



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สายอากาศย่านความถี่คู่สำหรับติดตั้งบนยานพาหนะ  
Dual-Band Antenna for Vehicular Applications

รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายธีรพล ภัทรชัยสกุล

นายสิทธิชัย เด่นตรี

\* ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สายอากาศย่านความถี่คู่สำหรับติดตั้งบนยานพาหนะ  
Dual-Band Antenna for Vehicular Applications

รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายธีรพล ภัทรชัยสกุล

นายสิทธิชัย เต็นตรี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

12833253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สายอากาศย่านความถี่คู่สำหรับติดตั้งบนยานพาหนะ  
Dual-Band Antenna for Vehicular Applications

รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายธีรพล ภัทรชัยสกุล

นายสิทธิชัย เด่นตรี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) สายอากาศย่านความถี่คู่สำหรับติดตั้งบนยานพาหนะ.....

แหล่งเงิน แหล่งเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ 2557..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 60,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2556 ถึง กันยายน 2557.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์.....

นายธีรพล ภัทรชัยสกุล.....

นายสิทธิชัย เค้นศรี.....

บทคัดย่อ

รายงานนี้นำเสนอสายอากาศแท่งย่านความถี่คู่ออกแบบสำหรับการใช้งานกับกระบอก โดยทำงานในย่านความถี่เอชเอฟ (13.56 MHz) และย่านความถี่ยูเอชเอฟ (920-925 MHz) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการใช้งานของประเทศไทย โดยขนาดของสายอากาศแท่งเท่ากับขนาดบัตรเครดิต และมีขนาดโดยรวมเมื่อสายอากาศแท่งทำงานร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ  $147 \text{ mm} \times 73.5 \text{ mm} \times 8.3 \text{ mm}$  ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศแท่งให้ใช้งานกับกระบอกได้ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สายอากาศแท่งและโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าถูกออกแบบบนวัสดุฐานรอง FR-4 มีความหนาเท่ากับ 0.3 mm และ 3 mm ตามลำดับ ในการออกแบบสายอากาศแท่งร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้านั้นใช้เทคนิคการแมตซ์แบบขดวน การแมตซ์แบบทีคู่ และ โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรูปร่างคล้ายเห็ด สำหรับย่านความถี่เอชเอฟอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่ยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดี และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าตามลำดับ โดยในย่านความถี่ยูเอชเอฟสายอากาศที่นำเสนอมีคุณสมบัติ  $|S_{11}|$  (dB) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 919.71 MHz ถึง 925.68 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งคูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $80^\circ$  และ  $110^\circ$  ตามลำดับ มีอัตราขยายเท่ากับ 4.31 dBi ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีระยะการอ่านข้อมูลไกลสุด 13.5 m

คำสำคัญ: ย่านความถี่คู่ สายอากาศ ช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Dual-Band Antenna for Vehicular Applications.....

**Researcher:** Mr. Chuwong Phongcharoenpanich Mr. Teerapol Phatarachaisakul and Mr. Sitthichai Dentri

**Faculty:** Engineering..... **Department:** Telecommunication Engineering.....

## ABSTRACT

This report proposes a dual-band tag antenna designed for a glass object for HF-RFID (13.56 MHz) and UHF-RFID (920-925 MHz) applications corresponding to Thailand standard. The proposed tag antenna has the same size with a credit card. The size of the tag antenna with EBG is 147 mm × 73.5 mm × 8.3 mm. The purposes of the designed antenna are to apply the tag antenna on a glass and to achieve the unidirectional beam. The tag antenna and EBG are designed on FR-4 substrate with thickness of 0.3 mm and 3 mm, respectively. To achieve the dual band operation, the designed tag antenna with EBG structure is based on the loop (spiral coil), the meander-line structure with double T-matching and mushroom-like EBG structure for HF, UHF and EBG, respectively. The operating frequency of the proposed antenna is from 919.71 to 925.68 MHz ( $|S_{11}|$  (dB) < -10 dB). The radiation pattern is unidirectional beam and the half-power beamwidths in XZ-plane and YZ-plane are 80° and 110°, respectively. The gain is 4.31 dBi at 922.5MHz. The maximum read range is about 13.5 m.

**Keywords:** Dual-band, antenna, and EBG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน  
งบบุณวิจัยประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ขอขอบคุณทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทดสอบ และให้คำปรึกษา  
รวมถึงเทคนิคต่างๆที่สามารถนำมาใช้ในการทำโครงการวิจัยนี้



นายชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์.....

นายธีรเมธ ภัทรชัยสกุล.....

นายสิทธิชัย เเด่นตรี.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 รายละเอียดของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ความเป็นมาของระบบอาร์เอฟไอดี.....	4
2.3 เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี.....	4
2.3.1 แท็ก.....	5
2.3.1.1 ส่วนประกอบของแท็ก.....	5
2.3.1.1.1 แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง (Substrate).....	5
2.3.1.1.2 สายอากาศแท็ก (Tag Antenna).....	6
2.3.1.1.3 ชิปวงจรรวม (IC chip).....	7
2.3.1.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการขงการส่งพลังงานไปยังแท็ก.....	7
2.3.1.2.1 แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive tag).....	8
2.3.1.2.2 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag).....	9
2.3.1.2.3 แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag).....	10
2.3.2 การจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุย่านสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิ.....	11
2.3.3 มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดี.....	12
2.3.4 ระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่เอชเอฟ (Ultra High Frequency RFID Systems).....	14
2.3.5 ระบบอาร์เอฟไอดีที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-field RFID).....	16
2.3.5.1 หลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล.....	16
2.3.5.1.1 การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล.....	17
2.3.5.1.2 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.5.2 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล(Effective Radiated Power: ERP).....	20
2.3.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Power transmission coefficient).....	21
2.3.5.4 สัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ (Polarization matching coefficient).....	23
2.3.5.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	23
2.3.5.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency).....	24
2.3.5.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain of antenna).....	24
2.3.5.8 ความไวของชิพวงจรรวม (Sensitivity of IC chip).....	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	25
2.4.1 สายอากาศแท่งย่านความถี่คูในระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ ที่มีขนาดกะทัดรัดหน้าเดียว.....	25
2.4.2 สายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบายนพาหะขณะเคลื่อนที่.....	26
2.4.3 การออกแบบสายอากาศแท่งระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทียูคูแถบความถี่กว้าง.....	27
2.4.4 การออกแบบสายอากาศแท่งโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	27
2.5 สรุป.....	29
<b>บทที่ 3 หลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟ.....</b>	<b>30</b>
3.1 บทนำ.....	30
3.2 หลักการการออกแบบและการแมตช์สายอากาศแบบขดวน.....	30
3.2.1. สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ.....	30
3.2.2. สายอากาศแบบขดวน N รอบ แกนอากาศ.....	32
3.3 การออกแบบสายอากาศแบบขดวน.....	33
3.4 การจำลองสายอากาศแท่งแบบขดวน.....	35
3.5 บทสรุป.....	37
<b>บทที่ 4 หลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่ยูเอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....</b>	<b>38</b>
4.1 บทนำ.....	38
4.2 หลักการการออกแบบและการแมตช์สายอากาศ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1 หลักการสำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์แบบสังยุค.....	38
4.2.1.1 การแมตช์แบบที.....	39
4.2.1.2 การแมตช์แบบทีคู่.....	40
4.3 หลักการการออกแบบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	41
4.3.1 รูปแบบวงจรรีโซแนนซ์สำหรับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	41
4.3.1.1 แบบตัวกลางที่มีประสิทธิผลด้วยวงจรสมมูลที่มีองค์ประกอบเป็นอุปกรณ์กลุ่มก้อน LC.....	42
4.4 การออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟและโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	43
4.5 การศึกษาค่าพารามิเตอร์.....	50
4.5.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ $L_s$ และ $W_s$ .....	50
4.5.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ $C_s$ .....	50
4.5.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ $C_d$ .....	51
4.5.4 การปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศแท่งกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	52
4.6 การจำลองสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	53
4.6.1 ค่าอิมพีแดนซ์.....	53
4.6.2 ค่า $ S_{11} $ (dB).....	54
4.6.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	54
4.6.4 อัตราขยาย.....	55
4.7 บทสรุป.....	55
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	56
5.1 บทนำ.....	56
5.2 โครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบ และการจัดเตรียมการทดสอบ.....	56
5.2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ.....	59
5.3 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	61
5.3.1 การทดสอบสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ.....	63
5.3.1.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	63
5.3.2 การทดสอบสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ.....	64
5.3.2.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	65
5.3.2.2 ค่า $ S_{11} $ (dB).....	66
5.3.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	66
5.3.2.4 อัตราขยาย.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศ.....	68
5.4.1 อุปกรณ์ในการวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศ.....	68
5.4.2 การวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศ.....	69
5.5 บทสรุป.....	70
บทที่ 6 บทสรุป.....	71
6.1 บทนำ.....	71
6.2 สรุปเนื้อหาทางวิจัย.....	71
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท่ง.....	11
2.2	ความถี่วิทยุที่นำมาใช้ในงานด้านต่างๆ สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี.....	12
2.3	มาตรฐานของ EPC Global.....	13
2.4	มาตรฐานของ ISO.....	14
2.5	มาตรฐานความถี่เอชเอฟของระบบอาร์เอฟไอดีที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ...	15
2.6	สรุปคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	28
3.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	35
4.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	47
4.2	พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ.....	49
5.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ.....	57
6.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ.....	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก.....	5
2.2	องค์ประกอบพื้นฐานภายในชีพวงจรรวม.....	7
2.3	แท็กชนิดพาสซีฟในรูปแบบต่างๆ .....	8
2.4	หลักการทํางานของแท็กชนิดพาสซีฟ.....	8
2.5	แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ.....	9
2.6	หลักการทํางานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ.....	9
2.7	สายอากาศแท็กชนิดแอ็กทีฟ.....	10
2.8	หลักการทํางานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ.....	10
2.9	กําลังงานและกลไกการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีบริเวณสนาม ระยะไกล.....	17
2.10	กําลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก.....	20
2.11	กําลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรรวมมูล.....	21
2.12	โครงสร้างสายอากาศแท็กย่านความถี่คู่ในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ ที่มีขนาดกะทัดรัดหน้าเดียวที่ถูกนำเสนอ.....	25
2.13	โครงสร้างสายอากาศแท็กย่านความถี่ยูเอชเอฟและจัดวางสายอากาศที่ถูก นำเสนอ.....	26
2.14	รูปถ่ายสายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบุยานพาหนะขณะเคลื่อนที่ ที่ถูกนำเสนอ.....	26
2.15	โครงสร้างสายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทีกู่แถบความถี่กว้างที่ถูก นำเสนอ.....	27
2.16	โครงสร้างสายอากาศแท็กโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบ แม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกนำเสนอ.....	28
3.1	รูปแบบต่างๆ ของสายอากาศขดลวดของแท็ก.....	30
3.2	สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ ในการคํานวณค่าความต้านทาน.....	31
3.3	สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ ในการคํานวณค่ารีแอ็กแตนซ์.....	32
3.4	สายอากาศแบบขดวน N รอบ.....	33
3.5	โครงสร้างสายอากาศแท็กต้นแบบ.....	34
3.6	ค่าความต้านทานของสายอากาศแท็กต้นแบบ.....	35
3.7	ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศแท็กต้นแบบ.....	36
3.8	ค่าความต้านทานของสายอากาศจากการจำลองเทียบกับการคํานวณ.....	36
3.9	ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศจากการจำลองเทียบกับการคํานวณ.....	37
4.1	โครงสร้างของแมตซ์แบบที่สำหรับไดโพลแบบระนาบและวงจรรวมมูล เมื่อ อิมพีแดนซ์แปรผันตามอัตราส่วน $(1 + \alpha)$ ที่เกี่ยวข้องกับตัวนำตามขวาง. โครงสร้างสายอากาศแผ่นรูปตัววีซึ่งความถี่กว้างที่มีการโพลาริซวงกลมที่ถูก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เสนอไว้สำหรับกรรไ้งงวนเพื่อลกรรศิดนวนเท่านั้น ไม่นอนนฤวดใ้บ่นวใ้ใ้งระโยชน์ด้า 40 รค้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	โครงสร้างของแมตซ์แบบที่คู่สำหรับไดโพลแบบระนาบ.....	41
4.3	รูปเรขาคณิตของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	41
4.4	พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
4.5	แบบ LC ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
4.6	การวางองค์ประกอบของสายอากาศแท่ง.....	43
4.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง.....	44
4.8	การวางองค์ประกอบของสายอากาศแท่งติดกับกระจก.....	44
4.9	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งติดกับกระจก.....	44
4.10	การวางองค์ประกอบของสายอากาศแท่งร่วมกับแผ่นสะท้อนแบบระนาบติดกับกระจก.....	45
4.11	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งร่วมกับแผ่นสะท้อนแบบระนาบติดกับกระจก.....	45
4.12	การวางองค์ประกอบของสายอากาศแท่งร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับกระจก.....	45
4.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับกระจก.....	46
4.14	อัตราการขยายของสายอากาศแท่งเมื่อมีและไม่มีโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	46
4.15	โครงสร้างของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	47
4.16	โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งเซลล์.....	48
4.17	ค่าเฟสการสะท้อนของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
4.18	โครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ.....	49
4.19	โครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ.....	49
4.20	$ S_{11} $ ของสายอากาศขณะปรับค่าพารามิเตอร์ $L_s$ และ $W_s$ .....	50
4.21	$ S_{11} $ ของสายอากาศขณะปรับค่าพารามิเตอร์ $C_3$ .....	51
4.22	$ S_{11} $ ของสายอากาศขณะปรับค่าพารามิเตอร์ $C_4$ .....	51
4.23	$ S_{11} $ ของสายอากาศขณะระยะห่างระหว่างสายอากาศแท่งกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	52
4.24	ค่าความต้านทานของสายอากาศต้นแบบ.....	53
4.25	ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศต้นแบบ.....	53
4.26	ค่า $ S_{11} $ (dB) ของสายอากาศต้นแบบ.....	54
4.27	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	54
4.28	อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	55
5.1	โครงสร้างของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	56
5.2	โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.3	โครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ.....	58
5.4	รูปถ่ายของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	58
5.5	รูปถ่ายของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ.....	58
5.6	รูปถ่ายของโครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ.....	59
5.7	เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5061B.....	59
5.8	เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย Hewlett Packard รุ่น 8720C .....	60
5.9	โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	60
5.10	สายนำสัญญาณ.....	60
5.11	แท่นยึดโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	61
5.12	การทดสอบสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟ.....	63
5.13	ผลการจำลองและผลการทดสอบค่าความต้านทานในย่านความถี่เอชเอฟ.....	63
5.14	ผลการจำลองและผลการทดสอบค่ารีแอกแตนซ์ในย่านความถี่เอชเอฟ.....	64
5.15	การทดสอบสายอากาศแท่งย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	64
5.16	ผลการจำลองและผลการทดสอบค่าความต้านทานในย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	65
5.17	ผลการจำลองและผลการทดสอบค่ารีแอกแตนซ์ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	65
5.18	ผลการจำลองและผลการทดสอบค่า $ S_{11} $ (dB) ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	66
5.19	ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ ยูเอชเอฟ.....	67
5.20	ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายในย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	67
5.21	เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี Symbol Reader รุ่น XR480.....	68
5.22	สายอากาศโพลาริซิงเส้น Wilson รุ่น 204411.....	68
5.23	เครื่องมือวัดระยะทาง.....	69
5.24	การเตรียมอุปกรณ์การวัดระยะการอ่านข้อมูล.....	69
5.25	การเตรียมสายอากาศแท่งในการวัดระยะการอ่านข้อมูล.....	70
6.1	โครงสร้างของสายอากาศแท่งต้นแบบ.....	72
6.2	โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ.....	72
6.3	โครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในยุคปัจจุบันนี้การพัฒนาของระบบแสดงตนโดยคลื่นความถี่วิทยุ หรืออาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification: RFID) ได้รับความนิยมนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่นระบบการควบคุมการใช้งานของบุคคล ด้านการขนส่ง กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม การจัดการของผลผลิต ประกอบกับการใช้แสดงตนของ คน สัตว์ และผลิตภัณฑ์ โดยย่านความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดีจะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกันกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไป ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านหลัก คือ

1. ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) 125/134.2 kHz
2. ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) 13.56 MHz
3. ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra High Frequency: UHF) เช่น 433/ 860/ 960/920-925 MHz
4. ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/ 5.8 GHz

โดยในแต่ละย่านความถี่นั้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน การใช้งานในสองย่านความถี่แรก (ย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง) เหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (โดยทั่วไปที่ย่านความถี่ต่ำมีระยะการอ่านประมาณ 10-20 cm และที่ย่านความถี่สูงมีระยะการอ่านประมาณ 100 cm) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่การตรวจหา และการเก็บประวัติในสัตว์เป็นต้น ส่วนย่านความถี่สูงยิ่ง หรือ ยูเอชเอฟนั้นจะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (โดยทั่วไป ย่านความถี่ยูเอชเอฟ มีระยะอ่านประมาณ 1-10 m) เช่น ระบบเก็บค่าบริการบนทางด่วน เป็นต้น และในปัจจุบันการวิจัย และพัฒนาระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz ได้มีการดำเนินการสำหรับใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 m [1]

ระบบอาร์เอฟไอดี มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบอาร์เอฟไอดีอยู่ที่สามารถ อ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลาย ๆ แท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือนการกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ระบบอาร์เอฟไอดี มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือแท็ก ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และส่วนที่สามคือระบบควบคุม เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แท็กในระบบอาร์เอฟไอดีคือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดีก็คือเครื่องอ่านข้อมูลบาร์โค้ด โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบอาร์เอฟไอดีจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้

เอกสารระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงในการอ่านบาร์โค้ดซึ่งจะต้องอ่านบาร์โค้ดที่ไม่มีอะไรปกปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ที่ละชั้น ในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบอาร์เอฟไอดีจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่นเพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้และการอ่านแท็กในระบบอาร์เอฟไอดียังสามารถอ่านได้หลายๆ แท็กในเวลาเดียวกันได้

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศแท็กย่านความถี่คู่ร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดีบนวัสดุที่เป็นกระจก การศึกษาและวิจัยในงานวิจัยฉบับนี้ ในย่านความถี่เอชเอฟจะศึกษาการสร้างโดยใช้เทคนิคการขุด และจำนวนรอบของขดในการปรับปรุงสายอากาศ และในย่านความถี่ยูเอชเอฟจะศึกษาการสร้างโดยใช้เทคนิคการแมตซ์แบบทีคู และศึกษาโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรูปร่างคล้ายเห็ด สำหรับการออกแบบให้สายอากาศในย่านความถี่เอชเอฟมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยสายอากาศแท็กย่านความถี่คู่ร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้านี้สามารถนำมาใช้งานในการสื่อสารระยะใกล้ และการสื่อสารระยะไกลได้ในสายอากาศตัวเดียว

## 1.3 รายละเอียดของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ  
บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของพื้นฐานสายอากาศ โดยใน ส่วนแรกจะกล่าวถึงความเป็นมาและหลักการของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะลงไปในรายละเอียดของส่วนประกอบของสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดี การแบ่งประเภทตามการใช้งานของสายอากาศแท็ก และการแบ่งย่านความถี่และมาตรฐาน และในส่วนหลังจากกล่าวถึงรายละเอียดการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศแท็กและเครื่องอ่านข้อมูล

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการสำหรับการออกแบบสายอากาศแท็กในย่านความถี่เอชเอฟ โดยจะทำการออกแบบสายอากาศแท็กให้มีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวมรุ่น SIC5600 ซึ่งมีค่าทางไฟฟ้าเป็นตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับ 23.5 pF และหลังจากการออกแบบสายอากาศแท็กต้นแบบจากการคำนวณในเบื้องต้นแล้ว จึงนำสายอากาศแท็กต้นแบบไปจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และหลังจากนั้น นำผลจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อดูความสอดคล้องกัน

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการและการออกแบบสายอากาศแท็กในย่านความถี่ยูเอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำการออกแบบสายอากาศแท็กให้มีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวมรุ่น NXP G2XL ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.88 + j148.82 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และหลังจากการออกแบบได้สายอากาศแท็กต้นแบบแล้ว จึงนำสายอากาศแท็กต้นแบบไปจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 กล่าวถึงในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศต้นแบบตามโครงสร้างในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยนำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศตามผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่อธิบายในบทที่ 3 และบทที่ 4 แล้วจึงนำผลการจำลองมาเทียบกับผลการทดสอบเพื่อดูความสอดคล้องกัน

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของงานวิจัย ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศ ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาสายอากาศต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของพื้นฐานสายอากาศ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงความ เป็นมาและหลักการของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะลงไปรายละเอียดของ ส่วนประกอบของสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดี การแบ่งประเภทตามการใช้งานของสายอากาศแท็ก และการแบ่งย่านความถี่และมาตรฐาน และในส่วนหลังจากกล่าวถึงรายละเอียดการติดต่อสื่อสาร ระหว่างสายอากาศแท็กและเครื่องอ่านข้อมูล

### 2.2 ความเป็นมาของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดีนั้นได้ถูกสร้างขึ้นและเริ่มต้นใช้งานในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อใช้ทำ การระบุเครื่องบินที่บินผ่าน่านฟ้า และนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอ ดีมาใช้ หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาศักยภาพในการทำงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะ หลังปี ค.ศ 1960 ได้เริ่มมีการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้ในภาคเอกชน เช่น การ นำมาใช้ด้านควบคุมการเข้าออกสถานที่ของหน่วยงาน เพื่อการรักษาความปลอดภัย ต่อมาในปี ค.ศ 1970 ได้นำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาใช้ในการติดตามและตรวจสอบสัตว์และระบบ คลังสินค้า ในปี ค.ศ 1980 เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีได้รับการพัฒนาศักยภาพในการทำงานที่มี ลักษณะแตกต่างและหลากหลายรูปแบบมากขึ้นจนนำไปสู่การพัฒนาและประยุกต์ใช้งานอย่าง กว้างขวางเพิ่มมากขึ้น นับตั้งแต่ปี ค.ศ 1990 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่เพื่อ สนับสนุนรูปแบบการทำงานที่หลากหลายมากขึ้น เนื่องจากระบบอาร์เอฟไอดีมีคุณสมบัติที่พิเศษและ มีความโดดเด่นกว่าเทคโนโลยีอื่น อาทิ รหัสแท่ง (Barcode) โดยระบบอาร์เอฟไอดีนั้นมีจุดมุ่งหมาย คือการนำมาใช้งานแทนรหัสแท่ง (Barcode) ซึ่งลักษณะการทำงานจะมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่าง แท็ก (Tag) กับเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) โดยใช้การสื่อสารแบบไร้การสัมผัส เป็นระบบบ่งชี้ข้อมูล อัตโนมัติแบบไร้สาย ซึ่งมีการส่งคลื่นความถี่วิทยุจากอุปกรณ์เครื่องอ่านข้อมูล ไปยังอุปกรณ์ ไมโครชิปขนาดเล็กที่มีสายอากาศติดอยู่ เพื่อส่งข้อมูลเฉพาะของสิ่งที่ต้องการบ่งชี้ แล้วนำข้อมูลมา ประมวลผลยังเครื่องอ่านข้อมูล หรือระบบที่เกี่ยวข้องโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นตัวกลางในการอ่านและ บันทึกข้อมูลของระบบ

### 2.3 เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ย่อมาจาก Radio frequency identification เป็นระบบระบุ ลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ ปีค.ศ.1980 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ นำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบอาร์เอฟไอดีอยู่ที่สามารถ อ่านข้อมูล เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวงเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นไปเซประยชนตั้นการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแท็ก (Tag) ได้หลาย ๆ แท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แร่งสันสะท้อนการกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ในระบบอาร์เอฟไอดี มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือแท็ก ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และส่วนที่สามคือระบบควบคุม เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แท็กในระบบอาร์เอฟไอดีคือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดีก็คือเครื่องอ่านข้อมูลบาร์โค้ด โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบอาร์เอฟไอดีจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้แสงในการอ่านบาร์โค้ดซึ่งจะต้องอ่านบาร์โค้ดที่ไม่มีอะไรปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ทีละชิ้น ในระยะใกล้ๆ แต่ระบบอาร์เอฟไอดีจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่นเพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้และการอ่านแท็กในระบบอาร์เอฟไอดียังสามารถอ่านได้หลายๆ แท็กในเวลาเดียวกันโดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนแรกคือแท็ก

### 2.3.1 แท็ก

แท็กมีหน้าที่หลักก็คือ ใช้ในการเก็บข้อมูลของวัตถุ และการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยลักษณะของแท็กนั้นจะมีรูปแบบที่หลากหลายตัวอย่างเช่น แบบกระดาษ แบบจานแบบเหรียญ และอีกหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน

#### 2.3.1.1 ส่วนประกอบของแท็ก

โดยส่วนประกอบของแท็กจะแสดงดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของแท็กจะประกอบไปด้วย 1. แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง 2. สายอากาศ 3. ชิปปวงจรรวม



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก

#### 2.3.1.1.1 แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง (Substrate)

ชนิดและขนาดของวัสดุฐานรอง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบสายอากาศ โดยจะเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของสายอากาศ ซึ่งการเลือกวัสดุฐานรองนอกจากจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความราบเรียบของพื้นผิวแล้ว สิ่งที่สำคัญนั้นคือคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยหลักๆที่มีการพิจารณาคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

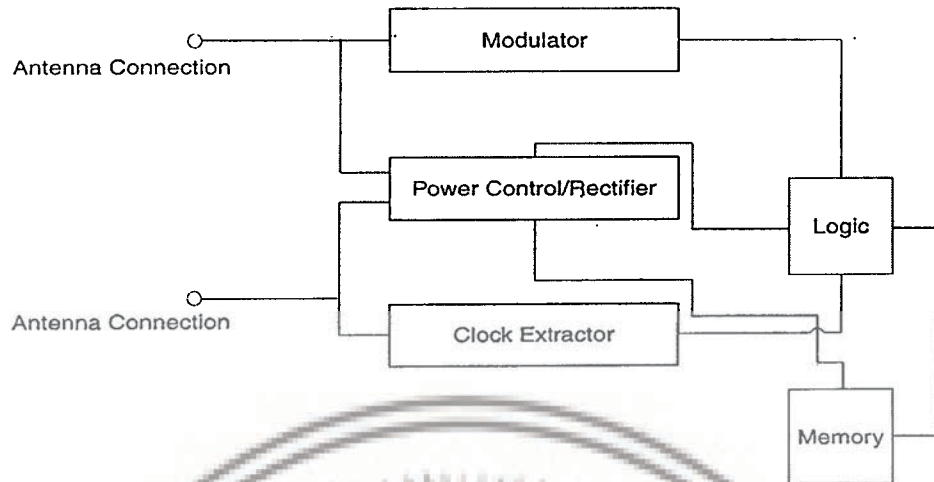
( $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียแทนเจนท์ ( $\tan \delta$ ) โดยวัสดุที่ทำการเลือกใช้ ควรเป็นวัสดุที่เป็นสารเนื้อเดียว เพื่อให้ค่าดังกล่าวมีค่าที่คงที่ตลอดแผ่นฐานรอง ซึ่งขนาดความหนาของวัสดุฐานรองจะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดคุณสมบัติของสายอากาศด้วยเช่นกัน โดยสมควรจะมีค่าต่ำเพื่อ ทำให้อากาศมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นก็ยังสามารถลดขนาดของสายอากาศให้มีขนาดที่เล็กลงได้ด้วยเช่นกัน ส่วนการสูญเสียแทนเจนท์ ( $\tan \delta$ ) สมควรจะให้มีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริก ทำให้อากาศมีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้น วัสดุฐานรองโดยทั่วไปที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศแท้ได้แก่ FR-4 PET PVC Plastic Film กระดาษ และวัสดุชนิดอื่นอีกมากมาย โดยการเลือกใช้ชนิดของวัสดุฐานรองก็จะขึ้นอยู่กับ ชนิดและจุดประสงค์ของการนำแท็กไปใช้งาน

### 2.3.1.1.2 สายอากาศแท็ก (Tag Antenna)

สายอากาศแท็กถูกนำไปใช้งานเพื่อแพร่กระจายพลังงานที่รับจากเครื่องอ่านที่ทำการปล่อยสัญญาณเพื่อนำไปกระตุ้นการทำงานของชิปวงจรรวมสำหรับทั้งการส่งสัญญาณกลับไปยังเครื่องอ่านและทั้งการรับสัญญาณจากเครื่องอ่าน (พาสซีฟแท็ก) สายอากาศแท็กจะมีส่วนที่ถูกยึดติดไว้กับชิปวงจรรวม โดยโครงสร้างของสายอากาศจะเป็นส่วนสำคัญในการช่วยการทำงานของแท็กและมีรูปแบบที่มากมายไม่จำกัดที่สามารถเป็นไปได้ในการออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศมีรูปแบบที่มากมายในการนำมาออกแบบให้สายอากาศมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับงานแต่ละชนิด ซึ่งอาจเป็นทั้งรูปแบบทางศิลปะและรูปแบบทางวิทยาศาสตร์หรืออาจจะเป็นการรวมทั้งสองรูปแบบไว้ด้วยกัน [2] ขนาดความยาวของสายอากาศนั้นจะเป็นสัดส่วนกับค่าความยาวคลื่นของความถี่ที่ถูกเลือกนำมาใช้งาน โดยขนาดของสายอากาศแท็กโดยทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิปวงจรรวม ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลการพิจารณาขนาดของแท็กจึงพิจารณาจากขนาดของสายอากาศแท็ก สายอากาศแท็กสามารถถูกออกแบบได้ด้วยองค์ประกอบที่หลากหลายในการพิจารณา ดังเช่น ระยะเวลาอ่านได้ไกลที่สุด ลักษณะการวางตัวของแท็กเมื่อนำไปใช้งาน ลักษณะของวัสดุที่นำไปใช้งาน การใช้งานที่มีลักษณะจำเพาะ โพลาริซชันของเครื่องอ่านข้อมูล ส่วนที่มีความสำคัญที่สุดคือส่วนที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและชิปวงจรรวมซึ่งจะเป็นส่วนที่มีความเปราะบางมากที่สุดในโครงสร้างของแท็ก ซึ่งถ้าหากจุดเชื่อมต่อดังกล่าวเกิดการเสียหายจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานต่ำลงหรืออาจจะไม่สามารถใช้งานได้ โดยทั่วไปสายอากาศแท็กจะสร้างขึ้นมาจากเส้นโลหะเช่น ทองแดง เงิน หรือ อลูมิเนียม ซึ่งการใช้หมึกนำไฟฟ้าก็มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาและนำมาใช้งานจริง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1.3 ชิปวงจรรวม (IC chip)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานภายในชิพวงจรรวม

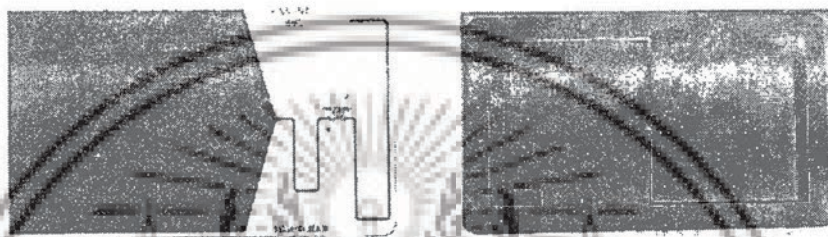
ชิพวงจรรวมเป็นส่วนที่มีความสำคัญของแท็กโดยเปรียบเสมือนสมองหลักในการทำงานของแท็ก โดยชิพวงจรรวมในปัจจุบันมีผู้ผลิตหลากหลายบริษัทเช่น Hitachi NXP semiconductor .ST Microelectronic และบริษัทอื่นๆ อีกมากมาย โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัววงจรรวมแต่ละตัวจะมีค่าแตกต่างกันออกไป และเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละความถี่ที่เราเลือกใช้งานโดยองค์ประกอบพื้นฐานของชิพวงจรรวมจะแสดงดังรูปที่ 2.2 ส่วนควบคุมพลังงาน วงจรเรียงกระแส จะทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับของสายอากาศเครื่องอ่านที่ส่งมาเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำไปเลี้ยงยังส่วนต่างๆ ของไมโครชิพ Clock extractor จะทำการดึงสัญญาณนาฬิกาจากสัญญาณที่มาจากเครื่องอ่าน วงจรมอดูเลเตอร์ จะทำการมอดูเลตสัญญาณที่รับมาได้จากเครื่องอ่าน การตอบสนองของแท็กจะถูกฝังไปกับสัญญาณที่มีการมอดูเลต ซึ่งจะมีการส่งกลับไปยังเครื่องอ่านในภายหลัง logic unit เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่จะรับผิดชอบในส่วนของโปรโตคอลในการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูล หน่วยความจำของชิพวงจรรวม (Memory) มีหน้าที่สำหรับเก็บข้อมูล มีความสามารถในการระบุตัวตน (Addressability) หมายถึงความสามารถในการระบุตำแหน่งที่เป็นเอกลักษณ์ ทั้งการอ่านและเขียนในแต่ละหน่วยความจำของชิพวงจรรวมของแท็ก ในส่วนของหน่วยความจำของแท็กจะสามารถเก็บข้อมูลที่มีความแตกต่างได้หลายชนิดเช่น ส่วนของข้อมูลของการระบุและแสดงตัว การตรวจสอบชุดข้อมูล โดยปัจจุบันนี้ชิพวงจรรวมสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้มีขนาดที่เล็กลงเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแท็กก็ไม่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิพวงจรรวมเพียงอย่างเดียวโดยขนาดของแท็กจะถูกคิดจากขนาดของสายอากาศเป็นหลัก

### 2.3.1.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการของการส่งพลังงานไปยังแท็ก

แท็กหรือเครื่องลูกข่าย (Tag หรือ Transponder) เมื่อทำการแบ่งตามวิธีการของการส่งพลังงานไปยังแท็กนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1. แท็กแบบพาสซีฟ (Passive tag) แท็กชนิดนี้ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ในการทำงาน มีระยะเวลาใช้งานที่ไม่สูง 2. แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag) ซึ่งจะมีแบตเตอรี่ในตัวใช้ในการเลี้ยงวงจรไฟฟ้าและชิพวงจรรวม แต่ไม่ได้ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล และมีระยะใช้งานที่มากกว่าแท็กแบบพาสซีฟ แต่น้อยกว่าแท็กแบบแอ็กทีฟ 3. แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag) จะมีแหล่งจ่ายไฟขนาดเล็กเพื่อป้อนพลังงานให้แท็กสามารถทำงานได้ในระยะการทำงานที่ไกลกว่าสองแบบแรก

### 2.3.1.2.1 แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive tag)



รูปที่ 2.3 แท็กชนิดพาสซีฟในรูปแบบต่างๆ [4]

แท็กชนิดนี้ไม่ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่โดยจะใช้พลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูลที่ส่งมาในการกระตุ้นการทำงานของแท็กและส่งข้อมูลที่เก็บไว้กลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล ในรูปที่ 2.4 แสดงหลักการการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ การติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลนั้น เครื่องอ่านข้อมูลจะเป็นตัวติดต่อก่อนเสมอแล้วตามด้วยการติดต่อกลับของแท็ก

กำลังงานสำหรับคลื่นวิทยุและแท็ก



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ

การอ่านข้อมูลนั้นทำได้ไม่ไกลมากนัก ระยะอ่านสูงสุดประมาณ 9 m โดยจะขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้และกำลังงานที่ต้องการน้อยที่สุดของชิพวงจรรวม โดยปกติแล้วแท็กชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก โดยทั่วไปประมาณ 16 ถึง 1,024 ไบต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างโดยทั่วไปกับแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟและแท็กชนิดแอ็กทีฟ โครงสร้างของแท็กชนิดนี้จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และด้วยความที่แท็กชนิดนี้ไม่มีแบตเตอรี่ภายในจึงทำให้มีน้ำหนักเบากว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ ราคาต่ำกว่า และมีอายุการใช้งานไม่ถูกจำกัดด้วยอายุการใช้งานของเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ แต่ข้อเสียก็คือ ตัวอ่านข้อมูลจะต้องมีความไวสูงและมีกำลังส่งงานสูง และมักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูง แท็กที่ถูกใช้ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ จะเกิดปัญหาได้เป็นอย่างมากเมื่อนำแท็กที่ไม่ได้ถูกออกแบบไว้เฉพาะแล้วนำไปใช้ติดกับวัสดุจำพวกโลหะหรือของเหลว [5]-[6] โดยจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก แต่ด้วยข้อได้เปรียบในเรื่องราคาและอายุการใช้งานทำให้แท็กชนิดพาสซีฟเป็นที่นิยมมากกว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ

### 2.3.1.2.2 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag)



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ

หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟแสดงดังรูปที่ 2.6 เครื่องอ่านจะทำการติดต่อสื่อสารมาก่อนแล้วจะตามด้วยการทำงานของแท็ก ส่วนการส่งสัญญาณกลับยังคงต้องใช้สัญญาณที่เกิดจากการกระจัดกระจายย้อนกลับ และใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการอ่านข้อมูล ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้แท็กชนิดนี้มีความเหมาะสมกับการใช้งานระบุตัวตนของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ด้วยเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งในเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

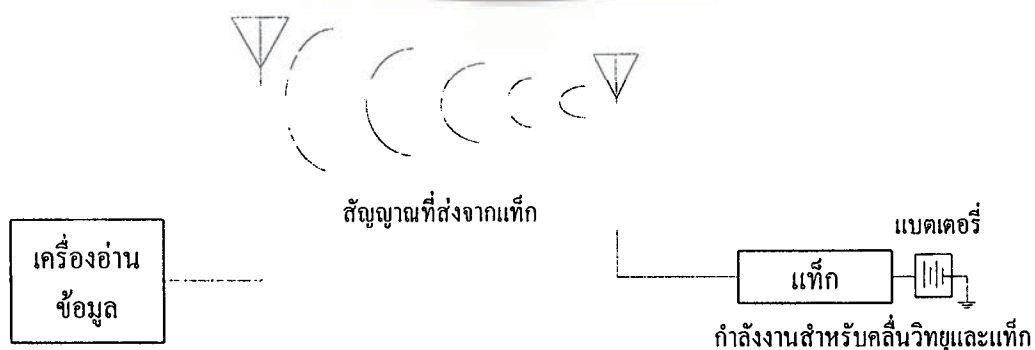
ความเร็วสูง แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะเวลาการติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท็กชนิดพาสซีฟแต่ยังไม่สูงเท่า ระยะเวลาการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ และต่างจากแท็กชนิดแอ็กทีฟคือแท็กไม่ได้เป็นผู้เริ่มส่ง สัญญาณก่อน ดังนั้นจึงมีความประหยัดพลังงานที่มากกว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ ซึ่งถ้าไม่มีการส่งสัญญาณ มาจากตัวเครื่องอ่าน แท็กจะอยู่ในสภาวะ Sleep ซึ่งต่างจากแท็กชนิดแอ็กทีฟที่จะมีการส่งสัญญาณ วิทยุอยู่ตลอดเวลา โดยระยะเวลาการทำงานโดยประมาณคือ 30 m และมีความเชื่อถือได้ที่สูงกว่าแท็ก ชนิดพาสซีฟทั้งยังสามารถระบุตัวตนของวัตถุที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงได้ โดยโครงสร้างภายใน ตัวของแท็กจะมีส่วนประกอบของโครงสร้างที่มากกว่าชิพวงจรรวมและสายอากาศ โดยมีส่วนที่สำคัญ นั้นก็คือแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้า โดยแท็กบางตัวอาจจะมีสายอากาศสองตัว ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น สายอากาศส่งอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับสัญญาณ โดยปกติแท็กชนิดกึ่งพาสซีฟจะถูก นำมาใช้งานใน Automobile tolling การระบุตัวตนของเครื่องบิน Airline part และสินค้าที่มีราคา สูง

### 2.3.1.2.3 แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag)



รูปที่ 2.7 สายอากาศแท็กชนิดแอ็กทีฟ [7]

แท็กชนิดแอ็กทีฟ (สามารถส่งสัญญาณออกมาเองได้) โดยอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายใน โดยจะมีลักษณะเป็นแบตเตอรี่ขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟ ในการให้พลังงานแก่แท็กทำให้แท็กสามารถทำงานได้โดยปกติ โดยหลักการทำงานของสายอากาศแท็กชนิดแอ็กทีฟแสดงดังรูปที่ 2.7 แท็กจะทำการติดต่อสื่อสารก่อนแล้วตามด้วยเครื่องอ่านข้อมูล โดยจะสามารถทำให้สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลกับ เครื่องอ่านข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้ในระยะที่ไกล โดยระยะทางอาจจะสามารถไกลได้ถึงหลายร้อยฟุต



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท็กชนิดแอ็กทีฟมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการติดตามวัตถุในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่หรือต้องการระยะการอ่านได้ที่สูงเช่น ระบบสายพานการผลิตรถยนต์ภายในโรงงาน ระบบการชำระเงินบนทางด่วน ระบบการตรวจสอบการเข้าออกรถยนต์ การติดตามทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูง ซึ่งระยะการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟจะมีระยะการทำงานที่สูงการแท็กชนิดพาสซีฟหลายเท่าตัว สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนได้ดี มีระบบความจำขนาดใหญ่ โดยสามารถมีหน่วยความจำได้มากถึง 1 เมกะไบต์ สามารถส่ง รับข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก และมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง แต่ถึงแม้ว่าแอ็กทีฟจะมีข้อดีอยู่มากมาย แต่การใช้งานแท็กชนิดแอ็กทีฟ ต้องมีแบตเตอรี่ติดอยู่ภายในตัวแท็ก ทำให้อายุการใช้งานถูกจำกัดด้วยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปจะมีอายุการใช้งานประมาณ 3-7 ปี นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าและสายอากาศ ซึ่งทำให้โครงสร้างของแท็กชนิดแอ็กทีฟมีขนาดใหญ่ และมีราคาที่ค่อนข้างสูง โดยจะมีราคาประมาณ 40-80 ดอลลาร์ โดยภายในอนาคตเมื่อมีการใช้งานที่มากขึ้นราคาดังกล่าวอาจจะมียุทธศาสตร์ที่ต่ำลง และสามารถนำไปใช้กับวัสดุที่มีราคาที่ถูกได้ โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท็กในแต่ละประเภท

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท็ก

คุณสมบัติของป้าย	ประเภทของแท็ก		
	ชนิดพาสซีฟ	ชนิดกึ่งพาสซีฟ	ชนิดแอ็กทีฟ
แหล่งพลังงาน	ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง แต่อาศัยพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูล	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)
การติดต่อสื่อสาร	เครื่องอ่านข้อมูลจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	เครื่องอ่านข้อมูลจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	แท็กจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร
ขนาด	เล็ก	กลาง	ใหญ่
ระยะการอ่าน	ใกล้ (มากกว่า 2m)	ปานกลาง (100 m)	ไกล ( 1 km)
ขนาดหน่วยความจำ	1 - 128 บิต	-	สูงสุด 8เมกะไบต์
ราคา	ไม่แพง	ปานกลาง	แพง

### 2.3.2 การจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุย่านสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ปัจจุบันคลื่นพาหะในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้งานในประเทศไทยจะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไปซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านความถี่ที่ใช้งาน คือ

1. ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low Frequency) ต่ำกว่า 150 kHz
2. ย่านความถี่สูง (HF: High Frequency) 13.56/27.125 MHz
3. ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF: Ultra High Frequency) 433/860-960 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ โดยไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางราชการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Frequency) 2.45/5.8 GHz

ในการใช้งานสอง ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ ย่านความถี่ต่ำ (LF) มีระยะอ่านประมาณ 10-20 cm และย่านความถี่สูง (HF) มีระยะอ่านประมาณ 15-100 cm เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF) มีระยะอ่านประมาณ 1-10 m เช่น การเก็บค่าบริการทางด่วน ระบบขนส่งสินค้า และในปัจจุบันระบบ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 และ 5.8 GHz เพื่อใช้ในระบบคลังสินค้าเนื่องจากขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กมากสำหรับในด้านของราคาและความเร็วในการส่งข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง และมีราคาสูงด้วยเช่นกัน โดยในตารางที่ 2.2 แสดงการประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ความถี่วิทยุที่นำมาใช้ในงานด้านต่างๆ สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

ย่านความถี่	ระยะการอ่าน	ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล	มาตรฐาน ISO (Passive Tag)	การประยุกต์ใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ 120-150 kHz	< 1 m	ต่ำ	ISO 18000-2	-ระบบระบุรหัสประจำตัวสัตว์ -บัตรผ่านเข้าออกประตู
ย่านความถี่สูง 13.56 MHz	< 1 m	ต่ำ ถึง ปานกลาง	ISO 18000-3	-สมาร์ทการ์ด ตัวโดยสาร -บัตรเติมเงิน -ห้องสมุด
ย่านความถี่ยูเอชเอฟ 433 MHz	> 1 m	ปานกลาง	18000, part 7	-ระบบคลังสินค้า -ระบบลอจิสติกส์
ย่านความถี่ยูเอชเอฟ 860-960 MHz	1-5 m	ปานกลาง ถึง สูง	18000, part 6	-ระบบ EPC -ระบบคลังสินค้า -ระบบลอจิสติกส์
ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.4 GHz	1-10 m	สูง	18000, part 4	-อุปกรณ์ไร้สาย

#### 2.3.3 มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดี

มาตรฐานสำหรับการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดี จะแบ่งออกเป็นสองหน่วยงานหลัก คือ International Standard Organization หรือ ISO และ EPC Global เป็นองค์กรที่เกิดจากความร่วมมือระหว่าง Uniform Code Council (UCC) และ EAN International โดยได้รับการสนับสนุนจากภาคอุตสาหกรรม ทำหน้าที่ในการกำหนดและพัฒนามาตรฐานรหัสของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์และโครงสร้างโดย EPC หรือ Electronic Product Code มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้งานทางด้านการระบุตัวตนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัตถุ เฉกเช่นเดียวกับการใช้งานของรหัสแท่ง ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยศูนย์ Auto-ID แห่งมหาวิทยาลัย MIT ซึ่งได้รับทุนจากบริษัทขนาดใหญ่หลายบริษัทเช่น Intel และ Wal-Mart มีวัตถุประสงค์หลักคือการนำไปใช้งานทางด้านการจัดการในระบบของห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain) โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 6 ประเภท (0-5) ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานของ EPC Global

คลาส	กำลังงาน	ระยะการอ่านได้ (เมตร)	หน่วยความจำ	คำอธิบาย	การติดต่อสื่อสาร	ชนิดของแท็ก	ราคา
0	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่านอย่างเดียว	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ถูก
1	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่าน/เขียนข้อมูล 1 ครั้ง	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ถูก
2	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่าน/เขียนข้อมูล	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ปานกลาง
3	แบตเตอรี่	< 100	< 100 kilobytes	อ่าน/เขียนข้อมูล	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	กึ่งพาสซีฟ	สูง
4	แบตเตอรี่	< 300	< 100 kilobytes	อ่าน/เขียนข้อมูล	การส่งข้อมูลแบบแอ็กทีฟ	แอ็กทีฟ	สูง
5	แบตเตอรี่ AC/DC Connection	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	อ่าน/เขียนข้อมูล	การส่งข้อมูลแบบแอ็กทีฟ	-	สูงมาก

โดยการแบ่งประเภทจะถูกแบ่งอยู่บนพื้นฐานของ กำลังงาน ระยะการอ่าน การติดต่อสื่อสาร ชนิดการทำงานของแท็ก แท็กชนิดพาสซีฟจะถูกกำหนดอยู่ในคลาสที่ 0-2 คลาสที่ 3 เป็นแท็กชนิดกึ่งพาสซีฟ ส่วนในคลาสที่ 4 จะเป็นแท็กชนิดแอ็กทีฟ โดยคลาสที่ 5 จะถูกสำรองไว้สำหรับ แท็กเครื่องอ่านข้อมูล (Tag reader) และแท็กชนิดแอ็กทีฟที่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กตัวอื่นๆ ได้ ในปัจจุบัน EPC Global จะมีมาตรฐานออกมา 2 รุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global Gen 1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย Class 0 Class 1 และมี EPC Gen 2 เป็นมาตรฐานอันล่าสุดที่จะทำให้เครื่องอ่านข้อมูลทุกอันที่เป็นไปตามมาตรฐาน EPC Gen 2 นี้จะต้องสามารถอ่านได้ในมาตรฐานทางความถี่ของทุกประเทศ โดยใช้มาตรฐาน ISO 18000 - 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 มาตรฐานของ ISO

	LF	HF	UHF	Microwave
ย่านความถี่	< 135 kHz	13.56 MHz	433 MHz (แอ็กทีฟ) 860-960 MHz	2.4 GHz
การติดต่อสื่อสาร ทางด้านอากาศ	ISO/IEC 18000-2	ISO/IEC 18000-3	ISO/IEC 18000-7 ISO/IEC 18000-6	ISO/IEC 18000-4
มาตรฐานสำหรับ รูปแบบการใช้งาน ที่เฉพาะเจาะจง	ISO/IEC 11784	ISO/IEC 14443	ISO/IEC 10374	ISO/IEC 10374
	ISO/IEC 11785	ISO/IEC 15693	ISO/IEC 18185	ISO/IEC 18185
	ISO/IEC 14223 (การระบุสัตว์)	(บัตรสมาร์ทการ์ด แบบไร้สัมผัส)	(คอนเทนเนอร์ ขนส่งสินค้า)	(คอนเทนเนอร์ ขนส่งสินค้า)

มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal Identification) มาตรฐาน ISO 11784 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระบุตัวสัตว์ด้วยความถี่วิทยุซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างรหัส ISO 11785 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องทางด้านเทคนิค และ ISO 14223/1 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับแท็ก

มาตรฐานบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส (Contactless smart cards) มาตรฐาน ISO 10536 เป็นมาตรฐานของวงจรรวม ซึ่งจะกำหนดโครงสร้างและตัวแปรในการทำงานของ Contactless coupling smart cards ซึ่งระยะการทำงานจะถูกกำหนดให้มีระยะ 1 cm ISO 14443 เป็นมาตรฐานที่อธิบายถึงหลักการการทำงานและตัวแปรในการทำงานของ Contactless proximity coupling smart cards ที่มีระยะการอ่านประมาณ 7-15 cm และ ISO 15693 เป็นมาตรฐานของ Contactless vicinity coupling smart cards ที่ระยะการอ่านที่สูงถึง 1 m

มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) มาตรฐาน ISO 18000 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุโดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับมาตรฐานการเชื่อมต่อผ่านอากาศ (Air Interface Standard) แบ่งเป็น 5 ย่านความถี่ด้วยกันคือ 1. ย่านความถี่ ต่ำ <135 kHz - 18000 - 2. ย่านความถี่สูง 13.56 MHz - 18000 - 3. ย่านความถี่ยูเอชเอฟ 433 MHz - Active - 18000 - 7 4. ย่านความถี่ยูเอชเอฟ 860 ~ 960 MHz - 18000 - 6 5. ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz - 18000 - 4

### 2.3.4 ระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra High Frequency RFID Systems)

ระบบย่านความถี่ยูเอชเอฟนั้นจะมีการใช้งานในย่านความถี่ 860-960 MHz ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่นประมาณ 33 cm ระบบย่านความถี่ยูเอชเอฟถูกควบคุมโดยมาตรฐาน ISO/IEC 18000-6 และ Gen 2-จาก EPC global แท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ทำการผลิตจะถูกควบคุมภายใต้ EPC global สำหรับ class 0 class 1 และ class 2 ยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยในปัจจุบันราคา

ต่อหน่วยของแท็กยังคงมีราคาที่แพงอยู่แต่คาดว่าจะภายในอนาคตอันใกล้ราคาของแท็กต่อหน่วยจะมี  
ไม่ต่ำกว่าครึ่งใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาที่ลดลง การใช้งานของแท็กในย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยส่วนมากจะถูกใช้งานในระบบการขนส่งสินค้า ห่วงโซ่อุปทาน สำหรับในการระบุกล่องหรือตู้สินค้า ซึ่งการใช้งานของแท็กจะเป็นการใช้งานทั้งแบบพาสซีฟแท็กและแอ็กทีฟแท็ก ช่วงการอ่านได้โดยปกติของแท็กที่ใช้งานในย่านความถี่ยูเอชเอฟ นั้นจะอยู่ที่ 1-9 m โดยการใช้งานช่วงค่าความถี่ที่ใช้งานก็จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานความถี่ยูเอชเอฟของระบบอาร์เอฟไอดีที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ

ประเทศ	ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (MHz)	ช่วงกว้างความถี่ (MHz)	กำลังงาน (Watt)
นิวซีแลนด์	864-868	4	4
อินเดีย	865-868	3	4
อัฟริกาเหนือ	865-868	3	2
ฟินแลนด์	865-868	3	2
ฝรั่งเศส	865-868	3	2
เยอรมนี	865-868	3	2
อิตาลี	865-868	3	2
เนเธอร์แลนด์	865-868	3	2
สหพันธรัฐรัสเซีย	865-868	3	2
สเปน	865-868	3	2
สวีเดน	865-868	3	2
สวิตเซอร์แลนด์	865-868	3	2
สหราชอาณาจักร	865-868	3	2
สิงคโปร์	866-869	3	0.5
บราซิล	902-907.5	5.5	4
แคนาดา	902-928	26	4
สหรัฐอเมริกา	902-928	26	4
อาร์เจนตินา	902-928	26	4
ชิลี	902-928	26	4
เกาหลี	910-914	4	4
อัฟริกาใต้	917-921	4	4
จีน	917-922	5	2
ไทย	920-925	5	4
ออสเตรเลีย	920-926	6	4
ไต้หวัน	922-928	6	1
ญี่ปุ่น	952-954	2	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าอาร์เอฟไอดีที่ใช้ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ ยังคงมีปัญหาหนึ่งในการใช้งานคือความไม่แน่นอนของค่าความถี่ที่ใช้กันทั่วโลก ซึ่งค่าความถี่และช่วงกว้างความถี่มีมาตรฐานที่ต่างกันไปตามแต่และข้อกำหนดของแต่ละประเทศ มาตรฐาน EPC global Gen-2 ซึ่งจะใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่สามารถอ่านแท็กได้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ยูเอชเอฟ (UHF) อัตราการอ่านสำหรับการอ่านแท็กหลายๆ ตัวจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศเนื่องจากความไม่แน่นอนระหว่างช่วงกว้างความถี่และวิธีการการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ถูกนำไปใช้งาน เมื่อช่วงกว้างความถี่มีขนาดที่กว้างก็จะสามารถติดต่อสื่อสารกับกลุ่มของแท็กในบริเวณที่ใช้งานได้รวดเร็วมากกว่าการที่มีช่วงกว้างความถี่แคบ ดังนั้นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีช่วงกว้างความถี่ 26 MHz อัตราการอ่านแท็กจะมีค่าประมาณ 1600 แท็กต่อวินาที ในกลุ่มประเทศยุโรปที่มีช่วงกว้างความถี่ 3 MHz จะมีอัตราการอ่านอยู่ที่ประมาณ 600 แท็กต่อวินาที แต่การใช้ช่วงกว้างความถี่ที่กว้างเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมากเช่นกัน

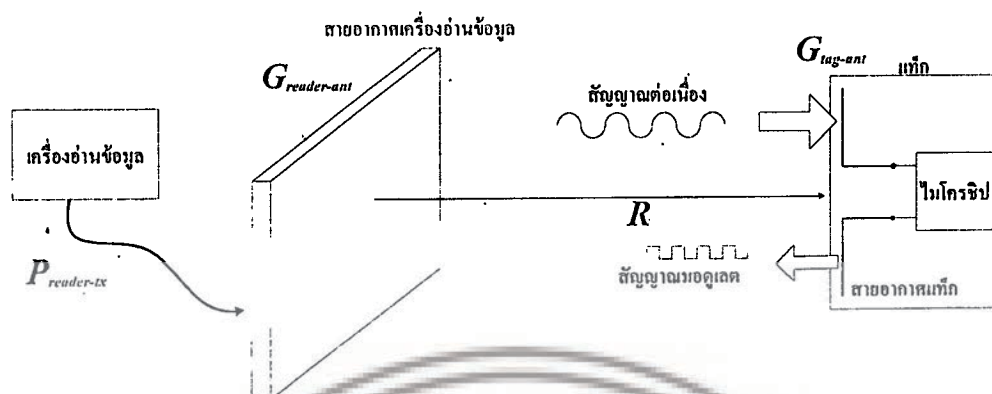
### 2.3.5 ระบบอาร์เอฟไอดีที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-field RFID)

ระบบอาร์เอฟไอดีที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-field) จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท็กประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิปวงจรรวม (Chip) ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ และสายอากาศสำหรับการรับและการส่งสัญญาณ

#### 2.3.5.1 หลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล

สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องมาจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.9 ที่แสดงหลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟในบริเวณสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่องซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท็ก หลังจากนั้นสายอากาศของแท็กจะเกิดกำลังอาร์เอฟ แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิปวงจรรวม โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปวงจรรวมใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ 1.2 โวลต์ ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปวงจรรวมใช้ประมาณ 2.2 โวลต์ เมื่อชิปวงจรรวมได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่สองสถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นแมตซ์สังยุคและค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อให้สำหรับมอดูเลทกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กำลังงานและกลไกการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีบริเวณสนามระยะไกล

### 2.3.5.1.1 การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดสองอย่าง คือ ระยะทางไกลที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิพวงจรรวมและการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางไกลที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัสดุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

### 2.3.5.1.2 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) คือไม่มีแหล่งจ่ายกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับกำลังงาน (Power) มาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัวให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการส่งให้ชิพวงจรรวมภายในแท็กทำงาน เทคโนโลยีของระบบอาร์เอฟไอดีแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลนั้นเป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ย่านความถี่ยูเอชเอฟ และย่านความถี่โมโครเวฟ เป็นต้น

ในรูปที่ 2.9 แสดงระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ เช่น กำลังที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น

จากสมการการส่งสัญญาณของฟรีส ในช่องว่างอิสระ (Friis free space transmission) สามารถหาค่ากำลังงานที่สายอากาศของแท็กได้รับได้ ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{tag-ant} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \quad (2.1)$$

โดยที่

$P_{tag-ant}$	คือ กำลังงานที่ชิพวงจรรวมรับได้
$P_{reader-ant}$	คือ กำลังงานส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล
$G_{reader-ant}$	คือ อัตราขยายสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล
$R$	คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก
$G_{tag-ant}$	คือ อัตราขยายสายอากาศแท็ก
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระที่ความถี่ใช้งาน
$\chi$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาริซระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศของแท็กมีการโพลาริซที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาริซเท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของระบบระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล โดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการโพลาริซเป็นแบบวงกลมและสายอากาศของแท็กจะมีโพลาริซเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาริซมีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท็กรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิพวงจรรวม ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้ [8],[9]

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\tau$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน  $(1 - |\Gamma|^2)$  (Transmission power coefficient)

ดังนั้นระยะทางที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านได้ไกลที่สุด คือ เมื่อ  $P_{tag-chip}$  มีค่าเท่ากับกำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิพวงจรรวมทำงานได้ ( $P_{tag-threshold}$ ) และสามารถหาระยะทางที่มากที่สุดแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$R_{\max(reader)} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \tau}{P_{tag-threshold}}} \quad (2.3)$$

หรือ

$$R_{\max(reader)} = 10^\alpha \text{ (m)} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\alpha = 27.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{\text{reader-ix}} (\text{dBm}) + G_{\text{reader-ant}} (\text{dBic}) + \frac{G_{\text{tag-ant}} (\text{dBi}) + \chi (\text{dB}) + \tau (\text{dB}) - P_{\text{tag-threshold}} (\text{dBm})}{20} \quad (2.5)$$

### 2.3.5.1.3 การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดีแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล (Uplink communication) โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจายกระจายย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจายกระจายย้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจายกระจายย้อนกลับของแท็ก บนพื้นฐานของสมการ Monostatic หรือ Backscatter radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลทที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ [8]

$$P_{\text{reader-rx}} = \frac{\lambda}{(4\pi)^3 R^4} P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}}^2 \chi \sigma \quad (2.6)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ พื้นที่หน้าตัดขวางเรดาร์ (Radar cross-section: RCS) ของแท็ก

เมื่อกำลังงานที่รับได้ ( $P_{\text{tag-threshold}}$ ) มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล จะทำให้ได้ระยะทางที่ไกลที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจายกระจายย้อนกลับ (Backscatter) และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_{\text{max(Backscatter)}} = \sqrt[4]{\frac{\lambda^2 P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}}^2 \chi \sigma}{(4\pi)^3 P_{\text{tag-threshold}}}} \quad (2.7)$$

หรือ

$$R_{\text{max(Backscatter)}} = 10^\beta \text{ (m)} \quad (2.8)$$

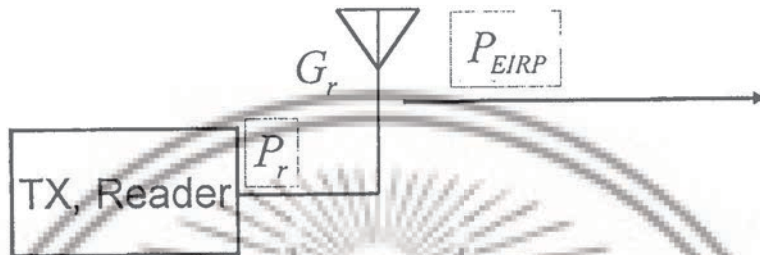
โดยที่

$$\beta = 16.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{\text{reader-tx}} (\text{dBm}) + 2G_{\text{reader-ant}} (\text{dBic}) + \frac{\chi (\text{dB}) + \sigma (\text{dBsm}) - P_{\text{tag-threshold}} (\text{dBm})}{40} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าระยะทางในการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่มีพารามิเตอร์อยู่สองตัว ที่สามารถหาค่าได้ก่อนจากการเลือกเครื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่านข้อมูลและตัวชี้พวงจรรวม คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชี้พวงจรรวมทำงานได้ ( $P_{\text{tag-threshold}}$ ) และความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ( $P_{\text{reader-threshold}}$ )

2.3.5.2 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP)



รูปที่ 2.10 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางการอ่านที่ไกลที่สุดเป็นส่วนหนึ่งกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านไกลขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ

ค่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หรือกล่าวโดยง่ายว่า EIRP คือกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งโดยเป็นการรวมค่ากำลังงานของตัวส่งและอัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}} \quad (2.10)$$

หรือ

$$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{reader-tx}} \text{ (dBm)} + G_{\text{reader-ant}} \text{ (dBi)} \quad (2.11)$$

โดยทั่วไปมีการอ้างถึงค่า EIRP และค่า ERP (Effective Radiated Power) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไดโพล มากกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dBi

$$P_{\text{ERP}} = P_{\text{reader-tx}} \text{ (dBm)} + G_{\text{reader-ant}} \text{ (dBd)} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า EIRP และค่า ERP คือ

$$P_{EIRP} = 1.64P_{ERP} \tag{2.13}$$

2.3.5.3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Power transmission coefficient)

พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล ( $A_e$ -max) ของสายอากาศของแท่งที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน ( $S$ : W/m<sup>2</sup>) แท่งจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิพวงจรรวมที่มีอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_T$  กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิพวงจรรวม ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ กำลังงานที่แท่งรับได้และกำลังงานที่ส่งต่อไปยังชิพวงจรรวม คือ

$$P_{tag-ant} = SA_e-max \tag{2.14}$$

และ

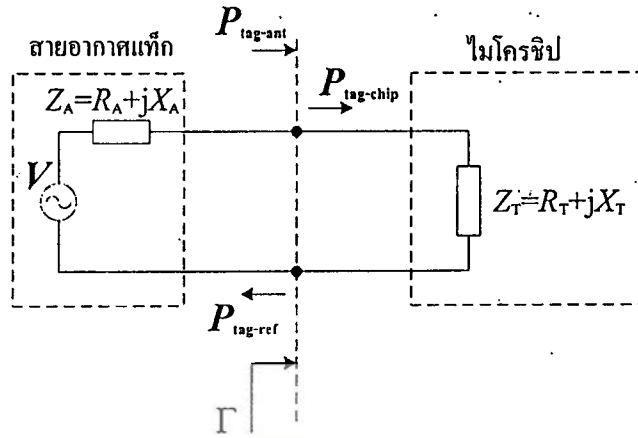
$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.15}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ  $Z_A$  ของแท่งและอิมพีแดนซ์ของชิพวงจรรวม  $Z_T$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิพวงจรรวม



(ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.11 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของชิพวงจรรวม  $Z_T$  จะรวมผลของตัวกล่องที่ใส่ชิพวงจรรวมด้วย [8] โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิพวงจรรวมจะขึ้นอยู่กับความถี่

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A} \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (2.16)$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (2.17)$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.18)$$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิพวงจรรวม คือ

$$P_{lag-chip} = (1 - |\Gamma|^2) P_{lag-ant} \quad (2.19)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{lag-chip}}{P_{lag-ant}} = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2}, 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสายอากาศเป็นแมตซ์สัญญลักษณ์กับขีพวงจรรวม นั่นคือ  $R_T = R_A$  และ  $X_T = -X_A$  จะทำให้  $|\Gamma| = 0$  ,  $\tau = 1$  จะได้กำลังงานที่ส่งผ่านจากสายอากาศแท้ก็ไปยังขีพวงจรรวมมากที่สุด และแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$P_{lag-chip-max} = P_{lag-ant} = SA_e-max \quad (2.21)$$

ในขณะที่สายอากาศถูกทำให้ลัดวงจร นั่นคือ อิมพีแดนซ์ของขีพวงจรรวมมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ( $Z_T = 0$ ) ส่งผลให้  $|\Gamma| = 1$  และ  $\tau = 0$  ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังขีพวงจรรวม

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการแมตซ์ของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

$$RL(dB) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (2.22)$$

#### 2.3.5.4 สัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาไรซ์ (Polarization matching coefficient)

โพลาไรซ์ของสายอากาศแท้จะต้องมีความเหมาะสมกับโพลาไรซ์ของเครื่องอ่านข้อมูล เนื่องจากจะสามารถนำมาซึ่งระยะการอ่านได้ที่ไกลที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่ซึ่งแสดงถึงการแมตซ์ของโพลาไรซ์คือ  $\chi$  (สัมประสิทธิ์การแมตซ์เชิงโพลาไรซ์) สำหรับระบบอาร์เอฟเอไอดีสนามระยะไกลนั้นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลส่วนมากจะมีโพลาไรซ์เชิงวงกลม ซึ่งแท้ก็โดยส่วนมากก็จะโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งทิศทางการติดตั้งสายอากาศแท้ก็ไม่สามารถกำหนดได้อย่างตายตัว ตัวอย่างเช่น การใช้แท็กที่มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นกับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลมค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์เชิงโพลาไรซ์ จะมีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB ซึ่งถ้าหากใช้แท็กที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลมก็จะสามารถเพิ่มระดับสัญญาณขึ้นมาได้อีก 3 dB

#### 2.3.5.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ถ้าไม่มีการระบุทิศทางให้หมายถึงทิศทางที่มีความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด

สำหรับสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิกจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับหนึ่ง เนื่องจากค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่น ( $U$ ) และค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด ( $U_{max}$ ) และค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกมีค่าเท่ากัน

โดยทั่วไปค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะแสดงในหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งสามารถหาได้จากการแปลงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)

#### 2.3.5.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของสายอากาศจะใช้เพื่อคำนึงถึงค่าการสูญเสียในส่วนต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสูญเสียจากการไม่แมตช์ของส่วนเชื่อมต่อกับสายอากาศแท็กและการสูญเสียภายในตัวสายอากาศ เช่น การสูญเสียในตัวนำ การสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก เป็นต้น โดยปกติแล้วค่าประสิทธิภาพของแท็กโดยรวมจะแสดงดังสมการ

$$e_t = e_{cd}e_r = e_{cd}(1-|\Gamma|^2) \quad (2.23)$$

เมื่อกำหนดให้

- $e_t$  คือ ประสิทธิภาพรวม
- $e_{cd}$  คือ ประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ
- $e_r$  คือ ประสิทธิภาพการสะท้อน (ไม่แมตช์)
- $\Gamma$  คือ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน อ้างอิงจากสมการที่ 2.16

โดยทั่วไปการกล่าวถึงค่าประสิทธิภาพของแท็กจะเป็นการพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็ก โดยพจน์ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อค่าอัตราขยายของแท็ก

### 2.3.5.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain of antenna)

อัตราขยายของสายอากาศนั้นเป็นอีกพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญสำหรับระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด ระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดจะอยู่ในทิศทางที่ค่าอัตราขยายมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปรกตินั้นจะถูกจำกัดโดยขนาด แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ย่านความถี่ที่ทำงานสำหรับสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและจะมีค่าอัตราขยายประมาณ 0-2 dBi สำหรับสายอากาศชนิดชี้ทิศทางบางชนิดเช่นสายอากาศชนิดแผ่นบาง (Patch antenna) สายอากาศจะสามารถมีอัตราขยายที่สูงขึ้นไปถึง 6 dBi หรือมากกว่านั้น

จากข้อกำหนดจากมาตรฐานของ IEEE นั้น อัตราขยายโดยทั่วไปจะไม่รวมการสูญเสียที่เกิดเนื่องมาจากการไม่แมตช์กันของอิมพีแดนซ์ (ค่าการสูญเสียจากการสะท้อน) และค่าการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์กันของโพลาริซ โดยในงานวิจัยจะทำการอธิบายรูปแบบของอัตราขยายสองรูปแบบ โดยรูปแบบแรกคือ อัตราขยาย (Gain,  $G$ ) ส่วนอีกรูปแบบนี้คือ อัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute gain,  $G_{abs}$ ) โดย อัตราขยายจะมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดดังสมการ

$$G(\theta, \phi) = e_{cd}D(\theta, \phi) \quad (2.24)$$

เมื่อกำหนดให้

- $D$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ
- $e_{cd}$  คือ ประสิทธิภาพการเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ

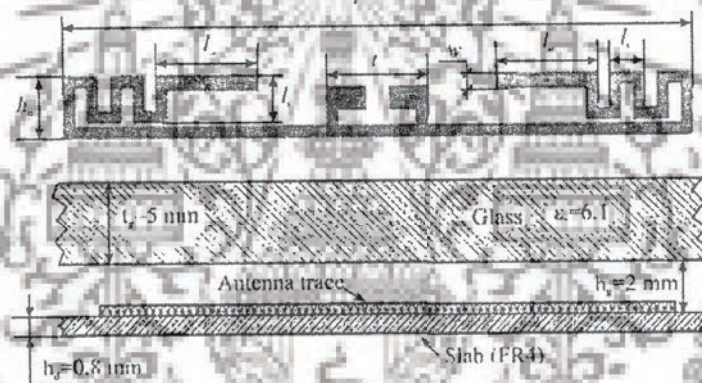
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยโครงสร้างอากาศแท่งย่านความถี่คูในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ ที่มีขนาดกะทัดรัดหน้าเดียว ที่ถูกนำเสนอในรูปที่ 2.12 ประกอบด้วย สายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่จัดวางอยู่ตามขอบของพื้นที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคการชดวน และสายอากาศแท่งย่านความถี่ยูเอชเอฟที่จัดวางอยู่ด้านในของพื้นที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคช่องเปิดสี่เหลี่ยม สายอากาศมีขนาดรวมเท่ากับ  $84 \text{ mm} \times 54 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  จากการทดสอบในย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศทำงานได้ในย่านความถี่ 13.56 MHz และในย่านความถี่ยูเอชเอฟ สายอากาศทำงานในช่วงความถี่ 911 MHz ถึง 931 MHz ( $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10 \text{ dB}$ ) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และมีอัตราขยายที่ความถี่ 910 MHz และ 920 MHz เท่ากับ  $-5.36 \text{ dBi}$  และ  $-1.89 \text{ dBi}$  ตามลำดับ

2.4.2 สายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบุนานพาหนะขณะเคลื่อนที่ [11]

สายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบุนานพาหนะขณะเคลื่อนที่ นำเสนอโดย Alberto Toccafondi Cristian Della Giovampaola Francesco Mariottini และ Alessio Cucini ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างสายอากาศแท่งย่านความถี่ยูเอชเอฟและจัดวางสายอากาศที่ถูกนำเสนอ [11]



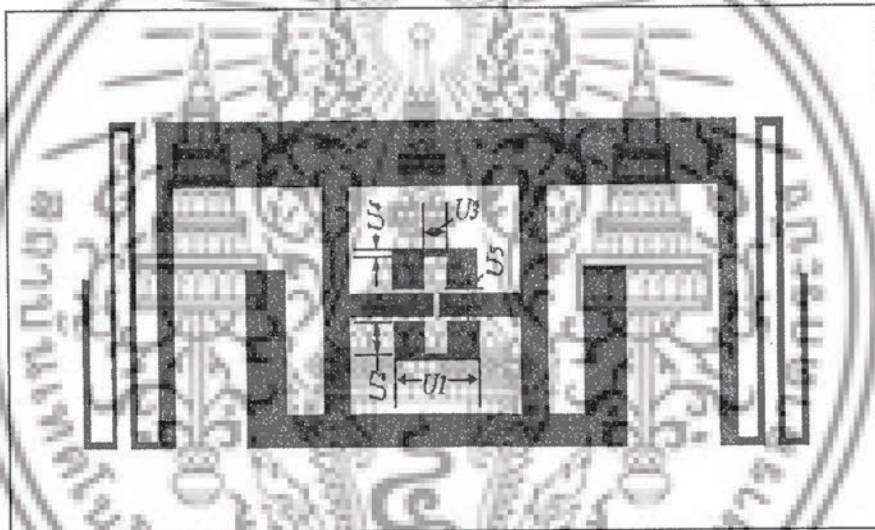
รูปที่ 2.14 รูปถ่ายสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบุนานพาหนะขณะเคลื่อนที่ ที่ถูกนำเสนอ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโครงสร้างสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ และยูเอชเอฟ สำหรับการระบุยานพาหนะขณะเคลื่อนที่ ที่ถูกนำเสนอในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่จัดวางอยู่ด้านล่างของพื้นที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคการชดวน และสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่จัดวางอยู่ด้านบนของพื้นที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคแมตซ์แบบที่ สายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟมีขนาด เท่ากับ  $81 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  และวางห่างจากกระจกเท่ากับ  $2 \text{ mm}$  จากการทดสอบในย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศทำงานได้ในย่านความถี่  $13.56 \text{ MHz}$  และในย่านความถี่ยูเอชเอฟ สายอากาศทำงานในย่านความถี่  $867 \text{ MHz}$

#### 2.4.3 การออกแบบสายอากาศแท่งระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทีคู่แถบความถี่กว้าง [12]

การออกแบบสายอากาศแท่งระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทีคู่แถบความถี่กว้าง นำเสนอโดย Juanjuan Tan และ Xiuping Li ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.15



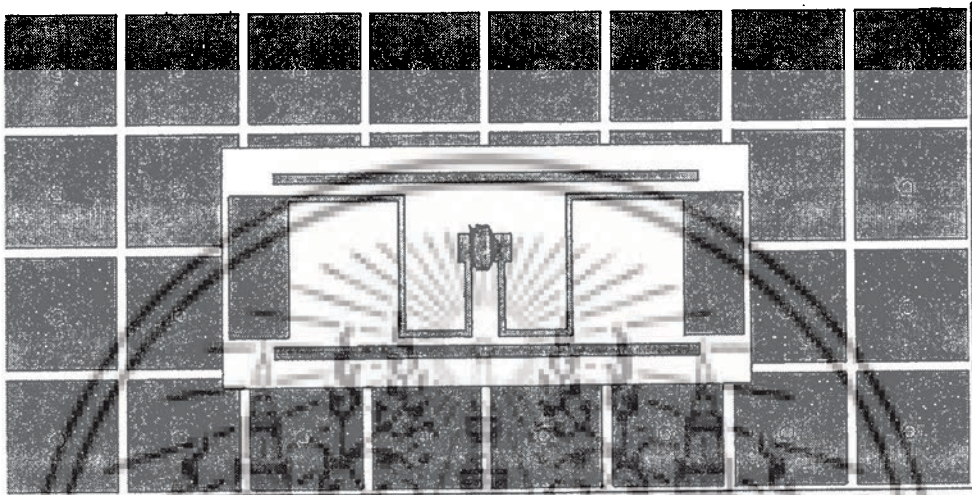
รูปที่ 2.15 โครงสร้างสายอากาศแท่งระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทีคู่แถบความถี่กว้างที่ถูกนำเสนอ [12]

โดยโครงสร้างสายอากาศแท่งระบบอาร์เอฟไอดีแบบยูทีคู่แถบความถี่กว้าง ที่ถูกนำเสนอในรูปที่ 2.15 ประกอบด้วย สายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคการแมตซ์แบบยูทีคู่ สายอากาศมีขนาดรวม เท่ากับ  $89.2 \text{ mm} \times 29 \text{ mm} \times 0.075 \text{ mm}$  จากการทดสอบในย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศทำงานในช่วงความถี่  $875 \text{ MHz}$  ถึง  $977 \text{ MHz}$  ( $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10 \text{ dB}$ ) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และมีอัตราขยาย เท่ากับ  $-1.93 \text{ dBi}$

#### 2.4.4 การออกแบบสายอากาศแท่งโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า [13]

การออกแบบสายอากาศแท่งโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า นำเสนอโดย C. PHATRA P. KRACHODNOK และ R. WONGSAN ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างสายอากาศแท่งโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกนำเสนอ [13]

โดยโครงสร้างสายอากาศแท่งโดยใช้ไดโพลร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกนำเสนอในรูปที่ 2.15 ประกอบด้วย สายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่ออกแบบโดยใช้ไดโพล และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวางห่างกัน 2 mm สายอากาศมีขนาดรวม เท่ากับ 144 mm x 72 mm x 6.8 mm จากการจำลองในย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศทำงานในช่วงความถี่ 910 MHz ถึง 950 MHz ( $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เท่ากับ 6.9 dBi ที่ความถี่ 922 MHz

ตารางที่ 2.6 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อน

ลำดับงานวิจัย	ความถี่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	อัตราขยาย
1	13.56 MHz และ 911 MHz ถึง 931 MHz	แบบรอบตัว	-5.36 dBi ที่ความถี่ 910 MHz -1.89 dBi ที่ความถี่ 920 MHz
2	13.56 MHz และ 867 MHz	แบบรอบตัว	-
3	875 MHz ถึง 977 MHz	แบบรอบตัว	1.93 dBi
4	910 MHz ถึง 950 MHz	แบบทิศทางเดียว	6.9 dBi (ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง) ที่ความถี่ 922.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปประโยชน์อื่นใด การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อนแต่ละงาน โดยในแต่ละงานวิจัยจะแสดงให้เห็นถึงการออกแบบ และเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งาน และเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป โดยในงานวิจัยเล่มนี้จะสนใจ สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่คู่ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

## 2.5 บทสรุป

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของพื้นฐานสายอากาศ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและหลักการของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะลงไปในรายละเอียดของส่วนประกอบของสายอากาศ แท็งก์อาร์เอฟไอดี การแบ่งประเภทตามการใช้งานของสายอากาศแท็งก์ การแบ่งย่านความถี่และมาตรฐาน และการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศแท็งก์และเครื่องอ่านข้อมูล รวมไปถึงงานวิจัยที่มีมาก่อนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศแท็งก์ในระบบอาร์เอฟไอดีที่สนใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

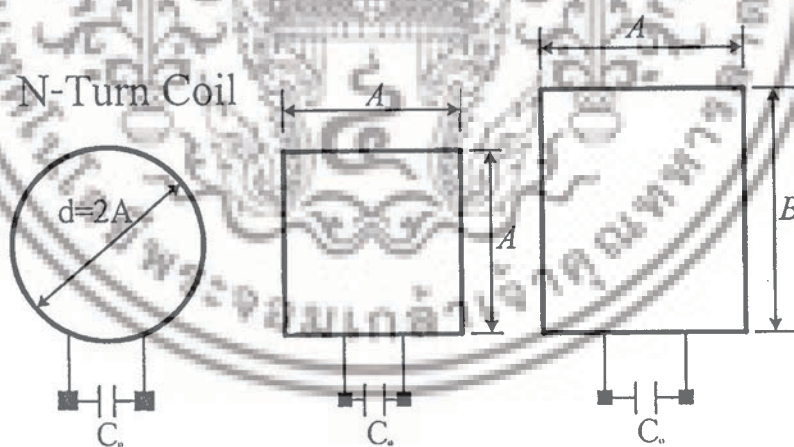
## หลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟ

### 3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงหลักการสำหรับการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟ โดยจะทำการออกแบบสายอากาศแท่งให้มีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวมรุ่น SIC5600 [14] ซึ่งมีค่าทางไฟฟ้าเป็นตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับ 23.5 pF และหลังจากการออกแบบสายอากาศแท่งต้นแบบจากการคำนวณในเบื้องต้นแล้ว จึงนำสายอากาศแท่งต้นแบบไปจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio [15] และหลังจากนั้น นำผลจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อดูความสอดคล้องกัน

### 3.2 หลักการการออกแบบและการแมตช์สายอากาศแบบขดวน

สายอากาศขดวนสำหรับแท่งของระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่เอชเอฟ สามารถทำได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์การใช้งาน ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศของแท่งที่ทำงานในย่านความถี่สูง เช่นแบบฉลากอัจฉริยะ หรือ สมาร์ทการ์ด มีรูปแบบสายอากาศเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดแตกต่างกันไปตามการใช้งาน รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานแบบต่างๆ ของสายอากาศแท่ง ซึ่งสายอากาศขดลวดโดยทั่วไปมักสร้างจากลวดเส้นเล็ก ๆ



รูปที่ 3.1 รูปแบบต่างๆ ของสายอากาศขดลวดของแท่ง

สำหรับการออกแบบสายอากาศสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพื่อให้แมตช์กับชิพวงจรรวมใช้ที่ใช้งานได้จากสูตรในแต่ละกรณีดังนี้

#### 3.2.1. สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ

ในการออกแบบสายอากาศสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = (R_r + R_L) + j(X_A + X_i) \quad (3.1)$$

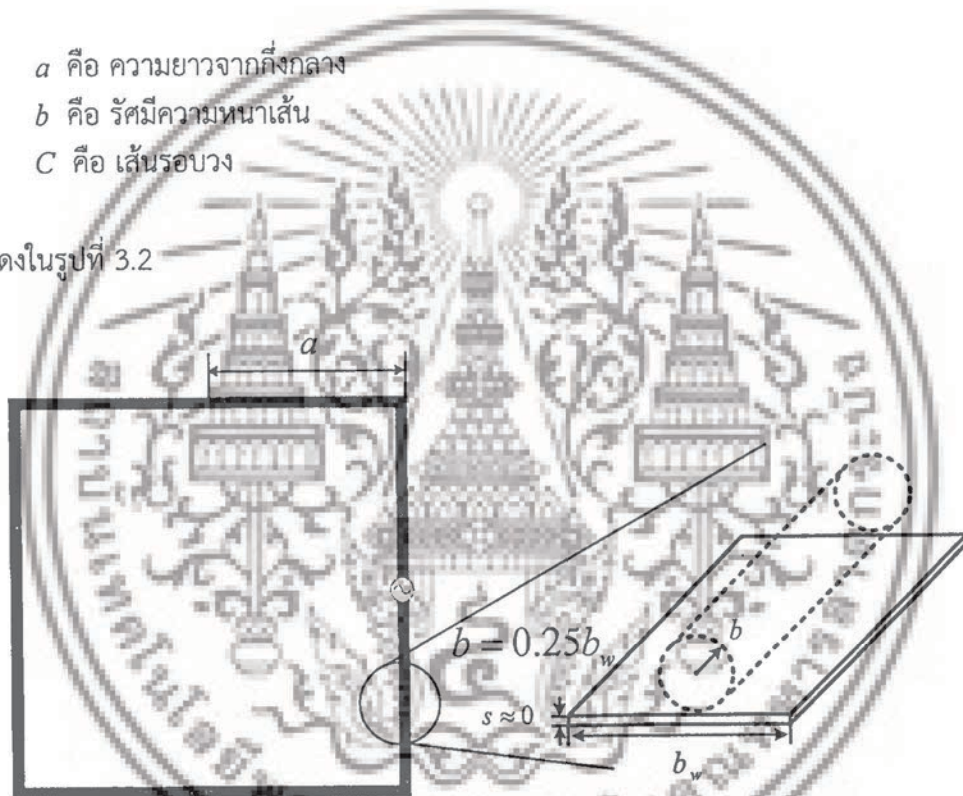
โดยค่าความต้านทานประกอบด้วยค่าการแพร่ความต้านทาน ( $R_r$ ) และค่าการสูญเสียความต้านทานของวงตัวนำ ( $R_L$ ) สามารถหาได้จากสูตร[16]

$$R_r = 20\pi^2 \left( \frac{C}{\lambda} \right)^4 \quad (3.2)$$

$$R_L = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $a$  คือ ความยาวจากกึ่งกลาง  
 $b$  คือ รัศมีความหนาเส้น  
 $C$  คือ เส้นรอบวง

ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ ในการคำนวณความต้านทาน

และค่ารีแอกแตนซ์ประกอบด้วยค่ารีแอกแตนซ์ตัวเหนี่ยวนำภายนอกของสายอากาศขดวง ( $X_A$ ) และค่ารีแอกแตนซ์ความถี่สูงภายในของสายอากาศขดวง ( $X_i$ ) สามารถหาได้จากสูตร [16]

$$X_A = \omega L_A \quad (3.4)$$

$$X_i = \omega L_i \quad (3.5)$$

โดยที่

$$L_A = 2\mu_0 \frac{a}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{a}{b} \right) - 0.774 \right] \quad (3.6)$$

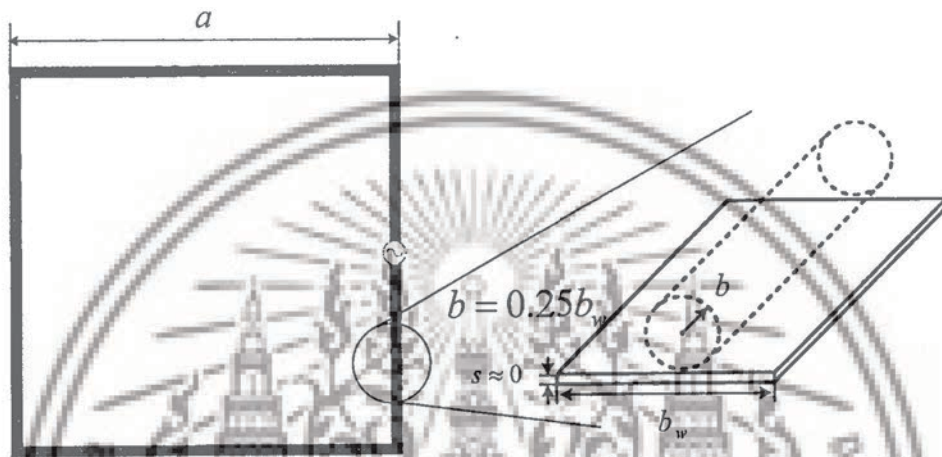
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_i = \frac{a}{\omega b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $a$  คือ ความยาวด้าน  
 $b$  คือ รัศมีความหนาเส้น

ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สายอากาศแบบขดวน 1 รอบ ในการคำนวณรีแอกแตนซ์

### 3.2.2. สายอากาศแบบขดวน N รอบ แกนอากาศ

ในการออกแบบสายอากาศสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จากสูตร

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = (R_r + R_L) + j(X_{Ant}) \quad (3.8)$$

ซึ่งค่าความต้านทานประกอบด้วยค่าการแผ่ความต้านทาน ( $R_r$ ) และค่าการสูญเสียความต้านทานของวงตัวนำ ( $R_L$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสูตร[16]

$$R_r = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 N^2 \quad (3.9)$$

$$R_L = \frac{Na}{b} R_s \left(\frac{R_p}{R_0} + 1\right) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $a$  คือ ความยาวจากกึ่งกลาง  
 $b$  คือ รัศมีความหนาเส้น  
 $C$  คือ เส้นรอบวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}$  คือ ความต้านทานพื้นผิวของตัวนำ  
ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4

และค่ารีแอกแตนซ์ประกอบด้วยค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ ( $X_{Ant}$ ) ซึ่งสามารถหาได้จาก  
สูตร[17]

$$X_{Ant} = \omega L_{Ant} \quad (3.11)$$

โดยที่

$$L_{Ant} = 31.33\mu_0 N^2 \frac{a^2}{8a+11c} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $a$  คือ ความยาวจากกึ่งกลาง  
 $c$  คือ ความหนาเส้น

ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายอากาศแบบขดวน N รอบ

### 3.3 การออกแบบสายอากาศแบบขดวน

ในการออกแบบสายอากาศแท่ง จะทำการออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับ  
ชิพวงจรรวมรุ่น SIC5600 ซึ่งมีค่าทางไฟฟ้าเป็นตัวเก็บประจุเท่ากับ 23.5 pF ดังนั้นในการออกแบบ  
ต้องออกแบบให้สายอากาศมีค่าทางไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำ โดยคำนวณจากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (3.13)$$

$$X_L = j2\pi fL \quad (3.14)$$

โดยกำหนดให้  $X_C$  และ  $X_L$  มีค่าเท่ากัน และได้สมการออกมาคือ

$$X_C = X_L$$

$$\frac{1}{j2\pi fC} = j2\pi fL$$

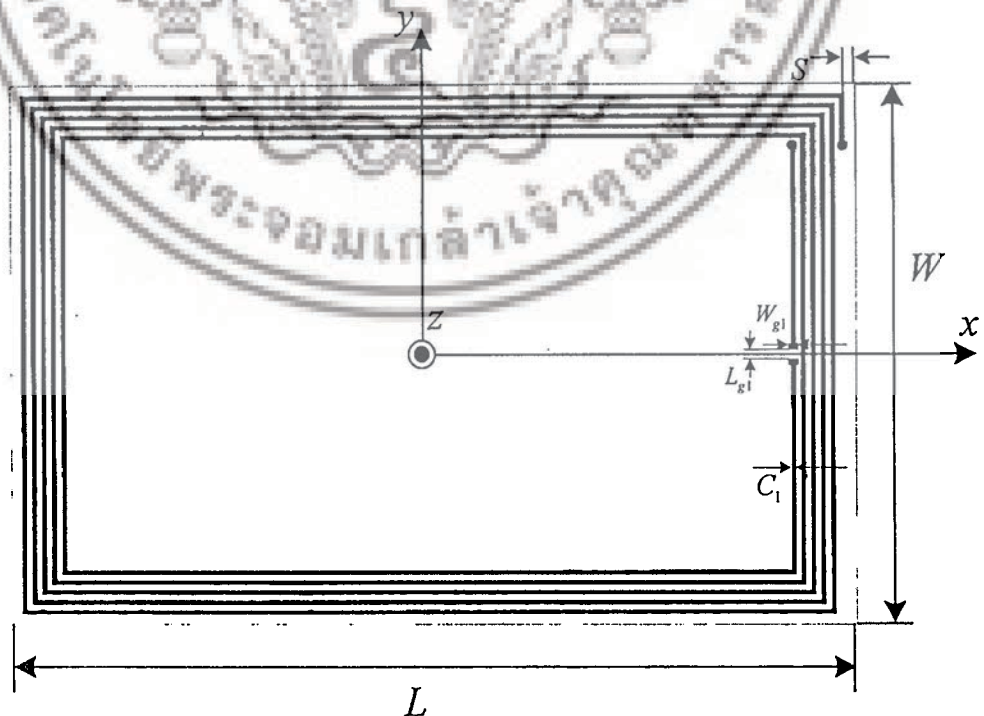
จะทำให้หาค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ออกมาเท่ากับ

$$L = \frac{1}{j^2 4\pi^2 f^2 C}$$

$$= \frac{1}{j^2 4\pi^2 (13.56 \times 10^6)^2 (23.5 \times 10^{-12})}$$

$$= 5.87 \mu\text{H}$$

และเมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ทางไฟฟ้าของสายอากาศแล้ว จากนั้นทำการกำหนดความกว้าง ความยาว และความหนาของเส้นขดวน แล้วจึงนำค่าไปแทนในสมการที่ 3.12 เพื่อหาจำนวนขดรอบของสายอากาศออกมา โดยมีโครงสร้างตามรูปที่ 3.5 และมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศแท่งตันแบบ

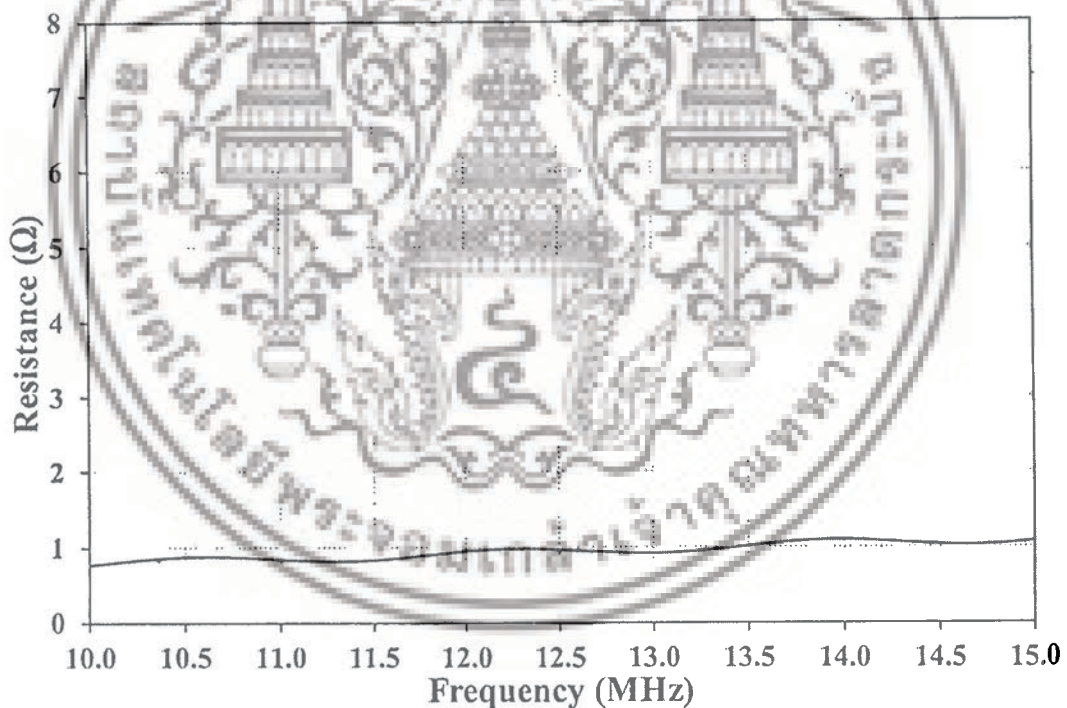
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแท่งต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$L$	84.0
$W$	54.0
$S$	1.0
$C_1$	0.5
$L_{g1}$	0.985
$W_{g1}$	0.794

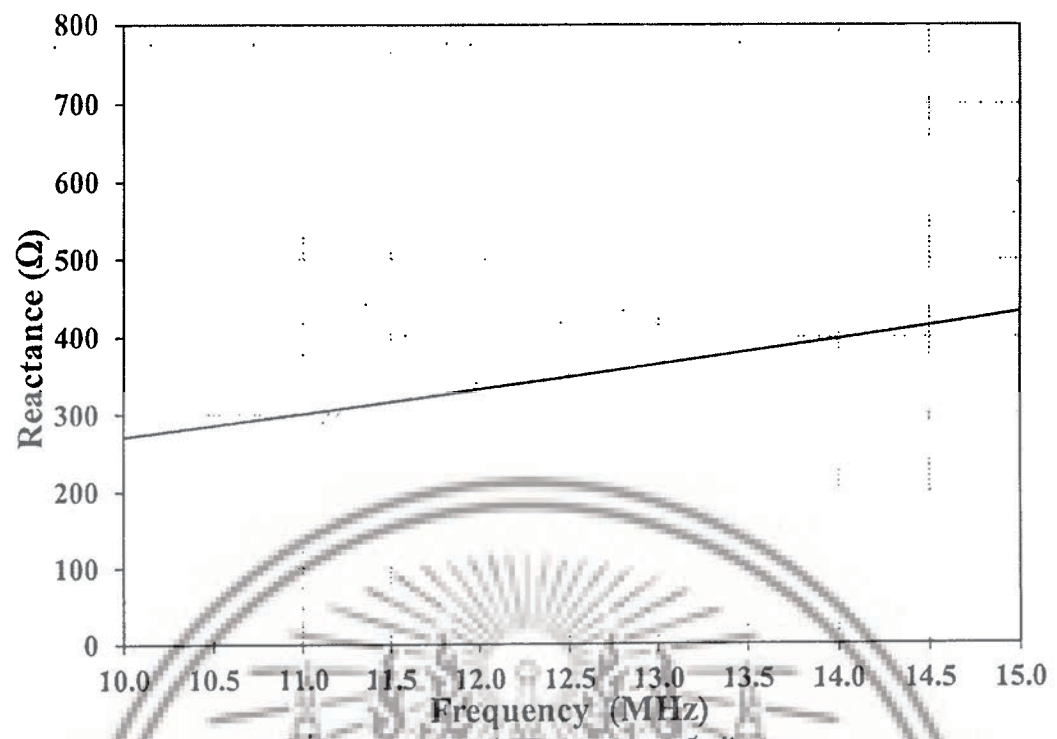
### 3.4 การจำลองสายอากาศแท่งแบบขดวน

เมื่อได้โครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบตามรูปที่ 3.5 แล้ว จากนั้นทำการนำโครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบไปจำลองกับโปรแกรม CST Microwave Studio และได้ผลจากการจำลองตามรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ความต้านทานของสายอากาศแท่งต้นแบบ

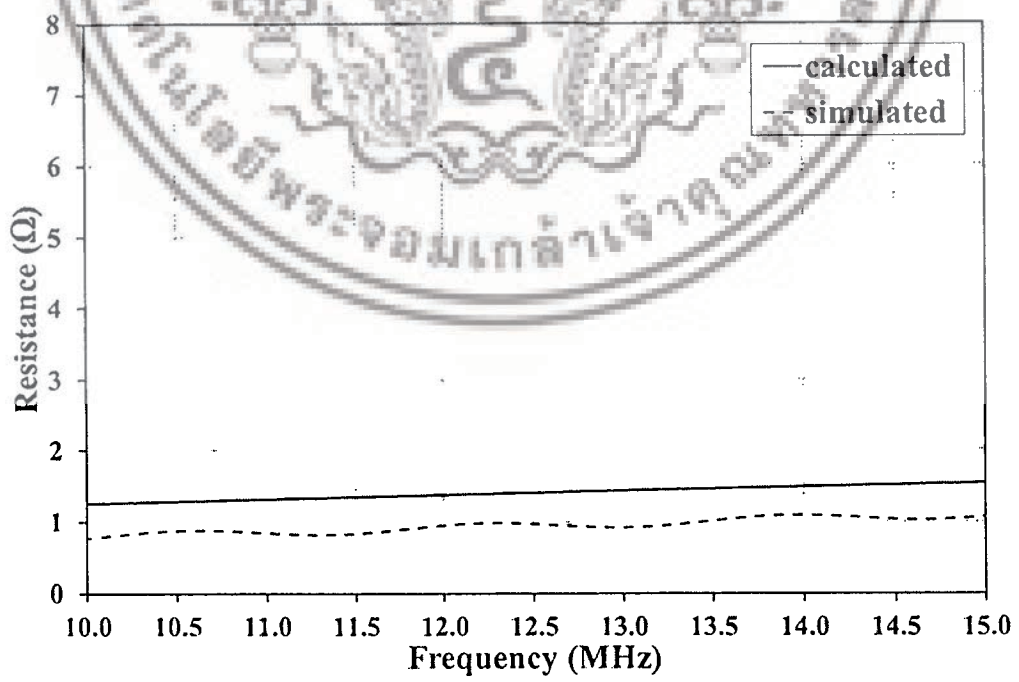
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รีแอกแตนซ์ของสายอากาศแท่งต้นแบบ

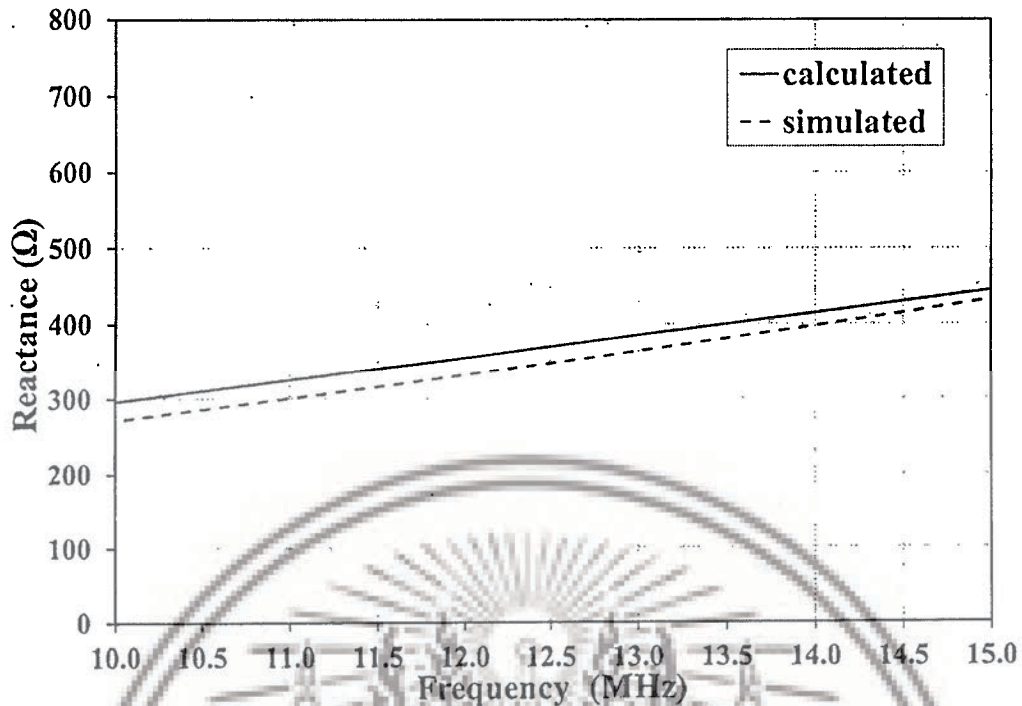
จากรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7 แสดงค่าความต้านทานของสายอากาศและแสดงค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศตามลำดับ โดยจากการจำลองสายอากาศ สายอากาศแท่งก็มีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $1.03+j383.29 \Omega$  ที่ความถี่ 13.56 MHz

และเมื่อนำผลจากการจำลองมาเทียบกับผลจากการคำนวณจะแสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ความต้านทานของสายอากาศจากการจำลองเทียบกับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รีแอกแตนซ์ของสายอากาศจากการจำลองเทียบกับการคำนวณ

จากรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับผลจากการคำนวณ เพื่อดูความสอดคล้องกัน และจากรูปทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าผลจากการคำนวณมีความสอดคล้องกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จากนั้นจะทำการสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบ และนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

### 3.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงหลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งแบบขดวนในย่านความถี่เอชเอฟโดยทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แล้วนำไปทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio แล้วนำผลมาเทียบกับการคำนวณ โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในการคำนวณ และการจำลองเท่ากับ  $1.46 + j402.02 \Omega$  และ  $1.03 + j383.29 \Omega$  ตามลำดับ ที่ความถี่ 13.56 MHz ซึ่งมีความสอดคล้องกัน

## บทที่ 4

# หลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่ยูเอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่ยูเอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำการออกแบบสายอากาศแท่งให้มีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวมรุ่น NXP G2XL [18] ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.88 + j148.82 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และหลังจากการออกแบบได้สายอากาศแท่งต้นแบบแล้ว จึงนำสายอากาศแท่งต้นแบบไปจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

### 4.2 หลักการการออกแบบและการแมตซ์สายอากาศ

#### 4.2.1 หลักการสำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์แบบสังยุค

ให้ค่าประสิทธิภาพของกำลังงานส่ง ( $EIRP_R$ ) ที่ถูกส่งมาจากเครื่องอ่าน และความสามารถในการรับพลังงาน ( $P_{chip}$ ) จากช่องทางการส่งของแท่ง เช่น พลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ต้องการให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชิพวงจรรวมทำงานและทำการมอดูเลตสะท้อนกลับไปยังอย่างคงที่ ภายใต้สมมติฐานของโพลาไรซ์ที่ตรงกัน ระหว่างเครื่องอ่าน และสายอากาศแท่ง โดยมีระยะที่พร้อมใช้งานสูงสุดของแท่งตามทิศทาง  $(\theta, \phi)$  [19] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$d_{max}(\theta, \phi) = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{\frac{EIRP_R}{P_{chip}} \tau G_{log}(\theta, \phi)} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $G_{log}(\theta, \phi)$  คือ อัตราขยายของแท่ง

$$\tau = \frac{4R_{chip}R_A}{|Z_{chip} + Z_A|^2} \leq 1 \quad (4.2)$$

คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสำหรับอิมพีแดนซ์ที่ไม่แมตซ์ระหว่างสายอากาศ ( $Z_A = R_A + jX_A$ ) และชิพวงจรรวม ( $Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip}$ ) อิมพีแดนซ์ของชิพวงจรรวมขึ้นอยู่กับกำลังงานด้านเข้า และจากช่องทางการส่ง รวมถึงขั้นตอนการจับเก็บพลังงาน ค่ารีแอกแตนซ์ด้านเข้าคือค่าความจุที่สำคัญ ส่วนใหญ่ RFID ASICS (วงจรรวมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง) ใช้ได้ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ แสดงให้เห็นว่ารีแอกแตนซ์ด้านเข้ามีค่าประมาณตั้งแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-100  $\Omega$  ถึง -400  $\Omega$  [20-22] ในขณะที่ส่วนของจำนวนจริงจะมีค่าน้อยมากหรือไม่มีเลย อิมพีแดนซ์ของสายอากาศควรจะเป็นตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดการแมตซ์สังยุคและมีมุมเฟดอิมพีแดนซ์ขนาดใหญ่ โดย  $\arctan(Z_A)$  มีค่ามากกว่า 45 องศา ความต้องการที่จะได้รับ นอกจาก  $d_{\max}$  พลังงานที่เก็บรวมไว้ในแท่งจะลดลงต่ำกว่าความสามารถในการรับพลังงานของซิฟวงจรรวม และทำให้แท่งไม่สามารถเข้าถึงได้

เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่มีราคาประหยัด ไม่ควรใช้การแมตซ์เชิงโครงข่ายภายนอก รวมถึงส่วนประกอบของอุปกรณ์กลุ่มก้อน ดังนั้นกลไกการแมตซ์จึงจะต้องมีการฝังลงไปในพื้นที่ของสายอากาศแท่ง

หลายๆ วิธีการป้อนสัญญาณสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงสายอากาศ โดยส่วนมากวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ แมตซ์แบบที การเชื่อมต่อแบบใกล้ของรูปขนาดเล็ก และการรวมกันของโครงสร้างที่เป็นช่อง ซึ่งโครงสร้างที่มีประโยชน์จะสามารถปรับค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ ได้โดยอิสระ เมื่อกระทำบนพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของแท่ง

บางเทคนิคการแมตซ์จะถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบ เพื่อความชัดเจนของขนาดที่มากที่สุดของสายอากาศจะถูกกำหนดให้เท่ากับครึ่งความยาวคลื่น โดยไม่ต้องพิจารณาถึงขนาดโดยรวม ซึ่งอาจจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง การทำให้ขนาดเล็กลงจะทำให้ได้โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ความสามารถในการแมตซ์ของการพิจารณารูปแบบการป้อนสัญญาณ จะต้องสรุปผ่านกราฟความอิมพีแดนซ์ ที่มีความต้านทานด้านเข้า และรีแอคแตนซ์ด้านเข้า สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้อง โดยรูปแบบการแมตซ์ดังกล่าวจะคล่องตัวมากขึ้นได้ เช่นการใช้สายที่มีมาตรฐาน ISO สำหรับค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ที่ขนานรวมกัน พื้นฐานของรูปแบบการแมตซ์จะแสดงด้วยความช่วยเหลือของตัวอย่างที่ไม่เป็นการค้าบางส่วนที่นำมาจากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

#### 4.2.1.1 การแมตซ์แบบที

จากรูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของไดโพลแบบระนาบซึ่งความยาว  $l$  สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยเริ่มจากจุดกึ่งกลางด้วยการใช้สลับแบบลัดวงจร ตามที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในตำรา [23] และอื่นๆ [16] แหล่งจ่ายของสายอากาศจะเชื่อมต่อกับไดโพลอันที่สอง โดยมีความยาว  $a \leq l$  วางไว้ใกล้เป็นระยะ  $b$  โดยวัดจากไดโพลตัวแรกถึงไดโพลตัวที่สอง กระแสไฟฟ้าจะไหลไปตามแขนสองข้างที่แพร่กระจายไปตามขนาดของส่วนขวาง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ [16, 23] ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่แหล่งจ่ายหาได้จาก

$$Z_m = \frac{2Z_i(1+\alpha)^2 Z_A}{2Z_i + (1+\alpha)^2 Z_A} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $Z_i = jZ_0 \tan \frac{ka}{2}$  คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสลับแบบลัดวงจรที่อยู่ในรูปแบบของตัวนำแมตซ์แบบทีและเป็นส่วนหนึ่งของไดโพล

$Z_0 \cong 276 \log_{10} \left( \frac{b}{\sqrt{r_e r'_e}} \right)$  คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายส่งสองตัวนำที่มีระยะห่าง  $b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_A$  คือ อิมพีแดนซ์ของไดโพลนับจากจุดกึ่งกลาง ในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อการแมตซ์แบบที่

$r_e = 0.25w$  คือ รัศมีสมมูลของไดโพลที่เป็นแบบระนาบ

$r_e' = 8.25w'$  คือ รัศมีสมมูลของสตัปแมตซ์ซึ่งเป็นแบบระนาบ

$\alpha = \ln\left(\frac{b}{r_e'}\right) / \ln\left(\frac{b}{r_e}\right)$  คือ ตัวคูณการแบ่งกระแสระหว่างสองตัวนำ



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของแมตซ์แบบที่สำหรับไดโพลแบบระนาบและวงจรสมมูล เมื่ออิมพีแดนซ์แปรผันตามอัตราส่วน  $(1+\alpha)$  ที่เกี่ยวข้องกับตัวนำตามขวาง [2]

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต  $a$ ,  $b$  และความกว้างของช่อง  $w'$  สามารถปรับให้แมตซ์กับค่าจำนวนเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ ( $Z_{chip}$ ) การแมตซ์แบบที่เป็นการทำเปลี่ยนรูปของอิมพีแดนซ์ดูจากรูปที่ 4.1 สำหรับกรณีของไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ผลอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่พอร์ตตัวแมตซ์แบบที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่ไดโพลขนาดเล็กจะมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้ารวมที่สามารถเป็นได้ทั้งตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

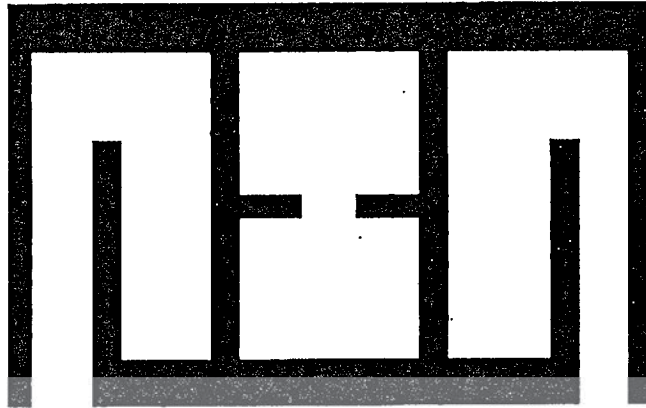
#### 4.2.1.2 การแมตซ์แบบที่คู่ [12]

ในรูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของไดโพล 2 ตัว ร่วมกับการแมตซ์แบบที่คู่ โดยไดโพลอันหนึ่งวางในไดโพลอีกอันหนึ่ง ไดโพลทั้งสองตัวประพฤติตัวเป็นวงจรรีแนสองตัวที่ขนานกัน และการเรโซแนนสองโหมดสามารถเกิดขึ้นโดยการปรับขนาดของไดโพล

ซึ่งการแมตซ์ตามรูปที่ 4.2 นั้นไดโพลตัวนอกจะมีระยะที่แน่นอน ซึ่งถือได้ว่าเป็นสายนำสัญญาณสองเส้นขนานกันซึ่งปลายสายช็อตกัน ดังนั้นอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของโครงสร้างจะประมาณได้เป็นการเหนี่ยวนำในอุดมคติ โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าในชิพวงจรรวมแท้กฟาสซีจะมีค่าเป็นตัวเก็บประจุมากเนื่องจากเป็นวงจรกระแสตรงที่เรียงกระแส การแมตซ์แบบที่คู่จะเพิ่มเป็นค่าการเหนี่ยวนำของไดโพลเพื่อให้แมตซ์กับชิพวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

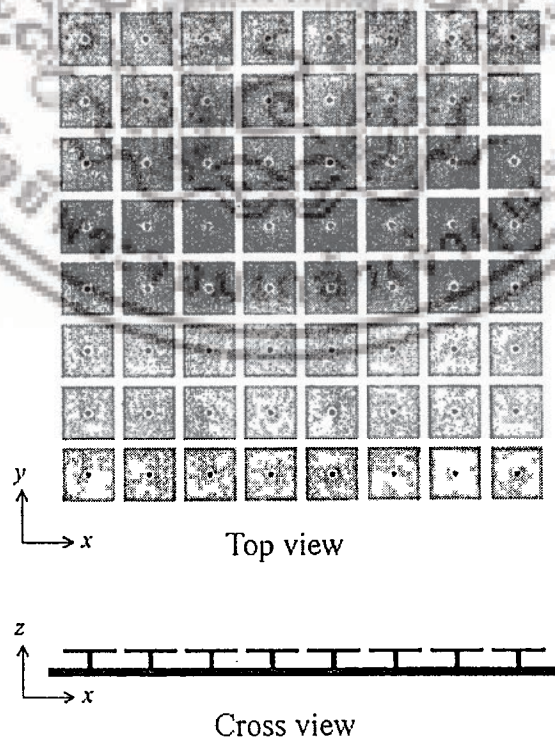


รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเมตซ์แบบที่คู่สำหรับไดโพลแบบระนาบ [12]

### 4.3 หลักการการออกแบบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 4.3.1 รูปแบบวงจรโซแนนซ์สำหรับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าใจในกลไกการทำงานของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap ; EBG) บางรูปแบบวงจรได้รับการแนะนำให้เสนอ โดยเริ่มแบบง่ายด้วยโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบสองมิติ แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งโครงสร้างแรกถูกนำเสนอใน [24] โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ระนาบกราวนด์ วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก แพทช์โลหะบนวัสดุฐานรอง และเส้นลวดเชื่อมต่อระหว่างแพทช์โลหะถึงระนาบกราวนด์ โดยโครงสร้างเรขาคณิตมีรูปร่างคล้ายเห็น



รูปที่ 4.3 รูปเรขาคณิตของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.1 แบบตัวกลางที่มีประสิทธิผลด้วยวงจรสมมูลที่มีองค์ประกอบเป็นอุปกรณ์กลุ่มก้อน LC

ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ประกอบด้วย ความกว้างแพทช์ ( $W$ ) ช่องว่างระหว่างแพทช์ ( $g$ ) ความหนาวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และ รัศมีเส้นลวดที่เชื่อมระหว่างแพทช์ถึงระนาบกราวด์ ( $r$ ) เมื่อขนาดของแต่ละช่วง ( $W+g$ ) มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ทำงาน จะทำให้วิธีการทำงานของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าอธิบายได้โดยใช้การจำลองแบบจากตัวกลางที่มีประสิทธิผลด้วยวงจรสมมูลที่มีองค์ประกอบเป็นอุปกรณ์กลุ่มก้อน LC แสดงในรูปที่ 4.5 [26] โดยตัวเก็บประจุมีผลมาจากช่องว่างระหว่างแพทช์ และตัวเหนี่ยวนำมีผลมาจากกระแสไหลไปตามแพทช์ที่ติดกัน ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร LC ริโซแนนซ์แบบขนานได้จาก

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (4.4)$$

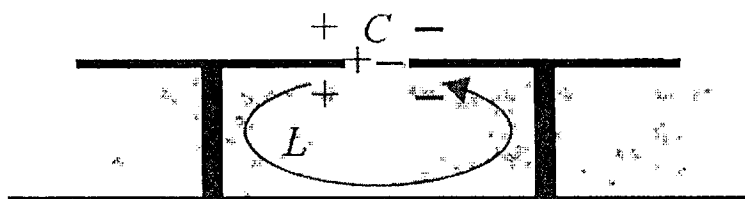
ดังนั้น จะคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรได้จาก

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

ในความถี่ต่ำ อิมพีแดนซ์จะเป็นตัวเหนี่ยวนำและรองรับคลื่นพื้นผิวสนามแม่เหล็ก และจะกลายเป็นตัวเก็บประจุที่ความถี่สูงและรองรับคลื่นพื้นผิวสนามไฟฟ้า ค่าที่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_0$  จะได้รับอิมพีแดนซ์สูง และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่รองรับคลื่นพื้นผิวใดๆ ที่เกิดขึ้นในช่องว่างแถบความถี่ อิมพีแดนซ์พื้นผิวสูงช่วยให้คลื่นระนาบสะท้อนโดยไม่มีกรลกลับเฟสที่เกิดขึ้นบนตัวนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบ (PEC)



รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า [25]



รูปที่ 4.5 แบบ LC ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของตัวเก็บประจุจะหาได้จากแนวความจุระหว่างแพตช์โลหะระนาบร่วมที่ใกล้เคียงซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยเทคนิคทั่วไปสำหรับกำหนดการกระจายของสนามไฟฟ้าสองมิติ เริ่มต้นด้วยแผ่นกึ่งอนันต์คู่ถูกแยกออกโดยช่องว่างและทำการตัดทอนขนาดแพตช์ที่จำกัด ในที่สุดขอค่าตัวเก็บประจุสำหรับเงื่อนไขที่ช่องว่างแคบได้จากสมการใน [26]

$$C = \frac{W \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{W + g}{g} \right) \quad (4.6)$$

ค่าของตัวเหนี่ยวนำจะหาได้จากกระแสลูปในรูปที่ 4.5 ประกอบด้วยเส้นลวดเชื่อมและแผ่นโลหะ สำหรับกระแสในขดโซลินอยด์ สนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ และการคำนวณตัวเหนี่ยวนำจากการจัดเก็บพลังงานสนามแม่เหล็กและการกระตุ้นกระแส โดยค่าการเหนี่ยวนำสามารถหาได้จาก [26] สมการดังนี้ ซึ่งค่าการเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างและค่าความขบขิม

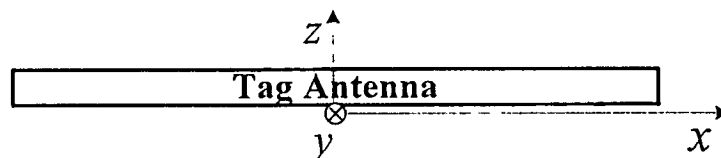
$$L = \mu h \quad (4.7)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.6 และ 4.7 ลงใน สมการที่ 4.4 และ 4.5 จะสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์พื้นผิว และความถี่เรโซแนนซ์ได้

#### 4.4 การออกแบบสายอากาศแท่งในย่านความถี่ยูเอชเอฟและโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการออกแบบสายอากาศแท่ง จะทำการออกแบบสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวมรุ่น NXP G2XL ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.88 - j148.82 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz และออกแบบให้สายอากาศสามารถทำงานร่วมกับกระแสได้และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

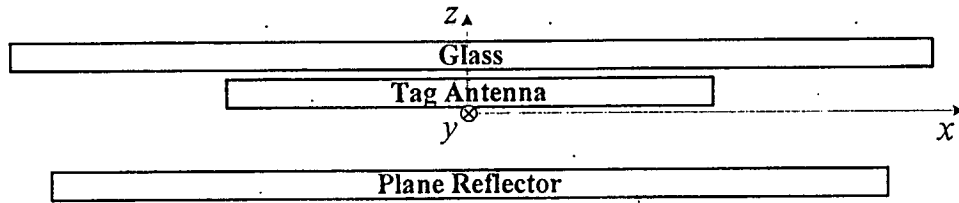
โดยในการออกแบบจะเริ่มต้นด้วยการออกแบบสายอากาศแท่งที่สามารถทำงานร่วมกับชิพวงจรรวมได้และทำงานในช่วงความถี่ 920-925 MHz ได้ ซึ่งจากการจำลองสายอากาศแท่งโดยวางองค์ประกอบตามรูปที่ 4.6 จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ตามรูปที่ 4.7



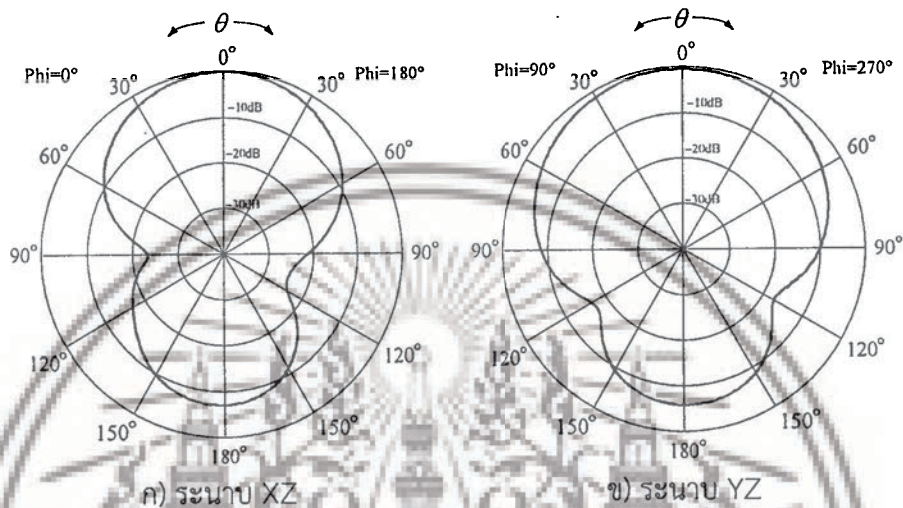
รูปที่ 4.6 การวางองค์ประกอบของสายอากาศแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





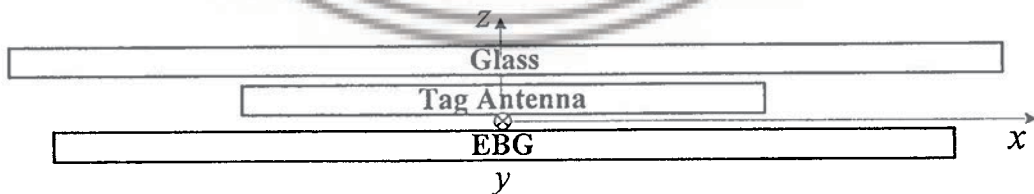
รูปที่ 4.10 การวางองค์ประกอบของสายอากาศที่กร่วมกับแผ่นสะท้อนแบบระนาบติดกับกระจก



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่กร่วมกับแผ่นสะท้อนแบบระนาบติดกับกระจก

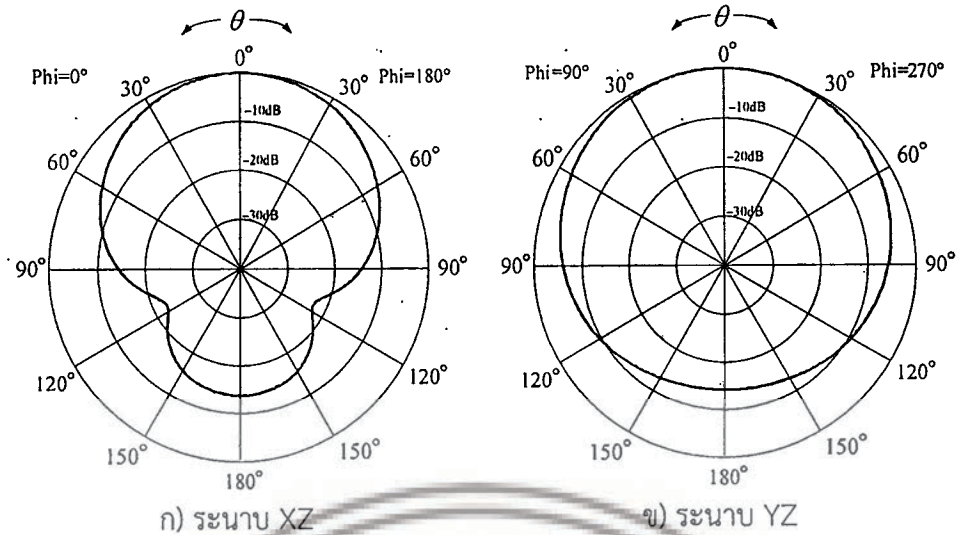
แต่จากการใส่แผ่นสะท้อนแบบระนาบไว้ข้างหลังสายอากาศแท้ก็ มีระยะห่างระหว่างสายอากาศแท้และแผ่นสะท้อนคลื่นมากเกินไป ทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้น จึงทำการศึกษาต่อในขั้นตอนต่อไป คือ การใส่โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยในขั้นตอนนี้จะมีการใส่โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าแทนการใส่แผ่นสะท้อนแบบระนาบ โดยจากการออกแบบจะวางองค์ประกอบตามรูปที่ 4.12 ซึ่งระยะระหว่างสายอากาศแท้ถึงโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีระยะลดลง และเมื่อทำการจำลองสายอากาศจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ตามรูปที่ 4.13



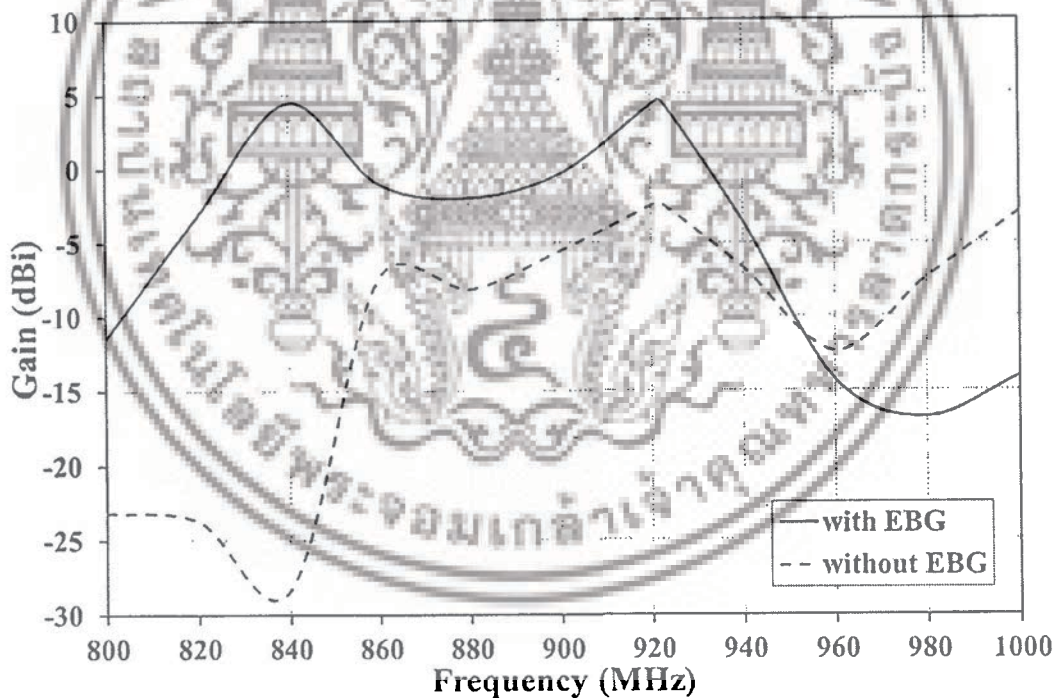
รูปที่ 4.12 การวางองค์ประกอบของสายอากาศที่กร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่กร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับกระจก

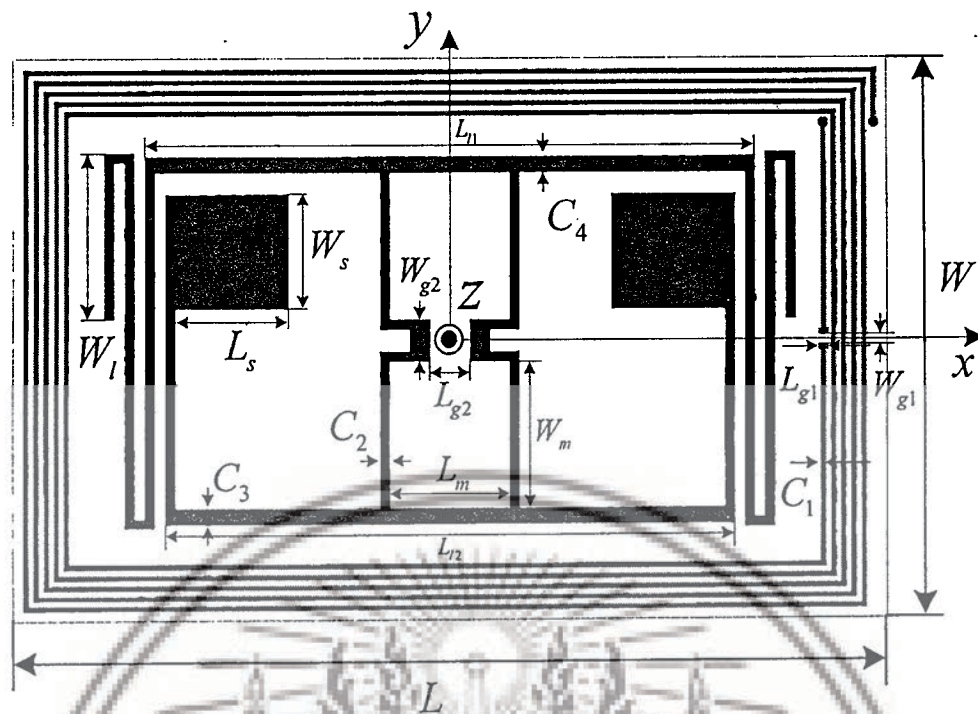
โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลอัตราการขยายเมื่อมีโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ากับไม่มีโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า จะได้ผลตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 อัตราการขยายของสายอากาศที่กเมื่อมีและไม่มีโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการจำลองตามการวางขององค์ประกอบในแต่ละแบบ ทำให้ได้รูปแบบที่ความเหมาะสมที่สุดในการใช้งานคือ การใช้โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทำให้เกิดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยในการออกแบบจะได้โครงสร้างสายอากาศที่กตามรูปที่ 4.15 และมีค่าพารามิเตอร์ตาม ตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของสายอากาศแท็กต้นแบบ

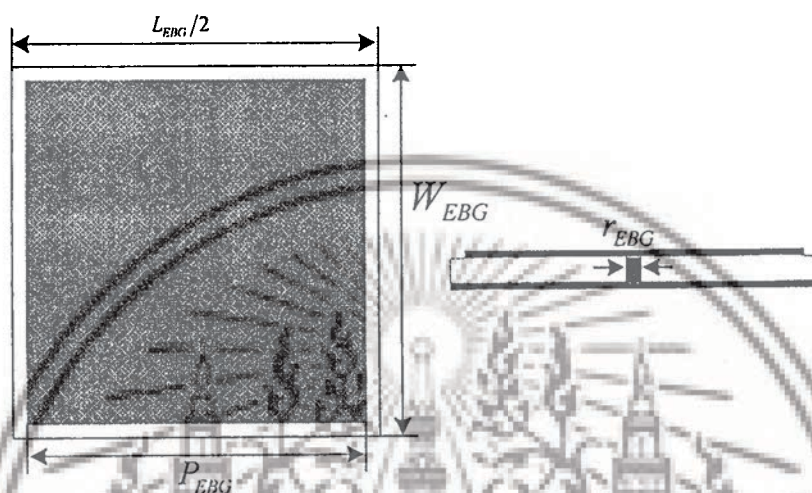
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแท็กต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$L$	84.0
$W$	54.0
$C_1$	0.5
$W_1$	16.0
$L_{11}$	60.0
$L_{12}$	56.0
$L_s$	11.0
$W_s$	11.0
$L_m$	12.0
$W_m$	14.0
$C_2$	1.0
$C_3$	1.65
$C_4$	1.65
$L_{g1}$	0.985
$W_{g1}$	0.794
$L_{g2}$	4.0
$W_{g2}$	4.0

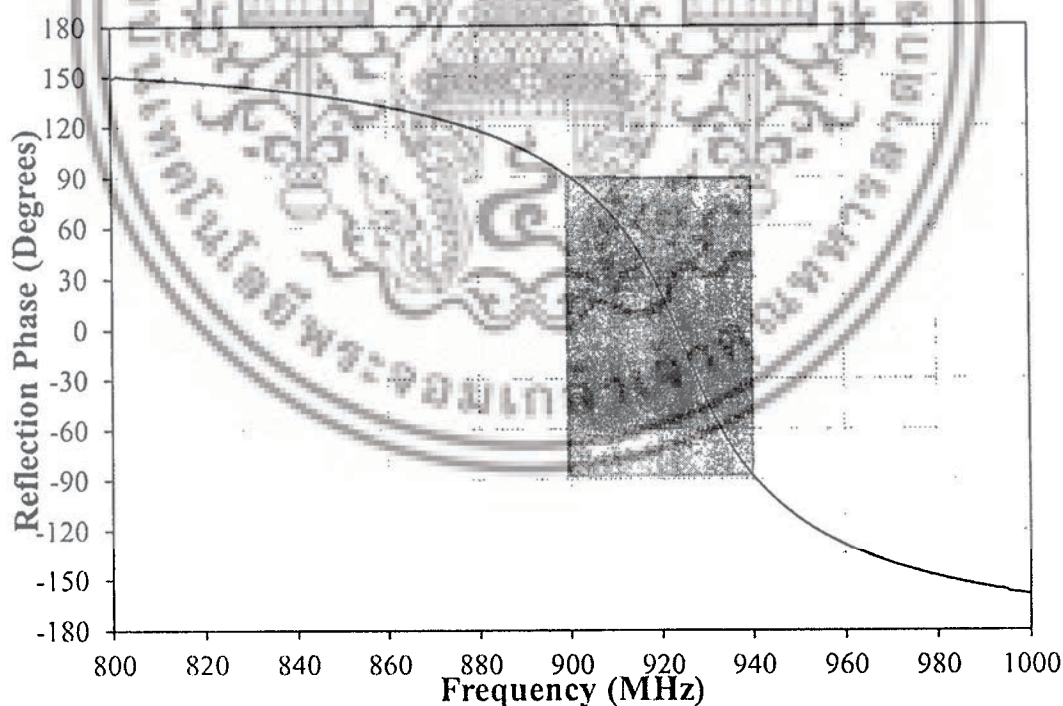
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำการพิจารณาจากเฟสการสะท้อน ซึ่งช่วงเฟสที่ใช้งานได้คือช่วง  $-90^\circ$  ถึง  $90^\circ$  จากการจำลองโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งเซลล์จะมีค่าเฟสการสะท้อนตามรูปที่ 4.17 ซึ่งที่ความถี่ 922.5 MHz มีค่าเฟสการสะท้อนเท่ากับ  $5.07^\circ$  และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 40.88 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 899.93 MHz ถึง 940.81 MHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz) โดยจะได้โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ตามรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นแบบสองเซลล์และมีค่าพารามิเตอร์ตาม ตารางที่ 4.2

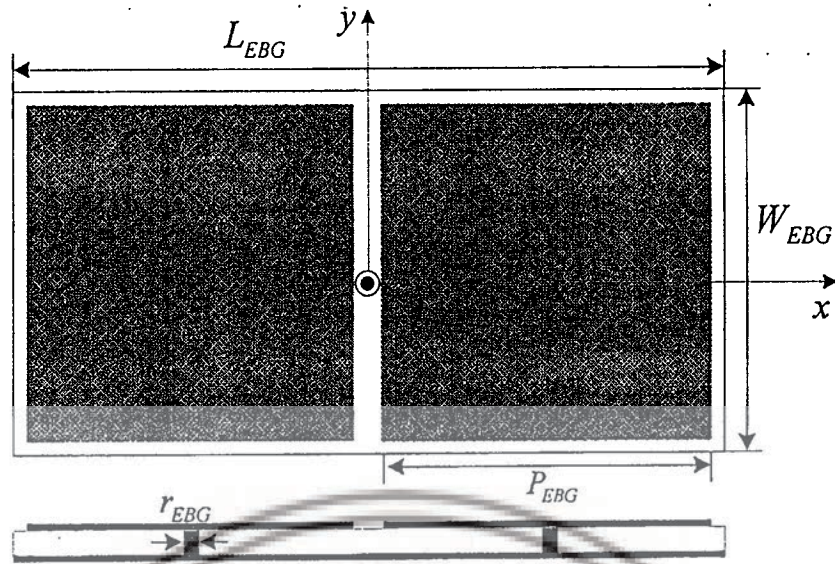


รูปที่ 4.16 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งเซลล์



รูปที่ 4.17 เฟสการสะท้อนของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

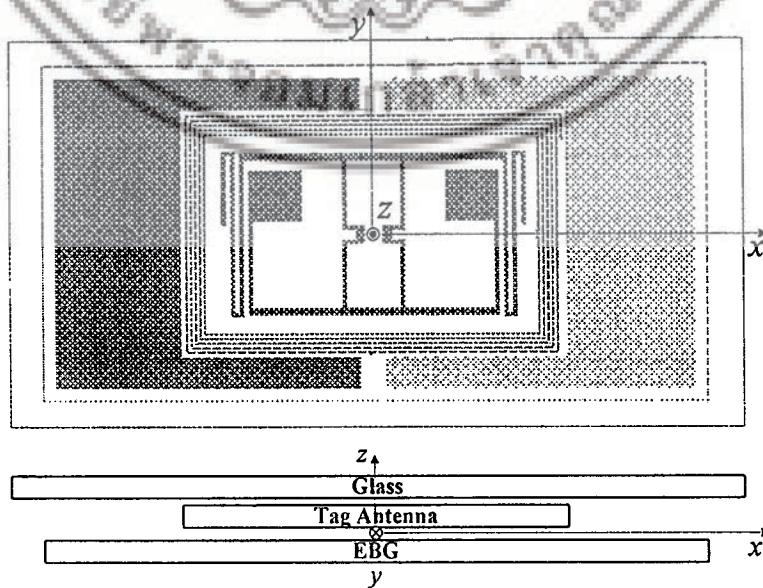


รูปที่ 4.18 โครงสร้างของช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$L_{EBG}$	147.0
$W_{EBG}$	73.5
$P_{EBG}$	71.5
$r_{EBG}$	1.0

โดยในการออกแบบจะทำการวางองค์ประกอบของโครงสร้างตามรูปที่ 4.19 โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศแท่งกับกระจก เท่ากับ 2 mm และ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแท่งกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า เท่ากับ 5 mm

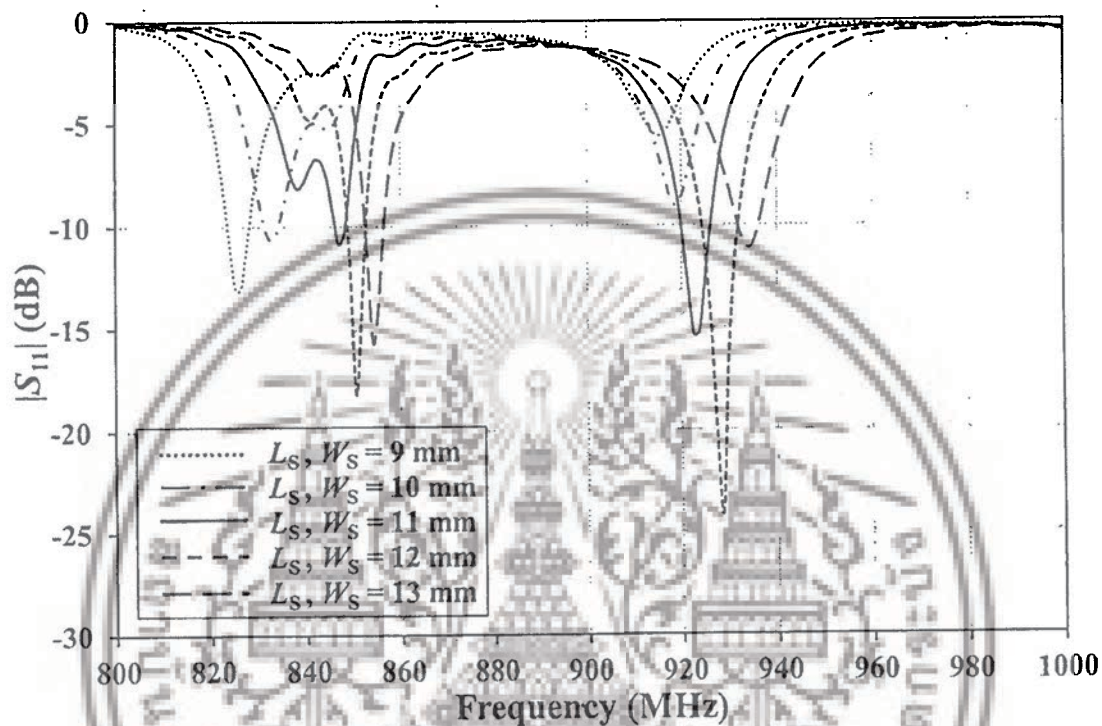


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.19 โครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบหันไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การศึกษาพารามิเตอร์

### 4.5.1 การปรับพารามิเตอร์ $L_S$ และ $W_S$

เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $L_S$  และ  $W_S$  ซึ่งคือความยาวและความกว้างของแขนรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส โดยปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 9 mm ถึง 13 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.20



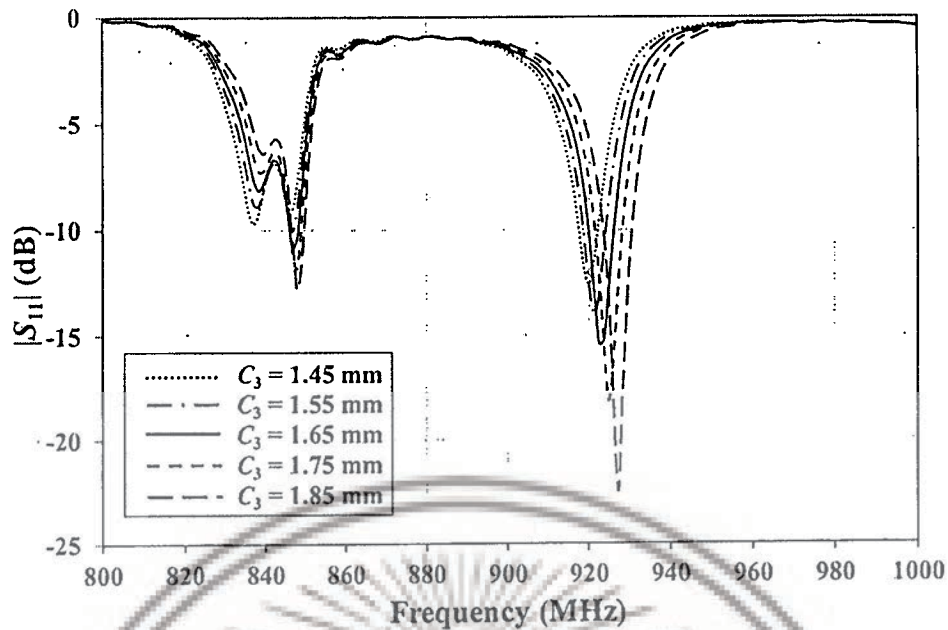
รูปที่ 4.20  $|S_{11}|$  ของสายอากาศขณะปรับพารามิเตอร์  $L_S$  และ  $W_S$

จากรูปที่ 4. พบว่าค่า  $L_S$  และ  $W_S$  เท่ากับ 11 mm มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำการเลือกความยาวและความกว้างของแขนรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสเท่ากับ 11 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz และมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz

### 4.5.2 การปรับพารามิเตอร์ $C_3$

เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $C_3$  ซึ่งคือความกว้างลายทองแดงของแขนด้านล่างของการแมตซ์แบบทีคู์ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 1.45 mm ถึง 1.85 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

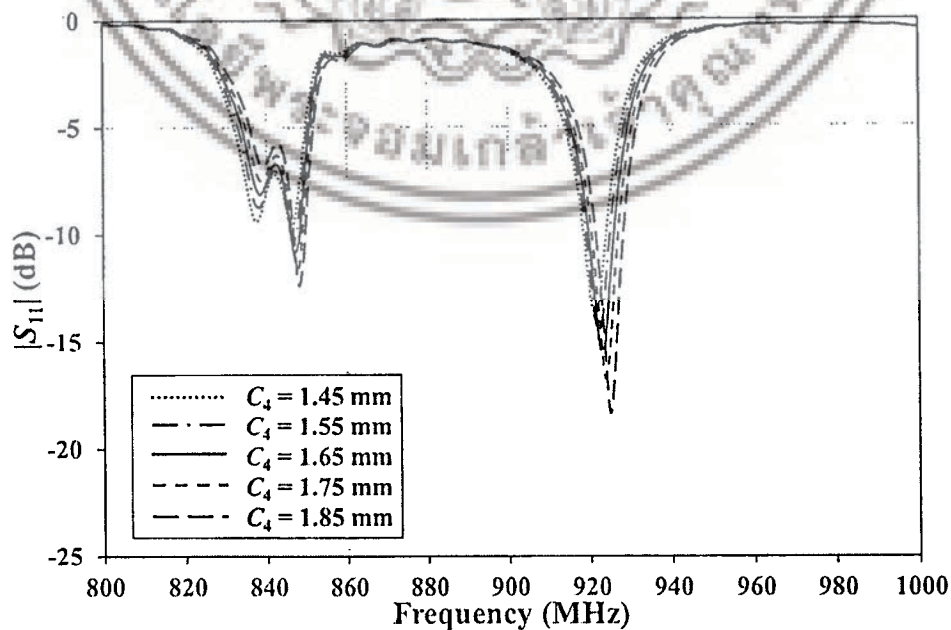


รูปที่ 4.21  $|S_{11}|$  ของสายอากาศขณะปรับพารามิเตอร์  $C_3$

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่า  $C_3$  เท่ากับ 1.65 mm มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้ งานจึงทำการเลือกความกว้างสายทองแดงของแขนด้านล่างของการแมตซ์แบบที่คู่เท่ากับ 1.65 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz และมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz

#### 4.5.3 การปรับพารามิเตอร์ $C_4$

เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $C_4$  ซึ่งคือความกว้างสายทองแดงของแขนด้านบนของการแมตซ์แบบที่คู่ โดยปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่ 1.45 mm ถึง 1.85 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.22

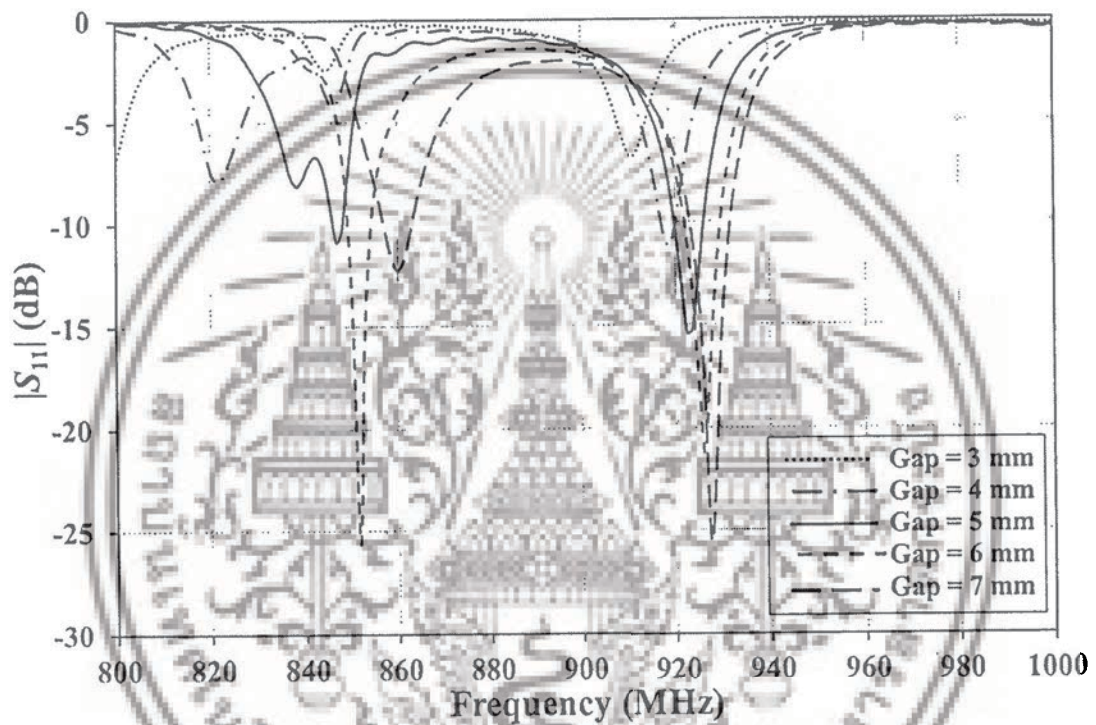


รูปที่ 4.22  $|S_{11}|$  ของสายอากาศขณะปรับพารามิเตอร์  $C_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 พบว่าค่า  $C_4$  เท่ากับ 1.65 mm มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำการเลือกความกว้างของแฉกของแขนด้านบนของการแมตซ์แบบทีคู่ออกกับ 1.65 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz และมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz

4.5.4 การปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศเทียบกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศเทียบกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่ 3 mm ถึง 7 mm ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23  $|S_{11}|$  ของสายอากาศขณะระยะห่างระหว่างสายอากาศเทียบกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

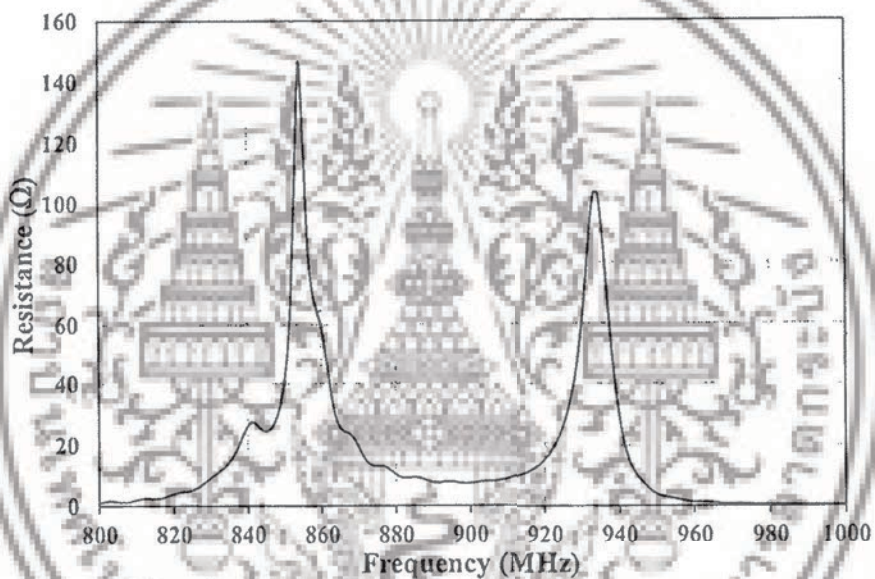
จากรูปที่ 4.23 พบว่า Gap เท่ากับ 5 mm มีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำการเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศเทียบกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า เท่ากับ 5 mm โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz และมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz

## 4.6 การจำลองสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟร่วมกับโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

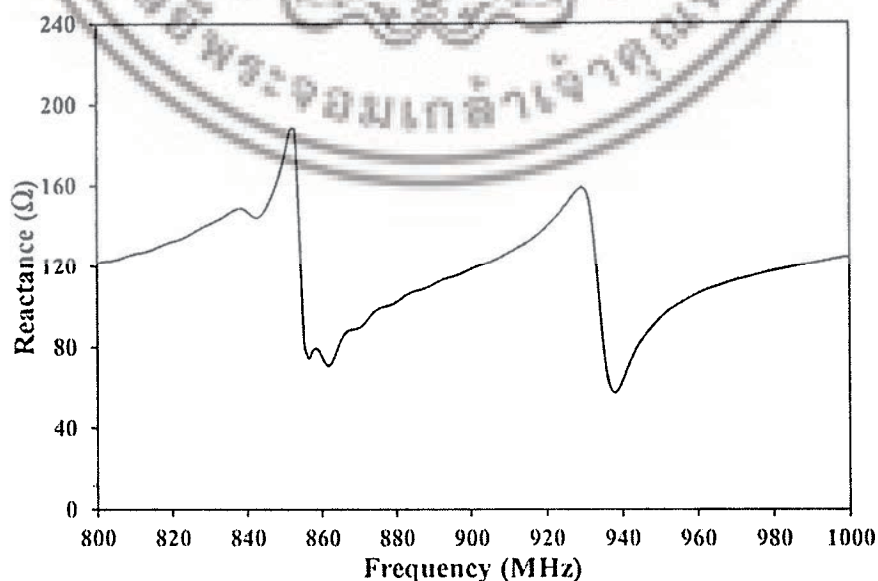
เมื่อได้โครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบตามรูปที่ 4.14 และ โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบตามรูปที่ 4.17 แล้ว จากนั้นทำการนำโครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบและโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าไปจำลองกับโปรแกรม CST Microwave Studio โดยวางส่วนประกอบตามรูปที่ 4.18 และได้ผลจากการจำลองดังต่อไปนี้

### 4.6.1 อิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 แสดงค่าความต้านทานของสายอากาศและแสดงค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศตามลำดับ โดยจากการจำลองสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $19.57 + j144.81 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 4.24 ความต้านทานของสายอากาศต้นแบบ

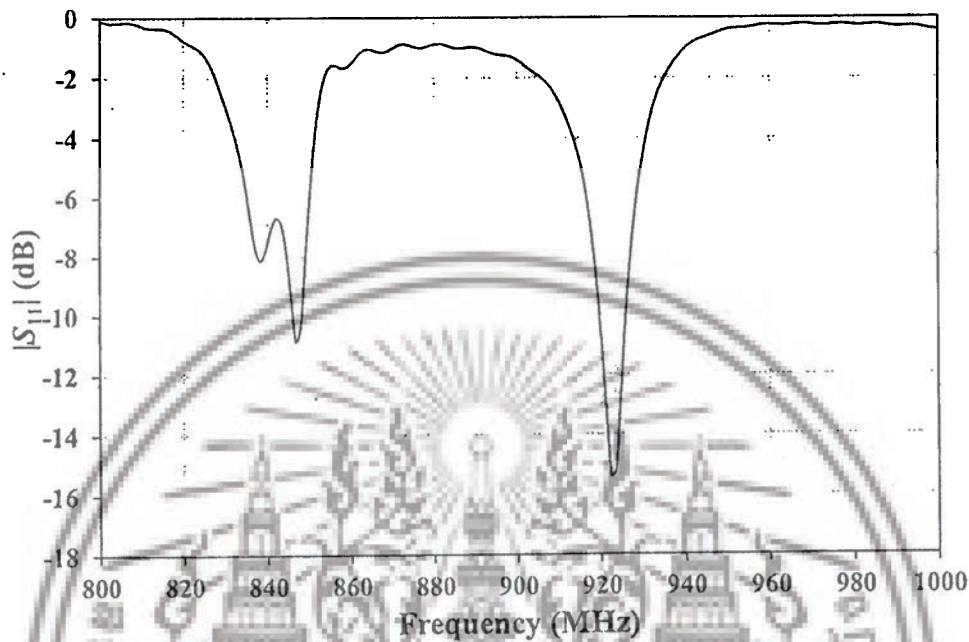


รูปที่ 4.25 รีแอกแตนซ์ของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2  $|S_{11}|$  (dB)

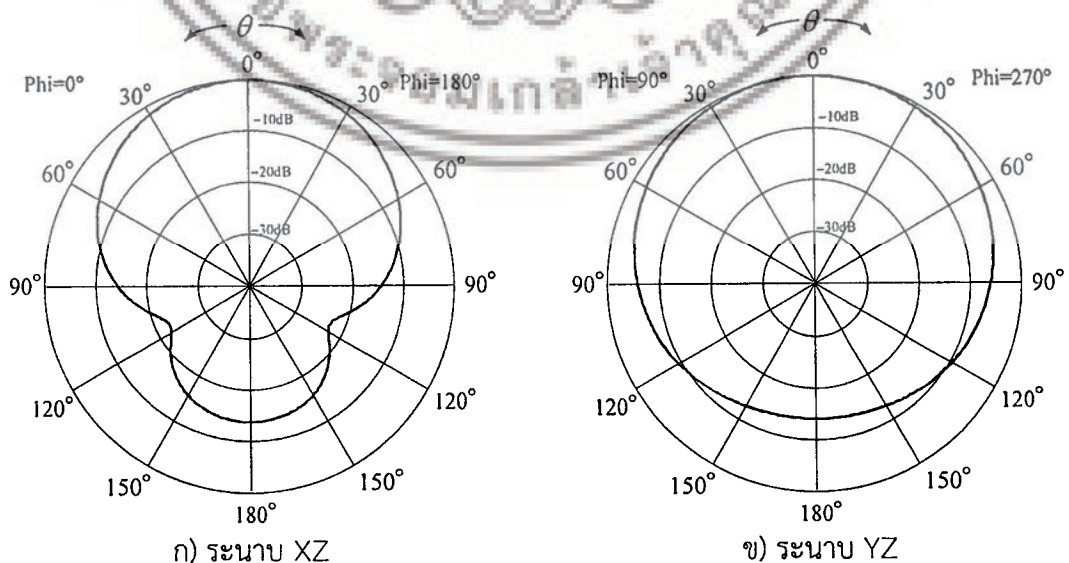
จากรูปที่ 4.26 แสดงค่า  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศ โดยจากการจำลอง สายอากาศมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 6.17 MHz ครอบคลุมแบนด์ตั้งแต่ความถี่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz



รูปที่ 4.26  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศต้นแบบ

4.6.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในรูปที่ 4.27 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz โดยจากการจำลองสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $81.9^\circ$  และ  $125.3^\circ$  ตามลำดับ

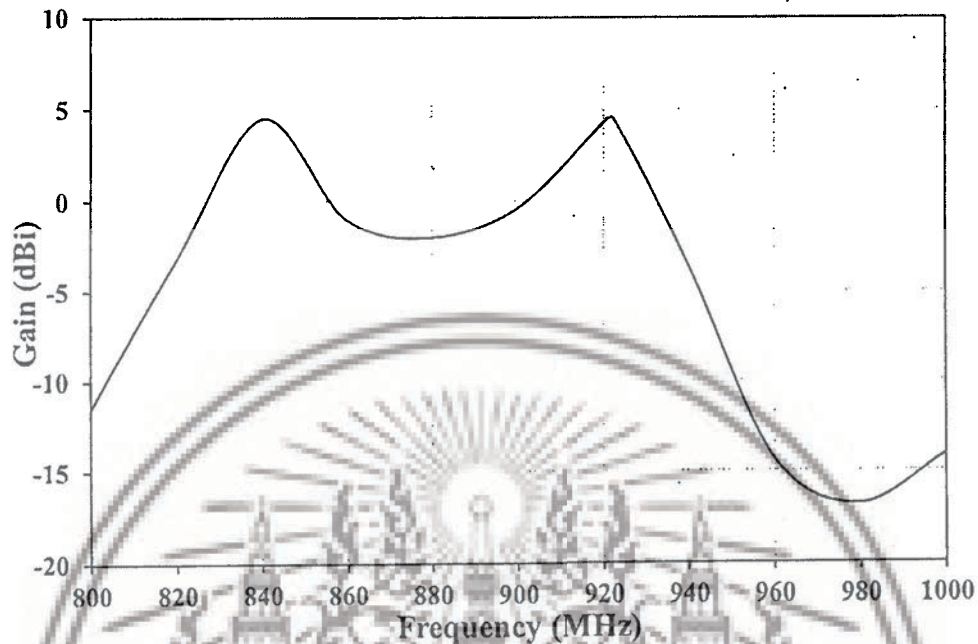


รูปที่ 4.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.4 อัตราขยาย

ในรูปที่ 4.28 แสดงถึงอัตราขยายของสายอากาศ โดยจากการจำลอง สายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 4.44 dBi ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz)



รูปที่ 4.28 อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

#### 4.7 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงหลักการและการออกแบบสายอากาศเท็กในย่านความถี่เอชเอฟ และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แล้วนำไปทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio โดยจากการจำลอง สายอากาศมีคุณสมบัติดังนี้ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $14.22 + j140.38 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz, มีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 6.17 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $81.9^\circ$  และ  $125.3^\circ$  ตามลำดับ และ มีอัตราขยายเท่ากับ 4.44 dBi ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

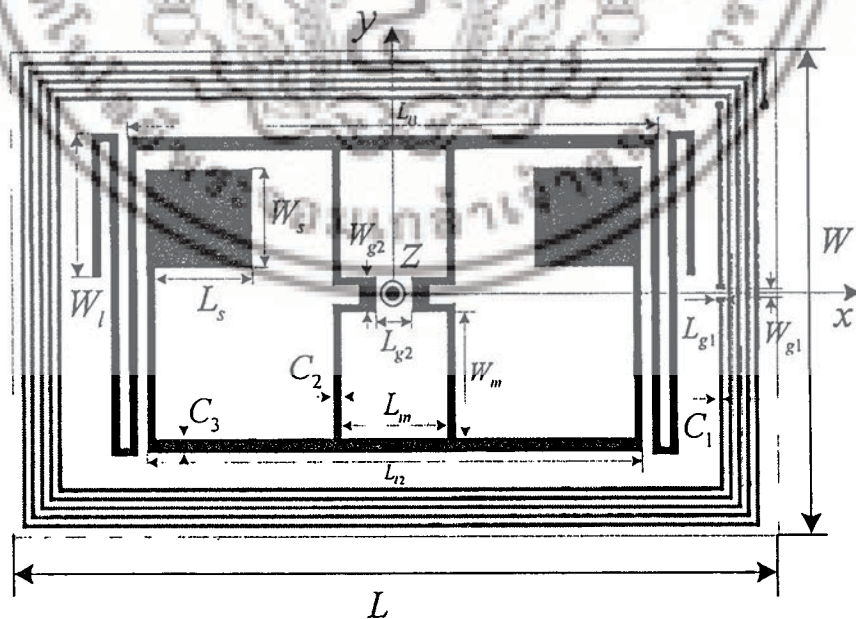
## บทที่ 5 ผลการทดสอบ

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศแท็กต้นแบบตามโครงสร้างในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยนำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ ตามผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่อธิบายในบทที่ 3 และบทที่ 4 แล้วจึงนำผลการจำลองมาเทียบกับผลการทดสอบเพื่อดูความสอดคล้องกัน

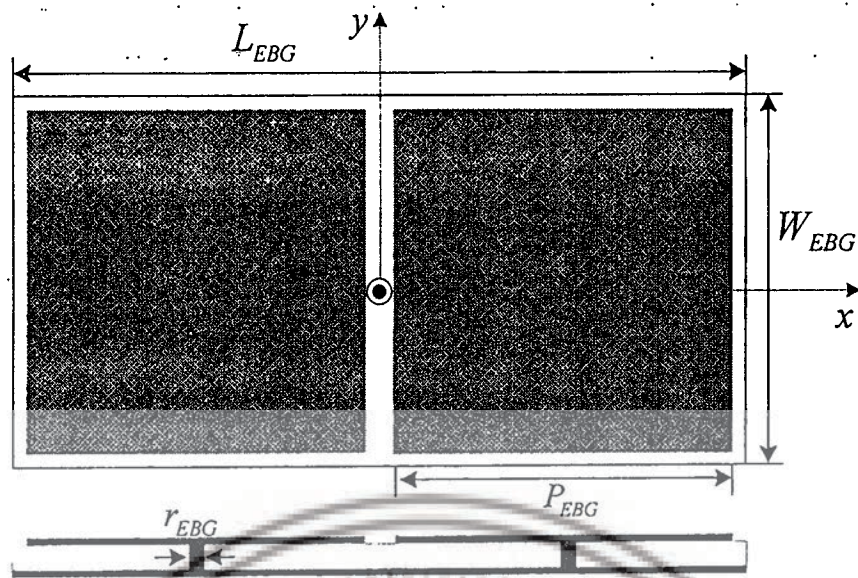
### 5.2 โครงสร้างสายอากาศแท็กต้นแบบ และการจัดเตรียมการทดสอบ

โครงสร้างสายอากาศแท็กต้นแบบที่ได้จากการจำลองจะมีโครงสร้างตามรูปที่ 5.1 และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปที่ 5.2 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 5.1 โดยในการสร้างสายอากาศต้นแบบจะแบ่งโครงตามการวางไว้ทั้งหมด 3 ชั้นตามรูปที่ 5.3 ซึ่งในชั้นที่หนึ่งคือกระจกมีความหนาเท่ากับ 3 mm วางห่างจากสายอากาศแท็กเท่ากับ 2 mm ชั้นที่สองคือสายอากาศแท็ก โดยสร้างจากแผ่นพิมพ์หน้าคู่โดยมีวัสดุฐานรองเป็น FR-4 มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.3 mm และในชั้นที่สามคือโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า วางห่างจากสายอากาศแท็กเท่ากับ 5 mm โดยสร้างจากแผ่นพิมพ์หน้าคู่โดยมีวัสดุฐานรองเป็น FR-4 มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 3 mm โดยมีรูปถ่ายสายอากาศแท็กต้นแบบตามรูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของสายอากาศแท็กต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

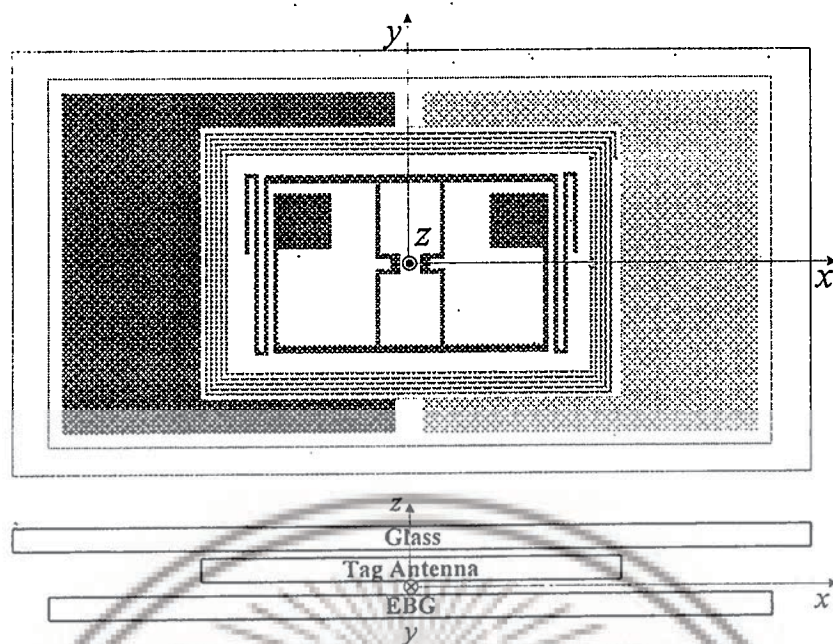


รูปที่ 5.2 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

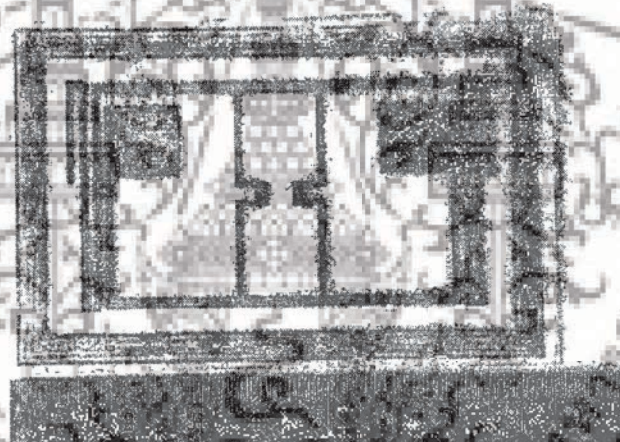
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$L$	84.0
$W$	54.0
$C_1$	0.5
$W_1$	16.0
$L_{l1}$	60.0
$L_{l2}$	56.0
$L_s$	11.0
$W_s$	11.0
$L_m$	12.0
$W_m$	14.0
$C_2$	1.0
$C_3$	1.65
$L_{g1}$	0.985
$W_{g1}$	0.794
$L_{g2}$	4.0
$W_{g2}$	4.0
$L_{EBG}$	147.0
$W_{EBG}$	73.5
$P_{EBG}$	71.5
$r_{EBG}$	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ

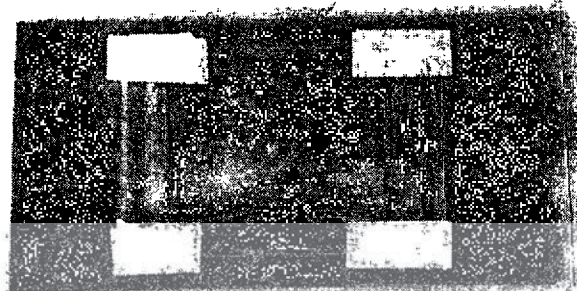


รูปที่ 5.4 รูปถ่ายของสายอากาศแท้ต้นแบบ



รูปที่ 5.5 รูปถ่ายของโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

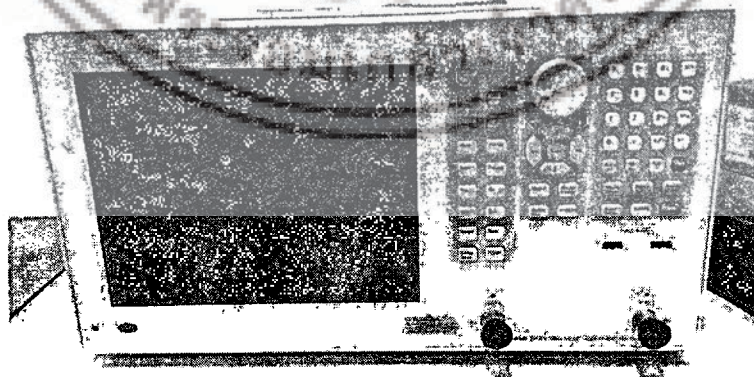


รูปที่ 5.6 รูปถ่ายของโครงสร้างรวมของสายอากาศต้นแบบ

#### 5.2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

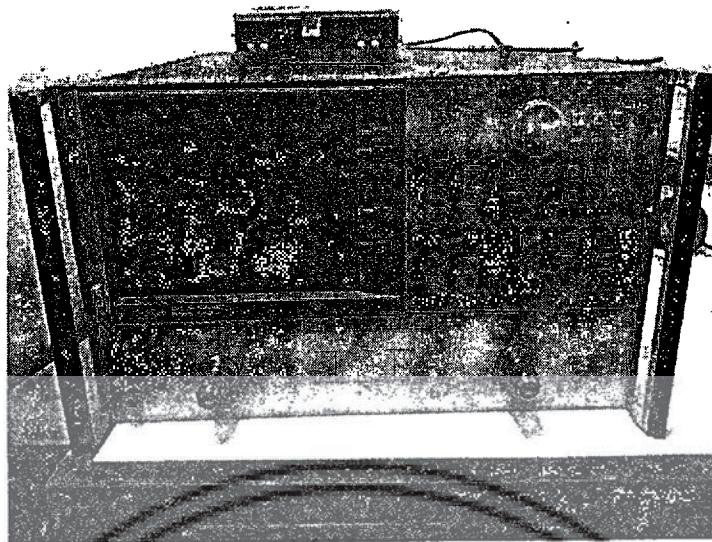
อุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศต้นแบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบในย่านความถี่เอชเอฟและในย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบดังนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5061B
2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Hewlett Packard รุ่น 8720C
3. โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล
4. สายนำสัญญาณ
5. แท่นยึดโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 5.7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5061B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Hewlett Packard รุ่น 8720C



รูปที่ 5.9 โพรบแบบดีฟเฟอร์เรนเชียล



รูปที่ 5.10 สายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แท่นยึดโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล

### 5.3 ผลการทดสอบสายอากาศ

ในการทดสอบสายอากาศแท้ [28] นั้น จะใช้อุปกรณ์ตามหัวข้อที่ 5.2.1 โดยทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบตามรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13 ซึ่งหลังจากทำการปรับเทียบอุปกรณ์แล้ว ทำการทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5061B และเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Hewlett Packard รุ่น 8720C ตามลำดับขั้นตอนดังนี้ เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ  $|S_{11}|$  (dB) และอัตราขยายของสายอากาศ

1. ทำการวัดค่า  $M_{11}$ (dB)  $P_{11}$ (degree)  $M_{21}$ (dB)  $P_{21}$ (degree)  $M_{12}$ (dB)  $P_{12}$ (degree)  $M_{22}$ (dB) และ  $P_{22}$ (degree) จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อนำค่าไปทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่า  $|S_{11}|$  (dB) และอัตราขยายของสายอากาศ

หมายเหตุ :  $M_{xy}$ (dB) คือ ขนาดของ  $S_{xy}$  และ  $P_{xy}$ (degree) คือ เฟสของ  $S_{xy}$

2. ทำการหาค่า  $S_{11}$   $S_{21}$   $S_{12}$  และ  $S_{22}$  จากสมการดังนี้

$$S_{11} = M_{11}(\text{volt}) (\cos P_{11}(\text{rad}) + i \sin P_{11}(\text{rad})) \quad (5.1)$$

$$S_{21} = M_{21}(\text{volt}) (\cos P_{21}(\text{rad}) + i \sin P_{21}(\text{rad})) \quad (5.2)$$

$$S_{12} = M_{12}(\text{volt}) (\cos P_{12}(\text{rad}) + i \sin P_{12}(\text{rad})) \quad (5.3)$$

$$S_{22} = M_{22}(\text{volt}) (\cos P_{22}(\text{rad}) + i \sin P_{22}(\text{rad})) \quad (5.4)$$

3. ทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ( $Z_{diff}$ ) โดยการแทนค่าที่ได้จากสมการที่ (5.1) ถึงสมการที่ (5.4) ลงในสมการดังนี้

$$Z_{diff} = \frac{2Z_0[(1+S_{11})^2 - S_{21}^2]}{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2 + 2S_{21}} \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{diff2} = \frac{2Z_0[(1+S_{22})^2 - S_{12}^2]}{1 - S_{22}^2 + S_{12}^2 + 2S_{12}} \quad (5.6)$$

$$Z_{diff} = \frac{Z_{diff1} + Z_{diff2}}{2} = Z_{Ant} = R_{Ant} + iX_{Ant} \quad (5.7)$$

หมายเหตุ : กำหนดให้  $Z_0 = 50\Omega$

#### 4. หาค่าอิมพีแดนซ์ของซีพวงจรรวมจากสมการดังนี้

$$R_{IC} = \frac{1}{2\pi fQC} \quad (5.8)$$

$$X_{IC} = -\frac{1}{2\pi fC} \quad (5.9)$$

เมื่อ  $Q = \frac{1}{\omega_0 RC}$

หมายเหตุ : กำหนดให้ C เท่ากับ  $1.16 \times 10^{-12}$  F และ R เท่ากับ  $16.01 \Omega$  ที่ความถี่ 915 MHz

#### 5. หาค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศจากสมการดังนี้

$$\Gamma = \frac{(R_{IC} + iX_{IC}) - (R_{Ant} - iX_{Ant})}{(R_{IC} + iX_{IC}) + (R_{Ant} + iX_{Ant})} \quad (5.10)$$

$$|S_{11}| = 20 \log |\Gamma| \quad (5.11)$$

#### 6. หาค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ดังนี้

6.1 หาค่า  $G_r$  (dB) ได้จากการวัดค่า  $\left(\frac{P_r}{P_i}\right)$  จากเครื่องวิเคราะห์โคจขาย แล้วนำไป

แทนในสมการดังนี้

$$G_r(dB) + G_r(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_i} \right) \quad (5.12)$$

#### 6.2 หาค่า $e_{cd}D(\theta, \phi)$ จากสมการดังนี้

$$G_{Ant} = (1 - |\Gamma_1|^2) e_{cd}D(\theta, \phi) \quad (5.13)$$

$$e_{cd}D(\theta, \phi) = \frac{G_{Ant}}{1 - |\Gamma_1|^2} \quad (5.14)$$

หมายเหตุ : กำหนดให้  $G_r$  (dB) เท่ากับ  $G_{Ant}$  และ  $\Gamma_1$  คือ ประสิทธิภาพการสะท้อนของสายอากาศแท่งที่ใช้กับระบบสายนำสัญญาณ  $50 \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

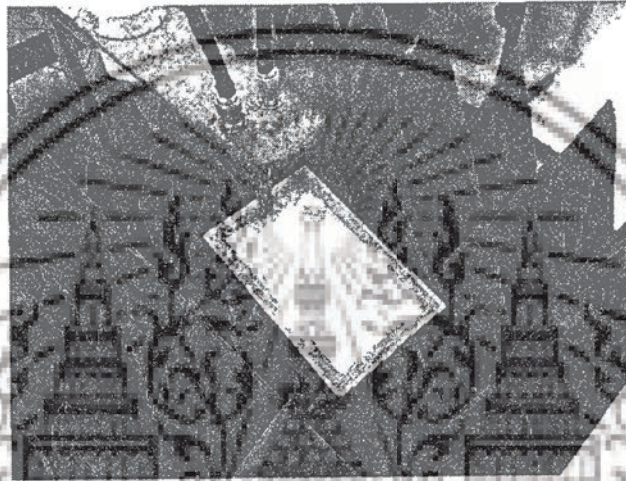
6.3 หาค่าอัตราขยายของสายอากาศ ( $G_{total}$ ) ได้จากสมการดังนี้

$$G_{total} = (1 - |\Gamma_2|^2) e_{cd} D(\theta, \phi) \tag{5.15}$$

หมายเหตุ : กำหนดให้  $\Gamma_2$  คือ ประสิทธิภาพการสะท้อนของสายอากาศแท้ที่ใช้กับขีฟวงจวม

### 5.3.1 การทดสอบสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

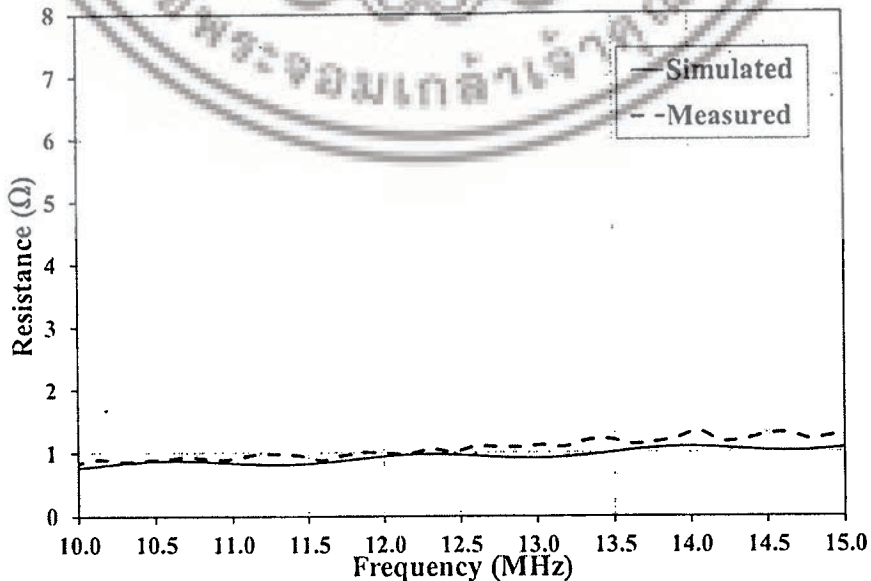
ในการทดสอบสายอากาศแท้กในย่านความถี่เอชเอฟจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5061B



รูปที่ 5.12 การทดสอบสายอากาศแท้กย่านความถี่เอชเอฟ

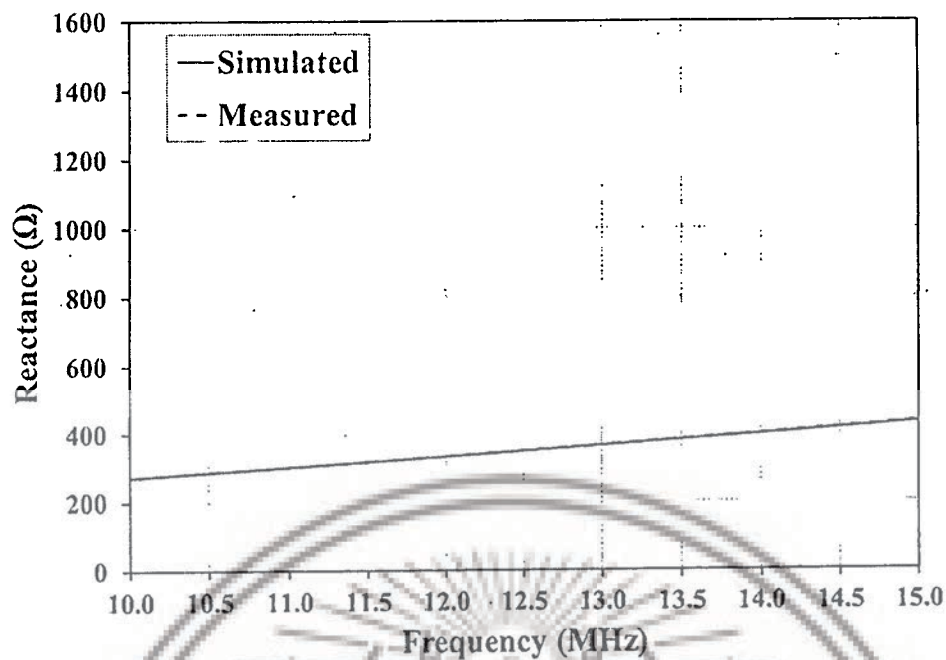
#### 5.3.1.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ค่าอิมพีแดนซ์จากการจำลองและทดสอบของสายอากาศที่ความถี่ 13.56 MHz เท่ากับ  $1.03 + j383.29 \Omega$  และ  $1.18 + j384.12 \Omega$  ตามลำดับ ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 5.13 และ รูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองและผลการทดสอบความต้านทานในย่านความถี่เอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ผลการจำลองและผลการทดสอบรีแอคแตนซ์ในย่านความถี่เอชเอฟ

### 5.3.2 การทดสอบสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

ในการทดสอบสายอากาศทั้งในย่านความถี่เอชเอฟจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Hewlett Packard รุ่น 8720C

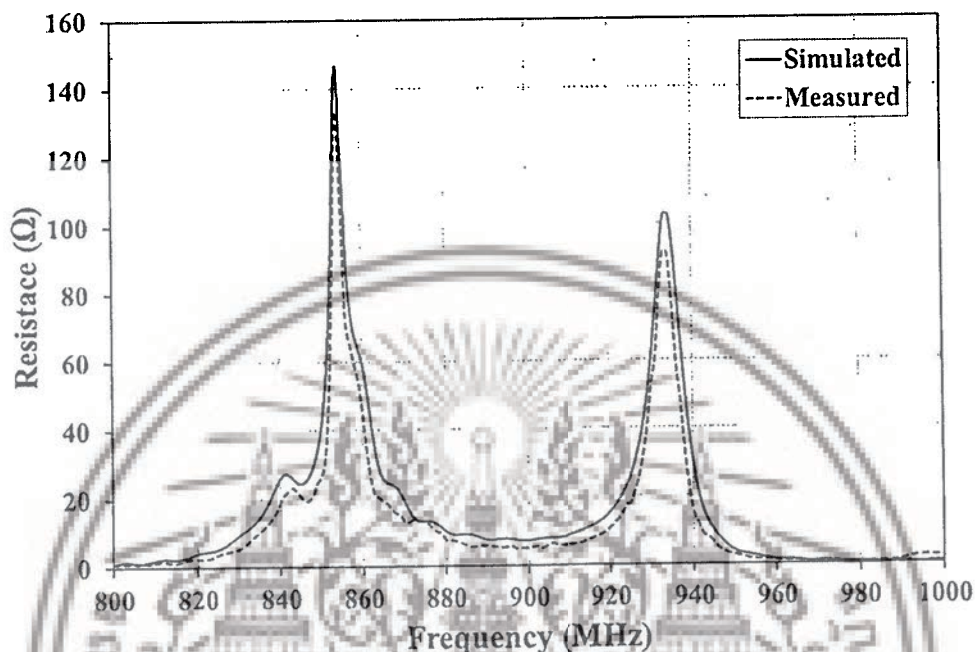


รูปที่ 5.15 การทดสอบสายอากาศเทียกย่านความถี่เอชเอฟ

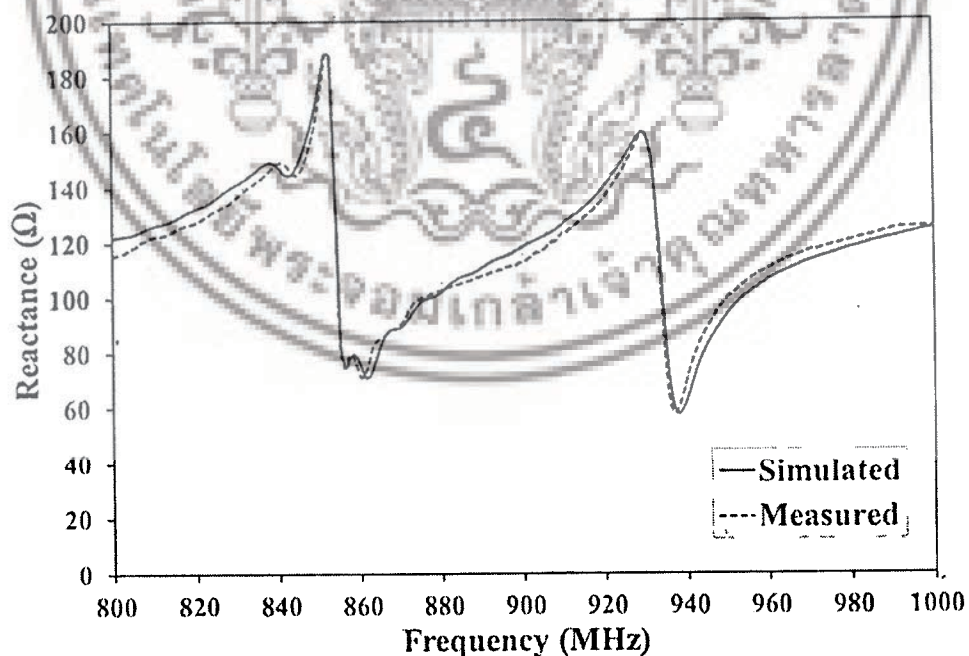
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการจำลองและทดสอบที่ความถี่ 922.5 MHz เท่ากับ  $19.57 + j144.64 \Omega$  และ  $14.22 + j140.38 \Omega$  ตามลำดับดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 ผลการจำลองและผลการทดสอบความต้านทานในย่านความถี่เอชเอฟ

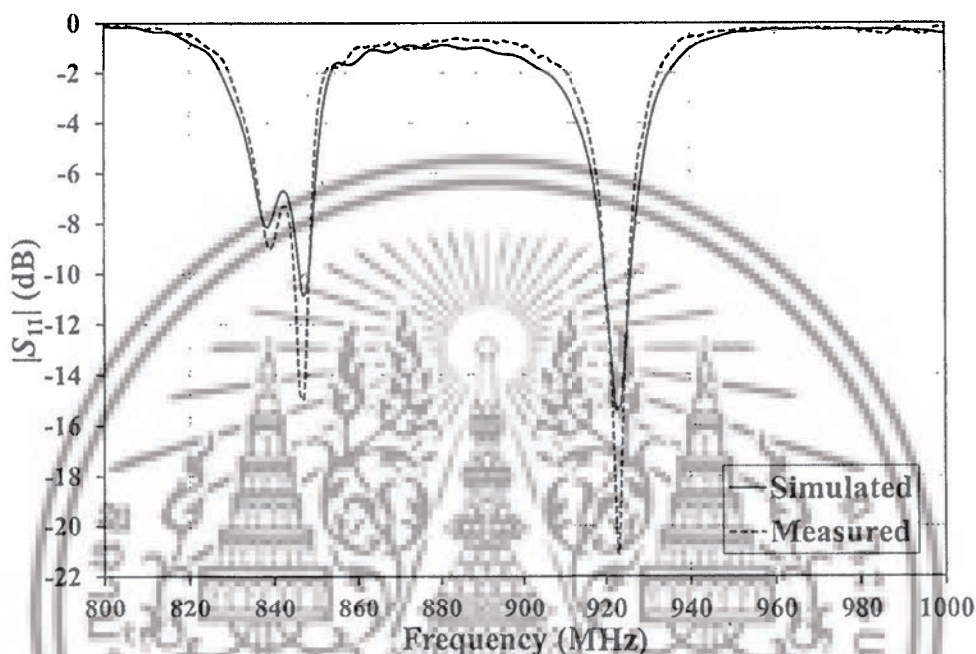


รูปที่ 5.17 ผลการจำลองและผลการทดสอบรีแอกแตนซ์ในย่านความถี่เอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2.2 $|S_{11}|$ (dB)

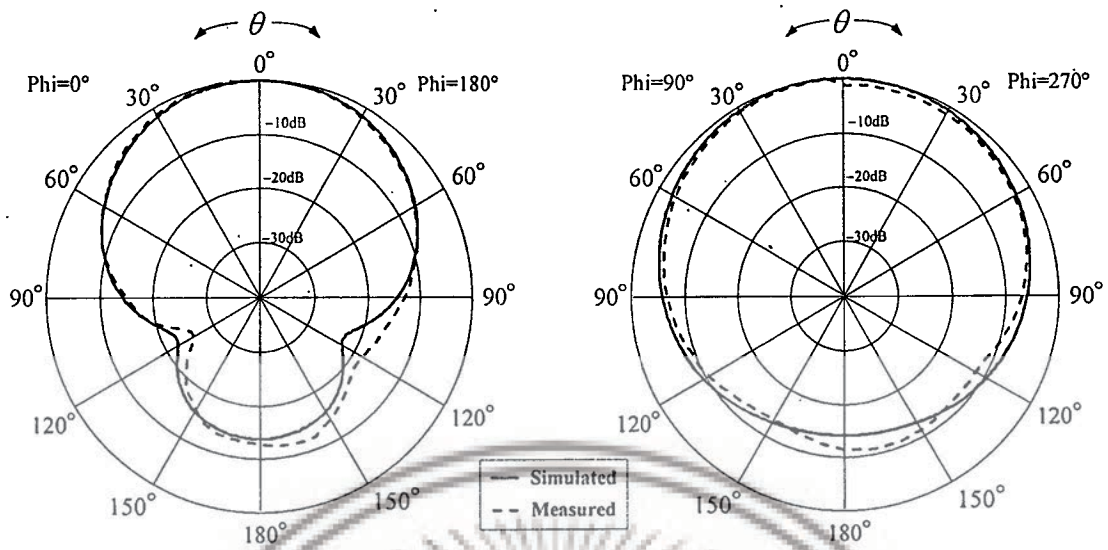
ในรูปที่ 5.18 แสดง  $|S_{11}|$  (dB) ของสายอากาศจากการจำลองและทดสอบ ที่ความถี่ 922.5 MHz จากการจำลองมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB โดยมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 6.17 MHz ครอบคลุมแบนด์ตั้งแต่ความถี่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz และ จากการทดสอบมีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -20.12 dB มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 5.97 MHz ครอบคลุมแบนด์ตั้งแต่ความถี่ 919.71 MHz ถึง 925.68 MHz



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองและผลการทดสอบ  $|S_{11}|$  (dB) ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

### 5.3.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในรูปที่ 5.19 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยจากการจำลองสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ความถี่ 922.5 MHz เท่ากับ  $81.9^\circ$  และ  $125.3^\circ$  ตามลำดับ และจากการทดสอบสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ความถี่ 922.5 MHz เท่ากับ  $80^\circ$  และ  $110^\circ$  ตามลำดับ



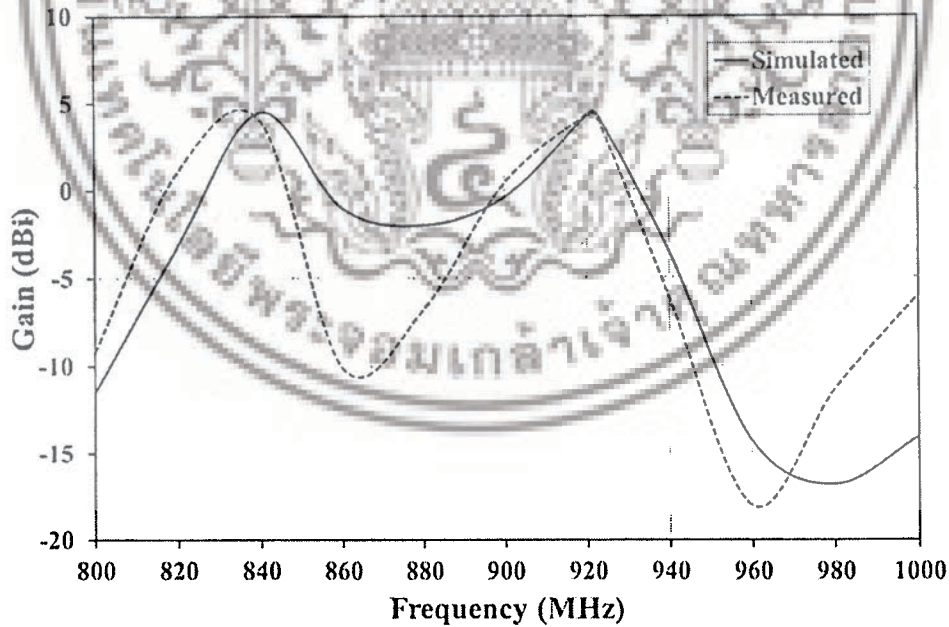
ก) ระนาบ XZ

ข) ระนาบ YZ

รูปที่ 5.19 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่เอชเอฟ

5.3.2.4 อัตราขยาย

ในรูปที่ 5.20 แสดงถึงอัตราขยายของสายอากาศจากการจำลองและทดสอบเท่ากับ 4.44 dBi และ 4.31 dBi ตามลำดับที่ความถี่กลาง (922.5 MHz)



รูปที่ 5.20 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายในย่านความถี่เอชเอฟ

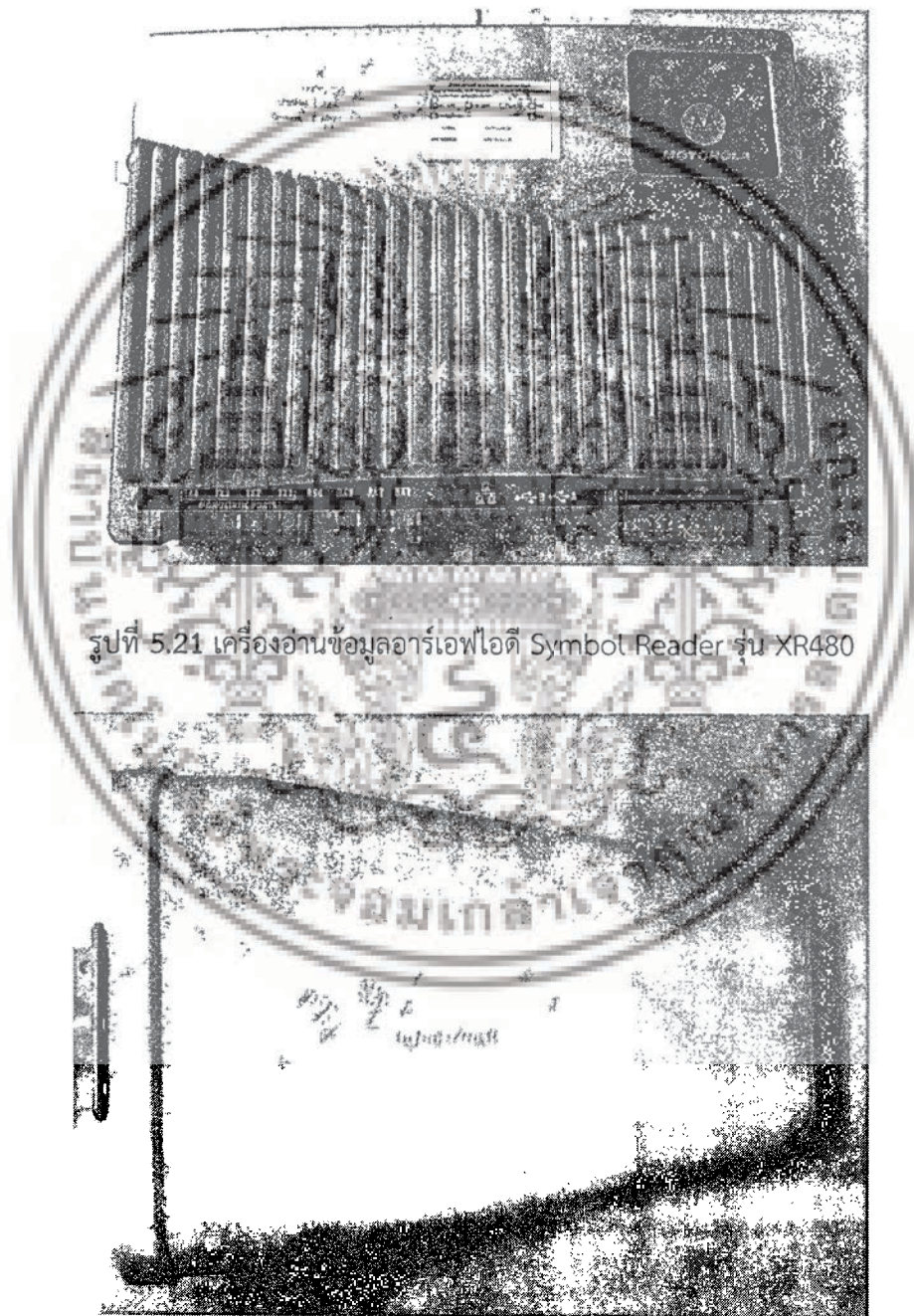
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศ

### 5.4.1 อุปกรณ์ในการวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศ

ในการวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศจะใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

1. เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี Symbol Reader รุ่น XR480
2. สายอากาศโพลาริซเซชัน Wilson รุ่น 204411
3. เครื่องมือวัดระยะทาง



รูปที่ 5.21 เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี Symbol Reader รุ่น XR480

รูปที่ 5.22 สายอากาศโพลาริซเซชัน Wilson รุ่น 204411

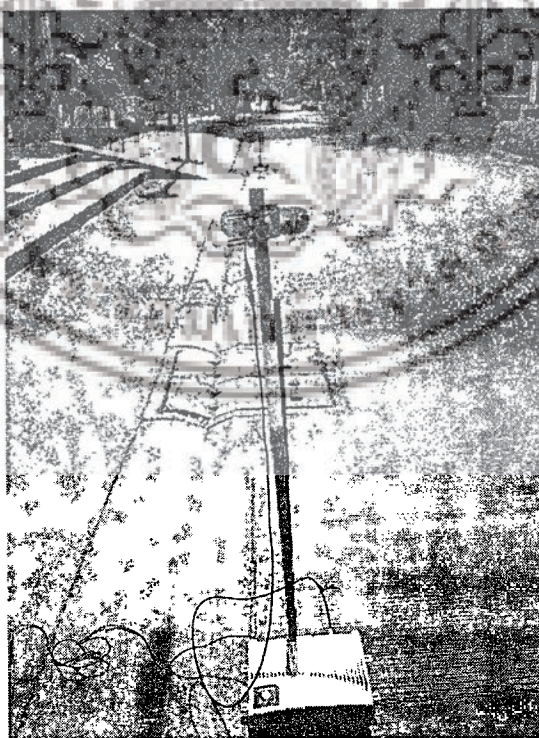
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 เครื่องมือวัดระยะทาง

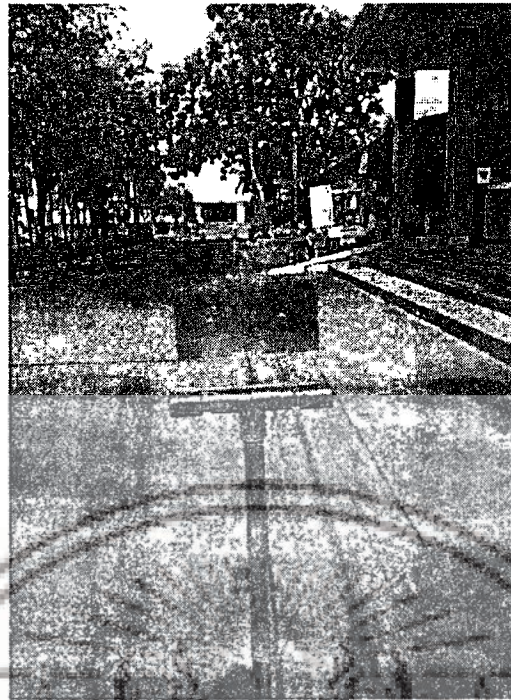
#### 5.4.2 การวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศ

ในการประยุกต์การใช้งาน จะทำการวัดระยะการอ่านไกลสุดของสายอากาศ โดยในทำการจัดเตรียมอุปกรณ์และสายอากาศ จะทำดังรูปที่ 5.24 และ รูปที่ 5.25 ตามลำดับ ซึ่งในการวัดระยะการอ่านของสายอากาศแท้ก็ ได้ระยะการอ่านไกลสุดเท่ากับ 13.5 m



รูปที่ 5.24 การเตรียมอุปกรณ์การวัดระยะการอ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 การเตรียมสายอากาศแท่งในการวัดระยะการอ่านข้อมูล

## 5.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการสร้างและทดสอบสายอากาศเพื่อวัดคุณสมบัติของสายอากาศทั้งสองย่านความถี่ โดยในย่านความถี่เอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติคือ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $1.18 + j384.12 \Omega$  ที่ความถี่ 13.56 MHz และในย่านความถี่ยูเอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติดังนี้ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $14.22 + j140.38 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz มีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -20.12 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 5.97 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.71 MHz ถึง 925.68 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $80^\circ$  และ  $110^\circ$  ตามลำดับ มีอัตราการขยายเท่ากับ 4.31 dBi ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) และมีระยะการอ่านของสายอากาศสูงสุดเท่ากับ 13.5 m และเมื่อนำผลการจำลองและผลจากการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศทั้งสองย่านความถี่มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าผลการจำลองและผลจากการทดสอบมีความสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปเนื้อหาของงานวิจัย ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศ ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาสายอากาศต่อไป

#### 6.2 สรุปเนื้อหางานวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการศึกษาและขอบเขตของงานวิจัย ทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟเอที และหลักการในการออกแบบสายอากาศแท่ง โดยทำการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองและสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบ รวมทั้งนำสายอากาศที่ถูกสร้างมาทดสอบคุณสมบัติ

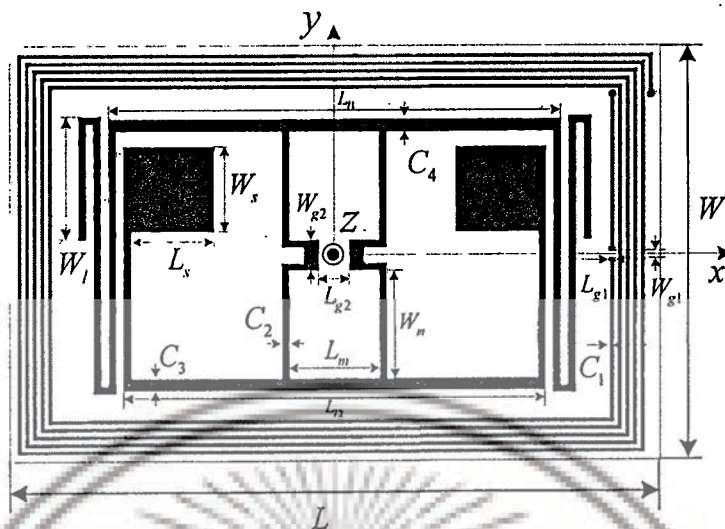
ในการคำนวณและวิเคราะห์การออกแบบสายอากาศแท่ง ในย่านความถี่เอชเอฟจะออกแบบให้สายอากาศแท่งมีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวม SIC5600 ซึ่งมีค่าทางไฟฟ้าเป็นตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับ 23.5 pF และในย่านความถี่ยูเอชเอฟจะออกแบบให้สายอากาศแท่งมีความเหมาะสมกับชิพวงจรรวม NXP G2XL ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.88 + j148.82 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และหลังจากการออกแบบได้สายอากาศต้นแบบสายอากาศจะถูกนำไปจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio

ผลการจำลองสายอากาศแท่งในย่านความถี่เอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติ คือ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $1.03 + j383.29 \Omega$  ที่ความถี่ 13.56 MHz และในย่านความถี่ยูเอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติ คือ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $19.57 + j144.64 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz, มีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -15.34 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 6.17 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.79 MHz ถึง 925.96 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $81.9^\circ$  และ  $125.3^\circ$  ตามลำดับ และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.44 dBi ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz)

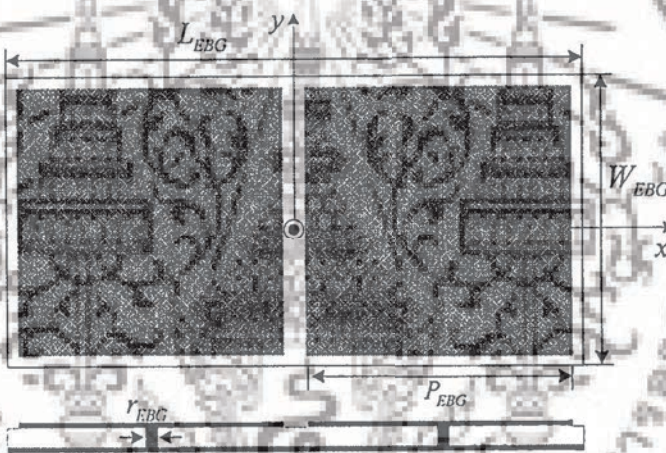
โดยโครงสร้างสายอากาศแท่งต้นแบบที่ได้จากการจำลองจะมีโครงสร้างตามรูปที่ 6.1 และโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปที่ 6.2 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 6.1 โดยในการสร้างสายอากาศต้นแบบจะแบ่งโครงตามการวางไว้ทั้งหมด 3 ชั้นตามรูปที่ 6.3 ซึ่งในชั้นที่หนึ่งคือกระจกมีความหนาเท่ากับ 3 mm วางห่างจากสายอากาศแท่งเท่ากับ 2 mm ชั้นที่สองคือสายอากาศแท่ง โดยสร้างจากแผ่นพิมพ์หน้าคู่โดยมีวัสดุฐานรองเป็น FR-4 มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.3 mm และในชั้นที่สามคือโครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า วางห่างจากสายอากาศแท่งเท่ากับ 5 mm โดยสร้างจากแผ่นพิมพ์หน้าคู่โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

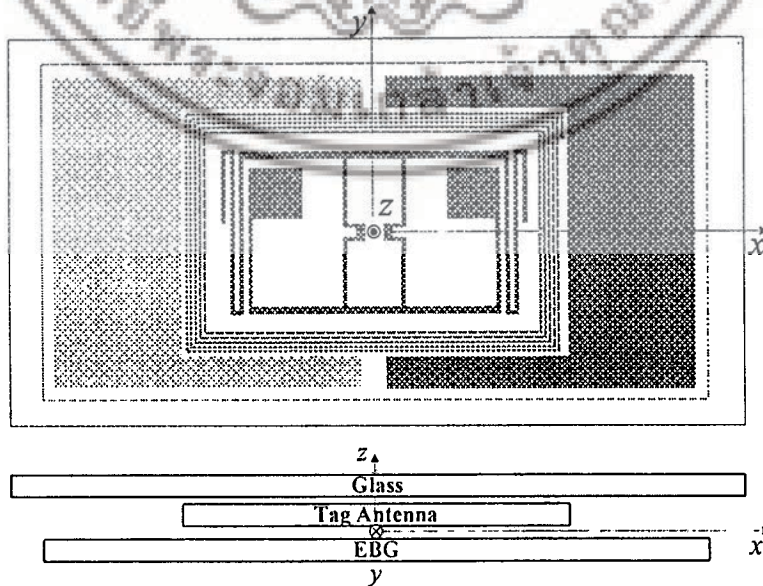
วัสดุฐานรองเป็น FR-4 มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 และมีความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 3 mm



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของสายอากาศแท่งตันแบบ



รูปที่ 6.2 โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าตันแบบ



รูปที่ 6.3 โครงสร้างรวมของสายอากาศตันแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
$L$	84.0
$W$	54.0
$C_1$	0.5
$W_1$	16.0
$L_{11}$	60.0
$L_{12}$	56.0
$L_s$	11.0
$W_s$	11.0
$L_m$	12.0
$W_m$	14.0
$C_2$	1.0
$C_3$	1.65
$C_4$	1.65
$L_{g1}$	0.985
$W_{g1}$	0.794
$L_{g2}$	4.0
$W_{g2}$	4.0
$L_{EBG}$	147.0
$W_{EBG}$	73.5
$P_{EBG}$	71.5
$r_{EBG}$	1.0

เมื่อสร้างสายอากาศแก้คต้นแบบตามขนาด ในตารางที่ 6.1 แล้วจึงนำสายอากาศไปทดสอบ โดยผลการทดสอบในย่านความถี่เอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติคือ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $1.18+j384.12 \Omega$  ที่ความถี่ 13.56 MHz และในย่านความถี่ยูเอชเอฟสายอากาศมีคุณสมบัติดังนี้ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $14.22+j140.38 \Omega$  ที่ความถี่ 922.5 MHz มีค่า  $|S_{11}|$  (dB) เท่ากับ -20.12 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 5.97 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 919.71 MHz ถึง 925.68 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งดูได้จากระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยทั้งสองระนาบนี้มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $80^\circ$  และ  $110^\circ$  ตามลำดับ มีอัตราการขยายเท่ากับ 4.31 dBi ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) และ มีระยะการอ่านของสายอากาศ สูงสุดเท่ากับ 13.5 m

และเมื่อนำผลการจำลองและผลจากการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศทั้งสองย่านความถี่ มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าผลการจำลองและผลจากการทดสอบมีความสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และการทดสอบสายอากาศแท่งย่านความถี่คู่ร่วมกับโครงสร้างช่องว่าง แถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดีบนวัสดุที่เป็นกระจก จะพบว่าในการ ออกแบบสายอากาศแท่งนั้น นอกจากความถี่ที่ต้องการใช้งานที่ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz แล้ว สายอากาศยังเกิดความถี่ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่หนึ่งคือช่วงความถี่ประมาณ 845 MHz นั้น เกิด จากการนำสายอากาศมาทำงานร่วมกับกระจก ซึ่งการนำสายอากาศมาทำงานร่วมกับกระจกนั้นทำให้ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเกิดการเพิ่มขึ้น โดยเมื่อทำการดูผลการจำลองของสายอากาศแท่งที่ยังไม่ ได้มาใช้งานกับกระจกแล้ว ที่ความถี่ 845 MHz ก็เริ่มมีแนวโน้มการเกิดความถี่ที่สามารถใช้งานได้ แล้วแต่ยังไม่แมตช์กับซีพวงจรรวมมาก แต่เมื่อนำมาใช้งานกับกระจก และทำการแมตช์สายอากาศ ใหม่ที่ความถี่ใช้งานที่ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz เพื่อให้ใช้งานได้นั้น ทำให้ที่ความถี่ 845 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่ต้องการ เกิดการแมตช์กับซีพวงจรรวมตามมา

และในส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น สายอากาศแท่งสามารถใช้งานกับวัสดุที่เป็นกระจก ได้จริง แต่ยังไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้งานเข้ากับระบบที่ต้องติดสายอากาศแท่งเอาไว้ในรถยนต์ ซึ่ง อาจเกิดผลกระทบจากโครงสร้างของรถยนต์ ทำให้ระยะการอ่านอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ ใน แนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อก็คือ การศึกษาและค้นคว้าผลกระทบของสายอากาศแท่งที่ได้รับจาก โครงสร้างของรถยนต์ เพื่อนำมาปรับปรุงและออกแบบสายอากาศแท่งให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร. ดนัย ต.รุ่งเรือง ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ นาย ศุภกิต แก้วดวงตา, หลักการออกแบบสายอากาศของระบบ RFID ในย่านความถี่ต่ำสำหรับการจัดการฟาร์ม และการลงทะเบียนสัตว์, ศูนย์หนังสือ สวทช, 2553
- [2] G. Marrocco, "The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques," IEEE Antennas Propagation Magazine., vol. 50, no. 1, pp. 66-79, 2008.
- [3] A. Rida, L. Yang, R. Vyas, S. Bhattacharya, and M. M. Tentzeris, "Design and integration of inkjet-printed paper-based UHF components for RFID and ubiquitous sensing applications," Proc. 2007 IEEE European Microwave Conference, Munich, Germany, Oct. 2007.
- [4] D. M. Dobkin, The RF in RFID passive UHF in practice, United States of America, Newnes, 2008.
- [5] P. Raunonen et al., "Folded dipole antenna near metal plate," in Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp., vol. 1, pp. 848-851, June 2003.
- [6] J. D. Griffin, G. D. Durgin, A. Haldi and B. Kippelen, "RF tag antenna performance on various materials using radio link budgets," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, pp. 247 – 250, Dec. 2006.
- [7] RFID Tag Considerations [online] Available <http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/wifich6.html>
- [8] Z. N. Chen, RFID tag antenna, antennas for portable devices, England, John Wiley & Sons, 2007.
- [9] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, S. F. Lam, "Impedance matching concepts in RFID transponder design," Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies (AutoID'05), pp.39-42, 2005.
- [10] Zi Long Ma, Li Jun Jiang, Jingtian Xi, and Terry Tao Ye, "A Single-Layer Compact HF-UHF Dual-Band RFID Tag Antenna," IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, pp. 1257-1260, Nov. 2012.
- [11] A. Toccafondi, C. D. Giovampaola, F. Mariottini, and A. Cucini, "UHF-HF RFID integrated tag for moving vehicle identification," in Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp., Charleston, SC, pp. 1-4, Jun. 2009.
- [12] Juanjuan Tan, and Xiuping Li, "Wideband Double-UT RFID Tag Antenna Design," IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems 2008 (APCCAS 2008), pp. 1256-1259, Dec. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] C. PHATRA, P. KRACHODNOK, and R. WONGSAN, "Design of a RFID Tag using Dipole Antenna with Electromagnetic Band Gap," 2012 9th International Conference on Electrical Engineering Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1-4, May 2012.
- [14] Silicon Craft IC Chip, [online] Available <http://www.sic.co.th>
- [15] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2006.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [17] Bing Jiang, Joshua R. Smith, Matthai Philipose, Sumit Roy, Kishore Sundara-Rajan, Alexander V. Mamishev, "Energy Scavenging for Inductively Coupled Passive RFID Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.56, No.1, Feb 2007.
- [18] NXP Semiconductors, [online] Available <http://www.nxp.com>
- [19] K. V. S. Rao, P. V Nikitin and S. F. Lam, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-53, 12, December 2005, pp. 3870-3876.
- [20] J. Curty, N. Joehl, C. Dehollain and M. J. Delercq, "Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40,11, November 2005, pp. 2 193-2202.
- [21] S. Basat, S. Bhattacharya, A. Rida, S. Johnston, L. Yang, M. M. Tentzeris and J. Laskar , "Fabrication and Assembly of a Novel High-Efficiency UHF RFID Tag on Flexible LCP Substrate," *Electronic Components and Technology Conference*, May-June 2006, pp. 1352-1355.
- [22] H. W. Son, J. Yeo, G. Y. Choi, and C. S. Pyo, "A Low-Cost, Wideband Antenna for Passive RFID Tags Mountable on Metallic Surfaces," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, Albuquerque, NM, June 2006, pp. 1019-1022.
- [23] S. Uda and Y. Mushiake, *Yagi-Uda Antenna*, Tokyo, Sasaki Printing and Publishing Co., 1954, pp. 119-131.
- [24] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolus, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, 2059-74, 1999.
- [25] Fan Yang, and Yahya Rahmat-Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, Cambridge University Press.,2009.
- [26] D. F. Sievenpiper, *High-Impedance Electromagnetic Surfaces*, Ph.D. dissertation at University of California, Los Angeles, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] S.-K. Kuo, S.-L. Chen, and C.-T. Lin, "An accurate method for impedance measurement of RFID tag antenna," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 83, 93-106, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

#### หัวหน้าโครงการวิจัย

1. รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
Assoc.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3730100326364
3. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 023264111 ต่อ 3346 โทรสาร 023264554  
E-mail kpchuwon@kmitl.ac.th, pchuwong@gmail.com

#### 4. ประวัติการศึกษา

สถานศึกษา	วุฒิ	สาขาวิชา	ปี (พ.ศ.)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.ด.	วิศวกรรมไฟฟ้า	2544
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	2541
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.บ.(เกียรตินิยมอันดับสอง)	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2539

#### 5. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

ตำแหน่ง	หน่วยงาน	ปี
อาจารย์ / รองศาสตราจารย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2542- ปัจจุบัน
ผู้ช่วยวิจัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2539- 2541

#### ผลงานวิจัย

ชื่อโครงการ	ปี
Propagation Modeling in Durian Orchard for Wireless Sensor Network	2551-ปัจจุบัน
Performance Enhancement of RFID Antennas for Animal Identification	2551-2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	ปี
Antenna for Wireless Sensor Network at 433 MHz	2550
Design of RF-ID Antennas for Animal Identification	2549-2550
Research and Development in 3rd Generation Mobile Telecommunication Systems	2547-2549
A High Gain Antenna using Circular Ring above the Reflector for Wireless LAN System	2546-2547
Development of Dielectric Property Measurement for Export Quality Control	2545-2546
Steerable Spherical Slot Array Antenna	2540-2542

#### หนังสือ

ชื่อหนังสือ	ผู้แต่ง	สำนักพิมพ์/โรงพิมพ์	ปี
หลักการออกแบบสายอากาศของระบบ RFID ในย่านความถี่ต่ำสำหรับการจัดการฟาร์มและการลงทะเบียนสัตว์	ดนัย ต.รุ่งเรือง ชูวงศ์ พงศ์เจริญ พานิษฐ์ ศุภกิต แก้วดวงตา	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ	2552

#### บทความวิชาการระดับนานาชาติ

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Design of a Novel Dual-Loop Gate Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) Systems at Low Frequency Band	S.Kawdungta C.Phongcharoenpanich D.Torrungrueng	Progress in Electromagnetics Research C	2553
A Two-Slot Array Antenna on a Concentric Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Coupling Slot	P.Wouchoum D.Worasawate C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	Progress in Electromagnetics Research	2551
Bidirectional Ultra-Wideband Antenna Using Rectangular Ring Fed By Stepped Monopole	S.Lamultree C.Phongcharoenpanich	Progress in Electromagnetics Research	2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Dual-Band Microstrip-to-Coplanar Strip Balun Transition and Loop Antenna Application	K.Meelarpkit M.Chongcheawchamnan C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh L.B.Lok I.D.Robertson	IET Microwaves, Antennas & Propagation	2551
A Multibeam Antenna using Quasi-Optical Antenna-Mixers	S.Janin K.Sripimanwat C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	AEU-International Journal of Electronics and Communications	2551
Characteristics of An Elliptical Ring Antenna Excited by A Linear Electric Probe	K.Chawanonphithak C.Phongcharoenpanich S.Kosulvit M.Krairiksh	International Journal of Electronics	2550
Probe-Fed Rectangular Ring Antenna with a Cross Strip for Low Cross Polarization	D.Srimoon C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	IEEE Trans. Antennas Propagat	2549
A Probe-Fed U-Shaped Cross-Sectional Antenna with Tuning Stubs on a U-Shaped Ground Plane	D.Srimoon C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	IEICE Trans. Communications	2549
Signal-to-Interference Ratio Improvement by Using a Phased Array Antenna of Switched-Beam Elements	P.Ngamjanyaporn C.Phongcharoenpanich P.Akkaraekthalin M.Krairiksh	IEEE Trans. Antennas Propagat	2548
Impedance Characteristic Analysis of an Axial Slot Antenna on a Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Probe using Method of Moments	R.Wongsan C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh J.Takada	IEICE Trans. Fundamentals	2546
Covariance Matrix Adjustment for Interference Cancellation Improvement in Adaptive Beamforming	T.Sukontapong P.Ngamjanyaporn	ECTI Transactions on Electrical Eng.,	2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
	C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	Electronics, and Communications	
A Spherical Array Self-Mixing Oscillator Antenna	M.Krairiksh W.Buasomboon P.Ngamjanyaporn C.Phongcharoenpanich	Electronics Letters	2545
A Simple and Cost-Effective Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Circular Ring	S.Kosulvit M.Krairiksh C.Phongcharoenpanich T.Wakabayashi	IEICE Trans. Electronics	2545
A Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Rectangular Ring	S.Kosulvit C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	Science Asia	2544
Theoretical Investigations of Radiation and Impedance Characteristics of a Probe Excited Rectangular Cavity-Backed Slot Antenna	T.Lertwiriwaprapa C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	International Journal of Science and Technology	2543

รางวัลที่ได้รับจากการวิจัย

ชื่อผลงาน	ชื่อรางวัลและหน่วยงานที่มอบ	ปี
Synthesis of the Antenna Array Pattern Accomplishing the Tapered Minor Lobe Distributions	Outstanding Contribution Paper in the 5th International Symposium on Antennas, Propagation and Electromagnetic Theory	2543
Theory and Experiment of a Circularly Polarized Conical Beam Spherical Slot Array Antenna	Honorable Mention in the Student Paper Competition in the 2001 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting	2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผู้ร่วมวิจัยที่ 1

1. นายธีรพล ภัทรชัยสกุล  
Mr. Teerapol Phatarachaisakul
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1409900672997
3. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 023264111 ต่อ 3346 โทรสาร 023264554  
E-mail T\_ten1@hotmail.com

#### 1. ประวัติการศึกษา

สถานศึกษา	วุฒิ	สาขาวิชา	ปี (พ.ศ.)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.บ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2555

### ผู้ร่วมวิจัยที่ 2

1. นายสิทธิชัย เดนตรี  
Mr. Sitthichai Dentr
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3101000050975
3. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 023264111 ต่อ 3344 โทรสาร 023264554  
E-mail [sitthichai.d@live.com](mailto:sitthichai.d@live.com)

#### 1. ประวัติการศึกษา

สถานศึกษา	วุฒิ	สาขาวิชา	ปี (พ.ศ.)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2554
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วศ.บ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ

ประวัติการทำงาน

ตำแหน่ง	หน่วยงาน	ปี
Service Engineer	G-ABLE Company Limited	2549- 2554

บทความนำเสนอในการประชุมนานาชาติ

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
A UWB-GPR Antenna using CPW-Fed Printed Bush Tree Structure above Rectangular Reflector	S. Dentri C. Phongcharoenpanich K. Kaemarungsi	ICEAST2012	2555
A Unidirectional Printed Scutcheon Antenna with Defected Ground Plane above Rectangular Reflector	S. Dentri C. Phongcharoenpanich K. Kaemarungsi	ISTS2012	2555
Scutcheon Antenna for UWB-GPR Applications	S. Dentri C. Phongcharoenpanich K. Kaemarungsi	TJMW2012	2555
Circularly Polarized UHF-RFID Antenna using Defected Rectangular Plate on the Ground Plane	S. Dentri C. Phongcharoenpanich	APCAP2012	2555
UHF-RFID Reader Antenna using Notched Rectangular Plate with Aperture and Line	C. Phongcharoenpanich S. Dentri	TJMW2011	2554
A Flat Antenna Radiating Circularly Polarized Unidirectional Beam for UHF-RFID Reader	S. Dentri C. Phongcharoenpanich	JICTEE2010	2553
A Broadband Flat Antenna on Corrugated Structure	S. Dentri C. Phongcharoenpanich	ISAP2010	2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
A UHF-RFID Reader Antenna using Rectangular Plate with Corrugated Structure	S. Denti C. Phongcharoenpanich	ITC-CSCC2010	2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้