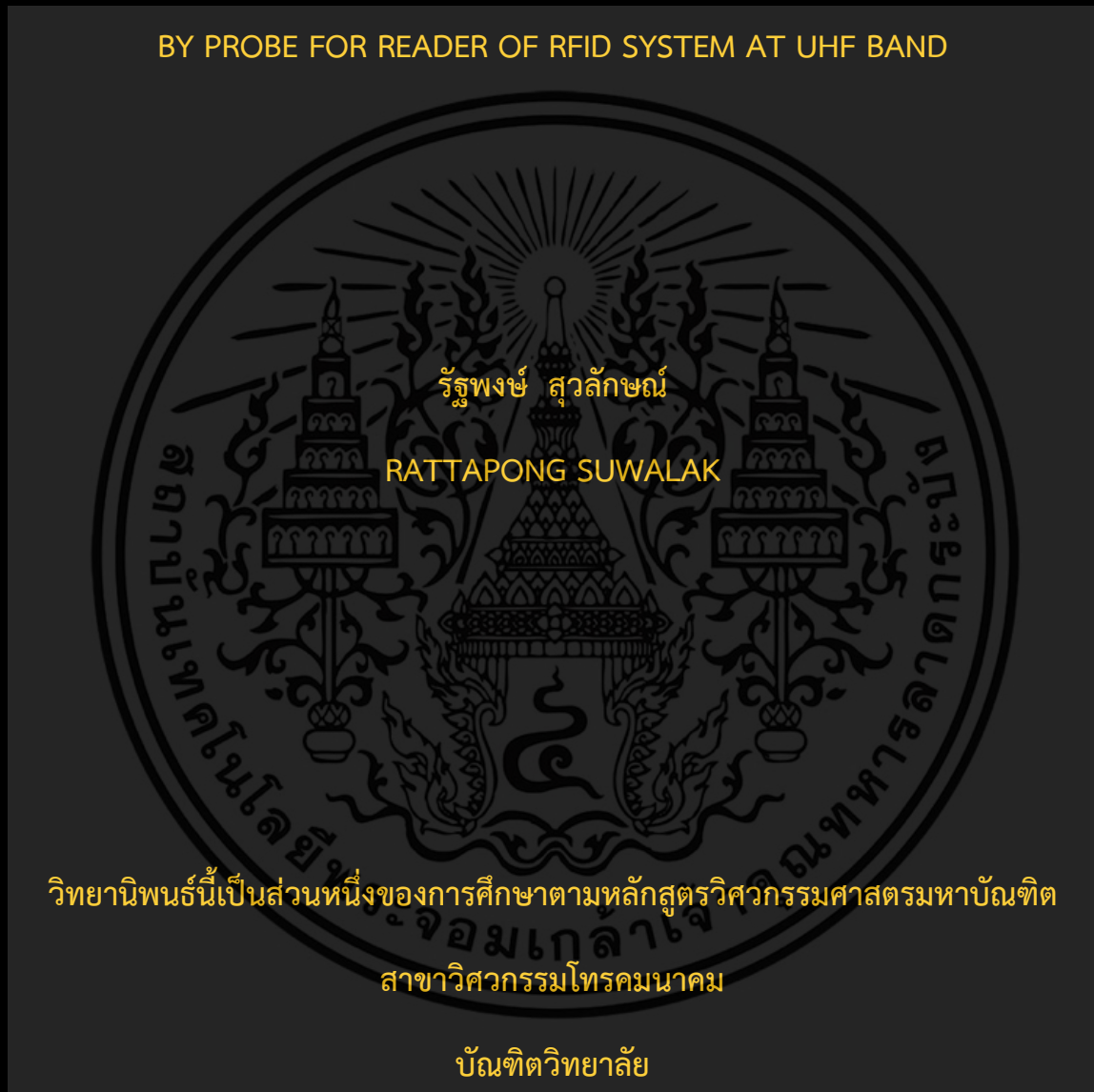


สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ  
สำหรับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ

ELLIPTICAL PATCH ANTENNA ON DOUBLE-LAYER PLATE FED

BY PROBE FOR READER OF RFID SYSTEM AT UHF BAND



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-028

สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ  
สำหรับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่เอชเอฟ

**ELLIPTICAL PATCH ANTENNA ON DOUBLE-LAYER PLATE FED  
BY PROBE FOR READER OF RFID SYSTEM AT UHF BAND**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELLIPTICAL PATCH ANTENNA ON DOUBLE-LAYER PLATE FED  
BY PROBE FOR READER OF RFID SYSTEM AT UHF BAND**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-010-028**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ยูเอชเอฟ
นักศึกษา	นายรัฐพงษ์ สุวลักษณ์
รหัสนักศึกษา	49060902
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบ โพลาริซวงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ การออกแบบสายอากาศให้มีการแพร่กระจายคลื่น โพลาริซวงกลมนี้ทำได้โดยอาศัยช่องเปิดของแผ่นตัวนำตรงกลางของสายอากาศแบบแผ่นสายอากาศที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างเป็นสองชั้นซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสองโหมดที่ตั้งฉากกันในแต่ละโพรบ การวิเคราะห์สายอากาศทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโครงสร้าง รวมทั้งทำการสร้างและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งพบว่า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว มีอัตราขยายเท่ากับ 8.73 dBic มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 100 และ 70 องศา ตามลำดับ มีช่วงกว้างแถบความถี่เท่ากับ 2.4% หรือครอบคลุมความถี่ 908 MHz ถึง 930 MHz ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ที่มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 914 MHz ถึง 931 MHz และที่ความถี่เรโซแนนซ์ (923 MHz) มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่บริเวณด้านหน้าของสายอากาศเท่ากับ 0.06 dB และค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 923 MHz มีค่าสภาวะเจาะจงทิศทางเท่ากับ 8.92 dBic ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

<b>Thesis Title</b>	Elliptical Patch Antenna on Double-Layer Plate Fed by Probe for Reader of RFID System at UHF Band
<b>Student</b>	Mr. Rattapong Suwalak
<b>Student ID.</b>	49060902
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

This thesis presents a circularly polarized antenna for reader of Radio Frequency Identification (RFID) system. The design of circularly polarized antenna is carried out by using the aperture on the middle plate of double layer. The effects of antenna parameters and dielectric constant are analyzed. The antenna prototype was fabricated and measured its characteristics. The pattern is unidirectional with the gain of 8.73 dBic. The half-power beamwidth in E - plane and H - plane are 100 and 70 degrees, respectively. The bandwidth is 2.4 % to cover 908 MHz – 930 MHz. The axial ratio of less than 3 dB is realized from 914 to 931 MHz. The axial ratio of the beam peak direction at the resonant frequency of 923 MHz is 0.06 dB. The directivity is 8.92 dBic. From the results of the investigations, it can be confirmed that the proposed antenna can be used for reader of RFID system.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือในด้านการศึกษา และงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมพล โกศลวิตร และศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณ ไพโรจน์ วุ่นหอม ผู้ซึ่งให้แนวคิดและคำแนะนำในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณ กิตติศักดิ์ แพบัว คุณสุภกิต แก้วดวงตา ซึ่งช่วยให้คำปรึกษาในการวิจัย ขอขอบคุณคุณสุพัตนา วงสีก พี่ๆ น้องๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ ข้อคิดและสิ่งดีๆ ต่อข้าพเจ้า ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ ดร. พรอนงค์ พงษ์ไพบูลย์ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำหรับความช่วยเหลือทั้งอุปกรณ์ในการทดลองรวมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำ

ขอขอบคุณ คุณวรดาณ์ จาตุรงค์ลักษณ์ ผู้ซึ่งเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในทุกๆ ด้าน คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแต่ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้า

รัฐพงษ์ สุวลักษณ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ.....	6
2.2.1 แท็ก.....	7
2.2.1.1 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบพาสซีฟ (Passive RFID Tag).....	8
2.2.1.2 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ (Active RFID Tag).....	8
2.2.1.3 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active RFID Tag).....	9
2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ.....	9
2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader).....	13
2.2.4 คุณลักษณะของอุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ.....	14
2.2.5 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่น ความถี่วิทยุ.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ.....	22
2.3.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	22
2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	24
2.3.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรง (Cavity Resonance).....	25
2.3.2.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ.....	27
2.3.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	28
2.3.2.4 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth).....	29
2.3.2.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity).....	29
2.3.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	29
2.3.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency).....	30
2.3.2.8 อัตราขยาย (Gain).....	30
2.3.2.9 ช่วงกว้างแถบความถี่ (Bandwidth).....	30
2.3.2.10 การโพลาไรซ์ (Polarization).....	31
2.3.3 เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการ สื่อสารแบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล.....	38
2.3.3.1 การออกแบบสายอากาศ RFID.....	38
2.3.3.2 หลักการทำงาน.....	38
2.3.3.3 การติดต่อสื่อสารของระบบ RFID ในสนามระยะไกล.....	39
2.3.3.4 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอ ปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลัง งานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP).....	42
2.3.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน.....	43
2.4 บทสรุป.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์สายอากาศ.....	46
3.1 บทนำ.....	46
3.2 แบบจำลองสายอากาศ บทนำ.....	46
3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศ .....	46
3.3 คุณลักษณะของสายอากาศ .....	47
3.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดแผ่นวงรี ( $u_x, u_y$ ).....	56
3.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดของร่องเชื่อมต่อ สี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ).....	57
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ).....	58
3.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์ และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ).....	59
3.3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นกลาง ( $v_x$ ) ของสายอากาศ.....	60
3.3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชั้นกลาง ( $v_y$ ) ของสายอากาศ.....	62
3.3.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลาง ของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ของ สายอากาศ.....	63
3.3.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุม ของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) ของสายอากาศ .....	64
3.3.9 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตำแหน่งของโพรบในการป้อน สัญญาณในแนวแกน $y$ ( $y_p$ ) ให้กับสายอากาศ .....	66
3.3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าขนาดความยาวและค่าขนาด ความกว้างของระนาบกราวนด์ ( $w_x, w_y$ ) ของสายอากาศ.....	67
3.3.11 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในย่าน ความถี่เอชเอฟ .....	69
3.3.12 ค่าอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่เอชเอฟ .....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในย่านความถี่ยูเอชเอฟ .....	71
3.3.14 แบบรูปของสนามของสายอากาศในย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	74
3.4 บทสรุป.....	75
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบสายอากาศ .....</b>	<b>77</b>
4.1 บทนำ.....	77
4.2 การสร้างสายอากาศ.....	77
4.3 การทดสอบสายอากาศ .....	79
4.3.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่น ระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ .....	79
4.3.2 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสอง ชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ.....	80
4.3.3 การทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบ สองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ.....	81
4.3.4 การทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรี บนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ .....	82
4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	83
4.4.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบน แผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ.....	83
4.4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบ สองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ.....	84
4.4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่น ระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ .....	85
4.4.4 ผลการทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่น วงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบ .....	87
4.5 บทสรุป.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การประเมินสมรรถนะและการประยุกต์ใช้งาน .....	91
5.1 บทนำ.....	91
5.2 การประเมินสมรรถนะ .....	91
5.2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบของการประยุกต์ใช้งาน .....	91
5.2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของแท็ก .....	92
5.2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล....	93
5.2.3.1 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลาริซ์	
เป็นแบบเชิงเส้น.....	93
5.2.3.2 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลาริซ์	
เป็นแบบวงกลม .....	94
5.2.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบ	
สองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล .....	95
5.2.5.การคำนวณหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล	
กับแท็ก .....	96
5.3 การประยุกต์ใช้งาน .....	99
5.3.1 การทดสอบสายอากาศโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศ	
อ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้นและแท็กมีการ โพลาริซ์เป็น	
แบบเชิงเส้น .....	100
5.3.1.1 กรณีที่แท็กมีการวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x.....	101
5.3.2 การทดสอบสายอากาศ โดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศ	
อ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กมีการ โพลาริซ์เป็น	
แบบเชิงเส้น .....	103
5.3.2.1 กรณีที่แท็กมีการวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x.....	103
5.3.3 การทดสอบสายอากาศ โดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศ	
แบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มีการ โพลาริซ์	
เป็นแบบวงกลมและแท็กมีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น .....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3.1 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x.....	105
5.3.3.2 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน y.....	106
5.3.3.3 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน z.....	107
5.3.3.4 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $h$ ) ของแท็ก ในกรณีที่แท็ก มีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x.....	108
5.3.3.5 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะทาง ( $d_1$ ) ของแท็ก ในกรณีที่ แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x .....	110
5.3.4 การเปรียบเทียบระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล กับแท็กของสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่น ระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ .....	111
5.4 บทสรุป .....	112
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	113
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม .....	113
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	115
บรรณานุกรม.....	116
ประวัติผู้เขียน .....	118

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังงานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน ความถี่ UHF ในประเทศต่างๆ.....	19
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด $TM_{010}^z$ .....	50
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด $TM_{100}^z$ .....	52
3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่างๆ ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น .....	54
3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล.....	68
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ .....	78
4.2 รูปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ ป้อนด้วยโพรบ .....	89
5.1 คุณสมบัติของแท่งที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น.....	93
5.2 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น.....	94
5.3 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม .....	94
5.4 คุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม .....	95
6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ .....	114

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของระบบ RFID.....	3
1.2 การประยุกต์ใช้งานระบบ RFID.....	3
2.1 โครงสร้างของระบบ RFID ทั่วไป .....	7
2.2 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ .....	8
2.3 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ .....	8
2.4 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ .....	9
2.5 แท็กแบบจานและเหรียญ .....	9
2.6 แท็กแบบกระดาษแก้ว.....	10
2.7 แท็กแบบหุ้มพลาสติก .....	10
2.8 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	11
2.9 แท็กแบบพวงกุญแจ .....	11
2.10 แท็กแบบนาฬิกา.....	12
2.11 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส .....	12
2.12 แท็กแบบ Smart Label .....	13
2.13 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล .....	14
2.14 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex .....	15
2.15 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ.....	17
2.16 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียว .....	23
2.17 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมและมีช่องเชื่อมต่อโค้งงอ.....	23
2.18 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียว .....	24
2.19 สายอากาศไมโครสตริปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับสตริปใจสำหรับการโพลาไรซ์แบบ วงกลม.....	24
2.20 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	25
2.21 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่ $z=0$ .....	32
2.22 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง .....	33
2.23 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน .....	33
2.24 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP).....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP) .....	35
2.26 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP).....	36
2.27 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP).....	36
2.28 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุใน สนามระยะไกล .....	39
2.29 กำลังงานที่ส่งมายังแท่งและวงจรสมมูล .....	43
3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ .....	47
3.2 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด $TM_{010}^z$ .....	50
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ( $v_y$ ) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ .....	51
3.4 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด $TM_{100}^z$ .....	52
3.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดเป็นโหมด $TM_{100}^z$ .....	53
3.6 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ.....	53
3.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบเป็นฟังก์ชันของความถี่ .....	54
3.8 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่ มุมต่างๆ.....	55
3.9 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแผ่นวงรี ( $u_x, u_y$ ) .....	56
3.10 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของร่องเชื่อมต่อ สี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) .....	57
3.11 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศ.....	58
3.12 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่น ระนาบกราวด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ของสายอากาศ.....	60
3.13 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแผ่น สี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) ของสายอากาศ.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของแผ่น สี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ของสายอากาศ.....	62
3.15 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะทางระหว่าง ตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ของ สายอากาศ .....	63
3.16 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของวงกลม สำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) ของสายอากาศ.....	65
3.17 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพรบใน การป้อนสัญญาณในแนวแกน $y$ ( $y_p$ ) ให้กับสายอากาศ.....	66
3.18 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดความยาว และค่าขนาดความกว้างของระนาบกราวนด์ ( $w_x, w_y$ ) ของสายอากาศ.....	67
3.19 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ .....	69
3.20 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่นำเสนอ .....	70
3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้น .....	71
3.22 แบบรูปของสนามของสายอากาศ .....	73
3.23 แบบรูปของสนามของสายอากาศที่นำเสนอ .....	74
4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	78
4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	80
4.3 การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	81
4.4 การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ.....	82
4.5 เปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง.....	83
4.6 เปรียบเทียบผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง .....	84
4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของมุมซึ่ง ได้จากการทดสอบ และการจำลอง.....	85
4.8 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง.....	87
5.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ของบริษัท ALIEN รุ่น 9800 .....	92
5.2 แท็กชนิด ไค โพลแบบขด .....	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น .....	93
5.4 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม .....	94
5.5 สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม .....	95
5.6 การทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท็ก .....	100
5.7 การวางตัวของแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $x$ .....	102
5.8 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศ อ้างอิงของเครื่องอ่านข้อมูลมีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้ง (0 องศา) .....	102
5.9 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศ อ้างอิงของเครื่องอ่านข้อมูลมีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม .....	104
5.10 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศ แบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบของเครื่องอ่านข้อมูลมีการ โพลาริซ์ เป็นแบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $x$ $y$ และ $z$ .....	105
5.11 การวางตัวของแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $y$ .....	107
5.12 การวางตัวของแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $z$ .....	108
5.13 การทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $h$ ) .....	109
5.14 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ความสูงต่างๆ เมื่อสาย อากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบของเครื่องอ่านข้อมูลมีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $x$ .....	109
5.15 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะห่าง ( $d_1$ ) จากแนว ตรงกลาง เมื่อสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบของเครื่อง อ่านข้อมูลมีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน $x$ .....	110
5.16 การเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่าน ข้อมูลกับแท็กระหว่างสายอากาศอ้างอิงกับสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้น ที่ป้อนด้วยโพรบ .....	111
5.17 ภาพถ่ายของการทดสอบสายอากาศที่ใช้งานร่วมกับแท็ก .....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID: Radio Frequency Identification System) เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ในปัจจุบันได้มีการนำระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากนำมาใช้แทนระบบบาร์โค้ดแบบเดิม เช่น ใช้ในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรสำหรับผ่านเข้าออกสำนักงาน ห้องพัก บัตรที่จ่อครดตามศูนย์การค้าต่างๆ และอาจพบเห็นเครื่องลูกข่ายในรูปแบบอื่นๆ เช่น เหรียญ กระดุม หรือแคปซูลขนาดเล็กที่ใช้ฝังในตัวสัตว์เพื่อบันทึกข้อมูลต่างๆ ปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบ RFID [1]-[2] จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสาร โดยทั่วไป อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านหลัก คือ

ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) 135/125/134.2 kHz

ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) 13.56 MHz

ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) เช่น 433/ 860/ 960/920 - 925 MHz

ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/ 5.8 GHz

ในแง่การใช้งานในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (ย่านความถี่ต่ำระยะการอ่านประมาณ 10 - 20 เซนติเมตร และย่านความถี่สูงระยะการอ่านประมาณ 1 เมตร) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้ในงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (ระยะการอ่านประมาณ 1 - 10 เมตร) เช่นระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ในแต่ละประเทศมีการอนุญาตให้ใช้ความถี่ของระบบ RFID ในย่านความถี่สูงยิ่งแตกต่างกัน เช่น ยุโรป คือ 866 - 869 MHz อเมริกาเหนือและใต้ คือ 902 - 928 MHz ญี่ปุ่น คือ 950 - 956 MHz ส่วนในประเทศไทย คือ 920 - 925 MHz และสุดท้ายคือ ย่านความถี่ไมโครเวฟ (ระยะการอ่านไกลกว่า 10 เมตร) ซึ่งใช้ใน ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (wireless LAN) ในส่วนของการใช้งาน RFID ในประเทศไทย เช่น การขนส่ง (บัตรทางด่วนและบัตรโดยสารรถไฟฟ้ามหานคร) ห้องสมุดอัจฉริยะ การควบคุมการเข้าออกสถานที่ (บัตรพนักงานและบัตรจ่อครด) การจัดการสายการผลิต [2]-[3] และการขนส่ง ปลูกสัตว์ (การให้อาหารและการติดตามโรค) เอกสารราชการ (หนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์และบัตรประชาชน) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

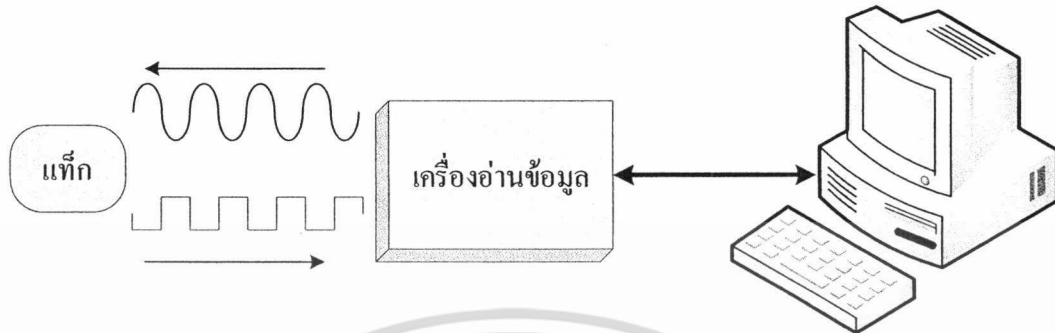
ในงานทางด้านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุซึ่งเป็นระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นสิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อระบบก็คือ สายอากาศ และเนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง ระยะทางในการส่งไกลและโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่ UHF จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับระบบดังกล่าว และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศโดยทั่วไปทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) กับแท็ก (Tag) ได้ในบางลักษณะการวางตัวของแท็กซึ่งถ้าสายอากาศของแท็ก ไม่ได้วางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมทำให้ระยะการติดต่อสื่อสารต้องใกล้มากๆ หรือไม่สามารติดต่อสื่อสารกันได้ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การติดต่อที่ระยะไกลมากขึ้นและติดต่อกับแท็กได้ในหลากหลายลักษณะการจัดวาง วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น โดยที่ชั้นบนเป็นแผ่นตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นวงรีและชั้นกลางเป็นแผ่นตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีการเจาะร่องจำนวน 2 ร่อง ในแนวเส้นทแยงมุมเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีการตัดขอบของแผ่นตัวนำสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางด้วยส่วนโค้งในทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกันและไม่อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมที่มีการเจาะร่อง ส่วนชั้นล่างสุดเป็นแผ่นตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศมีระยะห่างระหว่างชั้นบนกับชั้นกลางและระยะห่างระหว่างชั้นกลางกับชั้นล่างไม่เท่ากัน สายอากาศนี้ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมซึ่งเหมาะสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ UHF และสายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะที่เหมาะสมดังนี้คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โพลาไรซ์แบบวงกลมที่ดี และมีอัตราขยายที่สูง เป็นต้น

## 1.2 ความสำคัญของงานวิจัย

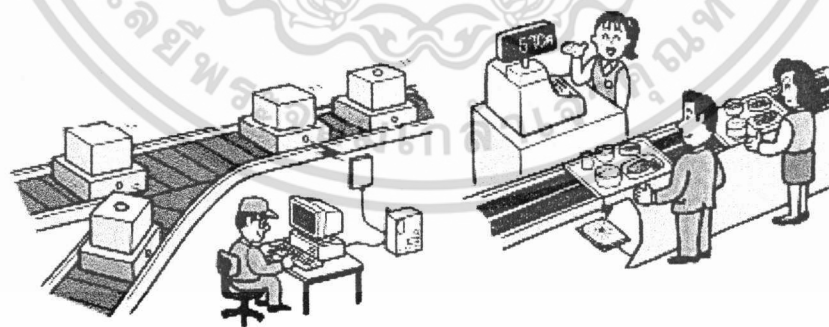
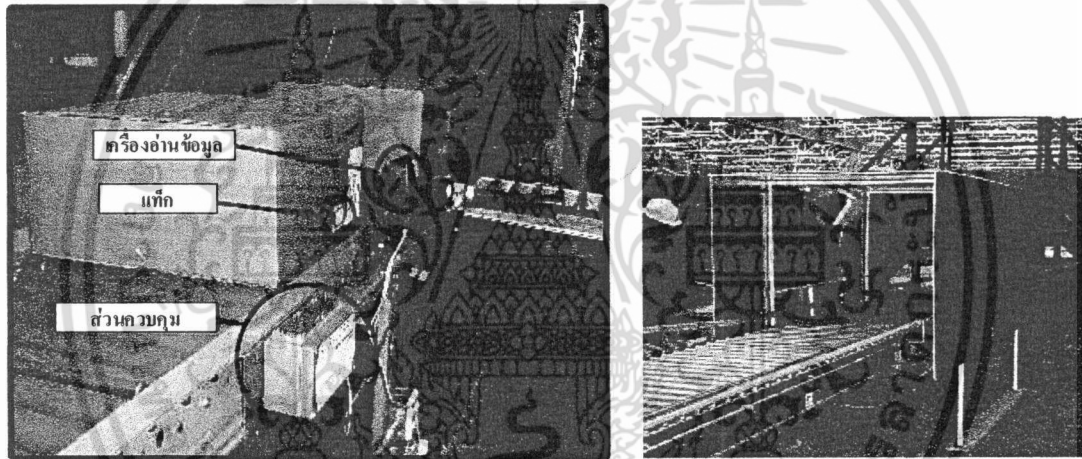
ปัจจุบันมีระบบต่างๆ มากมายที่ใช้เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุซึ่งได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 กำลังได้รับความสนใจและถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้งานแทนระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด โดยจุดเด่นของระบบ RFID คือ สามารถอ่านค่าข้อมูลจากป้ายหรือเครื่องลูกข่ายได้หลายๆ ตัวในเวลาเดียวกัน แบบไร้การสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี (มองไม่เห็น) สามารถอ่านค่าได้แม้ไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นสายตากับเครื่องอ่าน ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ระยะไกล และด้วยความเร็วสูง

รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของระบบ RFID ทั่วไปซึ่งมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วน คือ เครื่องอ่านข้อมูล (Reader) และแท็ก (Tag) หลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่

วิทยุ คือ เมื่อแท็กเข้ามาในช่วงการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังแท็ก หลังจากนั้นแท็กจะส่งสัญญาณกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบ RFID



รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานระบบ RFID [2]-[3]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสายอากาศมีความจำเป็นในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นสายอากาศที่จะนำมาใช้งานร่วมกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะในการใช้งานสูงสุด รูปแบบของสายอากาศจะมีลักษณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมกับการใช้งานในด้านต่างๆ โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแบบระนาบซึ่งมีคุณลักษณะเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบวงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF ซึ่งมีความต้องการสายอากาศที่มีคุณลักษณะดังนี้ เช่น มีอัตราขยายที่สูง มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ดี แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน รวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการใช้งานด้วย เป็นต้น การศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นวงรีและสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีร่องเชื่อมต่อ (Coupling hole) ระยะห่างระหว่างชั้นบนกับชั้นล่าง และระหว่างชั้นล่างกับระนาบกราวด์ ขนาดของร่องเชื่อมต่อ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยอาศัยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบสามมิติ ในการจำลองผลและนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นให้มีระยะการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กได้ไกลที่สุดและมีการโพลาไรซ์วงกลมที่ดี

### 1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัยและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ตัวอย่างเช่น ลักษณะและประเภทของแท็ก การทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ เป็นต้น ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อน ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศ เริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับความต้องการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF

บทที่ 4 กล่าวถึงการปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาปรับปรุงโครงสร้างและนำมาจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบของสมรรถนะของสายอากาศ เช่น ค่า  $|S_{11}|$  ค่าอัตราส่วนแกน ค่าอัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น ซึ่งสามารถทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศหลากหลายรูปแบบ และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน บทนี้จะนำเสนอให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของการปรับปรุงโครงสร้างสายอากาศเพื่อนำไปสร้างและทดสอบ

บทที่ 5 ในบทนี้ได้อธิบายถึงการประเมินสมรรถนะและการประยุกต์ใช้งาน เพื่อทดสอบว่ามีความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้หรือไม่ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความสามารถของสายอากาศในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในกรณี que ที่แท็กวางตัวอยู่นอกเหนือจากทิศ  $xy$  และ  $z$

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางในการจำลองแบบ สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF สรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ [1]-[2] ซึ่งประกอบด้วย ประเภทของแท็ก (Tag) และเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) แบบต่าง ๆ หลักการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุกับแท็ก หลักการสื่อสารที่อาศัยหลักการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [4]-[6]

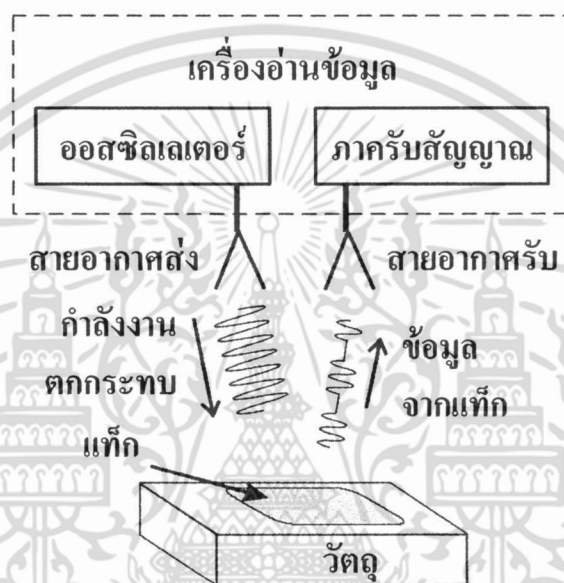
### 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

การติดต่อสื่อสารแบบไร้สายถูกใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับการส่งข้อมูลข่าวสารต่างๆ เช่น ข้อความ รูปภาพ สัญญาณเสียง และวิดีโอ เป็นต้น ปัจจุบันมีระบบต่างๆ มากมายที่ใช้เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุซึ่งได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 กำลังได้รับความสนใจและถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้งานแทนระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบ RFID คือสามารถอ่านค่าข้อมูลจากป้ายหรือแท็กได้หลายๆ ตัวในเวลาเดียวกันแบบไร้การสัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี (มองไม่เห็น) สามารถอ่านค่าได้โดยไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นสายตากับเครื่องอ่าน ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ระยะไกล และด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ภายในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน ด้วยกัน ส่วนแรก คือ แท็กที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการ โดยแท็กจะมีการบันทึกข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือ เครื่องสำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อความเข้าใจและให้เห็นภาพชัดเจนจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด ดังนี้ คือ แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ ก็คือ เครื่องอ่านบาร์โค้ดนั่นเอง โดยที่ทั้งสองระบบมีหลักการแตกต่างกัน คือ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียนข้อมูล ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากหลักการอ่านข้อมูลของระบบบาร์โค้ดเป็นการใช้แสงในการอ่านรหัสแท่ง ดังนั้นจึงมีข้อเสียคือ จะต้องอ่านรหัสแท่งโดยที่ไม่มีอะไรไปกบปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกันกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องอ่านบาร์โค้ดและอ่านวัตถุได้ทีละชิ้น ในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุจะมีข้อดีคือ สามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับเครื่องอ่านข้อมูลหรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุ เพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลภายในแท็กได้ รวมทั้งการอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุยังสามารถอ่านได้หลาย ๆ แท็กในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบ RFID ทั่วไป

### 2.2.1 แท็ก

โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ สายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและส่งพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ เช่น รหัสสินค้า เป็นต้น แท็กที่มีอยู่โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด เช่น กระดาษ แผ่นฟิล์ม และพลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุที่จะนำไปติด เช่น บัตร เหยี่ยง กระจก จดลากสินค้า และแคปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการจะแบ่งชนิดของแท็กที่มีใช้งานกันอยู่นั้นตามกำลังงานของแท็ก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ 1. แท็กแบบพาสซีฟ (Passive RFID Tag) 2. แท็กแบบแอ็กทีฟ (Active RFID Tag) และ 3. แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active RFID Tag) โดยแต่ละแบบก็จะมี ความแตกต่างกันในการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน ซึ่งจะขอกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบพาสซีฟ (Passive RFID Tag)

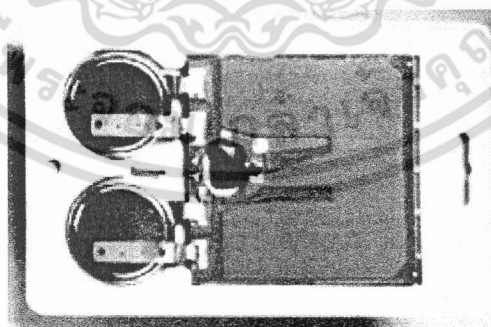
แท็กชนิดนี้ทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใด ๆ แสดงตามรูปที่ 2.2 เพราะภายในแท็กจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ

### 2.2.1.2 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ (Active RFID Tag)

แท็กชนิดนี้จะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท็กและส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งแท็กชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกล มีอายุการใช้งานสั้นและมีราคาแพง มักนิยมใช้กับเครื่องอ่านย่านความถี่ UHF หรือ ไมโครเวฟ

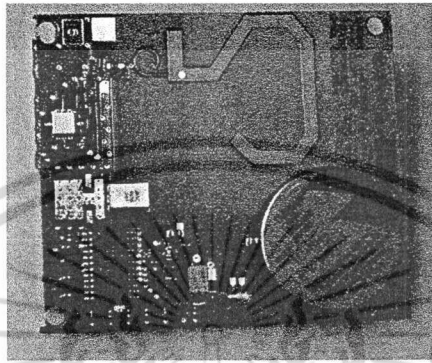


รูปที่ 2.3 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active RFID Tag)

แท็กชนิดนี้จะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท็ก แต่อย่างไรก็ตามแท็กชนิดนี้ยังต้องใช้กำลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านข้อมูลในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะเวลาติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท็กแบบพาสซีฟ



รูปที่ 2.4 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ

### 2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

อุปกรณ์แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุประเภทต่าง ๆ ที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่าง ๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

#### 2.2.2.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and Coin)

แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างวงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท็กชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึง 10 cm

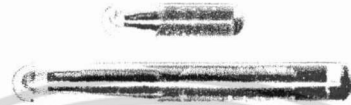


รูปที่ 2.5 แท็กแบบจานและเหรียญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass Housing)

เป็นแท็กที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 mm



รูปที่ 2.6 แท็กแบบกระเปาะแก้ว

### 2.2.2.3 แท็กแบบหุ้มพลาสติก (Plastic Housing)

นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic Package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ แท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภท

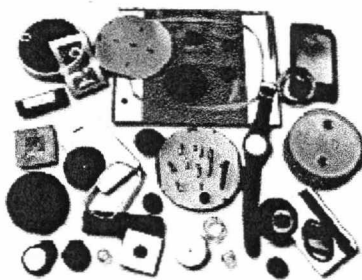


รูปที่ 2.7 แท็กแบบหุ้มพลาสติก

### 2.2.2.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุแท็กลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ

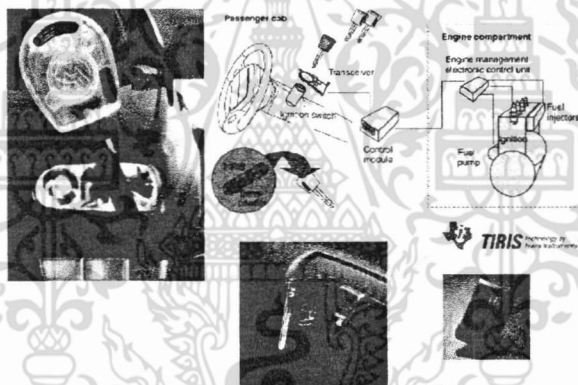
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

#### 2.2.2.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and Key Fob)

แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งอาจมีการนำเจ้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล

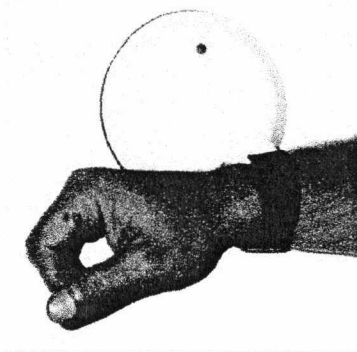


รูปที่ 2.9 แท็กแบบพวงกุญแจ

#### 2.2.2.6 แท็กแบบนาฬิกา

แท็กแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ ค.ศ. 1990-1992 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรเลียที่มีชื่อว่า Sky-Data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless Sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ตู้เล่นสกีสำหรับนักสกีทั้งหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แท็กแบบนาฬิกา

### 2.2.2.7 แท็กมาตรฐาน ID-1 และสมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส

แท็กแบบ ID-1 มีรูปลักษณะภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณ 85.72 คูณ 54.03 มม ความหนา 0.76 มม เป็นแท็กที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าแท็กแบบอื่น ๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก

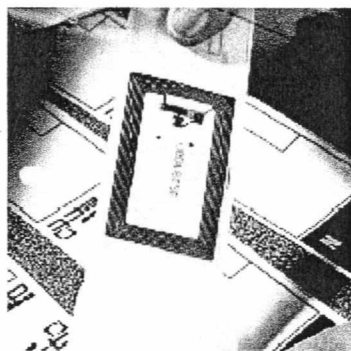


รูปที่ 2.11 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส

### 2.2.2.8 แท็กแบบ Smart Label

เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบาง ๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบพอยล์พลาสติกความหนาเพียง 0.1 มม โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบพอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แท็กแบบ Smart Label

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

แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ชนิดนี้มีความแตกต่างจากแท็กแบบอื่น ๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างแท็กกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้น จะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

### 2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)

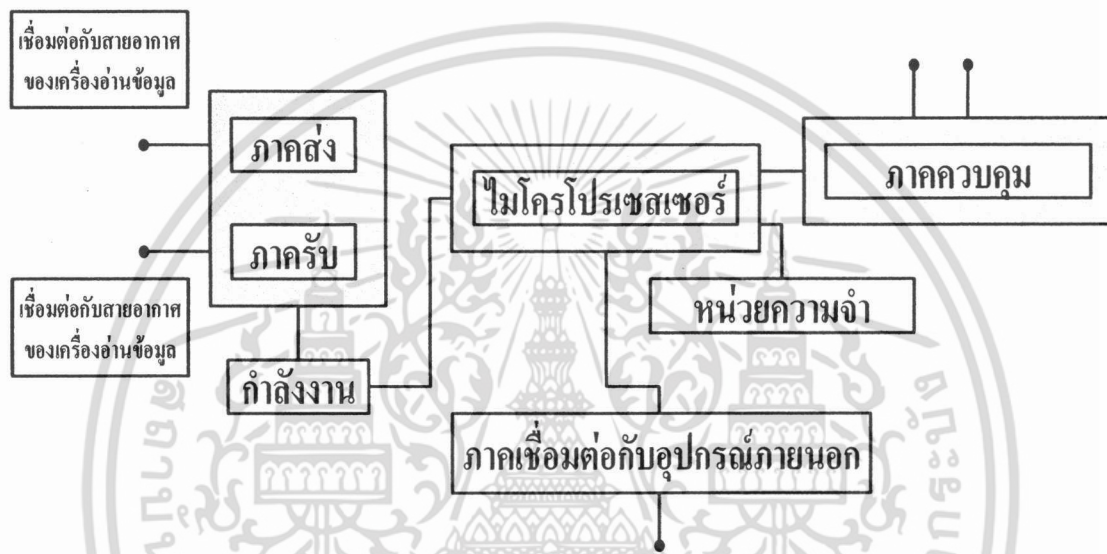
เครื่องอ่านข้อมูลจะสามารถติดต่อกับแท็กได้โดยผ่านทางสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลแต่ละเครื่องสามารถรองรับแท็กได้หลายตัวโดยใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) สายอากาศทำหน้าที่ในการแพร่กระจายสัญญาณ RF จากภาคส่งของเครื่องอ่านข้อมูล ออกมารอบๆ และรับการตอบสนองของแท็ก ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความแม่นยำและถูกต้องในการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะอยู่ใกล้กับเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อลดผลของการสูญเสียจากสายเคเบิล RF (RF cable) โดยเฉพาะเครื่องอ่านข้อมูลชนิดพกพา (Portable) จะรวมสายอากาศเข้าไปในตัวเครื่องอ่านข้อมูล โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูล ก็คือ การเชื่อมต่อสื่อสารกับแท็กเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลภายในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ [1]-[2]

- ภาคส่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) สัญญาณวิทยุ
- ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor)
- หน่วยความจำ (Memory)
- เซ็นเซอร์ (Sensor)
- ภาคควบคุม (Controller)
- ภาคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (In/out Interface)
- แหล่งจ่ายกำลังงาน (Power Supply)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายอากาศ (Antenna)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate Size) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล

## 2.2.4 คุณลักษณะของอุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

### 2.2.4.1 ลักษณะการทำงาน

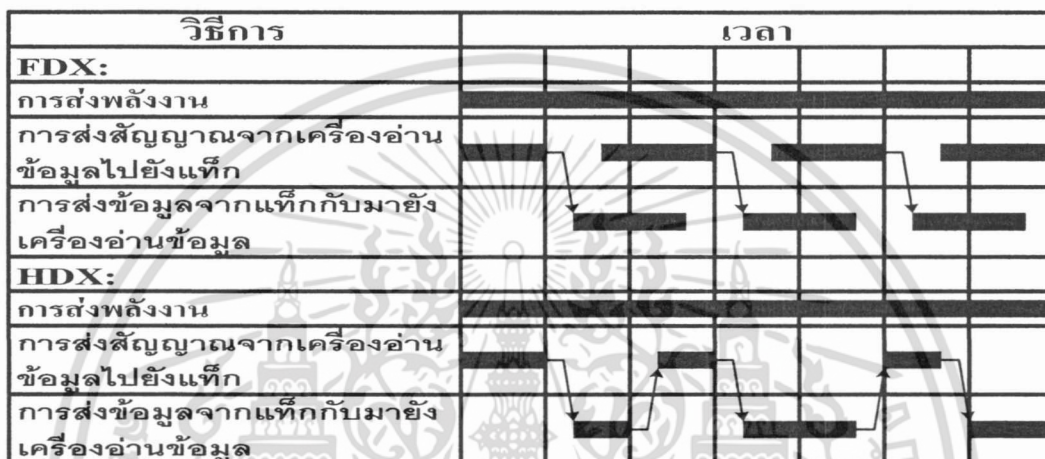
อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ (RFID) ทั้งแท็กหรือเครื่องอ่านข้อมูลจะมีรูปแบบการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) / Half Duplex (HDX)

#### 1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX)

เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับแท็กที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่แท็กส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่านข้อมูลหรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตัวเองทำให้ส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาได้สูงกว่า ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากแท็กแต่ละตัว ให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ Load Modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full Duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กกับมายังเครื่องอ่านข้อมูล (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex

## 2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half Duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูล ไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กกับมายังเครื่องอ่านข้อมูล (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ดังรูปที่ 2.14

### 2.2.4.2 ปริมาณข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็ก RFID จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่า ความจุข้อมูล (Data capacity) ไล่ขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลายๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างแท็ก RFID อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

### 2.2.4.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็ก RFID ตามขีดความสามารถในการโปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใดๆ ตามที่ได้รับคำสั่งข้างมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็ก RFID ที่สามารถทำการ โปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านข้อมูลได้ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องราวเทคนิค

#### 2.2.4.4 แหล่งกำลังงาน (Power Supply)

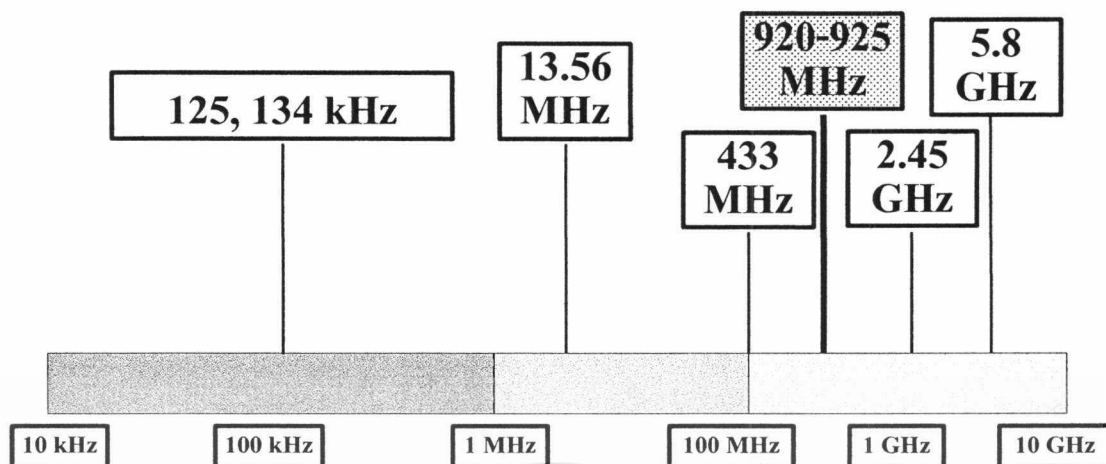
เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็ก RFID ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟ (Passive transponder) ซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอคทีฟ (Active Transponder) ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

#### 2.2.4.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency Range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating Frequency) ในมาตรฐาน RFID นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านข้อมูลทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีแท็กอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากแท็กจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสารโดยทั่วไป สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านหลักได้แก่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (ย่านความถี่ต่ำระยะการอ่านประมาณ 10 - 20 เซนติเมตร และย่านความถี่สูงระยะการอ่านประมาณ 1 เมตร) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้ในงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (ระยะการอ่านประมาณ 1 - 10 เมตร) เช่นระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ในแต่ละประเทศมีการอนุญาตให้ใช้ความถี่ของระบบ RFID ในย่านความถี่สูงยิ่งแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เช่น ยุโรป คือ 866 - 869 MHz อเมริกาเหนือและใต้ คือ 902 - 928 MHz ญี่ปุ่น คือ 950 - 956 MHz ส่วนในประเทศไทย คือ 920 - 925 MHz และสุดท้ายคือ ย่านความถี่ไมโครเวฟ (ระยะการอ่านไกลกว่า 10 เมตร) ซึ่งใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (wireless LAN) ในส่วนของการใช้งาน RFID ในประเทศไทย เช่น การขนส่ง (บัตรทางด่วนและบัตรโดยสารรถไฟฟ้ามหานคร) ห้องสมุดฉลาด การควบคุมการเข้าออกสถานที่ (บัตรพนักงานและบัตรจอดรถ) การจัดการสายการผลิตและการขนส่ง ปศุสัตว์ (การให้อาหารและการติดตามโรค) เอกสารราชการ (หนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์และบัตรประชาชน) เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะในย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดและมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

เนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูงระยะทางในการส่งไกลและโครงสร้างของสายอากาศที่มีไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่ UHF จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอสายอากาศแบบระนาบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.4.6 มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

การนำมาตรฐานมาใช้กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบนี้ถือว่าเป็นสิ่งที่ซับซ้อน แต่ก็มี ความพยายามนำมาใช้อย่างต่อเนื่อง มาตรฐานที่มีอยู่นั้นครอบคลุมใน 4 เรื่อง ของการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ คือ มาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ (Air interface standard) มาตรฐานปริมาณความจุของข้อมูล และการเข้ารหัส (Data content and encoding) มาตรฐานความเข้ากันได้ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ (Conformance) มาตรฐานการทำงานร่วมกันระหว่างการใช้งานกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

มาตรฐานหลักๆ ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ ในปัจจุบันมี 2 ค่าด้วยกัน คือ ISO และ EPC Global ซึ่ง ISO ก็จะมีมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ ในย่าน UHF คือ 18000-6A กับ 18000-6B ส่วนทางด้าน EPC Global ก็จะมีมาตรฐานออกมาสองรุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global Gen 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Class 0 กับ Class 1 Tag อีกรุ่นหนึ่งคือ EPC Global Gen 2 ซึ่งเตรียมไว้สำหรับ Class 1 ขึ้นไป แต่ตอนนี้ใช้กันหลักๆก็จะมีแต่เฉพาะ 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

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุสร้างขึ้นมาใช้ในสาขาต่างๆ 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 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุ โดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการติดต่อสื่อสารกันผ่านอากาศ

ตารางที่ 2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังงานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ในประเทศต่างๆ

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
ดูนิเซีย	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 อนุญาตให้ใช้ 4 W EIRP และสำหรับ 20 mW EIRP ไม่ต้องมีใบอนุญาต
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 และที่ความถี่ 868 MHz อนุญาตให้ใช้ 50 mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเทศ/ทวีป	สถานะ	ความถี่ (MHz)	กำลังงาน	เทคนิค	หมายเหตุ
		919-923	2 W ERP		กำลังงาน 2 W ERP ไม่ต้องมีใบอนุญาต 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		
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	ตรงกับย่านความถี่ที่อนุญาตของทหาร
เนเธอร์แลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
สหพันธรัฐรัสเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ต้องใช้ใบอนุญาตเท่านั้น
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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเทศ/ทวีป	สถานะ	ความถี่ (MHz)	กำลังงาน	เทคนิค	หมายเหตุ
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 ได้มีการออกกฎข้อบังคับไว้แล้วหรือกำลังจะนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้

IP แสดงถึง คาดการณ์ว่าจะออกกฎข้อบังคับภายใน 6-12 เดือนข้างหน้า

FHSS แสดงถึง Frequency Hopping Spread Spectrum

LBT แสดงถึง Listen Before Talk

## 2.2.5 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

### 2.2.5.1 ความถี่ใช้งาน

ในย่านความถี่ช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุจะใช้รูปแบบการส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่ย่านความถี่สูงยิ่ง 860-960 MHz และย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45 และ 5.8 GHz อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุมีการสื่อสาร โดยจะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนของการดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ พบว่า ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz ถึง 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz

ส่วนการเลือกใช้อุปกรณ์ในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าอุปกรณ์ที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์ที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นต้องการแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายๆ ประการ สิ่งที่ต้องพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ต่ำ คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากเป็นการรับส่งข้อมูลที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการ คือ ตำแหน่งของแท็ก ระยะห่างขั้นต่ำระหว่างแท็กแต่ละตัวกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็กและความเร็วในการอ่าน/เขียนข้อมูลของแท็ก

### 2.2.5.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันตัวตนของแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุและการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้นๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

### 2.2.5.4 ขนาดของหน่วยความจำ

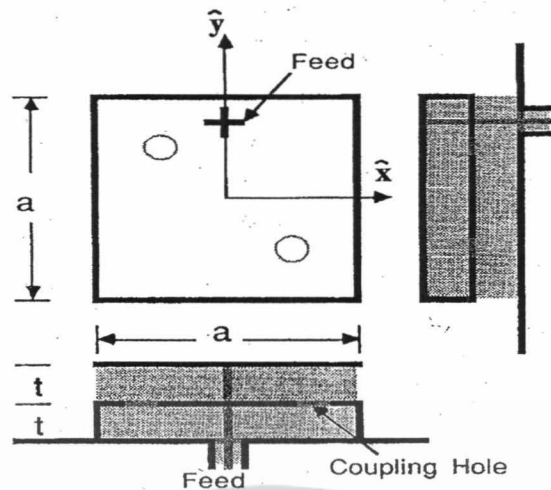
ต้นทุนของแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายในแท็ก การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อยหรือในบางกรณีอาจใช้แท็กแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือแท็กทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

## 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ

### 2.3.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน

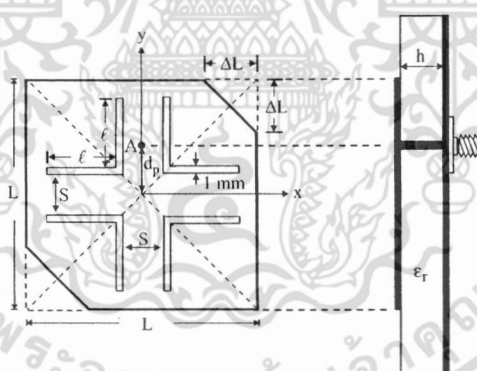
เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีอยู่เดิมโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและมีการใช้ตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริก [7] - [15] ซึ่งทำให้เกิดค่าการสูญเสียในตัวกลางไดอิเล็กตริกส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายต่ำกว่าสายอากาศแบบแผ่นวงรีที่นำเสนอ ตัวอย่างงานวิจัยที่มีมาก่อน เช่น สายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.16 เป็นสายอากาศไมโครสตริปที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบวงกลมของ C. S. Lee และคณะ สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 1996 จากรูปจะพบว่าสายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่มีสองชั้น โดยที่ในแต่ละชั้นจะมีผนังที่เป็นโลหะบางๆ ดังนั้นจึงทำให้สายอากาศสร้างได้ยาก นอกจากนี้ยังคงใช้วัสดุฐานรองซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 ทำให้เกิดการสูญเสียในสารไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง สายอากาศนี้มีความถี่กลางที่ 2.446 GHz และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม โดยคิดที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 6 dB เท่ากับ 1.63 % ซึ่งถือว่าเป็นช่วงแถบความถี่โพลาไรซ์ที่แคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการโพลาริไซซ์แบบวงกลมป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียว [7]

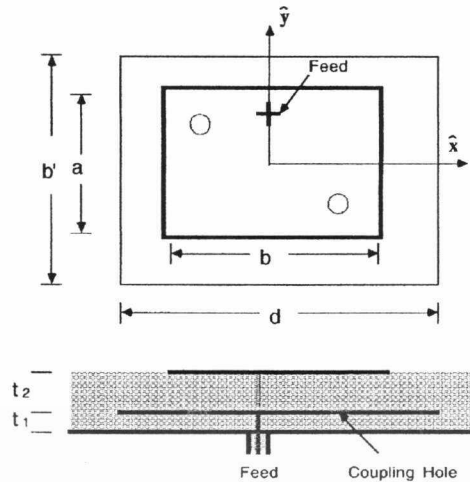
สายอากาศไมโครสตริปของ W. S. Chen และคณะตามรูปที่ 2.17 ที่มีร่องเชื่อมต่อโค้งงอ และใช้วัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กตริก มีการโพลาริไซซ์เป็นแบบวงกลม สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1998 ซึ่งสายอากาศนี้มีความถี่กลางอยู่ที่ 1.711 GHz อัตรายาวที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาริไซซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแฉกไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 0.8 % ซึ่งถือว่าเป็นช่วงแถบความถี่โพลาริไซซ์ที่แคบ



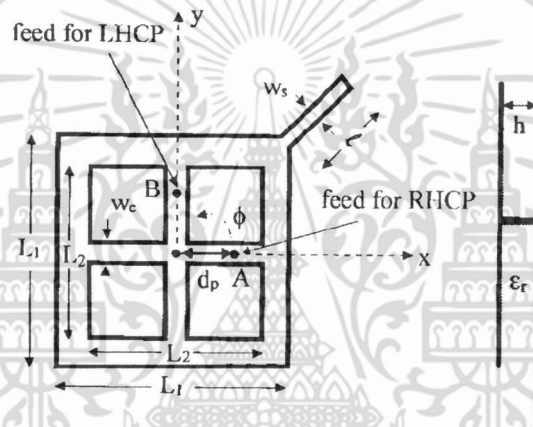
รูปที่ 2.17 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการโพลาริไซซ์แบบวงกลมและมีช่องเชื่อมต่อโค้งงอ [8]

ในรูปที่ 2.18 เป็นสายอากาศไมโครสตริปที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบวงกลมของ C. S. Lee และคณะ สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1999 จากรูปจะพบว่าสายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่มีสองชั้น โดยที่ในแต่ละชั้นจะมีการใช้วัสดุฐานรองซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 ทำให้เกิดการสูญเสียในสารไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง สายอากาศนี้มีความถี่กลางที่ 2.098 GHz และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาริไซซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแฉกไม่เกิน 6 dB เท่ากับ 2.4 % ซึ่งถือว่าเป็นช่วงแถบความถี่โพลาริไซซ์ที่แคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 สายอากาศไมโครสตริปที่มีการ โฟลราไรซ์แบบวงกลมป้อนสัญญาณตำแหน่งเดียว [10]



รูปที่ 2.19 สายอากาศไมโครสตริปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับสตริปไข่  
สำหรับการ โฟลราไรซ์แบบวงกลม [11]

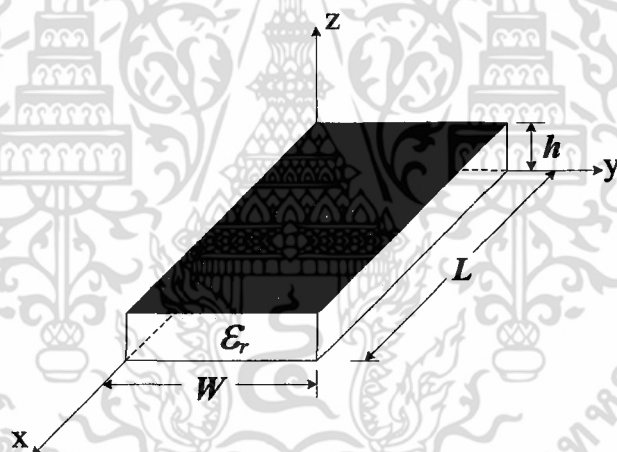
สายอากาศในรูปที่ 2.19 เป็นสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้เทคนิคการเจาะร่องเชื่อมต่อ ร่วมกับการป้อนสัญญาณบนแผ่นสตริปไข่เพื่อทำให้สายอากาศมีการ โฟลราไรซ์เป็นแบบวงกลม ซึ่งเป็นของ W. S. Chen และคณะ สร้างขึ้นใน ปี ค.ศ. 1999 สายอากาศนี้มีการใช้วัสดุฐานรองซึ่งมี ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 ทำให้เกิดการสูญเสียในสาร ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง สายอากาศ นี้มีความถี่กลางที่ 1.725 GHz และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการ โฟลราไรซ์เป็นแบบวงกลมที่แคบ ซึ่งคิดที่อัตราส่วนแค้นไม่เกิน 3 dB มีค่าเท่ากับ 0.93 %

### 2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปได้เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ในทศวรรษที่ 50 โครงสร้างของ สายอากาศไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและ ลักษณะการป้อนสัญญาณ โครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า แผ่นระนาบกราวด์และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยส่วนใหญ่จะมีสารไดอิเล็กตริกซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อยู่ตรงกลางมีความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฐานรองแสดงด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant:  $\epsilon_r$ ) และค่าของ Loss Tangent  $\delta$  โดยทั่วไปสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถทำงานที่โหมดหลัก (Fundamental Mode) คือ  $TM_{01}$  หรือ  $TM_{10}$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปมีคุณสมบัติที่เป็นข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ เช่น มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปจะมีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำ ทนกำลังงานได้ต่ำ ค่า  $Q$  สูง ความบริสุทธิ์โพลาไรซ์ไม่ดี (Poor Polarization Purity) และช่วงกว้างแถบความถี่แคบ เป็นต้น

### 2.3.2.1 ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรง (Cavity Resonance)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับ โพรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามรูปที่ 2.20 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

โดยที่

$h$  คือ ความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$L$  คือ ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $W$  คือ ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก
- $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
- $m$  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

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

โดยที่

$v_0$  คือ ความเร็วของแสง

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

เมื่อ  $h < \frac{L}{2} < W < L$

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

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

แต่ในกรณี  $h < W < \frac{L}{2}$

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

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

และในกรณี  $h < L < W$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่เป็น  $TM_{010}^x$  และสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการที่ 2.3

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

### 2.3.2.2 ลักษณะการป้อนสัญญาณ

กลไกการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ โดยทั่วไปเทคนิคการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวแพร่กระจายคลื่น นั่นคือเทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป (Microstrip Line) และเทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเซียล (Coaxial Probe)
2. เทคนิคการป้อนสัญญาณโดยการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า (Coupling) ซึ่งจะอาศัยหลักการเชื่อมต่อกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ นั่นคือ เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ (Aperture Coupling) และเทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ (Proximity)

เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงกับขอบของตัวแพร่กระจายคลื่น เทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้กับวัสดุฐานรองที่บาง

เทคนิคการป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เป็นสายโคแอกเซียล เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลเชื่อมต่อกับตัวแพร่กระจายคลื่นผ่านทางช่องในตัวกลางไดอิเล็กตริก ส่วนตัวนำด้านนอกเชื่อมต่อกับกราวด์ของสายอากาศไมโครสตริป ข้อดีของการป้อนสัญญาณแบบนี้ คือ สามารถป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศได้ทุกตำแหน่ง แต่ข้อเสีย คือ จะทำให้มีความกว้างแถบความถี่ที่แคบ

เทคนิคการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อ เป็นการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศโดยที่เส้นไมโครสตริปจะแยกออกจากตัวแพร่กระจายด้วยระนาบกราวด์ ดังนั้นการป้อนสัญญาณจากเส้นไมโครสตริปให้กับตัวแพร่กระจายคลื่นจึงอาศัยการเชื่อมต่อผ่านทางช่องเชื่อมต่อบนระนาบกราวด์ เนื่องจากการป้อนสัญญาณแบบนี้ทำให้สายอากาศมีหลายชั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทคนิคการป้อนสัญญาณวิธีอื่นๆ แต่ทำการออกแบบได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการเชื่อมต่อในระยะใกล้ จะมีเส้นไมโครสริปอยู่ระหว่างวัสดุฐานรองสองชนิดที่ต่างกัน และมีตัวแพร่กระจายคลื่นอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นบน ส่วนระนาบกราวนด์จะอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นล่าง

### 2.3.2.3 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 ประกอบไปด้วยลำคลื่นต่างๆ คือ ลำคลื่นหลัก (Major or main lobe) ลำคลื่นย่อย (Minor lobes) ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back lobes)

ลำคลื่นหลัก คือ ลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงมากกว่าลำคลื่นอื่น

ลำคลื่นย่อย คือ ลำคลื่นอื่นในนอกเหนือจากลำคลื่นหลัก 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

#### 2 ขอบเขตของสนาม (Field Regions)

โดยทั่วไปช่องว่างบริเวณรอบๆ สายอากาศถูกแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต คือ สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive Near-Field) สนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายคลื่น (Radiating Near-Field (Fresnel)) และสนามระยะไกล (Far-field (Fraunhofer))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ คือ ขอบเขตของสนามระยะใกล้ที่ติดกับสายอากาศซึ่งใช้หลักการรีแอกทีฟ

สนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายคลื่น คือ ขอบเขตของสนามของสายอากาศระหว่างสนามระยะใกล้รีแอกทีฟและสนามระยะไกล ถ้ามิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศน้อยกว่าความยาวคลื่น ดังนั้นอาจจะไม่ปรากฏขอบเขตนี้ ขอบเขตด้านในมีระยะเป็น  $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  และขอบเขตด้านนอกเป็น  $R < 2D^2/\lambda$  โดยที่  $D$  คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

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

### 2.3.2.4 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

### 2.3.2.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศที่เกี่ยวกับสนามระยะไกล สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นกับระยะทางยกกำลังสอง

กำลังงานทั้งหมดหาได้จากการอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตลอดมุมตันของ  $4\pi$

### 2.3.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic)

ถ้าไม่มีการระบุทิศทาง หมายความว่า ทิศทางที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด

สำหรับสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับหนึ่ง เนื่องจากค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ( $U$ ) ค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ( $U_{max}$ ) และค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) มีค่าเท่ากัน

โดยทั่วไปค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะแสดงในหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งสามารถหาได้จากการแปลงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)

### 2.3.2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศจะใช้เพื่อคำนึงถึงค่าการสูญเสียในส่วนต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสูญเสียจากการไม่แมตช์ของสายนำสัญญาณกับสายอากาศและการสูญเสียภายในตัวสายอากาศ เช่น การสูญเสียในตัวนำ การสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก เป็นต้น

โดยปกติแล้วในการทดสอบสายอากาศเพื่อหาค่าประสิทธิภาพนั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพการสะท้อนของสายอากาศและค่าประสิทธิภาพของการสูญเสียในตัวนำไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ

### 2.3.2.8 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก โดยที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีความสัมพันธ์กับกำลังงานในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิกและมีค่าเท่ากับกำลังงานที่สายอากาศได้รับ ( $P_m$ ) หากด้วย  $4\pi$  อัตราขยายของสายอากาศโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ อัตราขยายที่ไม่ได้คิดผลของการสูญเสียจากการสะท้อนและความไม่ตรงกันของโพลาริซชันของสายอากาศ และอัตราขยายที่คิดรวมผลของการสูญเสียจากการสะท้อนและความไม่ตรงกันของโพลาริซชันของสายอากาศ

### 2.3.2.9 ช่วงกว้างแถบความถี่

ช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณลักษณะอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้หรืออาจจะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น การโพลาริซชัน อัตราขยาย ประสิทธิภาพของสายอากาศ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เป็นต้น ที่สามารถทำงานได้ดี

จากคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะเป็นตัวกำหนดช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ที่ใช้งานจะต้องมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน และอัตราส่วนคลื่นนิ่งต้องมีค่าไม่เกิน 2:1

ช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น ดังนี้ คือ

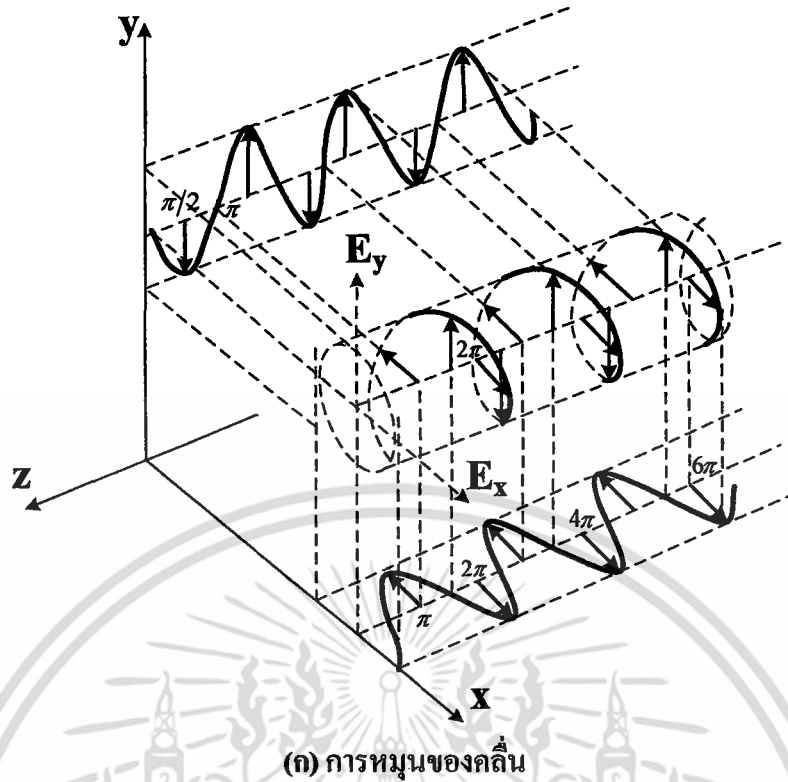
- สายอากาศที่มีช่วงกว้างแถบความถี่แคบ (Narrowband Antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่แคบ ซึ่งจะแสดงช่วงกว้างแถบความถี่เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความถี่กลาง
- สายอากาศที่มีช่วงกว้างแถบความถี่กว้าง (Wideband Antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า  $f_H$  มากกว่า  $f_L$  ประมาณ 40 เท่า และจะแสดงเป็นอัตราส่วน
- สายอากาศที่มีช่วงกว้างแถบความถี่อิสระ (Frequency Independent Antenna) คือ สายอากาศที่มีการใช้งานในช่วงความถี่กว้างมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า  $f_H$  มากกว่า  $f_L$  ประมาณ 80 เท่า

โดยที่

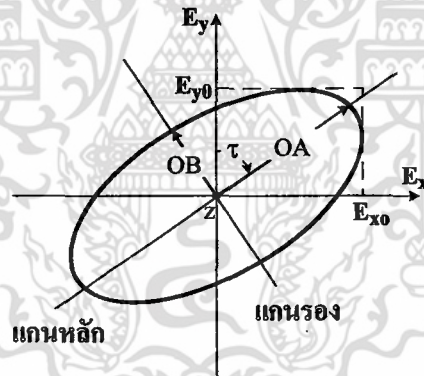
- $f_H$  คือ ความถี่ที่สูงกว่า  $f_L$   
 $f_L$  คือ ความถี่ที่ต่ำกว่า  $f_H$   
 $f_c$  คือ ความถี่กลางระหว่าง  $f_H$  และ  $f_L$

### 2.3.2.10 การโพลาไรซ์

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



(ก) การหมุนของคลื่น



(ข) วงรีของการโพลาไรซ์

รูปที่ 2.21 การหมุนของคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าและวงรีของการโพลาไรซ์ที่  $z=0$ 

การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ตลอดการเดินทางของคลื่น

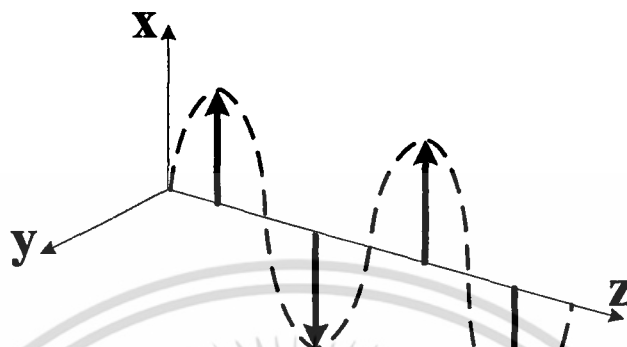
สำหรับคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีความแตกต่างของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ในแนวตั้งและในแนวนอน เป็นดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

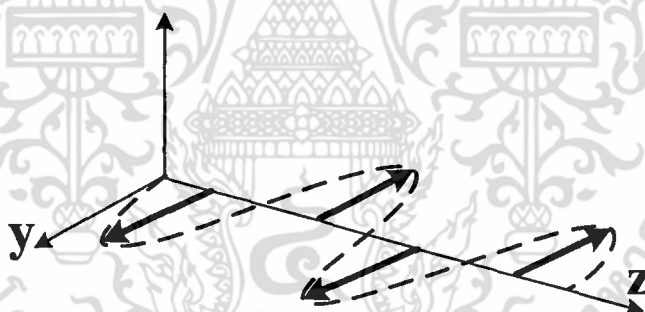
สามารถแบ่งชนิดของการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical Polarization: VP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ในแนวตั้งตลอดการเดินทางของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน (Horizontal Polarization: HP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ในแนวนอนตลอดการเดินทางของคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน

- การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวเฉียง (Slant Polarization: SP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) คงที่ในแนวเฉียงตลอดการเดินทางของคลื่น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

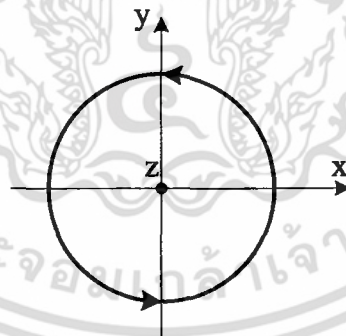
$$|E_x| = |E_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (2.6)$$

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

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

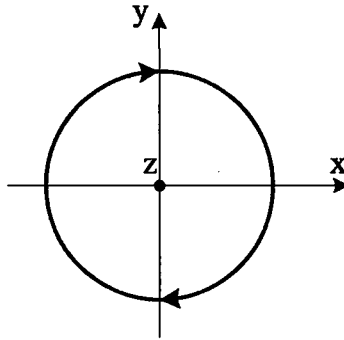
จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 พบว่า สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\bar{E}$ ) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนขวา (Right-Handed CP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\bar{E}$ ) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise: CCW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง  $z$ ) แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงกลมหมุนซ้าย (Left-Handed CP)

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

- กรณี 1: 1.1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ  
 1.2. ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากันแล้ว  
 1.3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับ

$$\text{จำนวนเท่าของ } \frac{\pi}{2}$$

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

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

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

- กรณี 2: 2.1. ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ  
 2.2. ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสองต้องมีขนาดที่ไม่เท่ากันแล้ว  
 2.3. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) ทั้งสอง ต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับ

จำนวนเท่าของ  $\pi$

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

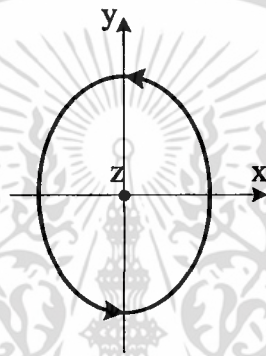
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad n=0,1,2,\dots \text{ สำหรับ CW} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

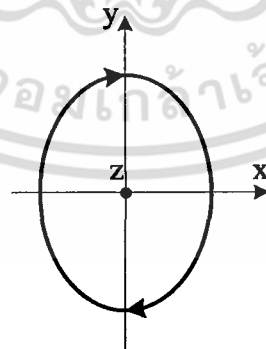
จากสมการที่ 2.9 ถึง 2.14 สามารถแบ่งการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนขวา (Right-Handed EP)

- การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทาง z) แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีหมุนซ้าย (Left-Handed EP)

ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบเชิงวงรีจะมีเส้นการกวาดของเวกเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของวงรีที่มีมุมเอียง (Tilted Ellipse) ดังแสดงในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.21 (ข) โดยอัตราส่วนของแกนหลัก (Major Axis) ต่อแกนรอง (Minor Axis) เรียกว่า อัตราส่วนของแกน (Axial Ratio) สามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

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

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

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

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน y จะแทนด้วยมุม  $\tau$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศที่มีการ โพลารไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีข้อดี คือ สายอากาศสร้างง่ายแต่จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง โพลารไรซ์มีค่าสูง ส่วนสายอากาศที่มีการ โพลารไรซ์เป็นแบบวงกลม มีข้อดี คือ การสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง โพลารไรซ์มีค่าต่ำ แต่สายอากาศสร้างยากกว่าสายอากาศแบบเชิงเส้น

### 2.3.3 เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการสื่อสารแบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล

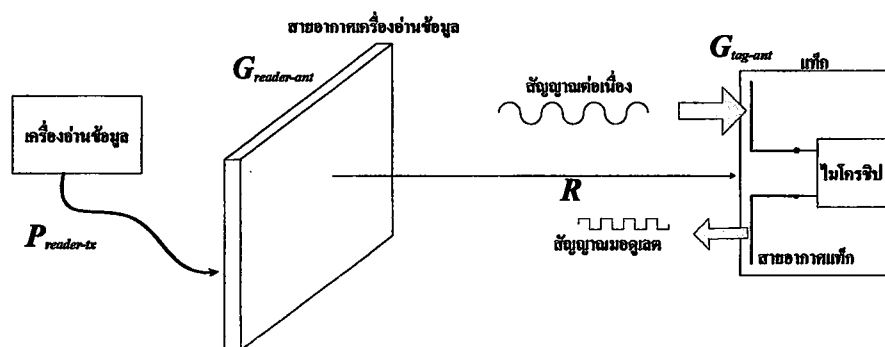
ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกล จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิป (Chip) ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ และสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ

#### 2.3.3.1 การออกแบบสายอากาศ RFID

หลักเกณฑ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับสมรรถนะของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ คือ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแท่งประกอบด้วยสายอากาศและชิป ซึ่งคุณลักษณะของชิปจะถูกกำหนดจากทางผู้ผลิตโดยที่ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ ในการออกแบบสายอากาศเพื่อที่จะให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด โดยที่ได้ทำการเลือกชิปไว้แล้ว รวมทั้งอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น ขนาดของสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และราคา เป็นต้น

#### 2.3.3.2 หลักการทำงาน

สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องมาจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.28 แสดงหลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบพาสซีฟในสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่องซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท่ง หลังจากนั้นสายอากาศของแท่งจะเหนี่ยวนำแรงดัน RF แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิป โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ 1.2 โวลต์ ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปใช้ประมาณ 2.2 โวลต์ เมื่อชิปได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่ 2 สถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นคอนจูเกตเมตซ์และค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อไว้สำหรับมอดูเลตกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.28 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะใกล้

### 2.3.3.3 การติดต่อสื่อสารของระบบ RFID ในสนามระยะใกล้

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัด 2 อย่าง คือ ระยะทางที่มากที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิปและการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัตถุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

#### 1 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ คือไม่มีแหล่งกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับกำลังงานมาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการส่งให้ชิปภายในแท็กทำงาน

เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะใกล้นี้เป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ความถี่ย่าน UHF และความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น

ในรูปที่ 2.28 แสดงระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะใกล้ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ 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 ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศของแท็กมีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาไรซ์เท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของระบบ RFID ในสนามระยะไกล โดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและสายอากาศของแท็กจะมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท็กรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิป ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

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

โดยที่

$\tau$	คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน (Transmission Power Coefficient)
--------	---

ดังนั้นระยะทางที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านได้ไกลที่สุด คือ เมื่อ  $P_{tag-chip}$  มีค่าเท่ากับกำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ( $P_{tag-threshold}$ ) และสามารถหาระยะทางที่มากที่สุดแสดงดังสมการนี้ คือ

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

หรือ

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

โดยที่

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

## 2 การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูลหรือ Uplink Communication โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจายย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจายย้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจายย้อนกลับของแท็ก บนพื้นฐานของสมการ monostatic หรือ Backscatter radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลตที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ

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

โดยที่

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

เมื่อกำลังงานที่รับได้มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ( $P_{\text{tag-threshold}}$ ) จะทำให้ได้ระยะทางที่มากที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจายย้อนกลับและสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

หรือ

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

โดยที่

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

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

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

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางในการอ่านที่มากที่สุดเป็นส่วนหนึ่งกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ เช่น

ค่า EIRP คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็น ไอโซทรอปิก (isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หาได้ดังนี้

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

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

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

2.3.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน

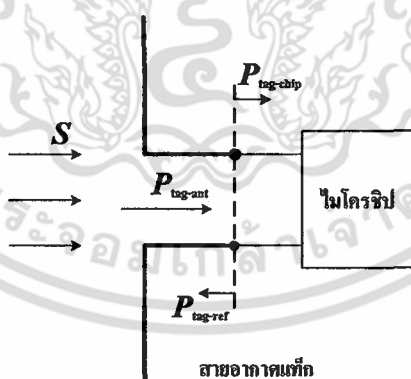
พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล ( $A_{e-max}$ ) ของสายอากาศของแท่งที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน ( $S: W/m^2$ ) แท่งจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิปที่มีอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_T$  กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิป ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ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

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

และ

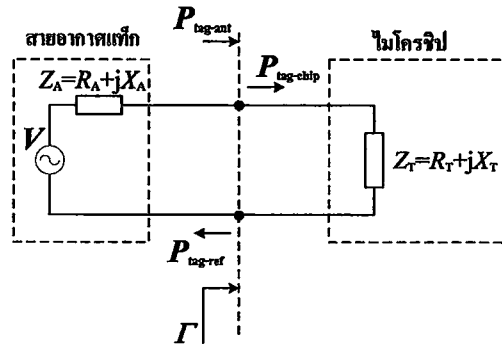
$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.34}$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ  $Z_A$  ของแท่งและอิมพีแดนซ์ของชิป  $Z_T$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิป



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.29 กำลังงานที่ส่งมายังแท่งและวงจรสมมูล

(ก) กำลังงานที่ส่งมายัง โครงสร้างของแท่ง (ข) วงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.29 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป  $Z_T$  จะรวมผลของตัวล่องที่ใส่ชิปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะขึ้นอยู่กับความถี่ 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 ค่าคอนจูเกตของ  $Z_A$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิป คือ

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

สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$P_{tag-chip-max} = P_{tag-ant} = SA_{e-max} \quad (2.40)$$

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

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะ ได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss (RL)) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

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

## 2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF ตัวอย่างเช่น ลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ การสื่อสารแบบการกระจายย้อนกลับ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้กันทั่วไป รวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ลำคลื่นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าอัตราขยายช่วงกว้างแถบความถี่ และการโพลาไรซ์ เป็นต้น

## บทที่ 3

# ผลการวิเคราะห์สายอากาศ

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้องกันสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ UHF ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอจะทำการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมเพื่อให้สามารถใช้งานกับแท่งที่มีลักษณะการวางตัวหลากหลายรูปแบบได้ และในบทนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการในการคำนวณในบทที่ 2 ประกอบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน [7]-[15] จากนั้นจึงจำลองผลตัวสายอากาศและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ได้ ซึ่งระบบนี้มีความต้องการสายอากาศที่ให้การโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ดี มีอัตราขยายที่สูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม รายละเอียดต่างๆ จะนำเสนอด้งหัวข้อต่อไปนี้

### 3.2 แบบจำลองสายอากาศ

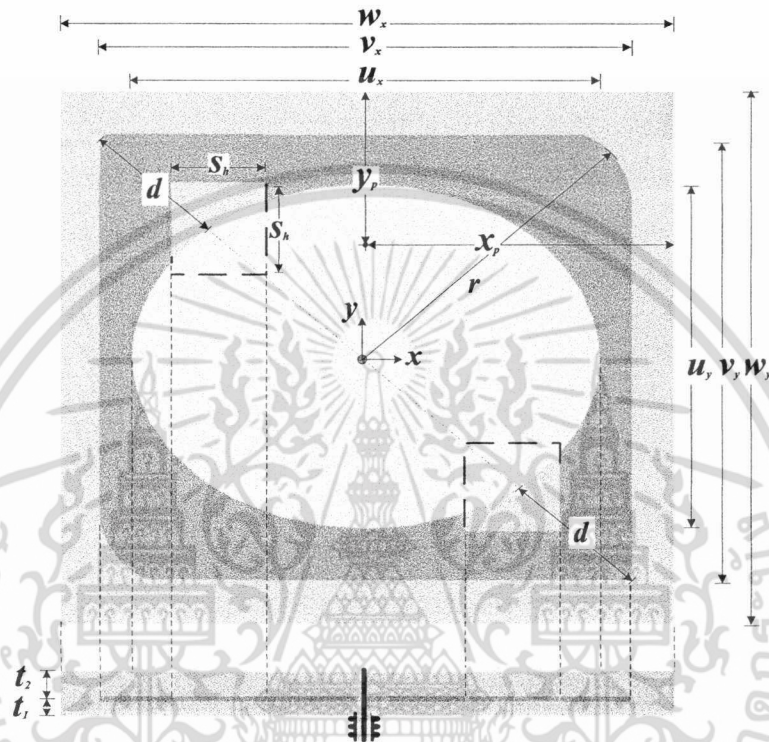
#### 3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศ

สายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยแผ่นโลหะ 3 แผ่น ซึ่งประกอบเป็นสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบ 2 ชั้น คือ ชั้นบนมีลักษณะเป็นแผ่นวงรี โดยมีแกนหลักและแกนรองของวงรีเป็น  $u_x$  และ  $u_y$  ตามลำดับ ชั้นกลางมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความยาวและความกว้างเป็น  $v_x$  และ  $v_y$  ตามลำดับ ในแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางนี้จะมีช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้างและยาวเป็น  $S_h$  ซึ่งวางตัวอยู่บนแนวเส้นทแยงมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและมีจุดศูนย์กลางของช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสห่างจากมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางเป็นระยะ  $d$  นอกจากนี้แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางนี้ยังมีการตัดขอบด้วยส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับ  $r$  ส่วนชั้นล่างสุดมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวและความกว้างเป็น  $w_x$  และ  $w_y$  ตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ของสายอากาศที่มีการป้องกันสัญญาณด้วยโพรบที่วางตัวในแนวแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สายอากาศที่นำเสนอจะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาไรซ์วงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ UHF การออกแบบสายอากาศให้มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาไรซ์วงกลมนี้ทำได้โดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่องเปิดในแผ่นตัวนำชั้นกลางของสายอากาศแบบแผ่นวงรี โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างเป็นสองชั้นซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสองโหมดที่ตั้งฉากกันในแต่ละโพรง การวิเคราะห์สายอากาศทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างสายอากาศ รวมทั้งทำการสร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรง

### 3.3 คุณลักษณะของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ จะเริ่มด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับสายอากาศก่อนโดยการคำนวณพารามิเตอร์ของสายอากาศซึ่งได้มาจากทฤษฎีในบทที่ 2 จากโครงสร้างของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นสองชั้น ดังนั้นในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจะทำการแบ่งสายอากาศออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นล่างและชั้นบน โดยที่โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศชั้นล่างและชั้นบนแสดงดังในรูปที่ 3.2 และ 3.4 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ

ในส่วนของการคำนวณหาขนาดของสายอากาศไมโครสตริปที่มีความสูง ( $h$ ) ของวัสดุฐานร่อนน้อยกว่าความยาว ( $L$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายๆ ( $h \ll L$ ) และมีความสูง ( $h$ ) ของวัสดุฐานร่อนน้อยกว่าความกว้าง ( $W$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายๆ ( $h \ll W$ ) ดังแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.18 เมื่อทำการกำหนดให้ขนาดความกว้างชั้นล่างของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า  $v_y = W$  และต้องการให้เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  โดยที่สายอากาศมีความถี่กลาง ( $f_r$ ) อยู่ที่ 923 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF (ในประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ความถี่ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz) ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดความกว้างชั้นล่างได้จากสมการที่ (2.3)

โดยที่

- $h$  คือ ความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- $L$  คือ ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- $W$  คือ ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบ
- $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
- $v_0$  คือ ความเร็วของแสง
- $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

เนื่องจากสายอากาศที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วัสดุฐานรองที่เป็นอากาศแทนวัสดุที่เป็นสารไดอิเล็กตริก เพราะฉะนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองมีค่าประมาณ 1 ( $\epsilon_r = 1$ ) นำไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.3) และเขียนใหม่ได้เป็น

$$W = v_y = \frac{1}{2(f_r)_{010} \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2(f_r)_{010} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

$$W = v_y = \frac{(3 \times 10^8)}{2(923 \times 10^6) \sqrt{1}} = 16.25 \text{ cm}$$

ดังนั้นความกว้างเริ่มต้นของชั้นล่าง ( $v_y = W$ ) มีค่าเท่ากับ 16.25 cm และขนาดความยาวชั้นล่างของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากำหนดให้  $v_x = L$  ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นได้จากเงื่อนไข ดังนี้ คือ ค่าความยาวของชั้นล่าง ( $v_x = L$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะต้องยาวกว่าความกว้างของชั้นล่าง ( $v_y = W$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ความกว้างของชั้นล่าง ( $v_y = W$ ) จะต้องกว้างกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวชั้นล่างของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ( $h < \frac{L}{2} < W < L$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการคำนวณหาขนาดของสายอากาศชั้นบน โดยที่กำหนดให้ความยาวชั้นบนของสายอากาศไมโครสตริป  $u_x = L$  และความกว้างชั้นบน  $u_y = W$  จากสมการที่ (2.2) สามารถหาความยาวชั้นบนซึ่งต้องการให้เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  และใช้ความถี่กลาง ( $f_r$ ) เดียวกันกับชั้นล่างของสายอากาศ ดังนี้

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

จากสมการที่ 2.2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

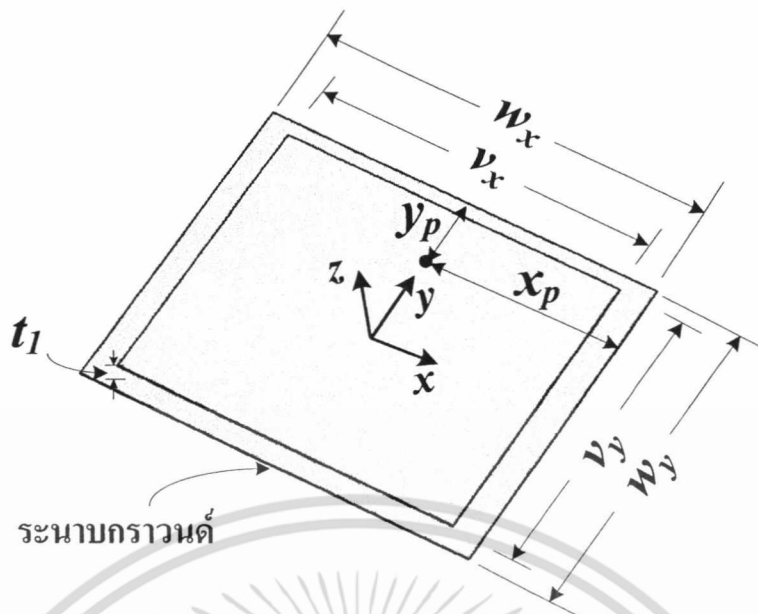
$$L = u_x = \frac{1}{2(f_r)_{100}\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_o}{2(f_r)_{100}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

$$L = u_x = \frac{(3 \times 10^8)}{2(923 \times 10^6)\sqrt{1}} = 16.25 \text{ cm}$$

ดังนั้นความยาวเริ่มต้นของชั้นบน ( $u_x = L$ ) มีค่าเท่ากับ 16.25 cm และความกว้างของชั้นบน ( $u_y = W$ ) หาได้จากเงื่อนไขดังนี้ คือ ความกว้างของชั้นบน ( $u_y = W$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปจะต้องมีความกว้างมากกว่าความสูงของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) และจะต้องน้อยกว่าความยาวของชั้นบน ( $u_x = L$ ) ของสายอากาศไมโครสตริป ( $h < W < L$ )

จากการคำนวณจึงได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริป ดังนี้ คือ ค่าขนาดความกว้างของชั้นล่าง ( $v_y = W$ ) และค่าขนาดความยาวของชั้นบน ( $u_x = L$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 16.25 cm ส่วนค่าขนาดความยาวของชั้นล่าง ( $v_x$ ) และค่าขนาดความกว้างของชั้นบน ( $u_y$ ) ของสายอากาศไมโครสตริปเป็นไปตามเงื่อนไข  $h < \frac{v_x}{2} < v_y < v_x$  และเงื่อนไข  $h < u_y < u_x$  ตามลำดับ

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นล่างที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  แสดงดังในรูปที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังตารางที่ 3.1



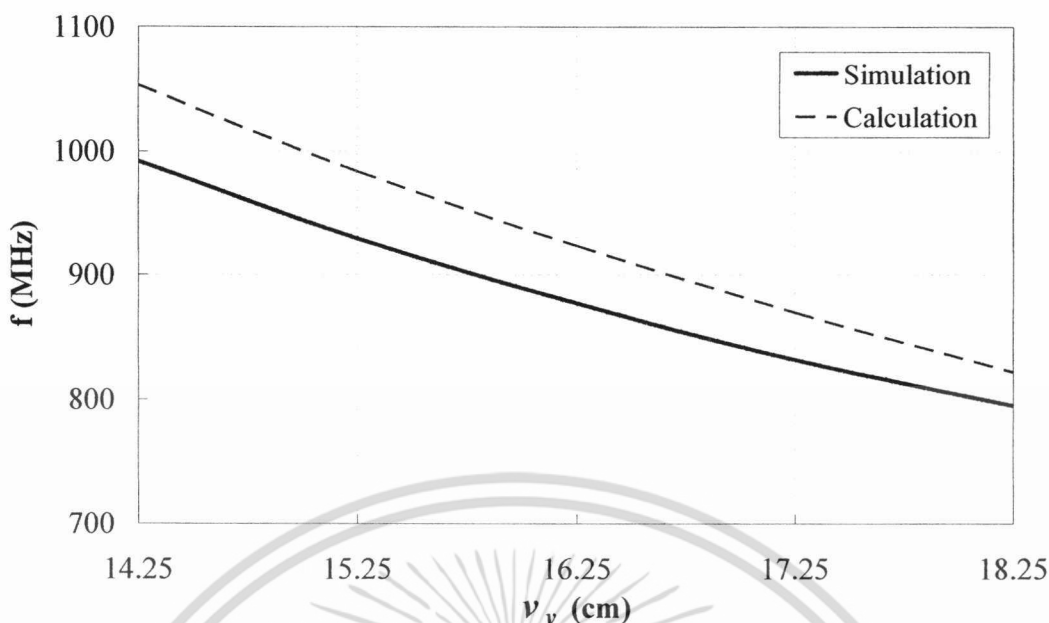
รูปที่ 3.2 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$v_x$	22.80 cm
$v_y$	15.25 cm
$w_x$	23.80 cm
$w_y$	18.40 cm
$t_1$	2.65 mm
$x_p$	11.90 cm
$y_p$	5.25 cm

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 ไปจำลองเป็นสายอากาศเริ่มต้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ( $v_y$ ) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ( $v_y$ ) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์

จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ( $v_y$ ) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ พบว่า ความกว้าง ( $v_y$ ) ของสายอากาศ ส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเป็นอย่างมาก และจะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าที่ได้จากการจำลองผล ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศจึงใช้การจำลองผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศ

ในส่วนของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปชั้นบนที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  แสดงดังในรูปที่ 3.4 และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังตารางที่ 3.2

จากการคำนวณข้างต้น จะได้ว่า  $u_x = 16.25$  cm และความกว้างของชั้นบนหาได้จากเงื่อนไข  $h < u_y < u_x$  ดังนั้นกำหนดให้  $u_y = 12$  cm เป็นค่าเริ่มต้นหลังจากนั้นทำการเปลี่ยนโครงสร้างจากแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าไปเป็นแผ่นวงรีได้โดยอาศัยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงเรขาคณิตกับรัศมีของทรงกระบอกวงกลมและจากสมการความสัมพันธ์ของทรงกระบอกวงกลมกับทรงกระบอกวงรี [5] จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงเรขาคณิตกับรัศมีของทรงกระบอกวงกลมจะได้รัศมีของวงกลม  $a_e$  มีค่าเท่ากับ 8.28 cm และจากความสัมพันธ์ของทรงกระบอกวงกลมกับทรงกระบอกวงรี ดังนี้

$$a_e = \frac{1}{2}(a+b) \quad (3.1)$$

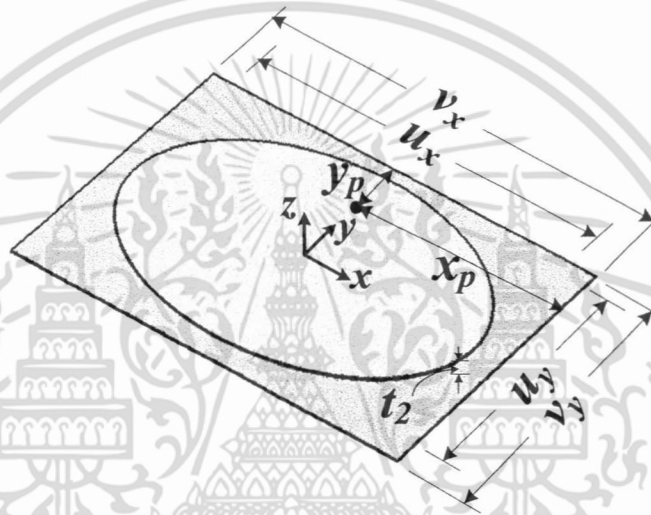
จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a + b = 16.56$$

โดยที่  $a = u_x$ ,  $b = u_y$

เมื่อกำหนดให้  $a = 10$  cm เพราะฉะนั้นจะได้ว่า  $b = 6.56$  cm ซึ่งนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  โดยที่  $a = u_x = 10$  cm และ  $b = u_y = 6.56$  cm โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  แสดงดังในรูปที่ 3.4 และได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3.2

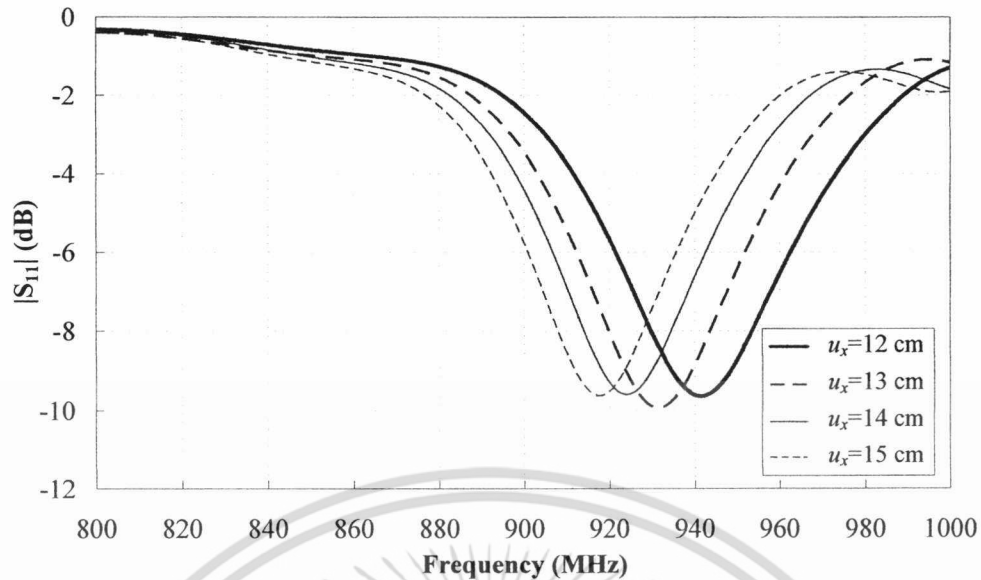


รูปที่ 3.4 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$

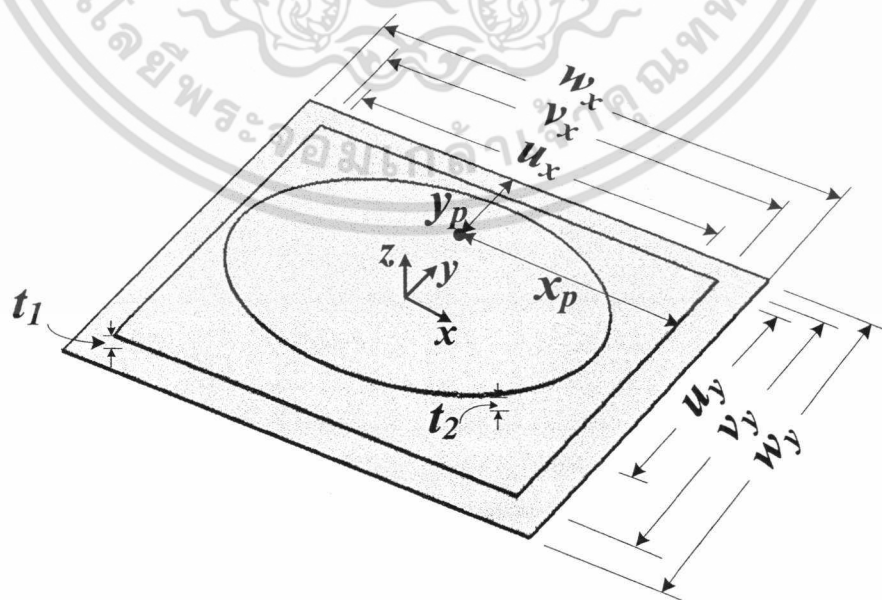
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$u_x$	14.00 cm
$u_y$	9.96 cm
$v_x$	22.80 cm
$v_y$	15.25 cm
$t_2$	6.65 mm
$x_p$	11.90 cm
$y_p$	5.25 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$

จากรูปที่ 3.5 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 มาทำการจำลองผล พบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาว ( $u_x$ ) จะส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ และจากหลักการของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งจะต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสที่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{\pi}{2}$  ดังนั้นจึงนำสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  และที่เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  มาทำงานร่วมกันเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดในการเกิดการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม ซึ่งโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วย โพรบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



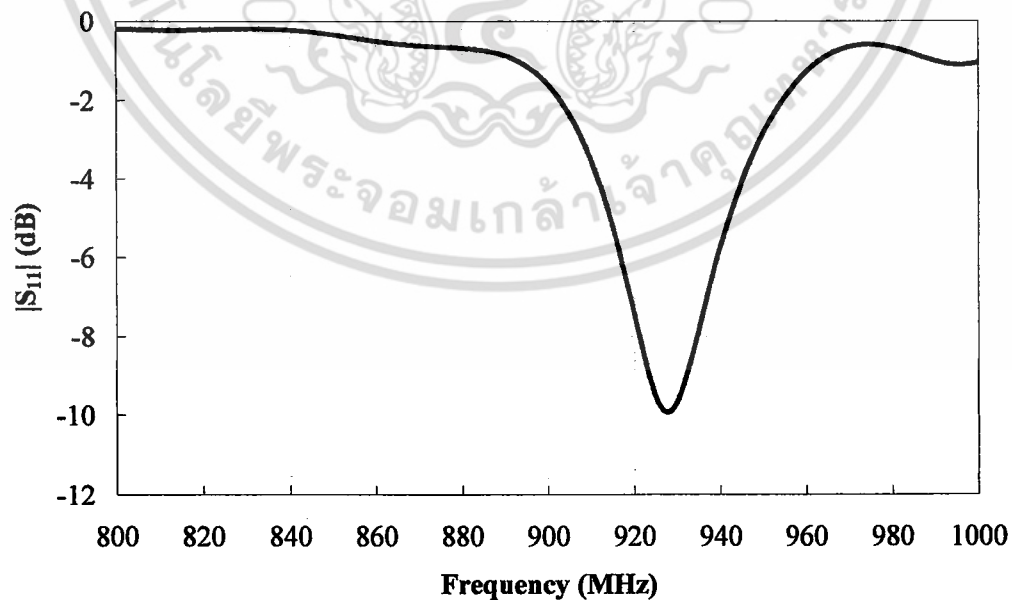
รูปที่ 3.6 โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่างๆ ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$u_x$	16.54 cm
$u_y$	11.93 cm
$v_x$	18.80 cm
$v_y$	15.40 cm
$w_x$	21.80 cm
$w_y$	18.40 cm
$t_1$	2.65 mm
$t_2$	1.10 cm
$x_p$	10.90 cm
$y_p$	3.95 cm

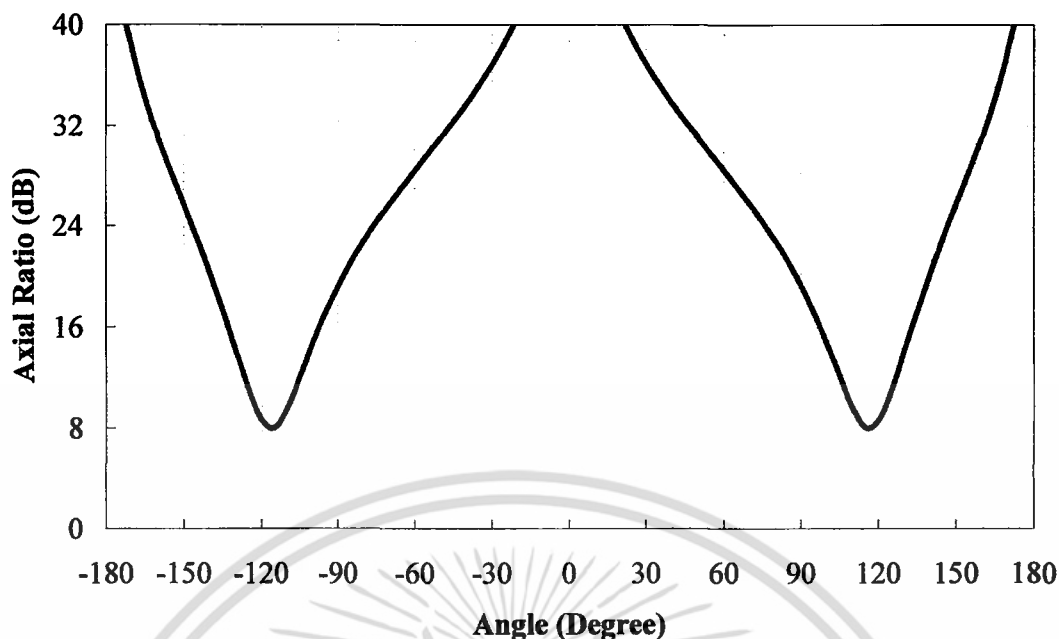
เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3.3 และเมื่อนำไปจำลองแบบสายอากาศเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น พบว่า ผลที่ได้จากการจำลอง คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนแกนแสดงดังในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น

ป้อนสัญญาณด้วย โพรบเป็นฟังก์ชันของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



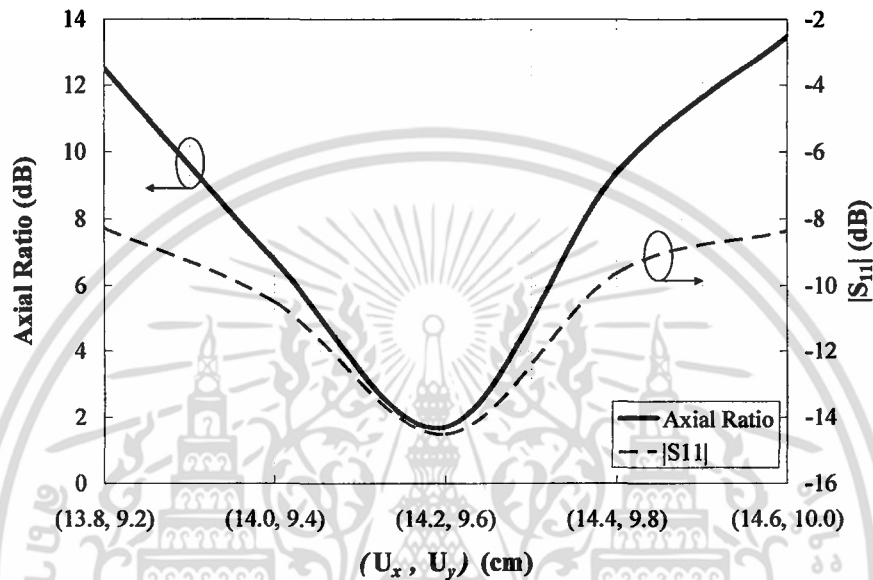
รูปที่ 3.8 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น  
ป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มุมต่างๆ

จากรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีค่ามากกว่า -10 dB และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มุมต่างๆ พบว่า ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ทุกมุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 0 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดการโพลาไรซ์แบบวงกลม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าการสูญเสียย้อนกลับให้มีค่าดีกว่า -10 dB และค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยทำการดัดแปลงโครงสร้างของสายอากาศโดยอาศัยเทคนิคต่างๆ ที่มีใช้กันอยู่ นั่นคือ เทคนิคการเจาะร่องเชื่อมต่อซึ่งทำการเจาะร่องเชื่อมต่อบนแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางจำนวน 2 ร่อง ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเส้นทแยงมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางร่วมกับเทคนิคการตัดขอบของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางด้วย ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่ทำการดัดแปลงโครงสร้างแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยที่สายอากาศจะต้องมีค่าอัตราส่วนแกนน้อยกว่า 3 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับดีกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920-925 MHz) รวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน

### 3.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดแผ่นวงรี ( $u_x, u_y$ )

ในขั้นตอนแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแผ่นวงรี โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ( $u_x, u_y$ ) มีค่าเท่ากับ 16.25 cm และ 12 cm ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของขนาดของแผ่นวงรีที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.9



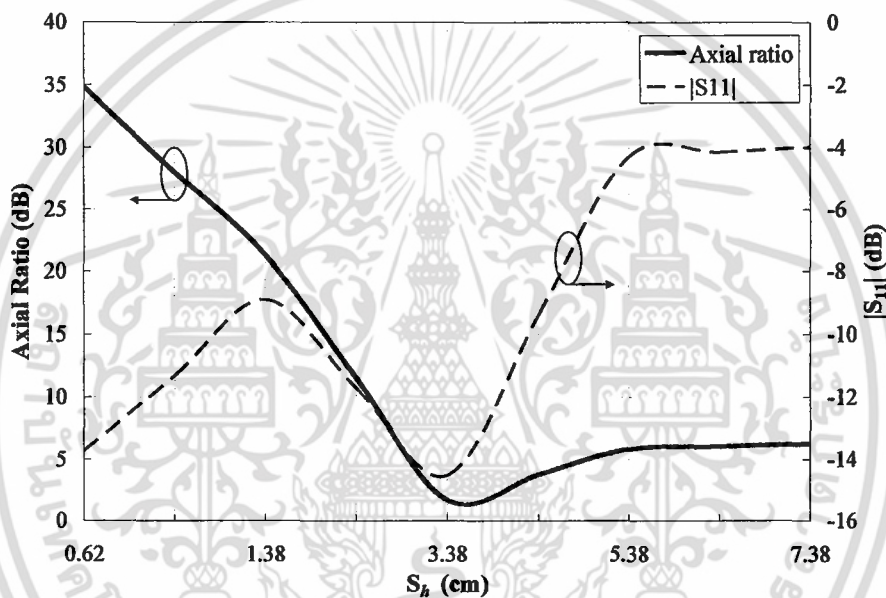
รูปที่ 3.9 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแผ่นวงรี ( $u_x, u_y$ )

จากรูปที่ 3.9 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแผ่นวงรีที่มีแกนหลักเป็น  $u_x$  และแกนรองเป็น  $u_y$  โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของขนาดของแผ่นวงรี พบว่า จะส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกนมากกว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ จากกราฟเมื่อเพิ่มขนาดของแผ่นวงรีในช่วงตั้งแต่ค่าของ  $u_x = 13.8$  cm และค่าของ  $u_y = 9.2$  cm จนถึงค่าของ  $u_x = 14.2$  cm และค่า  $u_y = 9.6$  cm จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำลง แต่ในช่วงตั้งแต่ค่าของ  $u_x = 14.2$  cm และค่าของ  $u_y = 9.6$  cm จนถึงค่าของ  $u_x = 14.6$  cm และค่าของ  $u_y = 10$  cm จะได้ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านี้ ค่าอัตราส่วนแกนจะมีค่าต่ำกว่า 3 dB เมื่อ  $u_x = 14.2$  cm และ  $u_y = 9.6$  cm เท่านั้น จากผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลอง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแกนหลักและแกนรองของวงรี ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของขนาดของแผ่นวงรี ( $u_x, u_y$ ) มีค่าเท่ากับ 14.2 cm และ 9.6 cm ตามลำดับ เนื่องจากที่ค่านี้จะให้ค่าอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดแล้วยังคงให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำที่สุดและดีกว่า -10 dB อีกด้วย ซึ่งจะนำค่าที่ได้นี้ใช้ในการจำลองผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ )

ในขั้นตอนต่อไปนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของขนาดร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) ที่อยู่บนชั้นกลางของสายอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่ร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสนี้จะวางตัวอยู่ในแนวเส้นทแยงมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางของสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 3.4 cm×3.4 cm และทำการกำหนดขนาดของแกนหลักและแกนรองของแผ่นวงรีให้มีค่าเท่ากับ 14.2 cm และ 9.6 cm ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.1 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ )

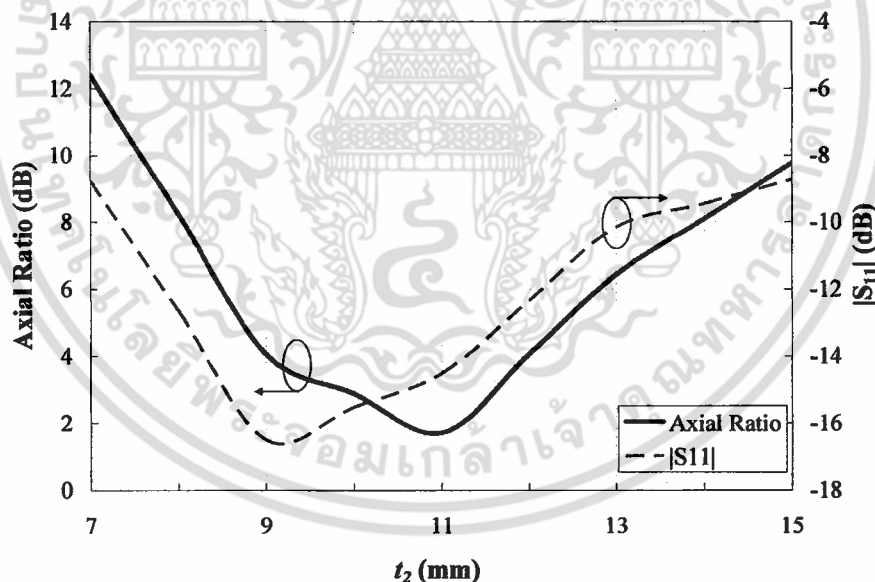
จากรูปที่ 3.10 พบว่า ขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแกนเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.9 กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มค่าขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสในช่วงตั้งแต่ 0.62 cm ถึง 3.38 cm ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนมีการลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงตั้งแต่ 3.38 cm ถึง 7.38 cm จะมีค่าอัตราส่วนแกนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากับ 3.38 cm×3.38 cm จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่า 3 dB ในส่วนของค่าการสูญเสียย้อนกลับ ในช่วงขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งแต่ 0.62 cm ถึง 7.38 cm พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าดีกว่า -10 dB เมื่อขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากับ 3.38 cm×3.38 cm และ 0.62 cm×0.62 cm เท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีค่าเท่ากับ 3.38 cm×3.38 cm จะมีค่าที่ต่ำที่สุดและตรงกับค่าที่ให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนแกนต่ำที่สุดด้วย และจากผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) มีค่าเท่ากับ  $3.38 \text{ cm} \times 3.38 \text{ cm}$  ซึ่งจะนำค่าที่ได้นี้ใช้ในการจำลองผลต่อไป

### 3.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ )

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้น โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $1 \text{ cm}$  และทำการกำหนดขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) เท่ากับ  $3.38 \text{ cm} \times 3.38 \text{ cm}$  ซึ่งเป็นผลการจำลองที่ได้มาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.2 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศที่มีความถี่กลางอยู่ที่  $923 \text{ MHz}$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศ

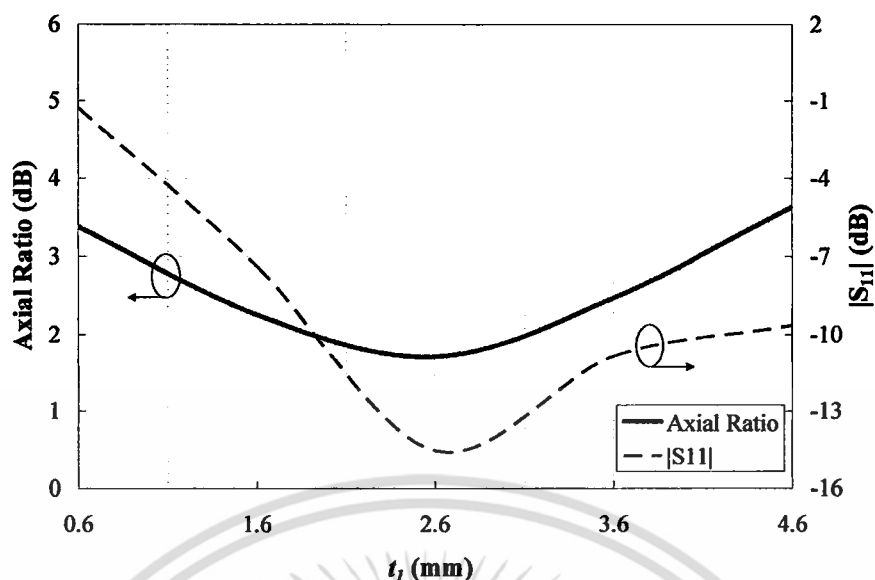
จากรูปที่ 3.11 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศ พบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ที่ทำให้เกิดค่าที่ต่ำที่สุดของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับจะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วนแกนที่มีค่าต่ำที่สุด จะมีค่าเท่ากับ 11 mm และเป็นเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่ต่ำกว่า 3 dB แต่ในส่วนของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าที่ต่ำที่สุดจะมีระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) เท่ากับ 9 mm อย่างไรก็ตามที่ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) เท่ากับ 11 mm ก็ยังคงส่งผลให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ยิ่งไปกว่านั้น จะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) เท่ากับ 11 mm ยังคงทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าที่ต่ำที่สุดรวมทั้งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการกำหนดขนาดของร่องเชื่อมต่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $S_h \times S_h$ ) มีค่าเท่ากับ 3.38 cm $\times$ 3.38 cm ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.10 อีกด้วย ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นมีค่าเท่ากับ 11 mm ซึ่งจะใช้ในการจำลองผลของขั้นตอนต่อไป

### 3.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ )

ในขั้นตอนนี้เป็นารเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ของสายอากาศ โดยมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 mm และทำการกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางและแผ่นวงรีชั้นบน ( $t_2$ ) เท่ากับ 11 mm ซึ่ง ได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.3 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ของสายอากาศ

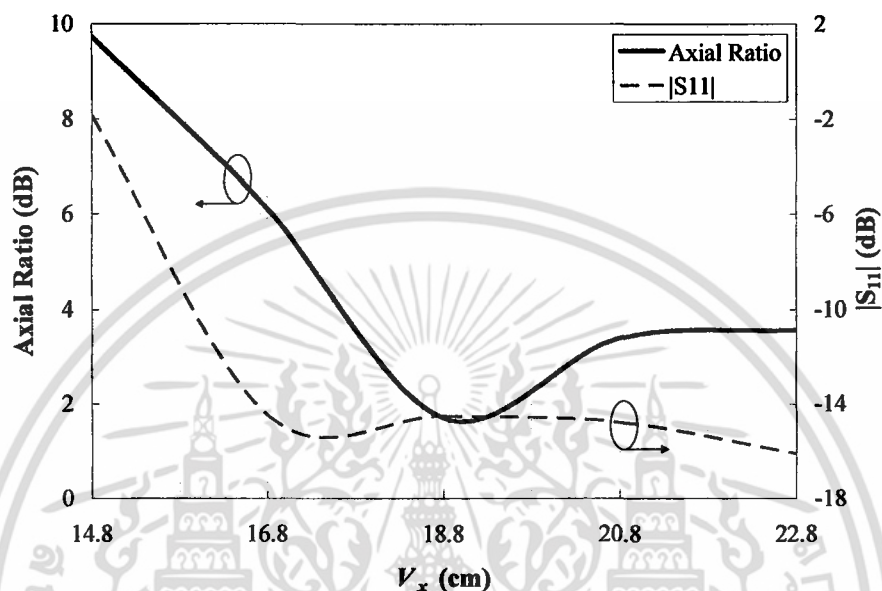
จากรูปที่ 3.12 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) พบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับมากกว่าค่าอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับจะต่ำลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) มีค่าตั้งแต่ 0.6 mm ถึง 2.6 mm ส่วนในช่วงตั้งแต่ 2.6 mm ถึง 4.6 mm จะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับในช่วงแรก และพบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำที่สุดและมีค่าดีกว่า -10 dB เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) มีค่าเท่ากับ 2.6 mm นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าที่ค่าระยะห่างนี้ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าที่ต่ำที่สุดและต่ำกว่า 3 dB อีกด้วย จากผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) มีค่าเท่ากับ 2.6 mm และจะใช้ในการจำลองผลต่อไป

### 3.3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 18.8 cm และทำการกำหนดระยะห่างระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นระนาบกราวด์และแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $t_1$ ) ให้มีค่าเท่ากับ 2.6 mm ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.4 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) ของสายอากาศ

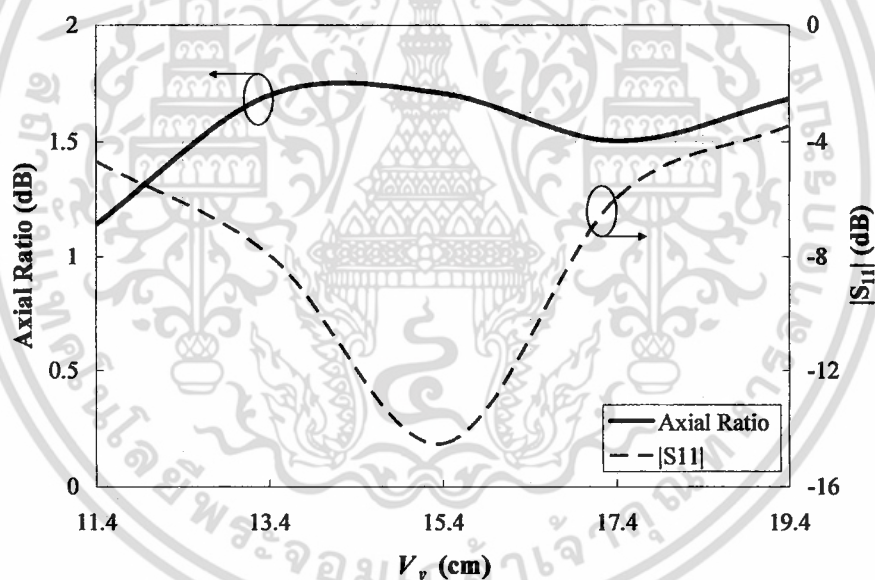
จากรูปที่ 3.13 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) พบว่า ค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับในลักษณะเดียวกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกตั้งแต่ค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) เท่ากับ 14.8 cm ถึง 18.8 cm จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับ และในช่วงที่สองมีค่าตั้งแต่ 18.8 cm ถึง 22.8 cm จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับช่วงแรก โดยจะพบว่าในช่วงที่สองจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ทุกค่าที่ทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) แต่เมื่อพิจารณาค่าที่ต่ำที่สุดของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับ พบว่า มีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าอัตราส่วนแกนจะมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) มีค่าเท่ากับ 18.8 cm ในขณะที่มีค่าเท่ากับ 17.4 cm จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อค่าความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) มีค่าเท่ากับ 17.4 cm และ 18.8 cm จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และจากผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นกลาง ( $v_x$ ) ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) มีค่าเท่ากับ 18.8 cm และจะนำไปใช้ในการจำลองผลต่อไป เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดและต่ำกว่า 3 dB รวมทั้งค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าดีกว่า -10 dB

### 3.3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 15.4 cm และทำการกำหนดความยาวของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_x$ ) ให้มีค่าเท่ากับ 18.8 cm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.5 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



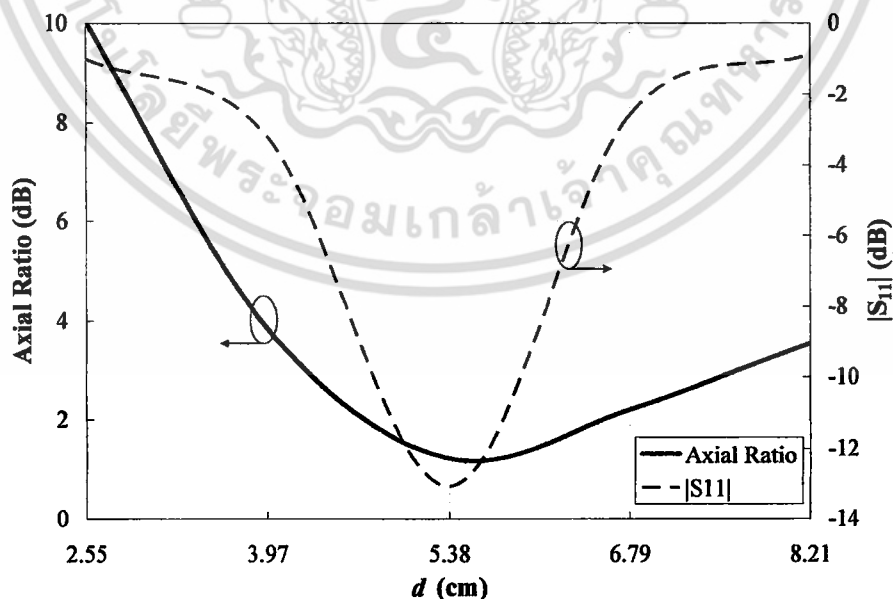
รูปที่ 3.14 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.14 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) พบว่า ค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับมากกว่าค่าอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด และจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงที่หนึ่งความกว้างของแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) มีค่าตั้งแต่ 11.4 cm ถึง 15.4 cm จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับในช่วงที่สองมีค่าตั้งแต่ 15.4 cm ถึง 19.4 cm ที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียย้อนกลับแต่ในการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองช่วงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลกระทบของค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ที่มีต่อค่าอัตราส่วนแกนพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม ผลของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า 3 dB ทุกค่า และเมื่อทำการพิจารณาควบคู่ไปกับผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับแล้ว ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) มีค่าเท่ากับ 15.4 cm เนื่องจากเป็นส่งผลให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองผลต่อไป

### 3.3.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5.38 cm และทำการกำหนดความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) มีค่าเท่ากับ 15.4 cm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.6 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะทางระหว่าง

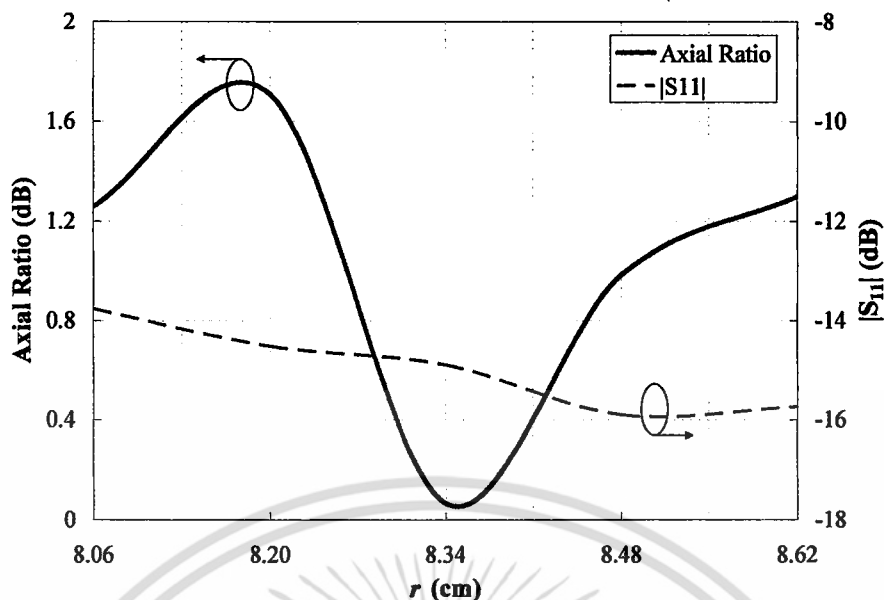
ตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) พบว่า ระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับมากกว่าค่าอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด และจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) จะส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับคล้ายคลึงกับผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้างของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $v_y$ ) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง เช่นเดียวกัน คือ ในช่วงที่หนึ่งระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) มีค่าตั้งแต่ 2.55 cm ถึง 5.38 cm จะทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับในช่วงที่สองที่มีค่าตั้งแต่ 5.38 cm ถึง 8.21 cm ที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียย้อนกลับ แต่ในการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองช่วงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.38 cm และเมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ที่มีต่อค่าอัตราส่วนแกน พบว่า เมื่อ  $d = 5.38$  cm จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าที่ต่ำที่สุดและต่ำกว่า 3 dB ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.38 cm ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองผลต่อไป

### 3.3.8 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 8.2 cm และทำการกำหนดค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.38 cm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.7 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.16

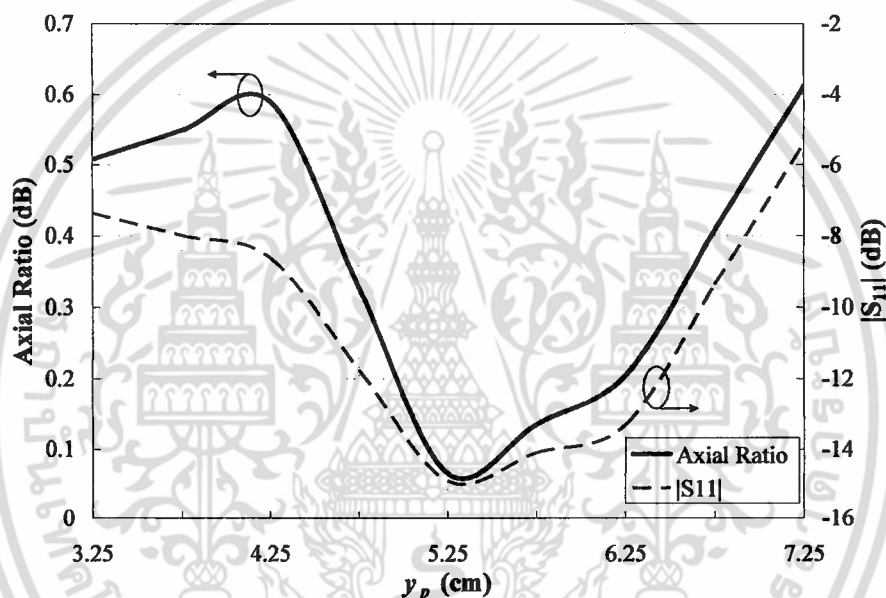


รูปที่ 3.16 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.16 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) พบว่า ค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกนมากกว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลกระทบต่อค่าที่ต่ำที่สุดของค่าอัตราส่วนแกน ซึ่งมีค่าต่ำลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งตรงกลางของร่องเชื่อมต่อกับมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $d$ ) ที่แสดงในรูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนแกนจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ คือ ในช่วง 8.06 cm ถึง 8.20 cm และช่วงตั้งแต่ 8.34 cm ถึง 8.62 cm จะมีค่าอัตราส่วนแกนที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) มีค่าตั้งแต่ 8.20 cm ถึง 8.34 cm จะทำให้ค่าอัตราส่วนแกนมีการลดลง โดยจะเกิดค่าที่ต่ำที่สุดขึ้นเมื่อค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) มีค่าเท่ากับ 8.34 cm ค่าที่ต่ำที่สุดของค่าอัตราส่วนแกนมีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนแกนดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.15 อย่างไรก็ตามภายในแต่ละช่วงที่พิจารณานั้นจะมีค่าอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ทั้งหมด ส่วนผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับนั้นจะเห็นว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการลดลงเล็กน้อยภายในช่วงตั้งแต่ 8.06 cm ถึง 8.34 cm และมีค่าที่ดีกว่า -10 dB ตลอดทั้งช่วง ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) มีค่าเท่ากับ 8.34 cm ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองผลต่อไป

### 3.3.9 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน $y$ ( $y_p$ ) ให้กับสายอากาศ

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) ให้กับสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 cm และทำการกำหนดค่ารัศมีของวงกลมสำหรับการตัดมุมของแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลาง ( $r$ ) มีค่าเท่ากับ 8.34 cm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.8 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) ให้กับสายอากาศ

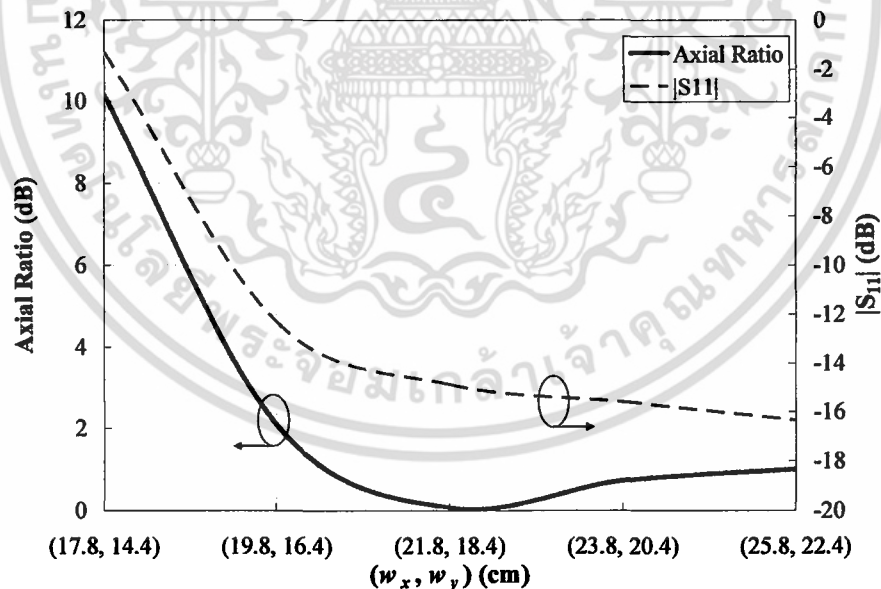
จากรูปที่ 3.17 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) พบว่า ตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) ส่งผลกระทบท่อค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และยังส่งผลให้ค่าที่ต่ำที่สุดของทั้งค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) มีค่าเท่ากับ 5.25 cm เหมือนกัน เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าอัตราส่วนแกนจะสังเกตได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนแกนในรูปที่ 3.16 และสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ ส่งผลกระทบท่อค่าที่ต่ำที่สุดของค่าอัตราส่วนแกนมีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก อย่างไรก็ตามภายในช่วงที่พิจารณานั้นจะมีค่าอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ตลอดทั้งช่วง ส่วนผลกระทบท่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียย้อนกลับนั้นจะเห็นว่า ค่าที่ต่ำที่สุดของการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) มีค่าเท่ากับ 5.25 cm ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) มีค่าเท่ากับ 5.25 cm ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองผลในขั้นตอนสุดท้ายต่อไป

### 3.3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าขนาดความยาวและค่าขนาดความกว้างของระนาบกราวด์ ( $w_x, w_y$ ) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนสุดท้ายของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวด์ของสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 21.8 cm และ 18.4 cm และทำการกำหนดตำแหน่งของโพรบในการป้อนสัญญาณในแนวแกน  $y$  ( $y_p$ ) มีค่าเท่ากับ 5.25 cm ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.9 ผลของค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวด์ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดความยาวและค่าขนาดความกว้างของระนาบกราวด์ ( $w_x, w_y$ ) ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.18 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวด์ พบว่า ค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $w_y$ ) ของระนาบกราวนด์ ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวนด์ จะส่งผลให้ทั้งค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ตั้งแต่  $w_x = 17.8$  cm และ  $w_y = 14.4$  cm จนถึง  $w_x = 21.8$  cm และ  $w_y = 18.4$  cm) และมีการลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงที่สอง (ตั้งแต่  $w_x = 21.8$  cm และ  $w_y = 18.4$  cm จนถึง  $w_x = 25.8$  cm และ  $w_y = 22.4$  cm) โดยที่จะพบว่า ค่าอัตราส่วนแกนจะมีค่าที่ต่ำที่สุดและต่ำกว่า 3 dB เมื่อค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวนด์ มีค่า  $w_x = 21.8$  cm และ  $w_y = 18.4$  cm ตามลำดับ และสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก ส่วนผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับนั้น จะมีค่าที่ลดลงดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และจะสังเกตได้ว่าที่ค่า  $w_x = 21.8$  cm และ  $w_y = 18.4$  cm จะมีค่าการสูญเสียดีกว่า -10 dB ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของค่าขนาดความยาว ( $w_x$ ) และค่าขนาดความกว้าง ( $w_y$ ) ของระนาบกราวนด์ มีค่าเท่ากับ 21.8 cm และ 18.4 cm ตามลำดับ ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองผลเพื่อทำการวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศต่อไป

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล

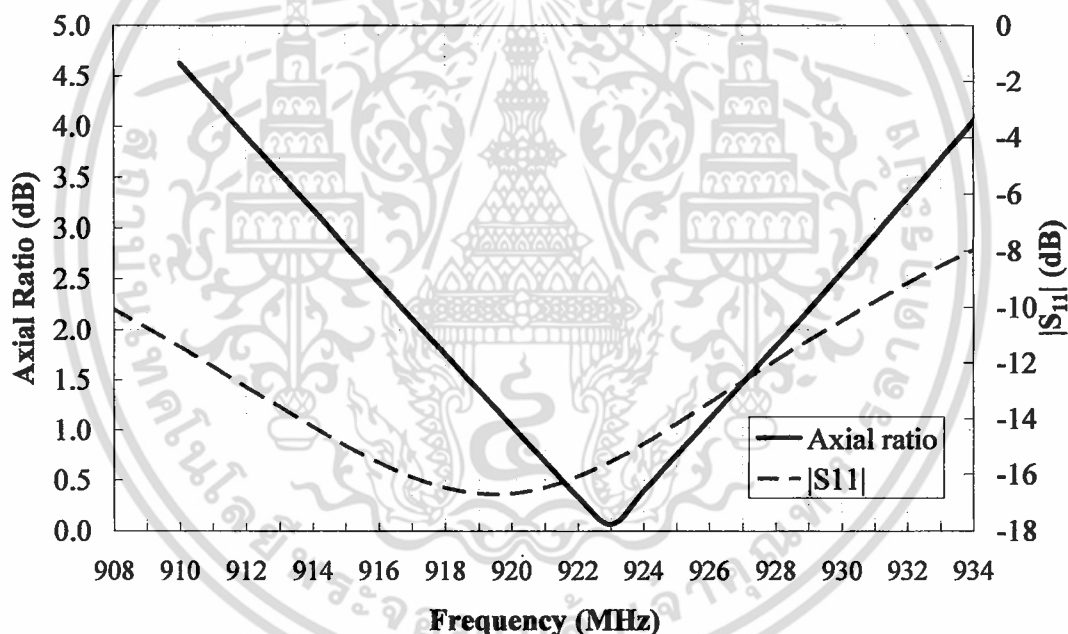
พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$u_x$	$0.437\lambda$	14.21 cm
$u_y$	$0.295\lambda$	9.59 cm
$S_h$	$0.104\lambda$	3.38 cm
$v_x$	$0.578\lambda$	18.80 cm
$v_y$	$0.474\lambda$	15.40 cm
$t_1$	$0.008\lambda$	2.60 mm
$t_2$	$0.342\lambda$	1.11 cm
$d$	$0.166\lambda$	5.38 cm
$r$	$0.252\lambda$	8.20 cm
$x_p$	$0.335\lambda$	10.90 cm
$y_p$	$0.162\lambda$	5.25 cm
$w_x$	$0.671\lambda$	21.80 cm
$w_y$	$0.566\lambda$	18.40 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนทั้งหมดของการจำลองผลของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น ป้อนสัญญาณด้วยโพรบจะได้อัตราส่วนแอมพลิจูดต่างๆ ที่เหมาะสมของสายอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศที่นำเสนอต่อไป

### 3.3.11 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ โดยทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนแกนและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

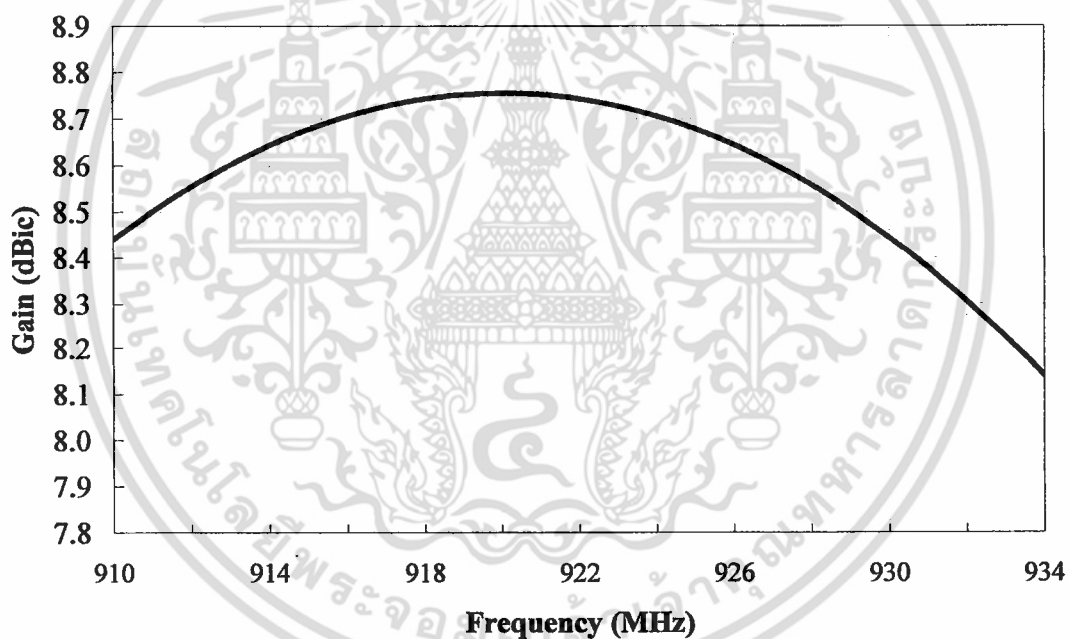
จากรูปที่ 3.19 พบว่า ช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 22 MHz หรือครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 908 MHz ถึง 930 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานทั้งหมด และที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งานมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -15.56 dB ดังนั้นสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และเมื่อทำการพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนในย่านความถี่ที่ใช้งาน คือ 920 MHz ถึง 925 MHz พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน แต่ยังคงมีค่าอัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต่ำกว่า 3 dB ทุกความถี่ และมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 0.1 dB นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่มีค่าต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ประมาณ 914 MHz ถึง 931 MHz ซึ่งในช่วงความถี่นี้ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่าน ดังนั้นช่วงความถี่นี้จึงเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้โดยที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

### 3.3.12 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาค่าอัตราการขยายที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ โดยทำการพิจารณาค่าอัตราการขยายที่ตรงมุม 0 องศา (ด้านหน้าของสายอากาศ) ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ค่าอัตราการขยายของสายอากาศภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.20

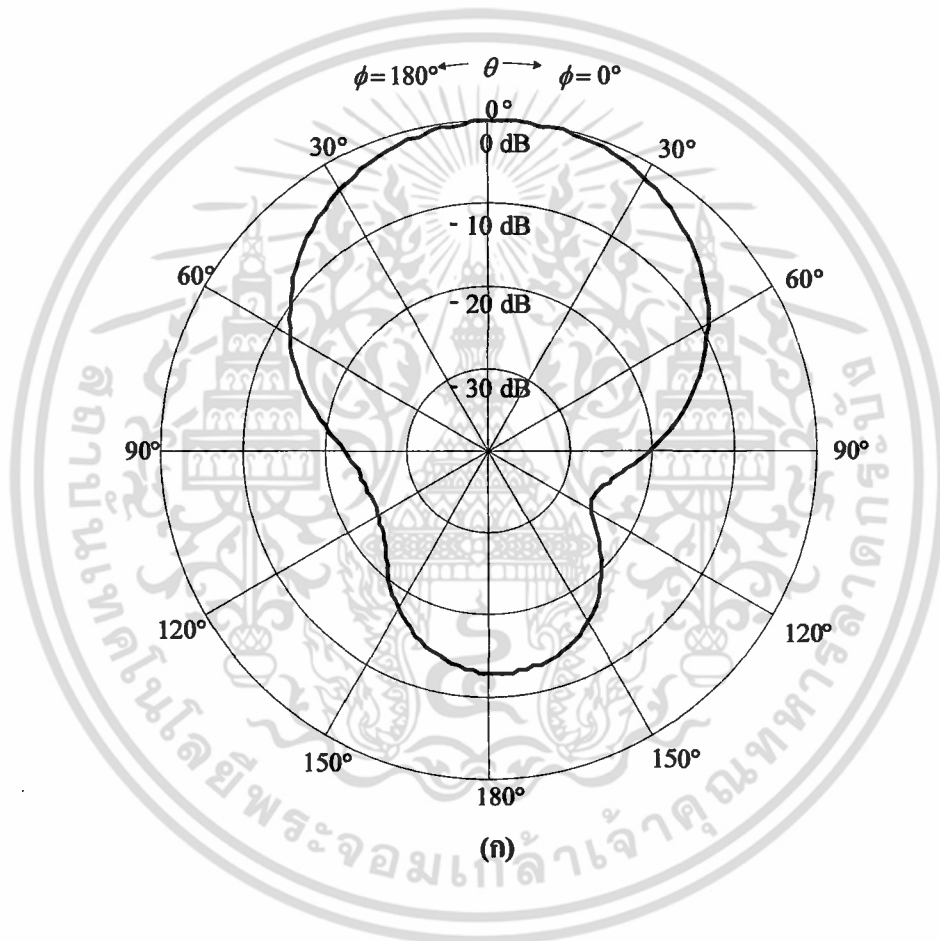


รูปที่ 3.20 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่นำเสนอ

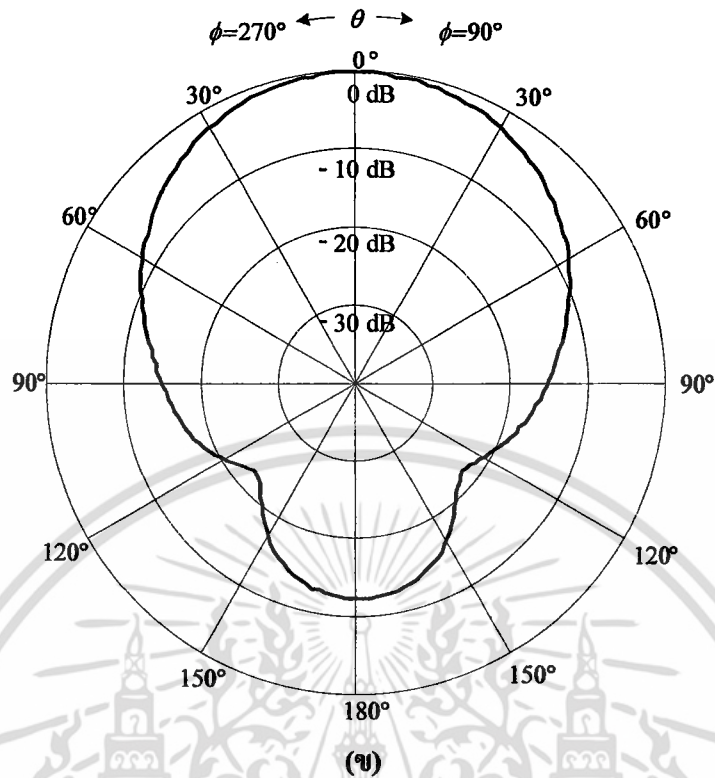
จากรูปที่ 3.20 พบว่าค่าอัตราการขยายที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.76 dB ซึ่งอยู่ที่ความถี่ 920 MHz และภายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz) มีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 8.68 dB ถึง 8.76 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราขยายที่สูง

### 3.3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

จากการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมดของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบมาจำลองผลเพื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ใช้งาน (923 MHz) โดยจะทำการพิจารณาทั้งในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  โดยที่สายอากาศวางตัวตั้งฉากกับทิศทางแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบแสดงดังรูปที่ 3.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

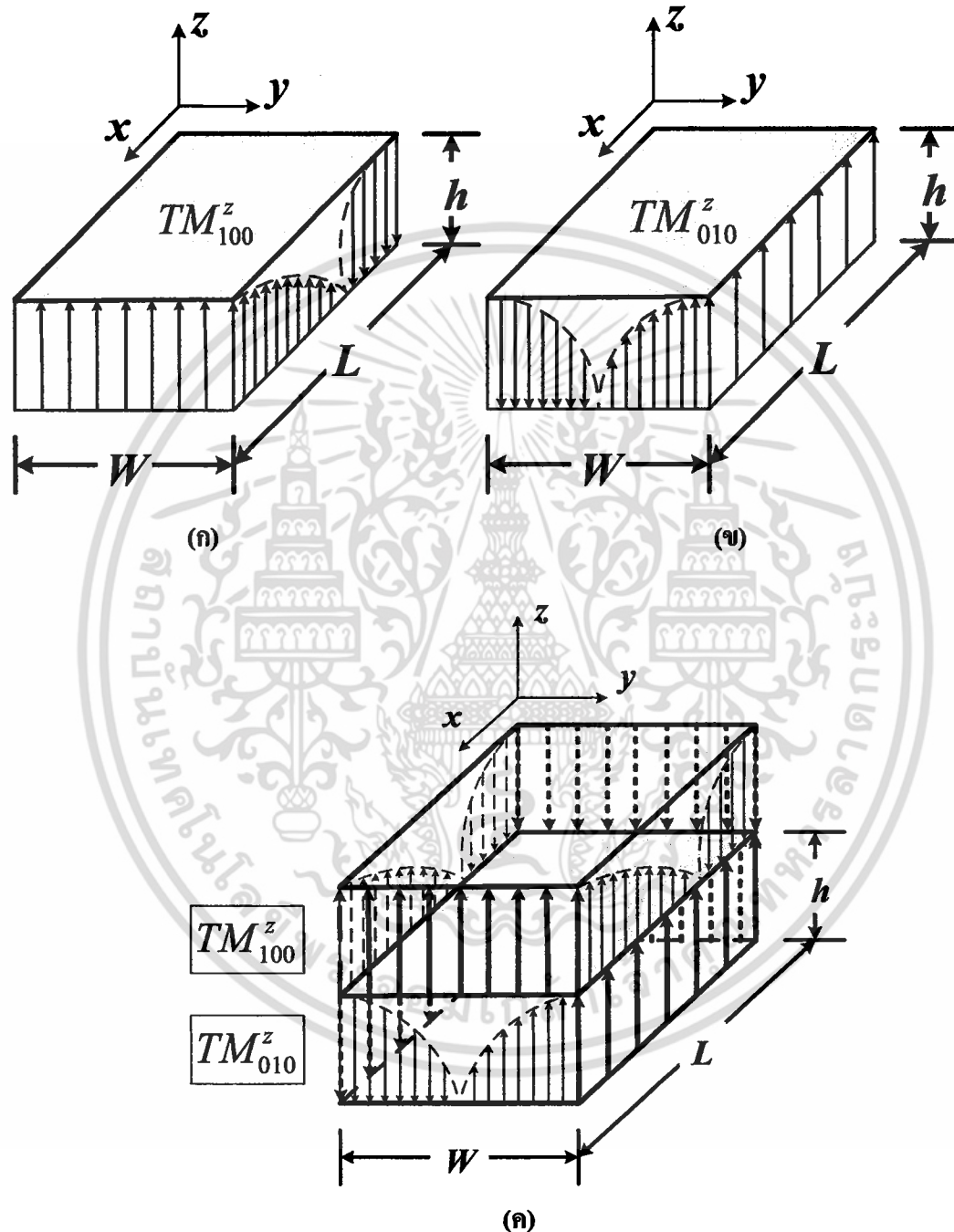


รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้น  
ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ  
(ก) ระนาบ xz (ข) ระนาบ yz

จากรูปที่ 3.21(ก) และ 3.21(ข) พบว่ามีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวเนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะเป็น ไมโครสตริปซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่าง และยังพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความไม่สมมาตรกัน อันเนื่องมาจากตำแหน่งการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศซึ่งทำให้โครงสร้างของสายอากาศเกิดความไม่สมมาตรกันในระนาบ yz แต่อย่างไรก็ตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในทั้งสองระนาบมีค่าที่แรงที่สุดที่มุม 0 องศา (ด้านหน้าของสายอากาศ) ซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าความกว้างของลำคลื่นเท่ากับ 63.8 องศา และ 70.4 องศา ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเท่ากับ 12.7 dB

### 3.3.14 แบบรูปของสนามของสายอากาศในย่านความถี่เอชเอฟ

ในหัวข้อนี้แสดงแบบรูปของสนามของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น ป้อนสัญญาณด้วยโพรบเมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แบบรูปของสนามของสายอากาศ

(ก) แบบรูปของสนามที่เกิดโหมด  $TM_{100}^z$

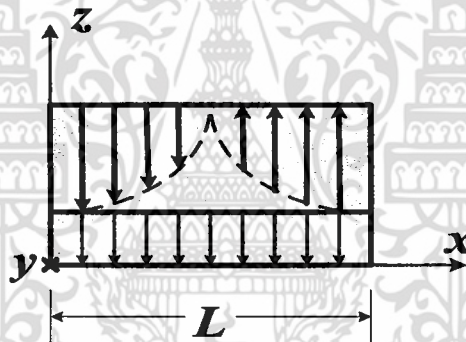
(ข) แบบรูปของสนามที่เกิดโหมด  $TM_{010}^z$

(ค) แบบรูปของสนามที่ชั้นบนเกิดโหมด  $TM_{100}^z$  และชั้นล่างเกิดโหมด  $TM_{010}^z$

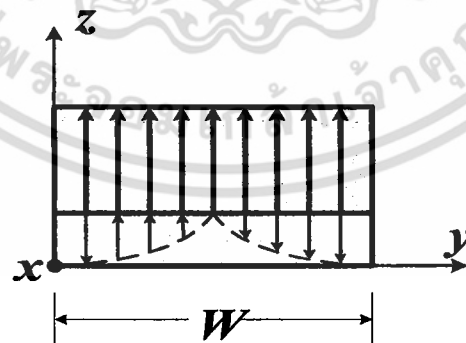
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.22(ก) และ 3.22(ข) แสดงแบบรูปของสนามที่เกิดโหมด  $TM_{100}^z$  และโหมด  $TM_{010}^z$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นโหมดพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจากหลักการที่จะทำให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ โดยที่สนามไฟฟ้าต้องมีขนาดที่เท่ากันและต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{\pi}{2}$  ดังนั้นจึงนำมาเป็นหลักการในการออกแบบสายอากาศมีลักษณะเป็นสองชั้นซึ่งแพร่กระจายคลื่นออกมาเป็นโหมดตั้งฉากกันซึ่งชั้นบนจะให้เกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  และชั้นล่างจะให้เกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  ดังแสดงในรูปที่ 3.22 (ก)

จากการจำลองผลสายอากาศด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่า แบบรูปของสนามของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ดังแสดงในรูปที่ 3.23 มีลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบเดียวกันกับที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.22 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.23 แบบรูปของสนามของสายอากาศที่นำเสนอ

(ก) ระนาบ  $xz$ (ข) ระนาบ  $yz$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.23(ก) และ 3.23(ข) จะสังเกตเห็นว่า ชั้นบนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบเกิดเป็นโหมด  $TM_{100}^z$  ในขณะที่ชั้นล่างของสายอากาศเกิดเป็นโหมด  $TM_{010}^z$  ดังนั้นจึงเป็นไปได้ตามเงื่อนไขการเกิดโพลาไรซ์แบบวงกลม คือ มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ  $\frac{\pi}{2}$  ซึ่งส่งผลให้สายอากาศที่นำเสนอมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม ส่วนการพิจารณาว่าเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวาหรือหมุนซ้ายนั้นจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

จากการจำลองผลสายอากาศด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่นำเสนอมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น หลังจากนั้นลำดับต่อมาจะทำการพิจารณาเบรปูของสนามของการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ใช้งาน พบว่า เบรปูของสนามบริเวณด้านหน้าของสายอากาศมีเบรปูของสนามที่แรงที่สุดอยู่ตรงกลางของสายอากาศแบบแผ่นวงรี ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เบรปูการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz มีสนามที่แรงที่สุดอยู่ที่มุม 0 องศา และนอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อมองไปตามทิศทางที่คลื่นแพร่กระจายออกจากสายอากาศ (ทิศทาง +z) เฟสจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะหมุนขวา (หมุนตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนขวานั้นเอง

### 3.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนในการจำลองผลของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่าน UHF โดยเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับสายอากาศก่อนแล้วจึงนำมาจำลองแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศซึ่งได้ทำการพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดและค่าการสูญเสียย้อนกลับควบคู่กันไป โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ คือ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจะต้องทำให้ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดมีค่าต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานและต้องทำให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานด้วย เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว หลังจากนั้นทำการพิจารณาสมรรถนะของสายอากาศ โดยพิจารณาค่าต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูด ค่าการสูญเสียย้อนกลับ เบรปูการแพร่กระจายคลื่น และค่าอัตราส่วนการขยาย พบว่า สายอากาศมีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920-925 MHz) ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.06 dB เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ พบว่า มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน และเบรปูการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว แต่ในระนาบ yz จะมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมมาตรกันอันเนื่องมาจากลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศที่ไม่สมมาตรกันในระนาบ yz  
 สุดท้ายพิจารณาค่าอัตราขยายซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน  
 เนื่องจากขนาดของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความยาวคลื่นมีค่าที่สูงขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น  
 ฉะนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง  
 ผลนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่ง  
 จะกล่าวในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

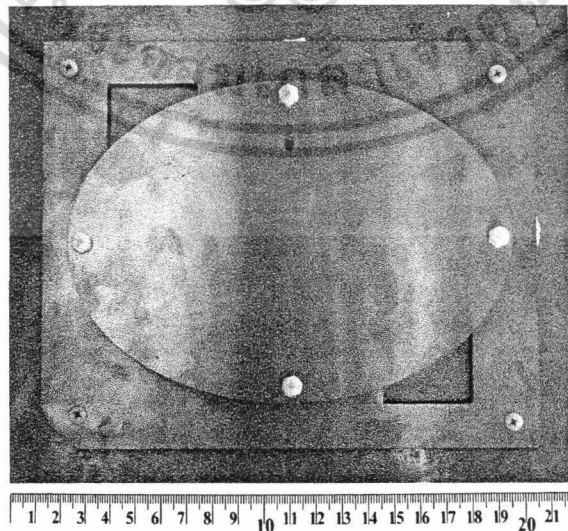
### ผลการทดสอบสายอากาศ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ซึ่งจะพิจารณาดังผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราขยาย ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ในส่วนของรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

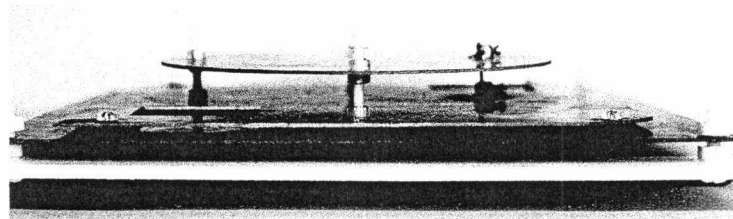
#### 4.2 การสร้างสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุที่เป็นทองเหลือง เนื่องจากไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทานและสามารถเชื่อมได้ง่าย ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองผลในบทที่ 3

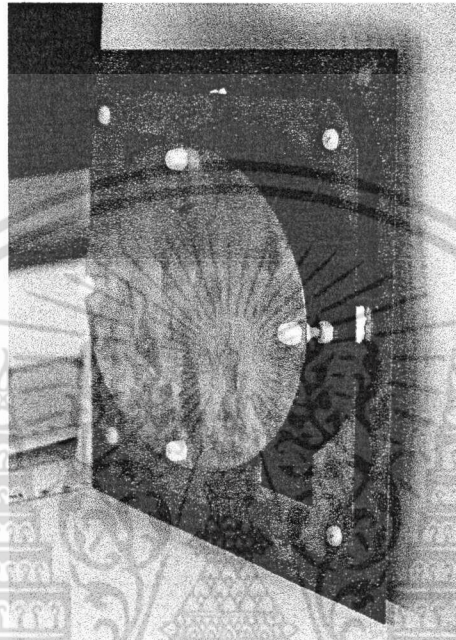


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.1 ลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง (ค) มุมมอง 3 มิติ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$u_x$	$0.437\lambda$	14.21 cm
$u_y$	$0.295\lambda$	9.59 cm
$S_h$	$0.104\lambda$	3.38 cm
$v_x$	$0.578\lambda$	18.80 cm
$v_y$	$0.474\lambda$	15.40 cm
$t_1$	$0.008\lambda$	2.60 mm
$t_2$	$0.342\lambda$	1.11 cm
$d$	$0.166\lambda$	5.38 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$r$	$0.252\lambda$	8.20 cm
$x_p$	$0.335\lambda$	10.90 cm
$y_p$	$0.162\lambda$	5.25 cm
$w_x$	$0.671\lambda$	21.80 cm
$w_y$	$0.566\lambda$	18.40 cm

### 4.3 การทดสอบสายอากาศ

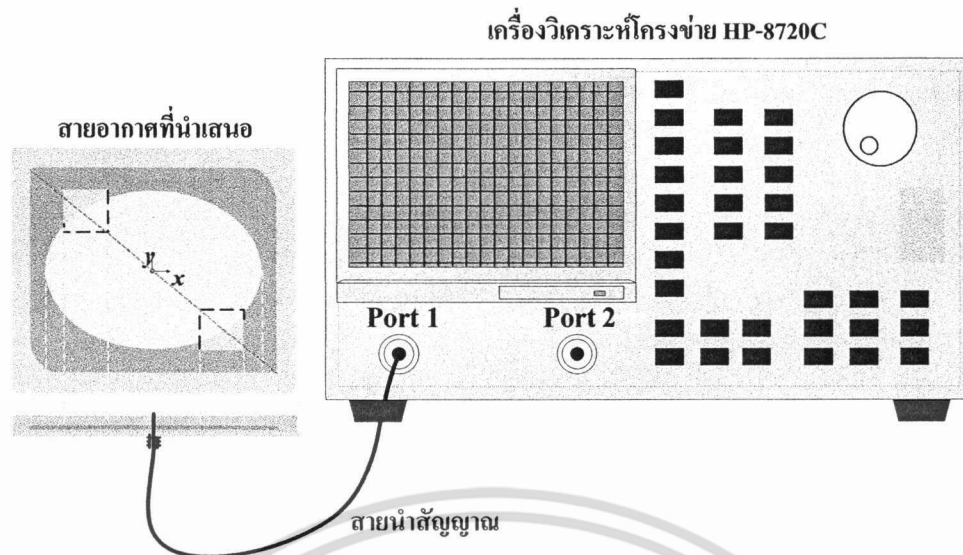
ก่อนที่จะทำการทดสอบสายอากาศได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อที่จะนำสายอากาศต้นแบบนี้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราขยาย ค่าอัตราส่วนแกนและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 รูปร่างของสายอากาศที่จะนำมาทดสอบสมรรถนะในด้านต่างๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 4.1

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น ป้อนสัญญาณด้วยโพรบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C
2. สายนำสัญญาณ
3. มัลติมิเตอร์

#### 4.3.1 การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ

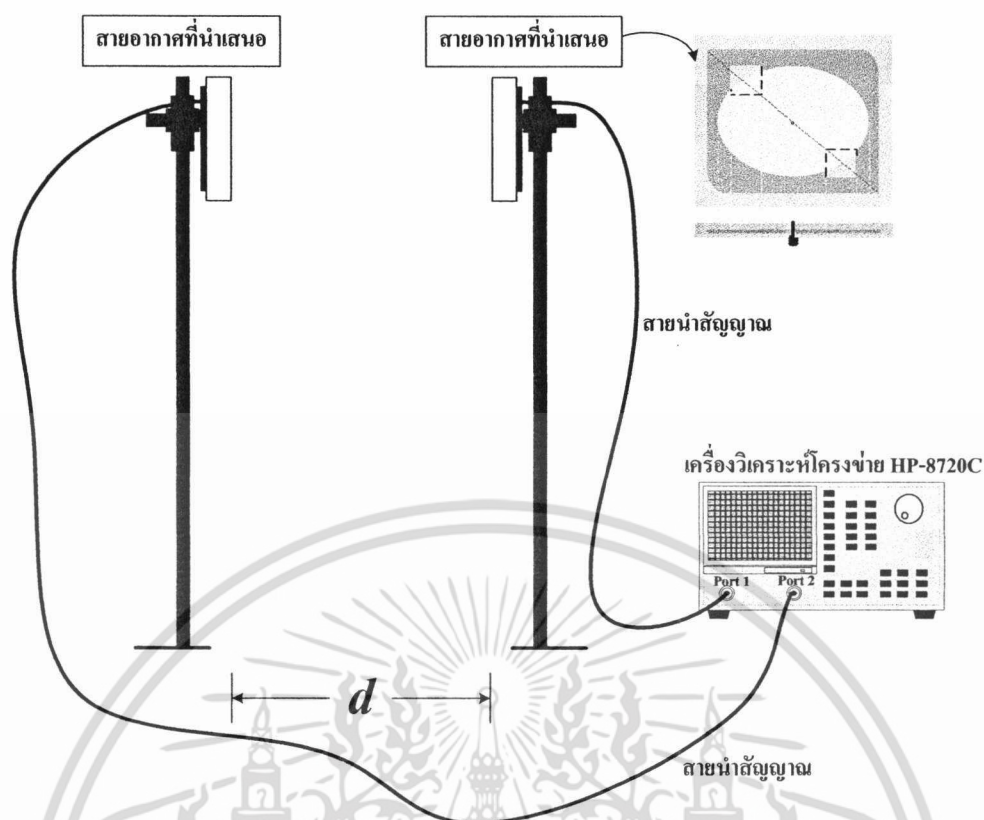
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบเพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยได้นำสายอากาศที่จะทำการทดสอบผลมาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ในการหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ การทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

#### 4.3.2 การทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึง การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายนั้นจะใช้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่เหมือนกันจำนวน 2 ตัวมาใช้ทำหน้าที่เป็นทั้งสายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับ โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำภายในสนามระยะไกล เพราะฉะนั้นระยะห่าง ( $d$ ) ระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไข  $d \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$  โดยที่  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.5 m การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ

#### 4.3.3 การทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึง การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนแกนนั้นจะใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm ทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต้องอาศัยสายอากาศแบบเกลียวจำนวน 2 ตัว คือสายอากาศแบบเกลียวตัวที่หนึ่งต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนขวา (ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.17 dBic) และสายอากาศแบบเกลียวตัวที่สองต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนซ้าย (ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 2.58 dBic) มาทำหน้าที่ในการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและใช้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวรับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนแกนได้ดังสมการที่ 4.1 โดยที่กำหนดให้สายอากาศทั้งสองนี้จะมีระยะห่างในการส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับในการทดสอบหาค่าอัตราขยายในหัวข้อที่ 4.3.2 นั่นคือ มีระยะห่างเท่ากับ 1.5 m นั่นเอง การทดสอบค่าอัตราส่วนแกนแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

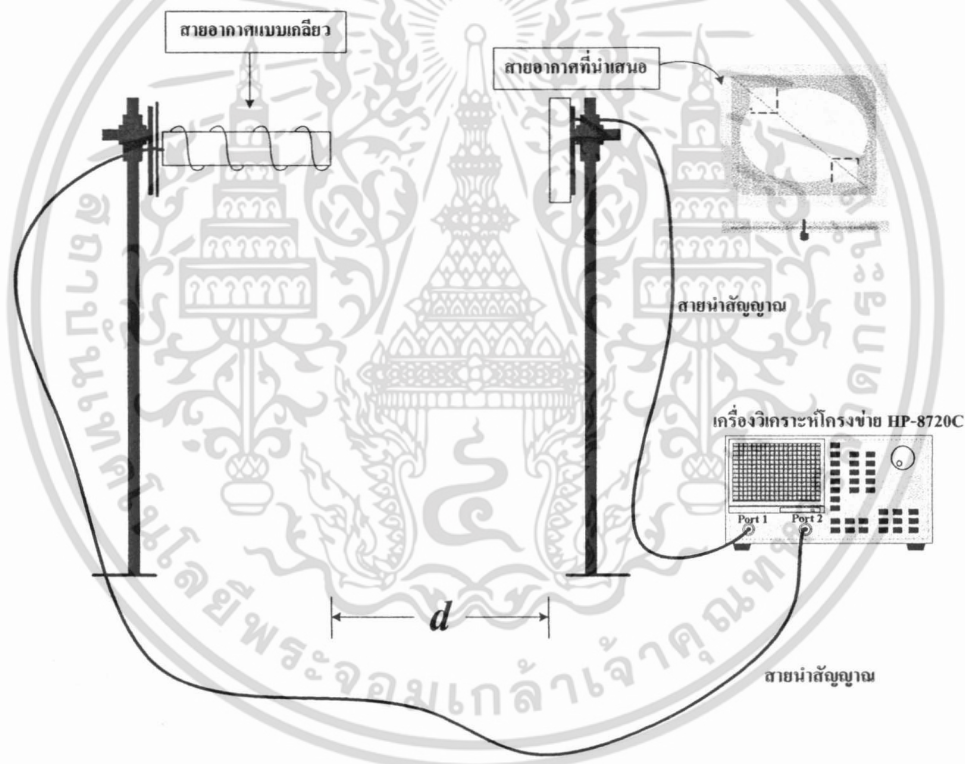
$$\text{Axial Ratio} = 20 \log \left[ \frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่

$|E_{co}|$  คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

$|E_{xp}|$  คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันข้ามกับการโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

หมายเหตุ:  $|E_{co}|$  ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หมายถึง ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนขวาและ  $|E_{xp}|$  หมายถึง ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนซ้าย



รูปที่ 4.4 การทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

#### 4.3.4 การทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ

ในหัวข้อสุดท้ายของการทดสอบสายอากาศนี้ จะกล่าวถึง การทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ โดยจะใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้สายอากาศแบบเกลียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

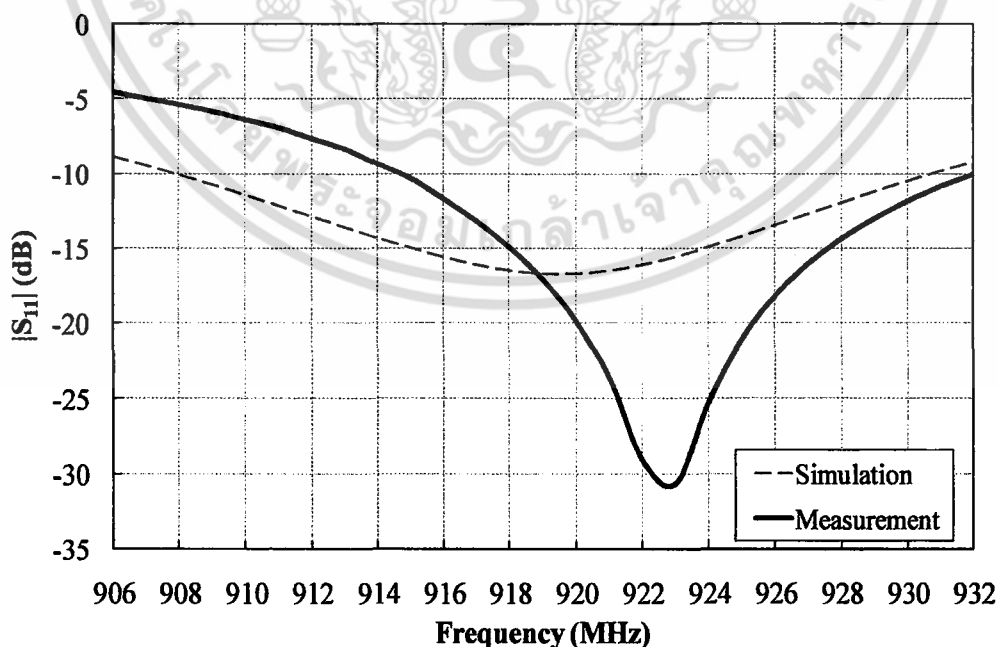
ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของตัวส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบทำหน้าที่เป็นสายอากาศของตัวรับและมีระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและตัวรับเท่ากับระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับในการทดสอบหาค่าอัตราขยายในหัวข้อที่ 4.3.2 และในการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเหมือนกับการทดสอบเพื่อค่าอัตราส่วนแกนซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

#### 4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

จากหัวข้อที่กล่าวไว้ข้างต้น กล่าวคือ เมื่อได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบซึ่งเป็นสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำสายอากาศต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ ของสายอากาศดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3 จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อต่อไป

##### 4.4.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 โดยพิจารณาในย่านความถี่ UHF ผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



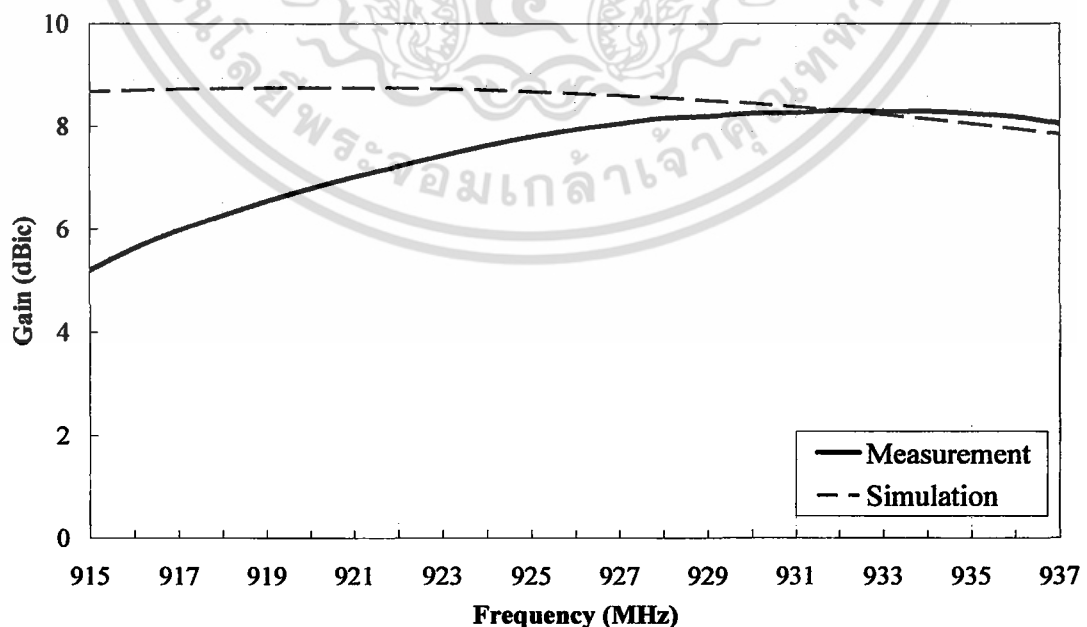
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ผลของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่ก็มี ความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย คือ ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 915 MHz ถึง 931 MHz (16 MHz) ในขณะที่ช่วงกว้างแถบความถี่ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 22 MHz หรือครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 908 MHz ถึง 930 MHz และส่งผลให้ระดับของค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่กลาง (923 MHz) มีค่าที่ดีกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบที่ได้มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลในบทที่ 3 รวมทั้งผลของวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบภายในย่านความถี่ที่ใช้งานมีค่าดีกว่า -10 dB ตลอดทั้งย่าน และที่ความถี่กลาง (923 MHz) มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -30.56 dB ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

#### 4.4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าอัตราการขยายของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (ย่านความถี่ UHF) ผลของการเปรียบเทียบของค่าอัตราการขยายของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



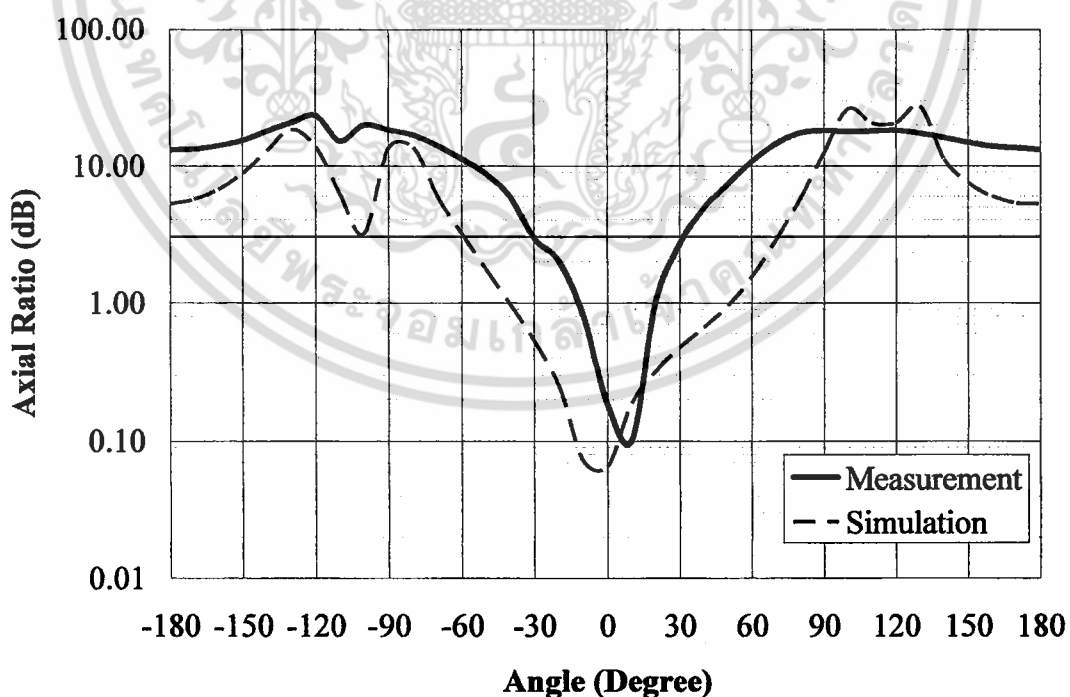
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของอัตราการขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าอัตราขยายระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูง (927 MHz ถึง 937 MHz) มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่จะสังเกตเห็นว่าภายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานยังมีความคลาดเคลื่อนที่สูงพอสมควร กล่าวคือ ผลของค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่เท่ากับผลที่ได้จากการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดมาจากการทดสอบสายอากาศต้นแบบนั้น อาจมีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ในขณะที่การจำลองผลค่าอัตราขยายของสายอากาศจะไม่นับรวมผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงทำให้ผลของค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าอัตราขยายที่ได้จากการคำนวณ

#### 4.4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (ย่านความถี่ UHF) ผลของการเปรียบเทียบของค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



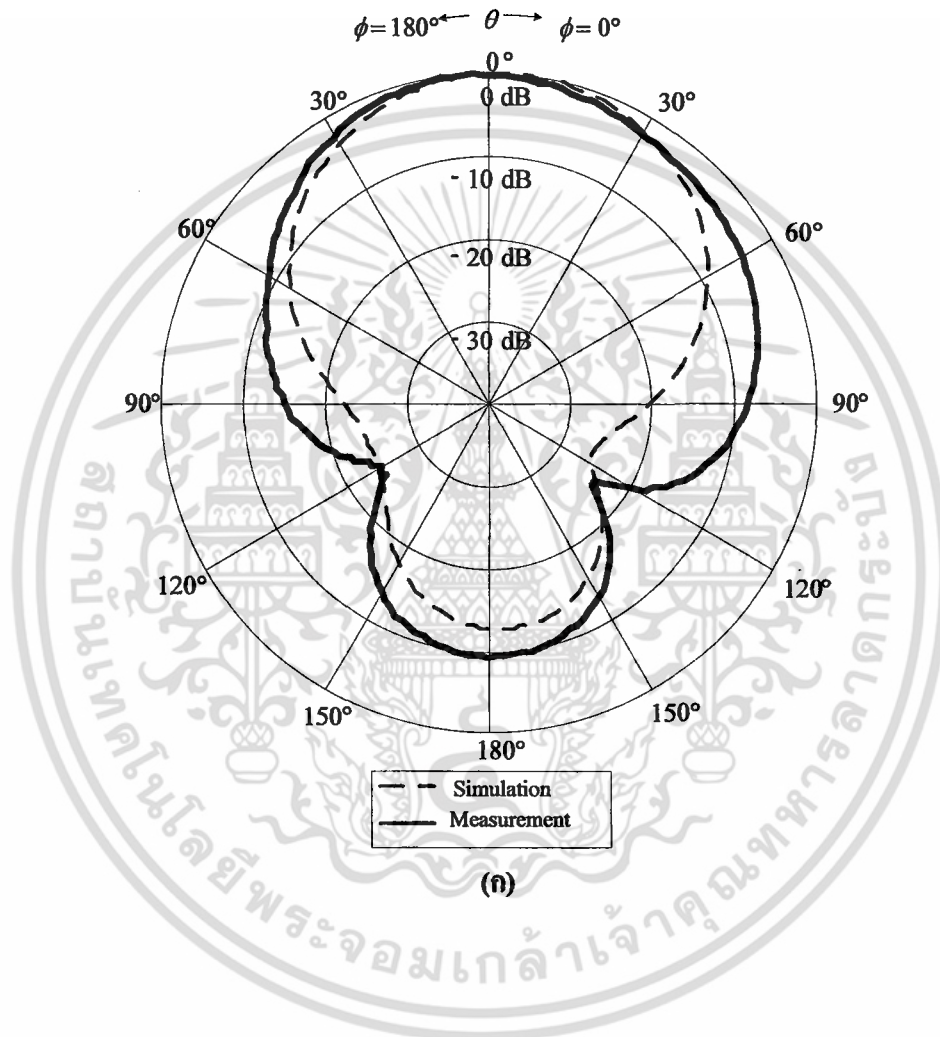
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของมุมซึ่งได้จากการทดสอบและการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

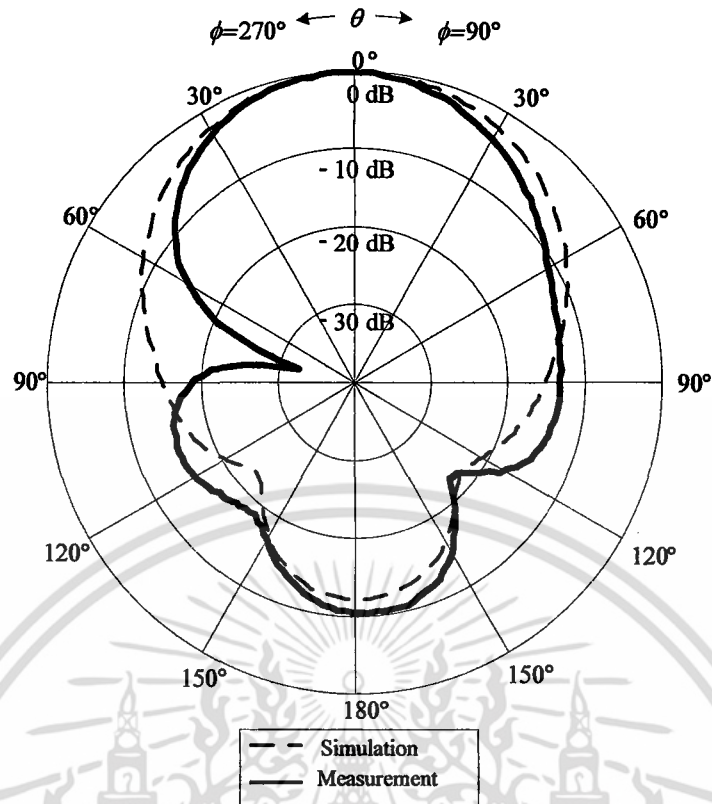
จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าอัตราส่วนแแกนระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า ค่าอัตราส่วนแแกนที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มแบบเดียวกันกับผลของค่าอัตราส่วนแแกนที่ได้จากการจำลอง กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนแแกนที่มุ่มต่างๆ ของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ ตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบเกลียวที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมซึ่งนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นตัวส่งอาจจะมีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลมที่ไม่ดีพอและสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบมีค่าพารามิเตอร์ที่คลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จำลองผล เป็นต้น แต่จากผลที่ได้จากการทดสอบค่าอัตราส่วนแแกนของสายอากาศที่มุ่ม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ พบว่า ภายในความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารยังคงมีค่าอัตราส่วนแแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และค่าที่ต่ำที่สุดอยู่ที่มุ่มที่ใกล้เคียง 0 องศา ดังนั้นจึงส่งผลให้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบมีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม

#### 4.4.4 ผลการทดสอบค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะมีผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

จากรูปที่ 4.8(ก) และ 4.8(ข) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวโดยที่มีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 100 องศา และ 70 องศาตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 0 องศา ซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารและยังพบว่า มุมที่อยู่ภายในความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบกับที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ก็ยังคงมีความผิดเพี้ยน อันเกิดจากสภาพแวดล้อมและการติดตั้งสายอากาศในการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้องกันสัญญาณด้วยโพรบ

สมรรถนะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 923 MHz
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	-30.56 dB
ค่าอัตราขยาย	8.73 dBic
ค่าอัตราส่วนแกน	0.06 dB
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	100 องศา
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	70 องศา

#### 4.5 บทสรุป

จากการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้องกันสัญญาณด้วยโพรบ สำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF เพื่อหาค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราขยาย ค่าอัตราส่วนแกนและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและนำผลการทดสอบสายอากาศที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า ผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากการจำลองแบบ และเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน พบว่า ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสร้างสายอากาศต้นแบบที่มีขนาดคลาดเคลื่อนไปจากขนาดของสายอากาศตามที่ได้จำลองผลไว้ในบทที่ 3 แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบยังคงสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ (920 MHz ถึง 925 MHz) ที่ต้องการใช้งานได้ และเมื่อทำการพิจารณาผลของค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มในแบบเดียวกัน แต่มีความผิดเพี้ยนเนื่องมาจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมในการทดสอบสายอากาศ ในส่วนของค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบพบว่า เกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน ตัวอย่างเช่น สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมซึ่งนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นตัวส่งอาจจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ไม่ดีพอและสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแบบวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้องกันด้วยโพรบมีค่าพารามิเตอร์ที่คลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จำลองผล เป็นต้น แต่จากผลที่ได้จากการทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ พบว่า ยังคงมีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ภายในความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และสุดท้ายเมื่อทำการพิจารณาผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลาง (923 MHz) ของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานพบว่า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีความสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยที่มิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  เท่ากับ 100 องศา และ 70 องศา ตามลำดับ จากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน ในส่วนของการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบกับเครื่องอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF นั้นจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การประเมินสมรรถนะและการประยุกต์ใช้งาน

### 5.1 บทนำ

จากในบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการสร้างและทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบเบื้องต้นมาแล้ว ดังนั้นในบทนี้จะนำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบไว้แล้วมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก เพื่อหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก รวมทั้งทำการทดสอบเพื่อหาระยะทางที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กอีกด้วย หลังจากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศอ้างอิง [18]-[19] กับแท็กกับผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบกับแท็ก โดยที่การทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุกับแท็ก มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

### 5.2 การประเมินสมรรถนะ

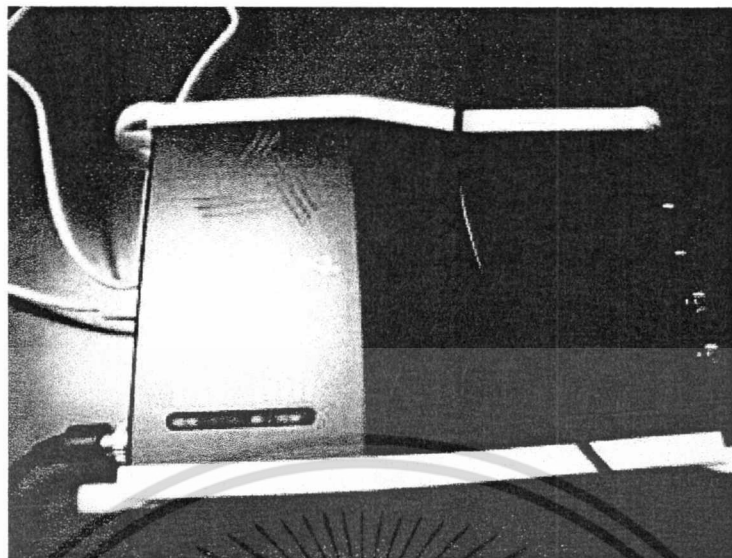
ในหัวข้อนี้จะทำการประเมินสมรรถนะของสายอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย สายอากาศแท็กไดโพลแบบขด [20] สายอากาศอ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น [18] สายอากาศอ้างอิงที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม [19] และสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการ โพลาริซ์เป็นแบบวงกลม

#### 5.2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบของการประยุกต์ใช้งาน

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องอ่านข้อมูล RFID ย่านความถี่ UHF ของบริษัท ALIEN รุ่น 9800 จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.1
2. แท็กชนิดไดโพลแบบขด จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.2
3. สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4
4. สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ
5. มัลติมิเตอร์
6. คอมพิวเตอร์
7. สายนำสัญญาณ

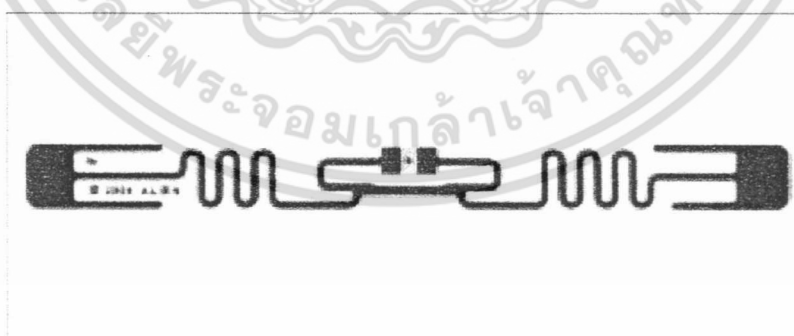
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ของบริษัท ALIEN รุ่น 9800 [17]

#### 5.2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของแท็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง แท็กที่นำมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนี้เพื่อที่จะให้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงได้ใช้แท็กตัวเดียวกันทุกรูปแบบการทดสอบ เพราะฉะนั้นจึงไม่ต้องพิจารณาถึงผลของความแตกต่างของแท็ก โดยที่แท็กที่นำมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลนี้เป็นแท็กชนิดไดโพลแบบขดที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 แท็กชนิดไดโพลแบบขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของแท่งที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

คุณสมบัติ	คำอธิบาย
ย่านความถี่	860-960 MHz
การโพลาไรซ์	แบบเชิงเส้น
ขนาด	9.7 cm × 1.1 cm

หมายเหตุ : ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงใน [17]

### 5.2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF โดยที่สายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นและสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ดังนี้

#### 5.2.3.1 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

สายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นนั้น จะใช้สายอากาศของบริษัท ALIEN รุ่น ALR-9610-AL แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5.2

### รูปที่ 5.3 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการ โพลารไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

คุณสมบัติ	คำอธิบาย
ย่านความถี่	890-940 MHz
การโพลารไรซ์	แบบเชิงเส้น
อัตราขยายสูงสุด	6 dBi
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	40 องศา
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	-15 dB
ขนาด	28.4 cm × 19.51 cm × 4.32 cm

หมายเหตุ : ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงใน [18]

### 5.2.3.2 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลารไรซ์เป็นแบบวงกลม

สายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลารไรซ์เป็นแบบวงกลมนั้น จะใช้สายอากาศของบริษัท ALIEN รุ่น ALR-9611-CR แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5.3

รูปที่ 5.4 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการ โพลารไรซ์เป็นแบบวงกลม

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลารไรซ์เป็นแบบวงกลม

คุณสมบัติ	คำอธิบาย
ย่านความถี่	890-930 MHz
การโพลารไรซ์	แบบวงกลม
อัตราขยายสูงสุด	6 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

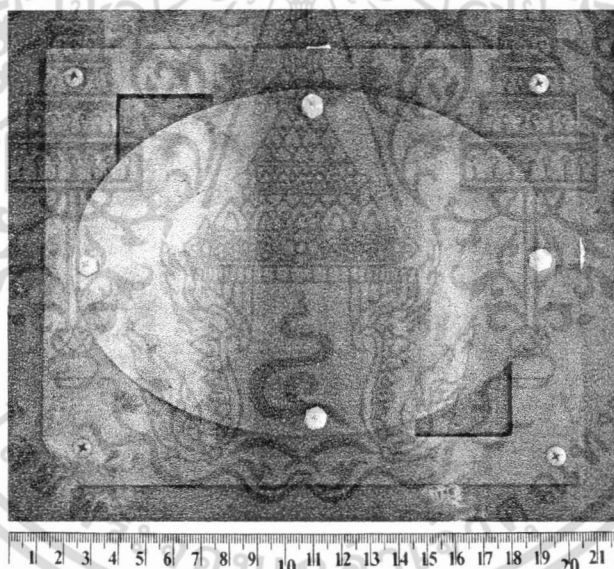
ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

คุณสมบัติ	ค่าอธิบาย
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	40 dB
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	-15 dB
ขนาด	28.4 cm × 19.51 cm × 4.32 cm

หมายเหตุ : ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงใน [19]

#### 5.2.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม ดังที่ได้ทำการสร้างและทดสอบเบื้องต้นในบทที่ 4 ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.5 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.5 สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

ตารางที่ 5.4 คุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

คุณสมบัติ	ค่าอธิบาย
ย่านความถี่	914-931 MHz
การโพลาไรซ์	แบบวงกลม
อัตราขยายสูงสุด	8.73 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

คุณสมบัติ	คำอธิบาย
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	100 องศา
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	-30.56 dB
ขนาด	24 cm × 19.4 cm × 4.0 cm

หมายเหตุ : ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในบทที่ 4

### 5.2.5 การคำนวณหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก

เนื่องจากในบทนี้เป็นการใช้การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้น ป้อนสัญญาณด้วยโพรบกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF และนำมาใช้งานร่วมกับแท็ก ในการทดสอบจะใช้เครื่องอ่านข้อมูลของบริษัท ALIEN รุ่น 9800 และโปรแกรมสำหรับคำนวณหาระยะทาง (ตั้งค่า 1 WEIRP ในโปรแกรม) ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยที่รายละเอียดในการคำนวณจะได้กล่าวในส่วนถัดไป ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยที่ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กนี้สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

จากกำลังงานที่แพร่กระจายออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูลสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$(RF'_{level})_{dB} = (P'_{reader-tx})_{dB} - (RF'_{atten})_{dB} \quad (5.1)$$

โดยที่

$$(RF'_{atten})_{dB} = \frac{RF_{atten}}{10} \quad \text{ซึ่งเป็นฟังก์ชันเฉพาะของเครื่องอ่านข้อมูล RFID ของบริษัท ALIEN รุ่น 9800}$$

$(P'_{reader-tx})_{dB}$  คือ กำลังงานที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกมาในหน่วยเดซิเบล

$RF_{atten}$  คือ กำลังงานที่สูญเสียจากการลดทอน

$(RF'_{atten})_{dB}$  คือ กำลังงานที่สูญเสียจากการลดทอนในหน่วยเดซิเบล

และจากสมการที่ 2.43 สามารถหาระยะทางที่ไกลที่สุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{\max(\text{reader})} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}} G_{\text{tag-ant}} \mathcal{K} \tau}{P_{\text{tag-threshold}}}}$$

โดยที่

$P_{\text{reader-tx}}$	คือ กำลังงานที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล
$G_{\text{reader-ant}}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล
$P_{\text{tag-threshold}}$	คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้
$G_{\text{tag-ant}}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศของแท็ก
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ใช้งาน
$\mathcal{K}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก
$\tau$	คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน (Transmission Power Coefficient)

และเมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $R$ ) ให้เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $d$  ดังนั้นสมการที่ 2.43 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_d G_{\text{reader-ant}} G_{\text{tag-ant}} \mathcal{K} \tau}{P_{\text{tag-threshold}}}} \quad (5.2)$$

โดยที่

$P_d$  คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ที่ระยะ  $d$

นำสมการที่ 5.2 ไปหารสมการที่ 2.43 จะได้ดังนี้

$$\frac{R_{\max(\text{reader})}}{d} = \sqrt{\frac{P_{\text{reader-tx}}}{P_d}} = \left( \frac{P_{\text{reader-tx}}}{P_d} \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

ทำให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบลได้ดังต่อไปนี้

$$10 \log \left( \frac{R_{\max(\text{reader})}}{d} \right) = 10 \log \left( \frac{P_{\text{reader-tx}}}{P_d} \right)^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$10\log\left(\frac{R_{\max(\text{reader})}}{d}\right)^2 = 10\log\left(\frac{P_{\text{reader-tx}}}{P_d}\right) = 10\log(P_{\text{reader-tx}}) - 10\log(P_d)$$

ดังนั้นสามารถเขียนอยู่ในหน่วยเดซิเบลได้เป็นดังนี้

$$\left(\frac{R_{\max(\text{reader})}}{d}\right)_{\text{dB}}^2 = (P_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} - (P_d)_{\text{dB}} \quad (5.4)$$

จากสมการที่ 5.1 พบว่า เมื่อต้องการให้ได้ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มากที่สุด ดังนั้น  $(RF'_{\text{atten}})_{\text{dB}} = 0$  และสมการที่ 5.1 สามารถเขียนได้ใหม่เป็น ดังนี้

$$(RF'_{\text{level}})_{\text{dB}} = (P_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} = (P'_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} - 0 \quad (5.5)$$

และจากสมการที่ 5.1 สามารถหาค่ากำลังงานที่เครื่องอ่านส่งออกมายังแท็กที่ระยะเท่ากับ  $d$  ได้ดังนี้

$$(RF'_{\text{level}})_{\text{dB}} = (P_d)_{\text{dB}} = (P'_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} - (RF'_{\text{atten}})_{\text{dB}} \quad (5.6)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 แทนลงในสมการที่ 5.4 จะได้เป็นดังนี้

$$\left(\frac{R_{\max(\text{reader})}}{d}\right)_{\text{dB}}^2 = (P'_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} - [(P'_{\text{reader-tx}})_{\text{dB}} - (RF'_{\text{atten}})_{\text{dB}}]$$

$$\left(\frac{R_{\max(\text{reader})}}{d}\right)_{\text{dB}}^2 = (RF'_{\text{atten}})_{\text{dB}} \quad (5.7)$$

และเนื่องจาก

$$(RF'_{\text{atten}})_{\text{dB}} = \left(\frac{RF_{\text{atten}}}{10}\right) \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$(RF'_{atten})_{dB} = 10\log(RF'_{atten}) \quad (5.9)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 5.8 และ 5.9 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$\frac{RF_{atten}}{10} = 10\log(RF'_{atten})$$

$$RF'_{atten} = 10^{\frac{RF_{atten}}{100}} \quad (5.10)$$

นำค่า  $RF'_{atten}$  ในสมการที่ 5.10 แทนค่าลงในสมการที่ 5.7 จะได้ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ไกลที่สุดในรูปของกำลังที่สูญเสียจากการลดทอนเป็นดังนี้

$$R_{\max(\text{reader})} = d\sqrt{10^{\frac{RF_{atten}}{100}}} \quad (5.11)$$

จากสมการที่ 5.11 พบว่า เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) เป็นค่าคงที่ใน โปรแกรมเพื่อคำนวณหาระยะทางในการติดต่อสื่อสาร ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ไกลที่สุด  $R_{\max(\text{reader})}$  จะขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานที่สูญเสียจากการลดทอน

### 5.3 การประยุกต์ใช้งาน

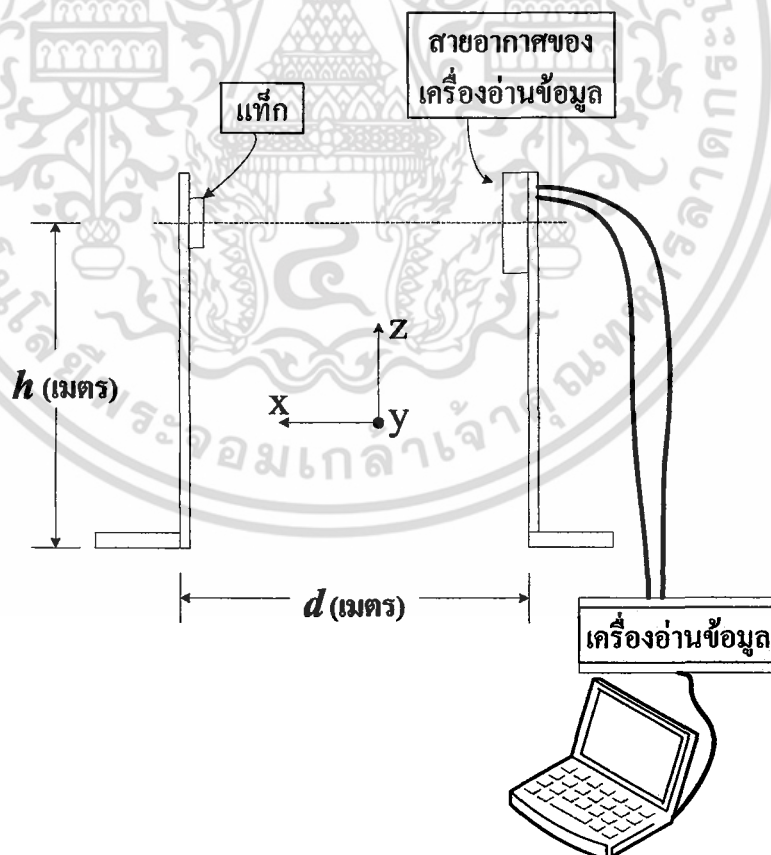
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุกับแท็ก เมื่อพิจารณาในย่านความถี่ UHF สำหรับในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกทำการทดสอบสายอากาศอ้างอิงที่ใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก และในส่วนที่สองทำการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วย โพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศอ้างอิงไปใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ในส่วนของรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

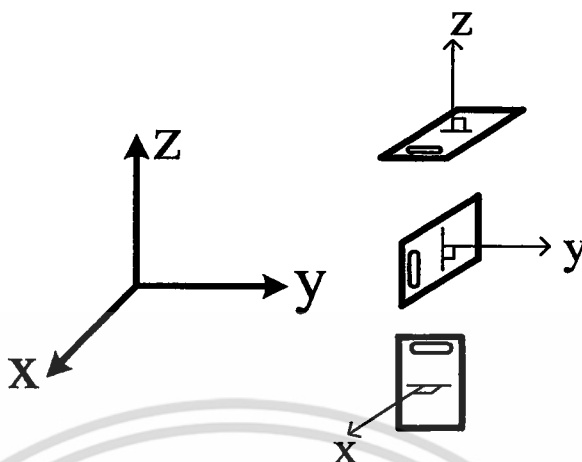
### 5.3.1 การทดสอบสายอากาศโดยใช้งานร่วมกับแท็กในกรณีที่ใช้สายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้นและแท็กมีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น

สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย การทดสอบสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้นและแท็กที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการหาระยะทางสูงสุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กด้วยวิธีการเคลื่อนตำแหน่งของแท็กออกจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจนกระทั่งเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยที่เริ่มต้นด้วยการติดตั้งสายอากาศอ้างอิงและแท็กให้มีระยะห่างกัน ( $d$ ) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศอ้างอิงและแท็กเท่ากับ 140 cm ดังแสดงในรูปที่ 5.6(ก) และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็ก แสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข)



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



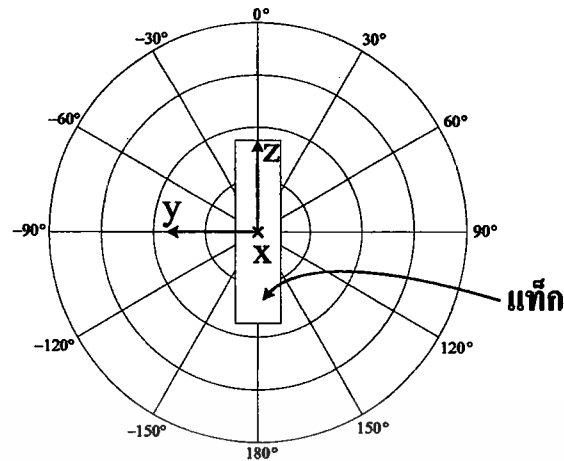
(ข)

รูปที่ 5.6 การทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล โดยใช้งานร่วมกับแท็ก

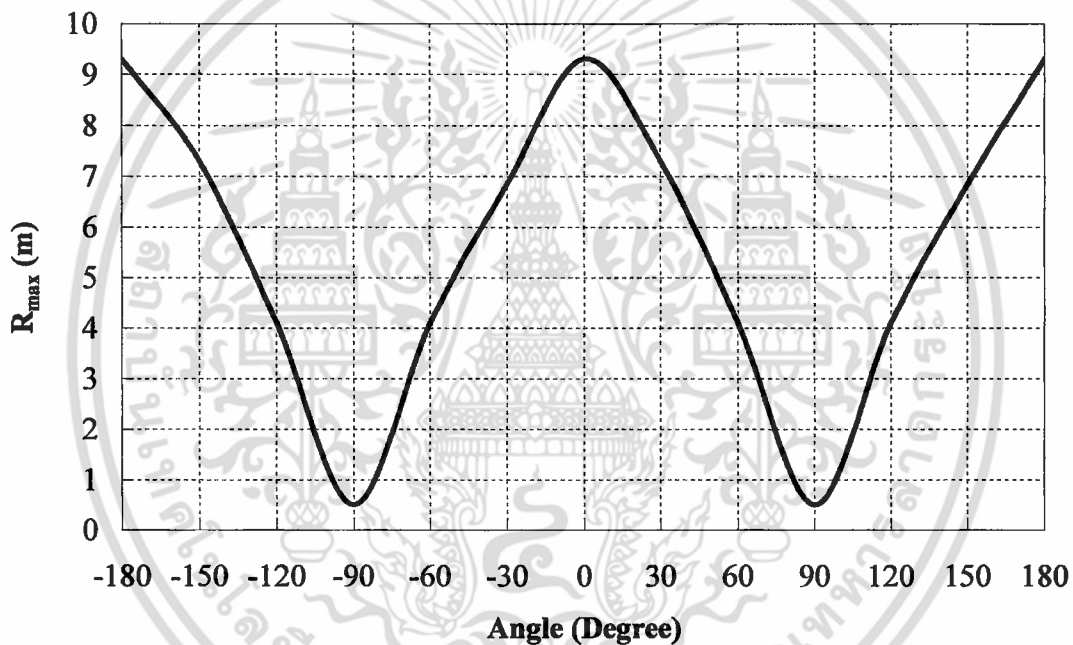
(ก) การติดตั้ง (ข) การวางตัวของแท็กในแต่ละแนวแกน

### 5.3.1.1 กรณีที่แท็กมีการวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นและแท็กเท่ากับ 140 cm หลังจากนั้นทำการหาระยะในการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) ให้มีค่ามากที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยที่สายอากาศอ้างอิงจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบแนวตั้ง และแท็กที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศไดโพลแบบขดที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กไปเป็นมุมครึ่งละ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุมเมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x ซึ่งเป็นทิศทางที่บริเวณด้านหน้าของแท็กจะหันเข้าหาด้านหน้าของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล แสดงดังในรูปที่ 5.6(ก) และผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงดังในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 การวางตัวของแท่งในแต่ละมุม เมื่อแท่งวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x



รูปที่ 5.8 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศอ้างอิงของเครื่องอ่านข้อมูลมีการ โพลารไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้ง (0 องศา)

จากรูปที่ 5.8 พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท่งมีการวางตัวในมุมที่ต่างกันและจะเห็นว่า ที่มุม 90 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่น้อยที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 50 cm ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่าระยะ  $d$  ที่กำหนดไว้เท่ากับ 1 m ดังนั้นที่มุม 90 องศา จึงต้องทำการเปลี่ยนระยะ  $d$  ให้มีระยะน้อยลงจนกระทั่งเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ และที่มุม 90 องศา นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0 องศา มีค่าเท่ากับ 9.3 m สาเหตุอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท่งในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

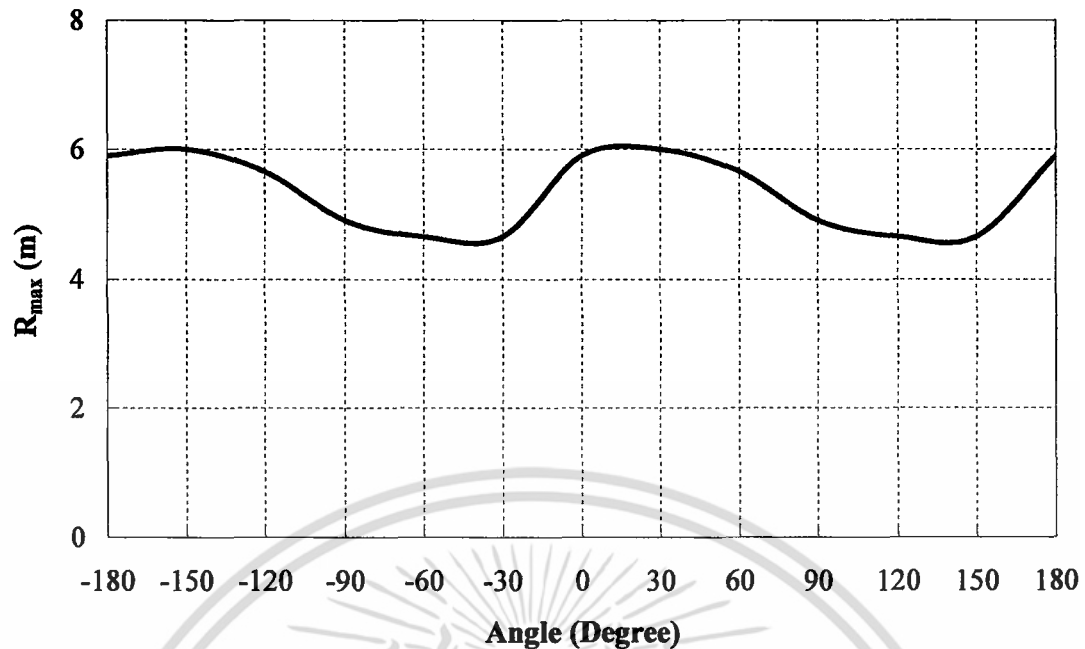
มุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาริซซ์ของแท่งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งลักษณะการวางตัวของแท่งตามรูปที่ 5.7 กล่าวคือ วางตัวในมุม 0 หรือ 180 องศา ซึ่งเป็นมุมที่แท่งมีการโพลาริซซ์เป็นแบบแนวตั้งซึ่งเหมือนกับการโพลาริซซ์ของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ดังนั้นจึงเกิดการแอมตซึ่งกันของการโพลาริซซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท่ง ทำให้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งได้ไกลที่สุด ส่วนที่มุมต่างๆ จะเกิดการไม่แอมตซึ่งกันของการโพลาริซซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท่งและโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 หรือ -90 องศา จะเกิดการไม่แอมตซึ่งกันของการโพลาริซซ์มากที่สุด ส่งผลให้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งได้น้อยที่สุด

### 5.3.2 การทดสอบสายอากาศโดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาริซซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งมีการโพลาริซซ์เป็นแบบเชิงเส้น

สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วยการทดสอบสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาริซซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งที่มีการโพลาริซซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่จะทำการติดตั้งสายอากาศอ้างอิงและแท่งให้มีระยะห่างกัน ( $d$ ) ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศอ้างอิงและแท่งเท่ากับ 140 cm ดังแสดงในรูปที่ 5.6(ก) และการวางตัวของแท่งจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข)

#### 5.3.2.1 กรณีที่แท่งมีการวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง ( $d$ ) มีค่าเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาริซซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งเท่ากับ 140 cm โดยที่สายอากาศอ้างอิงจะมีการโพลาริซซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศไดโพลแบบขดที่มีการโพลาริซซ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท่งไปเป็นมุมครึ่งละ 30 องศา เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และทำการทดสอบแบบเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.3.1 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งในแต่ละมุม เมื่อแท่งวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x ซึ่งเป็นทิศทางที่บริเวณด้านหน้าของแท่งจะหันเข้าหาด้านหน้าของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล แสดงดังในรูปที่ 5.6(ก) และผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงดังในรูปที่ 5.9

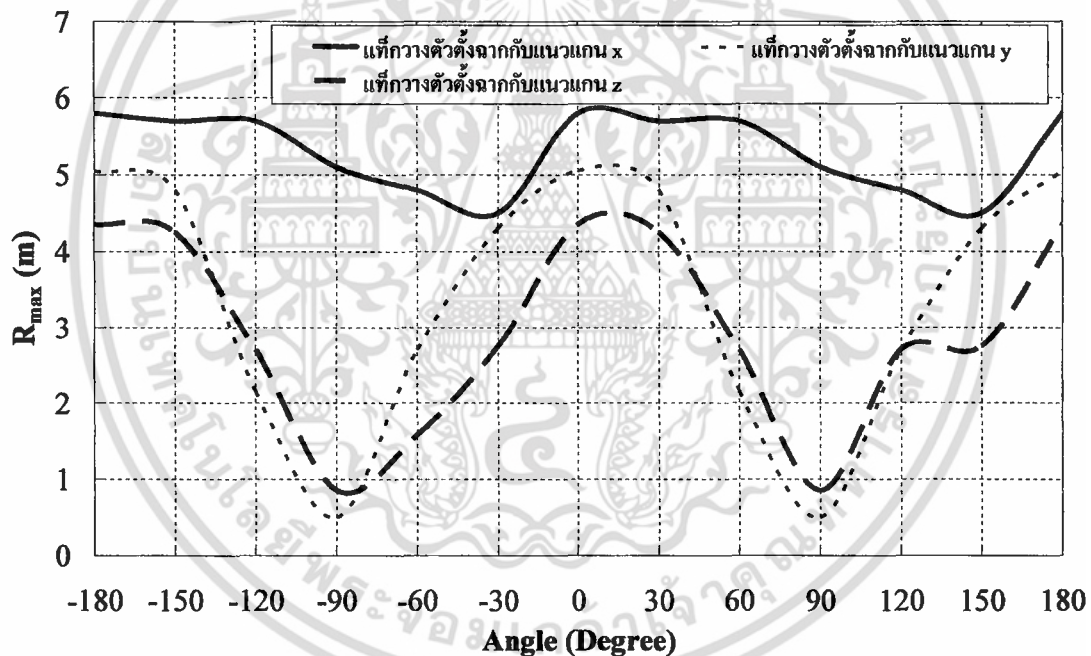


รูปที่ 5.9 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศอ้างอิงของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

จากรูปที่ 5.9 พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กมีการวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่า ที่มุม 60 หรือ -60 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 4.65 m และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 30 หรือ 150 องศา มีค่าเท่ากับ 6 m จากรูปที่ 5.9 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงระยะทางในการติดต่อสื่อสารจะมีค่าที่แตกต่างกันน้อยกว่ากรณีที่ใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 5.8 สาเหตุที่ระยะทางในการติดต่อสื่อสารเกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละมุมอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กซึ่งเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซ์กันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำให้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยกว่าในกรณีที่สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

### 5.3.3 การทดสอบสายอากาศโดยใช้งานร่วมกับแท่งในกรณีที่ใช้สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น

สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย การทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งที่มีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่จะทำการติดตั้งสายอากาศอ้างอิงและแท่งให้มีระยะห่างกัน ( $d$ ) ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศอ้างอิงและแท่งเท่ากับ 140 cm ดังแสดงในรูปที่ 5.6(ก) และการวางตัวของแท่งจะอ้างอิง โดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข) ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาริซ์เป็นแบบวงกลมและแท่งวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x y และ z

#### 5.3.3.1 กรณีที่แท่งมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x

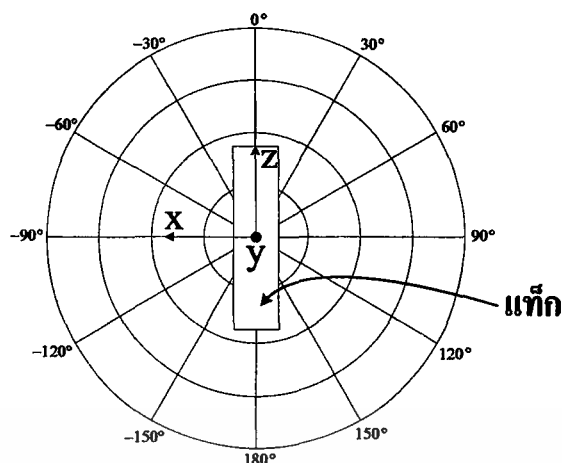
ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 5.10 ซึ่งในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของ

เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กเท่ากับ 140 cm โดยที่สายอากาศแท็กที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศไดโพลแบบขดที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กไปเป็นมุมครึ่งละ 30 องศา เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และทำการทดสอบแบบเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.3.1 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$  ซึ่งเป็นทิศทางที่บริเวณด้านหน้าของแท็กจะหันเข้าหาด้านหน้าของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล แสดงดังในรูปที่ 5.6(ก)

จากรูปที่ 5.10 พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$  จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กมีการวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่า ที่มุม -30 หรือ 150 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 4.5 m และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0 องศา หรือ 180 องศา มีค่าเท่ากับ 5.8 m สาเหตุอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กซึ่งเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิงกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำให้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยกว่าในกรณีที่สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

### 5.3.3.2 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน $y$

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กเท่ากับ 140 cm โดยที่สายอากาศแท็กที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศไดโพลแบบขดที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กไปเป็นมุมครึ่งละ 30 องศา เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $y$  ซึ่งเป็นทิศทางที่แท็กจะหันด้านข้างเข้าหาด้านหน้าของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล และผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงดังในรูปที่ 5.10 เช่นเดียวกัน



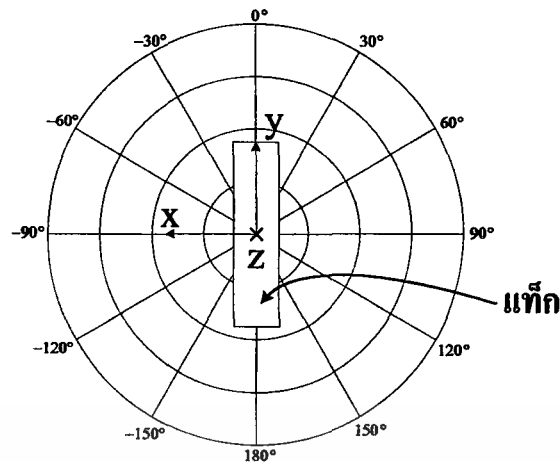
รูปที่ 5.11 การวางตัวของแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $y$

เมื่อแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $y$  ดังแสดงในรูปที่ 5.6(ข) ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 พบว่า ระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กมีการวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่า ที่มุม 90 องศา จะมีระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 50 cm และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0 องศา หรือ 180 องศา มีค่าเท่ากับ 5.05 m สาเหตุอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การ โพลาริซซ์ของแท็กซึ่งเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิงกันของการ โพลาริซซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 หรือ -90 องศา จะเกิดการไม่แมตซิงกันของการ โพลาริซซ์มากที่สุด จึงส่งผลให้ระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้น้อยที่สุด

### 5.3.3.3 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน $z$

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $z$  โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ( $d$ ) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มีการ โพลาริซซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กเท่ากับ 140 cm โดยที่สายอากาศแท็กที่ใช้ทดสอบเป็นสายอากาศไดโพลแบบขดที่มีการ โพลาริซซ์เป็นแบบเชิงเส้น การทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กไปเป็นมุมครึ่งละ 30 องศา เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.12 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $z$  ซึ่งเป็นทิศทางที่แท็กจะหันด้านข้างเข้าหาหน้าของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล และผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงดังในรูปที่ 5.10 เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

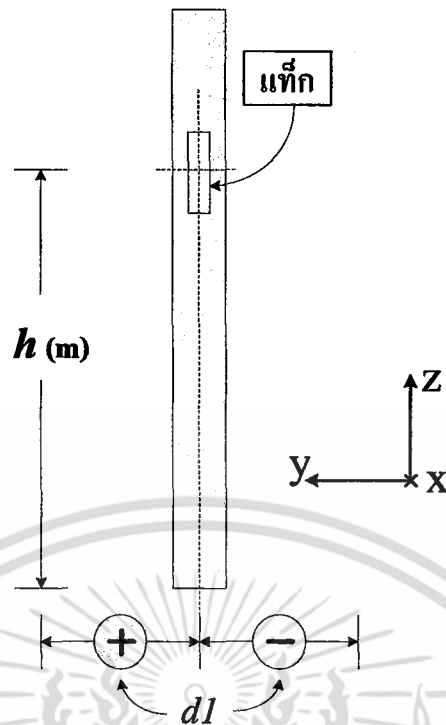


รูปที่ 5.12 การวางตัวของแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z

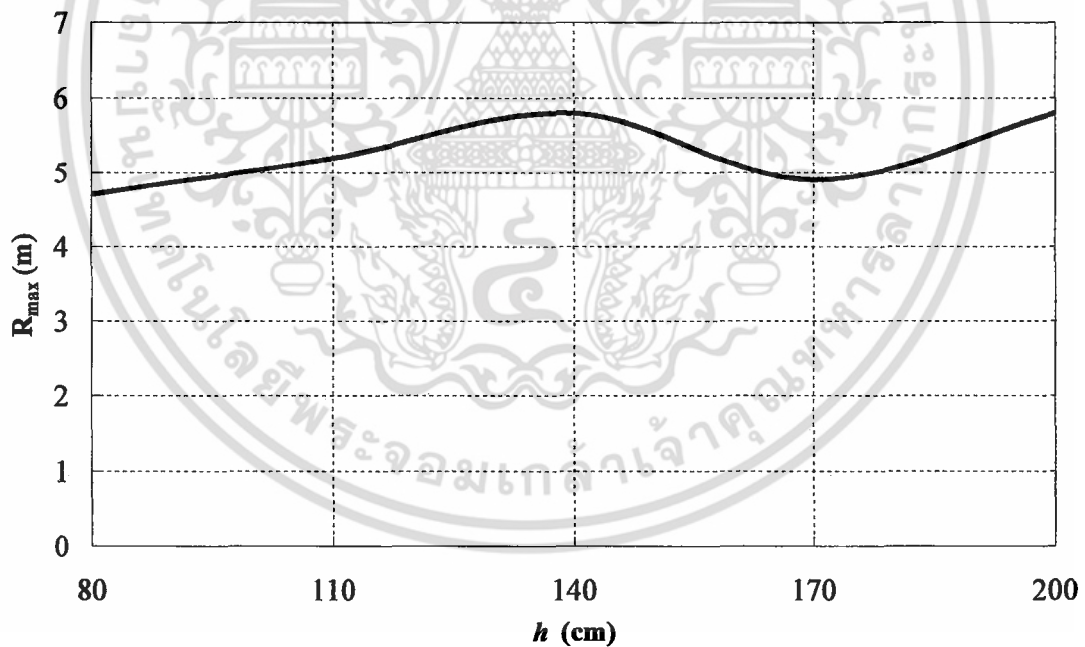
เมื่อแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.6(ข) ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 พบว่า ระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก จะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กมีการวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่า ที่มุม 90 องศา จะมีระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 85 cm และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาติดต่อสื่อสารที่มากที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0 องศา มีค่าเท่ากับ 4.35 m สาเหตุอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กซึ่งเป็นแบบเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก และ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 90 หรือ -90 องศา จะเกิดการไม่แมตซิงกันของการโพลาไรซ์มากที่สุด จึงส่งผลให้ระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ได้น้อยที่สุด

#### 5.3.3.4 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $h$ ) ของแท็ก ในกรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x

สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย การทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่จะทำการติดตั้งสายอากาศอ้างอิงและแท็กให้มีระยะห่างกัน ( $d$ ) ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และทำการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศแท็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็ก แสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข) ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 การทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $h$ )



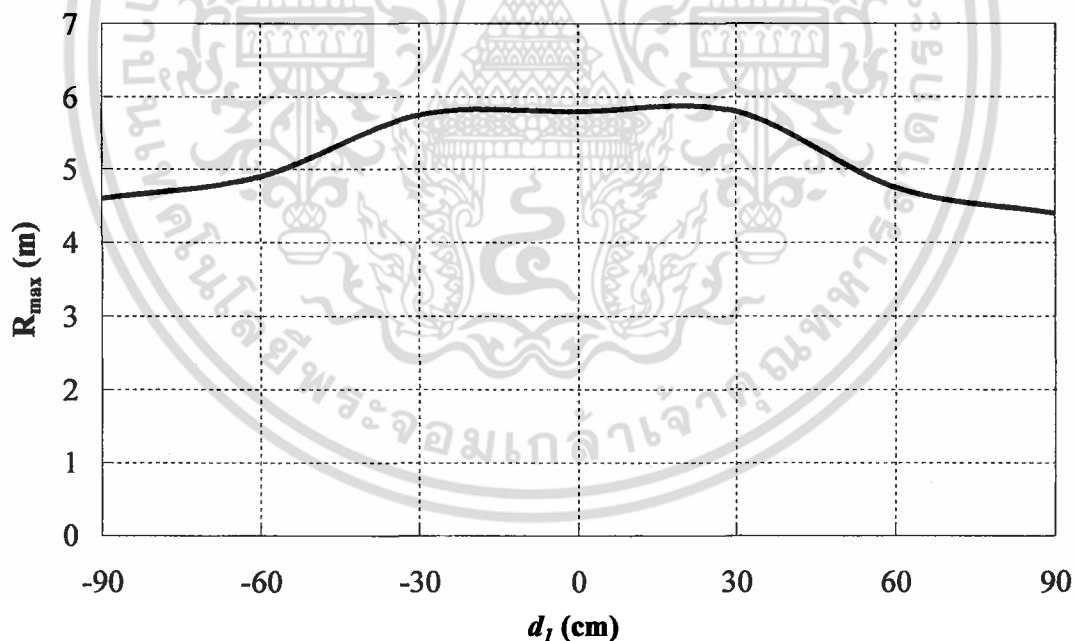
รูปที่ 5.14 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ความสูงต่างๆ เมื่อสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.14 พบว่า ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ความสูงต่างๆ นั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยที่ความสูง ( $h$ ) มีค่าเท่ากับ 140 cm มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด กล่าวคือ มีระยะการติดต่อสื่อสารเท่ากับ 5.8 cm เนื่องจากแท็กมีความสูงที่เท่ากับความสูงของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล

### 5.3.3.5 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะทาง ( $d_1$ ) ของแท็ก ในกรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน $x$

ในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย การทดสอบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่ จะทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบและแท็กให้มีระยะห่างกัน ( $d$ ) ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 m และมีความสูง ( $h$ ) ของสายอากาศแท็กและสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าเท่ากับ 140 cm และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากแนวตรงกลาง ( $d_1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิง โดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็ก แสดงได้ดังรูปที่ 5.6(ข) ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.15

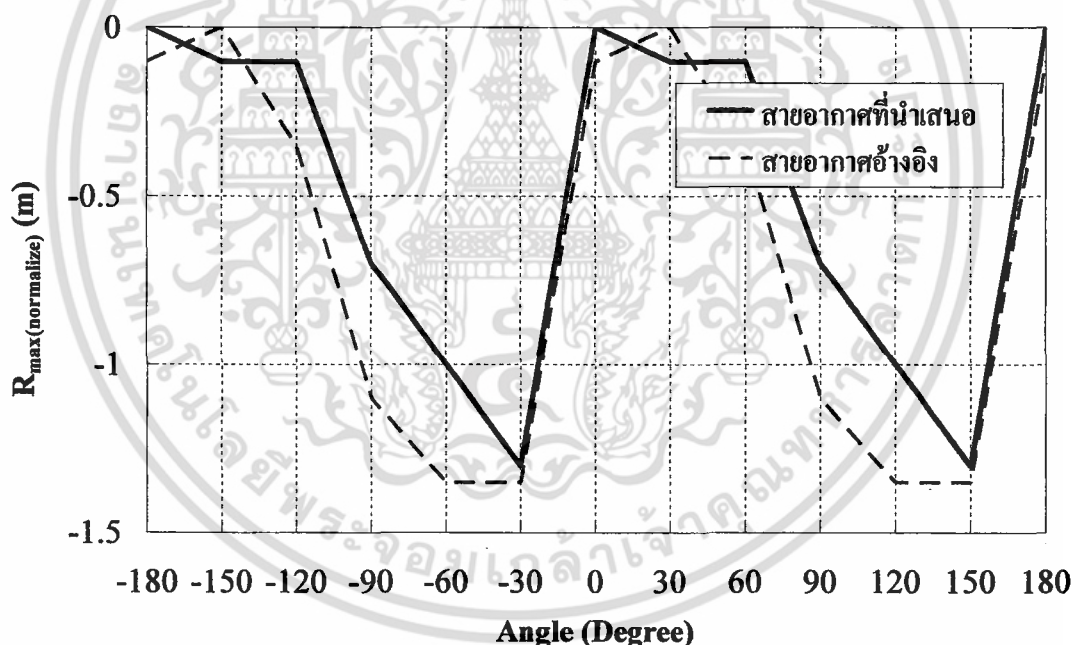


รูปที่ 5.15 ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ระยะห่าง ( $d_1$ ) จากแนวตรงกลาง เมื่อสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน  $x$

จากรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณาระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่ระยะห่างจากแนวตรงกลาง ( $d_1$ ) ต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่า ที่แนวตรงกลางจะมีระยะในการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด กล่าวคือ มีระยะการติดต่อสื่อสารเท่ากับ 5.8 m และระยะการติดต่อสื่อสารจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะห่างจากแนวตรงกลาง ( $d_1$ ) มีค่าประมาณ 60 cm

### 5.3.4 การเปรียบเทียบระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งของสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

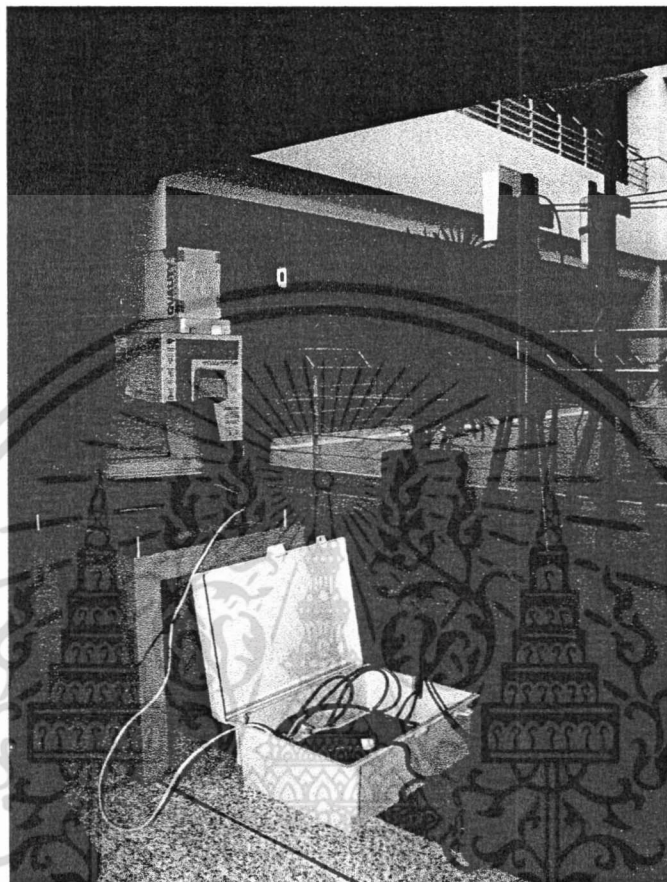
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงของระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง ระหว่างผลที่ได้จากสายอากาศอ้างอิงและสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วย โพรบซึ่งมีการ โพลาริซเป็นแบบวงกลมทั้งคู่ ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งระหว่างสายอากาศอ้างอิงกับสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบ

จากรูปที่ 5.16 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่างๆ ของสายอากาศอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วย โพรบหรือ กล่าวคือ สายอากาศแบบแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ดี ดังนั้นจึงส่งผลให้มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ได้ดีกว่าสายอากาศอ้างอิง



รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายของการทดสอบสายอากาศที่ใช้งานร่วมกับแท็ก

#### 5.4 บทสรุป

จากผลการทดสอบสายอากาศเพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก พบว่า สายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นที่ป้อนด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่ดี คือ มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กที่มีการโพลาไรซ์แบบต่างๆ ได้ใกล้เคียงกัน และบริเวณด้านหน้าของสายอากาศจะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ในระยะทางที่ไกลที่สุด ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถปรับปรุงความสามารถในการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กมีการโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศอ้างอิง ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF (920 MHz ถึง 925 MHz) โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีการ โพลาริซเป็นแบบวงกลมที่ดี มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวและมีอัตราขยายที่สูง นอกจากนี้ยังสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้ในหลากหลายลักษณะการจัดวางตัวของแท็กซึ่งลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแบบแผ่นระนาบที่มีสองชั้นซึ่งวางตัวอยู่เหนือระนาบกราวด์และมีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ในบทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ และนอกจากนี้ คือ ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่ UHF ส่วนในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

#### 6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเริ่มด้วยการอธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ จากนั้นอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุและทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศซึ่งได้ทำการคำนวณโดยใช้หลักการทางทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริปและนำผลที่ได้จากการคำนวณมาจำลองแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ UHF (920 MHz ถึง 925 MHz) ได้ โดยที่สายอากาศจะต้องมีคุณลักษณะดังนี้ คือ สายอากาศต้องมีการ โพลาริซเป็นแบบวงกลมที่ดี มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวและมีอัตราขยายที่สูงด้วย หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแล้ว จึงนำสายอากาศที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ค่าอัตราส่วนแกน ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นต้น พบว่า สายอากาศมีคุณลักษณะดังนี้ คือ มีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานและที่ความถี่กลาง (923 MHz) จะมีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.06 dB ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ดังนั้นสายอากาศจึงมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมตามที่ต้องการ ในส่วนของค่าการสูญเสียย้อนกลับ พบว่า ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 908 MHz ถึง 930 MHz (22 MHz) มีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ยิ่งไปกว่านั้นยังครอบคลุมย่านความถี่ที่มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ด้วย ดังนั้นสายอากาศจึงสามารถทำงานภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานได้โดยที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมตลอดทั้งย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz) ค่าอัตราขยายของสายอากาศภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานจะมีค่าอยู่ในช่วง 8.68-8.76 dBic และที่ความถี่กลาง (923 MHz) มีค่าเท่ากับ 8.73 dBic และเมื่อพิจารณาถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบ พบว่า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่ได้จากการจำลอง ในส่วนต่อไปได้ทำการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 มาทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ ที่ความถี่ 923 MHz
$u_x$	0.437 $\lambda$	14.21 cm
$u_y$	0.295 $\lambda$	9.59 cm
$S_h$	0.104 $\lambda$	3.38 cm
$v_x$	0.578 $\lambda$	18.80 cm
$v_y$	0.474 $\lambda$	15.40 cm
$t_1$	0.008 $\lambda$	2.60 mm
$t_2$	0.342 $\lambda$	1.11 cm
$d$	0.166 $\lambda$	5.38 cm
$r$	0.252 $\lambda$	8.20 cm
$x_p$	0.335 $\lambda$	10.90 cm
$y_p$	0.162 $\lambda$	5.25 cm
$w_x$	0.671 $\lambda$	21.80 cm
$w_y$	0.566 $\lambda$	18.40 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น ค่าอัตราส่วนแแกน ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้แล้ว พบว่า ที่ความถี่กลาง (923 MHz) มีค่าอัตราส่วนแแกนมีค่าที่ต่ำกว่า 3 dB ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่ก็มี ความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย คือ ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 915 MHz ถึง 931 MHz (16 MHz) ในส่วนของค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูง (927 MHz ถึง 937 MHz) มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และเมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบ พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการจำลอง

สุดท้ายคือ นำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นแล้ว ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูล โดยทำงานร่วมกับแท็ก ซึ่งผลที่ได้จากการนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้งานกับแท็กพบว่า เครื่องอ่านสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้จริง

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบ พบว่า สายอากาศที่ได้จากออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแท็กได้ และเมื่อทำการพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นวงรีบนแผ่นระนาบสองชั้นป้อนสัญญาณด้วย โพรบ จะเห็นว่าในตัวนำแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าชั้นกลางจะมีร่องที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างชั้นล่างกับชั้นบนมีการวางตัวในแนวเส้นทแยงมุมด้านซ้ายซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนขวา ในทางกลับกันหากร่องเชื่อมต่อบนตัวนำแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการวางตัวในแนวเส้นทแยงมุมด้านขวาจะส่งผลในทางตรงกันข้ามต่อการโพลาไรซ์ กล่าวคือ สายอากาศจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนซ้าย แต่เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะสังเกตเห็นว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงมีค่าอัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อค่าคลื่นด้านหลังที่สูงอยู่ ดังนั้นในการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำได้โดยการดัดแปลงในส่วนของระนาบกราวนด์ให้มีลักษณะที่มีมิติความสูงเพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อค่าคลื่นด้านหลัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ นำเสนอการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุง โครงสร้างให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นและหลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไปในอนาคต

## บรรณานุกรม

- [1] Klaus Finkenzeller, *RFID Handbook*, John Wiley& Sons, 2003.
- [2] RFID system, [Online]. Available: [www.controlelectric.com/RFID/What\\_is\\_RFID.html](http://www.controlelectric.com/RFID/What_is_RFID.html)
- [3] ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน RFID, [Online]. Available:  
<http://www.omron-ap.co.th/product%5Finfo/V700/>
- [4] Z. N. Chen, *Antennas for Portable Devices*, John Wiley& Sons, 2007.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, John Wiley& Sons, 2005.
- [6] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley& Sons, 1989.
- [7] C. S. Lee, V. Nalbandian, and F. Schwering, "Circularly polarized microstrip antenna with a single coaxial feed," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 1426–1427, 1996.
- [8] W.S. Chen, C.K. Wu, and K.L. Wong, "Compact circularly polarized microstrip antenna with bent slots," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1278–1279, 1998.
- [9] V. Nalbandian and C. S. Lee, "Planar, single-feed, circularly polarized microstrip antenna with enhanced bandwidth," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 3, pp. 1368–1371, 1998.
- [10] C. S. Lee and V. Nalbandian, "Planar circularly polarized microstrip antenna with a single feed," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1005–1007, 1999.
- [11] W.S. Chen, C.K. Wu, and K.L. Wong, "Square-ring microstrip antenna with a cross strip for compact circular polarization operation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1566–1568, 1999.
- [12] D. M. Pozar and S. M. Duffy, "A dual-band circularly polarized aperture-coupled stacked microstrip antenna for global positioning satellite (GPS)," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.45, no.11, pp. 1367-1374, 1997.
- [13] S. Yuminaga and Y. Yamada, "A Triple-layer patch antenna capable of triple-frequency operation," *Digest of the 2003 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 138–141, 2003.
- [14] Q. Jinghui, Q. Wenyi, Y. Caitian, and Z. Lingling, "A triple-frequency circularly polarized microstrip antenna," *Proceedings of the 2005 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol. 4, 3 pages, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] C.Y. Huang, J.Y. Wu, and K.L. Wong, "Cross-slot-coupled microstrip antenna and dielectric resonator antenna for circular polarization," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 605–609, 1999.
- [16] W.S. Chen, C.K. Wu, and K.L. Wong, "Square-ring microstrip antenna with a cross strip for compact circular polarization operation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1566–1568, 1999.
- [17] Alien\_9800, [Online]. Available:  
[http://www.alientechnology.com/docs/products/DS\\_ALR-9800.pdf](http://www.alientechnology.com/docs/products/DS_ALR-9800.pdf)
- [18] Alien\_9610\_datasheet, [Online]. Available:  
[http://www.adtio.com/EN/download/alien/alien\\_9610\\_datasheet.pdf](http://www.adtio.com/EN/download/alien/alien_9610_datasheet.pdf)
- [19] ALR-9611-CR, [Online]. Available:  
[www.rfidsupplychain.com](http://www.rfidsupplychain.com)
- [20] ALN-9540, [Online]. Available:  
[http://www.alientechnology.com/docs/products/DS\\_ALN\\_9540\\_Squiggle.pdf](http://www.alientechnology.com/docs/products/DS_ALN_9540_Squiggle.pdf)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรัฐพงษ์ สุวลักษณ์
วัน เดือน ปีเกิด	23 สิงหาคม 2525 ที่จังหวัดสงขลา
ที่อยู่	253/1 ถนนกาญจนวนิช ตำบลพะวง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90100
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2548 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] R. Suwalak and C. Phongcharoenpanich, "Elliptical Patch Antenna Radiating Unidirectional Beam with Circular Polarization for Reader of RFID at UHF Band," *Proceedings of the 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference*, pp. 833-836, May 2007.
- [2] R. Suwalak and C. Phongcharoenpanich, "Circularly Polarized Truncated Planar Antenna with Single Feed for UHF RFID Reader," *Proceedings of the 2007 Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2007)*, pp. 103-106, Oct. 2007.
- [3] R. Suwalak and C. Phongcharoenpanich, "Parametric Study of a Circularly Polarized Planar Antenna for Reader of UHF RFID System," *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2007)*, pp. 1625-1628, Dec. 2007.
- [4] R. Suwalak and C. Phongcharoenpanich, "A Probe-Fed Elliptical Patch Antenna on Double Layer Conducting Plate," *Proceedings of Joint International Conference on Information Communication Technology (JICT)*, pp. 136-139, Dec. 2007.