

รหัสโครงการ [SUT7-716-56-12-09]



รายงานการวิจัย

การออกแบบแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่างๆ
ที่ปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ได้เอง

**DESIGN OF RFID TAGS ON CURVATURE SURFACE
WITH SELF-IMPEDANCE TUNING**

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การออกแบบแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่างๆ
ที่ปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ได้เอง

**DESIGN OF RFID TAGS ON CURVATURE SURFACE
WITH SELF-IMPEDANCE TUNING**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภา

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

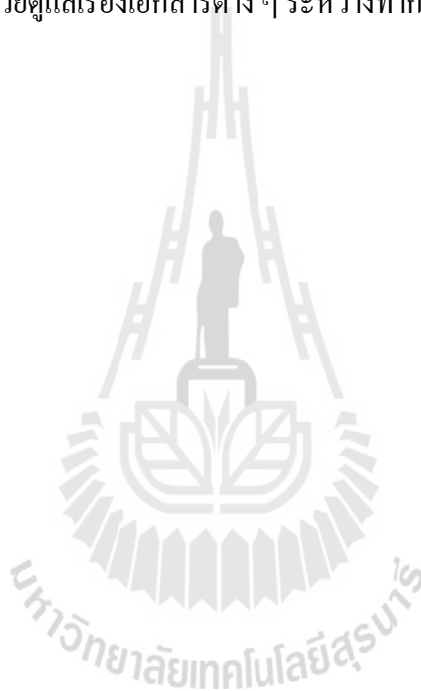
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ และเลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมที่ช่วยดูแลเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างทำการวิจัยจนสำเร็จไปด้วยดี

ชาญชัย ทองโสภ

มีนาคม 2557



บทคัดย่อ

ระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification - RFID) เป็นระบบที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงที่ผ่านมา โดยเฉพาะการใช้งานเสริมกับระบบรหัสแท่ง เนื่องจากมีความสามารถที่มากกว่าในหลายด้าน ตัวอย่างหนึ่ง คือ การนำระบบอาร์เอฟไอดี ไปใช้ควบคุมสินค้าคงคลัง ของสินค้าอุปโภคบริโภค ด้วยเหตุนี้สายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จึงอาจจะติดตั้งอยู่บนวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันและองค์ประกอบของวัสดุที่หลากหลาย เช่น โลหะ แก้ว พลาสติก และแม้กระทั่งถูกนำไปติดบนเสื้อผ้าสำหรับใช้สวมใส่บนร่างกายมนุษย์ โดยพบว่า การนำเอาแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานบนวัตถุที่มีพื้นผิวที่มีรูปแบบต่าง ๆ จะประสบกับปัญหาการที่คุณสมบัติของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากลักษณะของวัตถุที่นำไปใช้งานร่วมด้วย โดยจะทำให้สายอากาศมีการเปลี่ยนรูป ส่งผลถึงค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศรวมทั้งผลตอบสนองทางความถี่ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้จะเป็นศึกษาการออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองได้ เพื่อที่จะมีคุณสมบัติเหมาะสม สำหรับการใช้งานบนพื้นผิวโค้ง และสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

Abstract

Radio Frequency Identification (RFID) system has been widely used in many services in the industry in the past decade. Initially RFID has developed to used together with barcode system because of its more capable in many ways. RFID systems are frequently used to control the inventory of consumer goods; hence, tag antennas may be mounted on objects with widely varying size and material composition such as metal, glass, plastic, and even on clothing for wear on the human body. However, for practical usage of RFID tags on various objects and surface variations will be faced with the problem of the RFID tags properties has changed. Cause of the nature of the materials used with the RFID tag including the impedance of the antenna which affect the efficiency of system.

This research has studied and designed the RFID tag antenna with self-impedance tuning for used on the various curved surfaces of objects. In order to enable appropriate design features of the antenna used correctly and efficiently.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ปรัชญาหรือค่านิยม.....	4

บทที่ 2 ระบบอาร์เอฟไอดีเบื้องต้น

2.1 บทนำ.....	7
2.2 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี	7
2.3 คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี	8
2.3.1 ชนิดการส่งข้อมูล.....	8
2.3.2 ความจุข้อมูล	9
2.3.3 ความสามารถในการเขียนข้อมูล	9
2.3.4 แหล่งจ่ายพลังงาน	10
2.3.5 ความถี่ปฏิบัติการ	10
2.3.6 ระยะเวลาในการใช้งาน	10
2.3.7 กระบวนการส่งข้อมูลกลับ.....	11
2.4 รูปแบบโครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี.....	11
2.4.1 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบคิสก์และเหรียญ.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยแก้ว	12
2.4.3	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยพลาสติก	12
2.4.4	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับติดตั้งบนเครื่องมือและขวดก๊าช.....	12
2.4.5	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในรูปแบบกุญแจและพวงกุญแจ.....	12
2.4.6	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในรูปแบบนาฬิกา	12
2.4.7	รูปแบบสมาร์ทการ์ดแบบ ID-1	12
2.4.8	ฉลากอัจฉริยะ (Smart Label)	13
2.4.9	ไอซีแบบมีขดลวดในตัว	13
2.4.10	รูปแบบอื่น ๆ.....	13
2.5	ความถี่ ระยะเวลาใช้งาน และการควบคุม.....	13
2.6	สรุป.....	14
บทที่ 3	สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี	
3.1	บทนำ	16
3.2	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี	16
3.3	การแมตซ์อิมพีแดนซ์และการถ่ายโอนกำลังงาน	18
3.4	สายอากาศไดโพลและอนุพันธ์	23
3.4.1	การวัดเส้น (Wiggling Line).....	25
3.4.2	การแมตซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ.....	28
3.4.3	การโหลดปลายสายด้วยค่าคาปาซิแตนซ์	29
3.4.4	ไดโพลแบบทรงกระบอกและแบบแผ่นบาง	30
3.5	แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับวัสดุแวดล้อม	33
3.6	สรุป.....	37
บทที่ 4	การออกแบบและการจำลองแบบ	
4.1	บทนำ	38
4.2	การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน	38
4.3	ผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 สรุป.....	51
บทที่ 5 การวิเคราะห์และวัดผล	
5.1 บทนำ.....	53
5.2 การสร้างและวัดผลสายอากาศต้นแบบ	53
5.3 สรุป.....	59
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย	60
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	61
รายการอ้างอิง	62
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	64
ประวัติผู้วิจัย	73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบระบบอาร์เอฟไอดี 7
2.2	โครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี 8
2.3	รูปแบบที่หลากหลายของ RFID 11
3.1	สายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟที่ใช้งานเชิงพาณิชย์..... 18
3.2	แหล่งจ่ายแรงดันกับความต้านทานแหล่งจ่าย R_S และ ความต้านทานโหลด R_L 19
3.3	วงจรสมมูลของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับไอซี..... 21
3.4	สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี 23
3.5	ไดโพลแบบครึ่งคลื่นสามารถทำให้สั้นลงโดยการติดตั้งเส้นลวด 24
3.6	กระแสที่ไหลในโครงสร้างสายอากาศแบบ โค้งตัวัด จะมีทิศทางตรงข้ามกันของส่วนที่มีทิศ ทางตรงข้ามและไม่เกิดการแผ่กระจายคลื่น 25
3.7	สายอากาศโค้งตัวัดมีค่าอินดักแตนซ์ภายในน้อยเนื่องจากการตั้งฉากและการวางตรงข้าม.... 27
3.8	สายอากาศโค้งตัวัดสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี 28
3.9	การลัดวงจรด้วยตัวเหนี่ยวนำและการต่ออนุกรมด้วยตัวเหนี่ยวนำเพื่อแมตชิงค่าคาปาซิทีฟ สายอากาศกับค่าคาปาซิทีฟโหลด..... 29
3.10	สายอากาศเชิงพาณิชย์ ที่ใช้การ โหลดปลายและค่าอินดักทีฟเพื่อแมตชิงให้พอดีกับความยาว ที่ต้องการ..... 30
3.11	การเปรียบเทียบการวัดค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลสำหรับสายอากาศสองแบบที่ความยาว คล้ายกัน แต่มีการเปลี่ยนอัตราส่วนด้าน..... 32
3.12	โครงสร้างสายอากาศแถบความถี่กว้างที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์..... 33
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ, คลื่นที่เดินทางออกไป, และคลื่นที่สะท้อนที่ผิว 34
3.14	รูปแบบคลื่นนิ่งใกล้กับรอยต่อที่ก่อให้เกิดการสะท้อน ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความ เข้มสนามและกำลังงานที่ได้รับเทียบกับตำแหน่ง 35
3.15	ภาพด้านข้างของสายอากาศจริงที่วางใกล้พื้นผิวโลหะจะสมมูลกับสายอากาศเงาเมื่อไม่มี โลหะ 36
4.1	สายอากาศไดโพล..... 39
4.2	โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	เปรียบเทียบสายอากาศแบบตัดโค้งกับสายอากาศแบบหักงอ..... 41
4.4	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนขณะตัดโค้ง..... 42
4.5	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1..... 42
4.6	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2..... 43
4.7	ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลง ขณะตัดโค้ง ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพล แผ่นแบนแบบที่ 1..... 43
4.8	ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงขณะตัดโค้ง ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบที่ 2..... 44
4.9	ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1..... 45
4.10	ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2..... 45
4.11	แบบจำลองสายอากาศคั่นแบบ 47
4.12	กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ..... 48
4.13	กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ..... 48
4.14	กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ..... 49
4.15	กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นบางชั้นเดียว ที่ความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศความหนา 0.1 และ 0.3 มิลลิเมตร..... 50
4.16	กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นบางสองชั้น ที่ความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศความหนา 0.1 และ 0.3 มิลลิเมตร..... 51
5.1	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่มีการต่อเพิ่มส่วนขยาย..... 53
5.2	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตร 55
5.3	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร 55
5.4	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตร 56
5.5	สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร 56

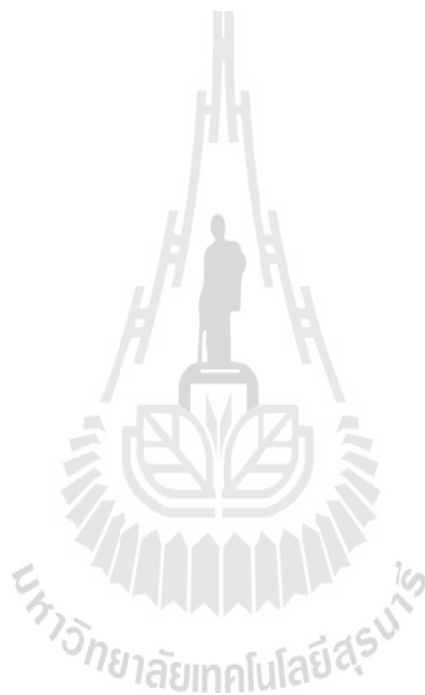
สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 ผลการวัดค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตรขณะ ตัดโค้งที่รัศมี 24.5 มิลลิเมตร	57
5.7 ผลการวัดค่าค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร ขณะตัดโค้งที่รัศมี 24.5 มิลลิเมตร	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล..... 40
4.2	ค่าอัตราส่วนความโค้งและขนาดความโค้งจริง 50
5.1	ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบ 59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการระบุตัวตนอัตโนมัติ (Auto-ID) เป็นที่นิยมอย่างมาก ทั้งในอุตสาหกรรม การจัดซื้อ และการขนส่ง การกระจายสินค้า รวมทั้งอุตสาหกรรม การระบุตัวตนอัตโนมัติได้มีการใช้ในการจัดเก็บข้อมูลบุคคล สัตว์ สินค้า และผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเริ่มจากการใช้ระบบรหัสแท่ง (Barcode) ซึ่งได้รับการยอมรับ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานในด้านต่าง ๆ (Finkenzeller K., 2003) อย่างไรก็ตาม ระบบรหัสแท่ง แม้จะมีราคาที่ถูก แต่ก็มีความจุข้อมูลที่ต่ำ และไม่สามารถแก้ไขข้อมูลใหม่ได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลลงในชิพซิลิคอนที่เรียกว่า บัตรสมาร์ทการ์ด แต่ก็ยังมีข้อดีที่ต้องอาศัยการสัมผัสของจุดเชื่อมต่อ ซึ่งค่อนข้างไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ดังนั้นการที่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้โดยมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลและอุปกรณ์อ่านค่าที่เหมาะสม น่าจะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า รวมทั้งในการทำให้อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลทำงานนั้น พลังงานจะถูกส่งผ่านด้วยเทคโนโลยีไร้สาย ด้วยเหตุนี้เอง จากขั้นตอนที่ใช้สำหรับการส่งผ่านพลังงาน และการรับส่งข้อมูลของระบบระบุตัวตนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จึงถูกเรียกว่า ระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification – RFID)

นอกจากนี้ ในช่วงที่ผ่านมา ระบบอาร์เอฟไอดี ยังได้รับการพัฒนาเป็นวิทยาการสาขาใหม่ที่อิสระ ซึ่งไม่ได้รวมกับกลุ่มพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีก่อนหน้านี้ โดยจะเป็นการนำองค์ความรู้จากวิทยาการด้านต่าง ๆ ทั้งเทคโนโลยีความถี่สูง เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ การปกป้องข้อมูล การเข้ารหัส เทคโนโลยีการผลิต และอีกหลากหลายด้านที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถจัดกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารด้าน โทรคมนาคมได้หลายกลุ่ม อาทิ กลุ่มที่ศึกษาการพัฒนาออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายและเครื่องรับส่งอาร์เอฟไอดี กลุ่มที่ศึกษาแบบจำลองระบบ เป็นต้น สำหรับการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะเป็นการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสม สำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะ เช่น การใช้งานบนวัตถุที่เป็น โลหะ แก้ว พลาสติก ไม้ อย่างใดอย่างหนึ่ง จึงทำให้การนำไปใช้งาน ขาดความยืดหยุ่น และมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นในการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละลักษณะ โดยเฉพาะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจในการศึกษาการออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการนำเอาแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานบนวัตถุที่มีพื้นผิวรูปแบบโค้ง โดยพิจารณาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศ ทั้งอัตราขยาย ผลตอบสนองทางความถี่ และ

โดยเฉพาะอิมพีแดนซ์ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพขณะนำไปใช้งานได้ (Foster, P.R., Burberry, R.A., 1999)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวรูปโค้งแบบต่างๆ
- 1.2.2 ออกแบบสร้างและทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิววัตถุแบบโค้งต่างๆ
- 1.2.3 ได้สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิววัตถุแบบโค้งต่างๆที่ปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้อัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุแบบโค้งต่างๆ
- 1.3.2 ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF)
- 1.3.3 วิเคราะห์ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีต้นแบบบนพื้นผิวรูปแบบโค้งต่างๆเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 แนวทางการดำเนินงาน
 - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 2) ศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุแบบโค้งต่างๆ
 - 3) ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF)
 - 4) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

 - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 2) วิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับลักษณะของพื้นผิววัตถุแบบโค้งต่างๆ
- 3) ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF)
- 4) วิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ออกแบบเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบเดิม

1.4.3 สถานที่ทำการวิจัย

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

1.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

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

1.4.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปและนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์ เพื่อใช้ประกอบการออกแบบสายอากาศ
- 3) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบสร้างและวัดทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และค่าตอบสนองทางความถี่ รวมทั้งอัตราขยาย และความกว้างลำคลื่น

1.4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับค่าอิมพีแดนซ์ และค่าตอบสนองทางความถี่ ของสายอากาศบนพื้นผิวโค้งค่าต่าง ๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแบบ รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ตีพิมพ์ไปแล้ว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากพื้นผิวโค้งที่มีต่อคุณสมบัติของสายอากาศ และออกแบบเทคนิคการลดผลกระทบดังกล่าวด้วยการออกแบบให้สายอากาศสามารถปรับแต่งค่าตัวเองได้เพื่อช่วยลดผลกระทบจากการคดโค้ง

1.5.2 ได้เทคนิคการออกแบบสายอากาศ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศเพื่อลดผลกระทบของการตัดโค้ง

1.6 ปรัชญ์วรรณกรรม

ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้ศึกษาผลงานวิจัย ที่ผ่านมาโดยอาศัยฐานข้อมูลต่าง ๆ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยัง ได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยระบบอาร์เอฟไอดีที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศระบบอาร์เอฟไอดี สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือสายอากาศของเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี และสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับงานวิจัยสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี มีค่อนข้างหลากหลาย จึงขอยกตัวอย่าง รวมถึงบทสรุปของงานวิจัยในแต่ละหัวข้อของกลุ่มต่าง ๆ ที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่จะทำการศึกษา ได้แก่

1. กลุ่มที่ศึกษาเทคนิคการออกแบบสายอากาศ

ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง	หัวข้อการวิจัย
2004	Keskilammi, M.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษเป็นส่วนประกอบของสายอากาศ
2007	Dong-Uk Sim, et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีโดยใช้ EBG สำหรับการใช้งานบนวัสดุที่เป็นโลหะ
2007	Syed, A., et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เปรียบเทียบกันระหว่างสายอากาศที่มีความกว้างและความหนาแบบต่างๆ
2009	Guo-Min Yang, et al.,	เป็นการศึกษาคุณสมบัติสายอากาศอาร์เอฟไอดี อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นฟิล์มที่เป็นโลหะแม่เหล็ก

2. กลุ่มที่ศึกษาการใช้งานสายอากาศสำหรับสิ่งแวดล้อมหรือวัสดุชนิดต่าง ๆ

ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง	หัวข้อการวิจัย
2005	Kamarudin, M.R., et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศที่ติดตั้งบนจุดต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์
2010	Deleruyelle, T., et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เปรียบเทียบความเหมาะสมในการใช้งานระหว่างสายอากาศสองแบบโดยการเปลี่ยนค่า Permittivity และความหนา สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

3. กลุ่มที่ศึกษาการบิดงอและการโค้งสายอากาศ

ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง	หัวข้อการวิจัย
2001	(Siden, J., et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศที่เกิดจากการบิดงอของสายอากาศที่ระยะห่างและมุมการหักงอค่าต่าง ๆ
2004	Xiang Zhou, Gang Wang,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโค้งงอของสายอากาศ
2004	Tikhov, Y., Won, J.H.,	เป็นการเปรียบเทียบการใช้ช่อง(Slit) แบบวงกลมทดแทนแบบสี่เหลี่ยมซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อมีการคดโค้ง
2007	Leung, S.Y.Y., Lam, D.C.C.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของขดลวดเหนียวหนาเมื่อมีการคดโค้งซึ่งพบว่าค่าอินดักแตนซ์จะเพิ่มเมื่อมีการโค้ง
2007	Salonen, Pekka, et al.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับการใช้งานบนแผ่นผ้าที่มีความโค้งต่างกัน
2010	Kellomaki, T., Whittow, W.G.,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศแพตช์สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ที่มีการโค้งงอบนร่างกายมนุษย์ โดยมีการเจาะช่องว่างที่ชั้นกราวด์เพื่อให้สามารถโค้งงอได้
2010	Bai, Qiang, Langley, Richard,	เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับใช้งานบนแผ่นผ้าที่มีความโค้งต่างกัน และมีการยับเป็นลอนคลื่น

จากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นได้ว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่มากมาย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการพิจารณาการออกแบบสายอากาศให้ลดผลกระทบจากการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ เป็นการเฉพา หรือเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นสำหรับสภาวะหรือเงื่อนไขต่าง ๆ ยังไม่ได้มีการออกแบบ

สายอากาศ เพื่อให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศได้เอง จากการใช้งานบนพื้นผิววัสดุ ลักษณะต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม ยังมีกลุ่มงานวิจัยด้านอื่นๆของระบบอาร์เอฟไอดี ได้แก่ การออกแบบแบบจำลองระบบ ระบบการปกป้องข้อมูล การศึกษาการเข้ารหัสข้อมูล การออกแบบวงจรรวม การใช้งานบนร่างกายมนุษย์ การศึกษาด้านวัสดุศาสตร์ การนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการด้านต่างๆ ซึ่งเป็นการใช้ความรู้ด้านต่างๆ นำมาปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะขอไม่กล่าวถึงในรายละเอียด



บทที่ 2

ระบบอาร์เอฟไอดีเบื้องต้น

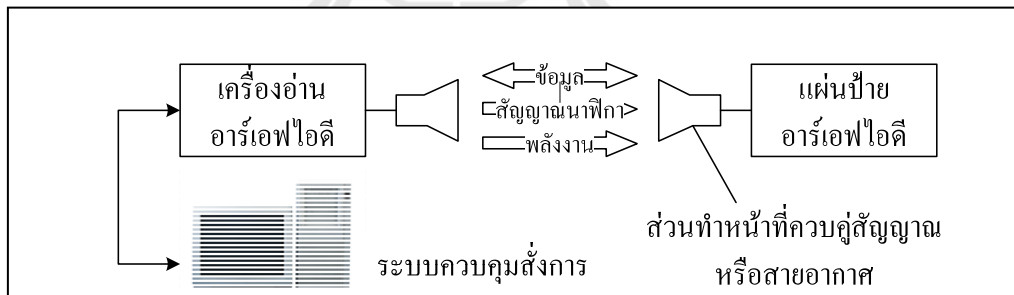
2.1 บทนำ

จากการที่ระบบอาร์เอฟไอดีมีการใช้งานที่กว้างขวาง รวมทั้งมีลักษณะปลีกย่อยอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบถึงการทำงาน ส่วนประกอบ และคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบอาร์เอฟไอดีเบื้องต้นก่อน ในบทนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดส่วนประกอบ และคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบอาร์เอฟไอดีเบื้องต้น

2.2 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

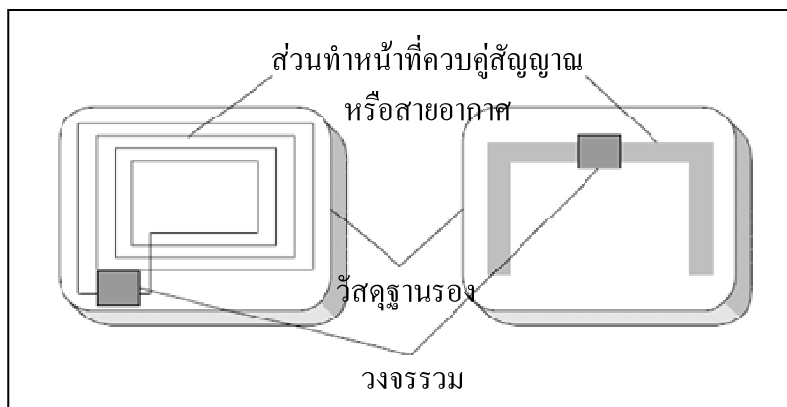
ระบบอาร์เอฟไอดี โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน (รูปที่ 2.1) (Finkenzeller K., 2003)

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



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบระบบอาร์เอฟไอดี

สำหรับเครื่องอ่านข้อมูล จะประกอบด้วย หน่วยควบคุม โมดูลการสื่อสาร และส่วนทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณแบบไร้สายไปที่แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ซึ่งอาจจะเป็นขดลวดหรือสายอากาศ นอกจากนี้ เครื่องอ่านข้อมูลโดยทั่วไป อาจจะมีส่วนเชื่อมต่อภายนอก เพื่อให้สามารถส่งต่อข้อมูลที่ได้รับไปยังระบบควบคุมส่วนอื่น ๆ ต่อไปได้ ทรานสปอนเดอร์ หรือ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยส่วนขดลวดหรือสายอากาศทำหน้าที่รับส่งสัญญาณ และส่งวงจรรวม (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

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

2.3 คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบ อาร์เอฟไอดี ในปัจจุบันมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากถูกผลิตจากผู้ผลิตที่หลากหลาย หากเราจะอธิบายถึงภาพรวมของระบบ อาร์เอฟไอดี เราจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำแนกความแตกต่างของระบบอาร์เอฟไอดี ดังต่อไปนี้

2.3.1 ชนิดการส่งข้อมูล

ระบบ อาร์เอฟไอดี ทำงานได้ในลักษณะพื้นฐานสองแบบคือ แบบขนานแบ่งออกเป็น Full Duplex (FDX) และ Half Duplex (HDX) และระบบแบบอนุกรม (Sequential - SEQ) โดยระบบที่เป็นแบบขนาน FDX/HDX จะมีผลตอบสนองของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีส่งออกมา เมื่อสัญญาณจากเครื่องอ่านเดินทางมาถึง เนื่องจากสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ส่งไปยังสายอากาศที่เครื่องอ่าน จะมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่าน วิธีการรับส่งที่ใช้ จะต้องสามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จากสัญญาณของเครื่องอ่านได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้ว การถ่ายโอนข้อมูลจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปยังเครื่องอ่าน จะอาศัยเทคนิคการปรับโหลด (Load modulation) โดยอาศัยคลื่นพาห่อย่อยที่เป็นฮาร์โมนิกเดียวกับความถี่ของคลื่นที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่าน

ในทางตรงกันข้ามระบบแบบอนุกรมจะอาศัยสัญญาณในช่วงที่เครื่องอ่านหยุดส่งสัญญาณในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะใช้สำหรับส่งข้อมูลกลับไปให้เครื่องอ่าน ข้อดีของการทำงานระบบแบบอนุกรม คือ การขาดหายของพลังงานในช่วงที่เครื่องอ่านหยุดส่งสัญญาณ ซึ่งต้องมีการจัดเก็บพลังงานโดยอาศัยตัวเก็บประจุ หรือ แบตเตอรี่

2.3.2 ความจุข้อมูล

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

2.3.3 ความสามารถในการเขียนข้อมูล

ความสามารถในการเขียนข้อมูลไปยังแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้เราสามารถจำแนกชนิดของระบบ อาร์เอฟไอดี ในระบบแบบง่าย ๆ ข้อมูลที่บันทึกในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะเป็นหมายเลขอ้างอิงสินค้า ซึ่งจะถูกรับบันทึกมาจากโรงงาน เมื่อมีการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่สามารถเขียนได้ เครื่องอ่านจะสามารถเขียนข้อมูลลงในแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีได้ โดยมีวิธีที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสามแบบหลัก ๆ คือ

- เมมโมรี่แบบ EEPROMs (electrically erasable programmable read-only memory) จะใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีแบบการเหนี่ยวนำควบคู่ (Inductive coupling) อย่างไรก็ตามจะมีข้อเสียคือ มีการใช้พลังงานที่สูงในระหว่างดำเนินการเขียน และจำนวนครั้งในการเขียนที่จำกัด (โดยปกติสามารถเขียนซ้ำได้ประมาณ 100,000-1,000,000 ครั้ง)

- เมมโมรี่แบบ FRAMs (ferromagnetic random access memory) มีการใช้งานที่เฉพาะ โดยใช้พลังงานในการอ่านต่ำกว่า EEPROMs ประมาณ 100 ถึง 1000 เท่า แต่เนื่องจากปัญหาในการผลิต จึงทำให้การใช้งานยังไม่แพร่หลายมากนัก

- เมมโมรี่แบบ SRAMs (static random access memory) ถือเป็นหน่วยจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ใช้กันในระบบย่านความถี่ไมโครเวฟ และมีความเสถียรเร็วมากในการเขียน แต่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าสำรองจากแบตเตอรี่ช่วยในการจัดเก็บข้อมูล

ในระบบที่สามารถตั้งโปรแกรมได้ วิธีการเขียนและอ่านหน่วยความจำและคำสั่งใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกาเขียนและอ่าน จะถูกควบคุมโดยชุดตรรกะภายในที่ให้บริการข้อมูล ในเบื้องต้น ฟังก์ชันเหล่านี้จะถูกตรวจสอบโดยชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะ (State machine) ถ้าการทำงานของงานที่ซับซ้อนมาก สามารถใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะในการตรวจสอบได้ แต่ผลเสียของชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะ คือ ไม่มีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันในโปรแกรม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงในระดับวงจรของชิพซิลิคอน ในทางปฏิบัติ หมายถึงต้องมีการออกแบบวงจรรภายในไอซีใหม่ทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้แล้ว ยังมีแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่เก็บข้อมูลโดยอาศัยผลกระทบทางกายภาพ ได้แก่ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบอ่านอย่างเดียวโดยอาศัยคลื่นผิว (Surface wave) และ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบหนึ่งบิต ที่สามารถยกเลิกการใช้งาน แต่จะไม่สามารถกลับมาเปิดใช้งานอีกได้

2.3.4 แหล่งจ่ายพลังงาน

หนึ่งในคุณสมบัติสำคัญของระบบ อาร์เอฟไอดี คือ แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟ จะไม่มีแหล่งจ่ายพลังงานของตนเอง ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะได้อมาจากสนามไฟฟ้าและหรือสนามแม่เหล็กจากเครื่องอ่าน แตกต่างจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอคทีฟ ซึ่งมีแบตเตอรี่ภายในสำหรับจ่ายพลังงานทั้งหมด หรือ บางส่วนของพลังงานสำหรับการทำงานของไอซีภายใน

2.3.5 ความถี่ปฏิบัติการ

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของระบบ อาร์เอฟไอดี คือ ความถี่ปฏิบัติการ และช่วงความถี่ใช้งานของระบบ ความถี่ปฏิบัติการของระบบ อาร์เอฟไอดี เป็นความถี่ที่เครื่องอ่านส่งสัญญาณออกมา และความถี่ในการส่งสัญญาณของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีส่วนใหญ่ จะเป็นความถี่เดียวกับการส่งของเครื่องอ่าน แต่กำลังส่งของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะมีค่าน้อยกว่ากำลังส่งของเครื่องอ่านกว่าสิบเท่า โดยจะสามารถแบ่งเป็นย่านความถี่หลัก ๆ ได้เป็น (Finkenzeller K., 2003) ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency - LF) 30 - 300 kHz ย่านความถี่สูง (High Frequency - HF) 3 - 30MHz ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency - UHF) 300MHz - 3 GHz ย่านความถี่ไมโครเวฟ ตั้งแต่ 3 GHz ขึ้นไป

2.3.6 ระยะในการใช้งาน

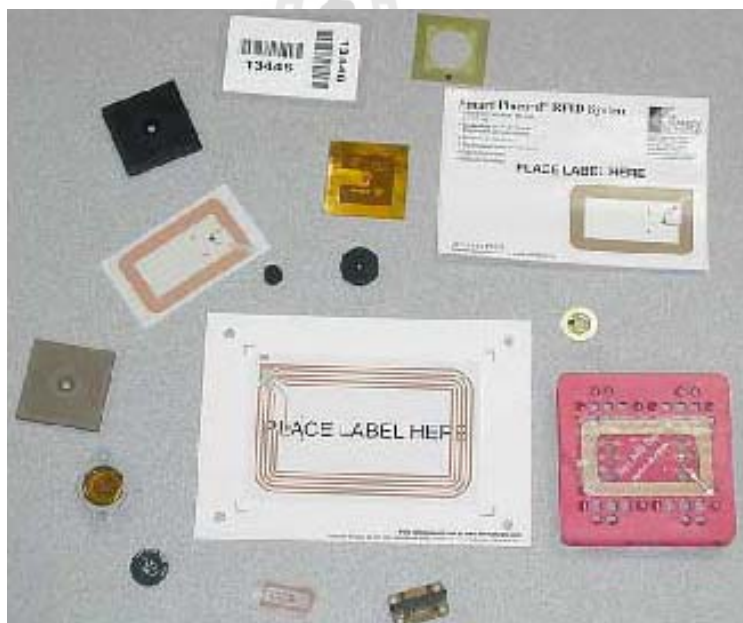
เราสามารถแบ่งชนิดระบบอาร์เอฟไอดีโดยอาศัยระยะในการใช้งาน ได้แก่ ช่วงการควบคุมคู่สนามใกล้ (Close-coupling) ระยะ 0-1 เซนติเมตร ช่วงการควบคุมระยะกลาง (remote-coupling) 0-1 เมตร และช่วงการควบคุมระยะไกล (long-range) ระยะมากกว่า 1 เมตรขึ้นไป

2.3.7 กระบวนการส่งข้อมูลกลับ

ความแตกต่างในกระบวนการส่งข้อมูลจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกลับไปยังเครื่องอ่านสามารถแบ่งกลุ่มได้เป็น การใช้สะท้อนหรือการกระจายกลับ (Backscatter) (ความถี่ของคลื่นสะท้อนตรงกับความถี่ในการส่งของเครื่องอ่าน อัตราส่วนความถี่ 1:1) การปรับโหลด (load modulation) (สัญญาณของเครื่องอ่านจะได้รับอิทธิพลจากคลื่นที่ส่งจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี อัตราส่วนความถี่ 1:1) และการใช้ความถี่ฮาร์โมนิกย่อย และรุ่นของคลื่นฮาร์โมนิก

2.4 รูปแบบโครงสร้างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

จากการใช้งานที่กว้างขวางในหลายรูปแบบ ทำให้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีได้มีการออกแบบให้เหมาะสมกับประเภทและลักษณะของการใช้งานในแต่ละสถานการณ์ จึงทำให้มีรูปแบบโครงสร้างที่หลากหลาย แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยสามารถสรุปแบ่งเป็นโครงสร้างแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 รูปแบบที่หลากหลายของ RFID

2.4.1 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบดิสก์และเหรียญ

รูปแบบโครงสร้างที่พบบ่อยที่สุด คือ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบดิสก์หรือเหรียญ ที่หุ้มด้วยพลาสติกที่ทำจาก ABS โดยอาศัยการฉีดลงในแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรถึงกว่า 10 เซนติเมตร

2.4.2 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยแก้ว

แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยแก้ว ถูกพัฒนาให้สามารถฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อการสำรวจประชากร โดยหลอดแก้วจะมีขนาดเพียง 12 – 32 มิลลิเมตร โดยจะมีไอซี ติดกับชุดอุปกรณ์ บนแผ่นวงจรรวม และตัวเก็บประจุแบบชิพ เพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานได้สม่ำเสมอ

2.4.3 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยพลาสติก

สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยพลาสติก ได้รับการพัฒนาสำหรับการใช้งาน โดยเฉพาะที่ความต้องการการเคลื่อนไหวทางกลค่อนข้างสูง โดยแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบนี้สามารถประกอบรวมกับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ อาทิ ร่วมกับกุญแจรถที่มีระบบป้องกันการโจรกรรมอิเล็กทรอนิกส์

2.4.4 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับติดตั้งบนเครื่องมือและขวดก๊าซ

รูปแบบโครงสร้างชนิดพิเศษ ได้รับการพัฒนาเพื่อติดตั้งแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโลหะ โดยขนาดของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะฝังในร่องของแกนเฟอร์ไรท์ ไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะถูกลงในทิศทางตรงกันข้ามกับร่องของแกนเฟอร์ไรท์ และทำการเชื่อมต่อไปหาขนาดของ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และเพื่อให้ได้ความทนทานต่อการสั่นสะเทือนและความร้อน

2.4.5 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในรูปแบบกุญแจและพวงกุญแจ

แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะถูกรวมกับกุญแจสำหรับการป้องกันการโจรกรรม หรือใช้ในการเปิดปิดประตู สำหรับการใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยสูง ซึ่งโดยปกติ จะเป็นแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หุ้มด้วยพลาสติก และจะถูกขึ้นรูปเป็นด้ามของกุญแจ ซึ่งแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่เป็นพวงกุญแจ ได้พิสูจน์แล้วว่า เป็นที่นิยมสำหรับระบบการควบคุมการเข้าออกสำนักงานและพื้นที่ทำงาน

2.4.6 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในรูปแบบนาฬิกา

รูปแบบการใช้งานนี้ ได้รับการพัฒนาในช่วงต้น ค.ศ. 1990s โดยบริษัทสกี ในประเทศออสเตรีย และมีการใช้ครั้งแรกในการผ่านเข้าใช้งานลานสกี โดยนาฬิกาเหล่านี้ ยังสามารถใช้งานในระบบควบคุมการเข้าใช้ที่พื้นล่าง สำหรับนาฬิกา จะมีกรอบเป็นสายอากาศที่มีจำนวนของขดลวด ถูกพิมพ์เป็นวงจรพิมพ์ชนิดบางจำนวนมาก และติดตั้งเข้ากับ โครงสร้างเรือนของนาฬิกา เพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับสายอากาศและเพิ่มระยะเวลาการใช้งาน

2.4.7 รูปแบบสมาร์ตการ์ดแบบ ID-1

มาตรฐาน ID-1 เป็นรูปแบบที่ใช้งานกันค่อนข้างแพร่หลาย เช่น บัตรเครดิตและบัตรโทรศัพท์ ประโยชน์ที่สำคัญของรูปแบบนี้ คือ มีพื้นที่ขนาดใหญ่สำหรับขดลวด ที่ช่วยเพิ่มระยะห่างในการใช้งานของสมาร์ตการ์ด

2.4.8 ฉลากอัจฉริยะ (Smart Label)

ฉลากอัจฉริยะ ในที่นี้จะหมายถึง แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่อยู่ในรูปกระดาษแบบบาง โดยแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีรูปแบบนี้ จะมีขนาดซึ่งจะอยู่บนแผ่นพลาสติกหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยอาศัยกระบวนการพิมพ์หรือการเซาะร่อง โดยแผ่นของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีนี้ มักจะมีชั้นของกระดาษอยู่ด้านหนึ่ง และมีกาวเคลือบอีกด้านหนึ่ง แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะถูกนำไปใช้ในรูปแบบของสติ๊กเกอร์ที่มีกาวในตัวในลักษณะเป็นม้วน ซึ่งจะบางและยืดหยุ่นเพียงพอที่จะติดกระเป๋า ก่องบรรจุภัณฑ์ และสินค้าประเภทต่าง ๆ เนื่องจากฉลากแบบนี้สามารถที่จะพิมพ์ทับได้ จึงสามารถเชื่อมข้อมูลที่เก็บไว้ร่วมกับระบบรหัสแท่งที่พิมพ์เพิ่มเติมไว้บนฉลากได้

2.4.9 ไอซีแบบมีขดลวดในตัว

ในรูปแบบโครงสร้างที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะประกอบแยกต่างหากในส่วนของขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศและไอซีหรือชิพของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จากความต้องการสร้างผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดเล็กลงจึงมีการฝังขดลวดลงบนชิพ โดยอาศัยกระบวนการผลิตแบบ Micro-galvanic ซึ่งทำให้เกิดขดลวดบนชิพ และในขั้นตอนสุดท้ายยังมีการเคลือบสารสังเคราะห์เพื่อให้แน่ใจว่า ในการนำไปใช้งานมีความถูกต้อง โดยขนาดของชิพและแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีทั้งหมด มีขนาดเพียง 3 มิลลิเมตร ทำให้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจำเป็นต้องฝังลงบนพลาสติก เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

2.4.10 รูปแบบอื่น ๆ

นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีการออกแบบหลายแบบที่ออกแบบเป็นพิเศษเฉพาะการใช้งานบางอย่าง ตัวอย่าง เช่น แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับนกพิราบแข่ง หรือชิพที่ใช้สำหรับจับเวลาในการแข่งขันกีฬา เป็นต้น

2.5 ความถี่ ระยะเวลาใช้งาน และการควบคุม

ความแตกต่างที่สำคัญของระบบ อาร์เอฟไอดี คือ ความถี่ปฏิบัติการของเครื่องอ่าน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อวิธีการติดต่อสื่อสาร และระยะเวลาใช้งานของระบบ โดยระบบอาร์เอฟไอดีจะสามารถดำเนินการได้ที่หลายความถี่ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ช่วงความถี่ 135 kHz จนถึงที่ 5.8 GHz โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะถูกใช้ในการส่งผ่านสัญญาณและกำลังงาน ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาใช้งานมีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรจนถึงกว่า 15 เมตร

ระบบอาร์เอฟไอดีที่มีช่วงการใช้งานที่สั้นมากไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะถูกเรียกว่า ระบบควบคุมสนามใกล้ (Close-coupling systems) ซึ่งในการใช้งานแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะต้องถูกใส่เข้าไปในเครื่องอ่าน หรือวางบนพื้นผิวของเครื่องอ่านเพื่อให้ใช้งานได้ ในระบบควบคุมสนามใกล้

ระบบจะใช้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตั้งแต่ย่านความถี่ ระหว่างสัญญาณกระแสตรงจนถึงความถี่ 30MHz เนื่องจากในการทำงาน ไม่ได้อยู่ในช่วงที่มีการแผ่กระจายคลื่น ทำให้การใช้งานส่วนใหญ่ จะเป็นแบบที่มีไอซีอยู่ภายใน จึงใช้พลังงานค่อนข้างสูง โดยจะพบมากในระบบที่ต้องการความปลอดภัยสูง โดยที่ระยะการใช้งานมีค่อนข้างจำกัด ตัวอย่าง เช่น ระบบประตูอิเล็กทรอนิกส์แบบไร้สัมผัส ระบบสมาร์ทการ์ดที่ใช้ในการชำระเงิน สำหรับระบบควบคุมสนามใกล้ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีโดยมากจะเป็นรูปแบบ ID-1 ซึ่งจะเป็นสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส (มาตรฐาน ISO10536) แต่อย่างไรก็ตามบทบาทของสมาร์ทการ์ดระบบควบคุมสนามใกล้ เริ่มมีความสำคัญลดลง

ระบบที่สามารถเขียนและอ่านได้ในระยะถึง 1 เมตร จะอาศัยการการเหนี่ยวนำควบคุมระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ระบบนี้จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ ระบบการเหนี่ยวนำด้วยคลื่นวิทยุ นอกจากนี้ยังถูกเรียกว่า ระบบควบคุมด้วยประจุไฟฟ้า

ระบบอาร์เอฟไอดีที่สามารถใช้งานที่ระยะมากกว่า 1 เมตรขึ้นไป จะเรียกว่า ระบบควบคุมระยะไกล (Long-range systems) ระบบทั้งหมดจะดำเนินการโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ สูงยิ่ง และช่วงไมโครเวฟ โดยส่วนใหญ่ระบบดังกล่าวจะเรียกว่า ระบบการกระจายสะท้อนกลับ (back-scatter system) เนื่องจากลักษณะพื้นฐานการทำงานของระบบ นอกจากนี้ยังเรียกว่า ระบบควบคุมระยะไกล โดยอาศัยแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบคลื่นนิ่งบนผิว (Surface Acoustic Wave transponders - SAW) ที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟ

สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบการกระจายสะท้อนกลับ ขณะที่ใช้งานที่ระยะ 15 เมตรขึ้นไปจำเป็นต้องมีการใช้แบตเตอรี่สนับสนุน อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้ว แบตเตอรี่ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไม่ได้ให้พลังงานสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับเครื่องอ่าน แต่ทำหน้าที่เฉพาะการให้พลังงานกับ ไอซี และข้อมูลที่เก็บไว้ พลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากเครื่องอ่าน จะถูกใช้เฉพาะสำหรับส่งข้อมูลระหว่างแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีและเครื่องอ่าน

2.6 สรุป

สำหรับบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงส่วนประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องของระบบอาร์เอฟไอดี ได้แก่ ชุดอ่านข้อมูล และ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้แยกความแตกต่างของระบบอาร์เอฟไอดีตั้งแต่ ชนิดการส่งข้อมูล ความจุข้อมูล รูปแบบการเขียนข้อมูล ชนิดของแหล่งจ่ายพลังงาน รวมทั้งย่านความถี่ที่ใช้ เพื่อให้เข้าใจถึงที่มาของการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ และลักษณะที่แตกต่างกันของระบบอาร์เอฟไอดีแต่ละชนิด นอกจากนี้แล้วยังยกตัวอย่างชนิดของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบต่าง ๆ ที่มีการพัฒนาและใช้งานในปัจจุบัน ที่เป็นแบบบัตรอิเล็กทรอนิกส์ หรือสมาร์ทการ์ด หรืออยู่ในรูปพวงกุญแจ เป็นต้น จากนั้นได้อธิบายถึงการจัดแบ่ง

ลักษณะระบบอาร์เอฟไอดีด้วยความถี่ปฏิบัติการของเครื่องอ่าน ซึ่งจะส่งผลต่อวิธีการติดต่อสื่อสาร และระยะเวลาใช้งานของระบบในแต่ละย่านความถี่ โดยสิ่งต่าง ๆ ที่ได้อธิบายไว้จะเป็นประโยชน์ ในการทำความเข้าใจการจัดแบ่งชนิดของระบบอาร์เอฟไอดีแบบต่าง ๆ ได้มากขึ้น



บทที่ 3

สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

3.1 บทนำ

ในบทนี้เราจะอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งการศึกษาผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์ที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของสายอากาศ และผลกระทบจากวัสดุแวดล้อม เพื่อให้เข้าใจถึงเหตุผลในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

3.2 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

ส่วนประกอบหลักอย่างหนึ่งที่สำคัญสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ใช้งานในย่านความถี่สูงคือ ส่วนที่เป็นสายอากาศ โดยทั่วไปแล้วสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะถูกออกแบบให้ทำงานโดยใช้หลักการเดียวกับสายอากาศสำหรับเครื่องอ่าน แต่อย่างไรก็ตามทางปฏิบัตินั้นจะพบว่ามีความแตกต่างกันระหว่างสายอากาศที่ใช้งานสำหรับเครื่องอ่าน และสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เนื่องจากต้องพบกับข้อจำกัดด้านต่างๆ ได้แก่

1. ค่าใช้จ่าย : เนื่องจากราคาโดยรวมในการผลิตแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีทั้งหมด ทั้ง ไอซี วัสดุรองพื้น สายอากาศ กาว แม่พิมพ์ วัสดุห่อหุ้ม และการทดสอบ รวมแล้วต้องมีต้นทุนค่าใช้จ่ายต่อชิ้นน้อยกว่า 30 บาท (ประมาณ 1 เหรียญสหรัฐ) และสำหรับกรณีที่มีการผลิตเพื่อการใช้งานในปริมาณมาก จะต้องสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของต้นทุนการผลิตแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีทั้งหมดให้ต่ำกว่า 1 บาท 50 สตางค์ (ประมาณ 0.05 เหรียญสหรัฐ) แต่ในทางตรงกันข้าม สำหรับเครื่องอ่านจะสามารถใช้สายอากาศคุณภาพปานกลางที่มีราคาอยู่ที่ 4500 บาท(ประมาณ 150 เหรียญสหรัฐ) ได้ โดยไม่มีข้อจำกัดเรื่องของต้นทุนมากนัก

2. ขนาด : สำหรับการใช้งานแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในระบบห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain) แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะต้องมีขนาดพอดีกับป้ายสินค้าที่มีขนาด 4 นิ้ว (10 เซนติเมตร) แต่เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ค่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจะมีค่าประมาณ 16 เซนติเมตร ทำให้สายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีต้องมีการลดขนาดลง ให้สามารถใช้งานบนป้ายสินค้ามีขนาดที่เล็กเพียง 10 เซนติเมตรได้ นอกจากนี้แล้ว สำหรับการใช้งานจริงส่วนใหญ่

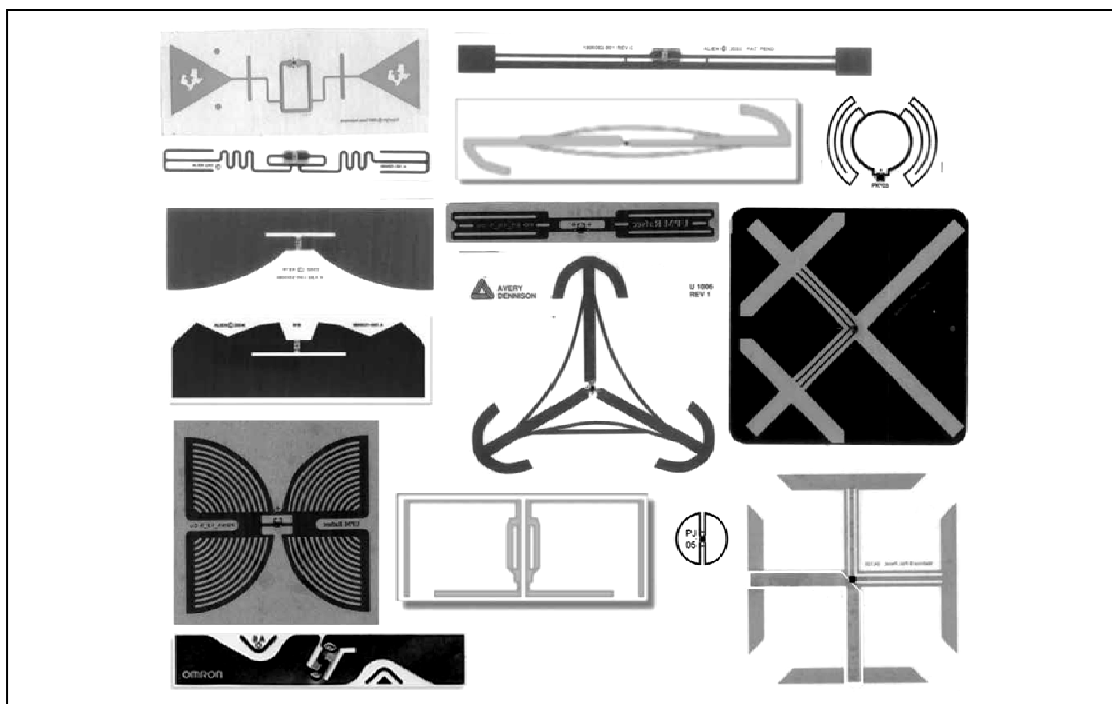
จะต้องมีความหนาโดยรวมน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จึงทำให้การออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ต้องมีการจำกัดรูปแบบ โครงสร้างที่จะนำมาใช้งานได้

3. โพลาริเซชัน : ในการนำเอาแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานจริง สิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหา คือ จะไม่สามารถควบคุมแนวการจัดวางสินค้า หรือวัตถุที่จะนำแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้ร่วมด้วยได้ จึงต้องทำการพิจารณาเลือกระหว่างการใช้สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านเป็นโพลาริซ์แบบวงกลม เพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณจากแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีได้ทุกแนวของการจัดวาง แต่ก็ต้องแลกกับระยะห่างในการใช้งานที่ลดลง หรือการใช้สายอากาศเครื่องอ่านที่มีโพลาริซ์แบบเชิงเส้น โดยอาจมีโอกาที่การจัดวางแนวสายอากาศเครื่องอ่าน ไม่ตรงกับของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งสามารถเพิ่มขนาด โครงสร้างสายอากาศเครื่องรับให้มีอัตราขยายที่ดีขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นด้วย

4. การแมตซ์กับไอซี : จากการที่ไอซีหรือวงจรรวมที่ใช้สำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะมีการกินกระแสที่น้อย แต่จำเป็นต้องมีแรงดันไฟเข้าที่เหมาะสม ดังนั้นความต้านทานอินพุทของไอซีควรจะมีค่าที่สูง ส่งผลให้สายอากาศและ โครงสร้างการแมตซ์ ต้องทำให้แรงดันจากสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบที่สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีมีค่าสูงที่สุด แม้จะมีข้อจำกัดจากขนาดที่เล็กของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี แต่การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีให้ตรงกับความต้านทานอินพุทของไอซีที่เหมาะสม จะทำให้มีการถ่ายโอนกำลังงานที่ดีที่สุด

5. การใช้งานร่วมกับวัสดุอื่น ๆ : สำหรับสายอากาศเครื่องรับ เราสามารถจัดวางให้สายอากาศอยู่ในกล่องราโคมพลาสติกที่มีความแม่นยำของทิศทาง และปราศจากการรบกวน เพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ดีได้ แต่ในทางตรงกันข้าม สายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะไม่สามารถป้องกันผลจากการนำไปใช้งานบนวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยไม่มีผลกระทบจากคุณสมบัติสื่อไฟฟ้า หรือเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าของวัตถุที่นำไปใช้งานร่วมเหล่านั้นได้เลย ดังนั้นในการเลือกใช้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานโดยเฉพาะ จะช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้งานดีที่สุด แต่ก็จะทำให้ต้องมีแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่หลากหลายสำหรับวัสดุแต่ละชนิด รวมทั้งราคาแพงกว่าด้วย

จากข้อจำกัดต่างๆ ในการออกแบบแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีการพัฒนารูปแบบสายอากาศที่มีความหลากหลาย และแตกต่างจากสายอากาศทั่วไปออกมามากมาย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (Dobkin, D. M., 2008)



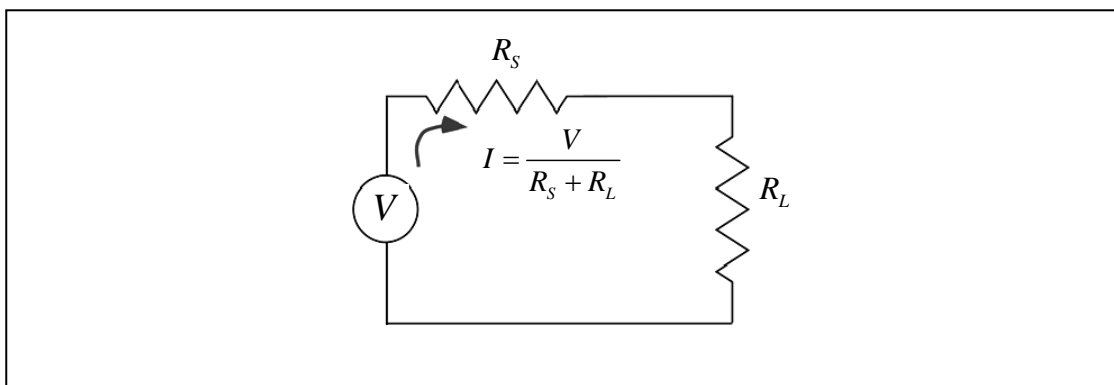
รูปที่ 3.1 สายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟที่ใช้งานเชิงพาณิชย์

3.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์และการถ่ายโอนกำลังงาน

การออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ดี จะต้องสามารถส่งมอบกำลังงานที่จะทำให้ไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเริ่มทำงานได้ ถ้ากำลังงานที่ได้ไม่เพียงพอ ก็จะไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าอื่น ๆ ต่อไป โดยเราสามารถตรวจสอบได้ว่า กำลังงานที่ได้รับได้มีค่าเท่าใด สำหรับสายอากาศที่ทราบอัตราขยายโดยใช้สมการของฟรีสส์ (Friis Equation) โดยที่ อัตราขยาย (G) และกำลังส่งของสายอากาศ (P) มีหน่วยวัดเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางมีหน่วย dBi สำหรับกำลังงานที่ได้รับจากสายอากาศส่ง (P_{TX}) โดยสายอากาศรับ (P_{RX}) หากเราทราบอัตราขยายสายอากาศทั้งคู่ และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง (r) เราสามารถเขียนสมการทั่วไปได้ ดังแสดงในสมการที่ 3.1 (Balanis, C., 2005)

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} \frac{A_{e,RX}}{4\pi r^2} = P_{TX} G_{TX} \frac{\lambda/4\pi}{4\pi r^2} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (3.1)$$

โดยที่กำลังงานที่แท้จริงที่ส่งผ่านจากสายอากาศไปยังไอซี อาจจะมีการสูญเสียไประหว่างทางได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ เกี่ยวกับวิธีการที่กำลังงานไฟฟ้า จะถูกส่งผ่านไปยังโหลดหรือไอซี (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายแรงดันกับความต้านทานแหล่งจ่าย R_S และ ความต้านทานโหลด R_L

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหรือกระแส จะมีข้อจำกัดบางอย่างที่เชื่อมโยงกับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสที่สามารถจ่ายได้ ในกรณีของสายอากาศ จะใช้รูปแบบของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายเป็นแบบเชิงเส้น เมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมีเฉพาะค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียว ก็ค่อนข้างง่ายที่จะแสดงให้เห็นว่ากำลังงานสูงสุดจะถ่ายโอนให้กับความต้านทาน โหลดที่มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยค่ากระแสที่ไหลสำหรับวงจรในรูปที่ 3.2 สามารถหาได้มาจากกฎของโอห์ม :

$$I = \frac{V}{R_S + R_L} \quad (3.2)$$

กำลังงานที่กระจายไปในตัวความต้านทานแบบรีซิสแตนซ์ (P_S, P_L) แต่ละตัวหาได้จาก:

$$P_S = \frac{V_S^2}{2R_S}; P_L = \frac{V_L^2}{2R_L} \quad (3.3)$$

แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในตัวรีซิสแตนซ์แต่ละตัวมีค่าเป็น IR จากกฎของโอห์ม โดยที่กระแสก็จะเหมือนกันทั้งที่แหล่งจ่ายและ โหลด เราสามารถแสดงได้เป็น

$$P_S = \frac{IV_S^2}{2}; P_L = \frac{IV_L^2}{2} \quad (3.4)$$

แทนค่ากระแสในสมการแสดงกำลังงาน เราจะพบว่า

$$P_L = \frac{R_L V^2}{2(R_S + R_L)^2} = \frac{1}{R_S} \frac{\left(\frac{R_L}{R_S}\right) V^2}{2\left[1 + \left(\frac{R_L}{R_S}\right)\right]^2} \quad (3.5)$$

โดยที่ กำลังงานที่ไหลสำหรับความต้านทานแหล่งจ่ายที่คงที่ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อความต้านทานแหล่งจ่ายและความต้านทานโหลดมีค่าเท่ากัน เมื่อเราเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแหล่งจ่าย ขณะที่ความต้านทานโหลดคงที่ การถ่ายโอนกำลังงานที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเสมอเมื่อความต้านทานแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเหมือนกัน

ในกรณีทั่วไปที่แหล่งจ่ายและโหลดจะมีค่ารีแอกแตนซ์ที่เป็นส่วนที่เป็นค่าเชิงซ้อน ที่เป็นค่าอินดักแตนซ์หรือค่าคาปาซิแตนซ์หรือทั้งคู่ ดังนั้นสมการกระแส สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ในรูปแบบเดียวกัน แต่เพิ่มส่วนที่เป็นค่าเชิงซ้อนเข้ามา

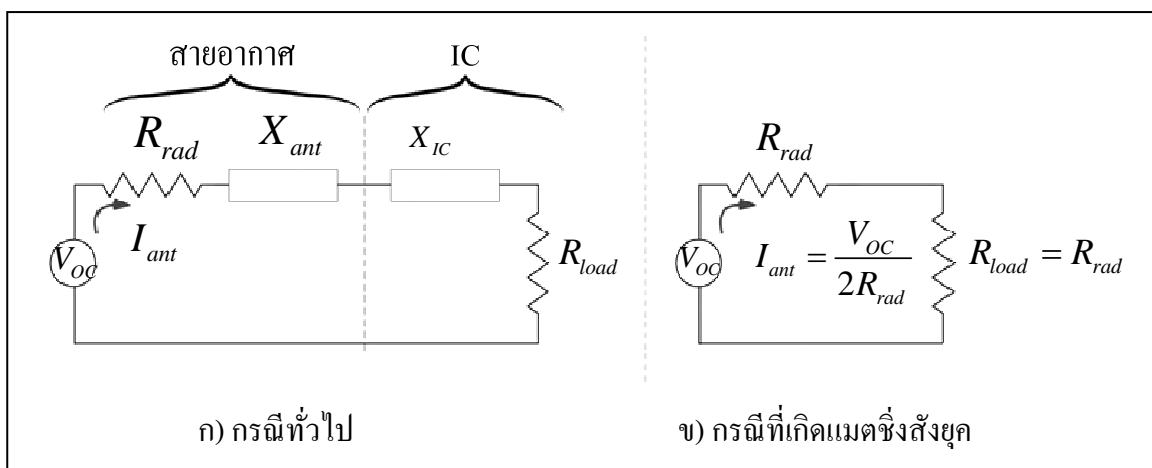
$$I = \frac{V}{(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)} \quad (3.6)$$

สำหรับค่ารีซิสแตนซ์ จะไม่สนใจว่ามุมหรือเฟสของกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร กำลังงานที่ได้จะมีผลเฉพาะต่อขนาดของกระแส

$$P_L = \frac{|I|^2 R_L}{2} = \frac{V^2 R_L}{2|(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)|^2} = \frac{V^2 R_L}{2|Z_S + Z_L|^2} \quad (3.7)$$

โดยที่สัญลักษณ์ | หมายถึง โมดูลัสของปริมาณเชิงซ้อน ซึ่งก็คือ ความยาวของเวกเตอร์ในระนาบเชิงซ้อน และถ้าเราให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเป็น $Z = R + jX$ ค่ากำลังงานสูงสุดจะได้รับเมื่อตัวส่วนมีค่าน้อย สำหรับค่าจริงของแหล่งจ่ายและโหลดที่คงที่ นั่นคือ ตัวส่วนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อส่วนจินตภาพมีค่าเป็น 0 กล่าวคือ เมื่อค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่าย X_S และโหลด X_L มีการหักล้างค่ากันหมด การหักล้างนี้ สามารถเกิดขึ้นได้โดยการให้ค่ารีแอกแตนซ์มีเครื่องหมายแตกต่างกัน สำหรับแหล่งจ่ายและโหลด นั่นคือ ถ้าโหลดเป็นค่าคาปาซิทิฟ (ค่ารีแอกแตนซ์เป็นลบ)

แหล่งจ่ายต้องเป็นค่าอินคัลทิฟ (ค่ารีแอกแตนซ์เป็นบวก) และมีขนาดเท่ากัน เมื่อส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเหมือนกัน และส่วนค่าเชิงซ้อนมีขนาดเท่ากัน แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม ค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองจะเป็นค่าสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugates) ที่แตกต่างกันเฉพาะเครื่องหมายของส่วนจินตภาพ ดังนั้นสถานะของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า การแมตซิงสังยุค (conjugate matching)



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับไอซี

เราสามารถพิจารณาสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีเป็นแหล่งแรงดันแบบวงจรเปิด (V_{OC}) เชื่อมต่อผ่านความต้านทานเชิงซ้อน ประกอบด้วยความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (R_{rad}) และค่าอินคัลแตนซ์ หรือค่าคาปาซิแตนซ์ เรียกรวมกันว่าค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ (X_{ant}) เราสามารถพิจารณาอิมพีแดนซ์ของไอซีในแบบเชิงเส้น โดยมีค่าความต้านทานแบบเชิงซ้อนเป็น (R_{load}) และ (X_{IC}) ดังรูปที่ 3.3 (ก)

การถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด จะเกิดขึ้นเมื่อค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายหรือสายอากาศ และค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดหรือไอซีมีค่าเป็นแมตซิงสังยุคและหักล้างกัน ซึ่งจะเป็นสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ปกติในการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศ ดังนั้นกำลังงานที่ได้รับ จะถูกส่งผ่านไปยังไอซี เมื่ออยู่ในเงื่อนไขที่มีการแมตซิงสังยุคเกิดขึ้น นั่นคือ กำลังงานที่กระจายไปที่โหลดจะมีค่าเท่ากับกำลังงานที่ได้รับจากค่าความต้านทานสายอากาศ แทนด้วย กำลังงานที่ใช้ได้ (P_{Av})

$$P_{Av} = \frac{I_{ant}^2 R_{load}}{2} = \frac{V_{oc}^2}{8R_{rad}} \quad (3.8)$$

เมื่อการแมตซิ่งที่สมบูรณ์แบบไม่มีอยู่จริง กำลังงานที่ส่งผ่านไปให้อิซิมี่มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณไว้โดยสมการของฟริสส์ เราสามารถใช้สมการ (3.7) ในการหาอัตราส่วนของกำลังงานที่ส่งผ่านไปให้กับอิซิมี่ต่อกำลังงานสูงสุดที่ได้รับตามสมการของฟริสส์ นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่าน (τ) จะหาได้จาก

$$\tau = \frac{P_L}{P_{Friis}} = \frac{V_{oc}^2 R_{load}}{2|Z_{ant} + Z_{load}|^2} \frac{8R_{rad}}{V_{oc}^2} = \frac{4R_{load} R_{rad}}{|Z_{ant} + Z_{load}|^2} \quad (3.9)$$

ค่ากำลังงานถ่ายโอนไปยังอิซิมี่ของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และทำให้แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีมีระยะห่างในการอ่านสูงสุดที่ $\tau = 1$ และเมื่อค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่านมีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้ระยะห่างที่อ่านได้จะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานส่งผ่าน τ ดังนั้นปัญหาของการออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จึงเป็นปัญหาของการสร้างสายอากาศที่เชื่อมต่อกันได้ตรงกับอิมพีแดนซ์ของอิซิมี่

ประโยชน์ที่ได้ของการแมตซิ่งที่ดีของอิมพีแดนซ์แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอีกอย่าง คือ จะสามารถได้รับการแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พิจารณาจากรูปที่ 3.3 (ข) ในกรณีที่มีเพียงตัวรีซิสแตนซ์เพียงสองตัว และมีค่าเท่ากัน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวอิมพีแดนซ์ของโหลดจะมีค่าเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ถ้าหากตัวรีแอคแตนซ์ของสายอากาศ และอิซิมี่มีค่าเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน ค่าแรงดันในอิซิมี่จะไม่ใช่แรงดันตกคร่อมที่ตัวรีซิสแตนซ์ แต่จะเป็นแรงดันตกคร่อมตัวคาปาซิแตนซ์และตัวรีซิสแตนซ์ที่อนุกรมกัน นี่คือการแตกต่างที่สำคัญ เพราะในขณะที่ตัวรีซิสแตนซ์ มีค่าน้อย ค่าของคาปาซิแตนซ์ที่อนุกรมอยู่จะมีผลอย่างมากทีเดียว แรงดันตกคร่อมอิซิมี่ จะได้มาจากการคูณกระแสในวงจรโดยอิมพีแดนซ์ที่อนุกรมกันแบบวงจร R-C เมื่อวงจรเชื่อมต่อกันเป็นแมตซิ่งสังยุค

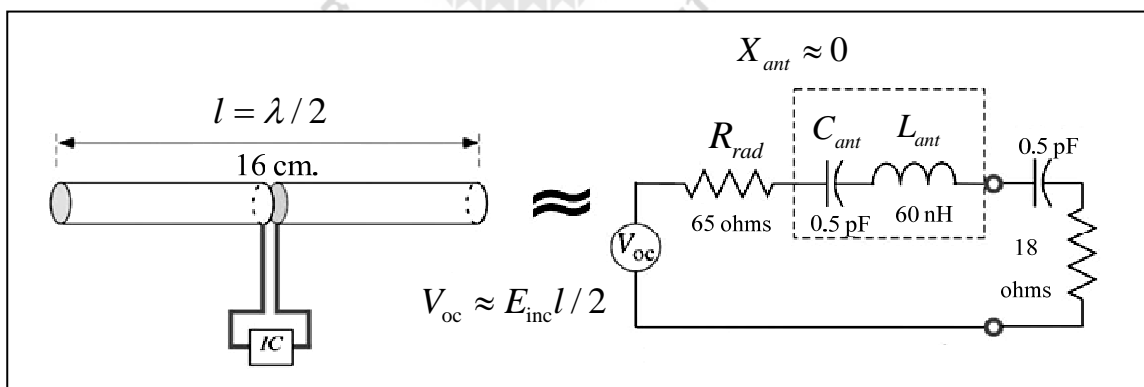
เช่นเดียวกับตัวรีแอคแตนซ์สายอากาศ (X_{ant}) เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะมีผลกับแบนด์วิดท์ ซึ่งประสิทธิภาพแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะเป็นที่ยอมรับได้ พบว่าที่ความถี่ที่แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีและสายอากาศมีการแมตซิ่งอย่างสมบูรณ์แบบ ตัวรีแอคแตนซ์จะถูกหักล้าง และความต้านทานรวมที่ส่งผลจากแหล่งจ่ายแรงดันเป็น $2R_{rad}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ตัวรีแอคแตนซ์จะมีการเพิ่มขนาดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว แบนด์วิดท์จะแปรผกผันกับปัจจัย Q ซึ่งเป็นอัตราส่วน

ของค่ารีแอกแตนซ์ต่อค่ารีซิสแตนซ์ สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมปัจจัย Q จะมีค่าเป็นสองเท่าของการขยายแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นการขยายแรงดันไฟฟ้าจะต้องมีการแลกมาด้วยแบนด์วิดท์ที่ลดลง สายอากาศที่มีค่ารีแอกแตนซ์ขนาดใหญ่ (ค่าอินดักแตนซ์มากและค่าคาปาซิแตนซ์น้อย) และค่ารีซิสแตนซ์ น้อย อาจจะทำให้มีการแมตซ์ที่ความถี่หนึ่ง พร้อมกับการส่งผ่านกำลังงานที่ดีและมีการขยายของแรงดันไฟฟ้า แต่ประสิทธิภาพจะลดลงที่ความถี่อื่น ๆ และสำหรับสายอากาศที่มีค่ารีแอกแตนซ์น้อย ๆ จะให้ค่าประสิทธิภาพดีกว่าตลอดย่านความถี่

3.4 สายอากาศไดโพลและอนุพันธ์

รูปแบบสายอากาศแบบไดโพลเป็นตัวอย่างวิธีที่ดีในการอธิบายการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี ในรูปที่ 3.4 จะแสดงสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในรูปแบบเชิงเรขาคณิตและวงจรสมมูลทางไฟฟ้า (Dobkin, D. M., 2008)

จากรูปพบว่าสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นที่ยังไม่ทำการตัดแปลง จะยังคงมีคุณสมบัติที่ไม่ดีพอ สำหรับใช้กับไอซีสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีทั่วไป เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศมีขนาดน้อยมาก จึงไม่สามารถใช้ชดเชยค่ารีแอกแตนซ์ที่ค่อนข้างมากของไอซี เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ที่มีค่ามาก รวมทั้งยังไม่มีชดเชยของค่าคาปาซิแตนซ์ของไอซีสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี เพราะเหตุนี้ เราจะไม่สามารถใช้งานได้ที่ระยะห่างที่เพียงพอ เนื่องจากความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นไม่เหมาะสมกับค่ารีซิสแตนซ์แบบอนุกรมของไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

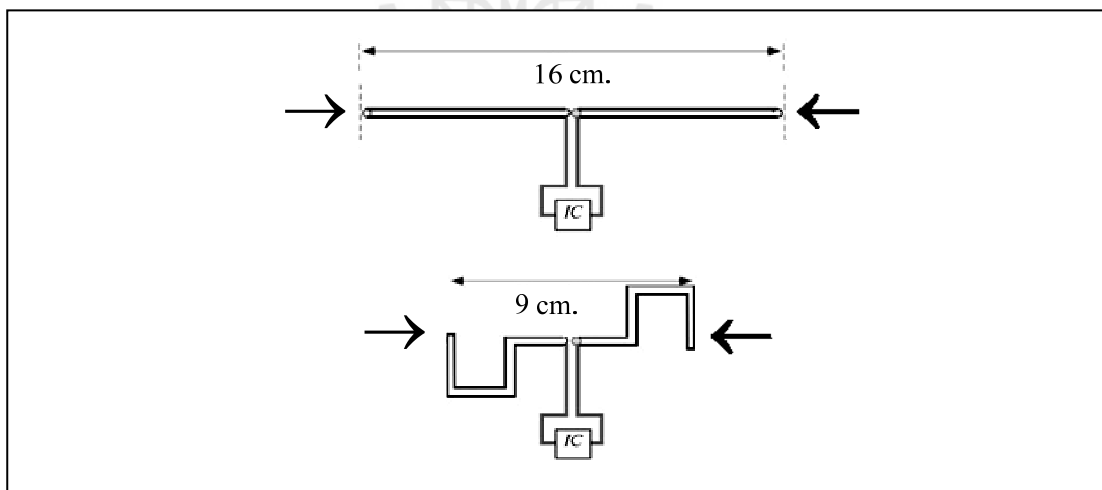


รูปที่ 3.4 สายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

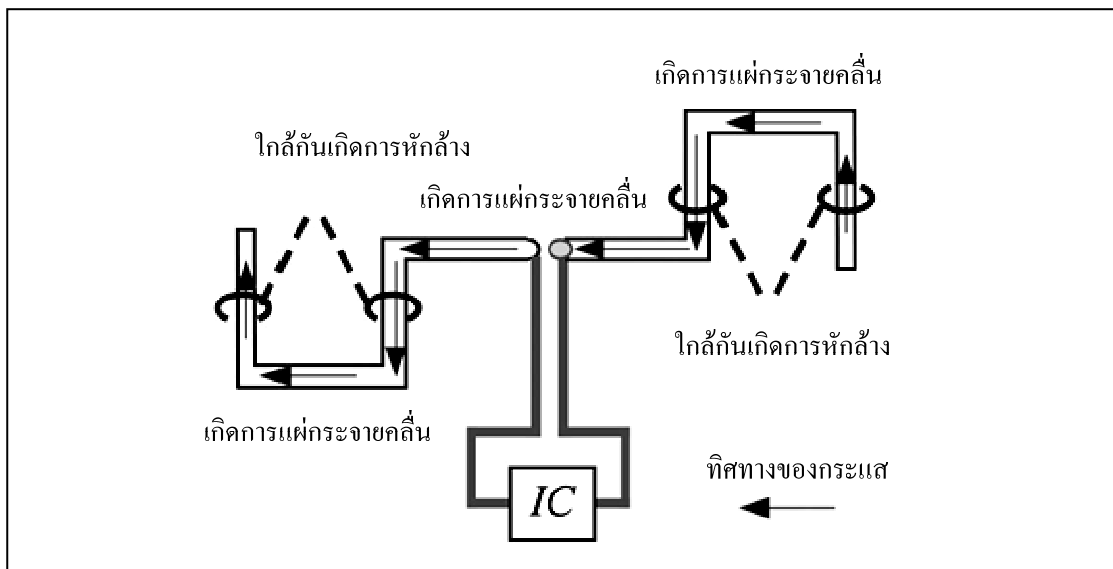
นอกจากนี้แล้ว จากลักษณะทางกายภาพของสายอากาศที่มีความยาวถึง 16 เซนติเมตร ซึ่งมากเกินไปสำหรับการนำไปใช้กับแผ่นป้ายกำกับสินค้า หรือการใช้งานอื่น ๆ ดังนั้น เพื่อรักษาความเรียบง่ายของสายอากาศไดโพล แต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดี ทำให้ต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างบางอย่างของสายอากาศ โดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ ดังจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

3.4.1 การตัดเส้น (Wigging Line)

การแก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดที่จะแก้ไขปัญหาด้านโครงสร้างได้ คือ ถ้าเราต้องการที่จะทำให้ไดโพลมีขนาดเล็กลง เราก็เพียงทำการบีบโดยการดัดงอหรือขดเส้นลวดให้มีขนาดเล็กลง (รูปที่ 3.5) เราสามารถลดขอบเขตเชิงเส้นจากขนาด 16 เซนติเมตร ให้มีขนาดเล็กลงได้ ขึ้นอยู่กับการจำนวนการขดที่เราต้องการ สายอากาศไดโพลที่สั้นลงในลักษณะนี้ เป็นที่รู้จักกันว่า สายอากาศไดโพลแบบดัดงอ (Bent dipole) สายอากาศไดโพลแบบดัดงอที่มีการดัดโค้งมากขึ้น จะเริ่มมีลักษณะเช่นเดียวกับการเลี้ยวลดของแม่น้ำผ่านภูมิประเทศที่พื้นที่ราบ และเป็นที่ยู้อีกกันว่าเป็นสายอากาศไดโพลแบบโค้งตัว (Meandered Dipole) ด้วยการดัดโค้งที่พอเหมาะ เราสามารถทำให้ไดโพลสั้นลงมาก เมื่อเทียบกับความยาวเดียวกันของสายอากาศแบบเส้นลวดแบบเดิม



รูปที่ 3.5 ไดโพลแบบครึ่งคลื่นสามารถทำให้สั้นลงโดยการดัดงอเส้นลวด



รูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลในโครงสร้างสายอากาศแบบโค้งตัว จะมีทิศทางตรงข้ามกันของส่วนที่มีทิศทางตรงข้ามและไม่เกิดการแผ่กระจายคลื่น

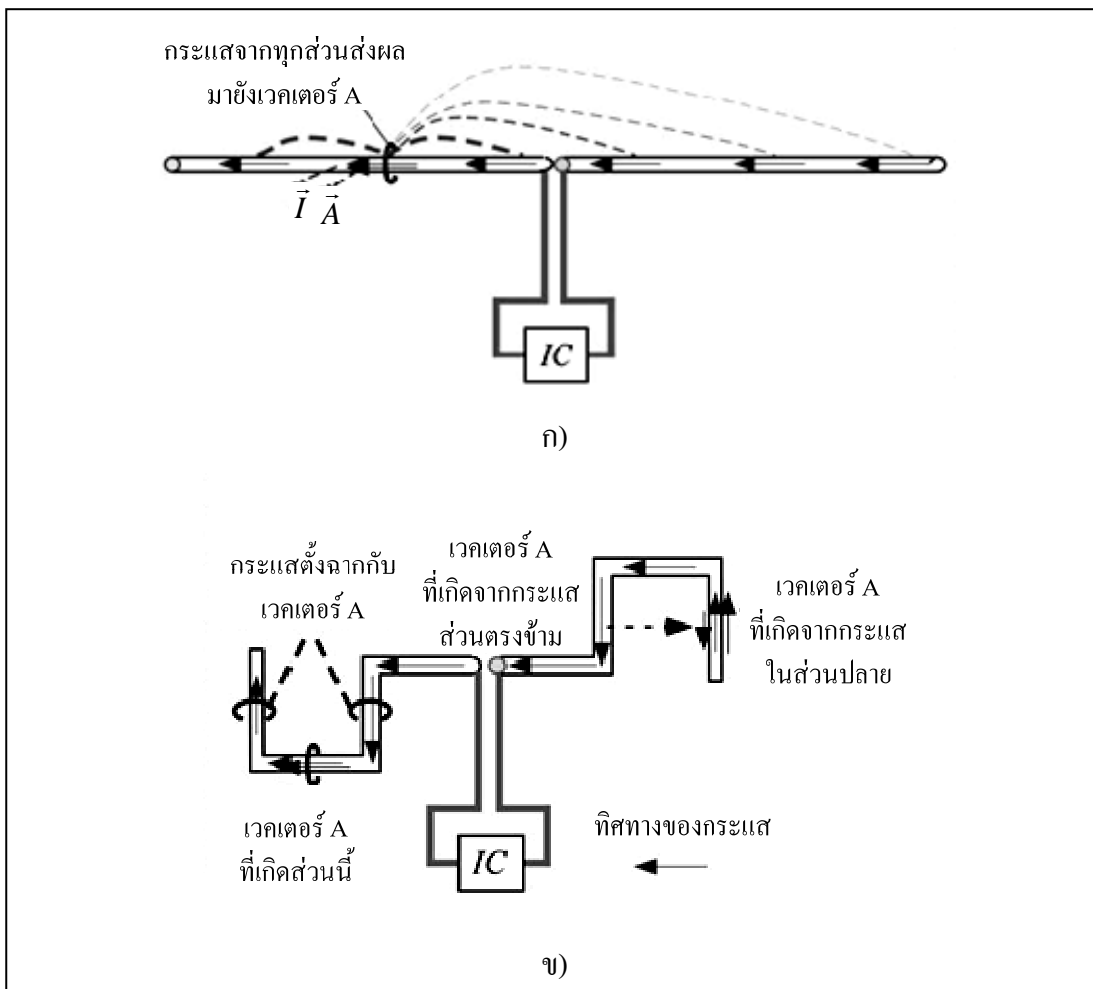
การขุดสายอากาศไดโพล ข้อมส่งผลกับโครงสร้างเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า และความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นผลที่ตามมาของพลังงานที่สูญเสียให้กับการแผ่กระจายของคลื่น ความเป็นเชิงเส้นของการไหลของกระแสไฟฟ้าตลอดความยาวของสายอากาศไดโพล คือจะมีในทิศทางเดียวกันและทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นจากกระแสที่ไหลทั้งหมดในทิศทางเดียวกับการไหลของกระแส เมื่อสายอากาศไดโพลเป็นแบบโค้งตัว ทิศทางการไหลของกระแสในส่วนที่อยู่ใกล้กันของส่วนที่ติดเคี้ยวจะตรงข้ามกัน

จากรูปที่ 3.6 การบีบอัดที่เราเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สายอากาศมีขนาดพอดีกับพื้นที่ขนาดเล็ก ทำให้มีการหักล้างกันมากขึ้นด้วย สำหรับสายอากาศโค้งตัวแบบหนาแน่น ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น จะได้มาจากการพิจารณาแต่ละชิ้นส่วนของสายอากาศที่มีการจัดวางในทิศทางเดียวกับสายอากาศไดโพลเดิม จึงจะมีการแผ่กระจายคลื่นออกมา สัทธิภาพของการแผ่กระจายคลื่นที่ลดลง จะคำนวณได้จากอัตราส่วนของความยาวของสายอากาศไดโพลแบบโค้งตัวที่มีการแผ่กระจายคลื่นเทียบกับสายอากาศไดโพลเดิม และกำลังงานในการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของสนามไฟฟ้า โดยสามารถหาได้จากการยกกำลังสองค่าอัตราส่วนที่ได้ นั่นคือ ถ้าความยาวของสายอากาศในทิศทางเดิมเป็น L_{proj} ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นจะประมาณได้จาก (Dobkin, D. M., 2008) :

$$R_{rad,meander} \approx \left(\frac{L_{proj}}{L_{half-wave}} \right)^2 R_{rad,half-wave} \approx \left(\frac{2L_{proj}}{\lambda} \right)^2 65 \quad (3.10)$$

นอกจากนี้ค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ของ โครงสร้างสายอากาศแบบโค้งตัวัด จะมีค่าแตกต่างจากของโครงสร้างที่เป็นเส้นตรง ค่าอินดักแตนซ์ภายในของเส้นลวดจะเป็นผลจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของเส้นลวด ซึ่งจะถูกรังขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปในทิศทางเดียวกันในส่วนต่าง ๆ ของเส้นลวด กระแสทั้งหมดของสายอากาศไดโพลที่ไหลไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อให้แต่ละองค์ประกอบมีส่วนเสริมที่ทุกตำแหน่งของเส้นลวด แม้ว่าผลกระทบที่ลดลงจะหักล้างกับระยะทางในสายอากาศ (รูปที่ 3.7 (ก)) เมื่อสายอากาศไดโพลมีการัดงอ ส่วนของเส้นลวดจะไม่ขนานกันส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในส่วนที่ตั้งฉากกับส่วนอื่นๆ ทำให้ไม่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งดังกล่าวบนเส้นลวด (รูปที่ 3.7 (ข)) นอกจากนี้ ยังมีแรงสัคย์ที่เกิดขึ้นจากกระแสใกล้เคียงที่ไหลในทิศทางตรงกันข้ามกันจะหักล้างกัน ผลที่ได้คือ สายอากาศโค้งตัวัดที่มีโครงสร้างแบบหนาแน่น จะมีค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลแบบตรง และสำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ต่อความยาวลวดของสายอากาศแบบโค้งตัวัดก็ลดลงเช่นกัน เพราะประจุบนเส้นลวดจะมีความใกล้กันมากขึ้น ทำให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าบนเส้นลวดสำหรับประจุโดยรวมที่เท่ากัน

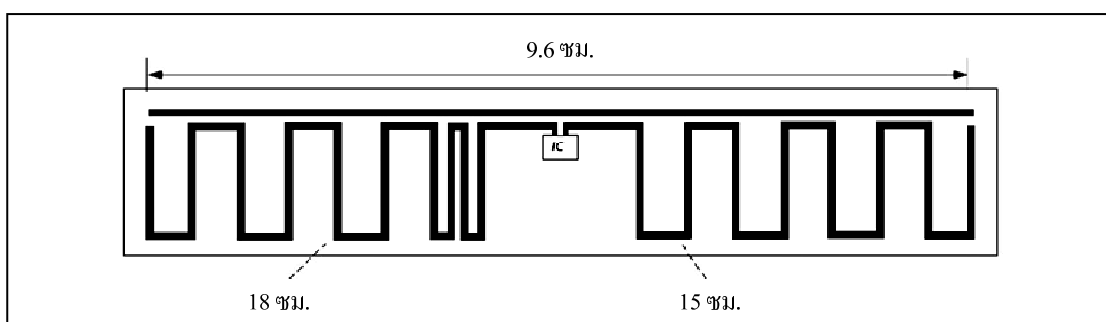




รูปที่ 3.7 สายอากาศโค้งตัวมีค่าอินดักแตนซ์ภายในน้อยเนื่องจากการตั้งฉากและการวางตรงข้าม

จากการที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ จะแปรผกผันกับผลคูณของค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ เมื่อค่าเหล่านี้ลดลง จะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ไดโพลแบบโค้งตัว จะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงกว่าไดโพลแบบตรง เมื่อเทียบด้วยความยาวของสายอากาศที่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่เดิม สำหรับสายอากาศไดโพลแบบโค้งตัว จะต้องมีความยาวโดยรวมที่มากกว่าความยาวของสายอากาศไดโพลแบบตรง อย่างไรก็ตามแม้สายอากาศไดโพลจะบีบลงไปที่ยาวที่ยอมรับได้ และสามารถเลื่อนความถี่ไปที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้ เรายังคงประสบปัญหาในการแมตซึ่งอยู่ วิธีการหนึ่งในการปรับปรุงให้การแมตซึ่งของสายอากาศกับไอซีดีขึ้น คือ ทำให้เส้นลวดสายอากาศยาวกว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ขณะที่รักษาความยาวโดยรวมให้เท่ากัน สายอากาศไดโพลที่ยาวกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้ค่าอินดักทีฟ และค่ารีแอคแตนซ์ส่วนจินตภาพเป็นบวกมากขึ้น ซึ่งจะไปชดเชยค่าคาปาซิแตนซ์

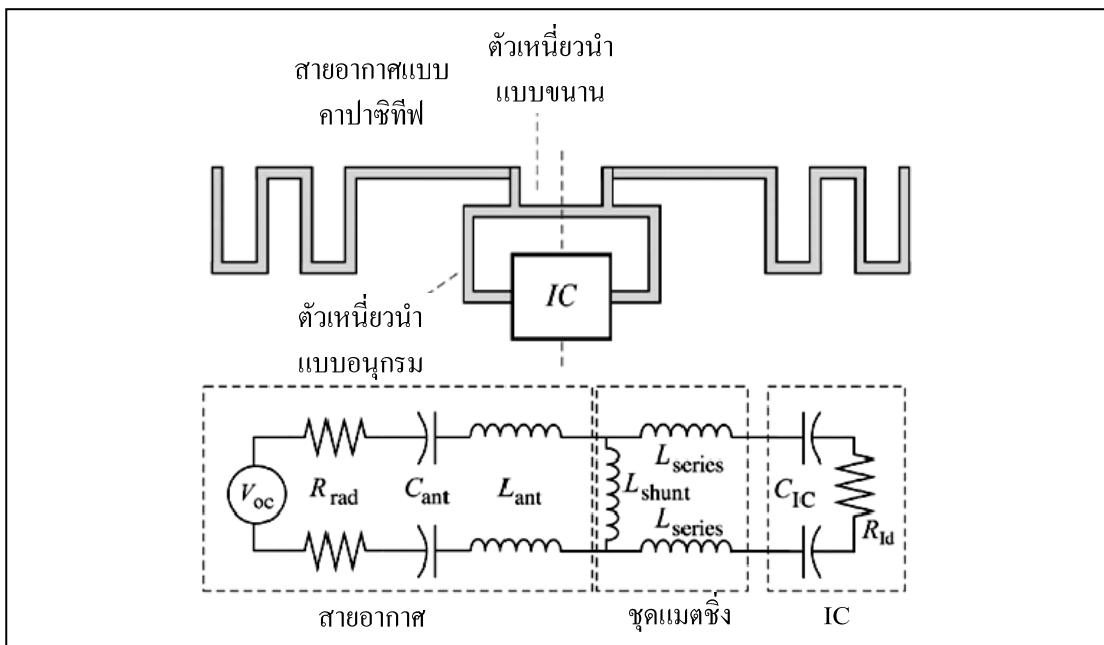
ของไอซี ตัวอย่างของวิธีการดังกล่าวในการออกแบบสายอากาศเชิงพาณิชย์จะปรากฏในรูปที่ 3.8 โดยความยาวรวมของสายอากาศยาวประมาณ 33 เซนติเมตร ทำการติดตั้งเพื่อให้พอดีกับข้อจำกัดของป้ายขนาด 10 เซนติเมตร แถบเส้นตรงที่เพิ่มเติมที่ด้านบนของโครงสร้างทำหน้าที่เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ที่ต่อขนานอยู่ ซึ่งจะช่วยลดทอนค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นกับความต้านทานอินพุทของไอซีของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี



รูปที่ 3.8 สายอากาศโค้งตัวสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี

3.4.2 การแมตชิงค่าอินดักแตนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ

วิธีที่สองเพื่อปรับสายอากาศให้สั้นลง เพื่อให้เหมาะกับค่าคาปาซิแตนซ์ของไอซีคือการเพิ่มโครงสร้างสำหรับการทำแมตชิง โครงสร้างหนึ่งที่เป็นไปได้คือ ใช้การผสมผสานกันของการลัดวงจรด้วยตัวเหนี่ยวนำและการต่ออนุกรมด้วยตัวเหนี่ยวนำ โดยการลัดวงจรด้วยตัวเหนี่ยวนำและการต่ออนุกรมด้วยตัวเหนี่ยวนำ จะแทนด้วยความยาวของเส้นตัวนำที่เชื่อมต่อสายอากาศกับไอซีดังแสดงในรูปที่ 3.9

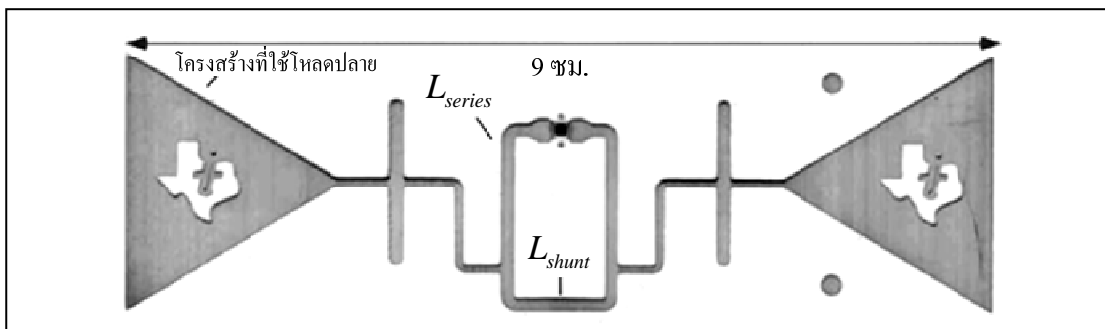


รูปที่ 3.9 การลัดวงจรด้วยตัวเหนี่ยวนำและการต่ออนุกรมด้วยตัวเหนี่ยวนำเพื่อแมตซิ่งค่าคาปาซิทีฟสายอากาศกับค่าคาปาซิทีฟโหลด

3.4.3 การโหลดปลายสายด้วยค่าคาปาซิแตนซ์

อีกวิธีการหนึ่งในการทำสายอากาศให้สั้น โดยมีอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม ก็คือ การดัดแปลงส่วนปลายของสายอากาศให้เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งจะเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ของสายอากาศ และเป็นที่รู้จักกันว่า การโหลดปลายสายด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitive tip-loading) เนื่องจากขนาดของค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ จะลดลงเมื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ สายอากาศใดโพลที่ต่อปลายโหลด จะให้ค่าอินดักทีฟที่มากกว่าสายอากาศใดโพลปกติ ที่มีความยาวเท่ากัน และจะง่ายต่อการแมตซิ่ง

สายอากาศใดโพลปลายโหลดมักจะใช้การโหลดด้วยโลหะทรงกลมที่มีค่าคาปาซิแตนซ์เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของทรงกลม สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพิมพ์ จะต้องใช้โครงสร้างลักษณะแบน และค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มจะเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของรูปร่างของโหลดมากกว่าพื้นที่ ตัวอย่าง ของโครงสร้างสายอากาศเชิงพาณิชย์ ที่มีการใช้การโหลดปลายและการแมตซิ่งค่าอินดักทีฟแสดงในรูปที่ 3.10 โครงสร้างเฉพาะดังกล่าวยังสามารถใช้กับหมึกพิมพ์ที่เป็นตัวนำในการสร้างรูปแบบโครงสร้างสายอากาศ การเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกันอาจจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันในการออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี



รูปที่ 3.10 สายอากาศเชิงพาณิชย์ ที่ใช้การโพลปลายและค่าอินดักทีฟเพื่อแมตซ์ให้พอดีกับความยาว ที่ต้องการ

3.4.4 สายอากาศแบบทรงกระบอกและแบบแผ่นบาง

สายอากาศที่ได้พิจารณาจนถึงขณะนี้ โดยมากจะมีลักษณะที่เป็นเส้น ซึ่งจะสะดวกในการผลิต แต่จะมีค่าอินดักแตนซ์ที่ค่อนข้างสูง และค่าคาปาซิแตนซ์ที่ค่อนข้างต่ำ เป็นผลให้ค่ารีแอกแตนซ์สายอากาศมีค่ามาก และทำให้แบนด์วิดธ์ลดลง เมื่อเทียบกับแบนด์วิดธ์ของไอซีสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี และเป็นที่น่าทึ่งกันว่า สายอากาศไดโพลที่ใช้องค์ประกอบที่หนามากกว่า จะใช้ได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่า เป็นเพราะค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นและค่าอินดักแตนซ์ลดลง สำหรับที่ความถี่เรโซแนนซ์เดียวกัน ดังนั้น ค่า Q ของสายอากาศจะมีค่าน้อยลงและแบนด์วิดธ์มีค่ามากขึ้น สำหรับเส้นลวดทรงกระบอก ค่าอินดักแตนซ์จะเป็นสัดส่วนแบบลอการิทึมของอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง

$$l \propto L \ln\left(\frac{L}{d}\right) \quad (3.11)$$

ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ $j\omega l$ จึงเป็นสัดส่วนแบบลอการิทึม ของอัตราส่วนที่เรโซแนนซ์ และขนาดของค่าคาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ต้องเท่ากับค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ ดังนั้นขนาดค่าคาปาซิแตนซ์ต้องมีค่าเป็น $1/\ln(L/d)$ ในทางกลับกันค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น จะสัมพันธ์เฉพาะกับความยาวเส้นลวด เนื่องจากขึ้นอยู่กับผลรวมของกระแส (ทราบได้ที่ความกว้างของเส้นลวดมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) ดังนั้นปัจจัยคุณภาพ Q ของสายอากาศ หรือ อัตราส่วนของค่ารีแอกแตนซ์กับค่ารีซิสแตนซ์จะเป็นสัดส่วนกับลอการิทึมของอัตราส่วนด้านและผกผันกับแบนด์วิดธ์

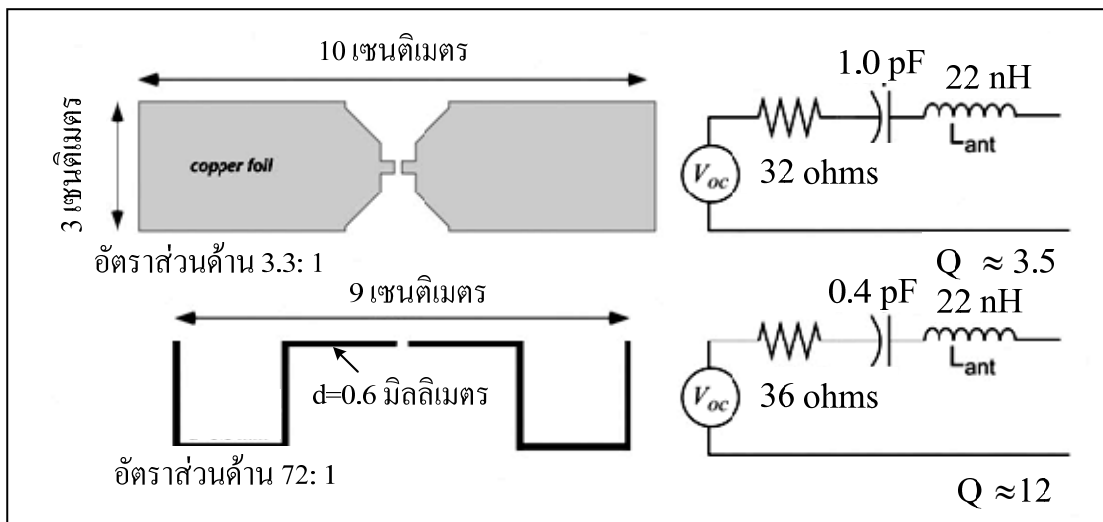
$$Q \propto \ln\left(\frac{L}{d}\right) \rightarrow BW \propto \frac{1}{\ln\left(\frac{L}{d}\right)} \quad (3.12)$$

การเปลี่ยนแปลงแบบลอการิทึมจะเปลี่ยนแปลงช้ามาก ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของสายอากาศอย่างมากจึงจะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์

โครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นแบนที่ใช้สำหรับสายอากาศแผ่นปายอาร์เอฟไอดี จะทำงานในลักษณะเหมือนกันในเชิงคุณภาพ แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของเส้นที่ใหญ่กว่า ประจุไฟฟ้าหรือกระแสที่ใกล้กับศูนย์กลางเส้นจะต้องนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นสำหรับกรณีเส้น ลวดลวดทรงกระบอก ผลก็คือ ขนาดของสายอากาศจะสามารถปรับขนาดได้เป็น

$$l \propto L \left[\ln\left(\frac{L}{d}\right) + 0.2 \frac{L}{w} - 0.3 \right] \quad (3.13)$$

สำหรับความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ กรณีที่ความหนา มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ความกว้างสายอากาศ อย่างไรก็ตาม สายอากาศแบบแผ่นแบนจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงแบนด์วิดท์ มากกว่า เมื่อเทียบกับสายอากาศโค้งตัว การเปรียบเทียบค่าจรรยาสมมูลสำหรับโครงสร้างทั้งสอง แบบที่ความยาวเท่ากันจะปรากฏในรูปที่ 3.12 (Dobkin, D. M., 2008) โดยการลดอัตราส่วนด้านลง 20 เท่า จะให้ผลปรับปรุงของค่า Q และแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น 3 เท่า (การทวิแรงดันไฟฟ้าที่ไอซีจะถูก ลดลงด้วยสัดส่วนเดียวกัน)



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบการวัดค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลสำหรับสายอากาศสองแบบที่ความยาวคล้ายกัน แต่มีการเปลี่ยนอัตราส่วนด้าน

เป็นที่ชัดเจนว่าโครงสร้างแบบแผ่นบาง ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญสำหรับแบนด์วิธใช้งาน โดยมีข้อแม้ว่าความหนาจะต้องมีค่าน้อยกว่าความยาวหรือความกว้างแน่นอนว่าแม้ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ และ โครงสร้างสำหรับการแมตซึ่งจะถูกลดให้เป็นค่าที่ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แบนด์วิธที่ยังคงถูกจำกัด โดยค่ารีแอกแตนซ์ของไอซี โครงสร้างที่กว้างมากขึ้นยังอาจเพิ่มต้นทุนการผลิตด้วย ขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศ อย่างไรก็ตามสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่ซับซ้อน ได้มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวาง โดยบางโครงสร้างใช้สำหรับย่านความถี่กว้างดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยมีอัตราส่วนด้านประมาณ 5:1 ถึง 7:1 สำหรับโครงสร้างเหล่านี้

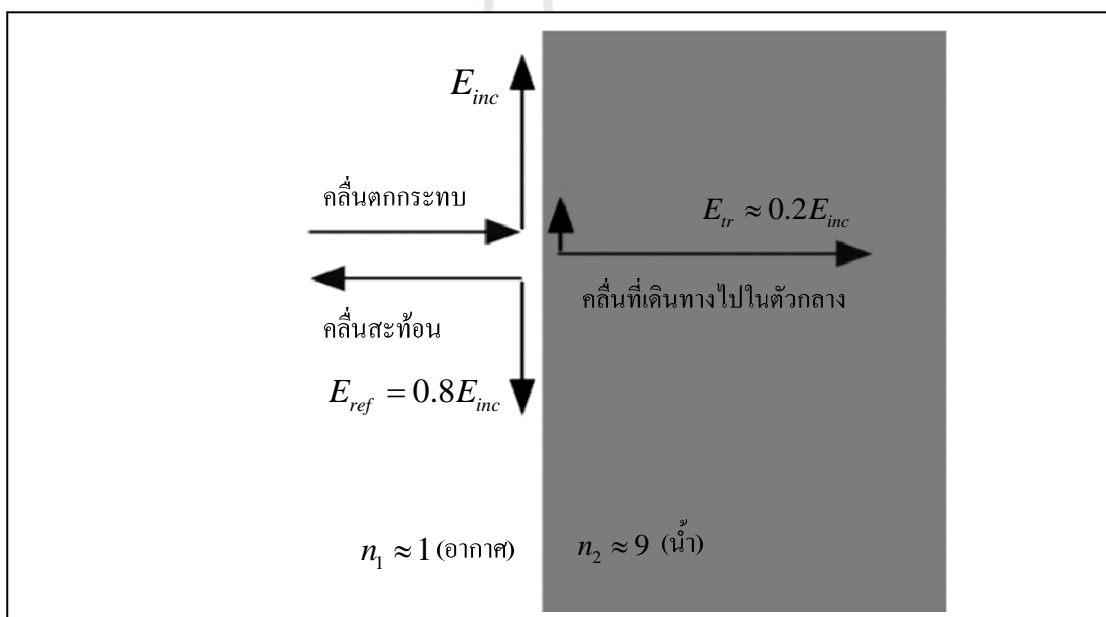


รูปที่ 3.12 โครงสร้างสายอากาศแถบความถี่กว้างที่ใช้ในงานในเชิงพาณิชย์

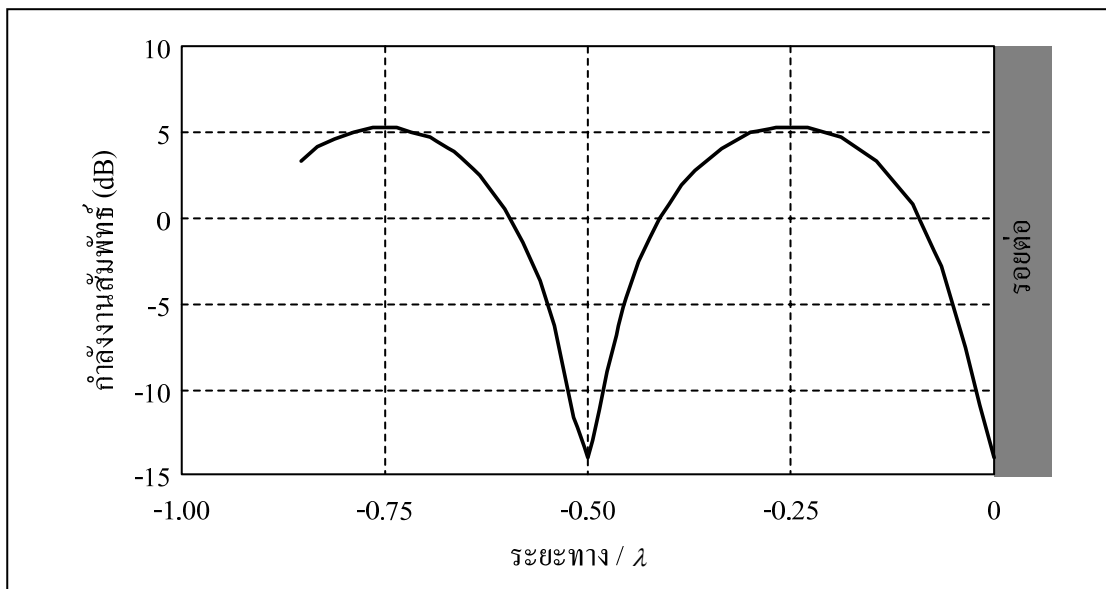
3.5 แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีกับวัสดุเวดล้อม

แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี มักจะใช้งานโดยแนบไปกับวัตถุที่พวกเขาต้องการที่จะระบุหรือตรวจสอบ โดยถ้าวัตถุนั้นจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ จนทำให้การทำงานของสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบหรือเปลี่ยนคุณสมบัติไป โดยเฉพาะในการใช้งานระบบห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะมักจะถูกฝังอยู่ในกระดาษหรือป้ายพลาสติก และถูกวางบนกล่องกระดาษแข็งโดยขนาดความหนาของกล่องที่แตกต่างกันจากประมาณ 3 มิลลิเมตร ถึง 1 เซนติเมตร โดยมีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่ทำจากกระดาษและกาว สำหรับกระดาษแข็งจะมีค่าความเป็นฉนวนคงที่ประมาณ 3 กระดาษแผ่นบางที่วางใกล้ แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี จะไปเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ของสายอากาศ แต่จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าอินดักแตนซ์ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะส่งผลกับการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์ไม่กี่เปอร์เซ็นต์ และไม่มีผลต่อแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอย่างมีนัยสำคัญมาก ยกเว้นสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีขนาดเล็กมาก ที่สายอากาศที่มีค่าแฟคเตอร์ Q สูง (เนื่องจากความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นต่ำ) สำหรับพื้นผิวทั่วไปอื่น ๆ เช่น แก้ว มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูงกว่า (ในกรณีนี้มักจะมีค่าประมาณ 3.5-7) และจะมีผลต่อค่าคาปาซิแตนซ์สายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบางประเภทได้รับการออกแบบให้ใช้งานได้เมื่อวางไว้บนพื้นผิวกระจกโดยตรง โดยการกำหนดวงจรแม่ตซึ่งให้เพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์ ซึ่งจะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้กรณีที่ไม่ใช่แก้ว แผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีดังกล่าวอาจทำงานได้เป็นอย่างดีโดยตรงบนกระจกหนา แต่ใช้งานได้ไม่ดีในอากาศหรือบนวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำ

สำหรับน้ำและโลหะจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป น้ำจะประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขั้วสูง อะตอมออกซิเจนใช้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจาก ไฮโดรเจน กลายเป็นประจุลบ และปล่อยค่าประจุบวกอย่างมีนัยสำคัญ โมเลกุลพยายามที่จะปรับทิศทางตัวเองเพื่อยกเลิกผลจากสนามไฟฟ้า โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำมีค่าประมาณ 80 ที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลของน้ำยังมีรูปแบบโครงสร้างซึ่งคล้ายวงแหวนชั่วคราวของน้ำที่เป็นของเหลว ซึ่งจะสามารถแยกตัวและกลับคืนรูปได้ในเสี้ยววินาที เป็นผลให้น้ำสามารถดูดซับแรง เช่นกันกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึม จะมีค่าประมาณ 5 เนปเปอร์ต่อเมตร (Np/m) หรือประมาณ 40 เดซิเบลต่อเมตร ที่ความถี่ 900 MHz (Dobkin, D. M., 2008) การดูดซึมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับความถี่และลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังนั้น น้ำ จะเป็นตัวสะท้อนและดูดซับรังสีไมโครเวฟที่ดีมาก นั่นเป็นเหตุผลที่ทำให้วัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจะมีผลกับคลื่นในย่านไมโครเวฟ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ, คลื่นที่เดินทางออกไป, และคลื่นที่สะท้อนที่ผิว



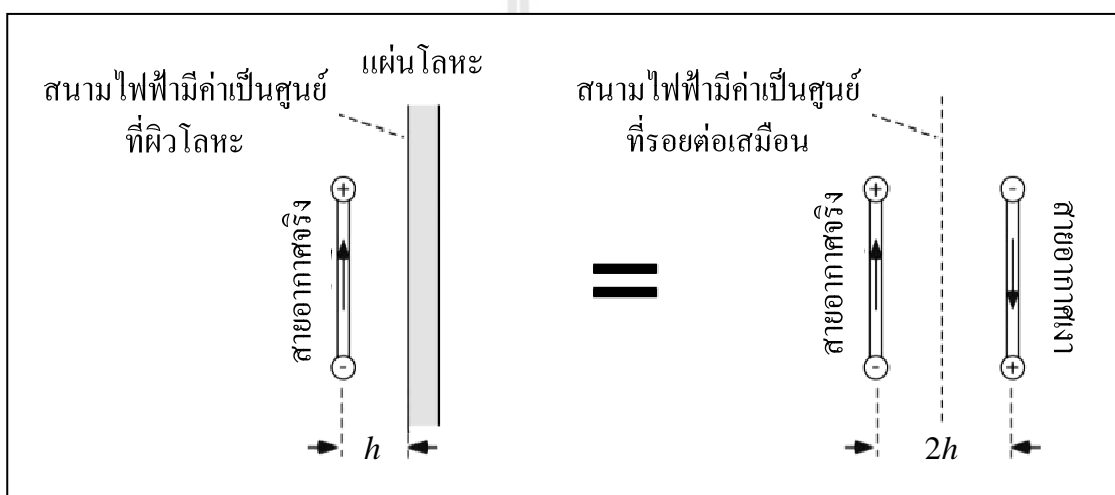
รูปที่ 3.14 รูปแบบคลื่นนิ่งใกล้กับรอยต่อที่ก่อให้เกิดการสะท้อน ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามและกำลังงานที่ได้รับเทียบกับตำแหน่ง

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำที่สูงมาก จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในน้ำจะมีค่าลดลงมาก โดยค่าของสนามไฟฟ้าของน้ำอยู่ด้านนอกและด้านในต้องมีความต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีการเดียวที่จะอธิบายได้ คือ การเพิ่มคลื่นสะท้อนเข้ามา จะทำให้เราสามารถอธิบายได้ว่า ถ้าสนามไฟฟ้าที่สะท้อนอยู่ในทิศทางที่ตรงข้ามและมีขนาดเท่ากับคลื่นตกกระทบ (รูปที่ 3.13)

หากเราเลื่อนความสนใจให้ห่างจากรอยต่อส่วนที่สัมผัสกับน้ำ ความสัมพันธ์ของเฟสของสัญญาณที่ส่งและสะท้อนกลับจะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม และมีผลลัพธ์เป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) (รูปที่ 3.14) ที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นจากพื้นผิวทั้งสองจุดจะมีค่าเหมือนกัน แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกัน และทำให้เกิดสนามที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่พื้นผิวไม่มีน้ำ และที่ระยะห่างครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจากรอยต่อจะทำให้มีจุดบอด (Null) เกิดขึ้น

สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีแบบเส้นลวด ในแง่จรรยาบรรณจะมีสนามไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากใกล้พื้นผิวน้ำ และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจะลดลงเมื่อระยะห่างจากรอยต่อน้อยกว่า $1/8$ ของความยาวคลื่น ดังนั้นพลังงานที่ได้รับที่ส่งผ่านไปให้กับโหลดจะลดลงเมื่อแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่ใกล้กับรอยต่อ ผลที่คล้ายกัน แต่รุนแรงมากขึ้นเกิดขึ้นเมื่อแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่ใกล้กับวัสดุโลหะ ในกรณีนี้สนามไฟฟ้าภายในโลหะจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะค่าความลึกผิว (skin depth) จากรอยต่อของวัสดุสองชนิด เพื่อให้คลื่นสะท้อนมีขนาดเดียวกับคลื่นที่ตกกระทบสำหรับโลหะทั่วไป

ค่าความลึกผิวจะมีค่าเป็นไม่กี่ไมครอนจนถึงสิบไมครอน ดังนั้นพื้นผิวโลหะสามารถถือว่าเป็นตัวสะท้อนที่สมบูรณ์แบบเพื่อให้ง่ายในการพิจารณาในเชิงปฏิบัติ สนามไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับค่าไซน์ของระยะทางจากระนาบกราวด์ที่ทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยค่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\sin(4\pi h/\lambda)$) เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ที่รอยต่อที่เล็กมาก เราสามารถพิจารณาแทนได้ด้วยการเอาแผ่นโลหะออก และแทนที่ด้วยภาพของสายอากาศที่จะอยู่ด้านหลังพื้นผิวเดิม โดยมีระยะทางเดียวกับสายอากาศจริงที่อยู่เหนือพื้นผิวภาพเงาของสายอากาศที่เหมือนเป็นสายอากาศจริง แต่มีกระแสและประจุทั้งหมดตรงข้าม เพื่อให้สนามให้เป็นศูนย์ที่ตำแหน่งที่เคยเป็นโลหะ (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 ภาพด้านข้างของสายอากาศจริงที่วางใกล้พื้นผิวโลหะจะสมมูลกับสายอากาศเงาเมื่อไม่มีโลหะ

หากเราพิจารณาสายอากาศที่ระยะห่างออกไป กระแสบนสายอากาศจริงบางส่วนจะถูกหักล้างโดยสายอากาศเงาที่เกิดตรงข้าม ถ้าสายอากาศทั้งสองอยู่ในที่เดียวกัน ($h = 0$) การหักล้างกันจะทำให้ไม่มีการแผ่กระจายคลื่น เมื่อการกระจัดของสนามมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น, การแผ่กระจายคลื่นทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับ (h/λ) และกำลังงานจะเป็นกำลังสองของค่าสัดส่วนนี้ สำหรับการกระจัดของสนามที่มีค่ามาก กำลังงานที่แผ่กระจายของคลื่นที่ตั้งฉากกับระนาบกราวด์จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของค่าไซน์ของ $4\pi h/\lambda$ และทำให้ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของค่าไซน์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นทั้งสองจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 0 เมื่อสายอากาศเข้าใกล้ระยะน้อยกว่า $1/8$ ของความยาวคลื่นจากพื้นผิวโลหะ ค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ของสายอากาศ

จะรับผลกระทบจากการปรากฏของส่วนเสมือนของสายอากาศไดโพล แต่คุณสมบัติที่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับรูปร่างสายอากาศ ค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ของเส้นลวด จะเป็นสัดส่วนแบบลอการิทึมของอัตราส่วนของความยาวต่อรัศมีหรือเขียนได้เป็น $\ln(L/a)$

ผลกระทบจากเส้นลวดที่วางใกล้กันจะสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับค่าลอการิทึมของอัตราส่วนของความยาวต่อระยะห่างหรือเขียนได้เป็น $\ln(L/2h)$ ดังนั้น ทรานสไมตตีวี่ค่า $\ln(h/a)$ มีค่ามากเมื่อเทียบกับ 1 จะทำให้มีผลกับค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ภายใน แต่เมื่อระยะห่างจากระนาบกราวนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพียงไม่กี่เท่าของความกว้างหรือรัศมีของเส้นลวด จะส่งผลให้ค่าอินดักแตนซ์จะลดลงและค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้น และสำหรับสายอากาศที่มีต้องมีการออกแบบเครือข่ายแมตชิ่งเฉพาะเนื่องจากสายอากาศมีค่ารีแอคแตนซ์ที่เฉพาะเจาะจง จะทำให้ส่งผ่านกำลังงานไปยังไมโครชิพได้น้อยลง เมื่อส่วนประกอบเหล่านี้เปลี่ยนค่า แม้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะไม่ได้รับผลกระทบ เรียกว่า การปรับตั้งค่า (detuning) ของสายอากาศ การปรับตั้งค่านี้เป็นส่วนสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่าแฟคเตอร์ Q มีค่าสูง และมีการเลือกใช้สายอากาศแบบดิวีแควบ

3.6 สรุป

ในบทนี้เราได้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี รวมทั้งปัญหาและเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยยกตัวอย่างการออกแบบสายอากาศไดโพล และการแก้ปัญหาเรื่องอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยอาศัยเทคนิควิธีต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีที่จะใช้ในงานวิจัยต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบและผลการจำลองแบบ

4.1 บทนำ

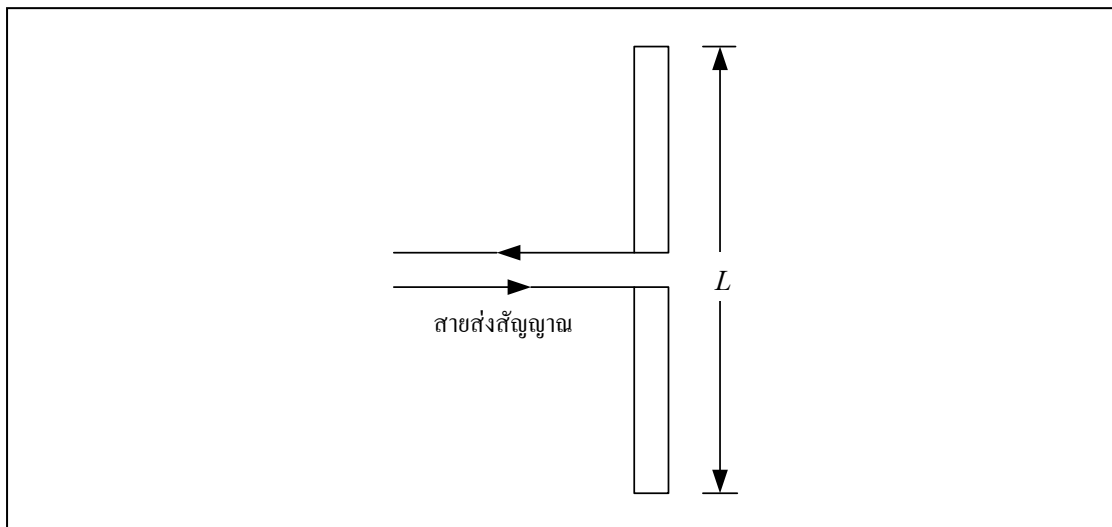
สำหรับในการออกแบบสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนเป็นสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการศึกษา โดยในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสตริปไดโพล แบบต่าง ๆ และจำลองผลสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio™ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบและการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ บนพื้นผิววัสดุแบบต่าง ๆ รวมทั้งเมื่อมีการตัดโค้งบนพื้นผิววัสดุที่เป็นทรงกระบอก และอธิบายถึงการพัฒนาเทคนิคการออกแบบวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดจากการตัดโค้งสายอากาศ ด้วยสายอากาศแบบสองชั้น

4.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

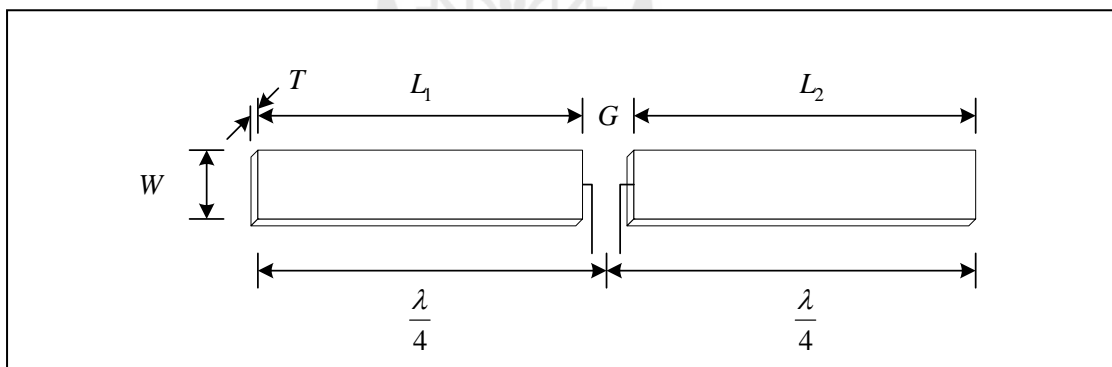
ในการศึกษาผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจากพื้นผิวรูปแบบต่าง ๆ นั้น ในเบื้องต้นจะเป็นการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์บนพื้นผิววัสดุที่เป็นทรงกระบอก โดยจะทำให้สายอากาศอาร์เอฟไอดีมีการเปลี่ยนแปลงตามความโค้งของพื้นผิวทรงกระบอก โดยได้พัฒนาออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน เนื่องจากมีความง่ายในการศึกษาถึงผลกระทบ และสามารถพัฒนาสร้างสายอากาศต้นแบบในการทดสอบและวัดค่าสำหรับสายอากาศที่จะนำไปใช้ศึกษาผลกระทบจากพื้นผิวที่มีความโค้ง

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดมีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 4.1 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่ง โดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศกระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากทฤษฎีสายอากาศไดโพลสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการนำมาคำนวณเพื่อหาความยาวของสายอากาศสตริปไดโพล หรือสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน ได้จากทฤษฎีความยาวของสายอากาศไดโพล จะมีค่าเป็น $L = \lambda/2$ เมื่อกำหนดให้มีความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศ คือ 2.45GHz ความยาวของสายอากาศไดโพล หรือ L หาได้จาก

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.45 \times 10^9 \text{ Hz}} = 122.5 \text{ mm.} \quad \text{ดังนั้น } L = \frac{\lambda}{2} = \frac{122.5}{2} = 61.25 \text{ mm.}$$



รูปที่ 4.1 สายอากาศไดโพล



รูปที่ 4.2 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

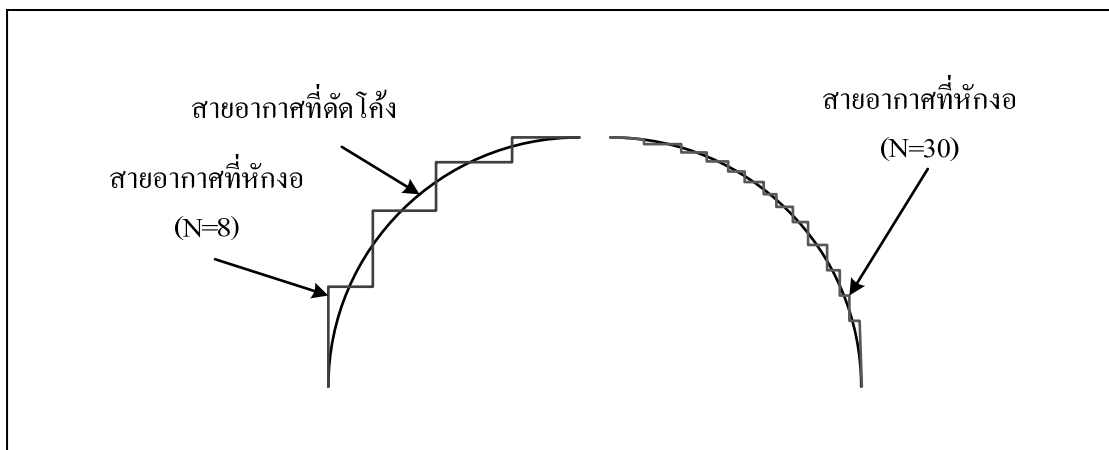
จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่มีความกว้างต่าง ๆ โดยจะส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) มีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาความกว้างของสายอากาศ ที่ให้ค่า S_{11} ต่ำที่สุด จากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะได้ ผลการจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนที่สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45GHz โดยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลต้นแบบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล

พารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล	ขนาด (มิลลิเมตร)
L_1, L_2 : ความยาวของสายอากาศ	28.10
W : ความกว้างของสายอากาศ	4.00
T : ความหนาของสายอากาศ	0.10
G : ระยะห่างกึ่งกลางสายอากาศ	1.00

เมื่อได้ขนาดที่เหมาะสมแล้ว ในการศึกษาสายอากาศไดโพลที่จะใช้ในการศึกษาผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจากพื้นผิวรูปแบบต่าง ๆ นั้น

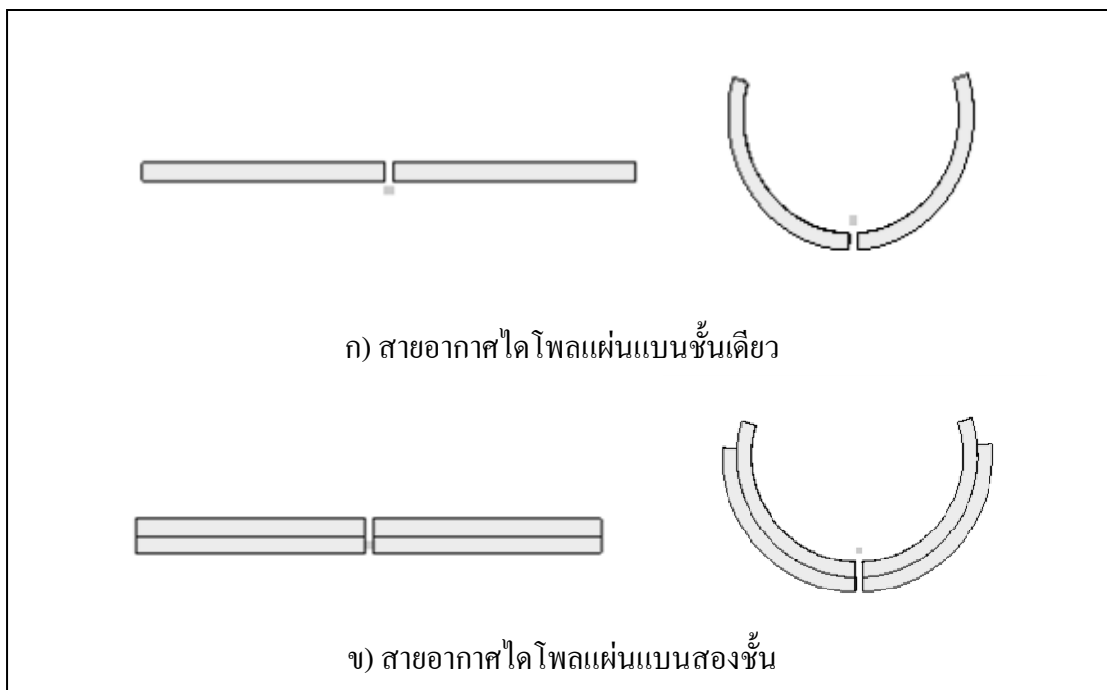
ในเบื้องต้นจะเป็นการศึกษาบนพื้นผิววัสดุผิวโค้งลักษณะทรงกระบอก โดยจะทำให้สายอากาศอาร์เอฟไอดีมีการเปลี่ยนแปลงตามความโค้งของพื้นผิวทรงกระบอก โดยได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน จากการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการตัดโค้ง สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียว จะพบว่าสายอากาศมีคุณสมบัติตอบสนองกับการตัดโค้ง โดยมีการเลื่อนของความถี่เรโซแนนซ์ไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น อันเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป โดนเราสามารถพิจารณาการตัดโค้งสายอากาศที่เกิดขึ้น แทนได้ด้วยการหักงอของเส้นตรงจำนวน N ชั้น หากเราเพิ่มจำนวนเส้นตรง (N) ให้มากขึ้นก็จะทำให้สามารถแทนเส้นโค้งได้ดีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนั้นการตัดโค้งที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกันกับสายอากาศแบบโค้งตัวที่ได้อธิบายในบทที่ผ่านมา นั่นคือ การตัดโค้งของสายอากาศ จะทำให้ค่าค่าปารีแดนซ์ต่อความยาวลวดของสายอากาศที่ตัดโค้งลดลง เพราะประจุนบนเส้นลวดจะมีความใกล้ชิดกันมากขึ้น ทำให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าบนเส้นลวดสำหรับประจุโดยรวมที่เท่ากัน และเมื่อสายอากาศไดโพลมีการตัดงอ ส่วนของเส้นลวดจะไม่ขนานกัน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในส่วนที่ตั้งฉากกับส่วนอื่น ๆ ทำให้ไม่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งดังกล่าวบนสายอากาศ นอกจากนี้ ยังมีแรงสัคย์ที่เกิดขึ้นจากกระแสใกล้เคียงที่ไหลในทิศทางตรงกันข้ามกันจะหักล้างกัน ผลที่ได้คือ สายอากาศที่ตัดโค้ง จะมีค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลแบบตรง



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสายอากาศแบบตัดโค้งกับสายอากาศแบบหักงอ

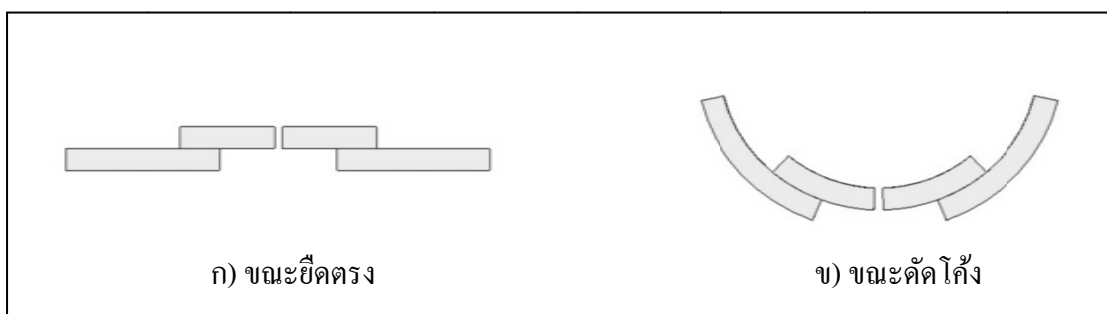
และจากการที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ จะแปรผกผันกับผลคูณของค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ เมื่อค่าเหล่านี้ลดลง จะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ผลที่ได้คือไดโพลแบบโค้ง จะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงกว่าไดโพลแบบตรง เมื่อเทียบด้วยความยาวของสายอากาศที่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่เดิม สำหรับสายอากาศไดโพลแบบโค้ง จะต้องมีความยาวโดยรวมที่มากกว่าความยาวของสายอากาศไดโพลแบบตรง

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้น เพื่อให้สายอากาศสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงความถี่เนื่องจากการตัดโค้งได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดจากการตัดโค้งที่มีต่อสายอากาศชั้นเดียวและสองชั้น จากการพิจารณาสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นพบว่า เมื่อมีการตัดโค้งสายอากาศจะทำให้เกิดความแตกต่างกันเนื่องจากรัศมีการตัดโค้งที่ไม่เท่ากันของสายอากาศแต่ละชั้น โดยพบว่าสายอากาศชั้นนอกจะมีขนาดสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับขณะที่ไม่มีการตัดโค้งลดลง และสายอากาศชั้นในจะมีความยาวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4

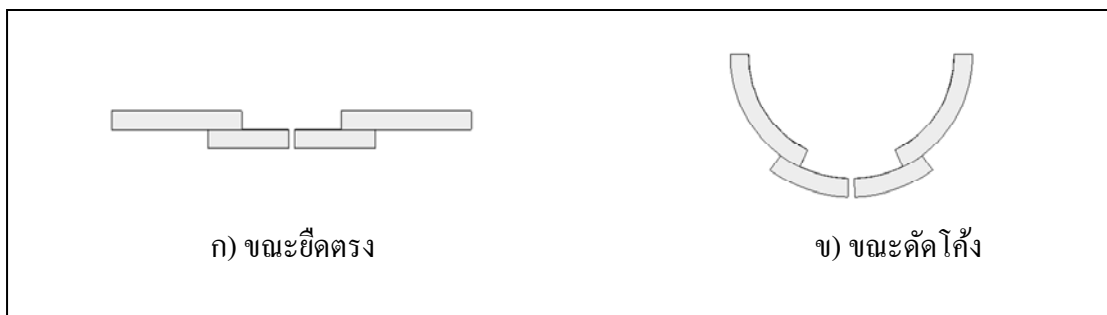


รูปที่ 4.4 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนขณะตัดโค้ง

ผลจากการตัดโค้งของสายอากาศสองชั้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวสัมพัทธ์ที่ไม่เท่ากัน จึงได้นำผลความแตกต่างดังกล่าวมาออกแบบเป็นสายอากาศสองชั้นแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยให้มีคุณสมบัติความยาวสัมพัทธ์มีเปลี่ยนแปลงตามค่ารัศมีการตัดโค้งของสายอากาศ โดยมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

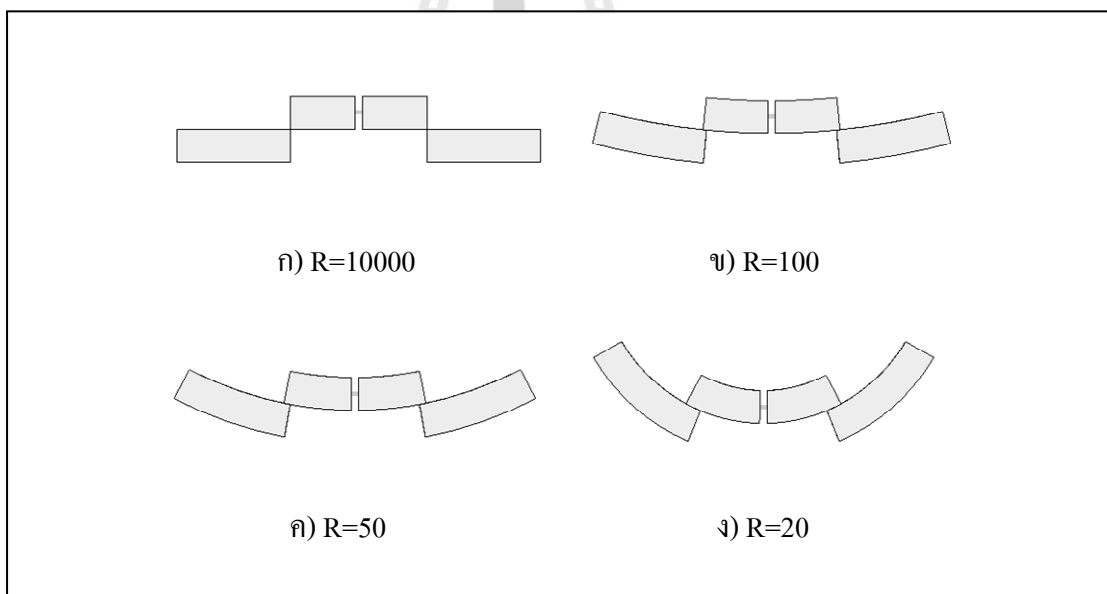


รูปที่ 4.5 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1

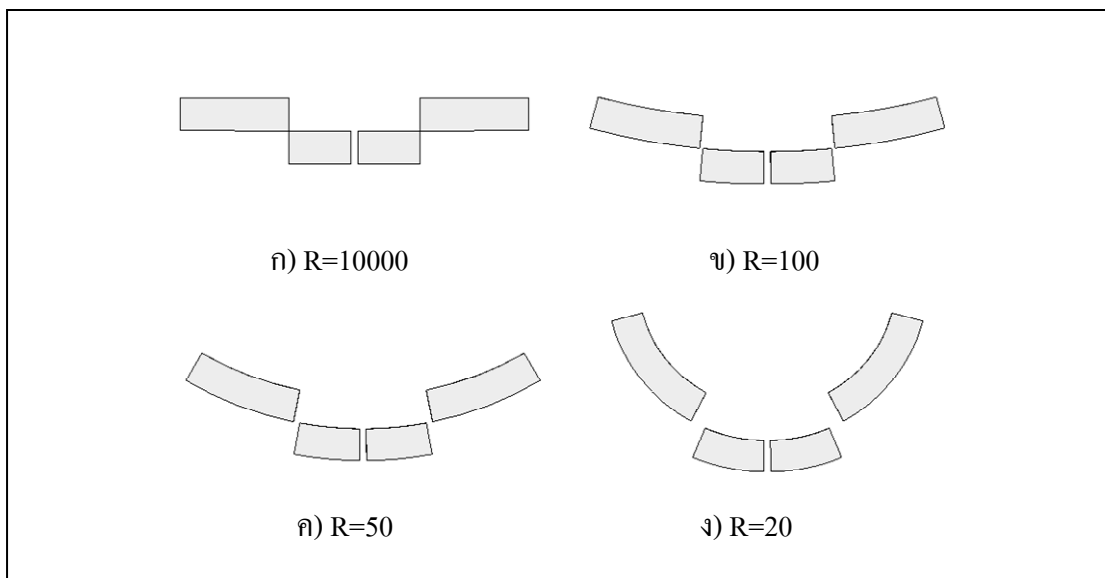


รูปที่ 4.6 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2

จากรูปที่ 4.5 เราสามารถดูความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าสายอากาศด้านนอกเมื่อมีการตัดโค้งมากขึ้น (รัศมีความโค้งลดลง) จะเกิดการทับซ้อนกับสายอากาศชั้นในมากขึ้น นั่นคือสายอากาศด้านนอกเมื่อตัดโค้งจะทำให้ความยาวโดยรวมของสายอากาศสั้นลง



รูปที่ 4.7 ความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลง ขณะตัดโค้ง ที่รัศมีความโค้งต่างๆ สำหรับสายอากาศไดโพล แผ่นแบนแบบที่ 1



รูปที่ 4.8 ความยาวสัมพัทธ์ของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงขณะตัดโค้ง ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบที่ 2

ทำนองเดียวกันสำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.8 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการตัดโค้งมากขึ้นจะมีผลต่างที่เกิดจากการตัดโค้งที่ไม่เท่ากันของสายอากาศทั้งสองชั้นทำให้เกิดช่องว่างเกิดขึ้น ดังนั้นในการออกแบบ จึงต้องมีการเพิ่มความยาวสายอากาศด้านนอกให้มากขึ้นเพื่อรองรับความแตกต่างที่เกิดขึ้น และเพื่อให้สายอากาศเกิดการซ้อนทับกันและเชื่อมต่อกันได้นั้นทำให้ความยาวสัมพัทธ์จะมีมากกว่าสายอากาศชั้นเดียวปกติเมื่อมีการตัดโค้ง นั่นคือ สายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบที่ 2 เมื่อตัดโค้งจะทำให้ความยาวโดยรวมของสายอากาศเพิ่มขึ้น

จากผลดังกล่าวสามารถคำนวณหาความยาวสัมพัทธ์ของสายอากาศทั้งสองแบบขณะที่ยังไม่มีการตัดโค้งได้ดังสมการ

$$L_{eff} = L_{ant} = 2 * (A + B + T) = 2 * (C + D + T) \quad (4.1)$$

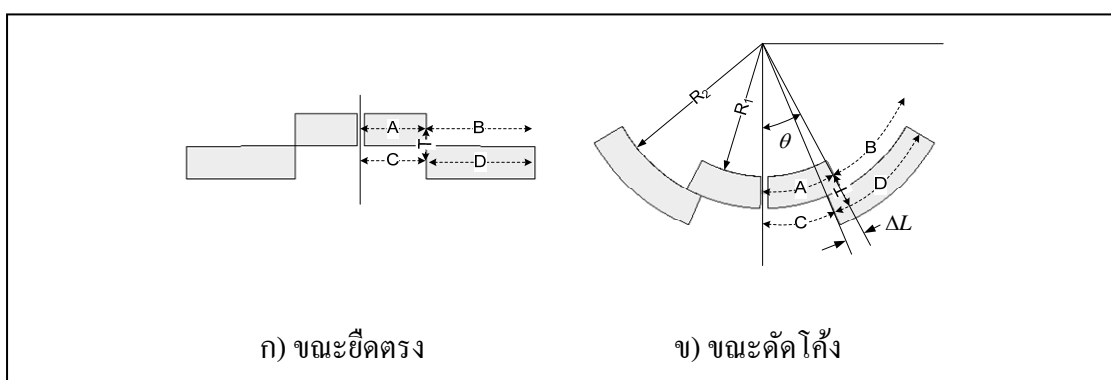
สำหรับผลต่างความยาวที่เกิดจากการตัดโค้งที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 สามารถคำนวณได้จากผลต่างความยาวเส้นโค้งของสายอากาศชั้นในกับยาวเส้นโค้งของสายอากาศชั้นนอกดังนี้

$$A = \frac{2\pi R_1 \theta}{360} \quad (4.2)$$

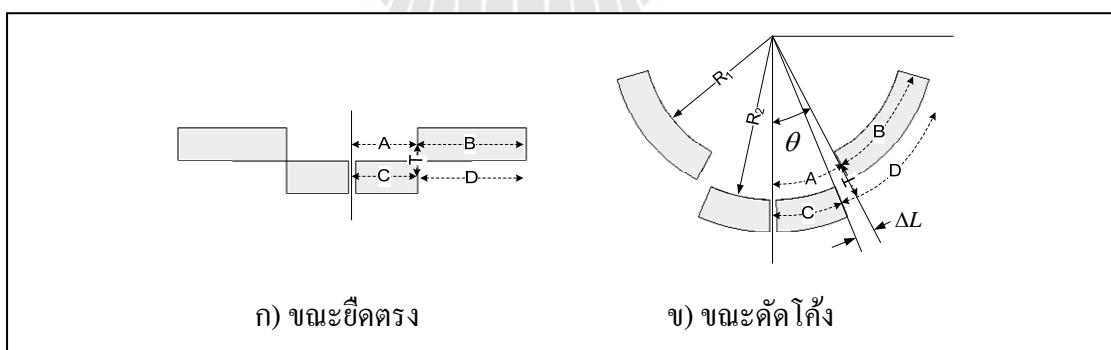
$$C + \Delta L = \frac{2\pi R_2 \theta}{360} \quad (4.3)$$

เนื่องจาก A และ C มีค่าเท่ากัน แทนที่ C ด้วย A จากสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.3 จะได้ว่า

$$\Delta L = \frac{2\pi\theta}{360} (R_2 - R_1) = \frac{2\pi\theta}{360} (T) \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.9 ความยาวสัมผัสของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1



รูปที่ 4.10 ความยาวสัมผัสของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2

และจากสมการที่ 4.2 เราสามารถเขียนได้เป็น

$$\theta = \frac{360}{2\pi} * \frac{A}{R_1} \quad (4.5)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 4.4 จะได้ว่า

$$\Delta L = \frac{A * T}{R_1} \quad (4.6)$$

จะเห็นได้ว่าการใช้สายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบสองชั้น จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความยาวสัมพันธ์ของสายอากาศ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขณะมีการตัดโค้งที่รัศมีต่าง ๆ โดยความยาวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะสัมพันธ์กับค่าความหนาของสายอากาศ และรัศมี ความโค้ง ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของสายอากาศทั้งสองแบบขณะที่มีการตัดโค้งได้ดังสมการ

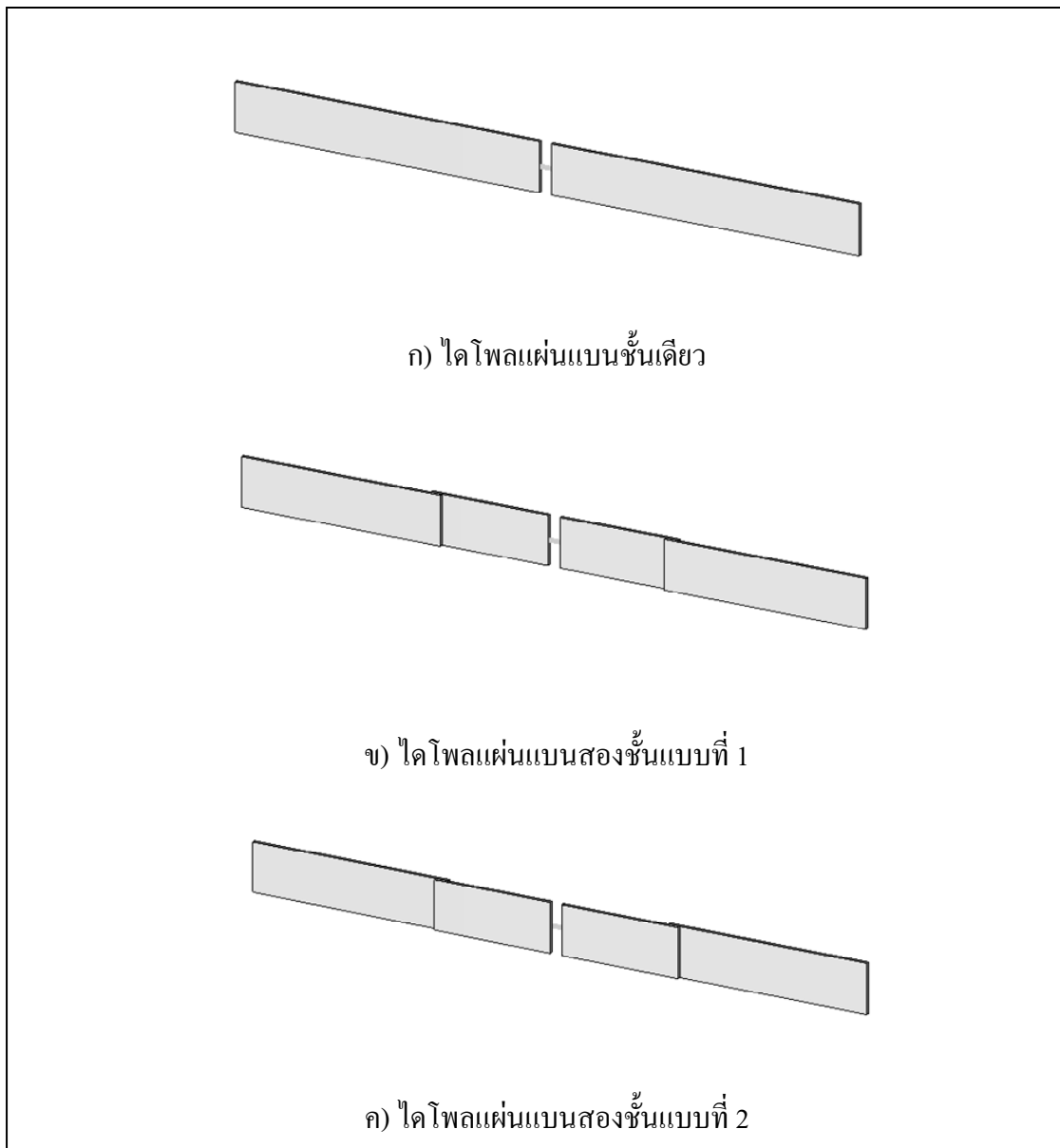
$$L_{eff, Type I} = 2 * (A + D + T - \Delta L) \quad (4.7)$$

$$L_{eff, Type II} = 2 * (C + B + T + \Delta L) \quad (4.8)$$

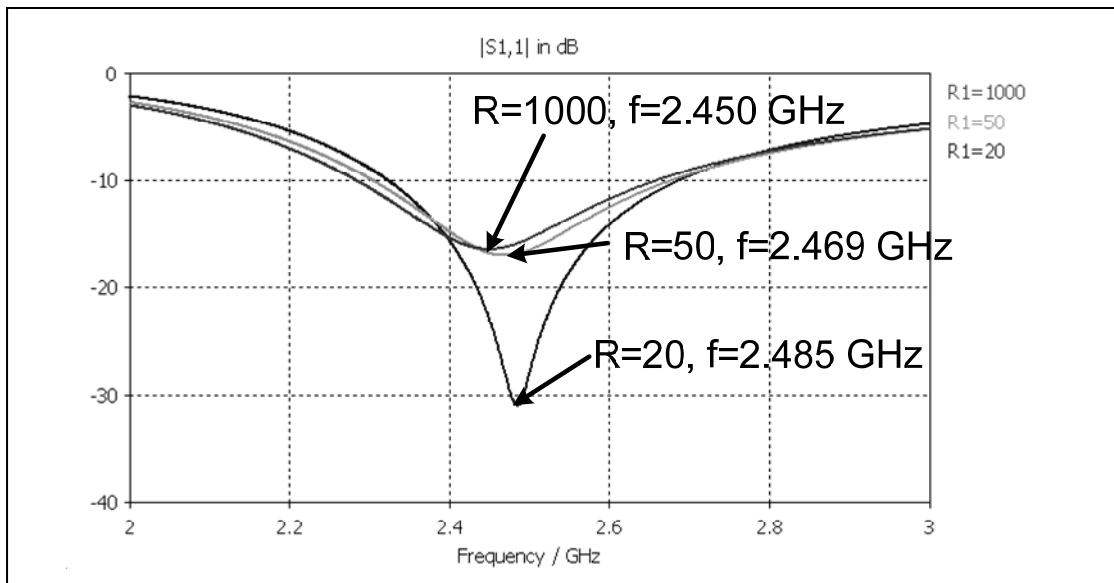
4.3 ผลการจำลองแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบน

จากการศึกษาสายอากาศไดโพลทั้งแบบชั้นเดียวและแบบสองชั้น พบว่าสายอากาศแบบสองชั้นแบบที่ 2 มีผลการตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าแบบแรก จึงนำผลที่ได้มาออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST และทำการปรับปรุงขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศจนได้สายอากาศที่เหมาะสมที่ความถี่ 2.45GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.11

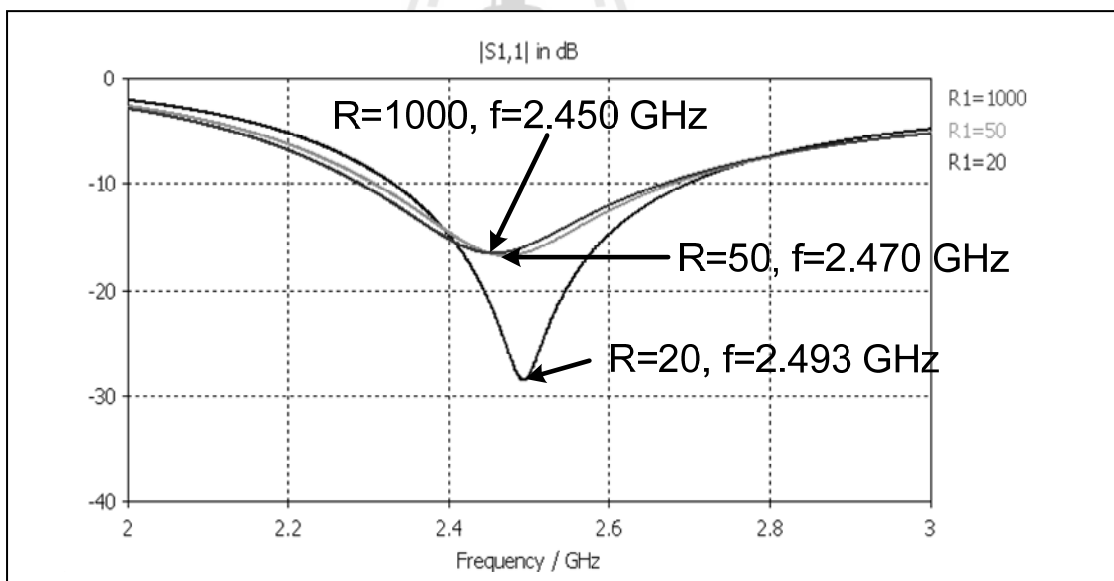
ผลที่ได้จากการจำลองแบบ สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียว สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยเปรียบเทียบขณะที่สายอากาศมีการตัดโค้งที่รัศมีต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.14 ตามลำดับ



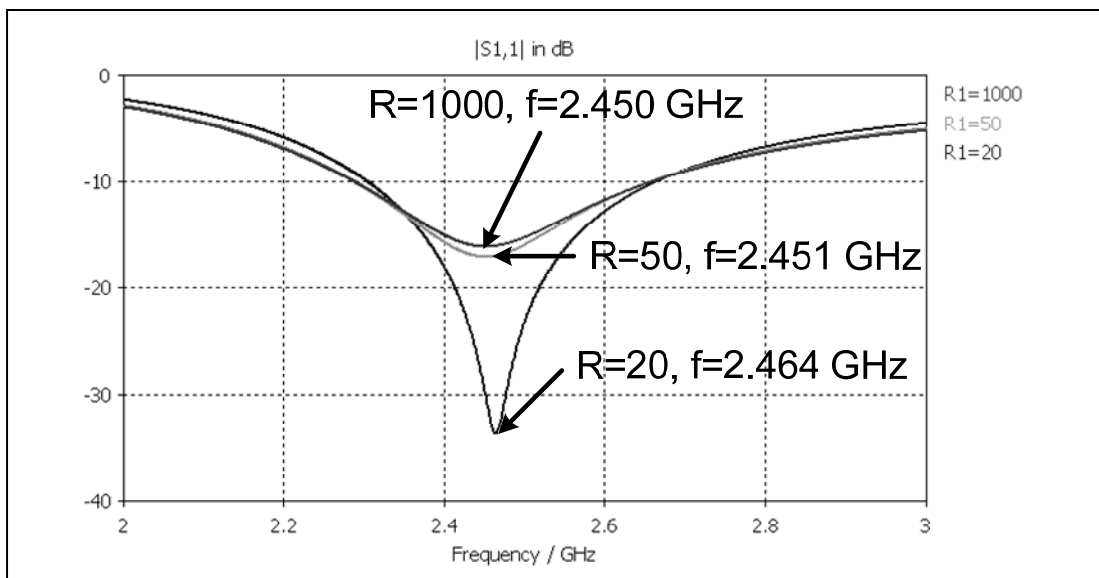
รูปที่ 4.11 แบบจำลองสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.12 กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 กราฟค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 ที่รัศมีความโค้งต่างๆ

ผลจากการจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวเมื่อมีการตัดโค้งจะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อตัดโค้งที่รัศมี 50 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเลื่อนจากความถี่ 2.45 GHz ไปที่ความถี่ 2.470 GHz และ 2.493 GHz ตามลำดับ และในรูปที่ 4.13 พบว่าสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 1 เมื่อมีการตัดโค้งจะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ 2.469 GHz และ 2.485 GHz ตามลำดับ ส่วนสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 เมื่อมีการตัดโค้งจะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ 2.451 GHz และ 2.464 GHz ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.14

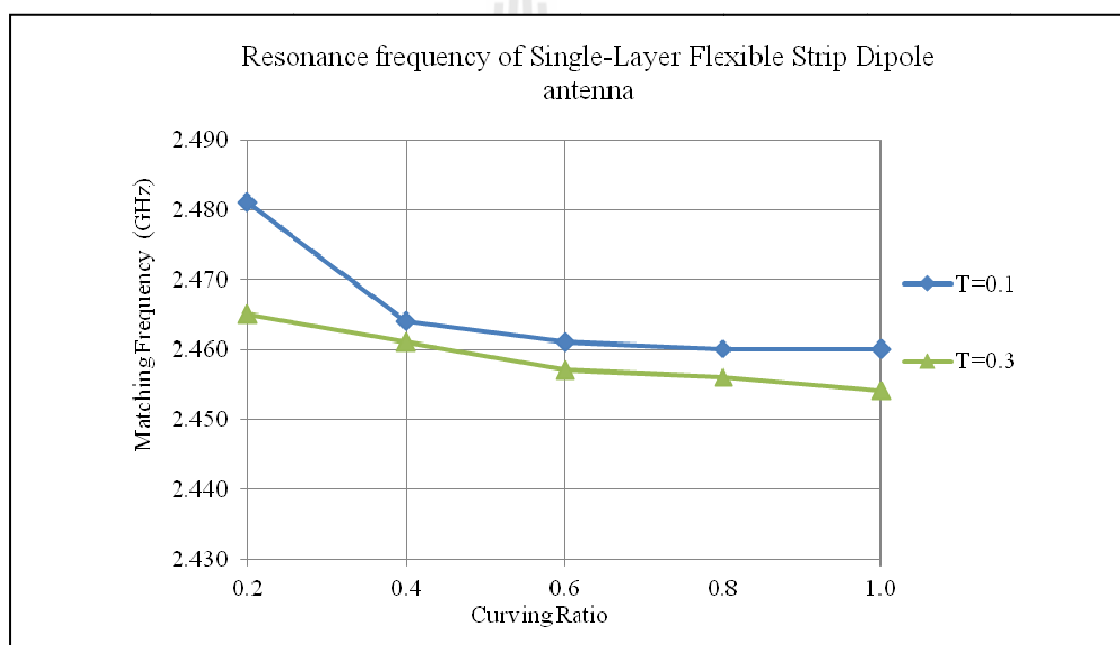
จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ความยาวของสายอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปขณะมีการตัดโค้งนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของสายอากาศ และเพื่อให้การตัดโค้งสายอากาศมีความเป็นเชิงเส้นต่อความถี่ของสายอากาศ จึงทำการเปรียบเทียบรัศมีความโค้งเทียบกับความยาวคลื่นของสายอากาศที่ทำการออกแบบโดยให้อัตราส่วนนี้มีค่าเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับโดยเมื่อคิดเป็นรัศมีความโค้งจริงมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

เมื่อทำการศึกษาผลของการจำลองแบบพบว่า สายอากาศมีการตอบสนองต่อความหนาของชั้นวัสดุที่นำมาใช้กับสายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15

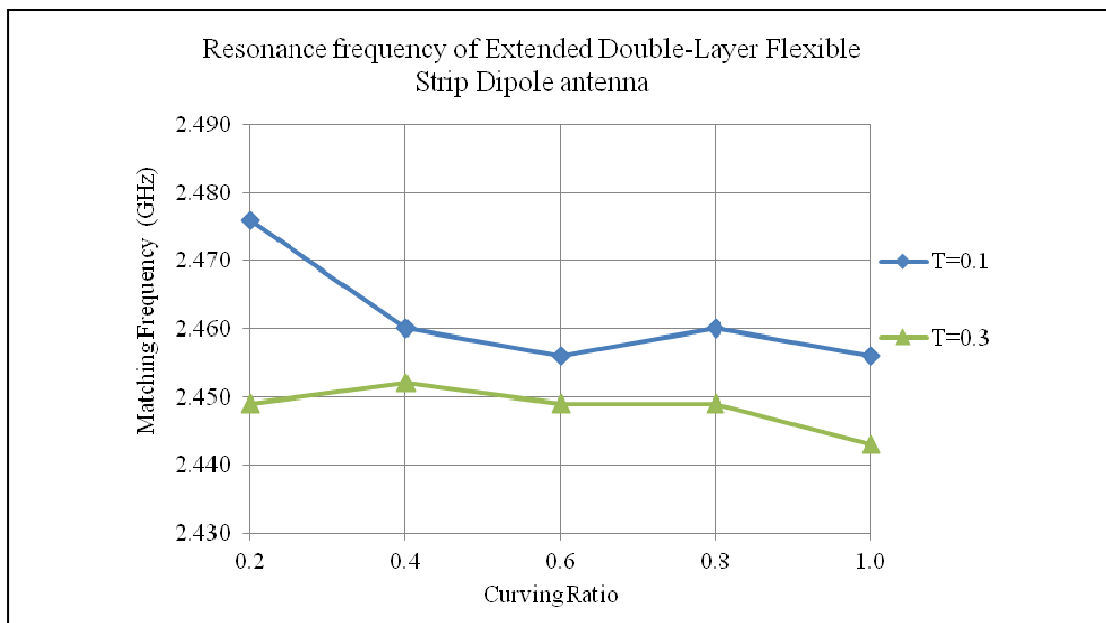
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนความโค้งและขนาดความโค้งจริง

อัตราส่วนความโค้ง*	ขนาดความโค้งจริง (มิลลิเมตร)
0.2λ	24.5
0.4λ	49.0
0.6λ	73.5
0.8λ	98.0
1.0λ	122.5

* $f_0 = 2.45$ GHz, $\lambda = 122.5$ มิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นบางชั้นเดียว ที่ความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศความหนา 0.1 และ 0.3 มิลลิเมตร



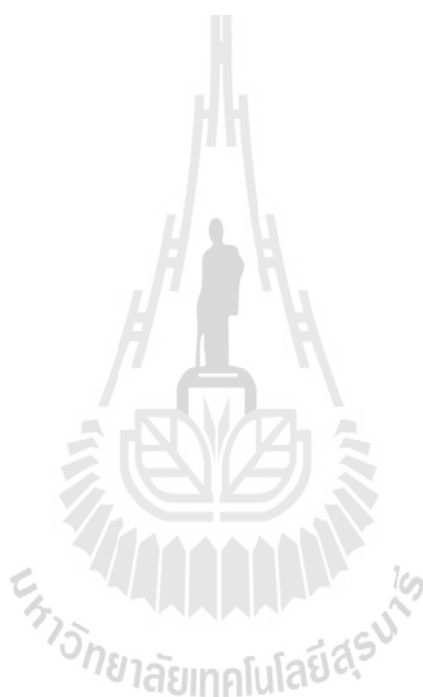
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นบางสองชั้น ที่ความโค้งต่าง ๆ สำหรับสายอากาศความหนา 0.1 และ 0.3 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่มีความหนาของชั้นวัสดุเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร จะให้ค่าผลตอบสนองทางความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าลดลงหรือต่ำกว่าสายอากาศที่มีค่าความหนาน้อยกว่าที่ความหนา 0.1 มิลลิเมตร และในทำนองเดียวกันสำหรับสายอากาศแบบสองชั้นชนิดที่ 2 ในรูปที่ 4.16 สายอากาศที่มีความหนามากกว่าก็ให้ผลลัพธ์ออกมาในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ สายอากาศที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตรเมื่อทำการดัดโค้ง จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าผลตอบสนองน้อยกว่าสายอากาศที่มีความหนาน้อยกว่า ที่ 0.1 มิลลิเมตรเมื่อทำการดัดโค้งที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ

4.4 สรุป

ในการศึกษาผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจากพื้นผิวโค้งที่เป็นทรงกระบอก ได้พัฒนาออกแบบสายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนแบบสองชั้น เพื่อให้ผลผลกระทบที่เกิดจากการดัดโค้งของสายอากาศ โดยจากผลการจำลองแบบที่ได้พบว่า สายอากาศไดโพลแผ่นแบนแบบสองชั้นแบบที่สองที่มีส่วนปลายของสายอากาศอยู่ด้านในและมีส่วนสายอากาศส่วนต้นอยู่ชั้นนอก จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าสายอากาศแบบอื่นเมื่อมีการดัดโค้ง นอกจากนี้แล้วยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของความหนาของวัสดุ

ที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ โดยพบว่าสายอากาศที่มีความหนามากกว่าจะให้ผลของการที่จะไปชดเชยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสายอากาศขณะที่มีการตัดโค้งได้มากกว่า ผลคือ สายอากาศที่ตัดโค้งที่มีความหนามากกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตอบสนองน้อยกว่าสายอากาศที่มีความหนาน้อยกว่า โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบนี้ จะได้นำไปสู่การเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดผลด้วยสายอากาศต้นแบบ และใช้วิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป



บทที่ 5

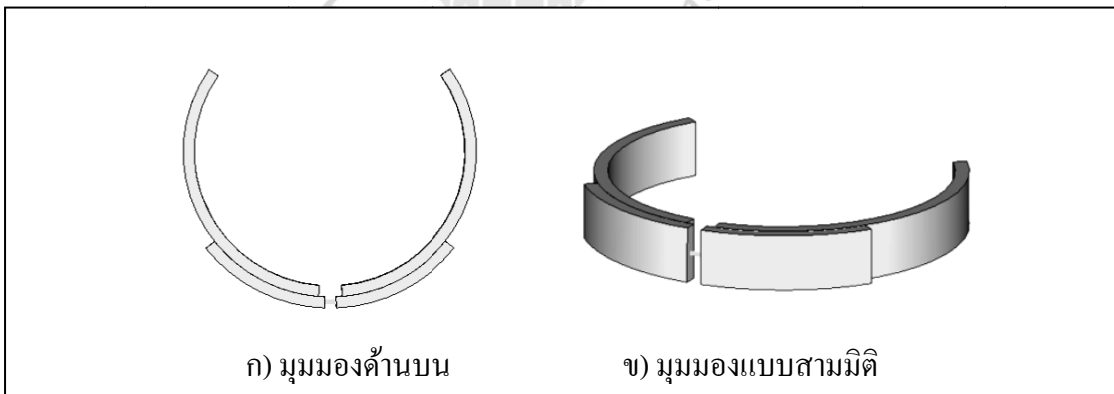
การวิเคราะห์และวัดผล

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบสายอากาศเพื่อใช้วัดค่าผลตอบสนองทางความถี่สายอากาศแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดี โดยอาศัยค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) รวมทั้ง โดยในการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการวัดค่าสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวและสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้น รวมทั้งวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ

5.2 การสร้างและวัดผลสายอากาศต้นแบบ

เนื่องจากการสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้น จำเป็นต้องทำให้สายอากาศทุกชั้นสามารถตัดโค้งและยังคงติดกันเป็นชั้นเดียวกัน จึงทำการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบเป็นแผ่นทองแดงที่มีการยึดส่วนสายอากาศชั้นในเข้าไปยังจุดกึ่งกลางสายอากาศ เพื่อใช้สำหรับการยึดติดสายอากาศเข้าด้วยกันระหว่างชั้นนอกกับชั้นใน โดยผลการออกแบบสายอากาศต้นแบบสำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1



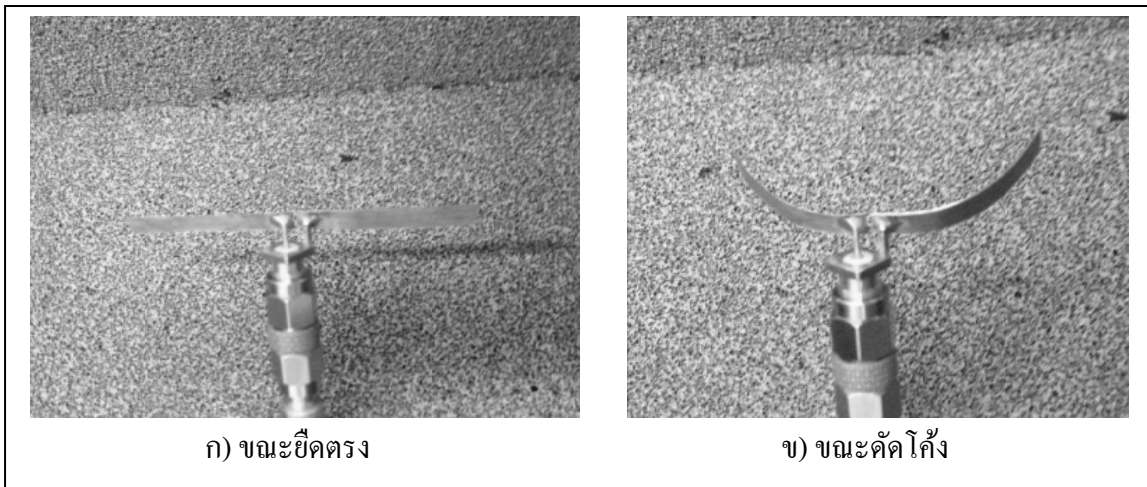
รูปที่ 5.1 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่มีการต่อเพิ่มส่วนขยาย

จากนั้นนำไปใช้สร้างแบบจำลองและทำการจำลองแบบและแก้ไขค่าขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศ หลังจากได้ผลลัพธ์จากการออกแบบด้วยแบบจำลองแล้ว นำผลที่ได้ไปใช้สร้างสายอากาศต้นแบบ สำหรับสายอากาศแบบชั้นเดียวจะมีขนาดความกว้างที่ 4 มิลลิเมตร ระยะห่าง

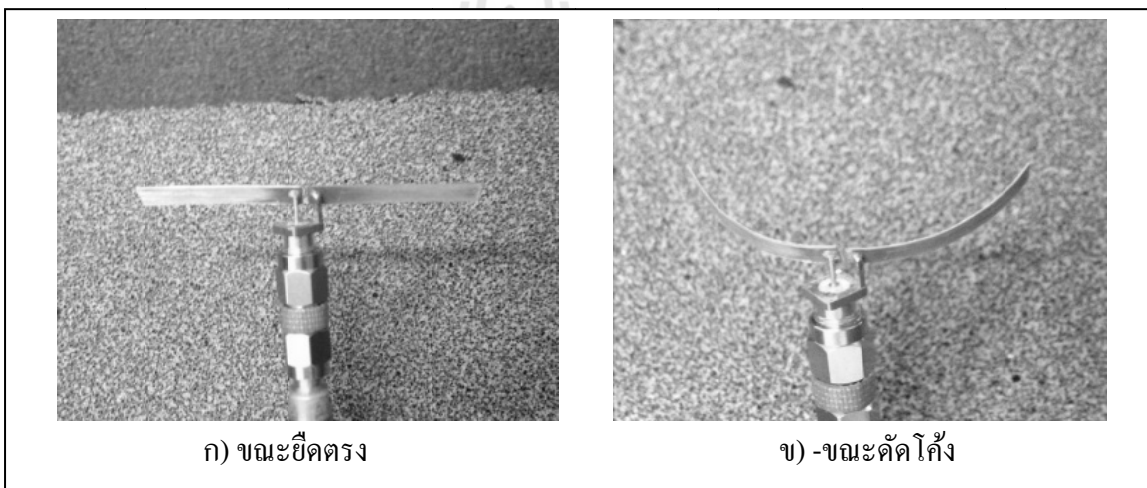
ช่องว่างระหว่างสายอากาศทั้งสองข้างอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร ความยาวแต่ละข้างยาว 27.5 มิลลิเมตร และสำหรับสายอากาศแบบสองชั้นความยาวของส่วน A และ C มีขนาดความยาวเป็น 15 มิลลิเมตร กว้าง 4 มิลลิเมตร ช่องว่างตรงกลางระหว่างสายอากาศชั้นนอก และชั้นใน มีค่าเป็น 2 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับความยาวของสายอากาศชั้นในจากการจำลองแบบอยู่ที่ 26.7 มิลลิเมตร โดยความยาวจริงที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบแบบชั้นเดียว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 27.5 ถึง 28.5 มิลลิเมตร และสายอากาศแบบสองชั้น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 26.5 ถึง 27.5 มิลลิเมตร เนื่องจากขั้นตอนการปรับค่าสายอากาศขณะยึดตรงก่อนทำการตัดโค้ง ให้มีผลตอบสนองทางความถี่อยู่ที่ 2.45GHz โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้น เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยสามารถเกิดได้จากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นความหนาของแผ่นทองแดงที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งแผ่น และเนื่องจากความไม่แน่นอนในการตัดชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม จากการวัดค่าสายอากาศต้นแบบแต่ละชั้น พบว่าความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก (น้อยกว่า 0.01 มิลลิเมตร) และความกว้างของสายอากาศแต่ละชั้นจะมีค่าความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.06 มิลลิเมตร ตลอดแนวความยาวสายอากาศ ดังนั้น ในการวัดผลในและปรับแต่งสายอากาศต้นแบบในขั้นตอนสุดท้าย จึงจำเป็นต้องมีการปรับขนาดความยาวของสายอากาศต้นแบบแต่ละชั้น โดยอาศัยการวัดค่าผลตอบสนองทางความถี่ให้มีค่าผลตอบสนองทางความถี่อยู่ที่ 2.45GHz โดยสายอากาศต้นแบบที่ได้แสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียว และในรูปที่ 5.4 และ 5.5 สำหรับสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นตามลำดับ

และเมื่อได้สายอากาศต้นแบบแล้ว จากนั้นจึงทำการวัดผลค่าความถี่ตอบสนองสายอากาศต้นแบบโดยการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D ในห้องที่มีการป้องกันการสะท้อนคลื่น (Anechoic Chamber) โดยทำการวัดเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศขณะยึดตรง และขณะตัดโค้ง ที่อัตราส่วนความโค้ง 0.2λ หรือคิดเป็นรัศมีมีความโค้งจริงที่ 24.5 มิลลิเมตร และผลการวัดดังแสดงในรูปที่ 5.6 และ 5.7

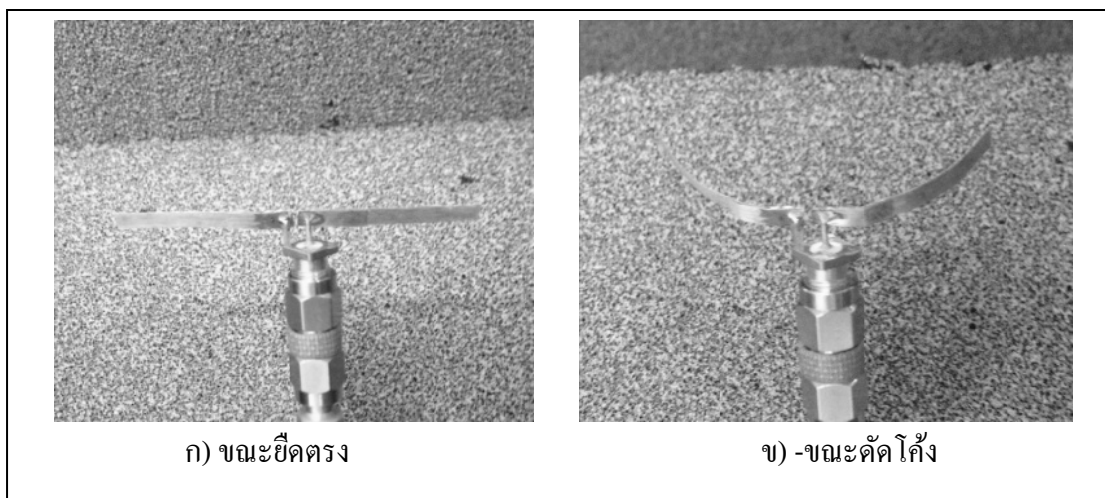
ผลที่ได้จากการวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่ามีผลลัพธ์สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองแบบ โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบที่วัดได้ สรุปไว้ดังตารางที่ 5.1



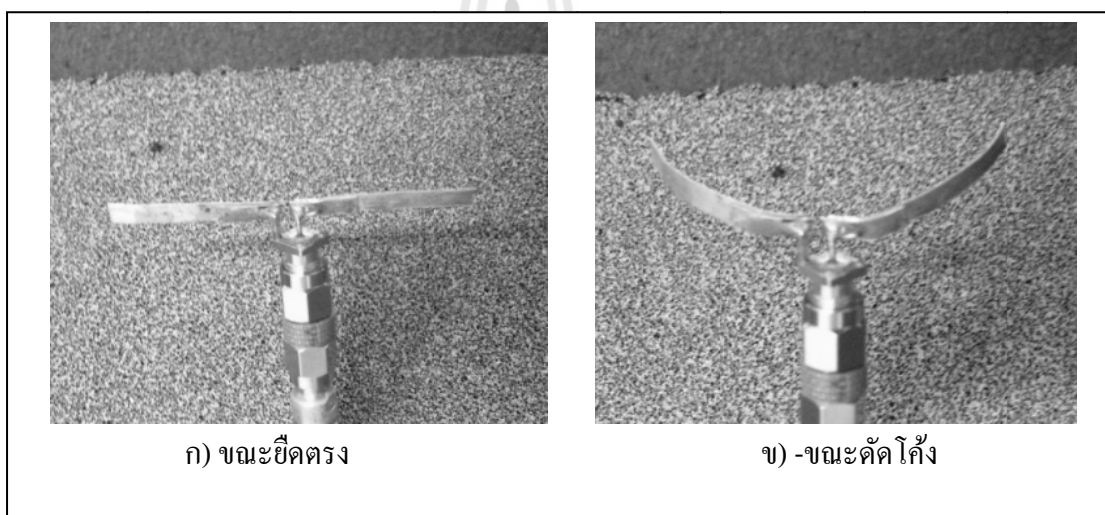
รูปที่ 5.2 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตร



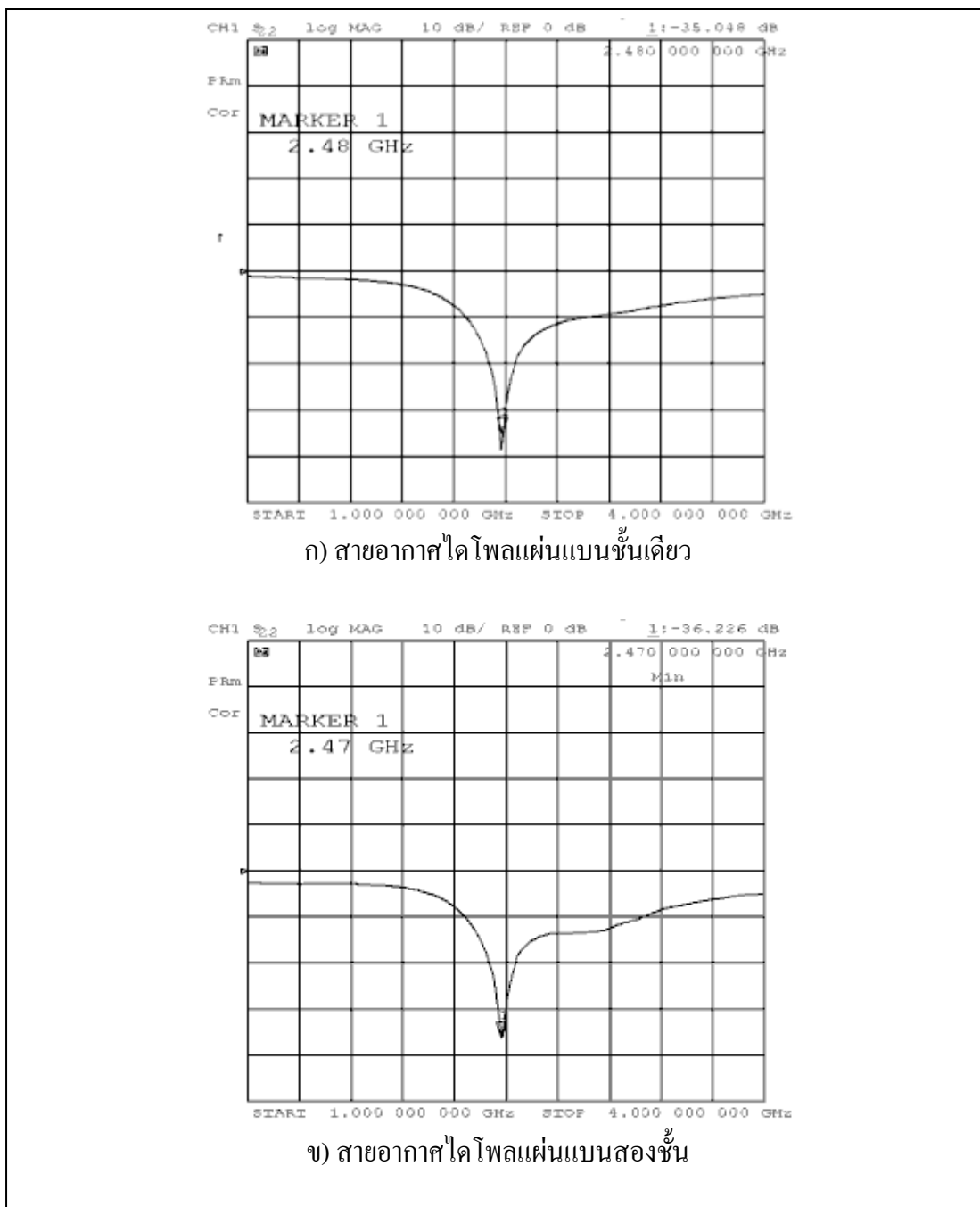
รูปที่ 5.3 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร



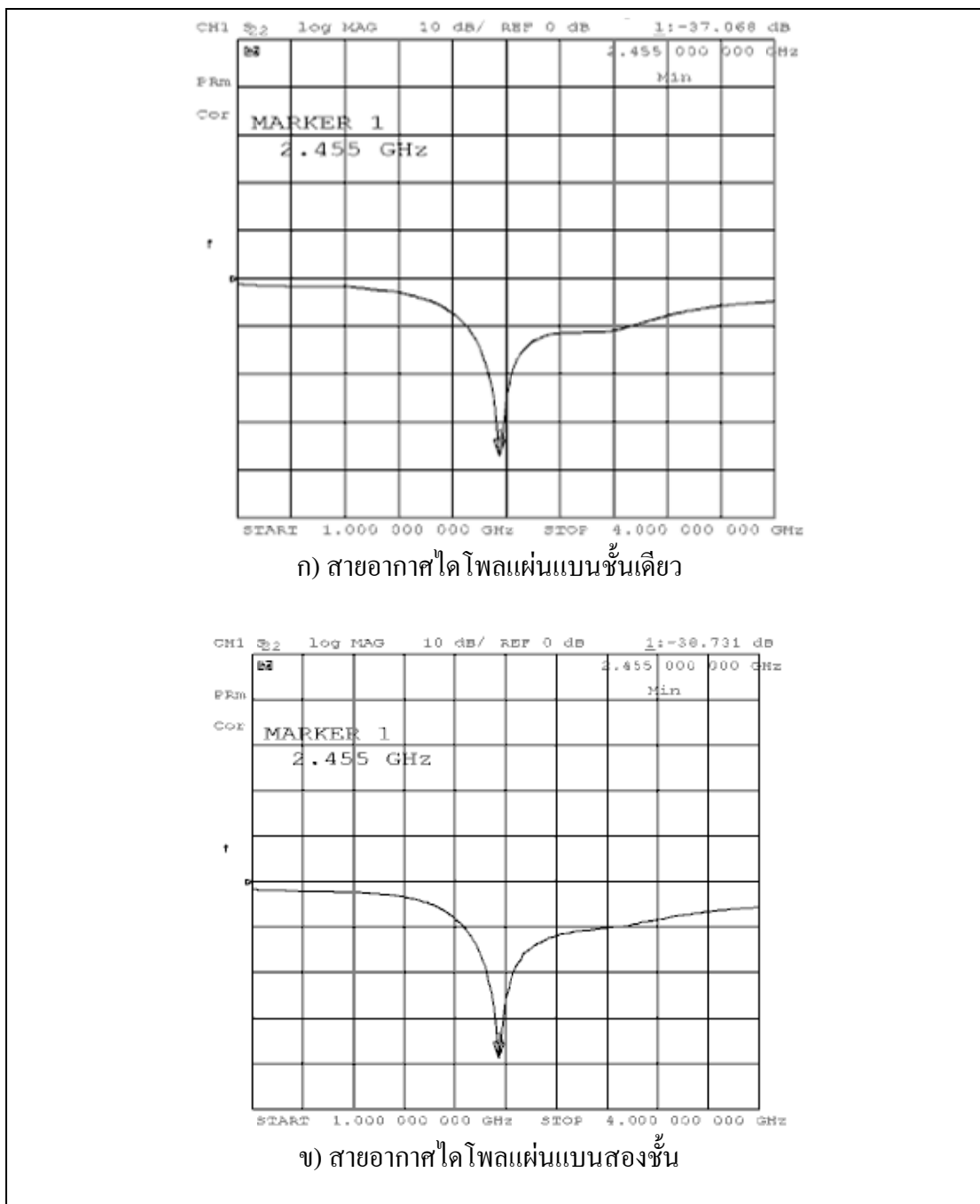
รูปที่ 5.4 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.5 สายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.6 ผลการวัดค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้วัสดุหนา 0.1 มิลลิเมตร
ขณะตัดโค้งที่รัศมี 24.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.7 ผลการวัดค่าค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ใช้วัสดุหนา 0.3 มิลลิเมตร
 ขณะตัดโค้งที่รัศมี 24.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.1 ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศต้นแบบ

ชนิดสายอากาศ	ความถี่เรโซแนนซ์ขณะยึดตรง	ความถี่เรโซแนนซ์ขณะตัดโค้งรัศมี 24.5 มิลลิเมตร	การเปลี่ยนแปลงความถี่
ไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวหนา 0.1 มม.	2.45GHz	2.480GHz	+0.030GHz
ไดโพลแผ่นแบนสองชั้นหนา 0.1 มม.	2.45GHz	2.470 MHz	+0.020GHz
ไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวหนา 0.3 มม.	2.45GHz	2.455GHz	+0.005GHz
ไดโพลแผ่นแบนสองชั้นหนา 0.3 มม.	2.45GHz	2.455GHz	+0.005GHz

5.3 สรุป

ผลจากการจำลองแบบพบว่าสายอากาศไดโพลแผ่นแบนชั้นเดียวเมื่อมีการตัดโค้งจะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไป ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะเลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงขึ้น และสายอากาศไดโพลแผ่นแบนสองชั้นแบบที่ 2 เมื่อมีการตัดโค้งจะทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ความถี่ที่สูงขึ้นเช่นกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าสายอากาศไดโพลแบบชั้นเดียว โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้วัสดุที่หนาขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความถี่ตอบสนองของสายอากาศมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงด้วย และเมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการวัดผลก็มีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ ซึ่งจากผลจากการวัดผลดังกล่าว เป็นการแสดงให้เห็นว่า การออกแบบสายอากาศแบบสองชั้นที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้นั้นสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการตัดโค้งของสายอากาศ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการนำเอาแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีไปใช้งานบนวัตถุที่มีพื้นผิวรูปแบบโค้งได้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ได้เอง โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสำหรับแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีจะมีการปรับค่าตัวเองให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่ถูกนำไปใช้งาน

โดยผลจากการศึกษา ทำให้ได้เทคนิคการออกแบบสายอากาศแบบสองชั้น โดยอาศัยคุณสมบัติของการที่วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ จะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ขณะที่มีการโค้ง กล่าวคือ วัสดุชั้นในที่มีรัศมีการโค้งน้อยกว่าจะทำให้มีการเพิ่มความยาวมากกว่าวัสดุชั้นนอกที่มีรัศมีการโค้งน้อยกว่า ทำให้เกิดผลต่างของความยาวของวัสดุแต่ละชั้นที่มีการโค้ง

จากผลการศึกษาที่ได้ ได้นำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยเลือกใช้สายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบนมาทำการปรับปรุง โดยการเพิ่มขึ้นของสายอากาศ และออกแบบให้เกิดผลของการโค้ง ให้มีการชดเชยกับความเปลี่ยนแปลงที่มีผลจากการโค้งตามปกติ จะทำให้อิมพีแดนซ์สายอากาศมีการเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้ความถี่ตอบสนองของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบชนิดที่สอง ที่มีชั้นวัสดุด้านในอยู่ที่ส่วนปลายของสายอากาศจะเกิดการยืดออกของความยาวโดยรวมของสายอากาศ ขณะที่โค้ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะทำให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป และจะทำให้มีความถี่ตอบสนองที่ต่ำลง ซึ่งก็จะไปชดเชยกับผลของการโค้งสายอากาศ ทำให้สายอากาศที่ได้ออกแบบ ให้ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ตอบสนองที่ดีกว่าสายอากาศแบบชั้นเดียวทั่วไป

นอกจากการออกแบบสายอากาศแบบสองชั้นแล้ว ได้ทำการศึกษาผลของขนาดของสายอากาศที่จะทำให้นิเทศการออกแบบที่ได้นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ โดยผลของการศึกษาพบว่า ความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ทำสายอากาศ จะมีผลกระทบต่อความสามารถในการชดเชยความถี่ตอบสนองของสายอากาศ อย่างมีนัยสำคัญ ดังที่ได้สรุปผลไว้แล้ว ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศแบบสองชั้นนี้ ยังต้องมีการพิจารณา ถึงความหนาของวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานและออกแบบสายอากาศด้วย เนื่องจากหากมีการใช้วัสดุที่บางเกินไป ก็จะทำให้ผลการชดเชยความถี่ตอบสนองมีค่าน้อยเกินไป จนไม่สามารถนำไปชดเชยกับผลที่เกิดจากการโค้งโดยตรงได้ และในทำนองเดียวกัน การใช้วัสดุที่หนามากเกินไป ก็จะทำให้

ให้การชดเชยมีมากเกินไป รวมทั้งทำให้สายอากาศมีความหนาเกินไป เกิดการสั้นเปลืองของวัสดุที่นำมาใช้ และยังทำให้สายอากาศคัดโค้งได้น้อยลงเนื่องจากสายอากาศที่หนามากด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

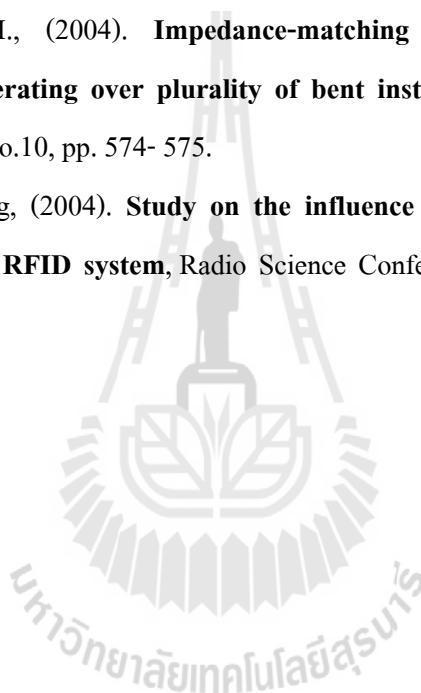
ในการศึกษาวิจัยในอนาคต ในหัวข้อ การออกแบบแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีบนพื้นผิวโค้งแบบต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ได้เอง สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษานี้ นำไปพัฒนาใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบอื่น ๆ ได้ อาทิ สายอากาศแบบแพทช์สี่เหลี่ยม แพทช์วงกลม หรือการเพิ่มจำนวนชั้นของสายอากาศ ให้มากขึ้นเป็น สายอากาศแบบหลายชั้น ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มขนาดความยาวสายอากาศขณะคัดโค้งได้มากขึ้น ตามจำนวนชั้นของสายอากาศที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิธีการศึกษาวิจัยและพัฒนา รวมถึงการวิเคราะห์และผลการทดลองจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้สนใจศึกษา และค้นคว้าในเรื่องของการออกแบบสายอากาศของแผ่นป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับใช้งานกับลักษณะของพื้นผิววัตถุที่แตกต่างกัน รวมทั้งการพิจารณาการออกแบบของสายอากาศที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และสายอากาศในแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

รายการอ้างอิง

- Bai, Qiang, Langley, and Richard, (2010). **Textile antenna bending and crumpling**, Antennas and Propagation (EuCAP), Proceedings of the Fourth European Conference on , vol., no., pp.1-4.
- Balanis, C. (2005). Antenna Theory (3rd Edition), Wiley.
- Deleruyelle, T., (2010). **RFID tag antennas with stable impedance to mounted material**, Microwave Conference (EuMC), vol., no., pp.1090-1093.
- Dobkin, D. M., (2008). The RF in RFID Passive UHF RFID in Practice, Elsevier Inc.
- Dong-Uk Sim, (2007). **Design of novel dipole-type tag antennas using electromagnetic bandgap (EBG) surface for passive RFID applications**, Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, vol., no., pp.1333-1336.
- Finkenzeller K., (2003). RFID Handbook, Wiley & Sons, 2nd editions.
- Foster, P.R., Burberry, R.A., (1999). **Antenna problems in RFID systems**, RFID Technology (Ref. No. 1999/123), IEE Colloquium on , vol., no., pp.3/1-3/5.
- Guo-Min Yang, (2009). **Tunable Miniaturized Patch Antennas With Self-Biased Multilayer Magnetic Films**, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.57, no.7, pp.2190-2193.
- Kamarudin, M.R., (2005). **Performance of antennas in the on-body environment**, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE , vol.3A, no., vol. 3A, pp. 475- 478.
- Kellomaki, T., Whittow, W.G., (2009). **Bendable plaster antenna for 2.45 GHz applications**, Antennas & Propagation Conference, (LAPC) Loughborough, pp.453-456.
- Keskilammi, M., Kivikoski, M., (2004). **Using text as a meander line for RFID transponder antennas**, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE , vol.3, no.1, pp.372-374.
- Leung, S.Y.Y., Lam, D.C.C., (2007). **Performance of Printed Polymer-Based RFID Antenna on Curvilinear Surface**, Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions, vol.30, no.3, pp.200-205.

- Salonen, Pekka, (2006). **Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth**, Antennas and Propagation, (EuCAP), First European Conference, pp.1-5.
- Siden, J., (2001). **Performance degradation of RFID system due to the distortion in RFID tag antenna**, Microwave and Telecommunication Technology, (CriMiCo) 11th International Conference, pp.371-373.
- Syed, A., (2007). **Effects of Antenna Material on the Performance of UHF RFID Tags**, RFID, IEEE International Conference, pp.57-62.
- Tikhov, Y., Won, J.H., (2004). **Impedance-matching arrangement for microwave transponder operating over plurality of bent installations of antenna**, Electronics Letters , vol.40, no.10, pp. 574- 575.
- Xiang Zhou, Gang Wang, (2004). **Study on the influence of curving of tag antennas on performance of RFID system**, Radio Science Conference, Proceedings, Asia-Pacific, pp. 54- 57.





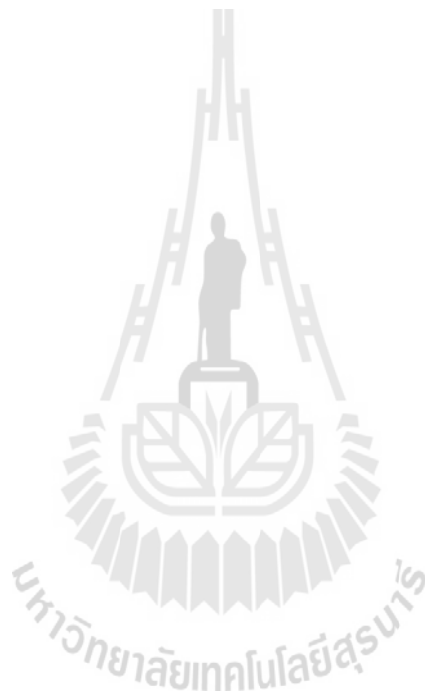
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Charinsak Saetiaw and Chanchai Thongsopa, "**Design of Double-Layer Copper Sheet for RFID Tags Antenna**," Advanced Materials Researches, Engineering and Manufacturing Technologies in Industry, Trans Tech Publications, V.787, P. 461-466, 2013



Multi-Layers Strip Dipole Antenna by Using Flexible Copper-Clad Laminate for UHF RFID Tags Antenna

Charinsak Saetiaw, Chanchai Thongsopa

Department of Engineering, Faculty of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

Abstract: This article presents the design of multi-layers strip dipole antenna by using flexible copper-clad laminate for UHF RFID tags antenna. The purpose of the paper is to design a flexible copper-clad laminate stacked; call Multi-Layers that suitable for curved on the cylindrical objects for UHF RFID system. The designed 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 each layer of antenna, so result of an extended length will prove a resonance frequency of antenna and make it has better efficiency compares to modern antenna when it is curved or attached to cylindrical objects. The multi-layer strip dipole antenna is designed at 920 MHz for UHF RFID applications.

Key words: Multi-layers strip dipole antenna, Flexible copper-clad laminate, UHF RFID tags antenna.

INTRODUCTION

The current system 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 money (Finkenzeller, 2010). 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, fast reading speed, and large information storage capability. RFID systems 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 for various kinds of products. The tag antenna can be printed onto flexible substrates (or so-called inlays). The flexible substrates of the tag antenna have been affected by various distortions when applying with different packages with non-flat 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 frequencies.

In this article, we introduce a novel structure of copper clad laminate with dielectric substrate stacking on layer by layer that has more efficiency than single layer for UHF RFID tag antenna and suitable for RFID applications. However, the tag RFID is mostly used as strip dipole antenna (Chen, 2007; Dobkin, 2007). Practically, strip dipole antenna property and efficiency including resonance frequency will be changed depending on the surface of the object it is lying on, may be rough or curved surfaces (Svanda and Polivka, 2007).

The analysis of curving the RFID tag antenna models by using a multi-layer antenna will be discussed. The result of curving will change the resonance frequency of antenna. Multi-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 each layer of antenna. So, result of an extended length will prove a resonance frequency of antenna and better efficiency compares to modern antenna.

This paper is organized into three sections. 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 multi-layer strip dipole antenna. In simulation section, a reflection coefficient of curved antenna in various radiuses and difference type of antenna are presented by result of simulations. The last section is the conclusion of the paper.

Basic Concept of Multi-Layers Strip Dipole Antenna:

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.

Corresponding Author: Charinsak Saetiaw, Department of Engineering, Faculty of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.
E-mail: charinsak_s@yahoo.co.th

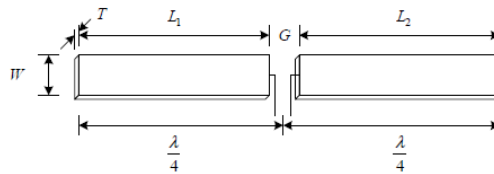


Figure 1. Schematic of microstrip dipole antenna.

Microstrip dipole of rectangular arm or rectangular geometry as shown in Fig. 1 can be designed for the lowest resonant frequency using transmission line model. Thus, L_1 equal to L_2 and gap between each arm of antenna is too small comparing to total length of antenna.

Fig. 2(a) and Fig. 2(b) present a structure of single sheet copper or single-layer. We can add more copper sheet stack into a structure called double-layer as shown in Fig. 2(c) and Fig. 2(d).



Figure 2. Schematic of copper sheet antenna. a) single sheet straight. b) single sheet curved. c) double sheet straight. d) double sheet curved.

Each layer has the same length when it is straight but the inner layer will be little longer than outer layer because the radius of each layer is not the same when it was curved as show in Fig. 2(d). 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 different length of each layer is equal to $(2\pi\theta/360)(R_2 - R_1)$. So, we can implement this changeable characteristic for tuning suitable properties of antenna. Normally, when a strip dipole has more length, its resonance frequency will decrease as well[3].



Figure 3. Schematic of double-layer flexible strip dipole type II antenna.

On the other hand, if the length is shorter than the original, the resonance frequency will increase. So, we design a double-layer strip dipole antenna that uses this physical change to compensate curving of antenna. Normally, double-layer flexible strip dipole antenna has been designed with two different types, type I has shorter inner layer than outer layer and type II has shorter outer layer than inner layer [8]. However, we only demonstrate type II as it provides good performance as shown in Fig.4

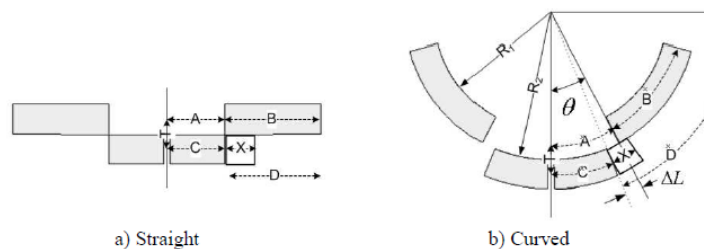


Figure 4. Diagram of double-layer flexible dtrip dipole antenna for calculates effective length.

From Fig. 4, the diagram created to demonstrate how we can calculate effective length of double layers flexible strip dipole antenna when it is straightened and curved with overlap section (X) as

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

The effective length (L_{eff}) of antenna from Eq. 1 is the same on left arm and right arm of antenna. However, the effective length changes when antenna is curved. We can estimate the effective length of double layers flexible strip dipole antenna as

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

From Eq. 2 and Fig. 4(b), the length of section A was fixed by physical structure. So, it would make section B move away from center rather than section D. This functioning affects on extension of length ΔL occurred. A different length can be calculated as follow.

$$\Delta L = \frac{2\pi\theta}{360} (R_2 - R_1) = \frac{2\pi\theta}{360} T \quad (3)$$

where $T = R_2 - R_1$ is thickness of antenna calculated from center of each layers. A positive sign in Eq. 2 means that the normal length has been extended. The CST-Microwave Studio [9] high frequency simulator is used as the simulation tool. From Eq. 1 and 2 agree with the simulation result that this model will not affect the overlap length (section X) and the middle section length (section A and C) if they are changed. it's mean to we can extended section B to the center for fabrication purpose. Therefore, we modified double-layer flexible strip dipole type II antenna model to an extended double-layer flexible strip dipole antenna as shown in Fig 5.



Figure 5. Extended double-layer flexible strip dipole antenna schematic.

This extended section of double-layer flexible strip dipole antenna is used as a fixed point in each layer connecting to each other at the center. So, this modified model will reduce additional supporting structures when fabricating a real antenna. The result of extended version will be shown in simulation and measurement. We implement this diagram to design the best performance of extended double-layer flexible strip dipole based on thin copper sheet. Typically, strip width less than $0.05\lambda_0$ for a micro-strip dipole. That is around 6.125 mm. for center frequency as 2.45GHz. So, a strip width is set to 4 millimeter. When antenna thickness is 0.1 millimeter, the length of the middle section (section A and C) is 15 millimeter and the end section (section B and D) is 26.7 millimeter; a gap of each layer is 2 and 4 millimeter for inner layer and outer layer, respectively.

Simulation Results

In Fig. 5, a structure of the extended double-layer flexible strip dipole antenna simulated by using CST. The antenna is laid on XY-plane and curve in XZ-plane. Some of antenna parameters effected the resonance frequency of the antenna. The most impact parameter is the overall length of the antenna (the length of the C plus D). Otherwise is the thickness and the width 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 effect to frequency bandwidth[7]. So, other value that less affects resonance frequency is the length of the overlap and the ratio of the length of the middle section (the length of section A).

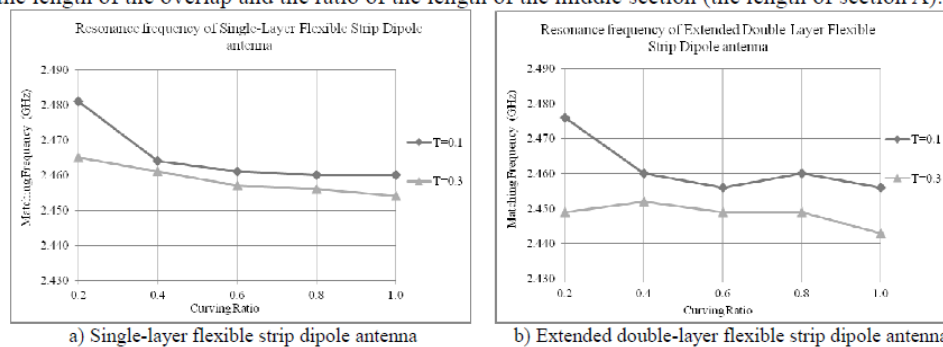


Figure 6. Resonance frequency with curving ratio for difference thickness (T).

The simulation result of using different curved radius is equal to a curving ratio multiplied by lambda of center frequency. In this case, center frequency is 2.45GHz. So, a lambda is equal to 122.5 millimeter. 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 ratio and thickness of single-layer flexible strip dipole antenna and extended double-layer flexible strip dipole antenna is shown in Fig. 6(a) and Fig. 6(b), respectively. Basically, resonance frequency increases higher when a single layer strip dipole antenna bends with curve as reported in [6] and [11]. So, a simulation reveals that single-layer flexible strip dipole antenna with thickness of 0.1 mm has resonance frequency at 2.481 GHz, 2.464 GHz, 2.461 GHz, 2.460 GHz and 2.460 GHz when curving ratio is 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 respectively. Next, an extended double-layer flexible strip dipole antenna with thickness of 0.1 mm has resonance frequency at 2.476 GHz, 2.460 GHz, 2.456 GHz, 2.460 GHz and 2.456 GHz when curving ratio is 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 respectively. On the other hand, a simulation result shows that single-layer flexible strip dipole antenna with thickness of 0.3 mm has resonance frequency at 2.476 GHz, 2.460 GHz, 2.456 GHz, 2.460 GHz and 2.456 GHz when curving ratio was 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 respectively. Lastly, a simulation of extended double-layer flexible strip dipole antenna with thickness of 0.3 mm has resonance frequency at 2.449 GHz, 2.452 GHz, 2.449 GHz, 2.449 GHz and 2.443 GHz when curving ratio was 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 respectively.

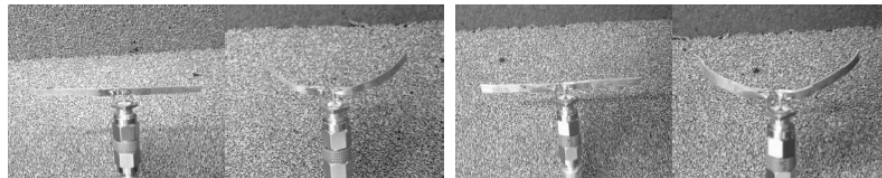
However, thickness of antenna is more important to stabilize a resonance frequency when it is curved. Extended double-layer strip dipole antenna, it can reduce increasing of a resonance frequency due to curving better than a single-layer strip dipole antenna.

Measurement Results

The prototype antenna is fabricated from copper sheet thickness of 0.1 and 0.3 millimeter to obtain different results from simulations. Other dimension of antenna is as same as simulation model. The result of a network analyzer HP8722D is used to search for resonance frequency from S11 result.

Practically, we can adjust the length of antenna to match resonance frequency when creating this prototype. Single-layer flexible strip dipole antenna and extended double-layer flexible strip dipole antenna with thickness of 0.1 and 0.3 is shown in Fig. 7(a) and Fig. 7(b) has a frequency resonance at 2.45 GHz.

A resonance frequency of single-layer flexible strip dipole antenna has increased to 2.480 GHz and 2.455 GHz for 0.1 and 0.3 antenna thickness after being curved approximately 24.5 millimeters or 0.2 curving ratio. For extended double-layer flexible strip dipole antenna with 0.1 in thickness, the resonance frequency increases to 2.470 GHz when being curved at a radius of 24.5 millimeter. For 0.3 millimeters of thickness, the resonance frequency increases to 2.455 GHz when being curved at a radius of 24.5 millimeter.



a) 0.1 mm thickness straight and curved

b) 0.3 mm thickness straight and curved

Figure 7. Prototype extended double-layer flexible strip dipole antenna used in the measurement.

The resonance frequency captured from Network Analyzer is shown in Fig. 8. This result is corresponding to the simulation result in section 3 that extended double-layer flexible strip dipole antenna has reduced increasing resonance frequency caused by curved antenna.

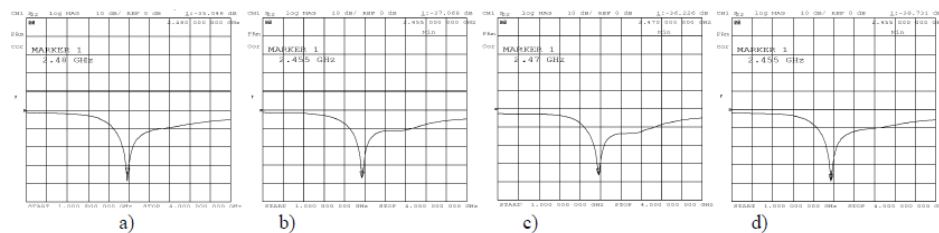


Figure 8. The reflection coefficient (S11) and resonance frequency when it curved at radius 24.5 millimeter. a) single-layer copper 0.1 mm thickness. b) single-layer copper 0.3 mm thickness. c) double-layer copper 0.1 mm thickness. d) double-layer copper 0.3 mm thickness.

Conclusion

This paper presents a design of double-layer copper sheet call extended double-layer flexible strip dipole antenna to improve the performance of bendable antenna suitable for RFID tags. The simulation of improvement achieved when the RFID tag antenna has curving characteristic. A design of antenna and effects of size on frequency (or the responded frequency of antenna) have been presented. The results of simulation will be implemented to design the appropriate and efficient antenna. According to the simulation, the extended double-layer flexible strip dipole antenna is more attractive than single-layer flexible strip dipole antenna because it has higher stability of resonance frequency when curving. However, stable resonance frequency is corresponding to thickness of antenna. Resonance frequency decreasing is affected by curving and thickness increases. Increasing of resonance frequency for extended double-layer flexible strip dipole antenna is less than the single-layer flexible strip dipole antenna with 0.2 curved ratios. Hence, the antenna has to be designed to match specific characteristics of object surfaces including material properties in order to improve RFID system performance

Acknowledgment

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand.

References

- [1] K. Finkenzeller, *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication*: Wiley, (2010).
- [2] Z. N. Chen, *Antennas for portable devices*: Wiley, (2007).
- [3] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: passive UHF RFID in practice*: Newnes, (2007).
- [4] M. Svanda and M. Polivka, "Dualband wearable UHF RFID antenna," in *The Second European Conference on Antennas and Propagation, 2007.*, (2007), pp. 1-5.
- [5] F. Alimenti, G. Orecchini, M. Virili, V. Palazzari, P. Mezzanotte, and L. Roselli, "Design of paper-substrate dipole antennas magnetically coupled to UHF RFID silicon chips," in *2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, (2011), pp. 219-222.
- [6] P. Salonen and Y. Rahmat-Samii, "Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 22 (2007), pp. 10-14.
- [7] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*: Artech House, (2001).
- [8] C. Saetiauw, C. Thongsopa, and A. Intarapanich, "RFID Tag Antenna Design Using Flexible Double-Layer Strip Dipole Antenna," in *International Symposium on Antennas and Propagation*, The Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea, (2011).
- [9] "CST-Microwave Studio," ed, (2009).
- [10] 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 *Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), 2005.*, (2005), p. 4 pp.
- [11] J. Siden, P. Jonsson, T. Olsson, and G. Wang, "Performance degradation of RFID system due to the distortion in RFID tag antenna," in *11th International Conference on Microwave and Telecommunication Technology, 2001.* (2001), pp. 371-373.

Advanced Materials Researches, Engineering and Manufacturing Technologies in Industry
10.4028/www.scientific.net/AMR.787

Design of Double-Layer Copper Sheet for RFID Tags Antenna
10.4028/www.scientific.net/AMR.787.461

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล : รองศาสตราจารย์ ดร. ชานชัย ทองโสภา

วันเดือนปีเกิด : 6 มีนาคม 2509 (สุพรรณบุรี)

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 7208 00098 92 5

รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ : 00040671

ตำแหน่งปัจจุบัน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และE-mail :

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์: 0-4422-4397

โทรสาร: 0-4422-4392

E-mail: chan@sut.ac.th

ที่อยู่ : 454/168 ม.ชนขอบ-ชั้นรัช ถ.รามอินทรา-วัชรพล แขวงคลองถนน
เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220
โทร. 08-1837-8185, 0-2994-2095

ประวัติการศึกษา 2545 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-สื่อสาร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2535 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยม
อันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบประกอบวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้าสื่อสาร, กฟส. 5514

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) การออกแบบวงจรความถี่สูง
- 2) ระบบสายอากาศ และสายอากาศแบบแอคทีฟ (Active antenna)
- 3) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง (Microwave Hypethermia)

รางวัลเกียรติคุณ

- 2533: โล่เกียรติคุณ จากกรมสื่อสารทหารอากาศ ในฐานะบุคคลดีเด่น
- 2534: โล่เกียรติคุณ จากกองทัพอากาศ ในฐานะบุคคลดีเด่น
- 2540: รางวัลวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 2546: รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น โรงเรียนช่างฝีมือทหาร
- 2551: โล่เกียรติคุณ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในฐานะบุคคลดีเด่น

สิทธิบัตร

1. การหลอมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้วัตถุดิบรีไซเคิลจากขยะชุมชน โดยขบวนการคลื่นแม่เหล็กและการบีบอัด เลขที่คำขอ 0501000290
2. สายอากาศแพตช์แนวตั้งคู่ที่มีสตริปเชื่อมอยู่ตรงกลาง เลขที่คำขอ 0701001929
3. เครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน เลขที่คำขอ 0901003816
4. เครื่องไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง เลขที่คำขอ 0901003815
5. เครื่องกำจัดลูกน้ำยุงโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เลขที่คำขอ 1001000444

ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย

- พ.ศ. 2535-2540 ตำแหน่งนักวิจัยบริษัทวิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด โดยมีผลงานดังต่อไปนี้
- การออกแบบระบบสื่อสาร หอบังคับการบินกับนักบิน
 - การออกแบบวิทยุรับ-ส่ง VHF, UHF (AM) 25 วัตต์ (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)
 - การออกแบบระบบวิทยุคลื่นสั้น HF (AM) 1kW (ระบบเปิดตลอด 24 ชั่วโมง)
- พ.ศ. 2540-2543 ตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโทรคมนาคม ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTE)
- เป็นที่ปรึกษาองค์กรโทรศัพท์แห่งประเทศไทยในโครงการ SDH
 - ผลงานการออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง
- ปัจจุบัน อาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บทความวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ

- 1) M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and A.Mearnchu, "A Steerable Active Applicator," Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, vol. 2, pp.861-864, Dec. 1998.
- 2) M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and C.Phongcharoenpanich, "A Steerable Active Spherical Slot Array Antenna," Proceedings of the 1999 Progress in Electromagnetics Research Symposium, Taipei, vol. 1, p.483, Mar. 1999.
- 3) M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, D.Srimoon and A.Mearnchu, "Analysis of Steerable Active Slot Array Applicator," Proceedings of the 1999 Asia-Pacific Microwave Conference, Singapore, vol. 2, pp.489-492, Dec. 1999.
- 4) M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, C.Phongcharoenpanich, E.Khoomwong and C.Leekpai, "A Steerable Spherical Slot Array Antenna," Journal Science Asia, vol. 25, no.4, pp.231-236,
- 5) **C.Thongsopa**, M.Krairiksh, N.Srirattana and A.Intarapanich, "A Single Patch Beam Steering Antenna," Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference, Sydney, pp. 1510-1513, Dec. 2000.
- 6) **C.Thongsopa**, M.Krairiksh and A.Mearnchu, " Analysis and Design of a Steerable Active Array Applicator," The First National Meeting on Biomedical Engineering, Bangkok Thailand, Sep. 2001
- 7) **C.Thongsopa**, M.Krairiksh, A.Mearnchu and D.Srimoon, "Analysis and Design of Injection Locking Steerable Active Array Applicator," IEICE Trans. Communications, vol.E 85-B, no 10, pp. 2327-2337, Oct, 2002.
- 8) **C.Thongsopa**, C. Jumniensri, and J.Wongmethanukro, "Beam Steering Using Single Patch Active Antenna," Proceedings of the 26th Electrical Engineering Conference, Thailand, pp.1796-1800, Nov. 2003.
- 9) **C. Thongsopa**, P. Jarataku, and P. Sukpong, "Wide Band U-Shaped cross section Antenna with a strip on a U-Shaped ground plane," IEEE Transactions on Magnetics, Beijing, China, pp.458-461, Apr. 2005.
- 10) P. Sukpong, **C. Thongsopa**, and P. Jarataku, "Injection-Locked Active Antenna Using a Dual Gate MESFET," The 4th PSU-Engineering Conference (PEC4), Songkhla, Thailand, pp. 50-54, December 8-9, 2005.
- 11) C. Thongsopa, A. Intarapanich, and C. Saetiaw, " Amplitude Modulation Using Injection Locking Oscillator Under Strong Envelop Variation Injection," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Tokyo, Japan, August 2006.

- 12) **C. Thongsopa**, “Array of A U-Shaped Element on A U-Shaped Ground Plane Wideband Antenna”, 2006 Asia-Pacific Conference on Communication, Bussan, Republic of Korea, 31 August-1 September 2006, 5D-145.
- 13) P. Jarataku, and **C. Thongsopa**, “2.45 GHz Bi- Directional Amplifier for Wireless LAN,” The 5th PSU-Engineering Conference (PEC5), Phuket, Thailand, pp.197-201, May 10-11. 2007.
- 14) **C. Thongsopa**, D.Srimoon, and P. Jarataku, “A U-Shaped Cross Sectional Antenna on a U-Shaped Ground Plane with an offset Parabolic Reflector for WLAN,” IEEE AP-S International Symposium 2007, Honolulu, Hawaii. USA, pp 5159-5162, Jun 10-15, 2007.
- 15) C. Saetiaw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, “Effect of Spatial Correlation with Directional Antenna on MIMO capacity,” 2007 International Symposium on Antenna and Propagation, Niigata, Japan, pp 1334-1337, August 20-24, 2007.
- 16) A. Intarapanich, **C.Thongsopa**, and C. Saetiaw, “Effect of Antenna Patterns on Narrowband MIMO capacity,” IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, Hangzhou, China, pp 160-163, August 14-16, 2007.
- 17) **C. Thongsopa**, and A. Intarapanich, “ Double injection Locking Active Antenna,” European Conference on Antennas and Propagation, (Eucap 2007) Edinburgh, UK, pp aa-bb, November 11-16, 2007.
- 18) P. Thosdee, and **C. Thongsopa**, “Quasi-Rhomboid Antenna for Ultra Wideband Wireless Communication System,” Proceedings of the 30th Electrical Engineering Conference, Kanchanaburi, Thailand, pp. aa-bb, October 25-26. 2007.
- 19) C. Saetiaw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, “Relations between 3-Dimensions Antenna Pattern and Narrowband MIMO Capacity,” Proceedings of the 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, Thailand, pp. aa-bb, December 11-14, 2007.
- 20) Maungrat, M., **Thongsopa,C.**, and Jarataku, P., “Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking,” *The 7th PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla, Thailand, pp. 97-100, May. 21-22, 2009.
- 21) Tangwachirapan, S., **Thongsopa,C.**, “Numerical Simulation of Magnetic Fields Shield for Breast Cancer Hyperthermia,” *The 7th PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla, Thailand, pp. 102-105, May. 21-22, 2009.

- 22) Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.**, “Analysis and Design of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz,” WSEAS Transactions on Communications, Issue 9, Volume 8, September 2009.
- 23) **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., “Array of Quasi Rhomboid Shaped Element Bowtie Antenna with Reflector for Ultra Wideband Applications,” *in proc.* The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009), Thailand, October 20-23, 2009.
- 24) **Thongsopa, C.**, and Saetiaw, C., “The Effect of 3D Antenna Radiation Pattern on Narrowband MIMO Capacity: Simulation and Measurement,” *in proc.* The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009), Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.
- 25) Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.**, “Simulations and Experiment of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz,” WSEAS Conferences AIC '09, ISCGAV '09, ISTASC '09, HTE '09, FMA '09, BEBI'09 Moscow, Russia, August 20-22, 2009.
- 26) **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Maungrat, M., “Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicles” *in proc.* 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC'09) Kyoto, Japan, July 20-24, 2009.
- 27) **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Tangwachirapan, S., “Shielding system for breast hyperthermia inductive heating” *in proc.* The XIVth International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering, (ISEF'09) Arras, France, Sep 10-12, 2009.
- 28) **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., “Development of Monocycle pulse Generator Circuit for Ultra Wideband Applications,” *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 29) Maungrat, M., and **Thongsopa, C.**, “Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking,” *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 30) Tangwachirapan, S., **Thongsopa, C.**, “Study Magnetic Fields Shield for Lossy Mediums Inductive Hyperthermia Heating,” *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference

(EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.

(The Best Paper Award in Biomedical Engineering).

- 31) Santalunai, S., and **Thongsopa, C.**, “High Power Amplifier Design for RF Induction Heating” *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 32) Yaemsuan, P., and **Thongsopa, C.**, “Design and Construction of Induction Heating Boiler Machine with Full-Bridge Inverter” *in proc.* 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 33) Saetiaw, C., **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Chinanupakorn, M., "Effect of Directional Antennas to Narrowband MIMO Capacity", 2010 International Workshop on Information Communication Technology (ICT 2010) , August 24 - 25, 2010 KMITL, Bangkok, Thailand.
- 34) **C. Thongsopa** and P. Thosdee, “*Development and Design of Mobile Jammer Systems,*” ECTI-CARD 2011, Bangkok, THAILAND (Best Paper award)
- 35) T. Phairat and **T. Chanchai**, “*Design of an UWB Quasi Rhomboid Shaped Element Bowtie Antenna for MIMO Applications,*” WCE 2011, IAENG, South Kensington campus, Imperial College London, U.K.
- 36) Phairat Thosdee, Montree Chinanupakorn and **Chanchai Thongsopa**, “*Design of Magnetic Shielding System for Cancer Treatment with Hyperthermia Inductive Heating,*” ISAP 2011, Lotte Hotel Jeju, Korea
- 37) Montree Chinanupakorn, Phairat Thosdee and **Chanchai Thongsopa**, “*Dual Band Quasi-Rhomboid Antenna for Bio-medical Monitoring Applications,*” ISAP 2011, Lotte Hotel Jeju, Korea
- 38) Montree Chinanupakorn, Phairat Thosdee and **Chanchai Thongsopa**, “*Design of Dual band Quasi-Rhomboid Antenna for Human On-body Applications,*” EE-CON 34th, Ambassador City Jomtien, Chonburi, Thailand
- 39) Thanaset Thosdeekoraphat and **Chanchai Thongsopa**, “*Development of Magnetic Shielding System for Breast Hyperthermia Inductive Heating,*” *IEEE Proceedings of*

Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC 2012), Hard Rock Hotel, Resorts World™ Sentosa, Singapore, 21-24 May 2012.

- 40) Thanaset Thosdeekoraphat, Samran Santalunai, and **Chanchai Thongsopa**, “Improved the Performance of Focusing Deep Hyperthermia Inductive Heating for Breast Cancer Treatment by Using Ferro-fluid with Magnetic Shielding System,” Trans Tech Publications, Applied Mechanics and Materials, Vols. 325-326, June 2013, pp. 353-358.
- 41) Thanaset Thosdeekoraphat and **Chanchai Thongsopa**, “The Optimization of Non-invasive Focused Deep Hyperthermia Inductive Heating for Breast Cancer Treatment by Using Nanoparticles and Magnetic Shielding System,” Australian Journal of Basic and Applied Sciences, June 2013. (อยู่ระหว่างการตีพิมพ์)
- 42) Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and **Chanchai Thongsopa**, “Thermal Analysis of Inductive Coils Array against Cylindrical Material, Steel for Induction Heating Applications,” Trans Tech Publications, Applied Mechanics and Materials, Vol. 330, June 2013, pp. 754-759.
- 43) Kongsak Ratniyomchai, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and **Chanchai Thongsopa**, “Optimization of Capacitor Copper Plate for Dielectric Heating to Eliminate Insect,” Trans Tech Publications, Applied Mechanics and Materials, Vol. 343, July 2013, pp. 101-105.