



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สายอากาศแผ่นระนาบที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้  
A Flat Antenna with Reconfigurable Polarization

รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
นายคมกฤษ บุษยิ๊ง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

สายอากาศแผ่นระนาบที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้  
A Flat Antenna with Reconfigurable Polarization

รศ.ดร. ขวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายคมกฤษ บุญยิ่ง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) สายอากาศแผ่นระนาบที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้.....

แหล่งเงิน แหล่งเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ..... 2558..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายคมกฤษ บุญยั้ง

### บทคัดย่อ

รายงานนี้นำเสนอสายอากาศระนาบที่สามารถปรับโพลาไรซ์ได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์วงกลม และการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น สำหรับการใช้งานกับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งของประเทศไทย (920-925 MHz) สายอากาศประกอบด้วยแผ่นกระจายคลื่นและระนาบกราวด์ แผ่นแพร่กระจายคลื่นได้ถูกออกแบบให้สามารถปรับรูปร่างได้เพื่อการสวิตช์โพลาไรซ์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบขึ้นมาสามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งโพลาไรซ์วงกลมและโพลาไรซ์เชิงเส้น สำหรับโพลาไรซ์วงกลม การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียวมีแบนด์วิดธ์ 45 MHz อัตราขยาย 8.69 dBic ความกว้างลำคลื่นที่อัตราส่วนแกน 3 dB เท่ากับ 60 องศา ในส่วนของโพลาไรซ์เชิงเส้น การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียวสายอากาศมีแบนด์วิดธ์ 27 MHz อัตราขยาย 8.67 dBic

คำสำคัญ : สายอากาศ โพลาไรซ์ เครื่องอ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** ... A Flat Antenna with Reconfigurable Polarization .....

**Researcher:** Mr. Chuwong Phongcharoenpanich Mr. Komkris Boonying .....

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

### ABSTRACT

This report presents a microstrip antenna which radiates both circular and linear polarization for UHF RFID Reader in Thailand (920 - 925 MHz). The antenna is composed of main radiation part and the ground plane. The radiation part was designed to be reconfigurable part in order to switch the polarization. The measurement result indicated that, the antenna can be switched between circular and linear polarization. For circular polarization, the pattern is unidirectional beam. The obtained bandwidth is 45 MHz. Gain 8.69 dBic. Beamwidth at Axial ratio 3 dB is 60°. For linear polarization, the pattern is unidirectional beam. The obtained bandwidth is 27 MHz. Gain 8.67 dBi

**Keywords :** Antenna, Polarization, and Reader



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบบุวิจัยประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ขอขอบคุณทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทดสอบ และให้คำปรึกษารวมถึงเทคนิคต่างๆที่สามารถนำมาใช้ในการทำโครงการวิจัยนี้

นายชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายคมกฤษ บุญยั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 เนื้อหาของงานวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	5
2.2.1 แท็ก.....	6
2.2.1.1 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ.....	7
2.2.1.2 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ.....	7
2.2.1.3 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ.....	7
2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	8
2.2.2.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and Coin).....	8
2.2.2.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass Housing).....	8
2.2.2.3 แท็กแบบพลาสติก (Plastic Housing).....	8
2.2.2.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	8
2.2.2.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and Key Fob).....	8
2.2.2.6 แท็กแบบนาฬิกา.....	8
2.2.2.7 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส.....	9
2.2.2.8 แท็กแบบ Smart Label.....	9
2.2.2.9 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-Chip).....	9
2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader).....	9
2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	10
2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation Type).....	10
2.3.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex.....	10
2.3.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data Quantity).....	11
2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable).....	11
2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power Supply).....	11
2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency Range).....	11
2.3.6 มาตรฐานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	13
2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	16
2.4.1 ความถี่ใช้งาน.....	16
2.4.2 ระยะทำการ.....	16
2.4.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย.....	16
2.4.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล.....	16
2.4.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์.....	16
2.4.4 ขนาดของหน่วยความจำ.....	17
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ.....	17
2.5.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	17
2.5.2 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	19
2.5.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรง (Cavity Resonance).....	20
2.5.2.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ.....	21
2.5.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	22
2.5.2.4 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth).....	23
2.5.2.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity).....	23
2.5.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	23
2.5.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency).....	24
2.5.2.8 อัตราขยาย (Gain).....	24
2.5.2.9 ช่วงกว้างแถบความถี่.....	24
2.5.2.10 โพลาร์ไรซ์.....	25
2.5.3 เทคโนโลยีของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการสื่อสาร	
แบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล.....	30
2.5.3.1 การออกแบบสายอากาศของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	30
2.5.3.2 หลักการทำงาน.....	31
2.5.3.3 การติดต่อสื่อสารของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล.....	31
2.5.3.4 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP).....	34
2.5.3.5 สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน.....	35
2.6 สรุป.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศ.....	38
3.1 กล่าวนำ.....	38
3.2 สายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	38
3.3 การออกแบบสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	39
3.3.1 การหาขนาดเริ่มต้นของสายอากาศ.....	40
3.3.2 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	46
3.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศ.....	46
3.3.2.2 การเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องของสายอากาศ.....	47
3.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดเชื่อมต่อของสายอากาศ.....	48
3.4 การจำลองการทำงานของสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	51
3.4.1 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในแบบโพลาริซ์วงกลม.....	51
3.4.2 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในแบบโพลาริซ์เชิงเส้น.....	51
3.4.3 อัตราส่วนแกนของสายอากาศในแบบโพลาริซ์วงกลม.....	52
3.4.4 อัตราส่วนแกนของสายอากาศในแบบโพลาริซ์เชิงเส้น.....	53
3.4.5 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในแบบโพลาริซ์วงกลม.....	53
3.4.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในแบบโพลาริซ์เชิงเส้น.....	55
3.4.7 อัตราส่วนแกนต่อความถี่ของสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	56
3.4.8 อัตราขยายของสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	57
3.5 สรุป.....	58
บทที่ 4 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	59
4.1 กล่าวนำ.....	59
4.2 สายอากาศต้นแบบ.....	59
4.3 การทดสอบสายอากาศ.....	60
4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	61
4.4.1 การทดสอบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	61
4.4.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศ.....	63
4.4.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	65
4.4.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ.....	68
4.5 สรุป.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดสอบประยุกต์ใช้งานและการประเมินสมรรถนะ.....	70
5.1 กล่าวนำ.....	70
5.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้นและทดลองในสภาพการใช้งานจริง.....	70
5.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน.....	72
5.3.1 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตช์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม โดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาริซ์วงกลม.....	74
5.3.2 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตช์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม โดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาริซ์แบบเชิงเส้น.....	77
5.3.3 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตช์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม โดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาริซ์แบบวงกลม เมื่อทำการเปลี่ยนระยะมุมยก ( $\alpha_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $\alpha_1$ ) ของแท่ง.....	80
5.3.4 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตช์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม โดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาริซ์แบบเชิงเส้น เมื่อทำการเปลี่ยนระยะมุมยก ( $\alpha_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $\alpha_1$ ) ของแท่ง.....	82
5.4 สรุป.....	83
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม.....	84
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังงานในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ยูเอชเอฟในประเทศต่าง ๆ.....	14
3.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศแบบแผ่นระนาบ .....	41
3.2 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศแบบแผ่นระนาบ .....	43
3.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ .....	50
3.4 สรุปความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ .....	56
3.5 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ.....	57
4.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ .....	60
4.2 อัตราขยายของสายอากาศ .....	68
4.3 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ.....	69
5.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งทดสอบสายอากาศ สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก.....	73
6.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก.....	2
1.2 โครงสร้างของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	3
2.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ.....	6
2.2 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ.....	7
2.3 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ.....	7
2.4 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ.....	8
2.5 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล.....	10
2.6 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex.....	11
2.7 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	12
2.8 สายอากาศแบบปรับโครงสร้างได้สำหรับการสวิตซ์โพลาไรซ์.....	17
2.9 สายอากาศไมโครสตริปแบบปรับโพลาไรซ์ได้.....	18
2.10 สายอากาศแผ่นระนาบแบบปรับโครงสร้างได้เพื่อการโพลาไรซ์ที่หลากหลาย.....	19
2.11 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	20
2.12 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่ $z = 0$ .....	25
2.13 โพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง.....	26
2.14 โพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน.....	26
2.15 โพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP).....	27
2.16 โพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP).....	28
2.17 โพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP).....	29
2.18 โพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP).....	29
2.19 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่น ความถี่วิทยุในสนามระยะใกล้.....	31
2.20 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก.....	34
2.21 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล.....	35
3.1 โครงสร้างของสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม.....	39
3.2 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ.....	41
3.3 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเริ่มต้นในแบบโพลาไรซ์วงกลม.....	42
3.4 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับปรุงในแบบโพลาไรซ์วงกลม.....	43
3.5 อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับปรุงในแบบโพลาไรซ์วงกลม.....	44
3.6 การปรับโครงสร้างของสายอากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น.....	44
3.7 การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับโครงสร้างให้เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น.....	45
3.8 อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ปรับโครงสร้างให้เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น.....	45
3.9 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดป้อนสัญญาณของของสายอากาศ สำหรับโพลาไรซ์วงกลม.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.10 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดบ่อนสัญญาณของของสายอากาศ สำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น .....	47
3.11 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องของสายอากาศ.....	47
3.12 อัตราส่วนแกนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องของสายอากาศ.....	48
3.13 จุดเชื่อมต่อตำแหน่งต่างๆเพื่อให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาริซ์เชิงเส้น .....	49
3.14 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดเชื่อมต่อของสายอากาศ .....	49
3.15 อัตราส่วนแกนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดเชื่อมต่อของสายอากาศ .....	50
3.16 การสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองสำหรับโพลาริซ์วงกลม.....	51
3.17 การสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองสำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น .....	52
3.18 อัตราส่วนแกนจากการจำลองสำหรับโพลาริซ์วงกลม.....	52
3.19 อัตราส่วนแกนจากการจำลองสำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น .....	53
3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาริซ์วงกลม.....	54
3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น .....	55
3.22 อัตราส่วนแกนของสายอากาศทั้งสองโพลาริซ์จากการจำลอง.....	56
3.23 อัตราขยายของสายอากาศจากการจำลอง.....	57
4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	59
4.2 เปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับ โพลาริซ์วงกลม.....	62
4.3 เปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับ โพลาริซ์เชิงเส้น.....	63
4.4 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับ โพลาริซ์วงกลม.....	64
4.5 เปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับ โพลาริซ์เชิงเส้น.....	65
4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง สำหรับโพลาริซ์วงกลม .....	66
4.7 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง สำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น.....	67
5.1 เครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ .....	71
5.2 แท็กชนิดไดโพลแบบขด Alien รุ่น ALN-9640.....	71
5.3 แท็กชนิดไดโพลแบบขด UPM รุ่น Short dipole .....	71
5.4 สายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	72
5.5 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
5.6 การกำหนดกำลังส่งของเครื่องอ่านข้อมูล.....	73
5.7 การวางตัวของแท็กแต่ละแนวแกน (ก) แนวแกน x (ข) แนวแกน y (ค) แนวแกน z.....	74
5.8 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมกับ Alien tag.....	75
5.9 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมกับ UPM tag.....	76
5.10 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นกับ Alien tag.....	77
5.11 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นกับ UPM tag.....	79
5.12 การทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงระยะมุมยก ( $\alpha_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $\alpha_1$ ).....	80
5.13 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมยก ( $\alpha_2$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแท็กวางตัวตามแนวแกน z.....	81
5.14 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมกวาด ( $\alpha_1$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแท็กวางตัวตามแนวแกน z.....	81
5.15 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมยก ( $\alpha_2$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และแท็กวางตัวตามแนวแกน z.....	82
5.16 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมกวาด ( $\alpha_1$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และแท็กวางตัวตามแนวแกน z.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

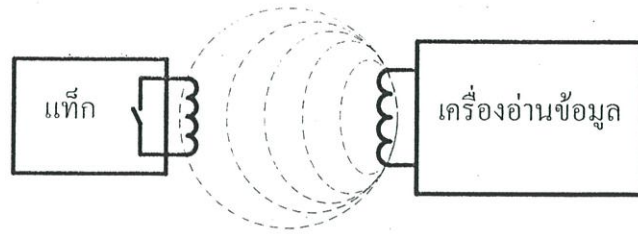
การบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาประมาณช่วงสงครามโลกครั้งที่สองนั้นเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้เกิดการบ่งชี้แบบไร้สายและเกิดประสิทธิภาพในการติดตาม เมื่อไม่กี่ปีมานี้ เทคโนโลยีการบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานกับหลายธุรกิจ เช่น อุตสาหกรรม บริการ โลจิสติก โรงงานผลิต ระบบขนส่งลำเลียงสินค้า และระบบฟาร์มปศุสัตว์ วัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้งานแทนระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด โดยจุดเด่นของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ คือ สามารถอ่านค่าข้อมูลจากป้ายหรือเครื่องลูกข่ายได้หลาย ๆ ตัวในเวลาเดียวกัน แบบไร้การสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี (มองไม่เห็น) สามารถอ่านค่าได้โดยไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นสายตากับเครื่องอ่าน ทนต่อความเปียกชื้น แร้งลื่นสะท้อน การกระทบกระแทก สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ระยะไกล และด้วยความเร็วสูง

ในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) นั้น เครื่องอ่านจะปล่อยสัญญาณผ่านสายอากาศของเครื่องอ่าน ในขณะที่แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุประกอบด้วย สายอากาศและ วงจรรวมเจาะจงการใช้งาน(ASIC) ถูกจัดตั้งอยู่ในพื้นที่การอ่านของสายอากาศเครื่องอ่าน แท็กจะถูกกระตุ้นให้มีการตอบสนองสำหรับข้อมูลที่บรรจุอยู่ภายในโดยเครื่องอ่าน สัญญาณจากเครื่องอ่านจะต้องมีพลังงานที่มากพอที่จะกระตุ้นแท็กแบบวงจรรวมเจาะจงการใช้งาน(ASIC) เพื่อให้แท็กทำการประมวลผลข้อมูล และส่งข้อมูลกลับไปเครื่องอ่าน เนื่องจากในบางประเภทการใช้งาน แท็กจะอยู่ที่ตำแหน่งไม่แน่นอน และปกติสายอากาศของแท็กจะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นโพลาริซิงเส้น ดังนั้นสายอากาศของเครื่องอ่านที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงวงกลม จึงถูกใช้ใน ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ที่ความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID) ยิ่งถ้าสามารถสร้างสายอากาศที่สามารถปรับโพลาริซิงได้ทั้งโพลาริซิงวงกลม และ โพลาริซิงเส้น จะเป็นการเพิ่มความแน่นอนในการสื่อสารกันระหว่างเครื่องอ่าน และแท็ก

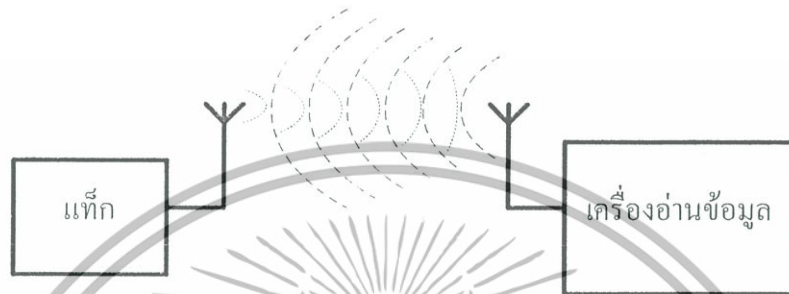
โดยทั่วไปแล้ว ในแต่ละประเทศทั่วโลกก็จะมีการจัดสรรความถี่สำหรับใช้งานกับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) เช่น ความถี่ 840.5–844.5 และ 920.5–924.5 MHz ในประเทศจีน 866–869 MHz ในยุโรป ย่านความถี่ 902–928 MHz ในอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ 866–869 และ 920–925 MHz ในสิงคโปร์ 952–955 MHz ในญี่ปุ่น และความถี่ 920–925 MHz สำหรับประเทศไทย[3]

ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการระบุลักษณะของคน สัตว์ หรือ วัตถุโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communications) การสื่อสารข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ คือการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) กับ แท็ก (Tag) โดยแบ่งออกเป็นสองหลักการคือ วิธีแรกเป็นวิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive coupling หรือ Proximity electromagnetic) วิธีที่สองเป็นวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic propagation coupling) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ[1]-[2] ดังแสดงในรูปแบบที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง



(ข) วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในย่านความถี่เอชเอฟและความถี่ไมโครเวฟ

รูปที่ 1.1 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก[1]

สำหรับสายอากาศของระบบบังคับด้วยคลื่นวิทยุของเครื่องอ่านข้อมูลในย่านความถี่เอชเอฟที่ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz ใช้วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในงานทางด้านระบบบังคับด้วยคลื่นวิทยุซึ่งเป็นระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นสิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อระบบก็คือสายอากาศ และเนื่องจากระบบบังคับด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงระยะทางในการส่งไกลและโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่เอชเอฟจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับระบบดังกล่าว และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศโดยทั่วไปทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้ในบางลักษณะการวางตัวของแท็กซึ่งถ้าสายอากาศของแท็กไม่ได้วางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ในหลากหลายลักษณะการจัดวาง งานวิจัยนี้ในงานวิจัยนี้จึงเสนอสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมและโพลาริซเชิงเส้นสำหรับการทำงานกับระบบบังคับด้วยคลื่นวิทยุที่ความถี่สูงยิ่งของประเทศไทย สายอากาศประกอบด้วยแผ่นกระจายคลื่น 1 แผ่น และระนาบกราวด์ มุมทั้งสี่มุมของแผ่นกระจายคลื่นหลักถูกตัดเป็นร่องเพื่อใช้สำหรับ ปรับโพลาริซโดยการเชื่อมต่อ (Shorted) และปล่อยลอย (Open) ระหว่างแผ่นกระจายคลื่นและมุมของแผ่นกระจายคลื่น การตัดมุมยังเป็นการปรับค่าอัตราส่วนแกน (AR) ของสายอากาศอีกด้วย สายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบมาให้ครอบคลุมย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบบังคับด้วยคลื่นวิทยุตั้งแต่ 920–925 MHz และมีประสิทธิภาพที่ดีในเรื่องของ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ในขณะเดียวกันโครงสร้างของสายอากาศก็ง่ายต่อการสร้าง และสลับการทำงานระหว่าง 2 โหมด ได้อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความสำคัญของงานวิจัย

ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วนดังรูปที่ 1.2 คือ ส่วนแรกคือ เครื่องอ่านข้อมูลมีหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างแท็ก ส่วนที่สองคือแท็ก เป็นตัวระบุเอกลักษณ์ที่ใช้ติดกับวัตถุ และส่วนสุดท้ายคือส่วนควบคุมทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลของแท็ก โดยหลักการการทำงานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ คือ เมื่อแท็กเข้ามาในช่วงการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังแท็ก หลังจากนั้นแท็กจะส่งสัญญาณกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

ระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย สิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อระบบก็คือ สายอากาศ นอกจากความถี่ที่ต่างกันแล้ว โพลาริซชันของสายอากาศก็มีหลากหลาย ทั้งโพลาริซชันวงกลม และโพลาริซชันเชิงเส้น ซึ่งการที่จะให้เครื่องอ่านของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุติดต่อกับแท็กได้ดีแน่นอนั้น โพลาริซชันของสายอากาศเครื่องอ่านกับสายอากาศแท็กจะต้องตรงกันด้วย เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศโดยทั่วไปทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้ในบางลักษณะการวางตัวของแท็ก ซึ่งถ้าสายอากาศของแท็กไม่ได้วางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ในหลากหลายลักษณะการจัดวาง



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

ในงานวิจัยนี้จึงเสนอสายอากาศแบบไมโครสตริปที่สามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซชันวงกลมและโพลาริซชันเชิงเส้นสำหรับการใช้งานกับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุที่ความถี่สูงยิ่งของประเทศไทย สายอากาศประกอบด้วยแผ่นกระจายคลื่น 1 แผ่น และระนาบกราวนด์ มุมทั้งสี่มุมของแผ่นกระจายคลื่นหลักถูกตัดเป็นร่องเพื่อใช้สำหรับ ปรับโพลาริซชันโดยการเชื่อมต่อ (Shorted) และปล่อยลอย (Open) ระหว่างแผ่นกระจายคลื่นและมุมของแผ่นกระจายคลื่น การตัดมุมยังเป็นการปรับค่าอัตราส่วนแกน (AR) ของสายอากาศอีกด้วย สายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบมาให้ครอบคลุมย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุตั้งแต่ 920–925 MHz และมีประสิทธิภาพที่ดีในเรื่องของ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และการแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ ในขณะที่เดียวกันโครงสร้างของสายอากาศก็ง่ายต่อการสร้าง และสลับการทำงานระหว่าง 2 โหมด ได้อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบ ซึ่งมีความต้องการสายอากาศที่สามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมและโพลาริซเชิงเส้น รวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการใช้งานด้วย เป็นต้น การศึกษาและวิจัยในงานวิจัยฉบับนี้ จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ขนาดของการตัดมุมบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ขนาดของร่อง ความสูงระหว่างแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นกับแผ่นกราวด์ ขนาดของแผ่นกราวด์ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยอาศัยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบสามมิติ ในการจำลองผลและนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบที่น่าเสนอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบที่สามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมและโพลาริซเชิงเส้น

### 1.4 เนื้อหาของงานวิจัย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัยและเนื้อหาของงานวิจัย

บทที่ 2 ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ และทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อน

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศ เริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองแบบสายอากาศและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์มาจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบของสมรรถนะของสายอากาศ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนแกน ค่าอัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

บทที่ 5 กล่าวถึงการประเมินสมรรถนะและการประยุกต์ใช้งาน เพื่อทดสอบว่ามีความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้หรือไม่ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถของสายอากาศในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในกรณีที่แท็กวางตัวในทิศ  $x y$  และ  $z$

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดของงานวิจัยฉบับนี้ พร้อมทั้ง ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ความเป็นมา และหลักการทั่วไปของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ [1]-[2] ซึ่งประกอบด้วย เครื่องอ่านข้อมูลและประเภทของแท็กแบบต่าง ๆ หลักการรับส่งข้อมูล ระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุกับแท็ก หลักการสื่อสารที่อาศัยหลักการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering communication) การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้ในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ [4]-[5] และการออกแบบสายอากาศสวิตซ์โพลารไรซ์[6]-[15]

### 2.2 ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

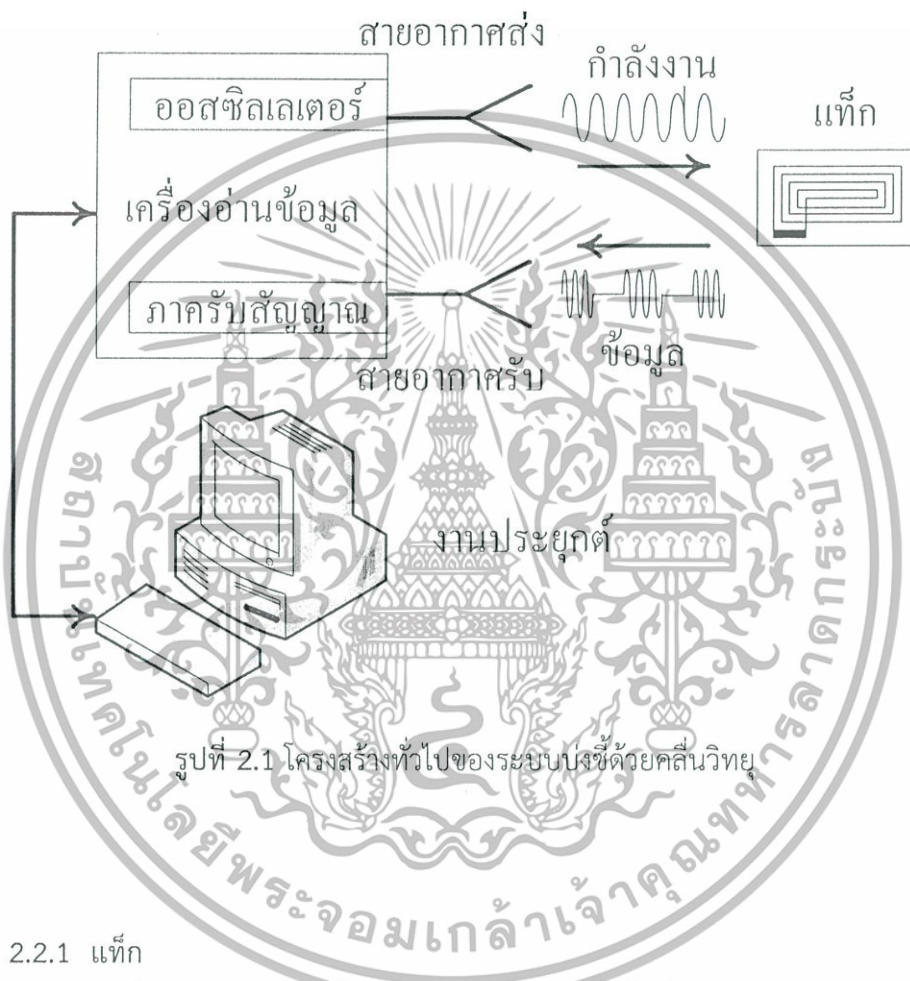
แนวความคิดในการนำคลื่นวิทยุมาใช้ เพื่อแสดงตำแหน่ง หรือแสดงตนเองได้เกิดขึ้นตั้งแต่ราวประมาณปลายสงครามโลกครั้งที่สอง โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่ง มาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศที่อยู่ในตัวรับข้อมูล ที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) และเนื่องจากอุปกรณ์ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ในขณะนั้นไม่สะดวกที่จะนำมาใช้งานเพราะ มีขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังมีราคาแพง จึงไม่ได้รับความนิยมมากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ บริการ และเชิงราชการ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุอย่างต่อเนื่อง จนสามารถลดขนาดให้เป็นแผ่นเล็ก ๆ ได้ดังในปัจจุบัน โดยจุดเด่นของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุอยู่ที่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้หลาย ๆ แท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือนการกระแทกและสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ภายในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ในปัจจุบันได้มีการนำระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากการนำมาใช้ในระบบบาร์โค้ดแบบเดิม เช่น ใช้ในบัตรชนิดต่าง ๆ เช่น บัตรสำหรับใช้ผ่านเข้าออกสถานที่ต่าง ๆ บัตรที่จอดรถ ตามศูนย์การค้าต่าง ๆ ที่เราอาจพบเห็นอยู่ในรูปของแท็กสินค้า มีขนาดเล็กจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแคปซูลขนาดเล็กฝังเอาไว้ในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติต่าง ๆ เป็นต้น

ในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก ที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการโดยแท็กที่ว่านี้จะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือเครื่องสำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยการทำงานนั้นเครื่องอ่านข้อมูลจะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานในรูปคลื่นความถี่วิทยุให้กับตัวบัตรยังผลให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในสามารถส่งข้อมูลเฉพาะที่แสดงถึง "Identity" กลับมาประมวลผลที่ตัวอ่านได้ เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบเกี่ยวกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ก็คือเครื่องอ่านบาร์โค้ด โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบบาร์โค้ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือการอ่านข้อมูลเป็นการใช้แสงในการอ่านบาร์โค้ดซึ่งจะต้องอ่านบาร์โค้ดที่ไม่มีอะไรกบปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ที่ละชั้นในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่น เพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุยังสามารถอ่านได้หลาย ๆ แท็กในเวลาเดียวกัน โดยระยะการอ่านข้อมูลนั้น สามารถอ่านได้ไกลกว่าระบบบาร์โค้ดอีกด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

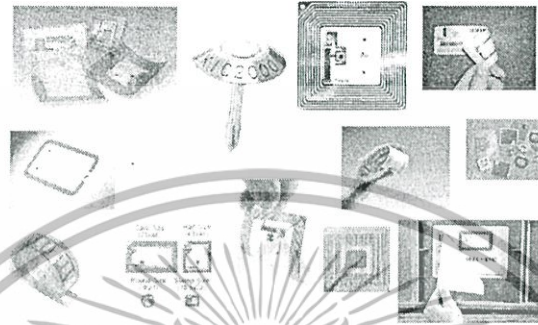
### 2.2.1 แท็ก

มาจากคำว่าทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) ผสมกับคำว่าเรสปอนเดอร์ (Responder) โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ สำหรับเครื่องส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ เช่น รหัสสินค้า เป็นต้น แท็กที่มีอยู่โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด เช่น กระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำเอาไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหยียดหยุ่น กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งแท็กที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน ซึ่งจะขอลำถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 แท้กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ

แท้กชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใด ๆ แสดงตามรูปที่ 2.2 เพราะภายในแท้กจะมีวงจรถ่ายสัญญาณไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท้งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แท้กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ[20]

### 2.2.1.2 แท้กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ

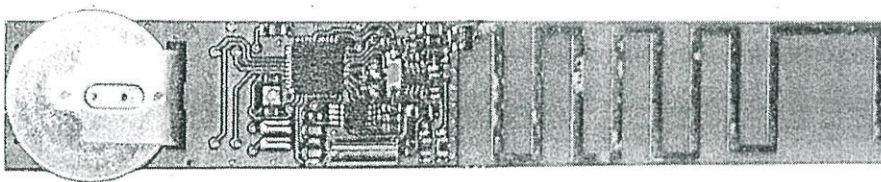
แท้กชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท้ก ซึ่งแท้กชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกล มีอายุการใช้งานสั้นและมีราคาแพง มักนิยมใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลในย่านความถี่เอชเอฟหรือย่านความถี่ไมโครเวฟ

รูปที่ 2.3 แท้กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ[21]

### 2.2.1.3 แท้กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ

แท้กชนิดนี้จะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท้ก แต่อย่างไรก็ตามแท้กชนิดนี้ยังต้องใช้กำลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านข้อมูลในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล แท้กแบบกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะเวลาติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท้กแบบพาสซีฟ ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ[22]

## 2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

อุปกรณ์แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ประเภทต่าง ๆ ที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่าง ๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

### 2.2.2.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and Coin)

แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างทรงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท็กชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตร ไปจนถึง 10 cm

### 2.2.2.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass Housing)

เป็นแท็กที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 mm

### 2.2.2.3 แท็กแบบพลาสติก (Plastic Housing)

นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ แท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลาย ๆ ประเภท

### 2.2.2.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

เป็นแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจดังเช่นการนำไปประยุกต์ใช้กับคอนเทนเนอร์หรือวัสดุที่เป็นโลหะ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุแท็กลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ

### 2.2.2.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and Key Fob)

แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคล

### 2.2.2.6 แท็กแบบนาฬิกา

แท็กแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2535 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรเลียที่มีชื่อว่า Sky-data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ลู่อ่านสก็สำหรับนักสกีทั้งหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.7 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส

สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัสเป็นรูปแบบของแท็กชนิดพาสซีฟอีกรูปแบบหนึ่ง โดยในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายพื้นที่ ข้อมูลที่อยู่ภายในการ์ดจะถูกอ่านเมื่ออยู่ใกล้กับเครื่องอ่านข้อมูล โดยตัวการ์ดไม่จำเป็นต้องวางติดกับเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อทำการอ่านข้อมูล

แท็กแบบ ID-1 มีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณ  $85.72 \times 54.03 \text{ mm}^2$  ความหนา  $0.76 \text{ mm}$  เป็นแท็กที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าแท็กแบบอื่น ๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก

### 2.2.2.8 แท็กแบบ Smart Label

เป็นแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบาง ๆ สามารถงอหรือทาบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบพอลิพลาสติกความหนาเพียง  $0.1 \text{ mm}$  โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบพอลิเหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด

### 2.2.2.9 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-Chip)

แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ชนิดนี้มีความแตกต่างจากแท็กแบบอื่น ๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างแท็กกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

## 2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)

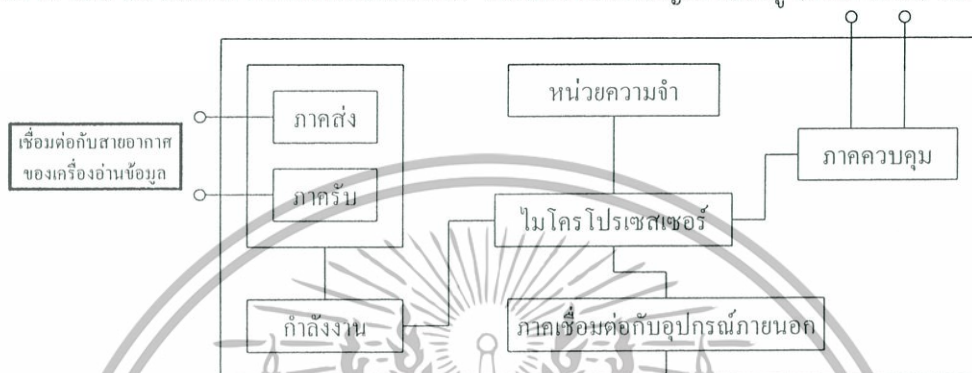
เครื่องอ่านข้อมูลจะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้โดยผ่านทางสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลแต่ละเครื่องสามารถรองรับแท็กได้หลายตัวโดยใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) สายอากาศทำหน้าที่ในการแพร่กระจายสัญญาณความถี่วิทยุจากภาคส่งของเครื่องอ่านข้อมูลออกมารอบ ๆ และรับการตอบสนองของแท็ก ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความแม่นยำและถูกต้องในการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะอยู่ใกล้กับเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อลดผลของการสูญเสียจากสายเคเบิล RF (RF cable) โดยเฉพาะเครื่องอ่านข้อมูลชนิดพกพา (Portable) จะรวมสายอากาศเข้าไว้ภายในตัวเครื่องอ่านข้อมูล โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูล ก็คือ การเชื่อมต่อสื่อสารกับแท็กเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลภายในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ [1]-[2]

- ภาคส่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) สัญญาณวิทยุ
- ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor)
- หน่วยความจำ (Memory)
- เซ็นเซอร์ (Sensor)
- ภาควัดคุม (Controller)
- ภาคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (In/out interface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แหล่งจ่ายกำลังงาน (Power supply)
- สายอากาศ (Antenna)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล(Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล

### 2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

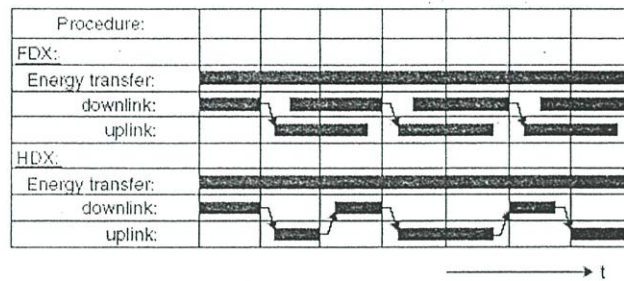
#### 2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation Type)

อุปกรณ์ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ทั้งแท็ก หรือเครื่องอ่านข้อมูล จะมีรูปแบบการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX)/Half duplex (HDX)

##### 2.3.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex

เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปให้กับแท็กที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่แท็กส่งออกมาจะมีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตนเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่า ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากแท็กแต่ละเครื่อง ให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้มอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full duplex และ Half duplex[1]

### 2.3.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับแท็กตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก และการส่งข้อมูลจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ดังรูปที่ 2.6

### 2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data Quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ จะมีขนาดของหน่วยความจำหรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data capacity) โหลขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลาย ๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit Transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

### 2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ตามขีดความสามารถในการโปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใด ๆ ตามที่ได้รับคำสั่งจ้างทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ที่สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านข้อมูลได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

### 2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power Supply)

เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟ ซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอ็กทีฟ ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

### 2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency Range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านข้อมูลทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีแท็กอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากแท่งจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ไอเอสเอ็ม (Industrial, Scientific and Medical: ISM) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งาน สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้งานในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 4 ย่าน หลักได้แก่

- ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency: LF) 135/125/134.2 kHz
- ย่านความถี่สูง (High frequency: HF) 13.56 MHz
- ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra high frequency: UHF) 433/860/960/920 MHz - 925 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8 GHz



ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสมสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ ที่ย่านความถี่ต่ำ ระยะการอ่านประมาณ 10 cm ถึง 20 cm และย่านความถี่สูง ระยะการอ่านประมาณ 1 m เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่านความถี่ยูเอชเอฟจะถูกใช้ในงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล มีระยะการอ่านประมาณ 1 ถึง 10 m เช่นระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ในแต่ละประเทศมีการอนุญาตให้ใช้ความถี่ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เช่น ยุโรป คือ 866 MHz ถึง 869 MHz อเมริกาเหนือและใต้ คือ 902 MHz ถึง 928 MHz ญี่ปุ่น คือ 950 MHz ถึง 956 MHz ส่วนในประเทศไทย คือ 920 MHz ถึง 925 MHz และสุดท้ายคือ ย่านความถี่ไมโครเวฟมีระยะการอ่านไกลกว่า 10 m ซึ่งใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ในส่วนของการใช้งานระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในประเทศไทย เช่น การขนส่งที่ใช้บัตรทางด่วนและบัตรโดยสารรถไฟฟ้ามหานคร ห้องสมุดฉลาด การควบคุมการเข้าออกสถานที่ที่ใช้บัตรพนักงานและบัตรจอดรถ การจัดการสายการผลิตและการขนส่ง ปศุสัตว์ใช้ในการให้อาหารและการติดตามโรค เอกสารราชการใช้สำหรับหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์และบัตรประชาชน เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะในย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดและมีราคาแพงที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเช่นกัน ส่วนระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

เนื่องจากระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง ระยะทางในการส่งไกลและโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่มีซับซ้อน ขนาดเล็กและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่ยูเอชเอฟจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน งานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบร่วมกับช่องเปิดสี่เหลี่ยมและเส้น

### 2.3.6 มาตรฐานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

การนำมาตรฐานมาใช้กับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบนี้ถือว่าเป็นสิ่งที่ซับซ้อน แต่ก็มีพยายามนำมาใช้อย่างต่อเนื่อง มาตรฐานที่มีอยู่นั้นครอบคลุมใน 4 เรื่อง ของการประยุกต์ใช้งานระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ คือมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ (Air interface standard) มาตรฐานปริมาณความจุของข้อมูลและการเข้ารหัส (Data content and Encoding) มาตรฐานความเข้ากันได้ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ (Conformance) มาตรฐานการทำงานร่วมกันระหว่างการผลิตใช้งานกับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

มาตรฐานหลัก ๆ ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ในปัจจุบันมี 2 ค่ายด้วยกันคือ ISO และ EPC Global ซึ่ง ISO ก็จะมีมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ คือ 18000-6A กับ 18000-6B ส่วนทางด้าน EPC Global ก็จะมีมาตรฐานออกมาสองรุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global gen 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Class 0 กับ Class 1 แท้ก็อีกรุ่นหนึ่งคือ EPC Global gen 2 ซึ่งเตรียมไว้สำหรับ Class 1 ขึ้นไป แต่ตอนนี้ใช้กันหลัก ๆ ก็จะมีแต่เฉพาะ Class 1 เท่านั้น โดยถ้าจำแนกตาม Class ของแท็ก ก็จะมีตั้งแต่ Class 0, Class 1, Class 2 ไปจนถึง Class 3 โดยจะแบ่งตามความสามารถในการเขียนข้อมูลลงไปบนแท็กแบบพาสซีฟและแบบแอ็กทีฟ ถ้า Class 0 ก็จะเป็นแบบพาสซีฟและเขียนไม่ได้ Tag ID ถูกกำหนดมาตั้งแต่โรงงาน Class 1 ก็ยังคงเป็นแบบพาสซีฟอยู่ แต่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ ส่วน Class 2 ก็จะเป็นแบบกึ่งแอ็กทีฟ คือ ในขณะที่รับข้อมูลจากเครื่องอ่านข้อมูลเป็นแบบพาสซีฟ แต่พอจะส่งข้อมูลจะใช้กำลังงานจากแบตเตอรี่ช่วยในการส่ง สุดท้ายคือ Class 3 ก็จะเป็นแบบแอ็กทีฟ

มาตรฐานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุสร้างขึ้นมาใช้ในสาขาต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เป็นต้น

มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) เช่น มาตรฐาน ISO 11784 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุตัวสัตว์ด้วยความถี่วิทยุซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างรหัส ISO 11785 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับทางด้านเทคนิค และ ISO 14223/1 จะเกี่ยวกับแท็ก

มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เช่น ISO 18000 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุโดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการติดต่อสื่อสารกันผ่านอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังงานในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่  
ยูเอชเอฟในประเทศต่าง ๆ

ประเทศ/ทวีป	สถานะ	ความถี่ (MHz)	กำลัง	เทคนิค	หมายเหตุ
แอฟริกา					
แอฟริกาเหนือ	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ในปี ค. ศ. 2006
แอฟริกาใต้		917-921	4 W EIRP	FHSS	ภายในอาคาร
ดูนิเชีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	วางแผนที่จะนำมาใช้งาน
เอเชียแปซิฟิก					
ออสเตรเลีย	OK	920-926	4 W EIRP		4W EIRP เหมาะจะใช้กับGS1
จีน	IP	917-922	2 W ERP		อนุญาตชั่วคราว
ฮ่องกง, จีน	OK	865-868	2 W ERP		
		920-925	4 W EIRP		
อินเดีย	OK	865-868	4 W ERP		อนุญาตให้ใช้ในเดือน พฤษภาคม ปี ค. ศ. 2005
อินโดนีเซีย	IP				พิจารณาในช่วง 923-925 MHz
ญี่ปุ่น	OK	952-954	4 W EIRP	LBT	ในช่วง 952-954 MHz อนุญาต ให้ใช้ 4 W EIRP และสำหรับ 20 mW EIRP ไม่ต้องมี ใบอนุญาต
เกาหลี	OK	908.5-910	4 W EIRP	LBT	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค. ศ. 2004
		910-914	4 W EIRP	FHSS	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค. ศ. 2004
มาเลเซีย	OK	866-869			กำลังอยู่ในการพิจารณา และที่ ความถี่ 868 MHz อนุญาตให้ใช้ 50 mW
		919-923	2 W ERP		กำลังงาน 2 W ERP ไม่ต้องมี ใบอนุญาต แต่กำลังงานตั้งแต่ 2 ถึง 4 W ต้องมีใบอนุญาต
สิงคโปร์	OK	866-869	0.5 W ERP		
ไต้หวัน	OK	922-928	1 W ERP	FHSS	ภายในอาคาร
		922-928	0.5 W ERP	FHSS	ภายนอกอาคาร
นิวซีแลนด์	OK	864-868	4 W EIRP		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ยุโรป					
ฟินแลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ตั้งแต่ 3 กุมภาพันธ์ ปี ค. ศ. 2005
ฝรั่งเศส	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
เยอรมนี	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ตั้งแต่ 22 ธันวาคม ปี ค. ศ. 2004
อิตาลี	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ตรงกับย่านความถี่ที่อนุญาต ของทหาร
เนเธอร์แลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
สหพันธรัฐรัสเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ต้องใช้ในอนุญาตเท่านั้น
สเปน	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ชั่วคราวตั้งแต่ มกราคม ปี ค. ศ. 2007
สวีเดน	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกเป็นกฎหมายใช้ตั้งแต่ มกราคม ปี ค. ศ. 2006
สวิตเซอร์แลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
สหราชอาณาจักร	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ตั้งแต่ 31 มกราคม ปี ค. ศ. 2006
อเมริกาเหนือ					
แคนาดา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
สหรัฐอเมริกา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
อเมริกาใต้					
อาร์เจนตินา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
บราซิล	OK	902-907.5	4 W EIRP	FHSS	
		915-928	4 W EIRP	FHSS	
ชิลี	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	

## หมายเหตุ

OK แสดงถึง ได้มีการออกกฎข้อบังคับใช้แล้วหรือกำลังจะนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้

IP แสดงถึง คาดการณ์ว่าจะออกกฎข้อบังคับภายใน 6-12 เดือนข้างหน้า

FHSS แสดงถึง Frequency hopping spread spectrum

LBT แสดงถึง Listen before talk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

### 2.4.1 ความถี่ใช้งาน

หลักการของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz จะใช้รูปแบบส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่หลักการของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ที่มีการสื่อสารโดยใช้ความถี่ย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.45 GHz ถึง 5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz ถึง 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ทำงานที่ความถี่ในย่านความถี่ยูเอชเอฟน่าจะให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางไกล

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์แท็กที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟสำรองไฟฟ้าให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลาย ๆ ประการ สิ่งที่ควรพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่สูง ก็คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

### 2.4.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการคือ ตำแหน่งของแท็กหรือระยะห่างชั้นต่ำระหว่างแท็กแต่ละตัวกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่ประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็ก และความเร็วในการอ่าน/เขียนข้อมูลของแท็ก

### 2.4.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

#### 2.4.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจริยยันแท็กของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้น ๆ จำเป็นต้องเข้ามาตรวจรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

#### 2.4.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1 MHz ถึง 3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field strength: E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength: H) ไม่เกิน 16.3 A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

density: S) ไม่เกิน  $10,000/f^2$  mW/cm<sup>2</sup> โดยคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging time) 6 นาที ซึ่ง  $f$  มีหน่วยเป็น MHz [2] และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 m จะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB $\mu$ A/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300 [2]

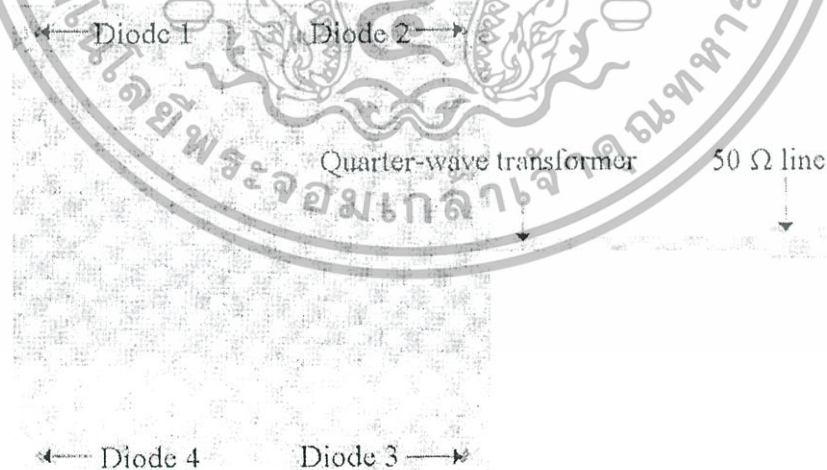
#### 2.4.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้แท็กแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือแท็กทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

## 2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ

### 2.5.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน

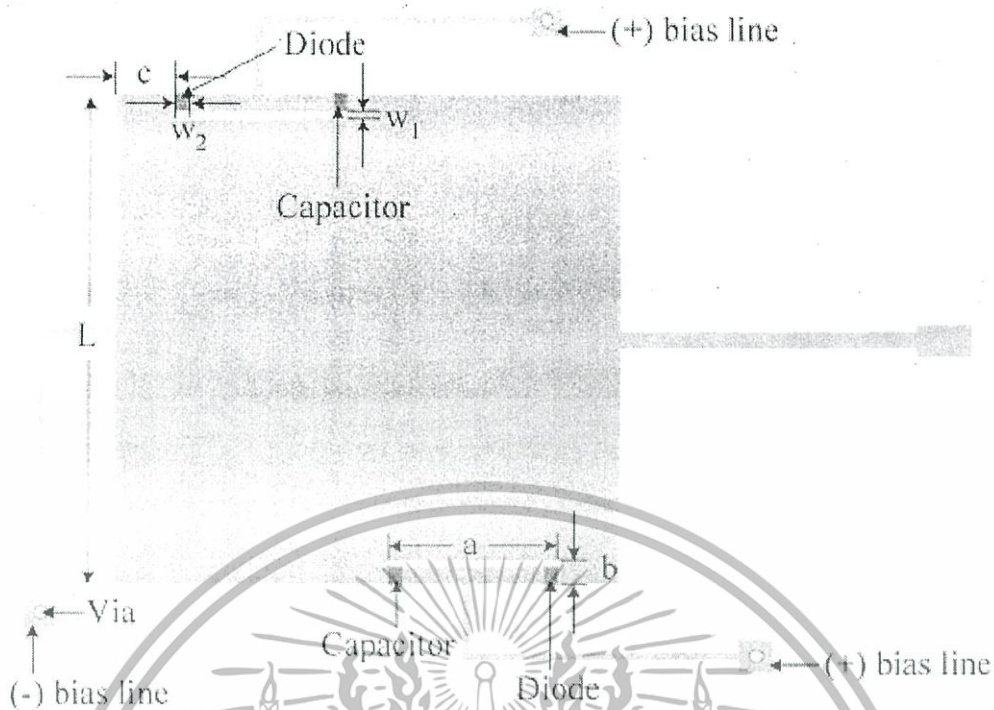
วิศวกรสายอากาศหลายคนได้มองเห็นความสำคัญของสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้หลายโพลาไรซ์ และได้มีการคิดค้นสายอากาศหลากหลายรูปแบบขึ้นมา ตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อน เช่น สายอากาศแบบปรับโครงสร้างได้เพื่อการปรับโพลาไรซ์ของ Y. J. Sung, T. U. Jang, and Y.-S. Kim ตามรูปที่ 2.8 สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งโพลาไรซ์เชิงเส้น โพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย และโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา ขึ้นอยู่กับการไบอัสให้ PIN ไดโอดแต่ละตัวที่มุมทั้งสี่ของสายอากาศ สายอากาศถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2004 ซึ่งสายอากาศนี้มีความถี่กลางอยู่ที่ 1.59 GHz อัตราขยาย 5.2 dBi สำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น และ 5.3 dBi สำหรับโพลาไรซ์วงกลมทั้งหมุนซ้ายและหมุนขวา



รูปที่ 2.8 สายอากาศแบบปรับโครงสร้างได้สำหรับการสวิตช์โพลาไรซ์ของ  
Y. J. Sung, T. U. Jang, and Y.-S. Kim

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.10 สายอากาศแผ่นระนาบแบบปรับโครงสร้างได้เพื่อการโพลาไรซ์ที่หลากหลายของ Y. J.

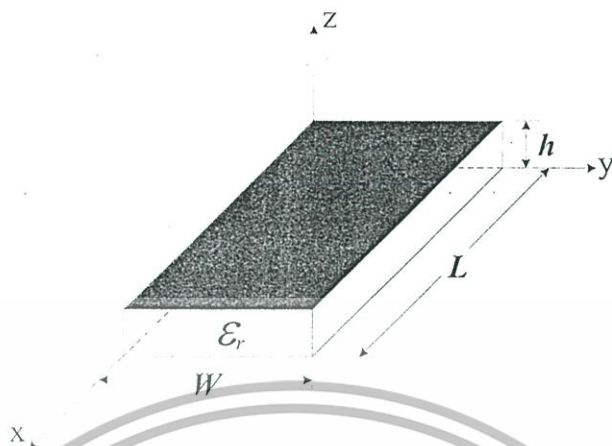
นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์ ดังรูปต่อไปนี้

### 2.5.2. ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปได้เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ในทศวรรษที่ 50 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและลักษณะการป้อนสัญญาณ โครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวด์และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยส่วนใหญ่จะมีสารไดอิเล็กตริกซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate) อยู่ตรงกลางมีความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฐานรองแสดงด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant:  $\epsilon_r$ ) และค่าของมุมความสูญเสีย (Loss tangent:  $\delta$ ) โดยทั่วไปสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถทำงานที่โหมดหลัก (Fundamental mode) คือ  $TM_{01}$  หรือ  $TM_{10}$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปมีคุณสมบัติที่เป็นข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ เช่น มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปจะมีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำ ค่า Q สูงทนกำลังงานได้ต่ำ ความบริสุทธิ์โพลาไรซ์ไม่ดี (Poor polarization purity) และช่วงกว้างแถบความถี่แคบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรง (Cavity Resonance)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างไมโครสตริปสไลต์เหล็ยมพื้นผ้า

ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรงสไลต์เหล็ยมพื้นผ้าตามรูปที่ 2.12 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$(f_r)_{\text{min}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.1)$$

โดยที่

$h$  คือ ความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสไลต์เหล็ยมพื้นผ้า

$L$  คือ ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสไลต์เหล็ยมพื้นผ้า

$W$  คือ ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสไลต์เหล็ยมพื้นผ้า

$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

$\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า

$m$  คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง  $x$

$n$  คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง  $y$

$p$  คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง  $z$

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี  $h \ll L$  และ  $h \ll W$  สามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ได้ตามสมการต่อไปนี้ คือ

เมื่อ  $h < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) เป็น  $TM_{100}^x$  และความถี่เรโซแนนซ์หาได้ดังนี้ คือ

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$v_0$  คือ ความเร็วของแสง

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

เมื่อ  $h < \frac{L}{2} < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดที่สอง (Second mode) เป็น  $TM_{010}^x$  และความเร็วเฟสหาได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

แต่ในกรณี  $h < W < \frac{L}{2}$

จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น  $TM_{200}^x$  แทนโหมด  $TM_{010}^x$  และสามารถหาความเร็วเฟสหาได้ดังนี้

$$(f_r)_{200} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

และในกรณี  $h < L < W$

จะทำให้เกิดโหมดขั้นใหญ่เป็น  $TM_{010}^x$  และสามารถหาความเร็วเฟสได้จากสมการที่

2.3

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ในกรณี  $h < L < \frac{W}{2} < W$  จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น  $TM_{020}^x$

#### 2.5.2.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ

กลไกการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ โดยทั่วไปเทคนิคการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวแพร่กระจายคลื่น นั่นคือ เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป (Microstrip line) และเทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเซียล (Coaxial probe)
2. เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า (Coupling) ซึ่งจะอาศัยหลักการเชื่อมต่อกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ นั่นคือ เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ (Aperture coupling) และเทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ (Proximity)

เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงกับขอบของตัวแพร่กระจายคลื่น เทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้กับวัสดุฐานรองที่บาง

เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเซียล เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำด้าน

ในของสายโคแอกเซียลเชื่อมต่อกับตัวแพร่กระจายคลื่นผ่านทางช่องในตัวกลางไดอิเล็กตริก ส่วนตัวนำ

ด้านนอกเชื่อมต่อกับกราวด์ของสายอากาศไมโครสตริบ ข้อดีของการบ่อนสัญญาณแบบนี้ คือ สามารถบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศได้ทุกตำแหน่ง แต่ข้อเสีย คือ จะทำให้มีความกว้างแถบความถี่ที่แคบ

เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ เป็นการบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศโดยที่เส้นไมโครสตริบจะแยกออกจากตัวแพร่กระจายด้วยระนาบกราวด์ ดังนั้นการบ่อนสัญญาณจากเส้นไมโครสตริบให้กับตัวแพร่กระจายคลื่นจึงอาศัยการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อบนระนาบกราวด์ เนื่องจากการบ่อนสัญญาณแบบนี้ทำให้สายอากาศมีหลายชั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทคนิคการบ่อนสัญญาณวิธีอื่น ๆ แต่ทำการออกแบบได้ง่าย

เทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ จะมีเส้นไมโครสตริบอยู่ระหว่างวัสดุฐานรองสองชนิดที่ต่างกัน และมีตัวแพร่กระจายคลื่นอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นบน ส่วนระนาบกราวด์จะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นล่าง

### 2.5.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือรูปที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งสามารถแสดงถึงค่าของความหนาแน่นของกำลังการแพร่กระจายคลื่น (Power density) ความเข้มของสนาม (Field intensity) เฟสหรือการโพลาไรซ์ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีการกระจายตัวใน 3 มิติ สามารถแสดงได้โดยการใช้ระบบพิกัดแบบ 3 มิติ และโดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น จะพิจารณาในบริเวณสนามระยะไกล (Far field zone)

#### 1. ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern lobes)

ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นบริเวณที่ปิดล้อมด้วยส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งแสดงในแกนเชิงขั้ว 3 มิติ ประกอบไปด้วยลำคลื่นต่าง ๆ คือ ลำคลื่นหลัก (Major or Main lobe) ลำคลื่นย่อย (Minor lobes) ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back lobes)

ลำคลื่นหลัก คือ ลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงมากกว่าลำคลื่นอื่น

ลำคลื่นย่อย คือ ลำคลื่นอื่นใดนอกเหนือจากลำคลื่นหลัก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความแรงน้อยกว่าลำคลื่นหลัก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ลำคลื่นย่อยด้านข้าง คือ ลำคลื่นย่อยที่มีทิศทางในระนาบเดียวกับลำคลื่นหลัก
2. ลำคลื่นย่อยด้านหลัง คือ ลำคลื่นย่อยที่มีทิศทางในระนาบตรงกันข้ามกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ (Grating lobe) คือ ลำคลื่นย่อยที่มีขนาดใกล้เคียงกับลำคลื่นหลักแต่เกิดในทิศทางที่ไม่ต้องการ

ดังนั้นสายอากาศที่ดีต้องจำกัดลำคลื่นที่ไม่ต้องการให้มากที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงในรูปของค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่สนใจต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก เรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe ratio) หรือระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) โดยทั่วไปในทางปฏิบัติต้องการให้ระดับของลำคลื่นด้านข้างน้อยกว่า -20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ขอบเขตของสนาม (Field regions)

โดยทั่วไปช่องว่างบริเวณรอบ ๆ สายอากาศถูกแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต คือ สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near-field) สนามระยะใกล้ที่แผ่กระจายคลื่น (Radiating near-field (Fresnel)) และสนามระยะไกล (Far-field (Fraunhofer))

สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ คือ ขอบเขตของสนามระยะใกล้ที่ติดกับสายอากาศซึ่งใช้หลักการรีแอกทีฟ

สนามระยะใกล้ที่แผ่กระจายคลื่น คือ ขอบเขตของสนามของสายอากาศระหว่างสนามระยะใกล้รีแอกทีฟและสนามระยะไกล ถ้ามิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศน้อยกว่าความยาวคลื่นดังนั้น อาจจะไม่ปรากฏขอบเขตนี้ ขอบเขตด้านในมีระยะเป็น  $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  และขอบเขตด้านนอกเป็น  $R < 2D^2/\lambda$  โดยที่  $D$  คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

สนามระยะไกล คือ ขอบเขตของสนามของสายอากาศซึ่งการแผ่กระจายของสนามไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ขอบเขตด้านในมีระยะเป็น  $R = 2D^2/\lambda$

### 2.5.2.4 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่น คือ มุมที่รองรับระหว่าง 2 ตำแหน่งที่มีความแรงเท่ากันแต่อยู่ด้านตรงข้ามกันของลำคลื่นหลัก โดยทั่วไปจะพิจารณาความกว้างลำคลื่น 2 ค่า คือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) และความกว้างลำคลื่นที่จุดศูนย์คู่แรก (First null beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง คือ ความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่มากที่สุด ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง  $-3$  dB ลงมาจากค่ากำลังงานที่มากที่สุด

ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งศูนย์คู่แรก คือ ความกว้างลำคลื่นที่ตำแหน่งศูนย์คู่แรก

อัตราส่วนลำคลื่นย่อยต่อลำคลื่นหลัก (Side lobe level: SLL) คือ อัตราส่วนของลำคลื่นย่อยต่อลำคลื่นหลัก

อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อย (Side lobe ratio: SLR) คือ อัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อย

### 2.5.2.5 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศที่เกี่ยวกับสนามระยะไกล สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นกับระยะทางยกกำลังสอง

กำลังงานทั้งหมดหาได้จากการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตลอดมุมตันของ

4 $\pi$

### 2.5.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ถ้าไม่มีการระบุทิศทาง หมายความว่า ทิศทางที่มีความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด

สำหรับสายอากาศที่มีการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับหนึ่ง เนื่องจากค่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ( $U$ ) ค่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ( $U_{\max}$ ) และค่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซทรอปิก (Isotropic) มีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะแสดงในหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งสามารถหาได้จากการแปลงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)

### 2.5.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศจะใช้เพื่อคำนึงถึงค่าการสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสูญเสียจากการไม่แมตช์ของสายนำสัญญาณกับสายอากาศและการสูญเสียภายในตัวสายอากาศ เช่น การสูญเสียในตัวนำ การสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก เป็นต้น

โดยปกติแล้วในการทดสอบสายอากาศเพื่อหาค่าประสิทธิภาพนั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพการสะท้อนของสายอากาศและค่าประสิทธิภาพของการสูญเสียในตัวนำไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ

### 2.5.2.8 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก โดยที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีความสัมพันธ์กับกำลังงานในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกและมีค่าเท่ากับกำลังงานที่สายอากาศได้รับ ( $P_{in}$ ) หารด้วย  $4\pi$  อัตราขยายของสายอากาศ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ อัตราขยายที่ไม่ได้คิดผลของการสะท้อนและความไม่ตรงกันของโพลาริซชันของสายอากาศ และอัตราขยายที่คิดรวมผลของการสะท้อนและความไม่ตรงกันของโพลาริซชันของสายอากาศ

### 2.5.2.9 ช่วงกว้างแถบความถี่

ช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณลักษณะอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้หรืออาจจะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น การโพลาริซชัน อัตราขยาย ประสิทธิภาพของสายอากาศ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เป็นต้น ที่สามารถทำงานได้ดี

จากคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะเป็นตัวกำหนดช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ที่ใช้งานจะต้องมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน และอัตราส่วนคลื่นนิ่งต้องมีค่าไม่เกิน 2:1

ช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น ดังนี้ คือ

- สายอากาศที่มีช่วงกว้างแถบความถี่แคบ (Narrowband antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่แคบ ซึ่งจะแสดงช่วงกว้างแถบความถี่เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความถี่กลาง
- สายอากาศที่มีช่วงกว้างแถบความถี่กว้าง (Wideband antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า  $f_H$  มากกว่า  $f_L$  ประมาณ 40 เท่า และจะแสดงเป็นอัตราส่วน
- สายอากาศที่มีอิสระจากความถี่ (Frequency independent antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่กว้างมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า  $f_H$  มากกว่า  $f_L$  ประมาณ 80 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $f_H$  คือ ความถี่ที่สูงกว่า  $f_L$   
 $f_L$  คือ ความถี่ที่ต่ำกว่า  $f_H$   
 $f_c$  คือ ความถี่กลางระหว่าง  $f_H$  และ  $f_L$

### 2.5.2.10 การโพลาไรซ์

การโพลาไรซ์ คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเดินทาง โดยการมองตามหลังคลื่น การโพลาไรซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear polarization: LP) การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม (Circular polarization: CP) การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรี (Elliptical polarization: EP)



รูปที่ 2.12 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่  $z = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ตลอดการเดินทางของคลื่น สำหรับคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีความแตกต่างของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ในแนวตั้งและในแนวนอน เป็นดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

สามารถแบ่งชนิดของการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical polarization: VP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ในแนวตั้งตลอดการเดินทางของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวเอียง (Slant polarization: SP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ในแนวเอียงตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
2. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากัน
3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{\pi}{2}$

ถ้าคลื่นแพร่กระจายไปในทิศทาง  $-z$  สามารถหาค่าความต่างของเฟสของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ในแนวตั้งและในแนวนอน ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (2.6)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, \quad n=0,1,2,\dots \text{ สำหรับ CW} \quad (2.7)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n=0,1,2,\dots \text{ สำหรับ CCW} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 พบว่า สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

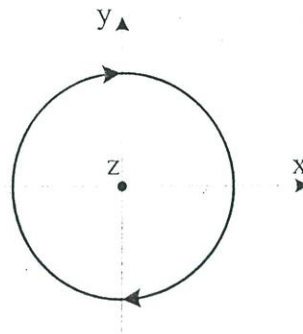
- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-handed CP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter clockwise: CCW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP)

การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรี คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เเงอนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาไรซ์ชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

- กรณี 1: 1) ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ  
 2) ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากันแล้ว  
 3.) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวนเท่า

ของ  $\frac{\pi}{2}$

$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (2.9)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi > 0, n=0,1,2,3,\dots \text{ สำหรับ } CW \quad (2.10)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi < 0, n=0,1,2,3,\dots \text{ สำหรับ } CCW \quad (2.11)$$

- กรณี 2: 1) ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ  
 2) ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีขนาดที่ไม่เท่ากันแล้ว  
 3) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวนเท่า  
 ของ  $\pi$

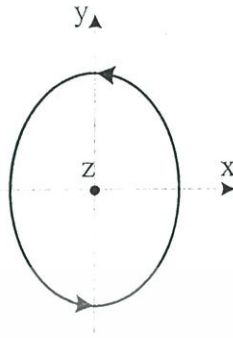
$$|E_x| \neq |E_y| \Rightarrow E_{x0} \neq E_{y0} \quad (2.12)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n=0,1,2,\dots \text{ สำหรับ } CW \quad (2.13)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n=0,1,2,\dots \text{ สำหรับ } CCW \quad (2.14)$$

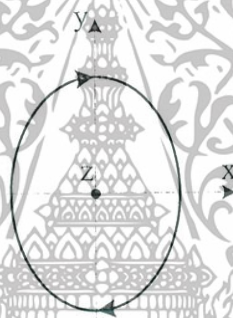
จากสมการที่ 2.9 ถึง 2.14 สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-handed EP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-handed EP)

ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีจะมีเส้นการกวาดของเวกเตอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของวงรีที่มีมุมเอียง (Tilted ellipse) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) โดยอัตราส่วนของแกนหลัก (Major axis) ต่อแกนรอง (Minor axis) เรียกว่า อัตราส่วนของแกน (Axial ratio) สามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}} = \frac{OA}{OB} = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} \quad (2.15)$$

$$OA = \left[ \frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$OB = \left[ \frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน  $y$  จะแทนด้วยมุม  $\tau$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2E_{x0}E_{y0}}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \cos(\Delta\varphi) \right] \quad (2.18)$$

การจำแนกชนิดของการโพลาไรซ์จะพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนของแกน (Axial ratio: AR) ที่แสดงดังสมการที่ 2.15

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.15 สามารถแบ่งชนิดของการโพลาไรซ์ออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้  
กรณีที่ 1 โพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (LP) ซึ่งจะมีเฉพาะค่า  $|E|_{\max}$  ( $|E|_{\min} = 0$ ) นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{0} = \infty \quad (2.19)$$

กรณีที่ 2 โพลาไรซ์แบบเชิงวงกลม (CP) ซึ่งจะมีค่า  $|E|_{\max} = |E|_{\min}$  นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = 1 \quad (2.20)$$

กรณีที่ 3 โพลาไรซ์แบบเชิงวงรี (EP) ซึ่งจะมีค่า  $|E|_{\max} > |E|_{\min}$  นั่นคือ

$$1 < AR < \infty \quad (2.21)$$

สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีข้อดี คือ สายอากาศสร้างง่ายแต่จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าสูง ส่วนสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม มีข้อดี คือ การสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์มีค่าต่ำ แต่สายอากาศสร้างยากกว่าสายอากาศแบบเชิงเส้น

### 2.5.3 เทคโนโลยีของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการสื่อสารแบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล

ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกล จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท็กประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิป ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ และสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ

#### 2.5.3.1 การออกแบบสายอากาศของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ

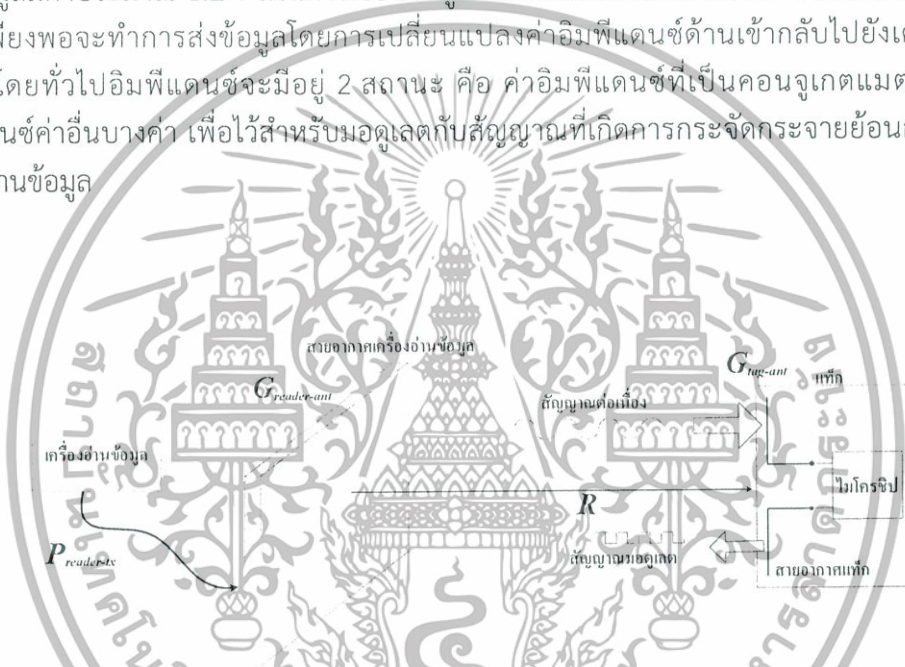
หลักเกณฑ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับสมรรถนะของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ คือ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแท็กประกอบด้วยสายอากาศและชิป ซึ่งคุณลักษณะของชิปจะถูกกำหนดจากทางผู้ผลิตโดยที่ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ ในการออกแบบสายอากาศเพื่อที่จะให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดโดยที่ได้ทำการเลือกชิปไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว รวมทั้งอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น ขนาดของสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และราคา เป็นต้น

2.5.3.2 หลักการทำงาน

สำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องมาจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.20 แสดงหลักการทำงานของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบพาสซีฟในสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่องซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท็ก หลังจากนั้นสายอากาศของแท็กจะเหนี่ยวนำแรงดัน RF แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิป โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ 1.2 v ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปใช้ประมาณ 2.2 v เมื่อชิปได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่ 2 สถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นคอนจูเกตแมตซ์และค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อไว้สำหรับมอดูเลตกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.19 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกล

2.5.3.3 การติดต่อสื่อสารของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นั้นจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัด 2 อย่าง คือ ระยะทางที่มากที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิปและการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่ กระจัดกระจายย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัตถุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ คือไม่มีแหล่งกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับกำลังงานมาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการสั่งให้ชิปภายในแท็กทำงาน

เทคโนโลยีของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลนั้นเป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ย่านความถี่ยูเอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟเป็นต้น

ในรูปที่ 2.20 แสดงระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ เช่น กำลังที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น

จากสมการการส่งสัญญาณในช่องว่างอิสระของฟรีส (Friis free-space transmission) สามารถหาค่ากำลังงานที่สายอากาศของแท็กได้รับได้ ดังนี้

$$P_{tag-ant} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \quad (2.22)$$

โดยที่

$P_{reader-ant}$

คือ กำลังงานที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล

$G_{reader-ant}$

คือ อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล

$R$

คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก

$G_{tag-ant}$

คือ อัตราขยายของสายอากาศของแท็ก

$\lambda$

คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างที่ความถี่ใช้งาน

$\chi$

คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซิงของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศของแท็กมีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตซิงของการโพลาไรซ์เท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุในสนามระยะไกลโดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและสายอากาศของแท็กจะมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตซิงของการโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท็กรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิป ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \quad (2.23)$$

โดยที่

$\tau$  คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน (Transmission power coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นระยะทางที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านได้ไกลที่สุด คือ เมื่อ  $P_{tag-chip}$  มีค่าเท่ากับ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ( $P_{tag-threshold}$ ) และสามารถหาระยะทางที่มากที่สุด แสดงดังสมการนี้ คือ

$$R_{\max(Reader)} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{reader-tx} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \tau}{P_{tag-threshold}}} \quad (2.24)$$

หรือ

$$R_{\max(Reader)} = 10^\alpha \quad (\text{m}) \quad (2.25)$$

โดยที่

$$\alpha = 27.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{reader-tx} (\text{dBm}) + G_{reader-ant} (\text{dBi}) + G_{tag-ant} (\text{dBi}) + \chi (\text{dB}) + \tau (\text{dB}) - P_{tag-threshold} (\text{dBm}) \quad (2.26)$$

## 2. การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบบางชุดด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจายพลังงานย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจายพลังงานย้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจายพลังงานย้อนกลับของแท็ก บนพื้นฐานของสมการ Monostatic หรือ Backscatter radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลตที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ

$$P_{reader-rx} = \frac{\lambda}{(4\pi)^3 R^4} P_{reader-tx} G_{reader-ant}^2 \chi \sigma \quad (2.27)$$

โดยที่

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

เมื่อกำลังงานที่รับได้มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ( $P_{tag-threshold}$ ) จะทำให้ได้ระยะทางที่มากที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจายพลังงานย้อนกลับและสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_{\max(\text{Backscatter})} = \sqrt[4]{\frac{\lambda P_{reader-tx} G_{reader-ant}^2 \chi \sigma}{(4\pi)^3 P_{tag-threshold}}} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

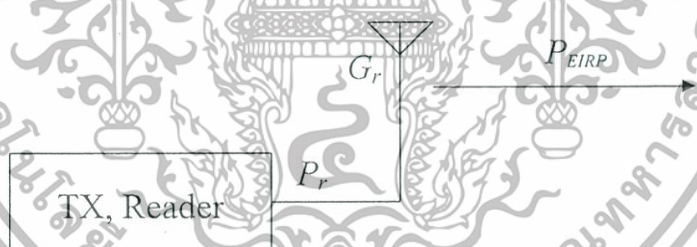
$$R_{\max(\text{Backscatter})} = 10^\beta \quad (\text{m}) \quad (2.29)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \beta = & 16.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{\text{reader-tx}}(\text{dBm}) + 2G_{\text{reader-ant}}(\text{dBic}) \\ & + \frac{\chi(\text{dB}) + \sigma(\text{dBsm}) - P_{\text{reader-threshold}}(\text{dBm})}{40} \end{aligned} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าระยะทางในการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แต่มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัว ที่สามารถทราบค่าได้ก่อนจากการเลือกเครื่องอ่านข้อมูลและตัวชิป คือ ค่ากำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ( $P_{\text{tag-threshold}}$ ) และค่าความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ( $P_{\text{reader-threshold}}$ )

#### 2.5.3.4 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP)



รูปที่ 2.20 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางในการอ่านที่มากที่สุดเป็นส่วนหนึ่งกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ เช่น

ค่า EIRP คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หาได้ดังนี้

$$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปมีการอ้างถึงค่า EIRP และค่า ERP ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไดโพลมากกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dBi ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EIRP และค่า ERP คือ

$$P_{EIRP} = 1.64P_{ERP} \tag{2.32}$$

2.5.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน

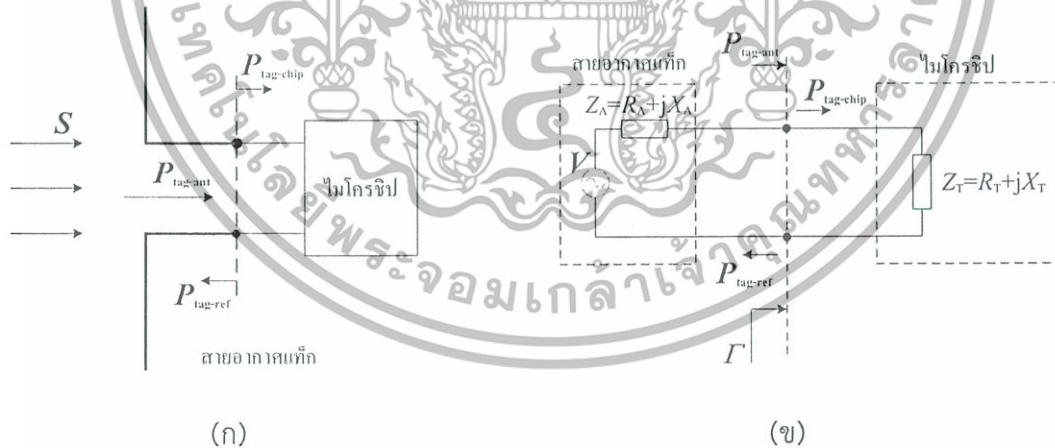
พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล ( $A_{e-max}$ ) ของสายอากาศของแท่งที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน ( $S$ : W/m<sup>2</sup>) แท่งจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิปที่มีอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_T$  กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิป ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ กำลังงานที่แท่งรับได้และกำลังงานที่ส่งต่อไปยังชิป คือ

$$P_{tag-ant} = SA_{e-max} \tag{2.33}$$

และ

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.34}$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ  $Z_A$  ของแท่งและอิมพีแดนซ์ของชิป  $Z_T$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิป



รูปที่ 2.21 กำลังงานที่ส่งมายังแท่งและวงจรสมมูล (ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท่ง (ข) วงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.22 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป  $Z_T$  จะรวมผลของตัวกล่องที่ใส่ชิปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (2.35)$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (2.36)$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.37)$$

$Z_A^*$  คือ ค่าสังยุคของ  $Z_A$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิป คือ

$$P_{\text{tag-chip}} = (1 - |\Gamma|^2) P_{\text{tag-ant}} \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{\text{tag-chip}}}{P_{\text{tag-ant}}} = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.39)$$

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

$$P_{\text{tag-chip-max}} = P_{\text{tag-ant}} = S A_e \text{-max} \quad (2.40)$$

ในขณะที่สายอากาศถูกทำให้ลัดวงจร นั่นคือ อิมพีแดนซ์ของชิปมีค่าเท่ากับ 0 ( $R_T = 0$ ) และ  $X_T = -X_A$  ส่งผลให้  $|\Gamma| = 1$  และ  $\tau = 0$  ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังชิป

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

$$RL(\text{dB}) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุความถี่เอชเอฟ ตัวอย่างเช่น ลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ อุปกรณ์ การสื่อสารแบบการกระจายย้อนกลับ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการ ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้กันทั่วไป รวมทั้งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความสำคัญต่อการ วิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ลำคลื่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าอัตราขยาย ช่วงกว้าง แถบความถี่ และการโพลาไรซ์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ผลการวิเคราะห์สายอากาศ

### 3.1 กล่าวนำ

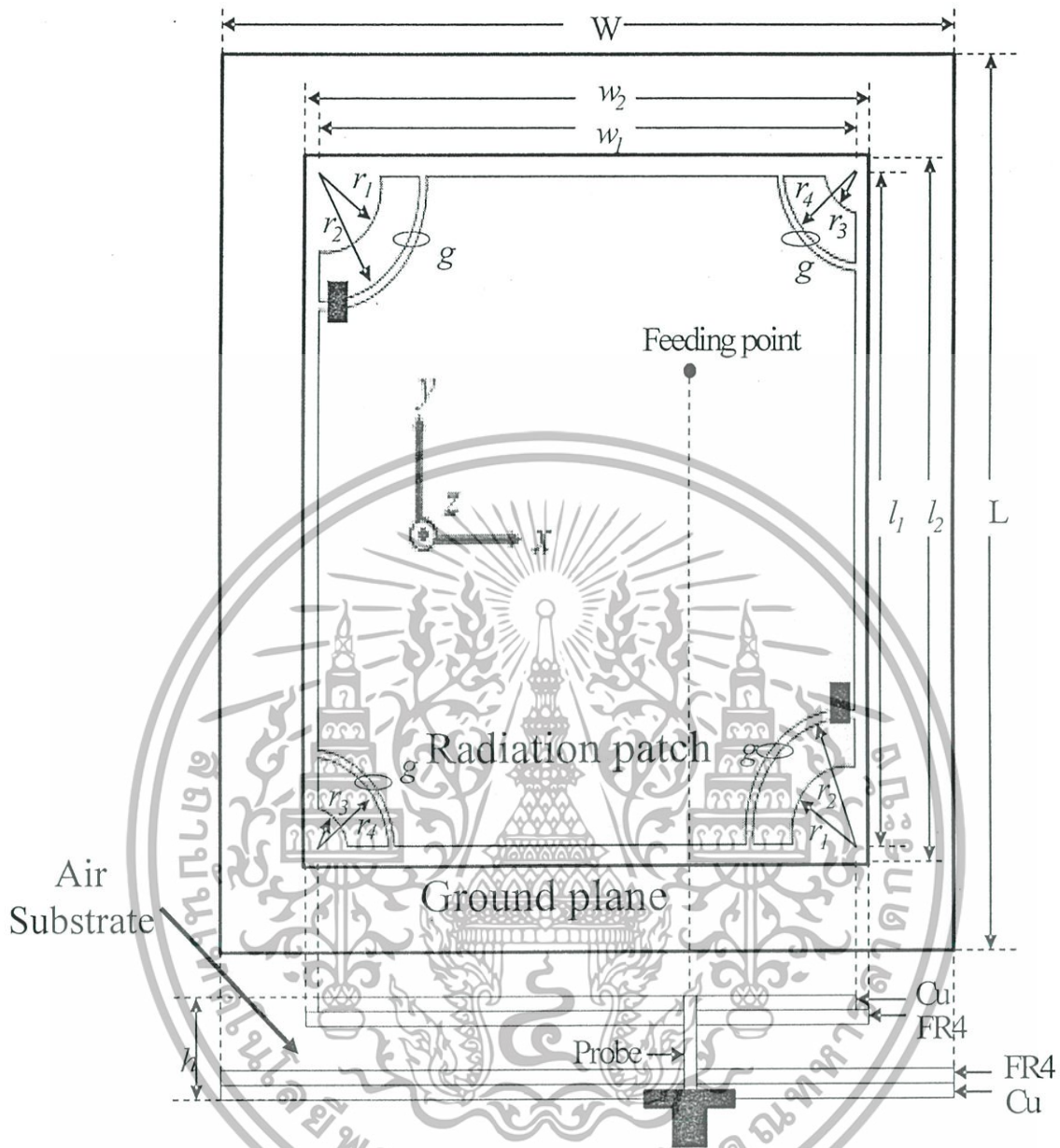
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ย่านความถี่เอชเอฟแผ่นระนาบปรับโพลาริไซซ์ได้ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในในรูปแบบปกติจะมีการโพลาริไซซ์เป็นแบบวงกลม แต่สามารถเปลี่ยนเป็นโพลาริไซซ์เชิงเส้นได้โดยการเปลี่ยนรูปร่างสายอากาศ เพื่อให้สามารถใช้งานกับแท่งที่มีลักษณะการวางตัวหลากหลายรูปแบบได้ และในบทนี้ได้ทำการหาพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณาอัตราส่วนแกนและการสูญเสียย้อนกลับในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบสายอากาศ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองผลตัวสายอากาศและปรับพารามิเตอร์ต่างๆ สายอากาศผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม CST® (Microwave studio) [16] เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะสายอากาศ รวมทั้งหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ย่านความถี่เอชเอฟ ซึ่งระบบนี้มีความต้องการสายอากาศที่สามารถตรวจจับแท่งที่วางอยู่ในทิศทาง รูปแบบ ที่หลากหลายได้ มีอัตราการขยายสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม รายละเอียดต่างๆ จะนำเสนอตั้งหัวข้อต่อไป

### 3.2 สายอากาศสวิตช์โพลาริไซซ์เชิงเส้น/วงกลม

สายอากาศที่สามารถปรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริไซซ์วงกลม และโพลาริไซซ์เชิงเส้นสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยการปรับรูปร่างสายอากาศ มีหลายเทคนิคหลายรูปแบบสำหรับการปรับโพลาริไซซ์สายอากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการตัดมุมของแผ่นแพร่กระจายคลื่นออกเป็นส่วนย่อยๆ แล้วปรับโพลาริไซซ์โดยการเชื่อมต่อ (Shorted) ส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน หรือการปล่อยให้แยกอิสระจากกัน (Open) และใช้เทคนิคการป้อนแบบเดี่ยว การป้อนแบบเดี่ยวมีข้อดีตรงที่โครงสร้างง่าย ง่ายต่อการผลิต และต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการผลิตในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ สายอากาศประกอบด้วยชั้นตัวนำสองชั้น ซึ่งประกอบด้วยแผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ ใช้วัสดุฐานรองอากาศเพื่อให้ได้อัตราขยายที่สูงขึ้น แบบตัววัดกว้างขึ้น และราคาถูก แผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ถูกสร้างจากแผ่น PCB ด้านเดียวความหนา 0.8 มิลลิเมตร แผ่นแพร่กระจายคลื่นหลักถูกวางเหนือระนาบกราวด์ด้วยระยะห่าง ( $h$ ) 9 มิลลิเมตร จุดป้อนสัญญาณถูกป้อนเข้าที่ตำแหน่ง ( $x = 23, y = 25$ ) มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม

รายละเอียด ขั้นตอนการออกแบบ การปรับพารามิเตอร์ต่างๆ การกำหนดจุดป้อนสัญญาณ การปรับรูปร่างสายอากาศโดยการ Shorted และ Open ระหว่างแผ่นแพร์กระจายคลื่นกับมุมเพื่อเปลี่ยนโพลาริซ์สายอากาศ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การออกแบบสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม

สำหรับการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบที่สามารถสวิตซ์โพลาริซ์ระหว่างเชิงเส้นและวงกลมได้นั้น ในขั้นต้นได้เริ่มจากการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบโดยการกำหนดขนาดของแผ่นตัวแพร์กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแผ่นระนาบกราวด์ โดยโครงสร้างสายอากาศจะเริ่มพิจารณาที่สายอากาศแผ่นระนาบเพื่อให้ได้ความถี่ใช้งานในย่านความถี่เอชเอฟ และจากนั้นจะพิจารณาใน

เอกสารเรื่องนี้ออกมามีข้อดีอย่างหนึ่งคือมีความกว้างที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการแยกและการเชื่อมต่อระหว่างค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นแพร่กระจายคลื่นหลักกับมุมที่ถูกแยกออกมีผลต่อโพลาริซายอากาศ และการสูญเสียย้อนกลับต้องต่ำกว่า 3 dB สำหรับโพลาริซายวงกลม และมีค่าสูงสำหรับโพลาริซายเชิงเส้น และทั้งสองโพลาริซายต้องตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ใช้งานคือความถี่ 920-925 MHz สายอากาศที่นำเสนอในรายงานนี้ใช้วัสดุฐานรองที่เป็นอากาศสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ

### 3.3.1 การหาขนาดเริ่มต้นสายอากาศ

เริ่มต้นจากการกำหนดความถี่ที่ใช้งานในระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านยูเอชเอฟมีค่าอยู่ระหว่าง 920 MHz ถึง 925 MHz โดยมีค่าความถี่กลางเท่ากับ 922.5 MHz ตามมาตรฐานของประเทศไทย จากนั้นหาขนาดความยาวคลื่นที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ตามสมการที่ 3.1

$\lambda_0$  คือ ค่าความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ

$c$  คือ ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ

ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \left( \frac{3 \times 10^8}{922.5 \times 10^6} \right) = 0.325 \text{ m} \quad (3.1)$$

การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นสายอากาศซึ่งได้จากทฤษฎีในบทที่ 2 ในส่วนการคำนวณหาขนาดสายอากาศไมโครสตริปที่มีความสูง  $h$  ของวัสดุฐานรองที่น้อยกว่าความยาว  $l$  สายอากาศไมโครสตริปหลายๆ และมีความสูง  $h$  ของวัสดุฐานรองน้อยกว่าความกว้าง  $w$  สายอากาศไมโครสตริปหลายๆ เมื่อทำการกำหนดให้ขนาดแผ่นตัวนำสายอากาศไมโครสตริป  $w \approx l$  ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดความยาวของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้จากสมการที่ 3.2

โดยที่

$h$  คือความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่น

$l$  คือความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่น

$w$  คือความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่น

$\mu$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

$\epsilon$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$v_0$  คือความเร็วของแสง

$\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

$$l = \frac{1}{2(f_r)_{010} \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2(f_r)_{010} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

$$l = \frac{3 \times 10^8}{2(922.5 \times 10^6) \sqrt{1}} = 162.6 \text{ mm}$$

ดังนั้นความยาวเริ่มต้น  $l$  มีค่าเท่ากับ 162.6 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณจึงได้พารามิเตอร์เริ่มต้นสายอากาศแผ่นระนาบ แสดงดังรูปที่ 3.2 และพารามิเตอร์ต่างๆ สายอากาศแผ่นระนาบแสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับระนาบกราวด์ได้ถูกกำหนดค่าเริ่มต้นไว้ที่ขนาดกว้างคูณยาว ( $L \times W$ ) เท่ากับ  $220 \times 220$  มิลลิเมตร เพื่อที่จะเป็นการจำกัดขนาดสายอากาศให้มีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป เนื่องจากในการผลิตในเชิงพาณิชย์นั้น ยังสามารถผลิตสายอากาศที่มีขนาดเล็กได้เท่าไรก็ดี เพราะจะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ และกำหนดจุดป้อนสัญญาณไว้ที่ตำแหน่ง  $x = 25$  มิลลิเมตร และ  $y = 27$  มิลลิเมตร ตามหลักการป้อนสัญญาณสำหรับโพลาริซวงกลมที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

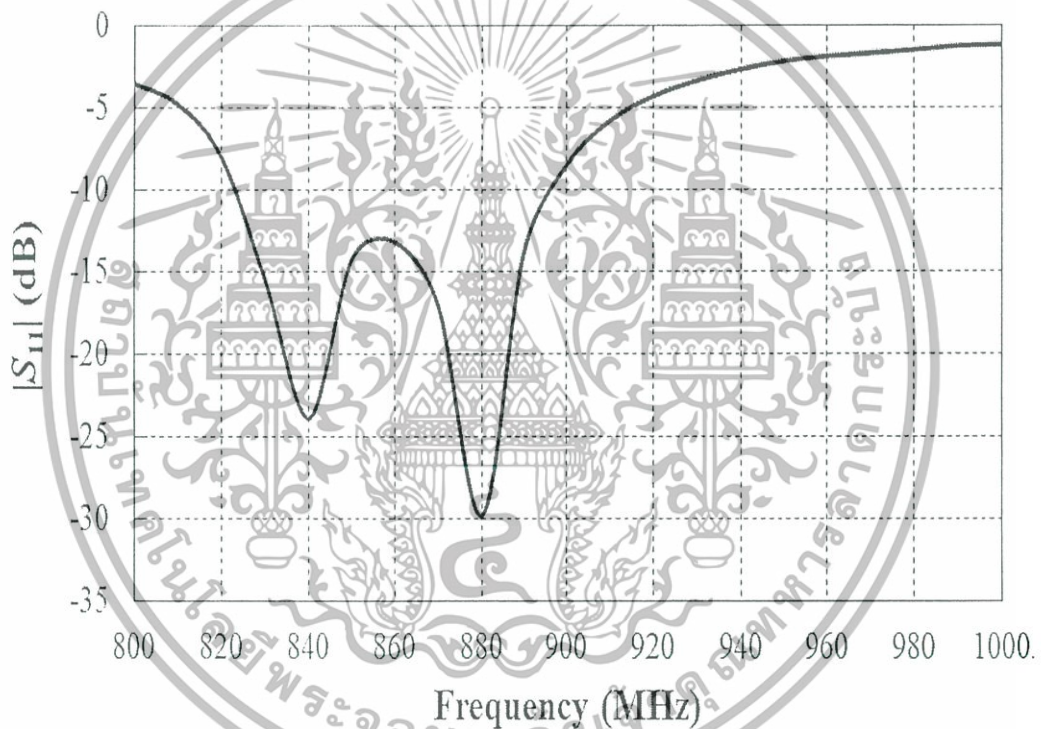
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นสายอากาศแผ่นระนาบ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเริ่มต้นสายอากาศ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเริ่มต้นสายอากาศตามรูปที่ 3.2 นั้น สายอากาศถูกออกแบบให้มีโพลาริซเอชันเป็นแบบโพลาริซวงกลม จากนั้นค่อยทำการปรับปรุงสายอากาศให้สามารถเปลี่ยนเป็นโพลาริซเชิงเส้น เนื่องจากต้องการให้อัตราส่วนแกนสายอากาศแบบโพลาริซวงกลมที่ดีที่สุด คือ มีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ซึ่งเป็นการออกแบบที่ง่ายกว่าการสร้างสายอากาศให้มีโพลาริซเอชันเป็นแบบโพลาริซเชิงเส้นแล้วค่อยเปลี่ยนให้เป็นโพลาริซวงกลมทีหลัง เพราะการเปลี่ยนโพลาริซจากเชิงเส้นเป็นโพลาริซวงกลมนั้น เป็นเรื่องยากกว่าที่จะควบคุมอัตราส่วนแกนสำหรับโพลาริซวงกลมให้ต่ำกว่า 3 dB

หลังจากนั้นจะเป็นการจำลองเพื่อวิเคราะห์การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) สายอากาศ โดยการสูญเสียย้อนกลับจะเป็นตัวบอกความถี่ที่สายอากาศสามารถใช้งานได้ การสูญเสียย้อนกลับสายอากาศเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเริ่มต้นสำหรับโพลาริซวงกลม

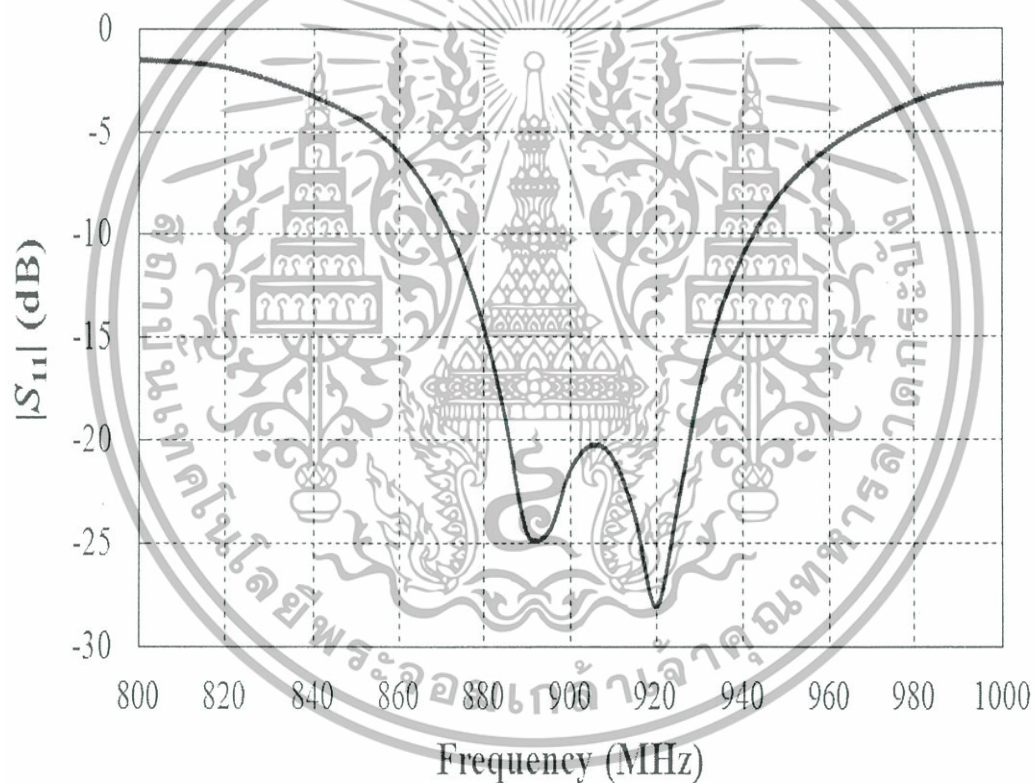
จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าสายอากาศตอบสนองความถี่ตั้งแต่ความถี่ 825 MHz ถึง 895 MHz ซึ่งยังต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการคือ 922.5 MHz อยู่ประมาณ 27 MHz ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปรับขนาดสายอากาศ เช่น ความกว้าง และ ความยาว โดยจากสมการที่ 3.2 หากต้องการให้สายอากาศตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้น ต้องปรับขนาดสายอากาศให้เล็กลง พารามิเตอร์สายอากาศที่ปรับปรุงแสดงดังตารางที่ 3.2 จากนั้นทำจำลองการทำงานสายอากาศเพื่อหาการสูญเสียย้อนกลับสายอากาศ

### ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงสายอากาศแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
$W$	220
$L$	220
$w_1$	142
$l_1$	152
$r$	15
$h$	10

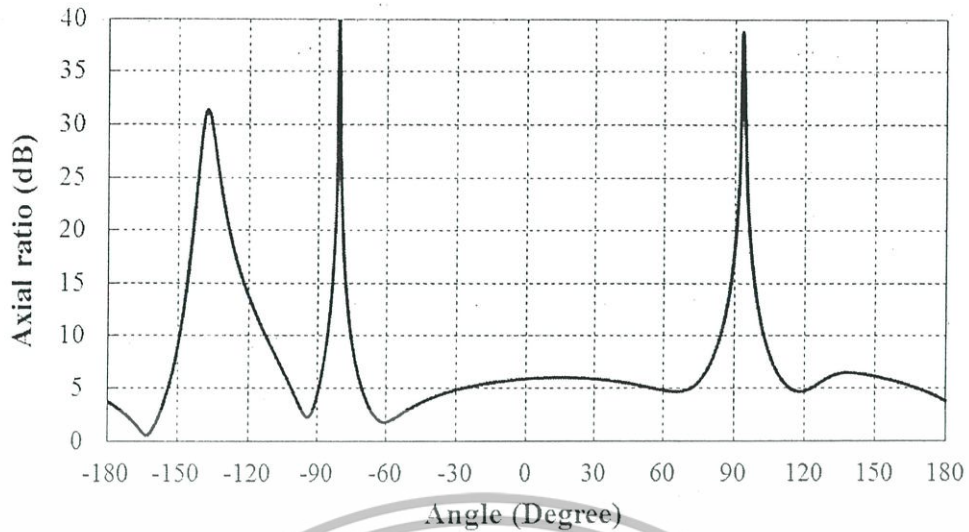
เมื่อนำพารามิเตอร์สายอากาศแผ่นระนาบที่แสดงในตารางที่ 3.2 ไปจำลอง จะได้รับการสูญเสียย้อนกลับดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่ปรับปรุงสำหรับโพลาริซวงกลม

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าสายอากาศตอบสนองความถี่ตั้งแต่ความถี่ 872 MHz ถึง 943 MHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ใช้งานที่ต้องการ จากนั้นจำลองเพื่อวิเคราะห์อัตราส่วนแกนสายอากาศดังแสดงตามรูปที่ 3.5

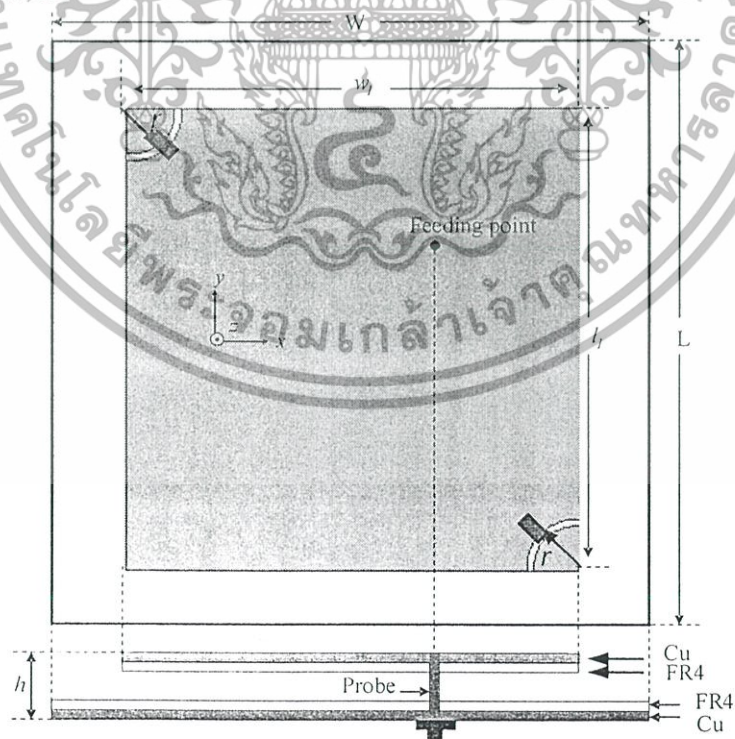
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 อัตราส่วนแกนสายอากาศที่ปรับปรุงสำหรับโพลาริซวงกลม

จากรูปที่ 3.5 สายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่มุม 0 องศา เท่ากับ 6 dB ซึ่งสูงกว่าอัตราส่วนที่ยอมรับได้สำหรับโพลาริซวงกลม คือ อัตราส่วนแกนต้องต่ำกว่า 3 dB แต่ค่าที่ได้ก็สูงกว่าเล็กน้อยซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการตัดมุมของแผ่นแพร่กระจายคลื่นโดยไม่ต้องปรับความกว้าง ความยาว ของแผ่นแพร่กระจายคลื่น

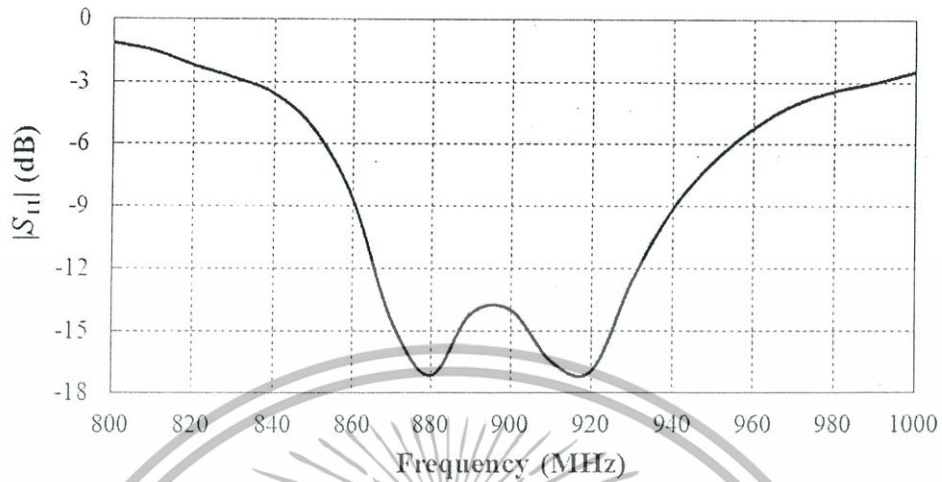
จากนั้นจำลองสายอากาศเพื่อพิจารณาว่าสายอากาศขนาดที่ปรับปรุงตามตารางที่ 3.2 สามารถเปลี่ยนเป็นโพลาริซเชิงเส้นได้หรือไม่ โดยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและมุมเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การปรับโครงสร้างสายอากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นโพลาริซเชิงเส้น

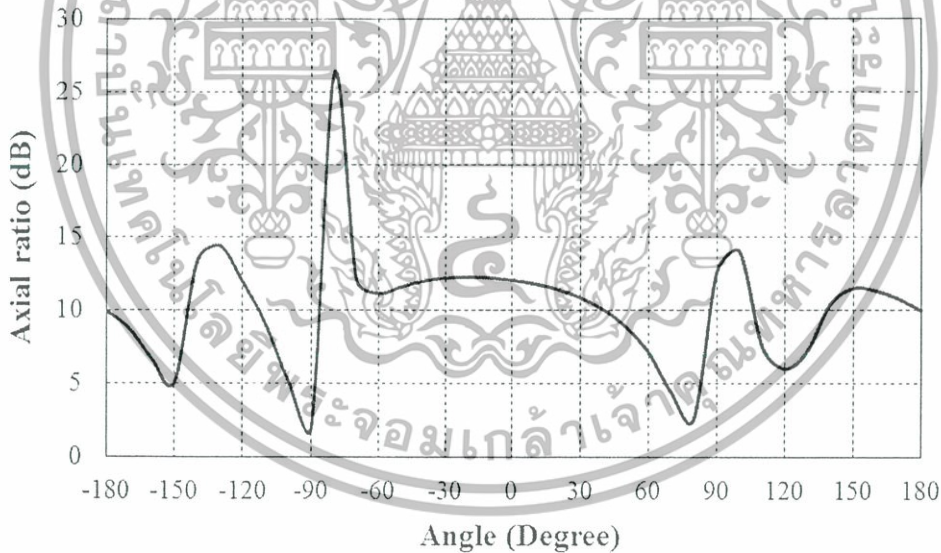
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการจำลองเพื่อหาการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนแกนสายอากาศดังแสดงตามรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่ปรับโครงสร้างให้เป็นโพลาริซเซชัน

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่า หลังจากปรับโครงสร้างสายอากาศแล้ว สายอากาศยังคงตอบสนองในย่านความถี่ที่ต้องการได้คือ ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz



รูปที่ 3.8 อัตราส่วนแกนสายอากาศที่ปรับโครงสร้างให้เป็นโพลาริซเซชัน

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่า การปรับรูปร่างสายอากาศมีผลอย่างมากกับอัตราส่วนแกนสายอากาศ โดยสายอากาศมีอัตราส่วนแกนที่มุม 0 องศาเท่ากับ 12 dB ซึ่งอัตราส่วนแกนที่สูงเป็นคุณสมบัติของโพลาริซเซชัน อย่างไรก็ตามอัตราส่วนแกนสำหรับโพลาริซเซชันยังมีค่าไม่สูงพอจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงต่อไป

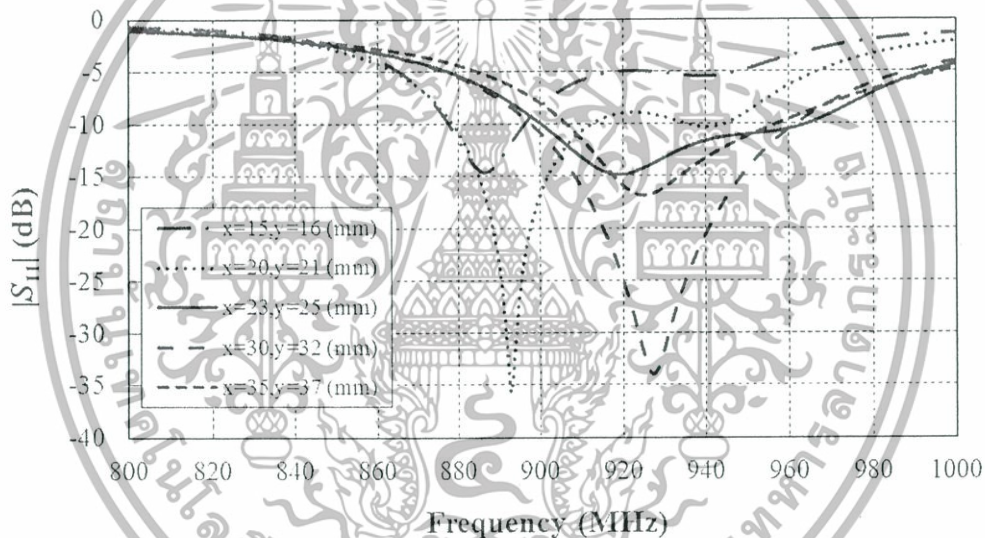
และจากผลการจำลองตามรูปที่ 3.5 ถึง 3.8 ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่า ขนาดและโครงสร้างสายอากาศที่ปรับปรุงแล้วตามตารางที่ 3.2 สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าและไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้งานได้ทั้งแบบโพลาริซวงกลมและเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้อัตราส่วนแกน อัตราขยาย โพลาริซ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ดี ทั้งในโพลาริซวงกลมและเชิงเส้น

### 3.3.2 การปรับพารามิเตอร์สายอากาศ

พารามิเตอร์สายอากาศ เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง สายอากาศ เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานในการสร้างสายอากาศ จากการจำลองการทำงานตามรูปที่ 3.4 ถึง 3.8 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆตามตารางที่ 3.2 นั้น สามารถสร้างสายอากาศแบบโพลาริซวงกลมได้ แต่การจะออกแบบสายอากาศให้สลับการทำงานเป็นแบบโพลาริซเชิงเส้นได้ และให้การตอบสนองความถี่ในย่านความถี่ที่ต้องการ ได้อัตราส่วนแกนที่ดีสำหรับโพลาริซเชิงเส้น มีพารามิเตอร์สำคัญอยู่ 3 อย่างคือ ตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณ ขนาดความกว้างของร่อง และตำแหน่งจุดเชื่อมต่อเพื่อปรับโครงสร้างสายอากาศเพื่อปรับโพลาริซสายอากาศ โดยหัวข้อนี้จะได้อธิบายรายละเอียดของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่านี้ ถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อการทำงานสายอากาศ

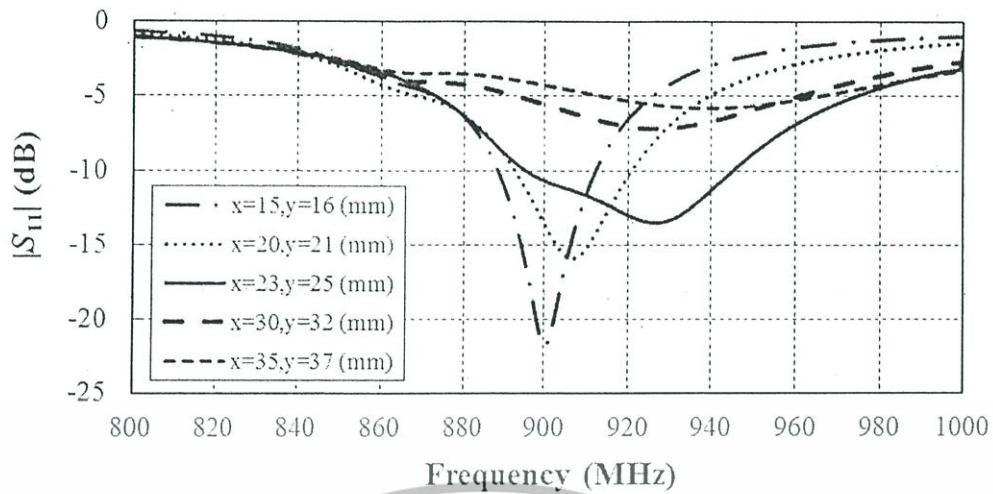
#### 3.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงจุดบ่อนสัญญาณสายอากาศ



รูปที่ 3.9  $|S_{11}|$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดบ่อนสัญญาณของสายอากาศสำหรับโพลาริซวงกลม

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่า ตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณที่ทำให้การสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ที่ความถี่ 920-925 MHz สำหรับโพลาริซวงกลมมีหลายจุดด้วยกัน เช่น ตำแหน่ง  $x=23$ ,  $y=25$  มิลลิเมตร ตำแหน่ง  $x=30$ ,  $y=32$  มิลลิเมตร และตำแหน่ง  $x=35$ ,  $y=37$  มิลลิเมตร แต่การจะเลือกใช้จุดบ่อนสัญญาณที่ตำแหน่งใดต้องพิจารณาในขณะที่สายอากาศมีโพลาริซแบบเชิงเส้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

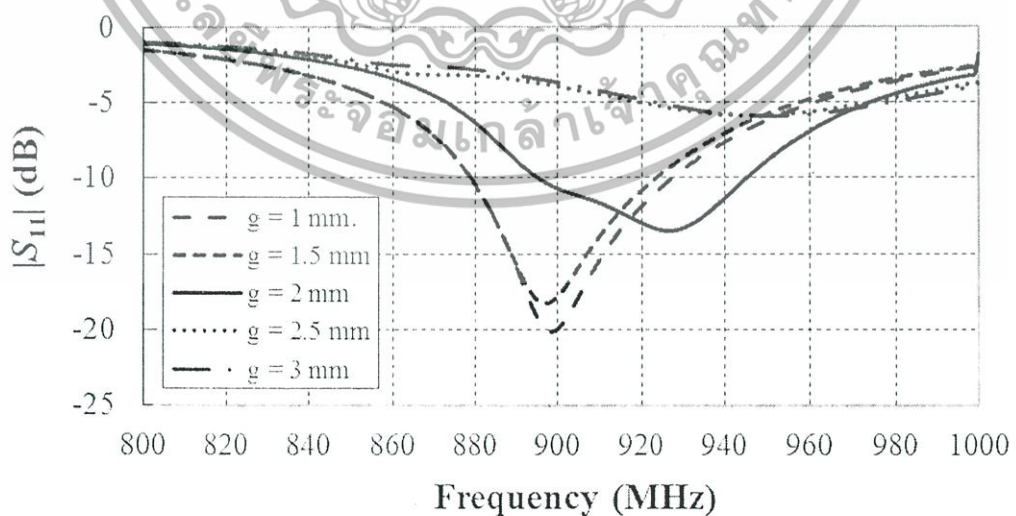


รูปที่ 3.10  $|S_{11}|$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดบ่อนสัญญาณของสายอากาศ สำหรับโพลาริเซชันเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่า ตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณที่ทำให้การสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ที่ความถี่ 920-925 MHz สำหรับโพลาริเซชันเชิงเส้นนั้นมีเพียงจุดเดียวคือ ตำแหน่ง  $x=23$ ,  $y=25$  มิลลิเมตร ดังนั้น เมื่อพิจารณาทั้งโพลาริเซชันวงกลมและเชิงเส้น ตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองโพลาริเซชันคือ ตำแหน่ง  $x=23$ ,  $y=25$  มิลลิเมตร

### 3.3.2.2 การเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องสายอากาศ

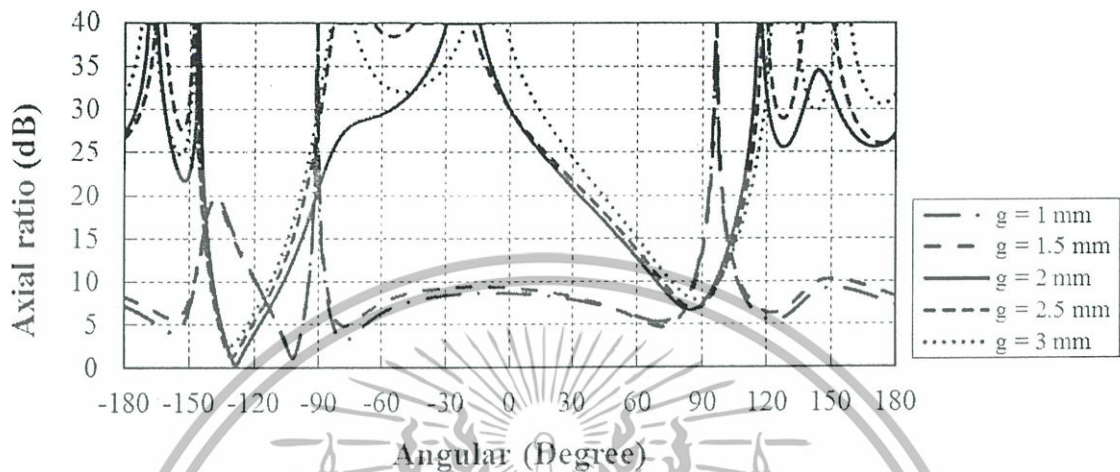
ความกว้างของร่องมีผลกระทบต่อคุณสมบัติสายอากาศในแบบโพลาริเซชันวงกลมน้อยมาก แต่มีผลมากต่อโพลาริเซชันเชิงเส้น เนื่องจากร่องนี้ถูกใช้เป็นตัวแยกมุมของแผ่นแพร่กระจายคลื่นออกและใช้เป็นจุดเชื่อมต่อเพื่อให้สายอากาศเปลี่ยนจากโพลาริเซชันวงกลมเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะกล่าวถึงผลของความกว้างร่องต่อคุณสมบัติสายอากาศในแบบโพลาริเซชันวงกลมเท่านั้น



รูปที่ 3.11  $|S_{11}|$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าความกว้างของร่องที่ทำให้การสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ที่ความถี่ 920-925 MHz สำหรับโพลาริซเซชันเชิงเส้น คือความกว้างขนาด 2 มิลลิเมตร โดยค่าความกว้าง 1.8-2.2 มิลลิเมตร ให้ผลไม่ต่างจากความกว้าง 2 มิลลิเมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความกว้าง 2 มิลลิเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการสร้าง



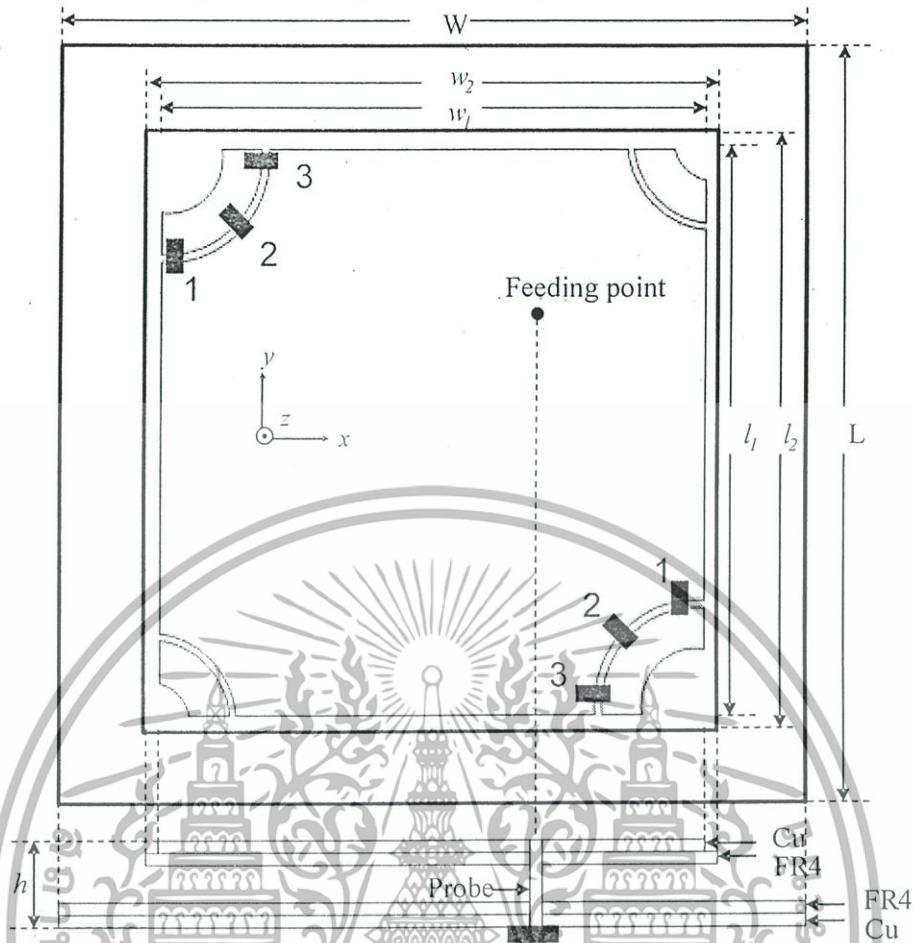
รูปที่ 3.12 อัตราส่วนแกนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่องสายอากาศ

เมื่อพิจารณาในเรื่องของอัตราส่วนแกนของโพลาริซเซชันเชิงเส้น จากรูปที่ 3.12 จะเห็นว่าความกว้างของร่องที่ทำให้การสูญเสียย้อนกลับมีค่าสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติของโพลาริซเซชันเชิงเส้นนั้น มีหลายค่าด้วยกัน เช่น 2 มิลลิเมตร 2.5 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร แต่เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับการสูญเสียย้อนกลับตามรูปที่ 3.11 แล้ว จึงเลือกใช้ความกว้างของร่องขนาด 2 มิลลิเมตรสำหรับงานวิจัยนี้

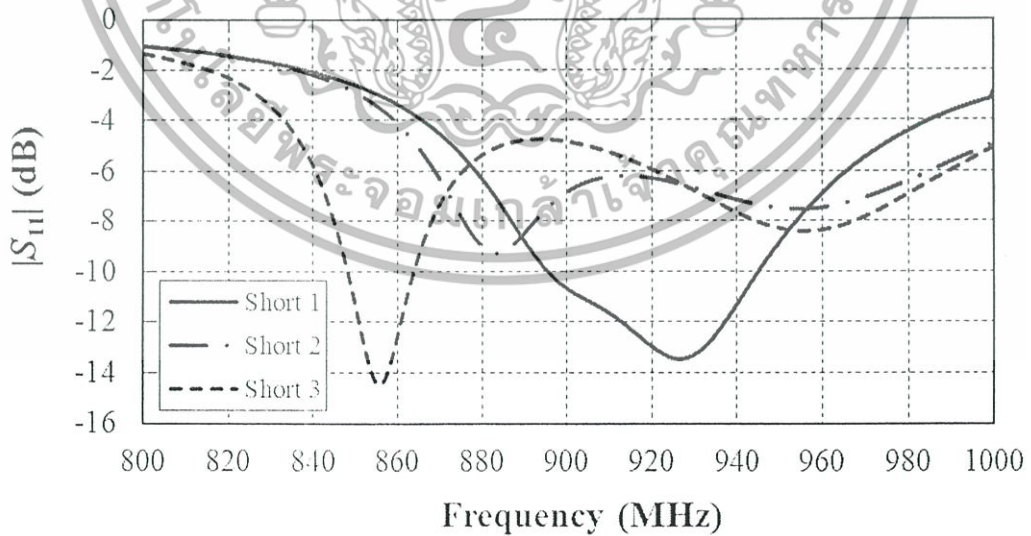
### 3.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดเชื่อมต่อสายอากาศ

จุดเชื่อมต่อนี้หมายถึงจุดที่จะเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพรกระจายคลื่นและมุมเข้าด้วยกัน เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศเบื้องต้นนั้น แผ่นแพรกระจายคลื่นและมุมถูกแยกออกจากกันด้วยร่องขนาด 2 มิลลิเมตรเพื่อให้สายอากาศมีโพลาริซเซชันเชิงเส้น แต่เมื่อต้องการให้สายอากาศมีโพลาริซเซชันแบบเชิงเส้นจำเป็นต้องเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพรกระจายคลื่นและมุมเข้าด้วยกัน โดยได้ทดลองเชื่อมต่อตามตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

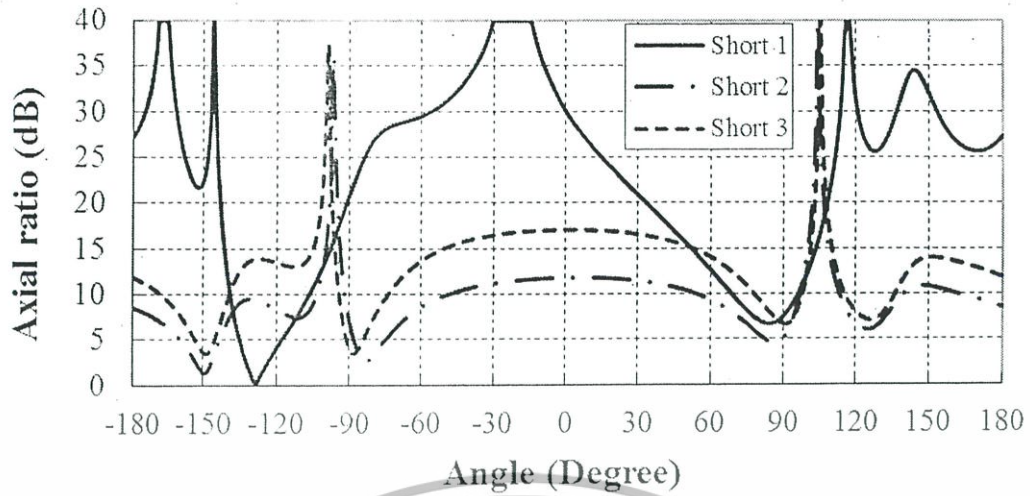


รูปที่ 3.13 จุดเชื่อมต่อตำแหน่งต่างๆเพื่อให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น



รูปที่ 3.14  $|S_{11}|$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดเชื่อมต่อสายอากาศ

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าตำแหน่งเชื่อมต่อที่ทำให้การสูญเสียย้อนกลับดีที่สุดคือ เชื่อมต่อตำแหน่งที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 อัตราส่วนแกนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงจุดเชื่อมต่อสายอากาศ

และจากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าตำแหน่งเชื่อมต่อที่ให้อัตราส่วนแกนดีที่สุดคือ เชื่อมต่อตำแหน่งที่ 1 อีกเช่นกัน

จากการจำลองการทำงานสายอากาศที่ผ่านมา รวมถึงการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่างๆ ทำให้ได้พารามิเตอร์ในการสร้างสายอากาศต้นแบบดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

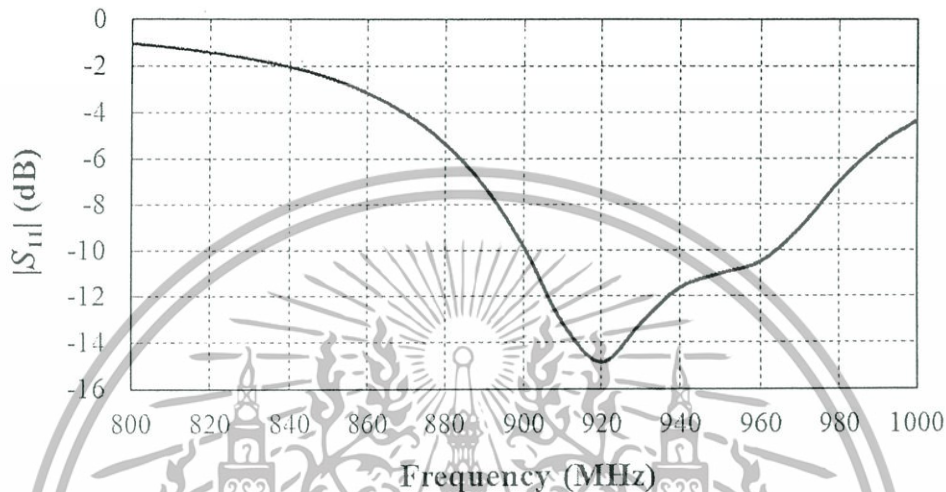
พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz
$L$	$0.677 \lambda$	220 mm
$W$	$0.677 \lambda$	220 mm
$l_1$	$0.455 \lambda$	148 mm
$l_2$	$0.467 \lambda$	152 mm
$w_1$	$0.424 \lambda$	138 mm
$w_2$	$0.437 \lambda$	142 mm
$h$	$0.028 \lambda$	9 mm
$g$	$0.006 \lambda$	2 mm
$r_1$	$0.055 \lambda$	18 mm
$r_2$	$0.083 \lambda$	27 mm
$r_3$	$0.025 \lambda$	8 mm
$r_4$	$0.071 \lambda$	23 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การจำลองการทำงานสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการทำงานสายอากาศสวิตซ์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลมหลังจากที่ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว

#### 3.4.1 การสูญเสียย้อนกลับสายอากาศในแบบโพลาริซ์วงกลม



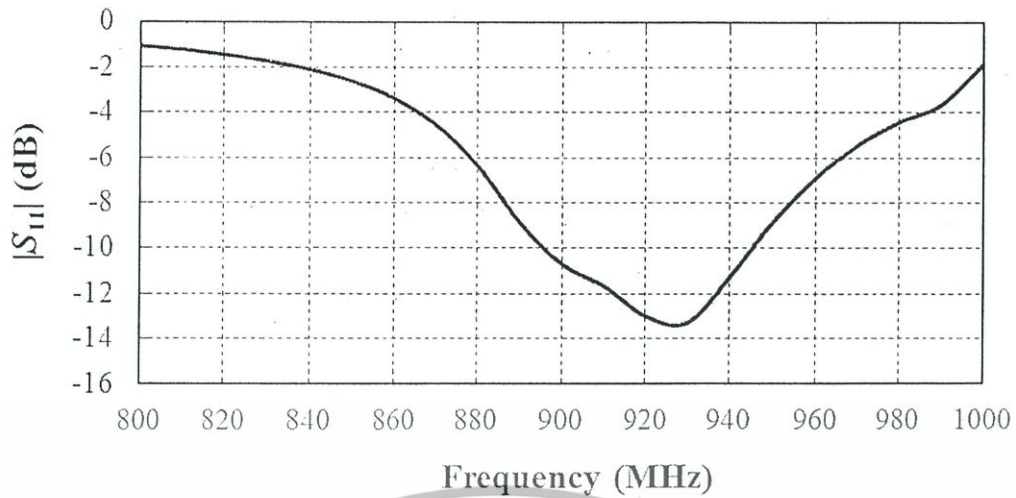
รูปที่ 3.16  $|S_{11}|$  จากการจำลองสำหรับโพลาริซ์วงกลม

จากรูปที่ 3.16 พบว่าผลของการสูญเสียย้อนกลับได้จากการจำลองจะมีช่วงกว้างความถี่ 63 MHz ที่ 901 MHz ถึง 964 MHz ผลระดับของการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่า -15 เดซิเบล ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ความถี่ 920-925 MHz ได้

#### 3.4.2 การสูญเสียย้อนกลับสายอากาศในแบบโพลาริซ์เชิงเส้น

การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองจะมีช่วงกว้างความถี่ 49 MHz ที่ 896 MHz ถึง 945 MHz และผลระดับของการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ -13.4 dB ดังแสดงตามรูปที่ 3.17 สายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ต้องการที่ 920-925 MHz ทั้งโพลาริซ์วงกลมและเชิงเส้น

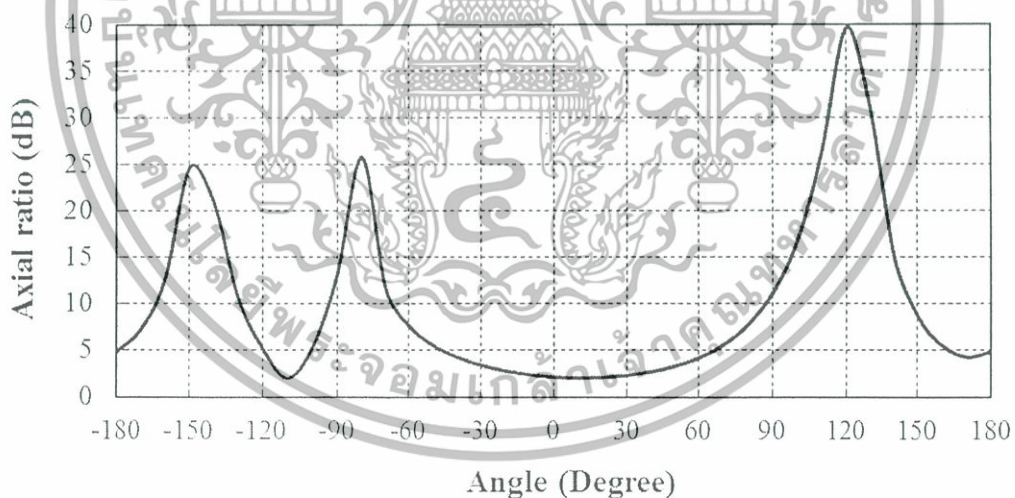
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17  $|S_{11}|$  จากการจำลองสำหรับโพลาริซิงเส้น

### 3.4.3 อัตราส่วนแกนสายอากาศในแบบโพลาริซิงวงกลม

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลของอัตราส่วนแกนสายอากาศแผ่นระนาบที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่เอชเอฟที่ความถี่กลาง 922.5 MHz อัตราส่วนแกนสายอากาศแบบโพลาริซิงวงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 3.18



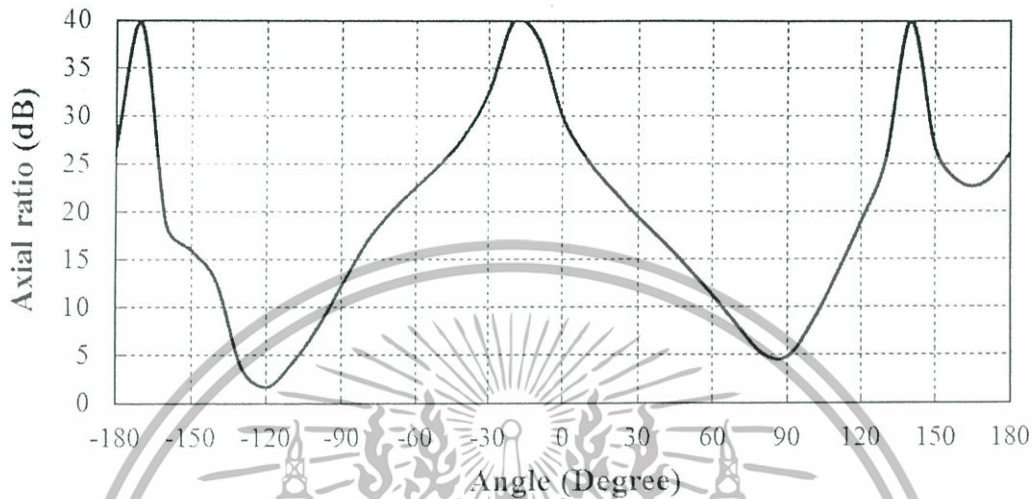
รูปที่ 3.18 อัตราส่วนแกนจากการจำลองสำหรับโพลาริซิงวงกลม

จากรูปที่ 3.18 อัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองสายอากาศที่มุม  $0^\circ$  หรือบริเวณด้านหน้าสายอากาศ พบว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB จากการจำลองมีค่า  $75^\circ$  และที่มุม  $0^\circ$  มีอัตราส่วนแกนจากการเท่ากับ 2.11 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 อัตราส่วนแกนสายอากาศในแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลของอัตราส่วนแกนสายอากาศแผ่นระนาบที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่เอชเอฟที่ความถี่กลาง 922.5 MHz อัตราส่วนแกนสายอากาศแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.19

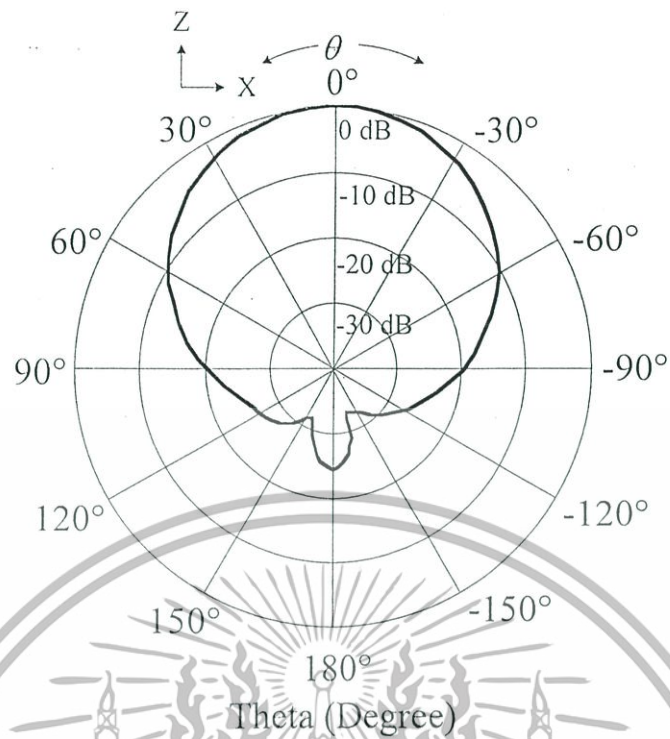


รูปที่ 3.19 อัตราส่วนแกนจากการจำลองสำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น

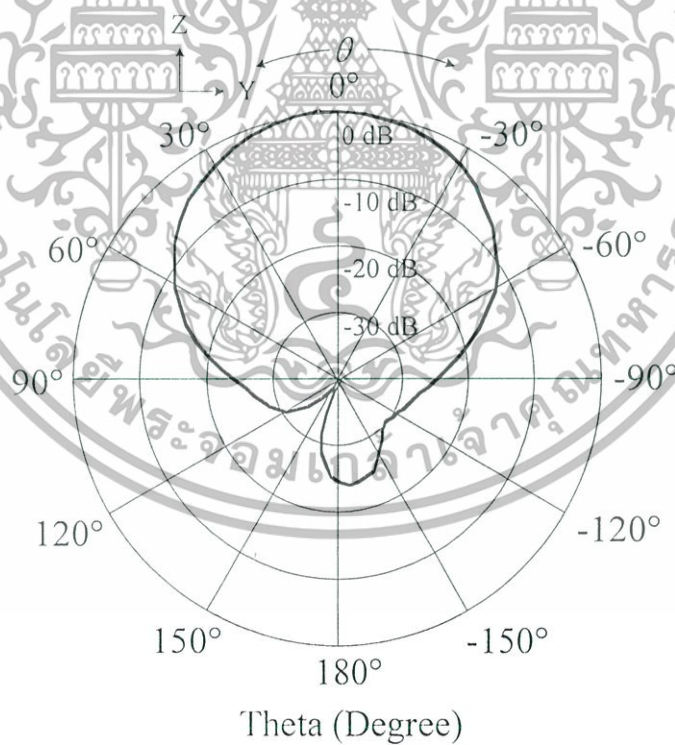
จากรูปที่ 3.19 แสดงอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการ โดยอัตราส่วนแกนสายอากาศที่มุม  $0^\circ$  หรือบริเวณด้านหน้าสายอากาศ พบว่าอัตราส่วนแกนจากการจำลองมีค่า 30 dB

### 3.4.5 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศในแบบโพลาไรซ์วงกลม

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแบบโพลาไรซ์วงกลมที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ xz และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ yz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยแสดงดังรูปที่ 3.20 ผลที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาไรซ์วงกลมในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการจำลองได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ  $68^\circ$  และ  $65^\circ$  ตามลำดับ โดยที่มุม  $0^\circ$  เป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร



(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาริซวงกลม

(ก) ระนาบ xz (ข) ระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 เป็นการแสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ผลจากการจำลองได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  มีค่าเท่ากับ  $67^\circ$  และ  $68^\circ$  ตามลำดับ โดยที่มุม  $0^\circ$  เป็นทิศทางที่ใช้ในการ

จากรูปที่ 3.20 ถึง 3.21 สามารถสรุปค่าความกว้างลำคลื่นสายอากาศได้ดังตารางที่ 3.4

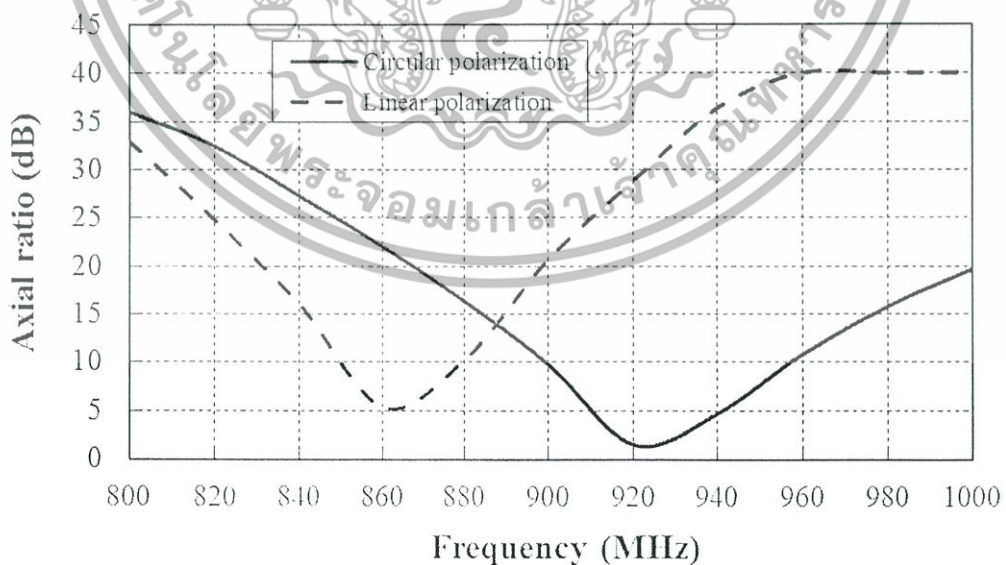
ตารางที่ 3.4 สรุปความกว้างลำคลื่นสายอากาศ

โพลาไรซ์	ผลจาก	ความกว้างลำคลื่น (องศา)	
		ระนาบ $xz$	ระนาบ $yz$
วงกลม	การจำลอง	68	65
เชิงเส้น	การจำลอง	67	68

จากตารางที่ 3.4 ความกว้างลำคลื่นสายอากาศในระนาบ  $xz$  มีค่า 68 องศา สำหรับโพลาไรซ์วงกลม และ 67 องศาสำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น ส่วนระนาบ  $yz$  ความกว้างลำคลื่นสายอากาศมีค่า 65 องศา สำหรับโพลาไรซ์วงกลม และ 68 องศาสำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น

3.4.7 อัตราส่วนแกนต่อความถี่สายอากาศสวิตช์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม

หัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการจำลองอัตราส่วนแกนสายอากาศระหว่างโพลาไรซ์วงกลมและโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 800-1000 MHz

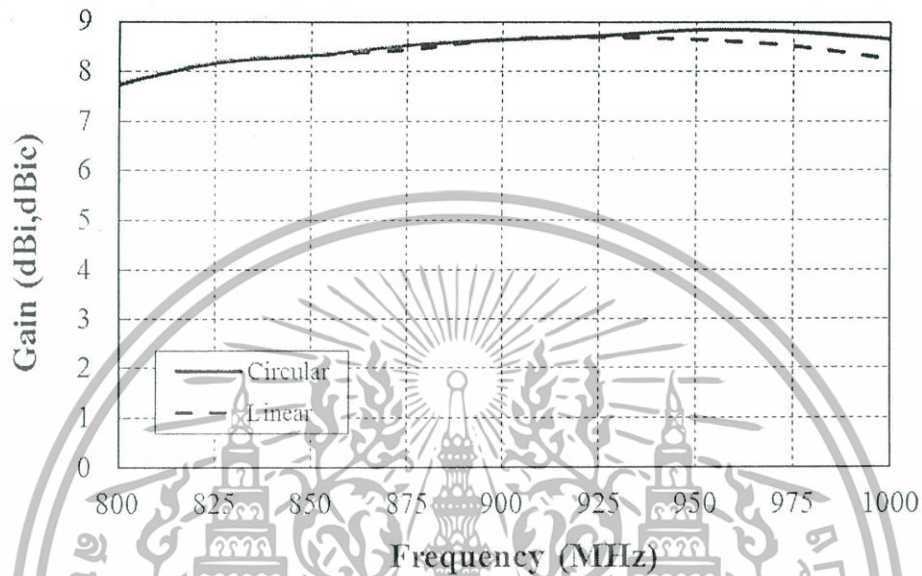


รูปที่ 3.22 อัตราส่วนแกนสายอากาศทั้งสองโพลาไรซ์จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.8 อัตราขยายสายอากาศสวิตช์โพลาริซ์เชิงเส้น/วงกลม

หัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศทั้งในแบบโพลาริซ์วงกลมและโพลาริซ์เชิงเส้น โดยเป็นการแสดงอัตราขยายที่ความถี่ 800-1000 MHz แสดงดังรูปที่ 3.23 โดยที่ความถี่ใช้งาน 920-925 MHz สายอากาศมีอัตราขยายมากกว่า 8.69 เดซิเบลสำหรับโพลาริซ์วงกลมและมากกว่า 8.67 เดซิเบลสำหรับโพลาริซ์เชิงเส้น



รูปที่ 3.23 อัตราขยายสายอากาศจากการจำลอง

ตารางที่ 3.5 สรุปสมรรถนะสายอากาศต้นแบบ

โพลาริซ์	สมรรถนะสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการทดสอบ (ความถี่ 922.5 MHz)
วงกลม	การสูญเสียย้อนกลับ	-14 dB
	อัตราขยาย	8.69 dBic
	อัตราส่วนแกน	2.11 dB
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	68°
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	65°
เชิงเส้น	การสูญเสียย้อนกลับ	-13 dB
	อัตราขยาย	8.67 dBi
	อัตราส่วนแกน	30 dBi
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	67°
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	68°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุป

ผลที่ได้จากการจำลองพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแผ่นระนาบ พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีค่าความกว้างลำคลื่นในระนาบมุมกวาดเท่ากับ  $68^{\circ}$  สำหรับโพลาริซวงกลม และ  $67^{\circ}$  สำหรับโพลาริซเชิงเส้น ทั้งสองโพลาริซมีอัตราการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถรับการใช้งานในย่านความถี่ยูเอชเอฟของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ มีอัตราการขยายที่  $8.69$  dBic สำหรับโพลาริซวงกลม และ  $8.67$  dBi สำหรับโพลาริซเชิงเส้น ผลที่ได้จากการการจำลองนั้นมีแนวโน้มของการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ใช้งานที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟ ในส่วนของอัตราส่วนแกนที่ได้พบว่า สำหรับโพลาริซวงกลมมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า  $3$  dB ที่มุมใช้งาน และสำหรับโพลาริซเชิงเส้นมีอัตราส่วนแกนที่มุม  $0^{\circ}$  เท่ากับ  $30$  dB และเมื่อทำการพิจารณาผลของค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งโพลาริซวงกลมและเชิงเส้นจากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถภาพสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟทั้งโพลาริซวงกลมและเชิงเส้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบสายอากาศ

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟทั้งโพลาร์ไรซ์วงกลมและเชิงเส้น ซึ่งจะพิจารณาถึงผลการสูญเสียย้อนกลับ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ในส่วนรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

#### 4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟแบบแผ่นระนาบ สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้งานที่ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz ซึ่งเป็นมาตรฐานประเทศไทยของระบบบ่งชี้ด้วยทางคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ วัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุแผ่นปริ้นท์หน้าเดียว เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ชั้นผิวตัวนำเป็นชั้นทองแดง และมีฐานรองเป็นวัสดุ FR4 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ FR4 มีค่า 4.3 ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองผลในบทที่ 3



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz
$L$	$0.677 \lambda$	220 mm
$W$	$0.677 \lambda$	220 mm
$l_1$	$0.455 \lambda$	148 mm
$l_2$	$0.467 \lambda$	152 mm
$w_1$	$0.424 \lambda$	138 mm
$w_2$	$0.437 \lambda$	142 mm
$h$	$0.028 \lambda$	9 mm
$g$	$0.006 \lambda$	2 mm
$r_1$	$0.055 \lambda$	18 mm
$r_2$	$0.083 \lambda$	27 mm
$r_3$	$0.025 \lambda$	8 mm
$r_4$	$0.071 \lambda$	23 mm

#### 4.3 การทดสอบสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมาเพื่อที่จะนำสายอากาศต้นแบบนี้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น การสูญเสียย้อนกลับ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบสายอากาศสวิตซ์โฟลราไรซ์ที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C
2. สายนำสัญญาณ
3. สายอากาศไดโพล
4. สายอากาศแบบเกลียว

การทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบเพื่อหาการสูญเสียย้อนกลับ โดยได้นำสายอากาศที่จะทำการทดสอบผลมาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ในการหาการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

การทดสอบเพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบ ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นจะใช้สายอากาศแผ่นระนาบทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบไดโพลมาตรฐานทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำภายในสนามระยะไกล เพราะฉะนั้นระยะห่าง ( $d$ ) ระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับต้องเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข  $d \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$  โดยที่  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ  $\lambda_0$  คือความยาวคลื่น

ในอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1 เมตร

การทดสอบอัตราส่วนแแกนและการทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นระนาบ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ จำนวนสองตัว ตัวแรกเป็นแบบเกลียวซ้าย ตัวที่สองเป็นแบบเกลียวขวาและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยทำการทดสอบทีละตัว และใช้สายอากาศแบบแผ่นระนาบทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1 เมตร ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนแแกนได้จากสมการที่ 4.1

$$\text{Axial Ratio} = 20 \log \left[ \frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่

$|E_{co}|$  คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$  คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ตรงกันข้ามกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

#### 4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

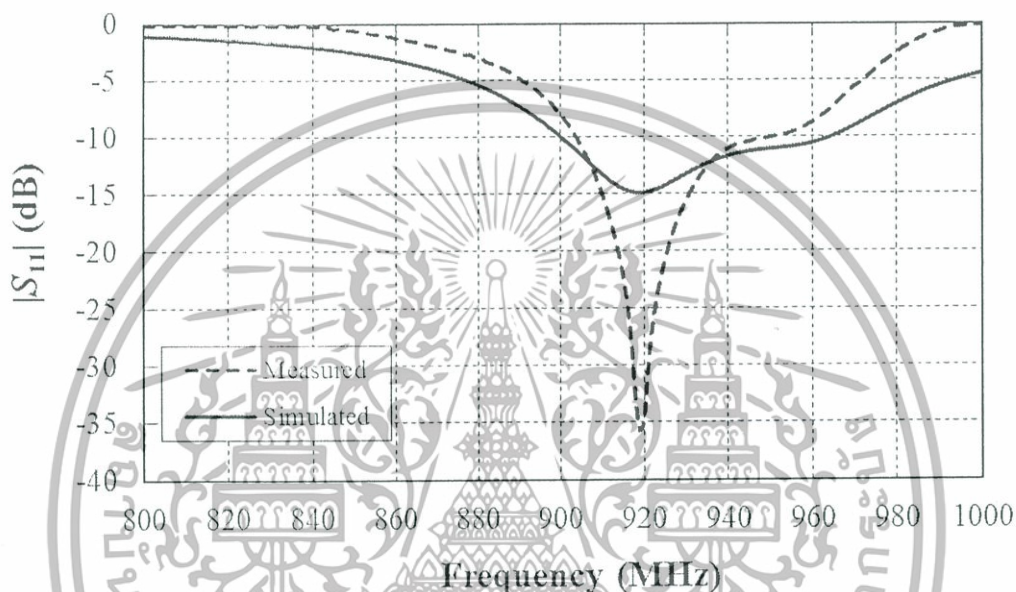
วัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศในงานวิจัยนี้คือการสร้างสายอากาศที่สามารถสวิตช์โพลาไรซ์ได้ทั้งแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น และโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นในการทดสอบสายอากาศจะทำการทดสอบสายอากาศในโพลาไรซ์วงกลมก่อน จากนั้นทำการสวิตช์สายอากาศให้เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นโดยการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและมุมเข้าด้วยกัน (ปกติแยกจากกันด้วยร่องขนาด 2 มิลลิเมตร) โดยใช้ PIN ไดโอดเป็นตัวสวิตช์ระหว่างโพลาไรซ์เชิงเส้น และโพลาไรซ์วงกลม แนวคิดคือ เมื่อไดโอดอยู่ในสถานะ OFF รอยต่อ PN อยู่ในสถานะเปิดวงจร ความต้านทานที่รอยต่อ PN จะมีค่าสูง กระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อ PN ของไดโอด เปรียบเสมือนสวิตช์ที่เปิดวงจร ส่วนในสถานะที่ไดโอดอยู่ในสถานะ ON รอยต่อ PN อยู่ในสถานะปิดวงจร ความต้านทานที่รอยต่อ PN จะมีค่าต่ำใกล้ 0 โอห์ม กระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านรอยต่อ PN ของไดโอดได้ เปรียบเสมือนสวิตช์ที่ปิดวงจร และในการออกแบบสายอากาศต้นแบบได้ออกแบบให้สายอากาศมีโพลาไรซ์เริ่มต้นเป็นโพลาไรซ์วงกลม และจะเปลี่ยนเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นกับมุมเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.6

การทดสอบสายอากาศเบื้องต้นจะยังไม่ใช้ PIN ไดโอดเป็นสวิตช์เพื่อสลับโพลาไรซ์ของสายอากาศ แต่จะใช้ลวดตัวนำเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและมุมเข้าด้วยกันเพื่อดูผลการทดสอบเบื้องต้น โดยขณะที่แผ่นแพร่กระจายคลื่นไม่เชื่อมต่อกับมุม สายอากาศจะเป็นโพลาไรซ์วงกลม และเมื่อแผ่นแพร่กระจายคลื่นเชื่อมต่อกับมุมด้วยลวดตัวนำ สายอากาศจะเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น จากนั้นเมื่อผลการทดสอบด้วยลวดตัวนำเป็นที่น่าพอใจ จะทำการทดสอบสายอากาศโดยใช้ PIN ไดโอดทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์โพลาไรซ์ต่อไป

การทดสอบสายอากาศจะนำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบสมรรถนะต่าง ๆ ของสายอากาศ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้ของค่าสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแกน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

#### 4.4.1 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของการสูญเสียย้อนกลับระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2

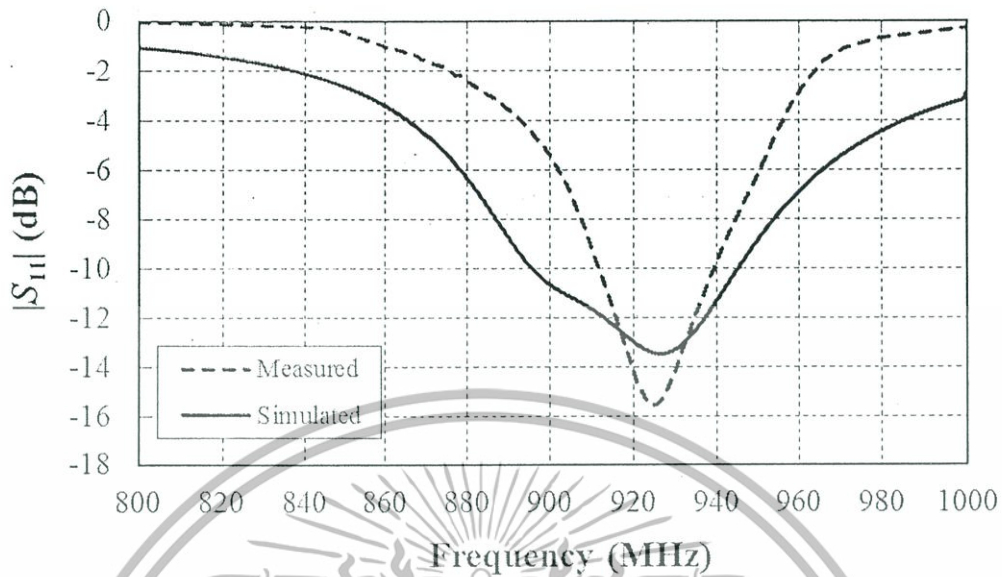


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับโพลาริซวงกลม

จากรูปที่ 4.2 พบว่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่ก็มีคลาดเคลื่อน โดยที่การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างความถี่ 45 MHz ที่ 904 MHz ถึง 949 MHz ในขณะที่การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองจะมีช่วงกว้างความถี่ 63 MHz ที่ 901 MHz ถึง 964 MHz ซึ่งจากการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จะมีช่วงความถี่ที่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่ได้ดีกว่าการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล รวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นระนาบอยู่ในช่วงย่านความถี่ใช้งานมีค่าดีกว่า  $-10$  dB ตลอดทั้งย่าน และที่ความถี่กลางผลของการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ  $-24$  dB ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ต้องการ

จากนั้นทำการเชื่อมต่อแผ่นแพร่กระจายคลื่นกับมุมด้วยลวดตัวนำ เพื่อให้สายอากาศเป็นโพลาริซเชิงเส้น และทำการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

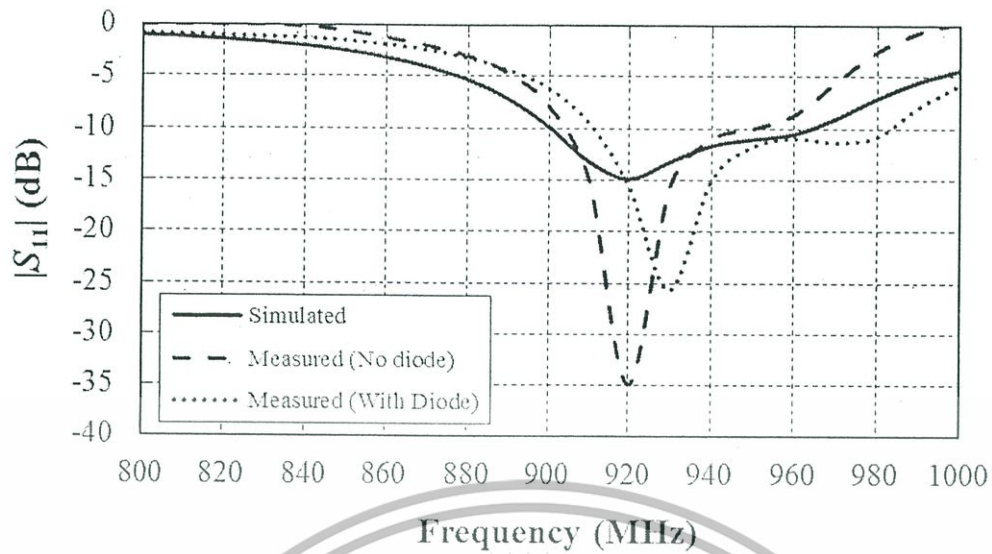


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสำหรับโพลาริซิงเส้น

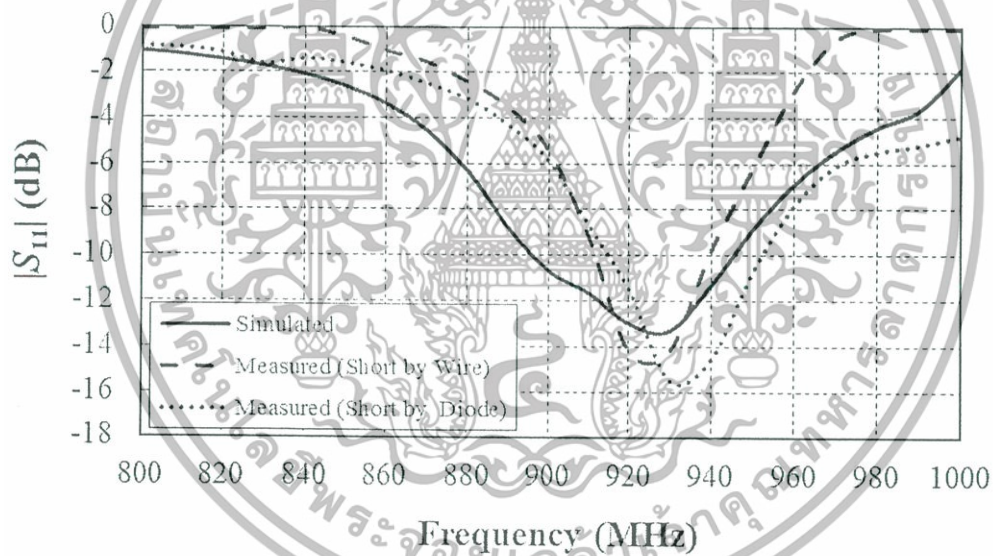
จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลของการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยที่การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างความถี่ 27 MHz ที่ 912 MHz ถึง 939 MHz ในขณะที่การสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองจะมีช่วงกว้างความถี่ 49 MHz ที่ 896 MHz ถึง 945 MHz ซึ่งจากการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จะมีช่วงความถี่ที่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่ได้ดีกว่าการจำลอง สงสเหตุเป็นเช่นเดียวกับผลของโพลาริซิงกลมที่ได้กล่าวไปแล้ว การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นระนาบอยู่ในช่วงย่านความถี่ใช้งานมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดทั้งย่าน และที่ความถี่กลางผลของการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -15 dB สายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ต้องการทั้งโพลาริซิงกลมและเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 การใช้ลวดตัวนำเชื่อมต่อแผ่นแพร์กระจายคลื่นกับมุมเข้าด้วยกันสามารถทำให้สายอากาศเปลี่ยนเป็นโพลาริซิงเส้นได้ และครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ ในขั้นตอนต่อไปเป็นการใช้ PIN ไดโอดทำหน้าที่สวิตช์แทนลวดตัวนำ โดยการเชื่อมต่อ PIN ไดโอด ลงบนสายอากาศตามรูปที่ 4.4 เมื่อต้องการให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาริซิงกลมจะไม่มีการป้อนไปอัสให้กับไดโอด จะมีการป้อนไปอัสให้ PIN ไดโอดในกรณีที่ต้องการให้สายอากาศเป็นโพลาริซิงเส้นเท่านั้น ผลการทดสอบสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อ PIN ไดโอดบนสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบมีไดโอดและไม่มีไดโอดและการจำลองสำหรับโพลาไรซ์วงกลม

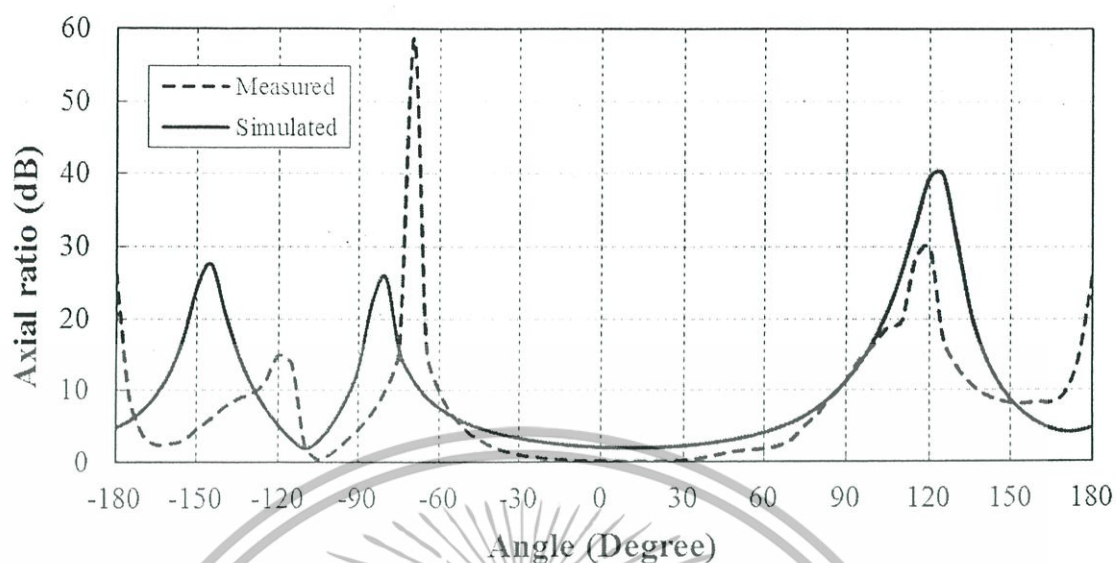


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบทั้งแบบมีไดโอดและไม่มีไดโอดและการจำลองสำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น

#### 4.4.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นระนาบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่ยูเอชเอฟที่ความถี่กลาง ผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบโพลาไรซ์วงกลมแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

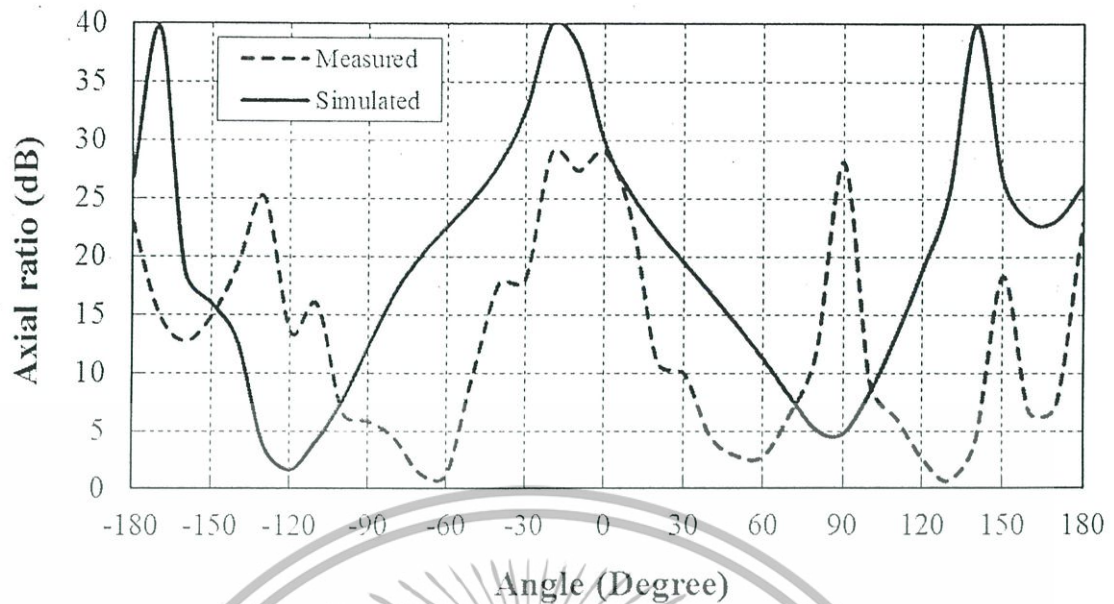
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง  
สำหรับโพลาริซิงกลม

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มเดียวกันระหว่างผลการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง พบว่าอัตราส่วนแกนที่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอื่นเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น สายอากาศแบบเกลียวที่มีโพลาริซิงเป็นแบบวงกลมที่ใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งอาจจะมีโพลาริซิงเป็นแบบวงกลมที่ไม่ดีพอ การสูญเสียจากวัสดุที่นำมาทำสายอากาศต้นแบบที่ใช้ลูมิเนียมเป็นตัวนำ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม  $0^\circ$  หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ พบว่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ  $105^\circ$  ส่วนจากการจำลองมีค่า  $75^\circ$  และที่มุม  $0^\circ$  มีอัตราส่วนแกนจากการทดสอบเท่ากับ 0.22 dB ส่วนผลที่ได้จากการจำลองที่มุม  $0^\circ$  มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 2.11 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

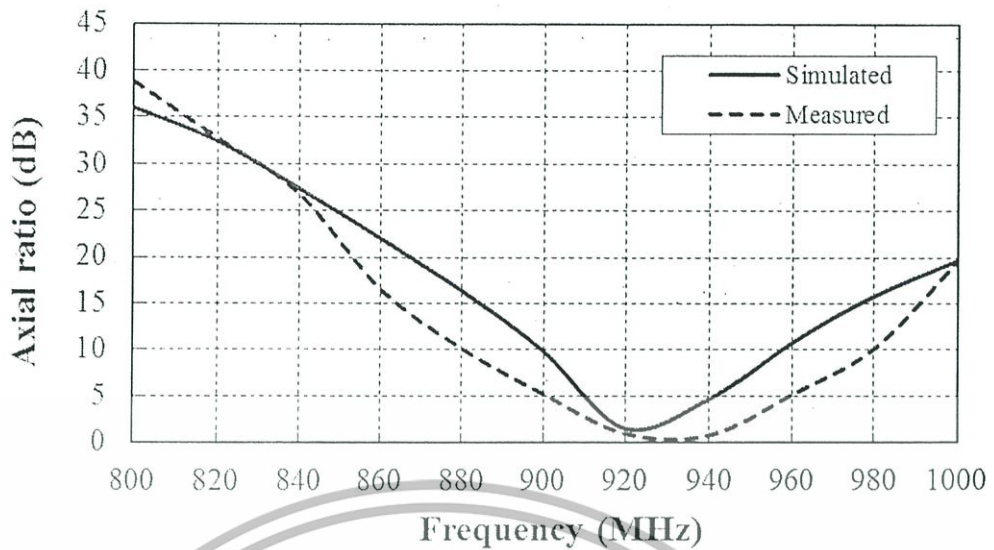


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

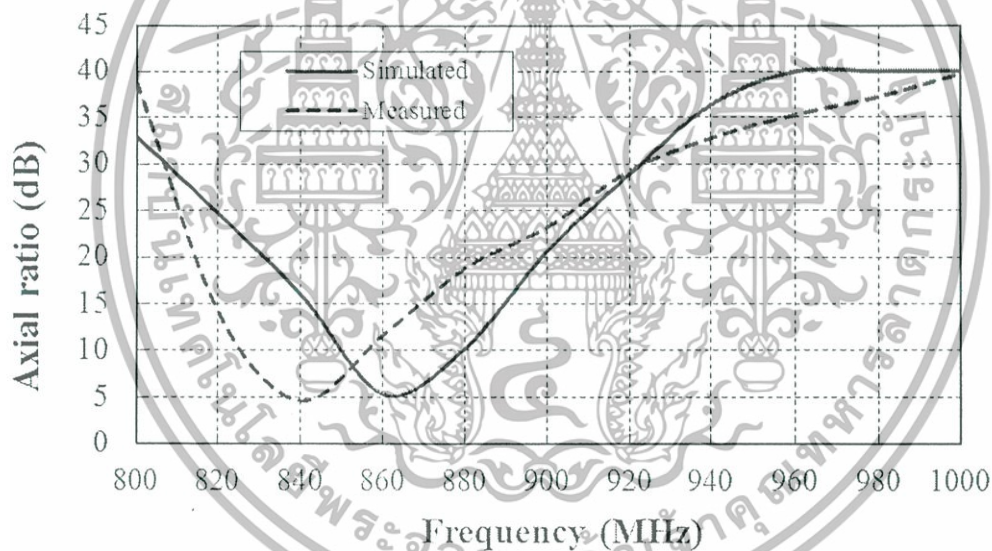
สำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มเดียวกันระหว่างผลการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง พบว่าอัตราส่วนแกนที่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น การสูญเสียจากวัสดุที่นำมาทำสายอากาศต้นแบบที่ใช้อลูมิเนียมเป็นตัวนำ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม  $0^\circ$  หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ พบว่าอัตราส่วนแกนจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 28.95 dB ส่วนจากการจำลองมีค่า 30 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ต่างๆที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง สำหรับโพลาริซวงกลม

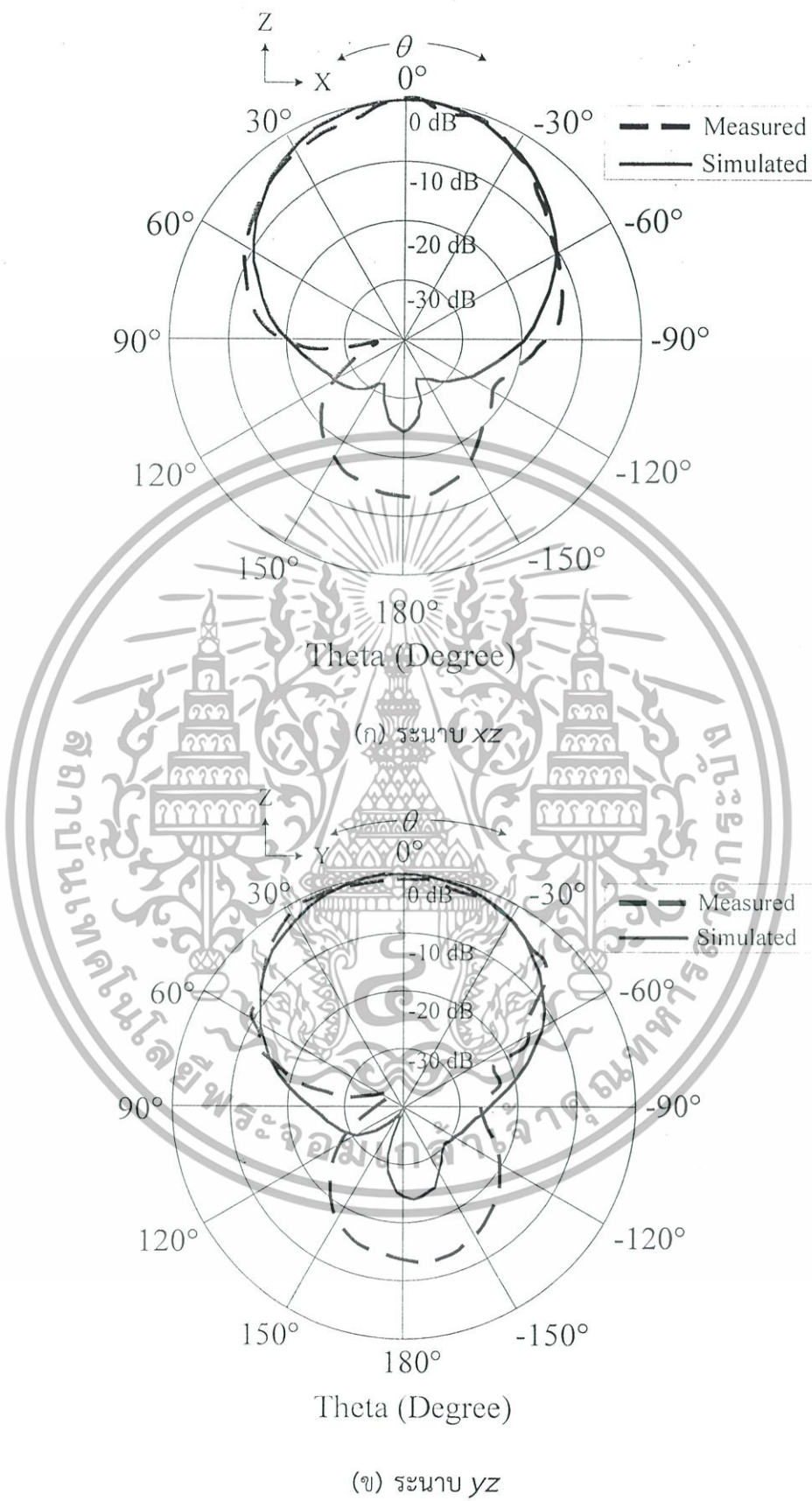


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ต่างๆที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง สำหรับโพลาริซเชิงเส้น

#### 4.4.3 การทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ใช้งาน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะมีผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ  $xz$  และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ  $yz$  ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยรูปที่ 4.6 จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแบบโพลาริซวงกลม และรูปที่ 4.7 จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแบบโพลาริซเชิงเส้น

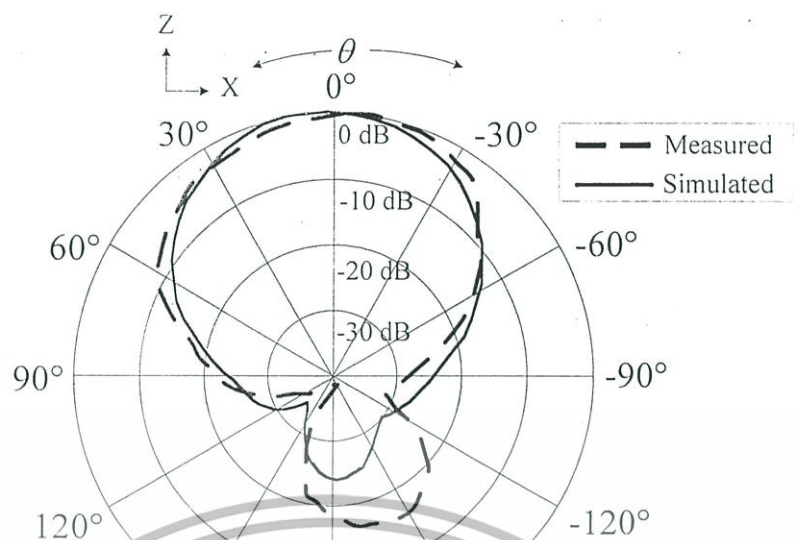
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



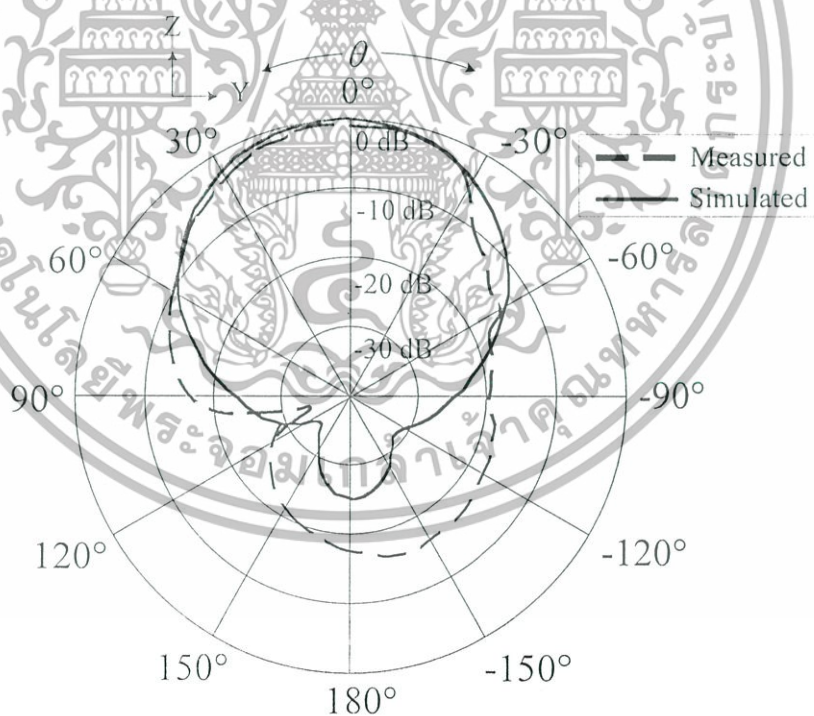
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการ

จำลองสำหรับโพลาริซวงกลม (ก) ระนาบ xz (ข) ระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาเบไซบะประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

สำหรับโพลาริซเซชันเชิงเส้น (ก) ระนาบ xz, (ข) ระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาริซวงกลมในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการทดสอบได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 60° และ 85° ตามลำดับ โดยที่มุม 0° เป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร และมี

จากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองสำหรับโพลาริซเชิงเส้นในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการทดสอบได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 65° และ 75° ตามลำดับ โดยที่มุม 0° เป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร และมี

จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและการติดตั้งสายอากาศในการทดสอบ

#### 4.4.4 การทดสอบอัตรายายของสายอากาศ

หัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการทดสอบอัตรายายของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองทั้งในแบบโพลาริซวงกลมและเชิงเส้น โดยเป็นการแสดงอัตรายายที่มุม 0° ที่ความถี่ใช้งาน โดยเป็นการนำผลจากการทดสอบมาแทนค่าในสมการที่ 4.2 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.2

$$\text{การคำนวณหาอัตรายาย} \quad \frac{P_r}{P_t} = 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 + G_t + G_r \quad (4.2)$$

โดยที่

$\frac{P_r}{P_t}$  คือค่าพลังงานที่สายอากาศเครื่องรับได้รับจากสายอากาศเครื่องส่ง

$\lambda$  คือค่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz

$r$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศเครื่องส่งกับสายอากาศเครื่องรับ

$G_t$  คืออัตรายายของสายอากาศเครื่องส่ง

$G_r$  คืออัตรายายของสายอากาศเครื่องรับ

ตารางที่ 4.2 อัตรายายของสายอากาศ

โพลาริซ	ผลจาก	ความกว้างลำคลื่น (องศา)		อัตรายาย (dBic, dBi)
		ระนาบ xz	ระนาบ yz	
วงกลม	การจำลอง	68	65	8.69
	การทดสอบ	60	85	8.8
เชิงเส้น	การจำลอง	67	68	8.67
	การทดสอบ	65	75	7.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 4.3 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

โพลาริซซ์	สมรรถนะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการทดสอบ (ความถี่ 922.5 MHz)
วงกลม	การสูญเสียย้อนกลับ	-24 dB
	อัตราขยาย	8.8 dBic
	อัตราส่วนแกน	0.22 dB
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	60°
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	85°
เชิงเส้น	การสูญเสียย้อนกลับ	-15 dB
	อัตราขยาย	7.02 dBi
	อัตราส่วนแกน	28.95 dB
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	65°
	ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	75°

### 4.5 สรุป

ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบ พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีค่าความกว้างลำคลื่นในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดเท่ากับ 60° สำหรับโพลาริซซ์วงกลม และ 65° สำหรับโพลาริซซ์เชิงเส้น ทั้งสองโพลาริซซ์มีอัตราการสูญเสียย้อนกลับที่สามารถรับการใช้งานในย่านความถี่ยูเอชเอฟของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ มีอัตราขยายที่ 8.8 dBic สำหรับโพลาริซซ์วงกลม และ 7.02 dBi สำหรับโพลาริซซ์เชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองนั้นมีแนวโน้มของการเรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ใช้งานที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟ แต่ผลที่ได้จากการทดสอบมีช่วงกว้างความถี่มากกว่าผลที่ได้จากการจำลองอาจจะมาจากขนาดของสายอากาศตามที่ได้จำลองผลเมื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อน เมื่อทำการพิจารณาผลของอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับผลการจำลอง ในส่วนของอัตราส่วนแกนที่ได้พบว่ามีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ที่มีมูใช้งาน แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองเนื่องมาจากหลายสาเหตุคือ สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งมีการโพลาริซซ์แบบวงกลมที่ไม่ดีพอ ขนาดของสายอากาศที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลอง วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวนำที่ไม่ดีพอ เป็นต้น และเมื่อทำการพิจารณาผลของค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง จากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถภาพของสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การทดสอบประยุกต์ใช้งานและการประเมินสมรรถนะ

### 5.1 กล่าวนำ

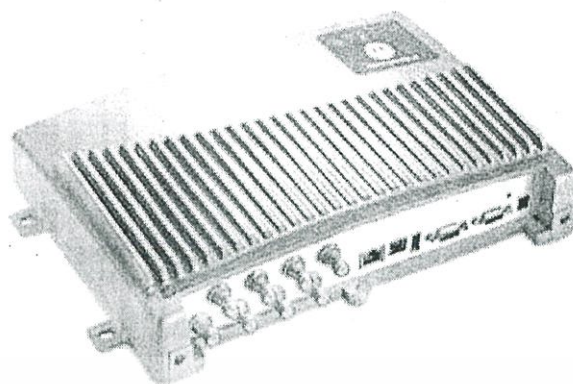
จากในบทที่ 4 ได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบ และทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟแบบแผ่น ระบายที่สามารถกระจายคลื่นได้ทั้งแบบโพลาริซวงกลมและเชิงเส้นเพื่อหาค่าสมรรถนะของสายอากาศมาแล้ว ในบทนี้จะนำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุความถี่เอชเอฟ โดยใช้ใช้งานร่วมกับแท็ก เพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยได้ทำการทดสอบหาระยะที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ซึ่งแท็กที่ใช้ในการทดสอบจะมีด้วยกัน 2 รูปแบบพร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของแท็กดังกล่าว โดยการทดสอบประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

### 5.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้นและทดลองในสภาพการใช้งานจริง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ ของบริษัท Motorola รุ่น XR480 [17] จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.1
2. แท็กชนิดไดโพลแบบขดลวด ของบริษัท Allen รุ่น ALN-9640 [18] จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.2
3. แท็กชนิดไดโพลแบบขดลวด ของบริษัท UPM รุ่น Short dipole [19] จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.3
4. สายอากาศสวิตซ์โพลาริซเชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ แสดงดังรูปที่ 5.4
5. คอมพิวเตอร์
6. สายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 เครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ[17]

จากรูปที่ 5.1 แสดงเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ ของบริษัท Motorola รุ่น XR480 มี 4 แชนแนล มีกำลังส่งสูงสุด 30 dBm รองรับมาตรฐาน EPC Gen 2



รูปที่ 5.2 แท้กชนิดไดโพลแบบขด Alien รุ่น ALN-9640[18]

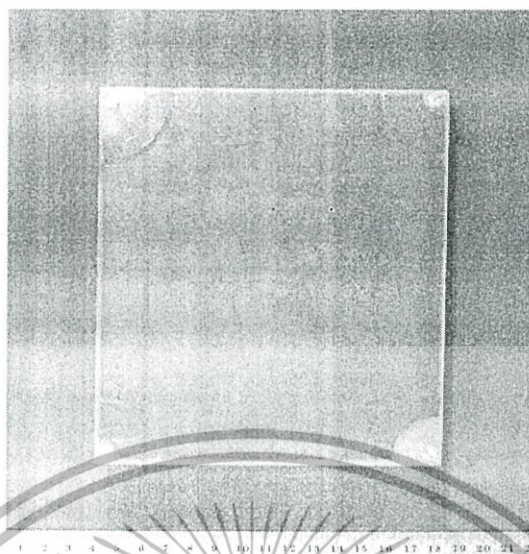
จากรูปที่ 5.2 แสดงแท้กชนิดไดโพลแบบขด ของบริษัท Alien รุ่น ALN-9640 โดยการนำแท้กชนิดไดโพลแบบขดมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งรูปแบบแท้กดังกล่าวรองรับตามมาตรฐานของ EPC Global Class 1 Gen 2 ที่มีการโพลไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 860 MHz ถึง 960 MHz ขนาดความกว้างและความยาวของแท้กมีค่าเท่ากับ 94.8 mm และ 8.1 mm ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 แท้กชนิดไดโพลแบบขด UPM รุ่น ShortDipole[19]

จากรูปที่ 5.3 แสดงแท้กชนิดไดโพลแบบขด ของบริษัท UPM รุ่น Short dipole โดยการนำแท้กชนิดไดโพลแบบขดมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งรูปแบบแท้กดังกล่าวรองรับตามมาตรฐานของ EPC global Class 1 Gen 2 ที่มีการโพลไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 860 MHz ถึง 960 MHz ขนาดความกว้างและยาวของแท้กเท่ากับ 93 mm และ 11 mm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



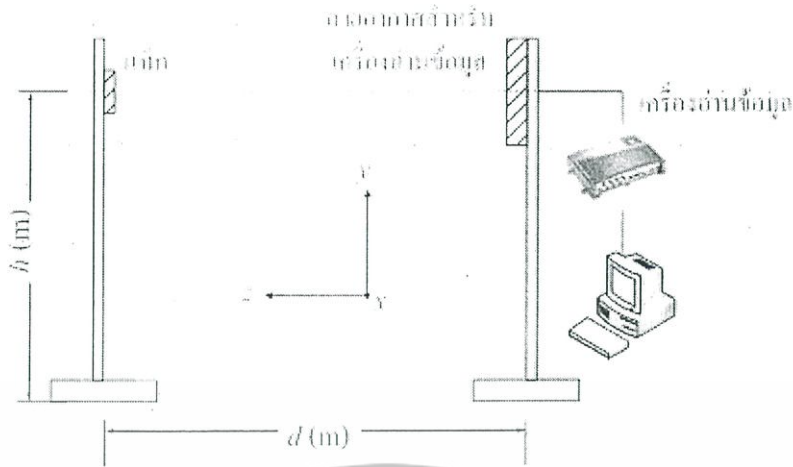
รูปที่ 5.4 สายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ

จากรูปที่ 5.4 สายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 904 MHz ถึง 949 MHz สำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลม และความถี่ 912 MHz ถึง 939 MHz สำหรับการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และอัตราการขยายที่ความถี่ใช้งานที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 8.8 dBic สำหรับโพลาไรซ์วงกลม และ 7.02 dBi สำหรับโพลาไรซ์เชิงเส้น

### 5.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การทดสอบสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟโดยใช้งานร่วมกับแท็กในย่านความถี่ยูเอชเอฟ สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนี้จะทำการทดสอบสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท็ก ในส่วนรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก



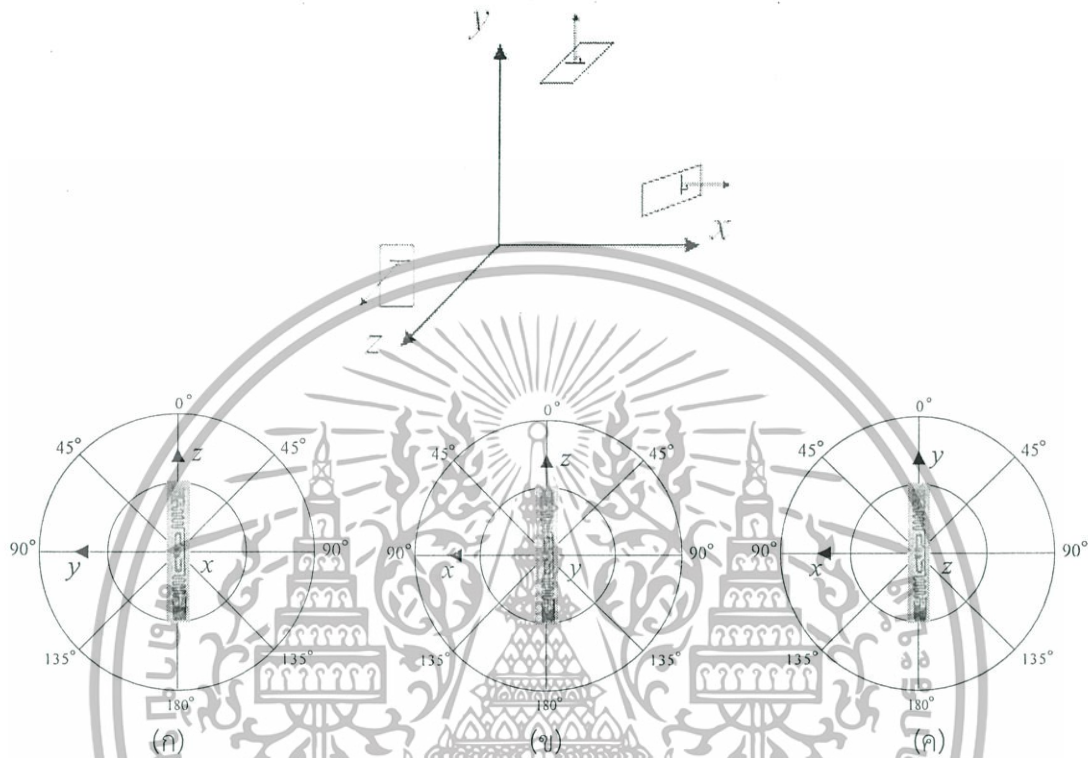
รูปที่ 5.6 การกำหนดค่ากำลังส่งของเครื่องอ่านข้อมูล

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก

พารามิเตอร์	ขนาด
$h$	1 m
$d$	1 m – 5 m
Power	500 mW

จากรูปที่ 5.5 แสดงการติดตั้งการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟใช้งานร่วมกับแท็ก โดยสายอากาศทดสอบและแท็กมีระยะห่าง ( $d$ ) เริ่มต้นเท่ากับ 1-5 เมตร และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศทดสอบกับแท็กให้เท่ากันที่ความสูงเท่ากับ 1 เมตร การทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ จะทำการหาระยะทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กด้วยวิธีการเคลื่อนตำแหน่งของแท็กออกห่างจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจนกระทั่งเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็กแสดงดังรูปที่ 5.7 และได้ทำการทดสอบสายอากาศทั้งโพลาไรซ์วงกลมและเชิงเส้น

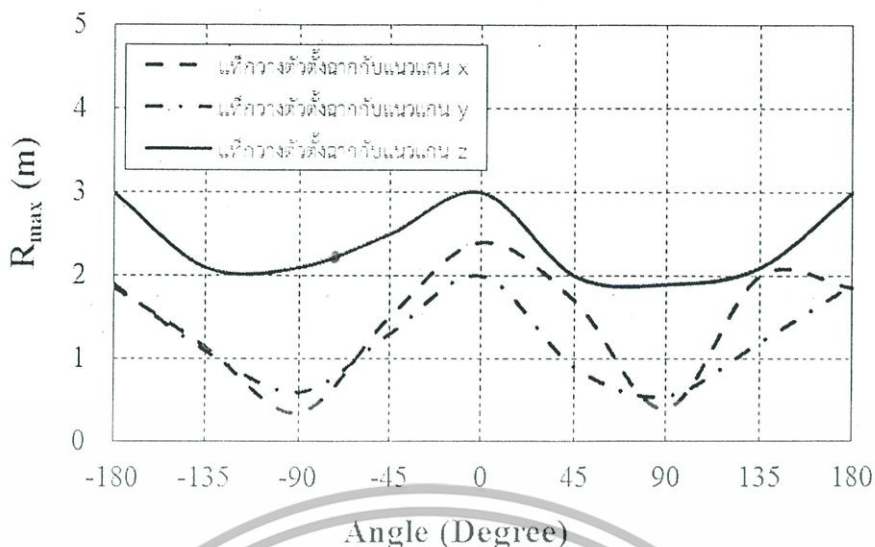


รูปที่ 5.7 การวางตัวของแท็กแต่ละแนวแกน (ก) แนวแกน x (ข) แนวแกน y (ค) แนวแกน z

### 5.3.1 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลม

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ โดยการทดสอบนี้ได้ทำการปรับให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาไรซ์วงกลม ส่วนแท็กที่ใช้มี 2 แบบคือ Alien tag และ UPM tag ที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กเป็นมุมครั้งละ 45 องศาในแนวแกน z เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุมเมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับสายอากาศกับแนวแกน x y และ z ดังรูปที่ 5.7 ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.8 และ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



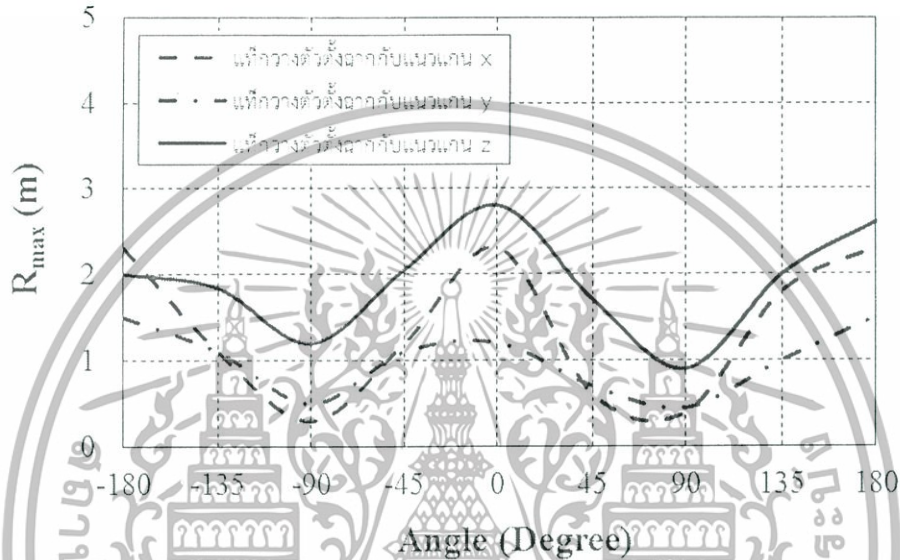
รูปที่ 5.8 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมกับ Alien tag

จากรูปที่ 5.8 ผลการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวางในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 2 m และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่ยุม  $0^{\circ}$  และมุม  $180^{\circ}$  หรือ  $-180^{\circ}$  มีค่าเท่ากับ 3 m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกัน

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน y พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien-tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^{\circ}$  หรือ  $90^{\circ}$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.6 m จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่ยุม  $0^{\circ}$  หรือ  $180^{\circ}$  มีค่าเท่ากับ 2 m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน y จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน y จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็กในระนาบแกน y ทำให้ระยะการอ่านได้น้อยกว่าในระนาบแกนอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$  พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.4\text{ m}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $2.4\text{ m}$  สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก



รูปที่ 5.9 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมกับ UPM tag

จากรูปที่ 5.9 ผลการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $z$  จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวางในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  และ  $90^\circ$  จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $1.25\text{ m}$  และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  และมุม  $180^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $2.7\text{ m}$  สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกัน

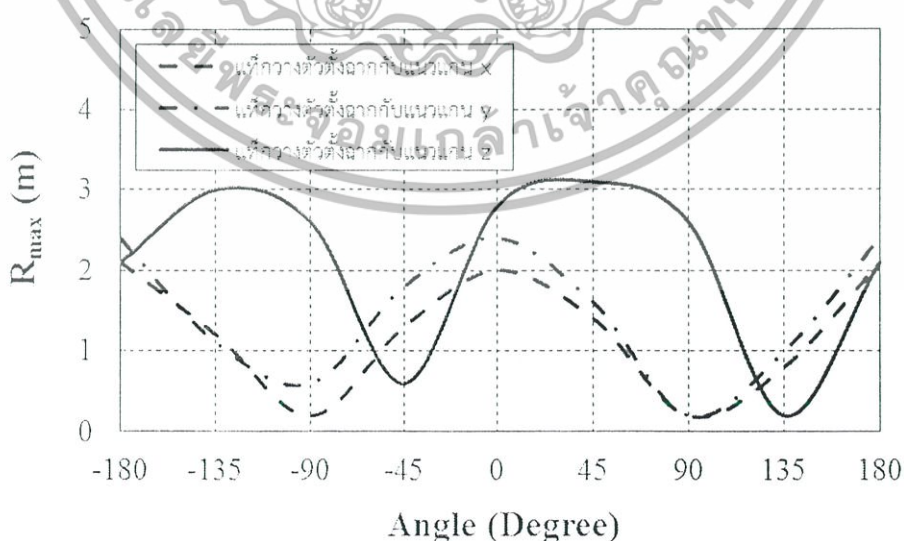
เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $y$  พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.5\text{ m}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $1.3\text{ m}$  สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุม

ต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน  $y$  จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน  $y$  จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็กในระนาบแกน  $y$  ทำให้ระยะการอ่านได้น้อยกว่าในระนาบแกนอื่น

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$  พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.4\text{ m}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $2.25\text{ m}$  สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก

### 5.3.2 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุความถี่เอชเอฟ โดยการทดสอบนี้ได้ทำการปรับให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น ส่วนแท็กที่ใช้มี 2 แบบคือ Alien tag และ UPM tag ที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กเป็นมุมครั้งละ  $45$  องศาในแนวแกน  $z$  เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุมเมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับสายอากาศกับแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ดังรูปที่ 5.7 ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.11



รูปที่ 5.10 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ที่สายอากาศมีการ

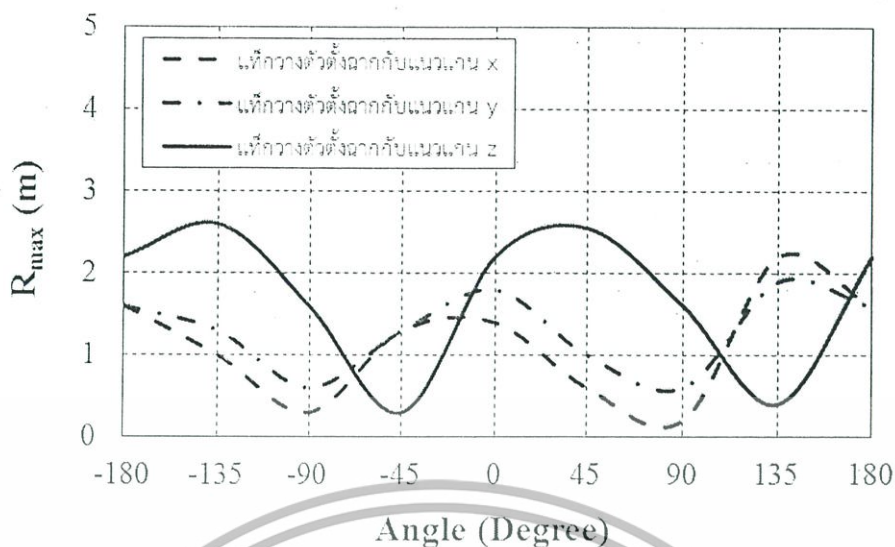
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.10 ผลการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $z$  จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวางในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-45^\circ$  หรือ  $135^\circ$  จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.6$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมนี้ไม่แมตซิ่งกันของการโพลาไรซ์กับสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $45^\circ$  หรือ  $-135^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $3$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมนี้แมตซิ่งกันของการโพลาไรซ์ของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันมากกว่าในกรณีของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $y$  พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.5$  m และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $2.4$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน  $y$  จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็ก

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$  พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^\circ$  หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.2$  m และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $2$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิ่งกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน  $x$  จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็กในระนาบแกน  $z$  ทำให้ระยะการอ่านได้น้อยกว่าในระนาบแกนอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นกับ UPM tag

จากรูปที่ 5.11 ผลการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวางในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-45^{\circ}$  หรือ  $135^{\circ}$  จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.3$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมนี้ไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์กับสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $45^{\circ}$  หรือ  $-135^{\circ}$  มีค่าเท่ากับ  $2.5$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมนี้แมตซิงกันของการโพลาไรซ์ของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น จึงทำให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันมากกว่าในกรณีของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน y พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^{\circ}$  หรือ  $90^{\circ}$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.5$  m และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^{\circ}$  หรือ  $-180^{\circ}$  มีค่าเท่ากับ  $1.75$  m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน y จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็ก

เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (UPM tag) จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม  $-90^{\circ}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

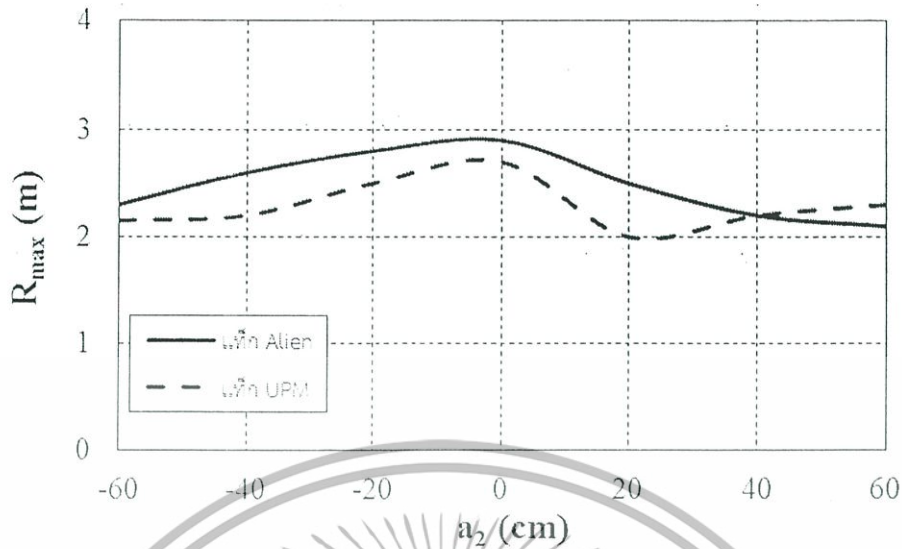
หรือ  $90^\circ$  จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.2 m และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม  $0^\circ$  หรือ  $-180^\circ$  มีค่าเท่ากับ 1.5 m สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็ก ในมุมต่าง ๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซ์กันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน x จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็กในระนาบแกน x ทำให้ระยะการอ่านได้น้อยกว่าในระนาบแกนอื่น

### 5.3.3 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมเมื่อทำการเปลี่ยนระยะมุมยก ( $a_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ของแท็ก

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลม สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบังคับด้วยคลื่นวิทยุความถี่เอชเอฟ โดยการทดสอบนี้ได้ทำการปรับให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาไรซ์วงกลม ส่วนแท็กที่ใช้มี 2 แบบคือ Alien tag และ UPM tag ที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้ตามรูปที่ 5.12 จะทำการเปลี่ยนแปลงระยะมุมยก ( $a_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ของสายอากาศแท็ก โดยกำหนดให้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีความสูงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโคไซน์แนวแกน z ดังรูปที่ 5.7(ค) และแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 5.13 และ รูปที่ 5.14

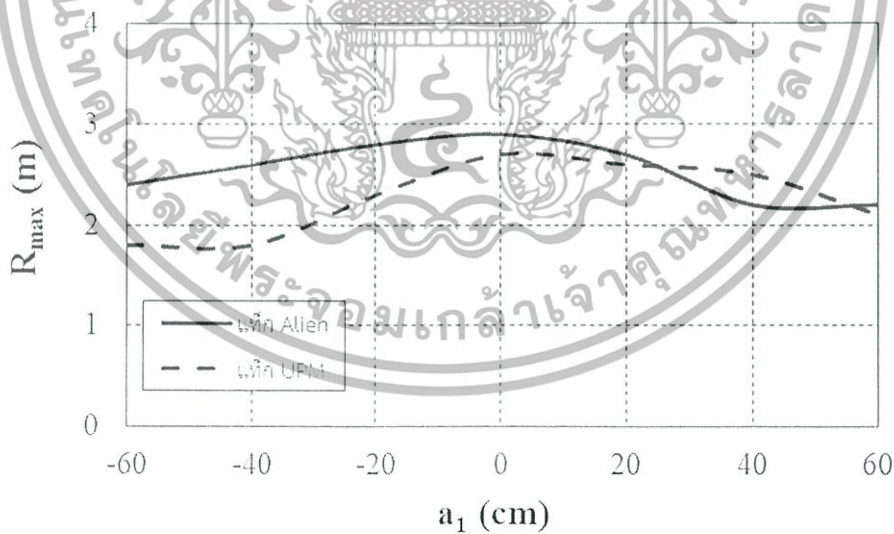
รูปที่ 5.12 การทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงระยะมุมยก ( $a_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $a_1$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมยก ( $a_2$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแท็กวางตัวตามแนวแกน z

จากรูปที่ 5.13 ระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมยกต่าง ๆ โดยที่มุมยก ( $a_2$ ) มีค่าเท่ากับ 0 cm คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1 m มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด คือ 2.85 m ของ Alien tag และ UPM tag ได้ระยะ 2.7 m เนื่องจากแท็กมีความสูงเท่ากับตัวสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล จากนั้นระยะการติดต่อสื่อสารจะลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมยกเท่ากับ 60 cm



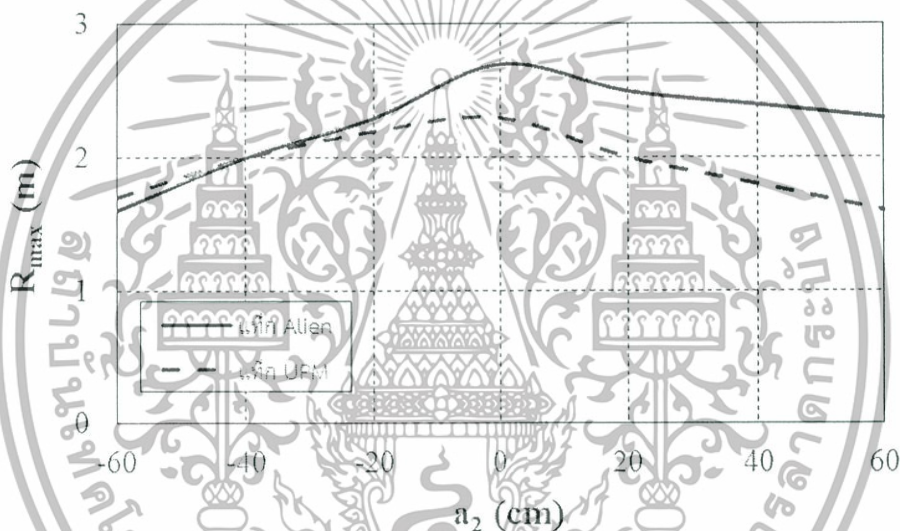
รูปที่ 5.14 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแท็กวางตัวตามแนวแกน z

รูปที่ 5.14 ระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมกวาดต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน โดยที่มุมกวาด ( $a_1$ ) มีค่าเท่ากับ 0 cm คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1 m มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด คือ 2.85 m ของ Alien tag และ UPM tag ได้ระยะ 2.7 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.4 ผลการทดสอบสายอากาศสวิตช์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเมื่อทำการเปลี่ยนระยะมุมยก ( $a_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ของแท็ก

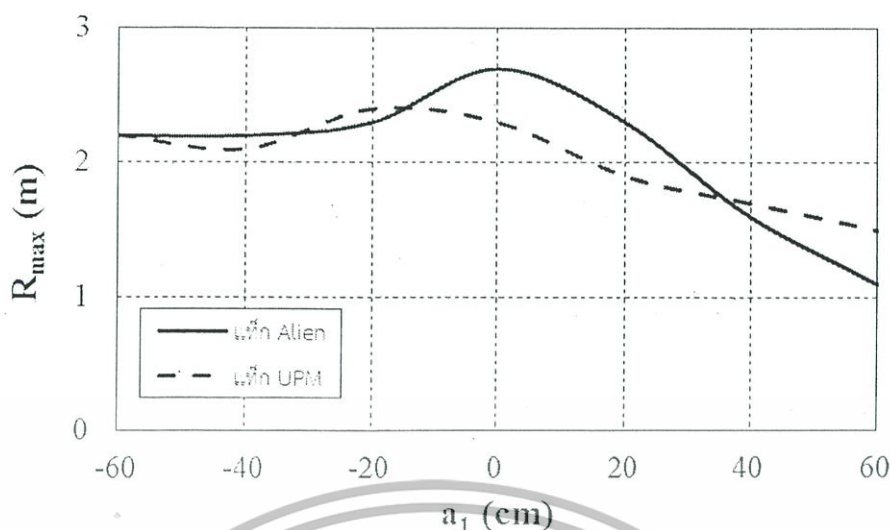
ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิตช์โพลาไรซ์เชิงเส้น/วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ โดยการทดสอบนี้ได้ทำการปรับให้สายอากาศทำงานในแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น ส่วนแท็กที่ใช้มี 2 แบบคือ Alien tag และ UPM tag ที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้ตามรูปที่ 5.12 จะทำการเปลี่ยนแปลงระยะมุมยก ( $a_2$ ) และระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ของสายอากาศแท็ก โดยกำหนดให้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีความสูงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดนใช้แนวแกน  $z$  ดังรูปที่ 5.7(ค) และแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมยก ( $a_2$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และแท็กวางตัวตามแนวแกน  $z$

จากรูปที่ 5.15 ระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมยกต่าง ๆ โดยที่มุมยก ( $a_2$ ) มีค่าเท่ากับ 0 cm คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1 m มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด คือ 2.7 m ของ Alien tag และ UPM tag ได้ระยะ 2.35 m เนื่องจากแท็กมีความสูงเท่ากับตัวสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล จากนั้นระยะการติดต่อสื่อสารจะลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมยกเท่ากับ 60 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะมุมกวาด ( $a_1$ ) ที่สายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และแท็กวางตัวตามแนวแกน z

รูปที่ 5.16 ระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมกวาดต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน โดยที่มุมกวาด ( $a_1$ ) มีค่าเท่ากับ 0 cm คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1 m มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด คือ 2.7 m ของ Alien tag และ UPM tag ได้ระยะ 2.35 m

#### 5.4 สรุป

จากผลการทดสอบสายอากาศเพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก พบว่าสายอากาศสวิตซ์โพลาไรซ์สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ระยะใกล้เคียงกันทั้งแบบโพลาไรซ์วงกลมและโพลาไรซ์เชิงเส้น โดยโพลาไรซ์วงกลมได้ระยะการติดต่อกับแท็กที่ไกลกว่าเล็กน้อยสำหรับโพลาไรซ์วงกลม บริเวณด้านหน้าของสายอากาศที่มุม  $0^\circ$  จะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ไกลที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง ส่วนโพลาไรซ์เชิงเส้น บริเวณด้านหน้าของสายอากาศที่มุม  $45^\circ$  กับ  $-135^\circ$  จะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ไกลที่สุด เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบมีโพลาไรซ์เอียง  $45^\circ$  และผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมาสามารถปรับปรุงความสามารถในการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กมีการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบแบบสวิตช์โพลาริซั้ได้ระหว่างโพลาริซั้วงกลมและเชิงเส้น โดยจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีการโพลาริซั้ได้ทั้งวงกลมและเชิงเส้น มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และมีอัตราการขยายที่สูง พร้อมทั้งสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุร่วมกับแท็กได้ทุกลักษณะการจัดวางตัวของแท็ก

ในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบ ผลที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุกับแท็ก ในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และทำการศึกษารายละเอียดที่ได้จากการคำนวณมาจำลองแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแผ่นระนาบร่วมกับช่องเปิดสี่เหลี่ยมและเส้นรวมทั้งผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว มีอัตราการขยายสูง และสามารถสวิตซ์การโพลาริซั้ได้ทั้งแบบวงกลมและเชิงเส้น โดยกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์นี้จะใช้โปรแกรม CST® (Microwave studio) เพื่อจำลองแบบของสายอากาศ แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะในด้านต่างๆ พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 922.5 MHz

สำหรับโพลาริซั้วงกลม สายอากาศมีค่าอัตราส่วนแชนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและ มีค่าอัตราส่วนแชนที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 2.11 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วงความถี่ตั้งแต่ 901 MHz ถึง 964 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 63 MHz ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB และที่ความถี่ใช้งานครอบคลุมค่าอัตราส่วนแชนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลางเท่ากับ -15 dB มีค่าอัตราการขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีค่าในช่วง 8.69 dBic ถึง 8.72 dBic และที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 8.70 dBic ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราการขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

สำหรับโพลาริซั้เชิงเส้น สายอากาศมีค่าอัตราส่วนแชนที่ความถี่กลางมี 30 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วงความถี่ตั้งแต่ 912 MHz ถึง 939 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 27 MHz ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำกว่า -10 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลางเท่ากับ -13.5 dB มีค่าอัตราการขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีค่าในช่วง 8.67 dBi ถึง 8.68 dBi และที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 8.68 dBi ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราการขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

จากนั้นได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟแบบแผ่นระนาบที่ได้จากการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ จึงได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 6.1 และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz
$L$	$0.677 \lambda$	220 mm
$W$	$0.677 \lambda$	220 mm
$l_1$	$0.455 \lambda$	148 mm
$l_2$	$0.467 \lambda$	152 mm
$w_1$	$0.424 \lambda$	138 mm
$w_2$	$0.437 \lambda$	142 mm
$h$	$0.028 \lambda$	9 mm
$g$	$0.006 \lambda$	2 mm
$r_1$	$0.055 \lambda$	18 mm
$r_2$	$0.083 \lambda$	27 mm
$r_3$	$0.025 \lambda$	8 mm
$r_4$	$0.071 \lambda$	23 mm

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลอง พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 922.5 MHz

สำหรับโพลาริซิงกลม สายอากาศมีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและมีค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 0.22 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วงความถี่ตั้งแต่ 904 MHz ถึง 949 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 45 MHz ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB และที่ความถี่ใช้งานครอบคลุมค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลางเท่ากับ -24 dB มีค่าอัตราการขยายที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 8.8 dBi ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราการขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

สำหรับโพลาริซิงเส้น สายอากาศมีค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลางมี 28.95 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วงความถี่ตั้งแต่ 912 MHz ถึง 939 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 27 MHz ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำกว่า -10 dB มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลางเท่ากับ -15 dB มีค่าอัตราการขยายที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 7.02 dBi ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราการขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

ในแบบโพลาริซวงกลมการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จะดีกว่าผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลางที่ได้จากการทดสอบมีค่าระดับของค่าการสูญเสียย้อนกลับดีกว่าการจำลองเช่นกัน ส่วนในแบบโพลาริซเชิงเส้น ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จะต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลรวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ โดยค่าอัตราการขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง

ในส่วนนี้ได้นำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นแล้วไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุความถี่เอชเอฟโดยทำงานร่วมกับแท็ก ซึ่งผลที่ได้จากการนำสายอากาศแบบแผ่นระนาบไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก พบว่าเครื่องอ่านสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้จริง

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบจะพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นวิทยุความถี่เอชเอฟแบบแผ่นระนาบสำหรับประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลร่วมกับแท็ก จะเห็นว่าในงานวิจัยนี้ สายอากาศสามารถสวิตช์โพลาริซได้เพียงสองโพลาริซคือโพลาริซวงกลม หมุนขวา กับโพลาริซเชิงเส้น สำหรับโพลาริซเชิงเส้นนั้นควรจะเป็นแนวนอนหรือแนวตั้งเพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งสายอากาศ แต่สายอากาศต้นแบบมีโพลาริซเชิงเส้นแบบเฉียง 45 องศา ซึ่งทำให้การติดตั้งสายอากาศต้องเอียงสายอากาศตาม ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศในอนาคตต้องปรับปรุงให้เป็นโพลาริซแนวนอน 0 องศา หรือแนวตั้ง 90 องศา สำหรับการสวิตช์โพลาริซจากวงกลมเป็นเชิงเส้นนั้น สายอากาศต้นแบบได้ใช้ลวดตัวนำทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นกระจายคลื่นและมุมที่ถูกแยกออกด้วยร่องขนาด 2 มิลลิเมตร เข้าด้วยกัน เพื่อดูผลการสวิตช์โพลาริซก่อนที่จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวสวิตช์โพลาริซ จากการทดลองพบว่า สายอากาศสามารถสลับการทำงานได้ทั้งแบบโพลาริซวงกลมและเชิงเส้น ซึ่งสามารถพัฒนาการสวิตช์โพลาริซได้โดยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น PIN ไดโอด ทำหน้าที่สวิตช์แทนลวดตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- [15] N. Jin, F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, "A novel patch antenna with switchable slot (PASS): Dual-frequency operation with reversed circular polarizations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 3, pp. 1031–1034, Mar. 2006.
- [16] CST® (Microwave Studio), [Online]. Available: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- [17] RFID Reader รุ่น Motorola XR480, [Online]. Available: <http://www.motorola.com>
- [18] Alien Tag รุ่น ALN-9640, [Online]. Available: [http://www.alientechnology.com/docs/products/DS\\_ALN\\_9640.pdf](http://www.alientechnology.com/docs/products/DS_ALN_9640.pdf)
- [19] UPM Tag รุ่น ShotDipole , [Online]. Available: [http://www.upmrfid.com/rfid/rfid.nsf/images/ShortDipole\\_M4\\_datasheet.pdf/\\$FILE/ShortDipole\\_M4\\_datasheet.pdf](http://www.upmrfid.com/rfid/rfid.nsf/images/ShortDipole_M4_datasheet.pdf/$FILE/ShortDipole_M4_datasheet.pdf)
- [20] RFID tag, [Online]. Available: [http://www.jesic-tech.com/RFID\\_tag.html](http://www.jesic-tech.com/RFID_tag.html)
- [21] Active tag, [Online]. Available: [http://www.acentech.net/cms/index.php?option=com\\_content&task=view&id=417&Itemid=205](http://www.acentech.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=417&Itemid=205)
- [22] semi-passive Tag, [Online]. Available: [http://www.bridge-project.eu/data/File/BRIDGE\\_WP04\\_Secure\\_semi\\_passive\\_RFID\\_Tags.pdf](http://www.bridge-project.eu/data/File/BRIDGE_WP04_Secure_semi_passive_RFID_Tags.pdf)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

#### หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assoc.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3730100326364
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 023264111 ต่อ 3346 โทรสาร 023264554 kpchuwon@kmitl.ac.th

#### 4. ประวัติการศึกษา

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

- ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย

ชื่อโครงการ	ปี
Propagation Modeling in Durian Orchard for Wireless Sensor Network	2551-ปัจจุบัน
Performance Enhancement of RFID Antennas for Animal Identification	2551-2552
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	คณิศร ต.รุ่งเรือง ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์ 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
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
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.Ngamjanyapom 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.Ngamjanyapom C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications	2546
A Spherical Array Self-Mixing Oscillator Antenna	M.Krairiksh W.Buasomboon P.Ngamjanyapom 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.Lertwiryaprapa C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	International Journal of	2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
		Science and Technology	

#### 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

#### ผู้ร่วมวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายคมกฤษ บุญยิ่ง  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Komkris Boonying
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5331090003127
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก - พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 023264111 ต่อ 3346 โทรสาร 023264554  
[komkris@hotmail.com](mailto:komkris@hotmail.com)
- ประวัติการศึกษา

สถานศึกษา	วุฒิ	สาขาวิชา	ปี (พ.ศ.)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2553
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	วศ.บ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย

วารสารวิชาการระดับประเทศ

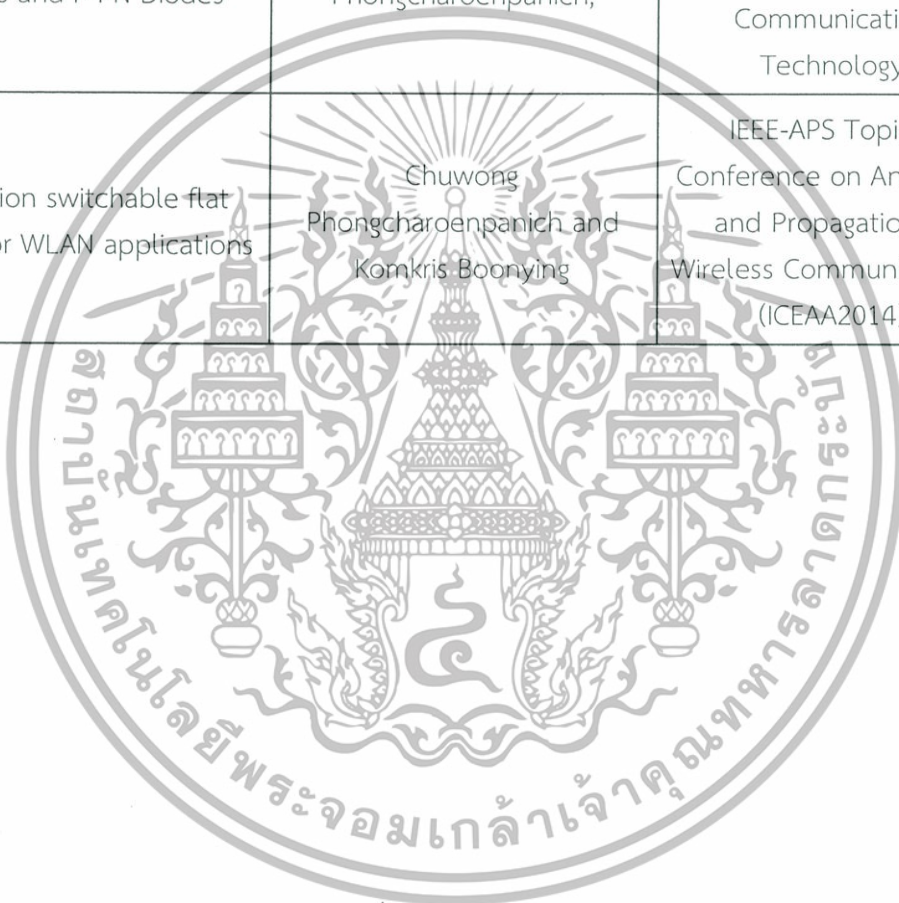
ชื่อวารสาร	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
สายอากาศไมโครสตริปไดเวอร์ซิตีเชิงโพลาริซัซแทรกร่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพค่ายกโดดเดี่ยว	คมกฤษ บุญยิ่ง, สมพล โกศลวิตร, อภินัน กาญจนวาปสถิตย์ และธีรวิสิษฐ เลาะห์เพ็ญแสง	วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	2554

บทความนำเสนอในการประชุมนานาชาติ

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Flat Antenna for Polarization Diversity	Komkris Boonying, Teeravisit Laohapensaeng, Sompol Kosulvit and Chuwong Phongcharoenpanich	Proceedings of Joint International Conference on Information and Communication Technology (IJICT 20010)	2553
Dual-Polarized Microstrip Antenna with High Isolation using an Inserted Slot	Teeravisit Laohapensaeng and Komkris Boonying	Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISAP 2011)	2554
Two Probes Fed Fed Circular Antenna for Polarization Diversity WLAN Application	Komkris Boonying, Teeravisit Laohapensaeng, Sompol Kosulvit and Chuwong Phongcharoenpanich	Proceedings of Thailand - Japan MicroWave	2555
Dual-band flat antenna for polarization diversity with high isolation	Komkris Boonying, Teeravisit Laohapensaeng, Sompol Kosulvit and Chuwong Phongcharoenpanich	IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (ICEAA2012)	2555
Dual-Band Circular Plate Antenna with Annular-ring Slot and Four-Paired Rectangular Slots	Komkris Boonying, Sompol Kosulvit and Chuwong Phongcharoenpanich	Engineering/Electronic, Computer, Telecommunications and	2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
		Information Technology (ECTI-con 2013)	
Polarization Reconfigurable Suspended Antenna using RF Switches and P-I-N Diodes	Komkris Boonying and Chuwong Phongcharoenpanich,	JITEE 2014 Proceedings of Joint International Conference on Information and Communication Technology	2557
Polarization switchable flat antenna for WLAN applications	Chuwong Phongcharoenpanich and Komkris Boonying	IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (ICEAA2014)	2557



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้