 0.035 millimeters, respectively.

However, it seems that flexible copper-clad laminate has a very small thickness to make a lot of extend length comparing to double-layers strip dipole made from pure copper sheet when it is curved. So, it is possible that we can stack it to make a multilayer strip dipole antenna with this material to increase thickness and make a better frequency response of antenna compared to an original design with a double-layers strip dipole antenna.

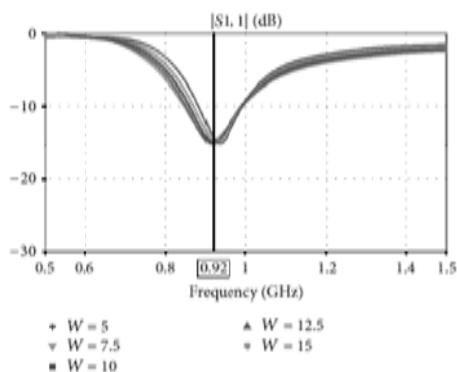


FIGURE 9: Resonance frequency of single-layer strip dipole antenna with difference width (millimeters).

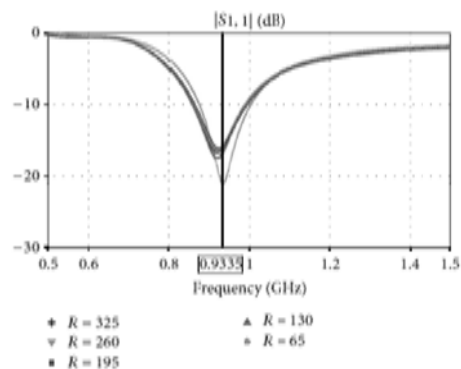


FIGURE 12: Resonance frequency of double-layers strip dipole antenna with difference curving radius (millimeters).

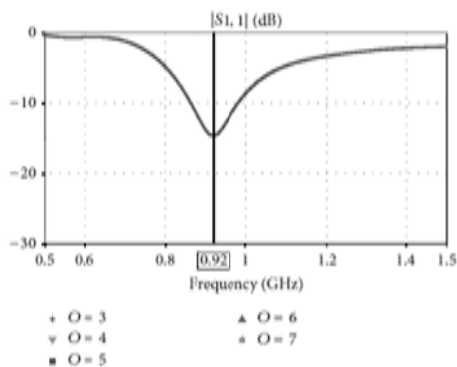


FIGURE 10: Resonance frequency of five-layers strip dipole antenna with difference overlap length (millimeters).

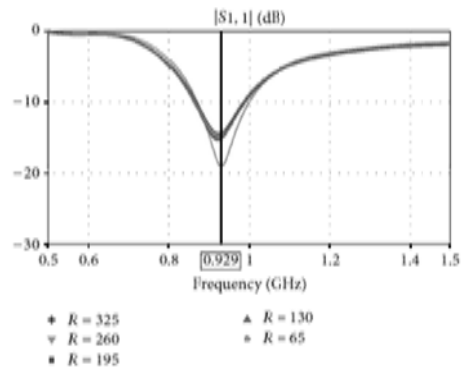


FIGURE 13: Resonance frequency of triple-layers strip dipole antenna with difference curving radius (millimeters).

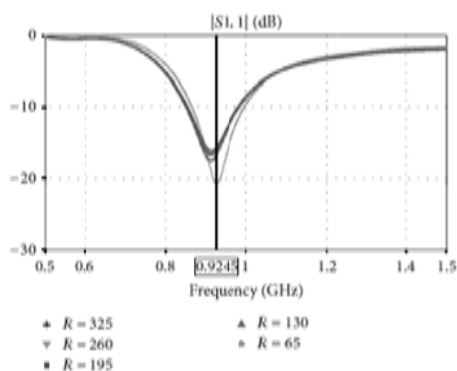


FIGURE 11: Resonance frequency of single-layer strip dipole antenna with difference curving radius (millimeters).

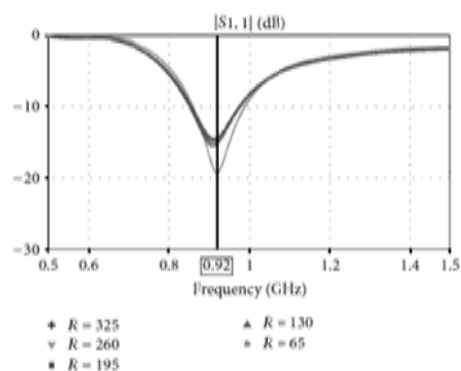


FIGURE 14: Resonance frequency of four-layers strip dipole antenna with difference curving radius (millimeters).

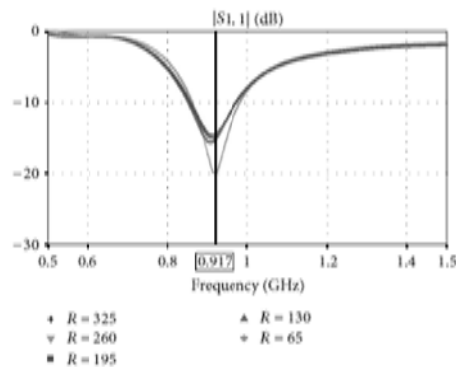


FIGURE 15: Resonance frequency of five-layers strip dipole antenna with difference curving radius (millimeters).

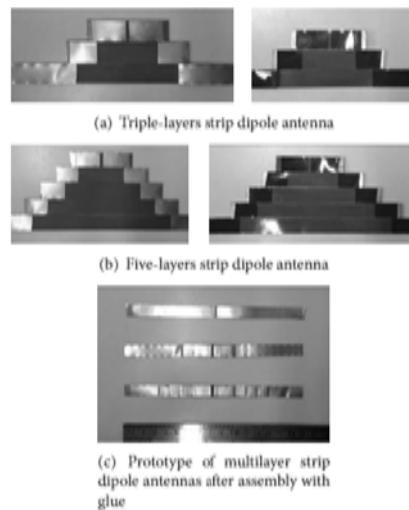


FIGURE 16: Prototype of multilayer strip dipole antennas.

TABLE 2: Curving ratio and actual curving radius.

| Curving ratio | Actual curving radius (mm) |
|----------------|----------------------------|
| $0.2\lambda_0$ | 65 |
| $0.4\lambda_0$ | 130 |
| $0.6\lambda_0$ | 195 |
| $0.8\lambda_0$ | 260 |
| $1.0\lambda_0$ | 325 |

So, when it has a lot of layers, it makes a bit longer process to make an antenna. This means to a limitation of multilayer with stacking technique which will be decided for how many

layers for fabrication to be capable to perform with good economic value.

Figure 6 shows a model for single-layer of flexible copper-clad laminate strip antenna. We can call them in general term as a multilayer strip dipole if we stack a flexible copper-clad laminate more than two layers. A demonstrated diagram to calculate effective length of five-layers strip dipole antennas is shown in Figure 7.

From Figure 7 the schematic of five-layers strip dipole antenna is demonstrated, with the effective length written as

$$L_{\text{eff}} = 2 * \{L_{11} + \Delta L_1 + T_1 + L_{22} + \Delta L_2 + T_2 + L_{32} + \Delta L_3 + T_3 + L_{42} + \Delta L_4 + T_4 + L_{52}\}, \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= \frac{T_1 L_{21}}{R_{C2}}, & \Delta L_2 &= \frac{T_2 L_{31}}{R_{C3}}, \\ \Delta L_3 &= \frac{T_3 L_{41}}{R_{C4}}, & \Delta L_4 &= \frac{T_4 L_{51}}{R_{C5}}, \end{aligned} \quad (5)$$

The thickness of each layer (T_M) can be calculated by total thickness of flexible copper-clad laminate that equals thickness of copper layer (T_{CM}) plus thickness of dielectric substrate (T_{SM}) where M is number of layers. Otherwise, a radius of curved on each layer can be used as a radius of copper layer (R_{CM}). So, we can find out an extended length of each layer for five-layers strip dipole antenna by (5).

3. Simulation Results

Figure 8 shows a schematic of the multilayer strip dipole antenna simulated by using CST-Microwave Studio high frequency simulator [12]. The antenna is laid on XY -plane and curve in XZ -plane. Some of the antenna parameters affected the resonance frequency of the antenna. The comparable result found that only one parameter changed when the other was fixed. By the way, the strip width will mostly affect the frequency bandwidth [9].

Typically, strip width is less than $0.05\lambda_0$ for a strip dipole [9] that is around 16.3 millimeters for center frequency at 920 MHz. Figure 9 shows effects of strip width that extend antenna bandwidth. So, a strip width is set to 10 millimeters for a proper size for use and has enough bandwidth covering UHF-RFID standard (850 to 960 MHz). The bandwidth of UHF-RFID standard in Thailand is 920–925 MHz [13].

Otherwise, this design will not be affected by the overlap length. If they are changed, the overlap lengths (O_M) are varying from 3, 4, 5, 6, and 7 millimeters, respectively. The resonance frequency is still the same at 920 MHz as shown in the simulation result in Figure 10.

Flexible copper-clad laminate has copper layer of 0.035 millimeters in thickness; the substrate thickness is 0.051 millimeters. The total length of the antenna will be used for a quarter wavelength, which is equal to 81.25 mm. but the final length will be changed depending on simulation result to provide frequency response at 920 Mhz. The other lengths of all section are shown in Table 1, where antenna type is a

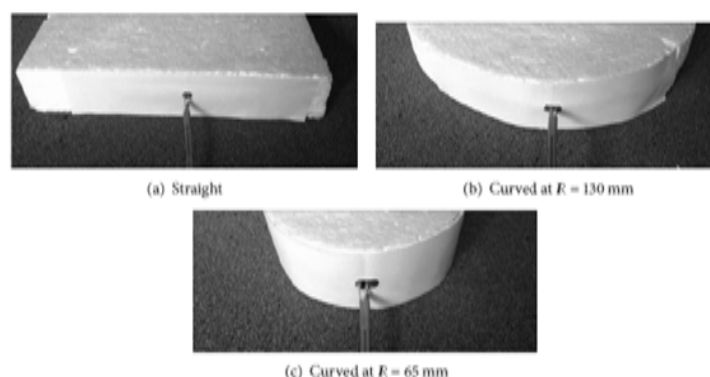


FIGURE 17: Multilayer strip dipole antenna with balun and cover paper used for measurement.

TABLE 3: Resonance frequency of strip dipole antenna with difference curving radius.

| Curving radius (mm) | Resonance frequency (MHz) | | | | |
|---------------------|---------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| | Single-layer | Double-layers | Triple-layers | Four-layers | Five-layers |
| 325 | 912.50 | 924.50 | 923.00 | 914.00 | 911.00 |
| 260 | 912.50 | 921.50 | 920.00 | 912.50 | 912.50 |
| 195 | 911.00 | 920.00 | 918.50 | 911.00 | 911.00 |
| 130 | 911.00 | 920.00 | 920.00 | 911.00 | 906.50 |
| 65 | 924.50 | 933.50 | 929.00 | 920.00 | 917.00 |
| Average | 915.25 | 923.25 | 921.75 | 914.75 | 913.00 |
| SD | 5.65 | 5.32 | 3.84 | 4.22 | 4.81 |

single-layer, double-layers, triple-layers, four-layers, and five-layers strip dipole antenna.

The simulation result of using different curved radius is equal to a curving ratio multiplied by wavelength (λ_0) of center frequency. In this case, center frequency is 920 MHz. So, a wavelength is equal to 325 millimeters that converts to actually curving radius as shown in Table 2.

The radius of curve has been changed in order to observe the reflection coefficient (S11) and resonance frequency. The result of the simulation with different curving ratios of single-layer, double-layers, triple-layers, four-layers, and five-layers strip dipole antenna are shown in Figures 11, 12, 13, 14, and 15, respectively.

For practical, a multilayer antenna must have a structural supported sheet cover on front of antenna to make each layer contacted together. We have used a thin paper for this purpose. Property of paper has a dielectric constant of 2.3 and thickness around 0.038 mm. So, it makes a small frequency shift when we compare to an original antenna without paper cover. Finally, we add a 0.038 mm thickness paper including in our model to simulation that has size 40×16 mm.

Basically, resonance frequency increases higher when a single-layer strip dipole antenna is curved as reported in [10, 14]. So, a simulation results of all strip dipole antenna are shown in Table 3.

According to these simulation results, it could be summarized that the resonance frequency of antenna and curving ratio is more stable when the layers match as shown in Table 3. For example, on single-layer strip dipole antenna, the resonance frequency has been changed from 920.0 MHz to 915.25 MHz for average when curving with different curved ratios. Its resonance frequency has been shifted to 4.75 MHz or 4.75 percent of bandwidth (UHF-RFID standard 850 MHz–960 MHz).

Then, the average of the resonance frequency changed from 920 MHz for double-layers, triple-layers, four-layers and five-layers strip dipole antenna was 3.25 MHz, 1.75 MHz, 4.75 MHz and 3.00 MHz, respectively. It shows that a standard deviation of the resonance frequency of single-layer, double-layers, triple-layers, four-layers, and five-layers strip dipole antenna was 5.65, 5.32, 3.84, 4.22, and 4.81, respectively. So, the most minimum change of resonance frequency with difference curving radius is triple-layers strip dipole antenna.

4. Measurement Results

From simulation result, we choose to represent only three types of them to make a prototype that was single-layer,

triple-layers, and five-layers. The prototype antennas were fabricated from flexible copper-clad laminate that has dimension and electrical properties is the same as the simulation model. The prototype antenna was made from flexible copper-clad laminate as shown in Figure 17. A network analyzer HP8722D used for measurement S11 results in anechoic chamber.

However, the edge of each layer will be flipped over and bent backward for joining to another layer to make a physical contact on entire antenna. Next, each of the layers was fixed together by glue at the center. Finally, we have a prototype antennas as shown in Figure 16.

In order to be able to measure the dipole antenna via coaxial cable, a balance-to-unbalance transformer balun is used. A quarter-wave coaxial balun or folded balun is relatively easily constructed [15]. A folded balun can be constructed using extra piece of coaxial cable. It is connected between feeding coaxial cable and the antenna side to the inner conductor of the feed. This extra cable should be a quarter of wave length long. Therefore, this type of balun has no effect on input impedance. Further more, the quarter wavelength line induces another current on the outside of the outer conductor, which canceled the unbalanced current. However, we connected this balun with a SMA connector for measurement as shown in Figure 17. It is not part of the strip dipole antenna, and it can be considered an external module used just for measurement purposes.

From measurement results, a resonance frequency of single-layer strip dipole antenna is at 920.0 MHz. The resonance frequency has been shifted to 912.5 MHz with curving radius of 130 millimeters and 924.9 MHz with curving radius 65 millimeters. Then, a triple-layers strip dipole antenna has resonance frequency at 920.0 MHz when being straightened. The resonance frequency has been shifted to 920.9 MHz and 918.5 MHz when it curved at 130 millimeters and 65 millimeters, respectively.

Finally, a five-layers strip dipole antenna has resonance frequency of 920.0 MHz when it is straightened. The resonance frequency has been shifted to 905.4 MHz and 917.1 MHz when it curved at 130 millimeters and 65 millimeters, respectively. This result agrees with simulation result in Section 3 that triple-layers and five-layers strip dipole has improved the change of resonance frequency due to the antenna to be curved.

5. Conclusion

This paper presents a novel multilayer strip dipole antenna using stacking technique. The proposed antenna has uses flexible copper-clad laminate, which this flexibility is the advantages to be applied for the application of RFID tags. The simulation of improvement is achieved when the multilayer strip dipole antenna is curved. A design of antenna and effects of size which varied by frequency of antenna have been presented. The results of simulation will be implemented to design an appropriate and efficient antenna. According to the simulation, the multilayer strip dipole antenna is more attractive than single-layer strip dipole antenna because it performs

higher stability of resonance frequency while curving. In addition, the deviation of resonance frequency for multilayer strip dipole antenna when it curved is less than single-layer strip dipole antenna with various curving ratios. This designed technique could be confirmed by a measurement result from a prototype antenna that agrees with simulation results. Hence, the antenna must be designed to match with specific characteristics of object surfaces including material properties in order to improve RFID system performance.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU Project of Thailand. The authors deeply appreciate the valuable comments of the reviewers and recommends to be advantageous for revisits this paper.

References

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2010.
- [2] Z. N. Chen, *Antennas for Portable Devices*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2007.
- [3] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*, Newnes, Newton, Mass, USA, 2007.
- [4] P. Salonen and Y. Rahmat-Samii, "Textile antennas: effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 22, no. 3, pp. 10–14, 2007.
- [5] A. Galehdar and D. V. Thiel, "Flexible, light-weight antenna at 2.4 GHz for athlete clothing," in *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 4160–4163, June 2007.
- [6] J. D. Kraus, "Heinrich Hertz-theorist and experimenter," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 36, no. 5, pp. 824–829, 1988.
- [7] C. Butler, "The equivalent radius of a narrow conducting strip," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 4, pp. 755–758, 1982.
- [8] M. H. Jamaluddin, M. K. A. Rahim, M. Z. A. A. Aziz, and A. Asrokin, "Microstrip dipole antenna analysis with different width and length at 2.4 GHz," in *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE '05)*, pp. 41–44, December 2005.
- [9] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Norwood, Mass, USA, 2001.
- [10] C. Saetiaw, C. Thongsopa, and A. Intarapanich, "RFID tag antenna design using flexible double-layer strip dipole antenna," in *Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation*, Jeju, Republic of Korea, 2011.

- [11] DuPont, "flexible circuit materials: Technical Data Sheet," <http://www.dupont.com/>.
- [12] *CST-Microwave Studio*, 2009.
- [13] "Regulatory status for using RFID in the EPC Gen 2 band (860 to 960 MHz) of the UHF spectrum," <http://www.gs1.org/>.
- [14] J. Siden, P. Jonsson, T. Olsson, and G. Wang, "Performance degradation of RFID system due to the distortion in RFID tag antenna," in *Proceedings of the 11th International Conference on Microwave and Telecommunication Technology*, pp. 371-373, 2001.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2005.

ประวัติผู้เขียน

นายจรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2517 ที่อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีพ.ศ. 2540 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับ บริษัทแอดวานซ์อินโฟร์เซอร์วิสเซอ จำกัด (มหาชน) โดยในระหว่างนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยรามคำแหง วิทยาเขตนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2547 จากนั้นได้ลาออกจากบริษัทเพื่อเข้าศึกษาระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2550 หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2552 จึงได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทบริหารธุรกิจ ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการและวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ดังนี้

1. งานวิจัยหัวข้อ “*RFID Tag Antenna Design Using Flexible Double-Layer Strip Dipole Antenna*” ตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ International Symposium on Antennas and Propagation 2011.
2. งานวิจัยหัวข้อ “*Multilayer Strip Dipole Antenna Using Stacking Technique and Its Application for Curved Surface*” ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ International Journal of Antennas and Propagation ปี 2013 หน้า 1-10.