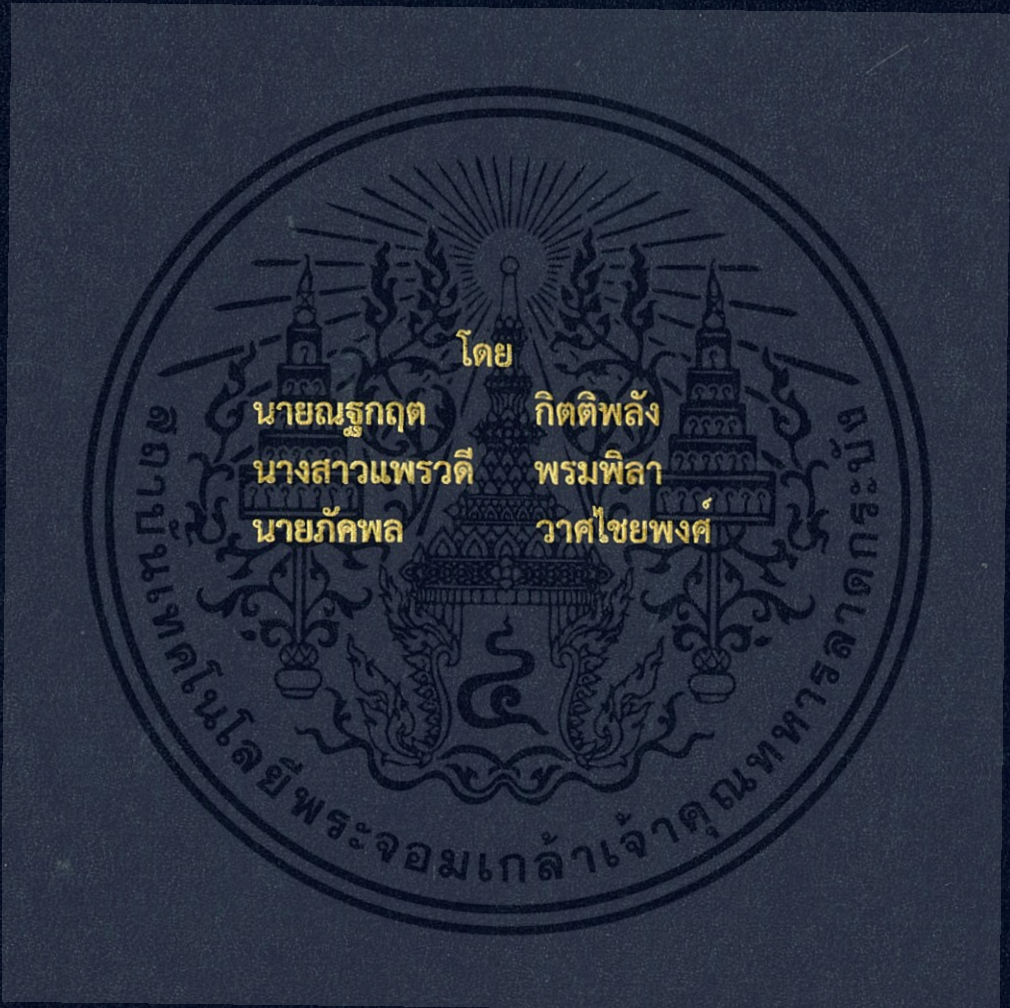


การออกแบบสายอากาศและระบบสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในสนามระยะใกล้  
และสนามระยะไกลในย่านความถี่สูง  
ANTENNA AND SYSTEM DESIGN FOR NEAR-FIELD AND FAR-FIELD  
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM  
AT HIGH FREQUENCY BAND



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบสายอากาศและระบบสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในสนามระยะใกล้  
และสนามระยะไกลในย่านความถี่สูง

ANTENNA AND SYSTEM DESIGN FOR NEAR-FIELD AND FAR-FIELD  
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM  
AT HIGH FREQUENCY BAND



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศและระบบสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในสนามระยะใกล้  
และสนามระยะไกลในย่านความถี่สูง

ANTENNA AND SYSTEM DESIGN FOR NEAR-FIELD AND FAR-FIELD  
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM  
AT HIGH FREQUENCY BAND

โดย  
นายณัฐกฤต กิตติพลัง 57010361  
นางสาวแพรวดี พรหมพิลา 57010940  
นายภัคพล วาศไชยพงศ์ 57010953

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560



ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(.....)  
อาจารย์ที่ปรึกษา



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(.....)  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ชิ้นงานด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสายอากาศและระบบสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในสนามระยะใกล้  
และสนามระยะไกลในย่านความถี่สูง

ANTENNA AND SYSTEM DESIGN FOR NEAR-FIELD AND FAR-FIELD WIRELESS  
COMMUNICATION SYSTEM AT HIGH FREQUENCY BAND

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐกฤต กิตติพิลัง 57010361
2. นางสาวแพรวดี พรหมพิลา 57010940
3. นายภักพล วาศไชยพงศ์ 57010953



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญ พาณิชย์ อาจารย์ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำและองค์ความรู้ต่างๆ รวมทั้งแนวคิดกระบวนการทางงานวิจัย อีกทั้งยังแนะนำผู้ชำนาญทางด้านองค์ความรู้ต่างๆ ให้จนกระทั่งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอมาโดยตลอด รวมทั้งขอบคุณอาจารย์อีกหลายๆ ท่านที่ได้ให้องค์ความรู้ต่างๆ แก่กลุ่มของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์ ร่มพุดตาล และคุณพิสิษฐ์ จันแปงเงิน ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ในทางเทคนิคและข้อคิด รวมทั้งองค์ความรู้ระเบียบแบบแผน และกำลังใจซึ่งเป็นแรงผลักดันอย่างยิ่งให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณสถานที่ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่ให้สามารถดำเนินปริญญาานิพนธ์นี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ๆทุกท่านในห้องปฏิบัติการทดลองและวิจัยที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งเป็นเบื้องหลังที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้ามาตลอด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปด้วยดี คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ กลุ่มของข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐกฤต กิตติพลัง

แพรววดี พรหมพิลา

ภักพล วาศไชยพงษ์

ผู้จัดทำ

การออกแบบสายอากาศและระบบสำหรับการสื่อสาร  
แบบไร้สายในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกลในย่าน  
ความถี่สูง

ANTENNA AND SYSTEM DESIGN FOR  
NEAR-FIELD AND FAR-FIELD WIRELESS  
COMMUNICATION SYSTEM AT HIGH  
FREQUENCY BAND

โดย นายณัฐกฤต กิตติพลัง 57010361  
นางสาวแพรวดี พรทพิลา 57010940  
นายภักพล วาศไชยพงศ์ 57010953

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

## บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอสายอากาศบ่วงขดลวดรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดี ระยะใกล้ย่านความถี่สูง 13.56 MHz และสายอากาศบ่วงขดลวดรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับสื่อสารอาร์เอฟไอดีระยะไกลย่านยูเอชเอฟ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในโครงการนี้ได้ออกแบบสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่โดยสายอากาศย่านความถี่สูง 13.56 MHz ที่ทำการออกแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีและสายอากาศย่านยูเอชเอฟที่ทำการออกแบบ ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงความถี่ 842 - 1021 MHz โดยนำสายอากาศที่ออกแบบมาใช้ร่วมกับโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี เพื่อติดต่อสื่อสารกับสายอากาศแท็กและควบคุมการทำงานระหว่างโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีด้วยบอร์ด Arduino R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ABSTRACT

This project presents rectangular coiled wire antenna for 13.56 MHz for high frequency RFID of near-field and rectangular loop antenna for UHF RFID of far-field. The antenna proposed in this project was designed to be applied for smart devices. The 13.56 MHz high frequency antenna design has a good reflection coefficient and antenna for UHF band was designed to provide impedance bandwidth of frequency 842 -1021 MHz. The antenna design was created to cooperate with RFID reader module to communicate with tag antenna and control between RFID reader modules by Arduino R3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	X
สารบัญตาราง	XVI
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 บทนำ	2
2.2 ทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป	4
2.3 คุณลักษณะของสายอากาศ	5
2.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (RADIATION PATTERN)	
2.3.2 ความกว้างลำคลื่น (BEAMWIDTH)	
2.3.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (STANDING WAVE RATIO : SWR)	
2.3.4 ประสิทธิภาพสายอากาศ (EFFECTIVE ANTENNA)	
2.3.5 อัตราขยาย (GAIN)	
2.3.6 ช่วงกว้างความถี่ (BANDWIDTH)	
2.3.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (ANTENNA IMPEDANCE)	
2.3.8 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกประสิทธิภาพ (EFFECTIVE ISOTROPIC RADIATION POWER)	
2.3.9 การโพลาไรซ์ (POLARIZATION)	
2.4 ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ย่านความถี่ใช้งาน	
2.5 ส่วนประกอบระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุหรือ RFID	17
2.5.1 แท็ก (TAG)	
2.5.2 สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (READER ANTENNA)	
2.5.3 เครื่องอ่านข้อมูล (RFID READER)	
2.5.4 เครื่องคอมพิวเตอร์	
2.6 การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กของระบบอาร์เอฟไอดี	20
2.6.1 วิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (INDUCTIVE COUPLING หรือ PROXIMITY ELECTROMAGNETIC)	
2.6.2 วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC PROPAGATION COUPLING)	
2.7 โครงสร้างของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สูง	21
2.7.1 หน่วยควบคุมการทำงาน	
2.7.2 ภาครับส่งข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	
2.7.3 ส่วนแมตซิง	
2.7.4 สายอากาศ	
2.8 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล	22
2.8.1 เพื่อต้องการส่งความถี่วิทยุ (คลื่นพาห์) ให้เป็นกำลังงานของแท็ก	
2.8.2 เพื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุ (สัญญาณข้อมูล) จากแท็ก	
2.9 คุณสมบัติของอุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดี	25
2.9.1 ลักษณะการทำงาน (OPERATION TYPE)	
2.9.2 ขนาดข้อมูล (DATA QUANTITY)	
2.9.3 ความสามารถในการโปรแกรม (PROGRAMMABLE)	
2.9.4 แหล่งพลังงาน (POWER SUPPLY)	
2.10 ข้อพิจารณาความปลอดภัยการใช้อุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟไอดี	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล	
2.10.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์	
2.11 ระยะเวลาอ่านแท็กของอุปกรณ์อาร์เอฟไอดี	27
2.12 หลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตซิงสำหรับสายอากาศบ่วง สี่เหลี่ยม	27
2.12.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ	
2.12.2 การปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยวงจรแมตซิง	
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	<b>31</b>
3.1 การออกแบบ	31
3.1.1 โครงสร้างและการออกแบบของสายอากาศ	
3.1.2 ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศบ่วงรูปทรง สี่เหลี่ยม	
3.1.3 การจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กของสายอากาศ	
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (NETWORK ANALYZER)	
3.2.2 FIELDFOX RF ANALYZER	
3.2.3 ME1300 TRAINING KIT	
3.2.4 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ANECHOIC CHAMBER)	
3.2.5 แผ่นวงจรพิมพ์ FR4 0.8MM	
3.2.6 RP-SMA MALE TO RP-TNC MALE REVERSE POLARITY CONNECTOR	
3.2.7 RF ADAPTER SMA MATE TO SMA MALE PLUG RIGHT ANGLE	
3.2.8 SMA-FEMALE	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.9 SMA MALE TO SMA MALE PLUG IN SERIES RF COAXIAL ADAPTER CONNECTOR	
3.2.10 NFC SHIELD V2.0	
3.2.11 UART ยูเอชเอฟ PASSIVE 6C	
3.2.12 ARDUINO UNO R3	
3.2.13 แท็กเหรียญ NFC	
3.2.14 แท็กบัตร NFC	
3.2.15 แท็กสมาร์ทโฟน NFC	
3.2.16 แท็กบัตรยูเอชเอฟ	
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	49
3.3.1 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน $ S_{11} $ ของ สายอากาศ	
3.3.2 การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ ยูเอชเอฟ	
3.3.3 การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่น	
3.3.4 ทดสอบการรับแท็ก NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีด้วย NFC SHIELD V2.0 MODULE	
3.3.5 ทดสอบการรับแท็ก ยูเอชเอฟ จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ด้วย UART ยูเอชเอฟ PASSIVE 6C	
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>57</b>
4.1 สร้างสายอากาศที่ทำการการออกแบบ	57
4.1.1 โครงสร้างสายอากาศ ยูเอชเอฟ	
4.1.2 โครงสร้างสายอากาศ NFC	
4.2 ผลการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน $ S_{11} $ ของ สายอากาศ	58

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	เมื่อเปรียบเทียบค่า $ S_{11} $ ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศ ต้นแบบกับผลวัดจริงของสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น	
4.3	ผลทดสอบการรับแท็ก NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	62
4.3.1	ผลทดสอบการรับแท็กชนิดเหรียญ NFC จากเครื่องอ่านข้อมูล อาร์เอฟไอดี NFC SHIELD V2.0	
4.3.2	ผลทดสอบการรับแท็กชนิดบัตร NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์ เอฟไอดี NFC SHIELD V2.0	
4.3.3	ผลทดสอบการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนด้วยเครื่องอ่านข้อมูลอาร์ เอฟไอดี NFC SHIELD V2.0	
4.3.4	ผลการทดสอบระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ในสนามระยะใกล้	
4.4	ผลทดสอบการรับแท็กยูเอชเอฟ จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	69
4.4.1	ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับ เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ XY	
4.4.2	ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับ กับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ XZ	
4.4.3	ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับ กับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ YZ	
4.4.4	ผลการทดสอบระบบระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่าน ความถี่สูงยิ่ง ยูเอชเอฟ ในสนามระยะไกล	
4.4.5	ผลการทดสอบจากระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่ สูงยิ่งยูเอชเอฟภายในโครงสร้างกล่องในสนามระยะไกล	
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>84</b>
5.1	สรุปผล	84
5.2	ข้อเสนอแนะ	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม	หน้า 86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	4
2.2	คลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิดธ์ของแบบรูปสายอากาศ	6
2.3	สเกลในเชิงเส้นของแบบรูปกำลังและความสัมพันธ์กับพหุคูณและบีมวิดธ์	6
2.4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูป 2 มิติ	7
2.5	ช่วงกว้างความถี่	11
2.6	การโพลาไรซ์	15
2.7	ส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	17
2.8	แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบบพาสซีฟ	18
2.9	แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบบแอ็กทีฟ	19
2.10	สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	19
2.11	วิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้ในย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง	20
2.12	วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้ในย่านความถี่สูงยิ่งและย่านความถี่ไมโครเวฟ	21
2.13	รูปโครงสร้างของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สูง	21
2.14	การคำนวณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B$ ที่จุดสังเกต $P$ โดยการป้อนกระแสที่ลวดตัวนำ	23
2.15	การคำนวณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B$ ที่จุดสังเกต $P$ โดยการป้อนกระแส ( $I$ ) เข้าบ่วง	24
2.16	การลดลงของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B$ กับระยะห่าง	24
2.17	การนำวงจรแมตซ์ชิงมาต่อเข้ากับสายอากาศ	28
2.18	คุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสมิตชาร์ต	29
2.19	การจำลองปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสมิตชาร์ต	30
3.1	ลักษณะของสายอากาศย่านความถี่	32
3.2	$ S_{11} $ ที่ฟังก์ชันของความถี่	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ย่านความถี่ ยูเอชเอฟ	34
3.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศย่านความถี่ ยูเอชเอฟ	34
3.5 ลักษณะของสายอากาศ NFC ย่านความถี่ 13.56 MHZ	35
3.6 $ S_{11} $ ที่ฟังก์ชันของความถี่	36
3.7 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง $I_2$ ต่อ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	37
3.8 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง $w_1$ ต่อ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	38
3.9 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง $w_7$ ต่อ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	38
3.10 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง $I_3$ ต่อ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	39
3.11 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง $w_2$ ต่อ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	39
3.12 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศย่านความถี่ 886 MHZ	40
3.13 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศย่านความถี่ 13.56 MHZ	40
3.14 เครื่อง (NETWORK ANALYZER) รุ่น E5061B ENA SERIES NETWORK ANALYZER	41
3.15 FIELDFOX RF ANALYZER N9912A	42
3.16 ME1300 TRAINING KIT	42
3.17 วัสดุดูดซับคลื่นเสียงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	43
3.18 FR4 0.8MM	43
3.19 RP-SMA MALE TO RP-TNC REVERSE POLARITY CONNECTOR MALE	44
3.20 RF ADAPTER SMA MATE TO SMA MALE PLUG RIGHT ANGLE	44
3.21 SMA-FEMALE	45
3.22 SMA MALE TO SMA MALE PLUG IN SERIES RF COAXIAL ADAPTER CONNECTOR	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 NFC SHIELD V2.0	46
3.24 UART ยูเอชเอฟ PASSIVE 6C	46
3.25 ARDUINO UNO R3	47
3.26 แท็กเหรียญ NFC	47
3.27 แท็กบัตร NFC	48
3.28 แท็กสมาร์ทโฟน NFC	48
3.29 แท็กบัตรยูเอชเอฟ	48
3.30 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	49
3.31 การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ ยูเอชเอฟ	50
3.32 การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	51
3.33 ยูเอชเอฟ	52
3.34 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการ สื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง NFC	53
3.35 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC SHIELD V2.0 MODULE ด้วยโปรแกรม ARDUINO	54
3.36 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC SHIELD V2.0 MODULE ด้วยโปรแกรม ARDUINO	55
3.37 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการ สื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟ	56
3.38 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก UART ยูเอชเอฟ PASSIVE 6C ด้วยโปรแกรม ARDUINO	57
4.1 สายอากาศสร้างขึ้นย่านความถี่ยูเอชเอฟที่สร้างขึ้น	58
4.2 รูปถ่ายสายอากาศ NFC ย่านความถี่ 13.56 MHZ	59
4.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ของ สายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ	

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ	60
4.5 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ	60
4.6 ผลการจำลองและผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ของสายอากาศ NFC ที่ความถี่ 13.56 MHz	61
4.7 การรับแท็กชนิดเหรียญ	62
4.8 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดเหรียญระนาบแกน X	63
4.9 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดเหรียญระนาบแกน Y	63
4.10 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดเหรียญระนาบแกน Z	63
4.11 การรับแท็กชนิดบัตร	64
4.12 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน X	65
4.13 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน Y	65
4.14 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน Z	66
4.15 การรับแท็กจากสมาร์ทโฟน (ก) ระนาบแกน Z	67
4.16 ผลการทดสอบการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนระนาบแกน Z	67
4.17 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ด้วยระบบ RFID	68
4.18 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง	68
4.19 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยูเอชเอฟในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ANECHOIC CHAMBER) ในระนาบ XY	69
4.20 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยูเอชเอฟในระนาบ XY (ด้านหน้า)	70
4.21 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยูเอชเอฟในระนาบ XY (ด้านข้าง)	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XY (ด้านหลัง)	71
4.23 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XY (มุมบน)	71
4.24 แบบจำลองในการทดสอบรับแก็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ANECHOIC CHAMBER) ในระนาบ XZ	72
4.25 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XZ (ด้านหน้า)	73
4.26 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XZ (ด้านข้าง)	73
4.27 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XZ (ด้านหลัง)	74
4.28 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ XZ (มุมบน)	74
4.29 แบบจำลองในการทดสอบรับแก็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ANECHOIC CHAMBER) ในระนาบ YZ	75
4.30 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ YZ (ด้านหน้า)	76
4.31 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ YZ (ด้านข้าง)	76
4.32 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ YZ (ด้านหลัง)	77
4.33 ผลการทดสอบการรับแก็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟใน ระนาบ YZ (มุมบน)	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟ ด้วยระบบ RFID	79
4.35 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง	79
4.36 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ภายในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ANECHOIC CHAMBER) ในระนาบ YZ	80
4.37 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านหน้า)	81
4.38 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านข้าง)	81
4.39 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านหลัง)	82
4.40 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยู่เอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (มุมบน)	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความถี่ที่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่ของแต่ละประเทศ	16
2.2	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ	17
3.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ยูเอชเอฟ	32
3.2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ NFC	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีนั้นมีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไร้สาย เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่ต้องการความสะดวกสบาย เพื่อการใช้ชีวิตอีกระดับที่ง่ายยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่ามนุษย์ในยุคปัจจุบันนั้นจะมีสิ่งหนึ่งที่ขาดไม่ได้เลย นั่นก็คือโทรศัพท์สมาร์ทโฟนซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องมือสื่อสารไร้สายที่มนุษย์ขาดจากกันไม่ได้เลยและเพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานอีกระดับ อุตสาหกรรมผู้ผลิตโทรศัพท์สมาร์ทโฟนเริ่มที่จะตื่นตัวเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ จึงได้เริ่มผลิตเทคโนโลยี Tag NFC ติดมากับโทรศัพท์มือถือ เพื่อรองรับการใช้งานในการซื้อขายจ่ายสะดวกด้วยโทรศัพท์สมาร์ทโฟนเพียงเครื่องเดียว

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น คณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Tag NFC ที่ความถี่ 13.56 MHz มาเป็นส่วนประกอบหนึ่งของการใช้งานเครือข่ายไร้สายเพื่อควบคุมการติดตั้งของหลอดไฟ

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ออกแบบและทดสอบสายอากาศสำหรับแอปพลิเคชัน NFC (13.56 MHz) และ Far-field (UHF band)
- 2) ออกแบบคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานระหว่างโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีและสายอากาศที่ออกแบบเพื่อติดต่อสื่อสารร่วมกับ tag antenna

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

- 1) ขนาดของสายอากาศที่ออกแบบจะมีขนาดจำกัดเนื่องจากการศึกษาพัฒนาสำหรับอุปกรณ์สมัยใหม่
- 2) ระยะเวลาสื่อสารของ Far-field จะถูกจำกัดด้วยขนาดของสายอากาศ
- 3) ใช้ระบบโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีร่วมกับสายอากาศที่ออกแบบ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศแบบไมโครสตริปสี่เหลี่ยม และระบบอาร์เอฟไอดี RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นระบบที่มีลักษณะของคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ Transponder และ Reader โดย Transponder คือ ตัวจัดเก็บและส่งข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปแบบของฉลากหรือป้าย โดยจะทำการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นไว้หรือเรียกอีกอย่างโดยทั่วไปว่า แท็ก (Tag) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่มีข้อมูลที่ถูกบันทึกอยู่ในแท็กตอบสนองไปยังตัวอ่านข้อมูล และในส่วนที่สอง Reader คืออุปกรณ์สำหรับอ่านข้อมูลหรือการเขียนข้อมูลภายในแท็กเป็นเครื่องอ่านในรูปแบบของระบบอาร์เอฟไอดี ในระบบอาร์เอฟไอดีมีข้อดีคือสามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นตัวแท็กและไม่จำเป็นต้องอยู่บนเส้นตรงกับคลื่น เพียงอยู่ในบริเวณที่สามารถอ่านแท็กได้หลายๆ ตัวในเวลาเดียวกับแบบไร้สภาพการสัมผัสเพราะลักษณะของระบบอาร์เอฟไอดีนี้ ระบบจะระบุอยู่ในลักษณะทางคลื่นวิทยุ ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านแท็กโดยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ดซึ่งเป็นระบบรหัสแท่งที่จะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่านจึงจะต้องอ่านรหัสแท่งที่ไม่มีอะไรปิดหรือต้องอยู่ในเส้นเดียวกันกับลำแสงที่ยิงมาจากเครื่องสแกนต่างๆ และอ่านวัตถุได้ในที่ละชั้นระยะที่ไกลๆ ในปัจจุบันได้มีการนำระบบอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้ในทางหลายๆ ด้านตัวแท็กใช้งานก็อยู่ในรูปแบบลักษณะต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น การใช้บัตรชนิดต่างๆ สำหรับการผ่านเข้าออกอาคารหรือสถานที่ที่สำคัญ บัตรที่จอตลอดตามศูนย์การค้า หรือตัวแท็กที่มีขนาดเล็กสามารถแทรกติดอยู่กับหนังสือหรือเป็นแบบแคปซูลขนาดเล็กฝังตัวสัตว์เพื่อดูพฤติกรรมภายในของสัตว์ในการเก็บประวัติหรือวิจัยต่างๆ เป็นต้น

ในการใช้งานย่านความถี่ต่างๆ ของระบบอาร์เอฟไอดีจะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสารทั่วไปตามข้อกำหนดของ สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ซึ่งย่านความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดีแต่ละย่านมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพแต่ต่างกันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านความถี่หลักได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF)

ใช้ความถี่ที่ต่ำจะอยู่ในช่วงความถี่ 30 - 300 kHz ระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้ย่านความถี่ต่ำจะมีคุณสมบัติในระยะการอ่านจะมีระยะการอ่านที่สั้นประมาณ 10 - 20 cm ความเร็วในการอ่านแท็กช้า และมีการดูดกลืนน้อยโดยความยาวคลื่นเป็นส่วนกลับของความถี่ จึงทำให้ความยาวคลื่นสูงขึ้น เมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้นสัญญาณที่ใช้ความถี่ต่ำก็จะถูกคลื่นได้ยากในชั้นบรรยากาศ (Atmosphere) และสามารถทะลุผ่านโลหะได้จึงทำให้ระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้ความถี่ต่ำเหมาะกับการใช้งานในน้ำและโลหะหรือนำไปใช้สำหรับการควบคุมการเข้าถึง การติดตามคนและสัตว์ การเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นต้น

- ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF)

ใช้ความถี่สูงจะอยู่ในช่วงความถี่ 300 MHz ถึง 3 GHz ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงที่ใช้งานโดยทั่วไปจะใช้ที่ความถี่ 6.8 MHz หรือ 13.56 MHz ซึ่งจะมีคุณสมบัติในระยะการอ่านจะมีระยะการอ่านที่ไกลประมาณ 100 cm และเนื่องจากความถี่สูงมีความยาวคลื่นสั้นจึงทำให้ไม่สามารถแพร่กระจายผ่านโลหะได้และมีความเร็วในการส่งข้อมูลมากกว่าระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้ความถี่ต่ำ

- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF)

ใช้ความถี่สูงจะอยู่ในช่วงความถี่ 3 ถึง 30 MHz ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงที่ใช้งานโดยทั่วไปจะใช้ที่ความถี่ 344 MHz และ 860 - 960 MHz ซึ่งจะมีคุณสมบัติในระยะการอ่านจะมีระยะการอ่านที่ไกลประมาณ 1 - 10 m ความเร็วในการอ่านแท็กข้อมูลที่สูงและรวดเร็วทำให้อาจเกิดข้อผิดพลาดมากขึ้น ความถี่ในย่านความถี่สูงยิ่งนี้ มีการใช้งานในแต่ละประเทศที่แตกต่างกัน จึงทำให้ไม่สามารถนำระบบอาร์เอฟไอดีไปใช้ได้ทุกประเทศ

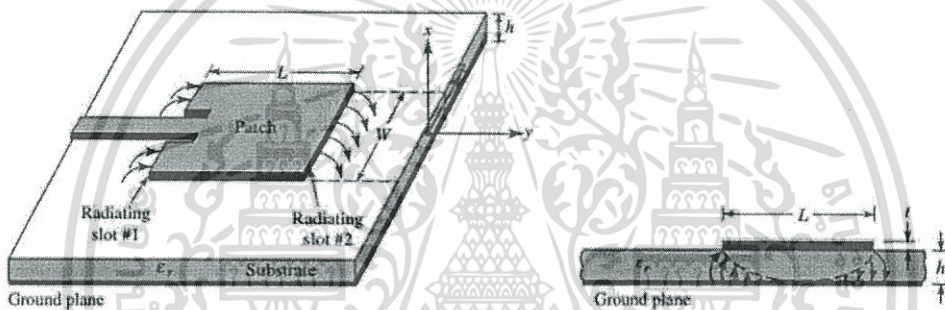
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave)

ในปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดีกำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 m เป็นต้น ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด และมีความราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแบบระนาบหรือแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1 เป็นสายอากาศที่สร้างขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้ทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ วัสดุฐานรอง (Substrate) แพตช์ (Patch) และกราวนด์ (Ground) ซึ่งแพตช์ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น ณ ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจะอยู่ด้านบนสุดของแผ่นไมโครสตริป ส่วนกราวนด์ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งจะอยู่ด้านหลังของส่วนที่แพร่กระจายคลื่น โดยที่จะมีวัสดุฐานรองคั่นอยู่ตรงกลาง โดยที่วัสดุฐานรองจะทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน โดยในการออกแบบเราจะต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป [1]

- 1) ค่าความนำสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ; relative permittivity)
- 2) ค่าความสูงของแผ่นวัสดุฐานรอง ( $h$ )
- 3) ค่าความกว้างของแพตช์ ( $w$ ) ซึ่งหาได้จาก

$$w = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_r$  คือ ค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบ (Hz)

$v_0$  คือ ค่าความเร็วแสง มีค่า  $3 \times 10^8$  (m/s)

$\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบของแม่เหล็ก มี  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า มีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  (F/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ ซึ่งหาได้จาก

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2}; \frac{w}{h} > 1 \quad (2.2)$$

5) ค่าความขดเขยอนเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Fring effect ( $\Delta L$ ) ซึ่งหาได้จากสูตร

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.3)$$

6) ค่าความยาวของแพตช์ซึ่งหาได้จาก

$$L = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.4)$$

## 2.3 คุณสมบัติของสายอากาศ

สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่ง จำเป็นต้องทราบคำนิยามของคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศที่จะช่วยในการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่างๆ มากมาย โดยมีส่วนสำคัญดังนี้

### 2.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเฟส (Phase) หรือการโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของแบบรูปที่เขียนอยู่ในรูป 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นในทิศของ  $\theta$  หรือ  $\phi$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบ คือ  $D|\theta, \phi|$  ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้า จะเรียกว่า รูปแบบสนาม (Field Pattern) ถ้าเป็นแบบรูปที่เขียนจากกำลังคลื่น  $D|\theta, \phi|$  จะเรียกว่าแบบรูปกำลัง (Power Pattern) และโดยปกติจะถูกรหัสด้วยค่าสูงสุด (Normalize) ซึ่งจะทำให้แบบรูปมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือถ้ากำกับหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB บางครั้งการแสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสก็มีความหมายในทางปฏิบัติเช่นเดียวกัน แบบรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสนี้เรียกว่า แบบรูปเฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

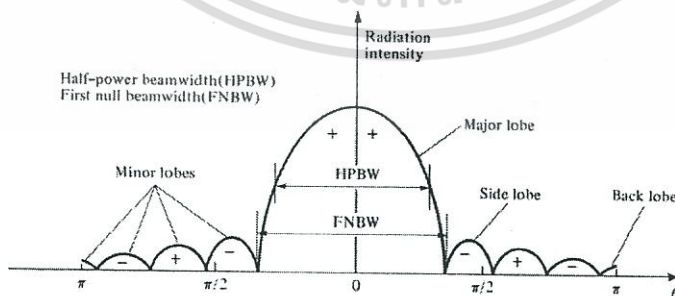
ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับเฟสเกี่ยวกับความเข้มของสนามไฟฟ้าล้วนอยู่ใน  $D|\theta, \phi|$  ทั้งสิ้นนอกจากนั้น  $D|\theta, \phi|$  ยังบอกทิศทางของการโพลาไรซ์ของ  $\vec{E}$  อีกด้วย

โดยองค์ประกอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มีดังนี้

- ลำคลื่นหลัก (Main Beam) คือ ลำคลื่นที่มีกำลังการแพร่กระจายออกไปมากที่สุด และโดยทั่วไปจุดสูงสุดของแบบจะอยู่ในลำคลื่นหลักนี้
- ลำคลื่นย่อย (Side Lobe หรือ Minor Lobe) คือ ลำคลื่นส่วนอื่นทั้งหมด นอกจากลำคลื่นหลัก
- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half – Power Beam Width : HPBW) คือ ช่วงมุมที่วัดจากจุด 2 จุดที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น เป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (-3 dB)
- ความกว้างลำคลื่นระหว่างจุดศูนย์จุดแรก (First Null Beam Width : FNBW) คือ ช่วงมุมที่เกิดจากการที่ค่าของกำลังเป็นศูนย์ครั้งแรก



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กำลังงานและความกว้างลำคลื่นของแบบรูปสายอากาศ [1]



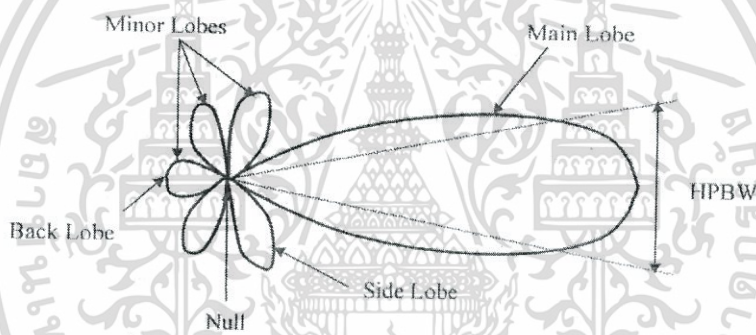
รูปที่ 2.3 สเกลในเชิงเส้นของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นและความสัมพันธ์กับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นย่อยและความกว้างลำคลื่น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)

หนึ่งในพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ คือ ความกว้างลำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยความกว้างลำคลื่นของแบบรูปเป็นการวัดมุมระหว่างจุดสองจุดที่มีค่าเท่ากันในด้านที่ตรงข้ามกันของแบบรูปสูงสุด ในแบบรูปของสายอากาศจะมีความกว้างลำคลื่นอยู่หลายแบบ ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ซึ่งนิยามโดย IEEE ว่า “ในระนาบที่ประกอบด้วยทิศทางลำคลื่นที่มีค่ามากที่สุด (ลำคลื่นหลัก) มุมระหว่างทิศทางสองทางที่มีความเข้มของการแผ่พลังงานครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของลำคลื่น นอกจาก HPBW แล้ว ยังมีความกว้างลำคลื่นที่สำคัญอีก คือ ความกว้างลำคลื่นที่จุดศูนย์จุดแรก FNBW นอกจากนี้แล้วยังมีความกว้างลำคลื่นอื่นๆ เช่น ความกว้างลำคลื่น -10 dB จากค่าสูงสุดของลำคลื่นหรือจะเป็นค่าอื่นๆ ก็ได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติความกว้างลำคลื่นโดยทั่วไปจะหมายถึง HPBW



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในรูป 2 มิติ [1]

### 2.3.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

บางครั้งเรียกว่า Voltage standing wave ratio (VSWR) คือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหลดผิดไปจากสถานะที่โหลดแมตซ์มากน้อยเท่าไรจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ ถ้าโหลดที่ต่อมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $R_L$  และสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์เท่ากัน เราสามารถคำนวณค่า VSWR ได้จาก

$$VSWR = \frac{Z_0}{L_0} \quad \text{หรือ} \quad VSWR = \frac{L_0}{Z_0} \quad (2.5)$$

แล้วแต่ว่าตัวใดมีค่ามากกว่าจะอยู่ด้านบน หรือถ้ามี Reflection Coefficient ( $\Gamma$ ) สามารถหาได้จาก

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.6)$$

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$Z_1$  คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

จากสมการข้างบนจะพบว่าถ้า  $Z_1$  เท่ากับ  $Z_0$  จะทำให้  $\Gamma$  เท่ากับ 0 นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งจะส่งผลให้ค่า VSWR เท่ากับ 1 ซึ่งก็คือการแมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเองแต่ถ้า  $Z_1$  ไม่เท่ากับ  $Z_0$  จะทำให้  $\Gamma$  ไม่เท่ากับ 0 ก็ส่งผลทำให้ค่า VSWR ไม่เท่ากับ 1 นั่นคือจะเกิดการไม่แมตช์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งถ้าค่า VSWR มีค่ามากๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า VSWR ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 การวัดค่า VSWR สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เราเรียกว่า SWR Meter หรือ Refectometer หรือ Network Analyzer

#### 2.3.4 ประสิทธิภาพสายอากาศ (Effective Antenna)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ  $e_t$  จะใช้เมื่อคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วอินพุตและภายในโครงสร้างของสายอากาศ โดยการสูญเสียเป็นผลมาจาก

1) การสะท้อนเนื่องจากความไม่แมตช์ (Mismatch) กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ

2) การสูญเสียทั้งในตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศโดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพ

รวมทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.8)$$

เมื่อ  $e_t$  คือ ประสิทธิภาพรวม (ไม่มีหน่วย)

$e_r$  คือ ประสิทธิภาพการสะท้อน คำนวณได้จาก  $1-|\Gamma|^2$  (ไม่มีหน่วย)

$e_c$  คือ ประสิทธิภาพตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

$e_d$  คือ ประสิทธิภาพของไดอิเล็กตริก (ไม่มีหน่วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายเป็นค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้เป็นอย่างดี อัตราขยายของสายอากาศวัดคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้าด้วยกัน ในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของแบบรูปสายอากาศเท่านั้น

อัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดถูกนิยามว่าเป็นมาตราส่วนของความเข้มของสนามในทิศทางที่กำหนดต่อความเข้มการแผ่พลังงานที่ได้รับจากสายอากาศที่เป็นไอโซทรอปิก กำลังการแผ่พลังงานของไอโซทรอปิกที่ให้ความเข้มการแผ่พลังงาน มีค่าเท่ากับกำลังที่ได้รับ สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$G_0 = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

โดยทั่วไปมักกล่าวถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative gain) ซึ่งได้ถูกนิยามว่าเป็นมาตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดต่ออัตรากำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้นเมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบเป็นแหล่งจ่ายไอโซทรอปิก สายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร (Horn antenna) หรือสายอากาศอื่นๆ ส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นแหล่งจ่ายไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย เมื่อถึงทิศทางที่กำหนด อัตราของกำลังปกติหมายถึง ทิศทางของการแผ่พลังงานมากที่สุด สามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แผ่กระจายรวม  $P_{rad}$  สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ  $P_{in}$

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $e_{cd}$  คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งถูกนิยามด้วยข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE “อัตราขยายจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียอันเนื่องมาจากการไม่แมตซ์ของอิมพีแดนซ์และการไม่แมตซ์ของ โพลาริเซชัน สมการที่ (2.11) เป็นรวมการสูญเสียผ่านตัวสายอากาศแต่ไม่รวมการสูญเสียระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ การสูญเสียที่จุดเชื่อมต่อเหล่านี้โดยทั่วไปหมายถึง การสูญเสียจากคุณลักษณะของสายไม่สอดคล้องกับสายนำสัญญาณ โดยทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการสะท้อน  $e_r$

ในทำนองเดียวกันสำหรับอัตราขยายบางส่วนของสายอากาศสำหรับโพลาริเซชันที่กำหนด ในทิศทางที่กำหนด ว่าเป็นส่วนของความเข้มการแผ่พลังงาน สำหรับโพลาริเซชันที่กำหนดหาความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตจากสภามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ทิศทางที่กำหนด ดังนั้นอัตรารวมสามารถหาได้จากการรวมอัตราขยายบางส่วนในแต่ละโพลาริซที่ต่างจากกัน สำหรับระบบพิกัดแบบทรงกลม อัตราขยายสูงสุดรวม  $G_0$  สำหรับองค์ประกอบที่ตั้งฉากกันระหว่าง  $\phi$  และ  $\theta$  ของสายอากาศ สามารถเขียนในรูปแบบเดียวกันกับสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดแสดงดังสมการ (2.11)

$$G_0 = G_\theta + G_\phi \quad (2.11)$$

เมื่อ  $G_0$  และ  $E_\phi$  สามารถหาได้จาก

$$G_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{P_{in}} \quad (2.12)$$

$$G_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{P_{in}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $U_\theta$  คือ ความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $E_\theta$

$U_\phi$  คือ ความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสนาม  $E_\phi$

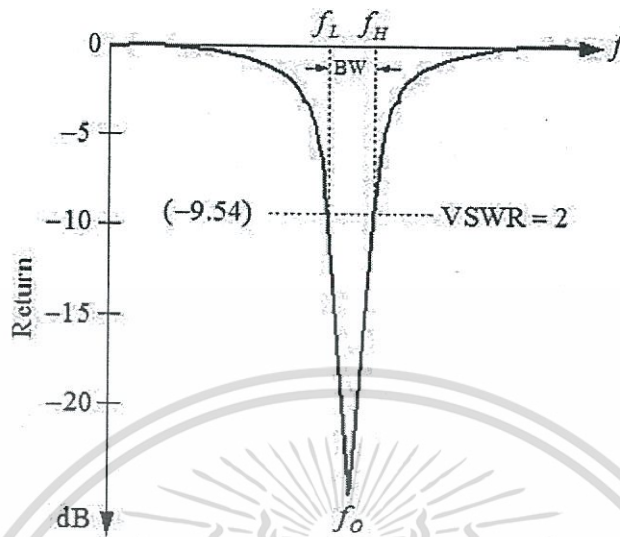
$P_{in}$  คือ กำลังรวมที่อินพุต

### 2.3.6 ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth)

ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศจะถูกกำหนดความกว้างโดยย่านของความถี่ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศ โดยทั่วไปช่วงความถี่ก็จะเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ด้านสูงกับความถี่ด้านต่ำหรือเปอร์เซ็นต์ของความถี่กลาง (Center frequency :  $f_c$ ) เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแต่ละตัวที่ไม่เหมือนกัน จึงเป็นการยากที่จะพิจารณาค่าของช่วงกว้างความถี่ จึงมีสองวิธีที่นิยมในการพิจารณาค่าของช่วงกว้างความถี่ คือ Pattern bandwidth และ Impedance bandwidth

Impedance Bandwidth คือย่านของความถี่ซึ่งมีค่าของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) อยู่ในช่วงมาตรฐาน โดยมาตรฐานแล้วคือ VSWR ไม่ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 (หรือ  $|r| \leq \frac{1}{3}$ ) หรือ ที่  $|S_{11}|$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB หรือมีการสะท้อนกลับของคลื่นประมาณ 11% ของกำลังส่งทางด้านอินพุตพิจารณาตามสมการที่ 2.14 และในบางงานที่ต้องการความแม่นยำก็จะใช้ค่า VSWR เป็น 1.5 หรือน้อยกว่า ในอนาคตอันใกล้นี้ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศอาจมีค่าน้อยลงกว่า Impedance bandwidth เนื่องจากตัวแปรต่างๆ (อัตราขยาย ค่าประสิทธิภาพ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอื่นๆ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่แสดงดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ช่วงกว้างความถี่

### 2.3.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Antenna Impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) คือเป็นอัตราส่วนของแรงดัน (Voltage) และกระแส (Current) ที่ตำแหน่งด้านเข้าของสายอากาศ

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = R + jX \quad (2.19)$$

ปกติแล้ว  $Z_{in}$  มีทั้งส่วนที่เป็นความต้านทาน (Resistance) และส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ (Reactance) คือ เมื่อนำสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เป็นความต้านทานอย่างเดียวกับสายอากาศส่วนใหญ่จะเกิดการไม่แมตช์ขึ้น (Mismatch) คือ พลังงานของคลื่นส่งบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับมาทางเครื่องส่ง ในทางปฏิบัติส่วนมากจึงต้องใช้ วงจรการแมตช์ซึ่ง (Matching Circuit) มาต่อไว้ระหว่างสายส่งกับสายอากาศเพื่อเป็นการลดทอนพลังงานส่วนนี้ให้น้อยลง

อิมพีแดนซ์ของการแพร่กระจายคลื่น อิมพีแดนซ์ของการแพร่กระจายคลื่นในกรณีของสายอากาศ ถ้ากระแสที่จุดป้อนเป็น  $I$  และกำลังคลื่นที่แพร่กระจายออกไปจากสายอากาศ (Radiation Power) เป็น  $W_r$  ให้ความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นเป็น

$$R_r = \frac{W_r}{|I|^2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงแล้ว คลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศยังมีส่วนคลื่นที่ไม่ได้กระจายออกไปรวมอยู่ด้วย ซึ่งกำลังคลื่นส่วนนี้จะเป็นพลังงานสะสมอยู่ใกล้ๆ ตัวสายอากาศในลักษณะเดียวกับพลังงานส่วนที่สะสมอยู่ใน  $L$  และ  $C$  ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา นั่นคือกำลังคลื่นที่ออกจากผิวของสายอากาศจะเป็นกำลังคลื่นเชิงซ้อน (Complex Power) ทำให้เราได้นิยามของอิมพีแดนซ์ของการแพร่กระจายคลื่นเป็นดังนี้

$$Z_r = R_r + jx_r = \frac{W_r + jW_s}{|I|^2} \quad (2.21)$$

โดยที่  $W_s$  เป็นกำลังคลื่นที่เก็บสะสมอยู่ในตัวกลางรอบๆ สายอากาศ

อิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) เมื่อสายอากาศในระบบมีมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป กำลังคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศแต่ละอันจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอื่นเปลี่ยนไป ถ้าสายอากาศในระบบมีอยู่  $n$  ตัว จากคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) จะได้แรงดันที่จุดบ่อนของสายอากาศเท่ากับ

$$V_i = \sum_{j=1}^N V_{ij} \frac{I_j}{I_j} \quad (2.22)$$

ถ้าให้

$$Z_i = \frac{V_{ij}}{I_j} \quad (2.23)$$

จะได้

$$V_i = \sum_{j=1}^N V_{ij} \frac{I_j}{I_j} \quad (2.24)$$

จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศและถ้า  $i$  ไม่เท่ากับ  $j$  จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปใจความสำคัญได้ว่า อิมพีแดนซ์ด้านเข้าให้พิจารณาเหมือนค่าอิมพีแดนซ์ทั่วไป อิมพีแดนซ์ของการแพร่กระจายคลื่นจะมองเป็นกำลังคลื่นที่ออกจากผิวสายอากาศเป็นเชิงซ้อนและอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอากาศจะพิจารณาที่สายอากาศสองตัวขึ้นไป

### 2.3.8 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกประสิทธิภาพ (Effective Isotropic Radiation Power)

กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกประสิทธิภาพของสายอากาศหรือ EIRP ของสายอากาศ หมายถึง ค่าพลังงานที่ใช้ในการสร้างความเข้มข้นเท่ากับสายอากาศใช้งานจริงที่จุดเดียวกัน ใช้สมการ (2.20)

$$\text{EIRP} = \frac{P_t G_t}{L_t} \quad (2.25)$$

หรือ

$$\text{EIRP(dB)} = P_t(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - L_t(\text{dB}) \quad (2.26)$$

เมื่อ  $G_t$  คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ

$P_t$  คือ กำลังที่ถูกส่งทั้งหมดของสายอากาศ

$L_t$  คือ การสูญเสียที่เกิดจากสายส่ง

### 2.3.9 การโพลาไรซ์ (Polarization)

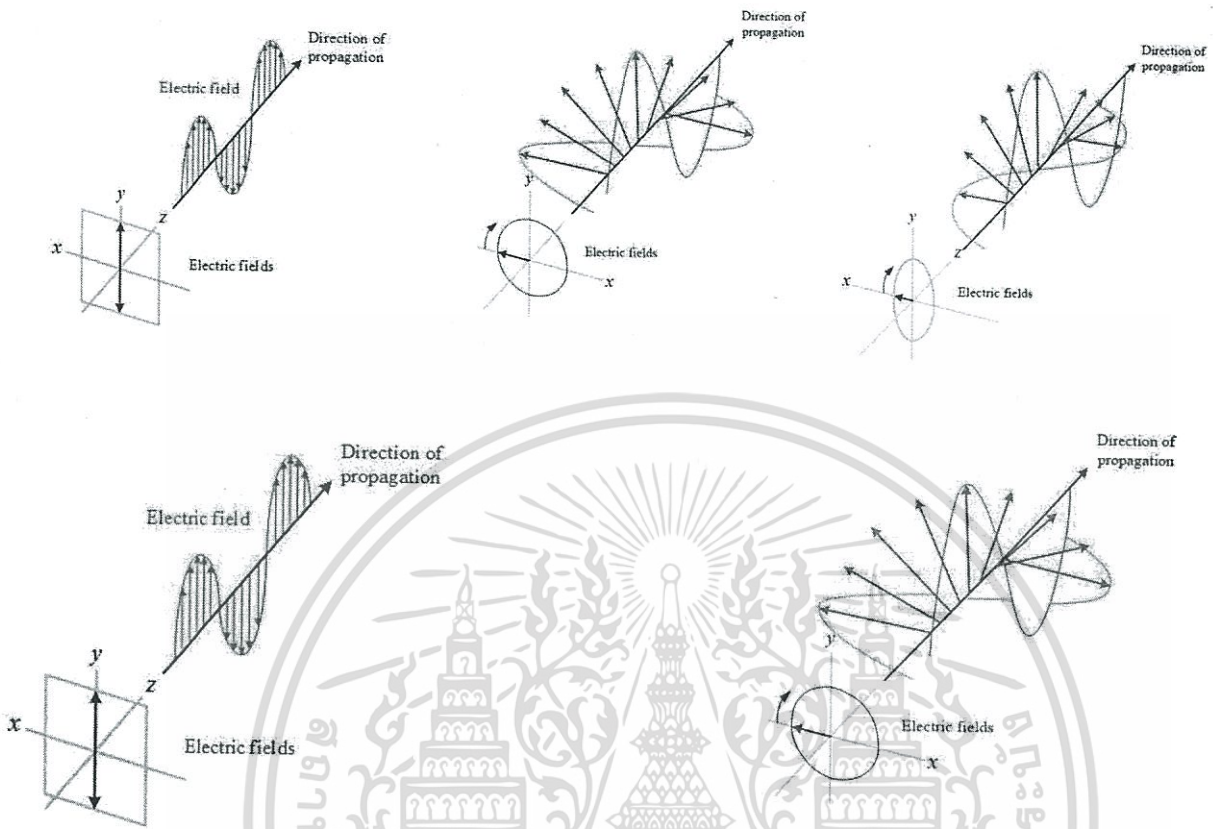
การโพลาไรซ์ คือ พื้นที่ของการแพร่กระจายของสายอากาศ พิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วคลื่นระนาบไม่ได้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชี้ทิศทางเดียวในการให้นิยามของโพลาไรซ์ขั้นนี้ ถือเอาทิศของสนามไฟฟ้า  $E$  บนระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นหลัก ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ  $E$  เป็นเส้นตรงเรียก โพลาไรซ์ของกรณีนี้ว่า โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization) ถ้าเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ขนานกับพื้นโลก จะเรียกว่า โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal polarization) ถ้าตั้งฉากกับพื้นโลกเรียกว่า โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical polarization) นอกจากโพลาไรซ์เชิงเส้นดังที่กล่าวมาแล้วนั้นก็ยังมี โพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical polarization) และโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular polarization) ซึ่งจะมีความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการโพลาไรซ์เชิงเส้นคือ จะมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงของ  $E$  อาจจะเป็นแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ในการให้นิยามนี้ให้ถือหลักดังนี้คือ เมื่อกำหนดระนาบ XY คงที่ และ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า  $E$  ในทิศทางเดียวกันที่เคลื่อนเดินทาง (เคลื่อนเดินทางในทิศ  $+Z$ ) และมีแอมพลิจูดคงที่ ถ้าสนามไฟฟ้า  $E$  ที่ปรากฏบนระนาบหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) จะเรียกว่า โพลาริซวงกลมหมุนขวา (Right - Hand Circular Polarization : RHCP) และถ้า  $E$  หมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter - Clockwise) จะเรียกว่า โพลาริซวงกลมหมุนซ้าย (Left - Hand Circular Polarization : LHCP) ในทางกลับกันหากแอมพลิจูดของ  $E$  ไม่คงที่และยังคงมีการหมุนของ  $E$  อยู่การโพลาไรซ์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า การโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization : EP)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การโพลาไรซ์ในลักษณะต่างๆ

### 2.4 ระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟ

สำหรับอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟ สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟและแท็กข้อมูลสามารถถูกเชื่อมต่อกันด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าอย่างใดอย่างหนึ่ง ระบบการเชื่อมต่อการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Inductive coupling) เป็นที่ยอมรับอย่างมากในการประยุกต์ใช้ เนื่องจากมีกำลังงานในส่วนรีแอกทีฟมาก ถูกเก็บในรูปของสนามแม่เหล็ก ระบบดังกล่าวถูกผลกระทบเพียงอย่างเดียวจากวัตถุที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) สูง และระบบที่มีความสามารถในการใช้งานใกล้กับวัสดุที่เป็นโลหะและน้ำ ในระบบอาร์เอฟไอเดียันการเชื่อมต่อแบบการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็ก เครื่องอ่านข้อมูลและแท็กถูกเชื่อมต่อกับสนามแม่เหล็กทำให้สายอากาศมีสนามไฟฟ้าอ่อน ซึ่งในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กจำเป็นต้องมีหลักการในการทดสอบการติดต่อสื่อสารดังหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 ย่านความถี่ใช้งาน

แท็กอาร์เอฟไอดีและเครื่องอ่านใช้ความถี่วิทยุในการติดต่อสื่อสารซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ใช้งานความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่ง เรียกว่าสเปกตรัมความถี่วิทยุเนื่องจากระบบอาร์เอฟไอดีสร้างและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ใน สเปกตรัมความถี่วิทยุ ดังนั้นจึงต้องมีระบบจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุสำหรับใช้งานประยุกต์ต่างๆ เช่น วิทยุ โทรทัศน์ และโทรศัพท์มือถือ เพราะฉะนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำหนดความถี่ที่ใช้งาน ของระบบอาร์เอฟไอดีเพื่อไม่ให้รบกวนการทำงานของระบบอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 ความถี่ที่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่ของแต่ละประเทศ

ประเทศ	ความถี่ต่ำ (LF)	ความถี่สูง (HF)	ความถี่สูงยิ่ง (UHF)	ความถี่ไมโครเวฟ
สหรัฐอเมริกา	125,134 kHz	13.56 MHz	902-928 MHz	2.40-2.48 GHz 5.72-5.85GHz
ยุโรป	125,134 kHz	13.56 MHz	868-870 MHz	2.45 GHz
จีน	125,134 kHz	13.56 MHz	N/A	N/A
อินเดีย	125,134 kHz	N/A	865-876 MHz	2.40 GHz
ญี่ปุ่น	125,134 kHz	13.56 MHz	950-965 MHz	2.45 GHz
สิงคโปร์	125,134 kHz	13.56 MHz	923-925 MHz	2.45 GHz

ในทางปฏิบัติระบบอาร์เอฟไอดีที่ทำงานย่านความถี่ต่ำ (LF) และความถี่สูง (HF) จะใช้ ความถี่เดียวกัน เช่น ย่านความถี่ต่ำจะใช้ความถี่ 135 kHz และย่านความถี่สูงจะใช้ความถี่ 13.56 MHz เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม่มีการกำหนดความถี่ที่จะใช้ในระบบอาร์เอฟไอดีที่ทำงานในย่าน ความถี่ยูเอชเอฟ) ดังนั้นความถี่ใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งในแต่ละประเทศแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้งานในย่านความถี่ยูเอชเอฟโดยทั่วไป ใช้การแพร่กระจาย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic distribution) ในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่อง อ่านข้อมูลกับแท็ก ทำให้ระบบนี้มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารระยะไกลมีความเร็วในการอ่าน ข้อมูลสูงมากสามารถอ่านข้อมูลจากแท็กพร้อมกันหลายตัวในเวลาเดียวกัน ระบบดังกล่าวนิยมนำไป ประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบกึ่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบโลจิสติกส์ ระบบเก็บค่าผ่านทาง บนทางด่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

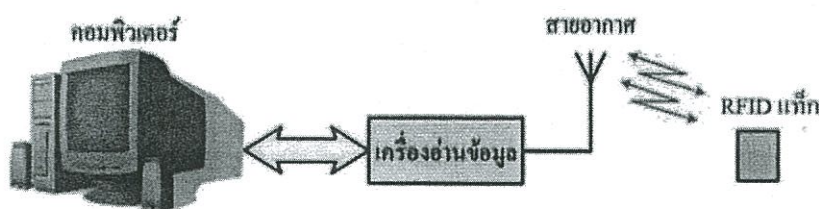
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ

ความถี่	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
ความถี่ต่ำ	งานได้ทั่วไปและดีในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	ระยะการอ่านต่ำและความเร็วในการอ่านข้อมูลช้า	ระบบป้องกันสิ่งของ การอ่านวัสดุที่มีน้ำอยู่ภายใน
ความถี่สูง	ความแน่นอนและความเร็วในการอ่าน และสามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้น	ต้องการพลังงานที่มากขึ้น	ระบบเข้าออกอาคาร การจัดเก็บกระเป๋าในสายการบิน การยืมหนังสือในห้องสมุด
ความถี่สูงยิ่ง	ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูงระยะการอ่านที่ไกลและสามารถเก็บข้อมูลได้มาก	ทำงานได้ไม่ดีที่สภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	การเข้าออกที่จอดรถ ห่วงโซ่อุปทาน
ความถี่ไมโครเวฟ	อ่านข้อมูลที่รวดเร็วมากและระยะทางการอ่านที่ไกล	ทำงานได้ไม่ดีที่สภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	การเข้าออกที่จอดรถ ห่วงโซ่อุปทาน

ในทางปฏิบัติระบบอาร์เอฟไอดี มีความถี่ที่ใช้งานหลากหลายความถี่ โดยแต่ละความถี่จะมีความแตกต่างกันทางด้านต่างๆ เช่น ระยะการอ่าน ความเร็วในการอ่าน และการใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น จึงนำไปสู่การใช้งานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปประสิทธิภาพของระยะการอ่านระบบอาร์เอฟไอดีจะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างแสดงดังตารางที่ 2.2

## 2.5 ส่วนประกอบระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุหรือ RFID

ระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุประกอบด้วยส่วนประกอบ 4 ส่วนที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ แท็ก สายอากาศ เครื่องอ่านข้อมูล และคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [6]

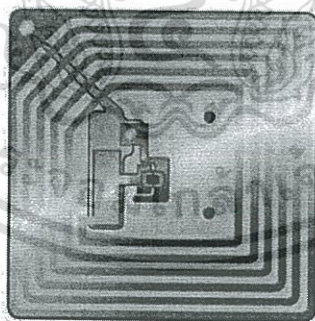
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 แท็ก (Tag)

โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Tag Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วน ของไมโครชิป (Microchip) ซึ่งทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุที่ต้องการ อาจสร้างจากวัสดุชนิดต่างๆ เช่น กระดาษ แผ่นเฟรม และพลาสติก เป็นต้น ขนาดและรูปร่างอาจจะต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และวัสดุที่จะนำแท็กไปติด เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น โดย หลักการในการติดต่อสื่อสาร สามารถแบ่งชนิดของแท็ก ที่ใช้งานกันอยู่นั้นเป็นสองชนิดใหญ่ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการ ทำงาน ดังนี้

#### 2.5.1.1 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ (Passive Tag)

คือ แท็กชนิดที่ไม่ ต้องการแหล่งจ่ายไฟหรือแบตเตอรี่ติดตั้งภายในแท็ก เนื่องจากแท็กชนิดนี้จะรับเอาพลังงานจาก คลื่นวิทยุที่ส่งจากเครื่องอ่านข้อมูลมากระตุ้นให้แท็กทำงาน ทำให้ระยะเวลาการอ่านข้อมูลไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของคลื่นวิทยุที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกมา ขนาดและรูปร่างของแท็กเป็นไปได้ทั้งแท่งหรือแผ่นขนาดเล็กมากจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ ไปจนถึงขนาดใหญ่มองเห็นได้สะดวกตา ดังแสดงรูปใน 2.8



รูปที่ 2.8 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบบพาสซีฟ [7]

#### 2.5.1.2 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ (Active Tag)

คือ เป็นแท็กชนิดที่ใช้ แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในแท็ก ซึ่งแท็กชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และสามารถส่งสัญญาณได้ไกล แต่มีอายุการใช้งานค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สั้นขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และมีราคาแพงเมื่อเทียบกับแท็กแบบพาสซีฟ มักนิยมใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่เอชเอฟ หรือย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ [8]

### 2.5.2 สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (Reader Antenna)

สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่แท็กเพื่อทำหน้าที่ส่งพลังงาน และรับส่งข้อมูลกับตัวแท็ก ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้น มีสายอากาศที่ใช้งานอยู่หลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและย่านความถี่ที่ใช้งาน เช่น แบบประตูเดินผ่าน แบบติดผนัง และแบบที่สร้างอยู่ภายในเครื่องอ่าน ข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นต้น



รูปที่ 2.10 สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [9]

### 2.5.3 เครื่องอ่านข้อมูล (RFID Reader)

เครื่องอ่านข้อมูล หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในแท็กด้วย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ และยังเป็นส่วนที่จัดเก็บข้อมูลเบื้องต้นก่อนที่จะส่งไปจัดเก็บ เป็นฐานข้อมูลที่คอมพิวเตอร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.4 เครื่องคอมพิวเตอร์

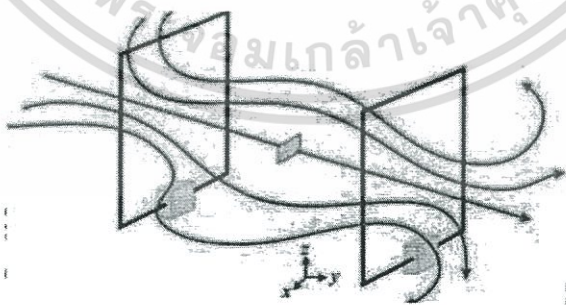
เครื่องคอมพิวเตอร์มีหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลของแท็ก สำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำงาน เพื่อความสะดวกในการเรียกใช้งาน อีกทั้งยังใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูลอีกด้วย

## 2.6 การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กของระบบอาร์เอฟไอดี

เครื่องคอมพิวเตอร์มีหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลของแท็ก สำหรับใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำงาน เพื่อความสะดวกในการเรียกใช้งาน อีกทั้งยังใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูลอีกด้วย การติดต่อสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุเป็นการติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สองชนิดคือแท็ก และเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communications) โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศที่ติดตั้งที่เครื่องอ่านข้อมูลและที่ติดอยู่กับตัวแท็ก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

### 2.6.1 วิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Inductive Coupling หรือ Proximity Electromagnetic)

วิธีการนี้จะใช้งานในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง ซึ่งมักจะใช้สายอากาศแบบบ่วง ทั้งกับเครื่องอ่าน ข้อมูลและแท็ก เนื่องจากสามารถกระจายและรับสนามแม่เหล็กได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วิธีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้ในย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง

## 2.6.2 การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อ (Electromagnetic Propagation Coupling)

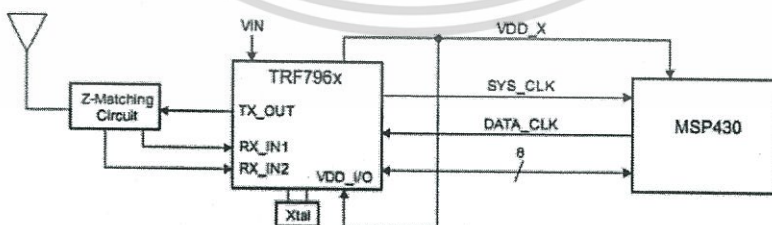
วิธีการนี้จะใช้งานใน ย่านความถี่สูงยิ่ง เนื่องจากวิธีการนี้สามารถที่จะติดต่อสื่อสารกับแท็กที่อยู่ในระยะไกลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้ในย่านความถี่สูงยิ่งและย่านความถี่ไมโครเวฟ

## 2.7 โครงสร้างของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สูง

โครงสร้างของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สูงดังรูปที่ 2.13 นั้นโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ 1.หน่วยควบคุมการทำงาน 2.ภาครับส่งข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 3.ส่วนแมตซิง 4.สายอากาศซึ่งการทำงานในแต่ละส่วนนั้นคือ



รูปที่ 2.13 รูปโครงสร้างของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สูง

### 2.7.1 หน่วยควบคุมการทำงาน

หน่วยควบคุมการทำงาน คือหน่วยที่ทำการประมวลข้อมูลและควบคุมการทำงานของชิพที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกับแท็กระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.2 ภาครับส่งข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ภาครับส่งข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คือหน่วยที่สร้างสัญญาณระบบระบุลักษณะ ทางคลื่นวิทยุและทำหน้าที่เป็นภาคแรกที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างแท็ก

### 2.7.3 ส่วนแมตซิง

ส่วนแมตซิงคือส่วนที่ทำหน้าที่ปรับค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนภาครับส่งข้อมูลกับสายอากาศ ให้ เกิดการส่งผ่านกำลังงานได้มากที่สุด

### 2.7.4 สายอากาศ

สายอากาศคือส่วนที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไปยังแท็กเพื่อที่จะติดต่อสื่อสารกันได้

## 2.8 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล

ในการพัฒนาสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล มีเหตุผลหลักอยู่ 2 ประการ คือ

2.8.1. เพื่อต้องการส่งความถี่วิทยุ (คลื่นพาห์) ให้เป็นกำลังงานของแท็ก

2.8.2. เพื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุ (สัญญาณข้อมูล) จากแท็ก

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุสามารถที่จะแพร่กระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพในมิติเชิงเส้นของสายอากาศ ซึ่งเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ในการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ (100 - 500 kHz) ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าประมาณ 2-3 km (สัญญาณความถี่ 125 kHz จะได้  $\lambda = 2.4$  km) เนื่องจากค่าของความยาวคลื่นมีความยาวมาก ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะสร้างสายอากาศได้ในระยะที่จำกัดตามจริง แต่มีทางเลือกหนึ่ง เป็นสายอากาศขดลวดแบบบ่วงขนาดเล็ก ซึ่งจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน โดยสายอากาศชนิดนี้จะใช้ สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ (Near Field Magnetic) ในการเชื่อมต่อการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศขดลวด ตัวส่งและตัวรับ

การทำให้เกิดสนามโดยสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กนั้นจะไม่แพร่กระจายคลื่น แต่จะทำให้ คลื่นอ่อนกำลังลงมากกว่า ความเข้มสนามจะถูกลดลงด้วย  $r^3$  (เมื่อ  $r$  = ระยะห่างจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ) ใน สนามระยะใกล้ ( $r^3$ ) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวจำกัดระยะเวลาการอ่านในการใช้งานของระบบระบุลักษณะ ทางคลื่นวิทยุ

เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านขดลวด (สายอากาศ) เป็นการเหนี่ยวนำ แรงดันให้ตกคร่อมด้านปลายสุดของขดลวด แรงดันนี้จะใช้เพื่อกระตุ้นแท่งชนิดพาสซีฟ ดังนั้น สายอากาศขดลวดส่วนมากจะถูกออกแบบให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันได้สูงสุด

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2.27)$$

โดย  $I$  = กระแส

$r$  = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของขดลวด

$\mu_0$  = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของ Free space มีค่า  $4\pi \times 10^{-7}$

ในกรณีที่ลวดมีความยาวอนันต์ที่  $\alpha_1 = 180$  และ  $\alpha_2 = 0$  จากสมการที่ (2.27) สมการเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.14 การคำนวณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแสที่ลวดตัวนำ

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศขดลวดแบบบ่วงวงกลมจำนวน  $N$  รอบ แสดงได้แสดงดังรูปที่ 2.15 จะได้สมการดังนี้

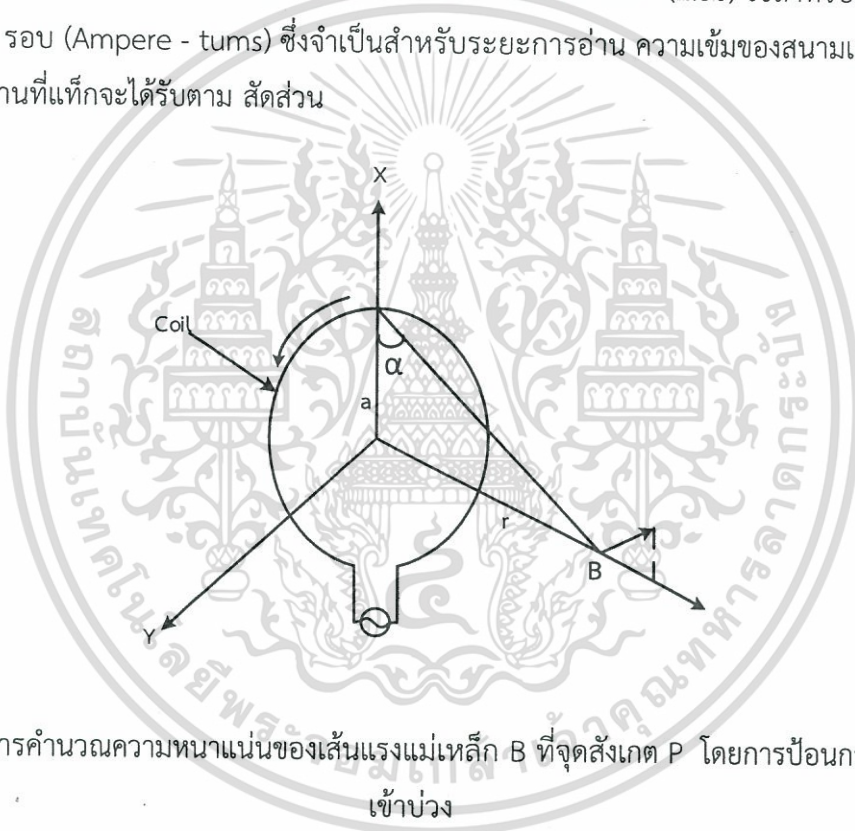
$$B = \frac{\mu_0 I N a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

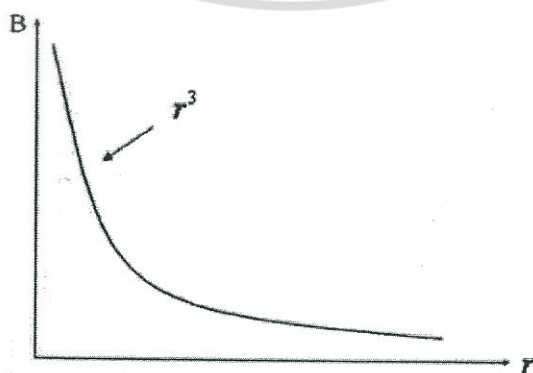
$$B = \frac{\mu_0 INa^2}{2} \left( \frac{1}{r^3} \right) \quad (2.30)$$

โดยที่  $a$  = รัศมีของข่วง

สมการที่ (2.30) แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศแบบข่วงถูกลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ความเข้มของสนามที่มากที่สุดในระยะของข่วงและทิศทางที่เหมาะสมสัมพันธ์ กับค่ากระแส, จำนวนรอบ (N) และพื้นที่ผิวของข่วง สมการที่ (2.30) ใช้สำหรับคำนวณหา ค่ากระแส - รอบ (Ampere - turns) ซึ่งจำเป็นสำหรับระยะการอ่าน ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อกำลังงานที่แท็กจะได้รับตาม สัดส่วน



รูปที่ 2.15 การคำนวณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  ที่จุดสังเกต  $P$  โดยการป้อนกระแส ( $I$ ) เข้าข่วง



รูปที่ 2.16 การลดลงของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  กับระยะห่าง  $r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดี

### 2.9.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type)

อุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดีทั้งแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลจะมีรูปแบบข้อมูลการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX) หรือ Half duplex (HDX)

#### 2.9.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex

เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับแท็กที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่แท็กส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตัวเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่าดังนั้นต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากแท็กแต่ละเครื่องให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้มอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก (Downlink) เป็นการส่งข้อมูลจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งกลับไปแต่อย่างใด

#### 2.9.1.2 การส่งข้อมูลแบบ Half duplex

การสื่อสารแบบ Half duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับแท็กตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่าน (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก

### 2.9.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็กในระบบอาร์เอฟไอดี จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดของความจุข้อมูล (Data capacity) มีขนาดตั้งแต่ไม่กี่ Byte ไปจนถึงหลายๆ KB ตัวอย่างแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 bit (1-bit Transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักจะมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ตามขีดความสามารถในการโปรแกรม ข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายใต้การเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัส หมายเลขใดๆ ตามที่ได้รับคำสั่งจ้งทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ที่สามารถทำโปรแกรมข้อมูลผ่านเครื่องอ่านข้อมูลได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

### 2.9.4 แหล่งพลังงาน (Power supply)

เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็กในระบบระบุ ลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว อีกกับประเภทหนึ่ง คือ แบบแอคทีฟ ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

## 2.10 ข้อพิจารณาความปลอดภัยการใช้อุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟไอดี

### 2.10.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันแท็กของระบบอาร์เอฟไอดี และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้นๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

### 2.10.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ที่มีความถี่ 0.1 ถึง 3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field strength : E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength : H) ไม่เกิน  $16.32 \cdot f$  A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power density : S) ไม่เกิน  $10,000 / f^2$  mW/cm<sup>2</sup> โดยที่เวลาเฉลี่ย (Average time) 6 นาที ซึ่ง  $f$  มีหน่วยเป็น MHz และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 m จะต้องไม่ค่าไม่เกิน 72 dB $\mu$ A/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ระยะเวลาอ่านแท็กของอุปกรณ์อาร์เอฟไอดี

ระยะเวลาอ่านแท็กที่ใช้สื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดีจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ โดยระยะเวลาอ่านของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุทั่วไปจะมีผลกระทบมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

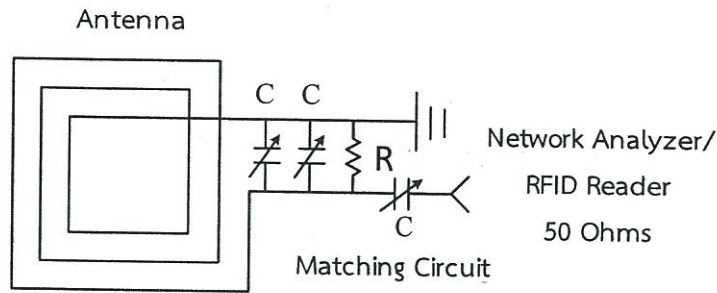
- ก. ความถี่ที่ใช้และการทำงานของขดลวดสายอากาศ
- ข. ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของสายอากาศการจูนวงจร
- ค. การปรับทิศทางของสายอากาศ
- ง. ค่ากระแสและแรงดัน
- จ. ความไวของการรับสัญญาณ
- ฉ. การเข้ารหัสและการถอดรหัส
- ช. จำนวนของบิตข้อมูล
- ซ. สภาพของแวดล้อม

ความสัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศและการจูนวงจรอยู่ในข้อจำกัด (ก-ค) การกำหนดโดยเทคโนโลยีของวงจรของเครื่องอ่านแท็กอยู่ในข้อจำกัด (ง-จ) และโปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของอุปกรณ์ (ฉ) และความสัมพันธ์ของโปรแกรมสำหรับการแปลความหมายข้อมูล (ช)

ขนาดของสายอากาศจะมีผลต่อระยะเวลาอ่านแท็กข้อมูล ซึ่งถ้าสายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ระยะเวลาอ่านแท็กไกลขึ้นด้วย

## 2.12 หลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตซ์สำหรับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยม

ในหัวข้อนี้จะเสนอหลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตซ์เพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถส่งผ่านกำลังงานเข้าสายอากาศได้มากที่สุด ด้วยการทำให้สายอากาศเป็น  $50 \text{ } (\Omega)$  ซึ่งแบบวงจรแมตซ์นี้เรียกว่า Tree element match โดยมีโครงสร้างของวงจรที่ไม่ซับซ้อนและออกแบบได้ง่าย โดยวงจรจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สองชนิดคือ ตัวเก็บประจุที่สามารถปรับค่าได้ (C) และตัวต้านทาน (R) :ซึ่งค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมจะอธิบายการคำนวณอย่างละเอียดในหัวข้อการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในหัวข้อที่ 2.17.1 และแสดงรูปการนำวงจรแมตซ์มาต่อเข้ากับสายอากาศในรูปที่ 2.17



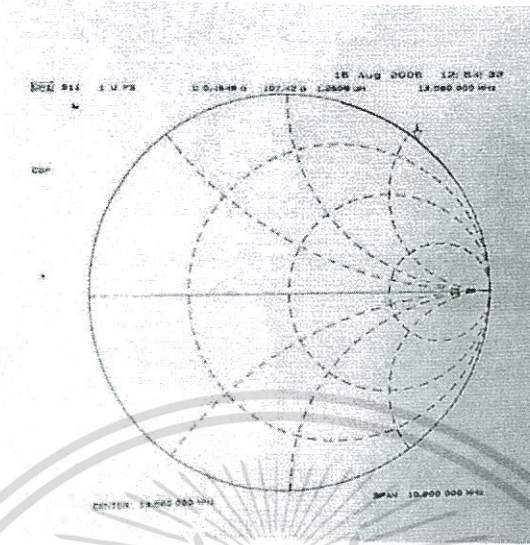
รูปที่ 2.17 การนำวงจรแมตซิ่งมาต่อเข้ากับสายอากาศ

### 2.12.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ

ขั้นตอนแรกในการแมตสายอากาศคือการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งในการปรับเทียบนั้นจะมีสามขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนแรกต่อด้วยโหลด (Load)  $50 \Omega$  ขั้นตอนที่สองคือลัดวงจร (Short) ด้วยความต้านทาน  $0 \Omega$  และขั้นตอนที่สามคือเปิดวงจร (Open) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อทดสอบกับระบบ RF ทั่วไป เมื่อทำการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแล้วก็นำสายอากาศมาเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยขั้นตอนนี้จะยังไม่มีส่วนของวงจรแมตซิ่งเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะต้องดูคุณสมบัติของสายอากาศก่อนว่ามีคุณสมบัติเป็น L หรือ C ซึ่งดูได้จาก Smith Chart โดยหลักการของวงจรนี้ถ้าหากสายอากาศมีคุณสมบัติเป็น C จะต้องนำ L หรือขดลวดมาต่ออนุกรมในวงจรเพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติเป็น L ก่อน เมื่อสายอากาศมีคุณสมบัติเป็น L แล้วก็จะเป็นส่วนของการนำวงจรแมตซิ่งเข้ามาเชื่อมต่อกับสายอากาศเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้  $50 \Omega$  หรือใกล้เคียงมากที่สุด รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.12.2 การปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยวงจรแมตซิ่ง

ในขั้นตอนนี้จะนำวงจรแมตซิ่งมาเชื่อมต่อกับสายอากาศและนำไปต่อเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างวัดค่าอิมพีแดนซ์และดูคุณสมบัติของสายอากาศจากสมิตชาร์ท



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสมิตชาร์ต

จากรูปที่ 2.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ  $0.4648 + j107.42 \Omega$  และมีคุณสมบัติเป็น  $L$  โดยมีค่า  $L$  เท่ากับ  $1.2608 \mu\text{H}$  ที่ความถี่  $13.56 \text{ MHz}$  จาก สมิตชาร์ตจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังอยู่ วงกลมด้านนอกซึ่งไม่ใช่วงกลม  $50 \Omega$

ดังนั้นจะต้องมาสนใจที่วงจรแมตซิ่ง โดยขั้นตอนแรกจะต้องคำนวณหาค่า  $R_p$  ที่เหมาะสมให้ได้ก่อน ซึ่งในการคำนวณหาค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ ( $Q$ ) ออกมาก่อน

$$Q = \frac{F_0}{BW} \quad (2.31)$$

$$Q = \frac{13.56 \text{ MHz}}{2 \text{ MHz}} = 6.78 \quad (2.32)$$

ในที่นี้จะกำหนดให้แบนวิดธ์ของสายอากาศเท่ากับ  $2 \text{ MHz}$  ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับ อาร์เอฟไอดี ย่านความถี่สูงที่กำหนดใน ISO15693 และ ISO14443/B ดังนั้นการคำนวณหาค่า  $R_p$  สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.33) การคำนวณค่า  $R_p$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{R}{(2\pi)(13.56\text{MHz})(1.208\mu\text{H})} = \frac{R}{107.42} \quad (2.34)$$

โดยที่ค่า  $X_L$  สามารถนำค่าจากสมิทชาร์ตมาใช้ได้เลย ดังนั้นจากสมิทชาร์ตจะได้ค่า  $X_L$  เท่ากับ  $107.42 \Omega$  เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า  $R_p$  ได้

$$R_p = \frac{Q}{X_L} \quad (2.35)$$

$$R_p = \frac{6.78}{107.02} = 728 \Omega \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.19 การจำลองปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสมิทชาร์ต

จากรูปที่ 2.19 การวัดค่าอิมพีแดนซ์จากคุณสมบัติด้วยสมิทชาร์ต จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ที่หนึ่งจะอยู่ที่นอกวงสุด การที่จะทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศขยับเข้ามาใกล้วงกลม  $50 \Omega$  คือการนำเอา  $C_1$  และ  $C_2$  มาต่อขนานกัน จากนั้นให้ทำให้การปรับจูน จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขยับลงมาอยู่ที่อิมพีแดนซ์ที่สอง ต่อไปให้นำ  $R_1$  มาต่อขนานไปที่  $C_1$  และ  $C_2$  ค่าอิมพีแดนซ์จะขยับลงมาอยู่ที่อิมพีแดนซ์ที่สาม ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำ  $C_3$  มาต่ออนุกรมเข้าไปแล้วทำการปรับจูนก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอยู่ที่วงกลม  $50 \Omega$  พอดี ก็คือจะได้สายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงหรือเท่ากับ  $50 \Omega$  นั่นเอง ข้อเสนอแนะในการเลือก  $C_1$   $C_2$  และ  $C_3$  ควรจะเป็น  $C$  ที่ปรับค่าที่มีช่วงกว้างๆ เนื่องจากว่าจำเป็นต้องมีการปรับจูน ส่วนค่า  $R_1$  ก็จะได้จากการคำนวณหรือ  $R_p$  นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศออกแบบบนโปรแกรมจำลองผล ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซิ่ง Impedance ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดิยามความถี่เอชเอฟและเอชเอฟ(ความถี่ 13.56 MHz) ออกแบบสายอากาศและปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศให้เหมาะสม NFC และ ยูเอชเอฟที่ความถี่ 13.56 MHz และ 886 MHz โดยใช้โปรแกรมจำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบที่ได้ คำนวณทางทฤษฎี โดยมุ่งเน้นพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วย  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยาย โดยศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ แล้วทำการปรับขนาดพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่

#### 3.1 การออกแบบ

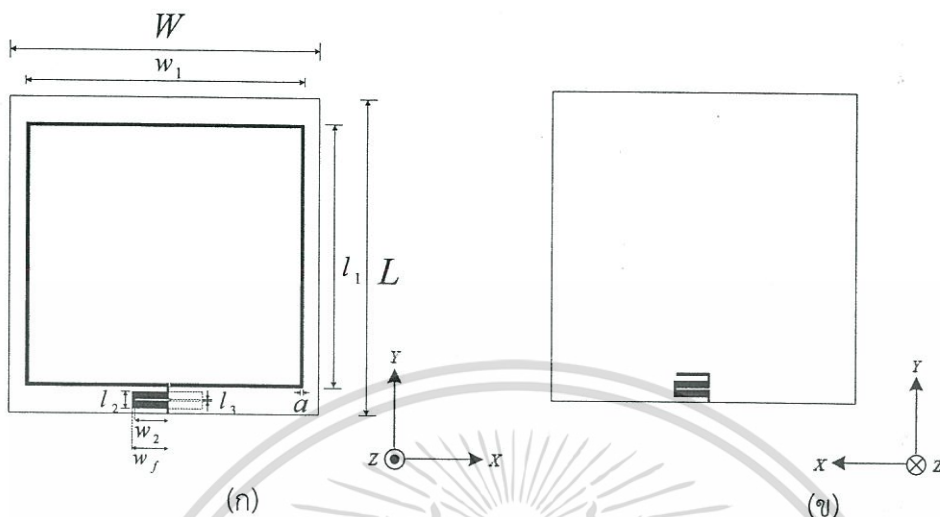
##### 3.1.1 โครงสร้างและการออกแบบของสายอากาศ

ในขั้นตอนของการออกแบบมุ่งเน้นเพื่อให้ได้สายอากาศสำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดิยามความถี่เอชเอฟ และ เอชเอฟ (ความถี่ 13.56 MHz) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่ซึ่งการออกแบบโครงสร้างสายอากาศในเบื้องต้นโดยใช้ทฤษฎีอ้างอิงของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น สำหรับใช้ในการคำนวณหาความยาวทั้งหมดของสายอากาศและใช้หลักการแมตซิ่ง Impedance เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบสายอากาศโดยส่วนของการพิจารณาว่าสายอากาศจะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะพิจารณาคูณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งหมายความว่า กำลังของคลื่นที่สะท้อนกลับมามีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดขึ้นใน IEEE ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศและเสนอในขั้นส่วนถัดไป

##### 3.1.1.1 สายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

สายอากาศที่ได้ทำการออกแบบบนโปรแกรมจำลองผล ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซิ่ง Impedance ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดิยามความถี่เอชเอฟโดยโครงสร้างที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



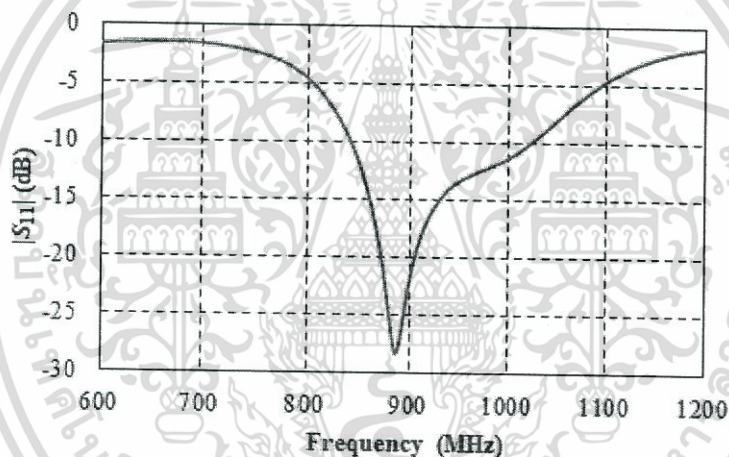
รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ (ก) มุมมองด้านหน้า และ (ข) มุมมองด้านหลัง

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ยูเอชเอฟ ตามรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	รายละเอียด	ขนาด (mm)
$W$	ความยาวของสายอากาศ	175.0
$L$	ความกว้างของสายอากาศ	180.0
$w_1$	ความยาว $w_1$	158.0
$w_2$	ความยาว $w_2$	19.0
$w_f$	ความยาว $w_f$	20.5
$l_1$	ความยาว $l_1$	150.0
$l_2$	ความยาว $l_2$	12.5
$l_3$	ความยาว $l_3$	0.9
$a$	ความยาว $a$	2.0
$s$	ความหนาของแผ่น FR4	0.8

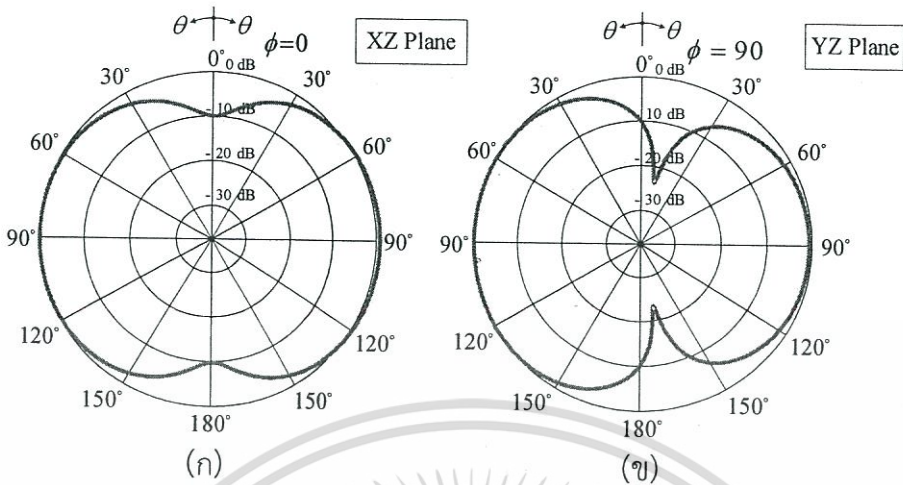
จากนั้นจึงทำการจำลองลักษณะของสายอากาศที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยโปรแกรมจำลอง CST MICROWAVE STUDIO โดยคุณลักษณะที่ใช้ในการพิจารณา คือ  $|S_{11}|$  และ Radiation pattern ซึ่งผลการจำลองที่ได้นั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.2 3.3 และ 3.4 พิจารณาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ  $|S_{11}|$  และอัตราขยายด้วยเครื่องมือ Network Analyzers และคุณลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยเครื่อง ME1300 Antenna Training Kit แสดงได้แสดงดังรูปที่ 3.2 ถึง 3.4 ตามลำดับสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟในรูปที่ 3.2 จะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างในโปรแกรมการจำลองสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ ซึ่งต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์สมัยใหม่ในส่วนของกาพิจารณาว่าสายอากาศจะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $-10$  dB ซึ่งหมายความว่า กำลังของคลื่นที่สะท้อนกลับมามีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดขึ้นใน IEEE โดยความถี่ที่พิจารณาคุณลักษณะที่  $|S_{11}|$  เท่ากับ  $-28.34$  dB ที่ความถี่  $886$  MHz และครอบคลุมการทำงานได้ดีช่วงความถี่  $826 - 1027$  MHz ซึ่งอยู่ในช่วงย่านความถี่ความถี่ที่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่ของแต่ละประเทศ มีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ  $22.84\%$

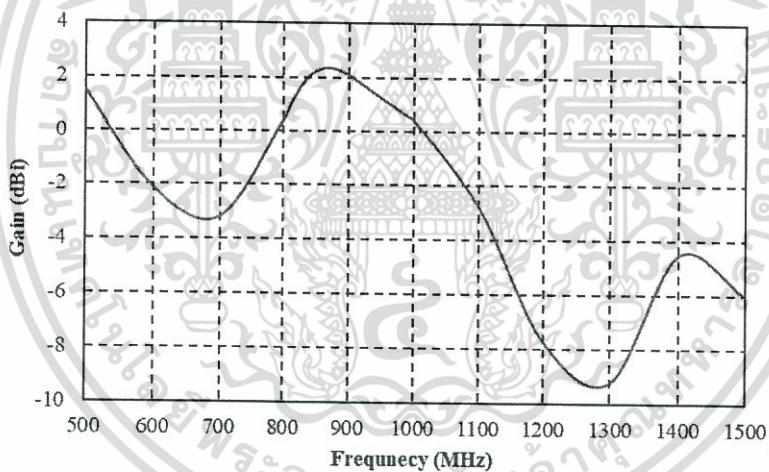


รูปที่ 3.2  $|S_{11}|$  ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูปที่ 3.3 แสดงถึงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยพิจารณาที่ความถี่  $886$  MHz ซึ่งมีลักษณะแบบสายอากาศรอบทิศทาง (Omnidirectional) และมีความกว้างยาวคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth : HPBW) เท่ากับ  $119.6$  องศา โดยผลการจำลองอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศพบว่าในย่านความถี่ยูเอชเอฟ มีอัตราขยายสูงสุด  $2.35$  dBi ที่ความถี่  $886$  MHz แสดงแสดงดังรูปที่ 3.4



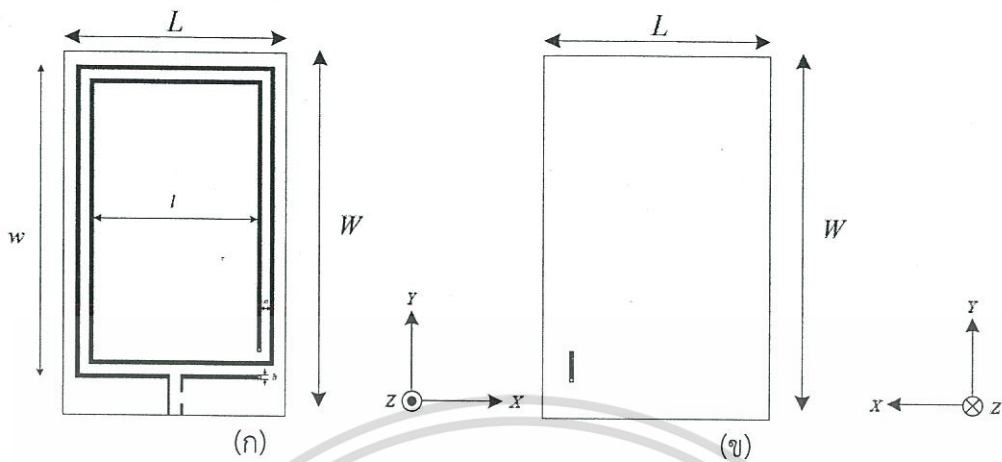
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ  
ที่ความถี่ 886 MHz (ก) ระนาบ XZ และ (ข) ระนาบ YZ



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่

### 3.1.1.2 สายอากาศย่านความถี่ NFC

สายอากาศที่ได้ทำการออกแบบบนโปรแกรมจำลองผล ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศวงรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซิ่ง Impedance ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ โดยโครงสร้างที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของสายอากาศ NFC ย่านความถี่ 13.56 MHz (ก.) มุมมองด้านหน้า

(ข.) มุมมองด้านหลัง

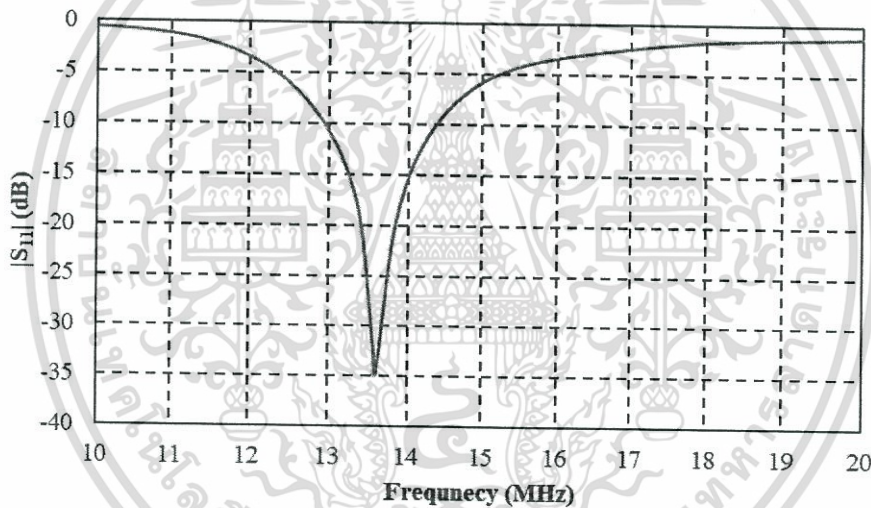
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ NFC ตามรูปที่ 3.5

พารามิเตอร์	รายละเอียด	ขนาด(mm)
$L$	ความกว้างของสายอากาศ	100.0
$W$	ความยาวของสายอากาศ	160.0
$w$	ความยาวของสายอากาศ	138.0
$s$	ความยาว $s$	5.0
$t$	ความยาว $t$	1.0
$l$	ความยาว $l$	76.0
$a$	ช่องว่างระหว่างรอบการหมุน	5.0
$b$	ความกว้างของแถบ	2.0

จากรูปที่ 3.5 สายอากาศขึ้นอยู่กับช่วงขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของพื้นผิวเรียบ ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่แสดงนั้นเป็นค่าที่ได้มาจากการจำลองเพื่อให้สายอากาศแผ่นพิมพ์แบบวงรูปทรงสี่เหลี่ยมนี้สามารถที่จะแพร่กระจายสนามแม่เหล็กได้ในทุกทิศทาง จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบจากผลการจำลองลักษณะของสายอากาศที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 ด้วยโปรแกรมจำลอง CST MICROWAVE STUDIO โดยคุณลักษณะที่ใช้ในการพิจารณา คือ  $|S_{11}|$  อัตราขยาย และ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น พิจารณาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ  $|S_{11}|$  ด้วยเครื่องมือ Network Analyzers เพื่อนำมาทดสอบสายอากาศ NFC ที่สร้างขึ้นใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กต่อไปสำหรับการประยุกต์การใช้งานกับอุปกรณ์สมัยใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองและผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ NFC ที่ความถี่ 13.56 MHz ในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบในโปรแกรมการจำลองมีแนวโน้มที่จะสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ต่ำที่ความถี่ 13.56 MHz นั้น ซึ่งต้องการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่ ในส่วนของการพิจารณาว่าสายอากาศจะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งหมายความว่า กำลังของคลื่นที่สะท้อนกลับมามีค่าน้อยกว่ากำลังของคลื่นที่ป้อนเข้าไปนั่นเอง โดยความถี่ที่พิจารณาคุณลักษณะที่  $|S_{11}|$  เท่ากับ 886 ครอบคลุมการทำงานได้ดีช่วงความถี่ 13.20 - 13.99 MHz จากโปรแกรมจำลองผลซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 13.56 MHz ของ NFC Shield module ที่รองรับ มีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 5.82%



รูปที่ 3.6  $|S_{11}|$  ที่ฟังก์ชันของความถี่

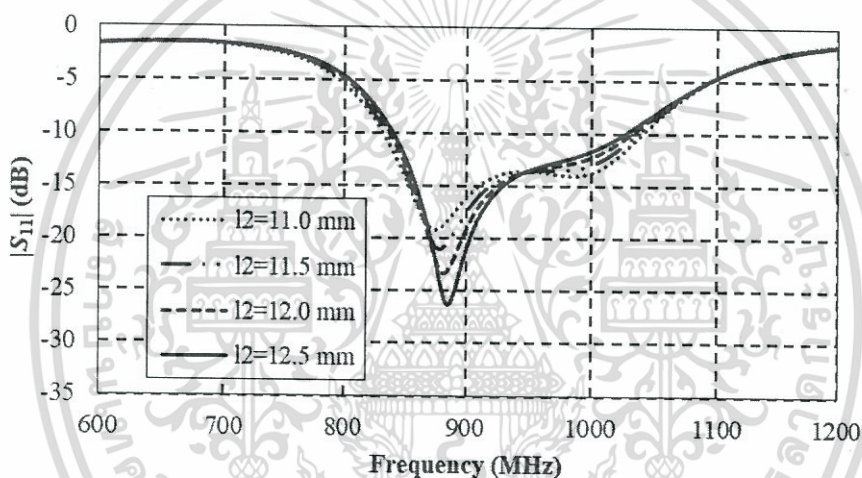
### 3.1.2 ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยม

#### 3.1.2.1 สายอากาศย่านความถี่ ยูเอชเอฟ

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นโดยออกแบบให้ความยาวทั้งหมดเป็น  $\lambda/2$  โดยโครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้แสดงดังรูปที่ 3.1 และการคำนวณหาขนาดของรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณได้จาก  $\lambda = c/f$  โดยความถี่ที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ 886 MHz โดยใช้แผ่นพิมพ์ FR4 ( $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3  $\tan \delta$  เท่ากับ 0.02 ความหนาของแผ่นวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.5 mm) ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.2

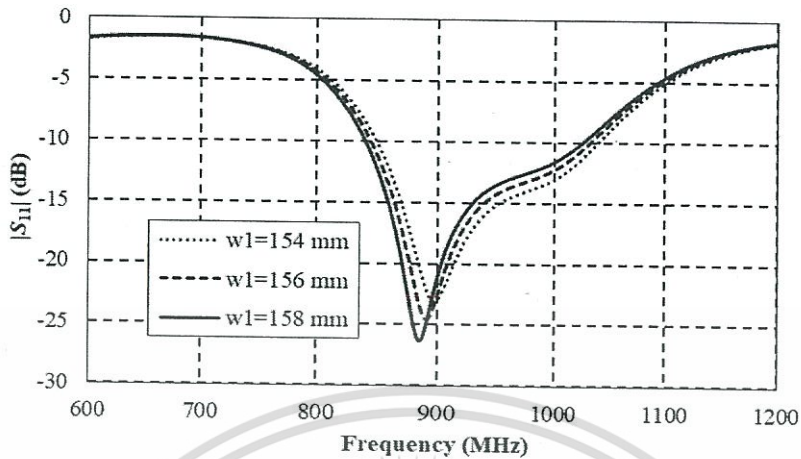
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์โดยทำการปรับพารามิเตอร์ให้มีขนาดต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 3.7 เมื่อทำการปรับขนาดพารามิเตอร์  $l_2$  ให้มีค่าแตกต่างกัน 0.5 mm จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $l_2$  มีผลต่อค่า  $|S_{11}|$  โดยเมื่อเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์  $l_2$  ให้มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดีขึ้นตามไปด้วย แต่จากการเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์  $l_2$  ก็จะส่งผลกระทบต่อทำให้ความถี่ ณ จุดที่ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำสุด มากขึ้นตามไปด้วยเล็กน้อย ซึ่งจากการจำลองผลกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของพารามิเตอร์  $l_2$  แล้วนั้น จึงเลือกขนาดพารามิเตอร์  $l_2$  เท่ากับ 12.5 mm ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีที่สุดซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการใช้งาน



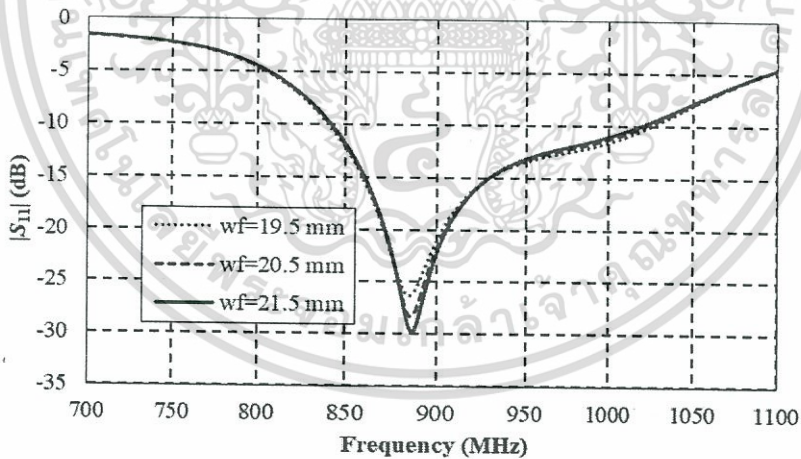
รูปที่ 3.7 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $l_2$  ต่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

เมื่อทำการปรับขนาดพารามิเตอร์  $w_1$  ให้มีค่าแตกต่างกัน 2 mm จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $w_1$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ของสายอากาศ โดยเมื่อลดขนาดของพารามิเตอร์  $w_1$  จะทำให้ช่วงความถี่ของสายอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งขณะที่ขนาดของพารามิเตอร์  $w_1$  เท่ากับ 158 mm นั้น จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีที่สุดที่ใกล้เคียงกับย่านความถี่ที่ต้องการออกแบบที่ 886 MHz จึงเลือกขนาดของพารามิเตอร์  $w_1$  เท่ากับ 158 mm แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $w_1$  ต่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

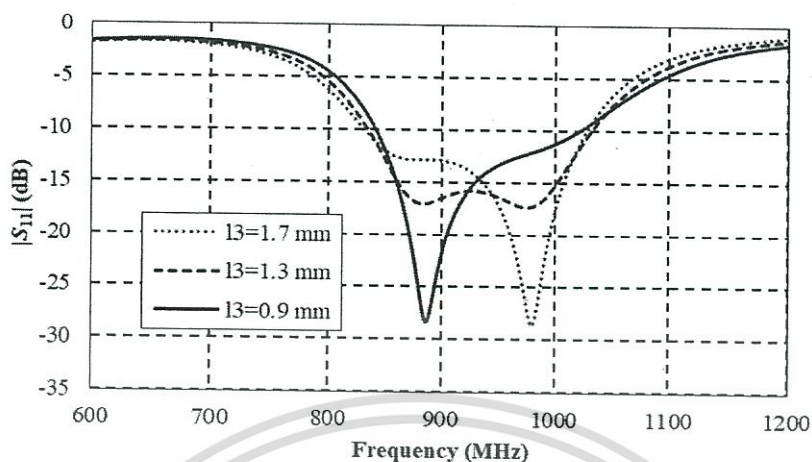
รูป 3.9 เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $w_f$  ให้มีค่าแตกต่างกัน 0.5 mm จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $w_f$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $|S_{11}|$  โดยเมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์  $w_f$  จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมีผลให้ความถี่เลื่อนด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.9 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $w_f$  ต่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

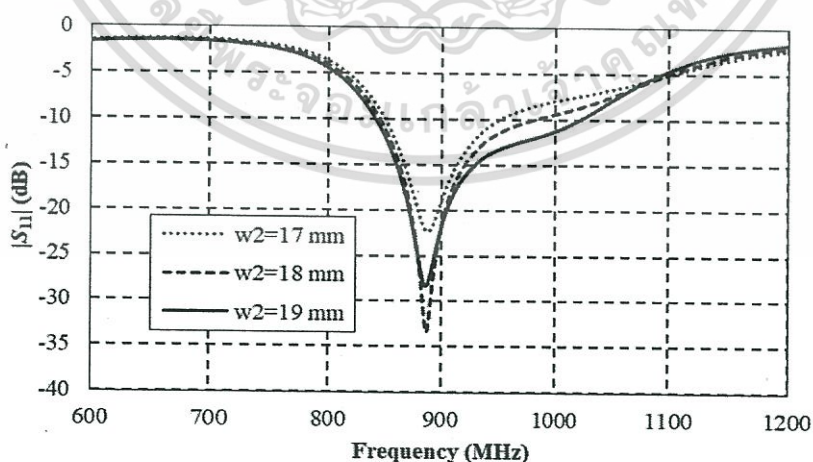
รูป 3.10 เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $l_3$  ให้มีขนาดแตกต่างกัน 0.4 mm จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $l_3$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $|S_{11}|$  ซึ่งเมื่อเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์  $l_3$  จะทำให้ ณ จุดต่ำสุดของกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเลื่อนไปทางขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $l_3$  ต่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

รูป 3.11 เมื่อทำการปรับพารามิเตอร์  $w_2$  ให้มีขนาดแตกต่างกัน 1 mm จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์  $w_2$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $|S_{11}|$  ซึ่งเมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์  $w_2$  จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดีขึ้น แต่จากรูปที่ 3.11 เมื่อพารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 19 mm เทียบกับพารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 18 mm จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 18 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดีกว่าพารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 19 mm แต่ทว่าพารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 19 mm ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมากกว่าจึงเลือกใช้ พารามิเตอร์  $w_2$  ขนาด 19 mm



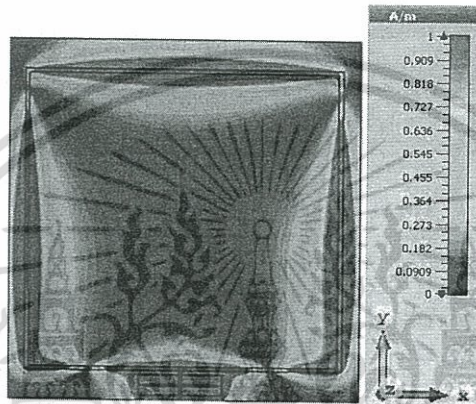
รูปที่ 3.11 การจำลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $w_2$  ต่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กของสายอากาศ

#### 3.1.3.1 สายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

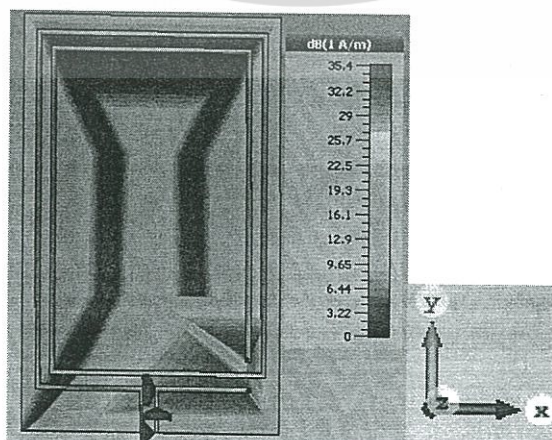
ขั้นตอนถัดมาแสดงการจำลองแบบสองมิติ (2-D) การแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 886 MHz แสดงโดยแบบจำลองแบบรูปการแพร่กระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศย่านความถี่ 886 MHz

#### 3.1.3.2 สายอากาศย่านความถี่ NFC

ขั้นตอนถัดมาแสดงการจำลองแบบสองมิติ (2-D) การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 13.56 MHz แสดงโดยแบบจำลองแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศ จากค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางของสายอากาศจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กในแต่ละทิศทางดังแสดงในรูปที่ 3.13



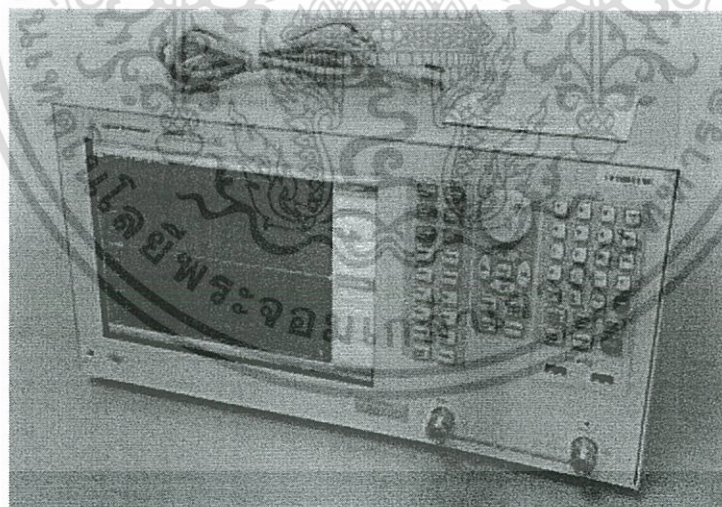
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ ที่ความถี่ 886 MHz และสายอากาศย่านความถี่ NFC ที่ย่านความถี่ 13.56 MHz จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ พบว่าสายอากาศทั้งสองแบบนี้สามารถกระจายสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามแนวแกน การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กจะลดลงเบาบางมากในบริเวณตรงกลางของพื้นที่อ่าน และมีการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กบริเวณขอบสายอากาศ บริเวณตรงกลางของสายอากาศจะมีสนามแม่เหล็กที่เบาบางมากไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกระทบมีนัยสำคัญกับการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก ทำให้มีแนวโน้มเกิดความไม่สม่ำเสมอ

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสัญญาณทางแอมพลิจูด แสดงได้แสดงดังรูปที่ ซึ่งใช้ในการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) และค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่อง (Network analyzer) รุ่น e5061b ENA Series Network Analyzer

### 3.2.2 FieldFox RF Analyzer

FieldFox Rx Analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดทดสอบและวิเคราะห์สัญญาณความถี่ไมโครเวฟซึ่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) และทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของเอกสารนี้คือผลผลิตของงานวิจัยที่ใช้กับสถาบันการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 FieldFox RF Analyzer N9912A

### 3.2.3 ME1300 Training kit

ME1300 Training kit เป็นชุดการทดลองที่ประกอบด้วยโมดูลสายอากาศฝั่งส่งและโมดูลสายอากาศฝั่งรับซึ่งใช้ในการปรับมุมของสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.16

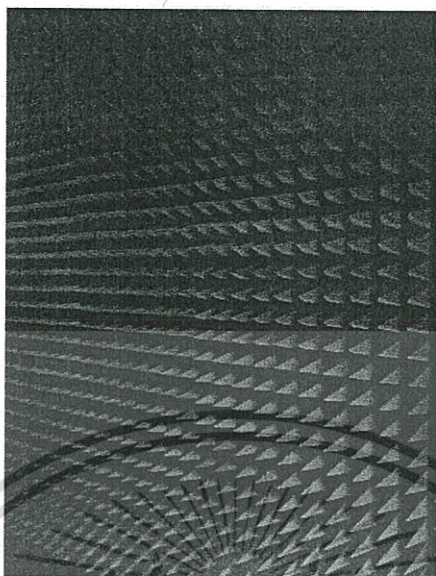


รูปที่ 3.16 ME1300 Training kit

### 3.2.4 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic chamber)

ห้องไร้การสะท้อนของคลื่นเป็นห้องที่ถูกรอกแบบมาให้ดูดซับการสะท้อนของเสียงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นห้องที่ใช้สำหรับทำการทดลองตรวจวัดคุณลักษณะของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.17

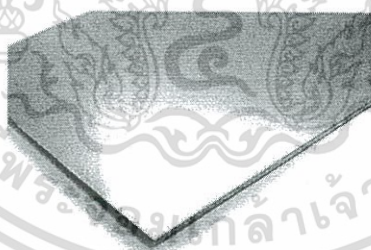
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วัสดุดูดซับคลื่นเสียงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 3.2.5 แผ่นวงจรพิมพ์ FR4 0.8mm

แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ใช้สำหรับการสร้างสายอากาศ ซึ่งจะมีทองแดงเคลือบอยู่ด้านบนบนฉนวนทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.18

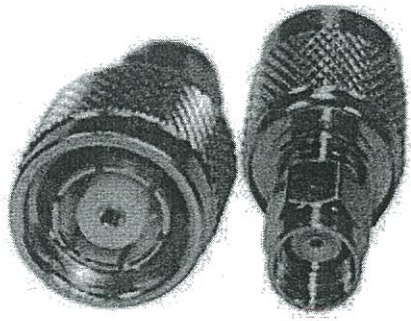


รูปที่ 3.18 FR4 0.8mm

### 3.2.6 RP-SMA Male to RP-TNC Male Reverse Polarity Connector

RP-SMA Male to RP-TNC Reverse Polarity Connector Male เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสายสายโคแอกซ์เซียลกับคอนเนคเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

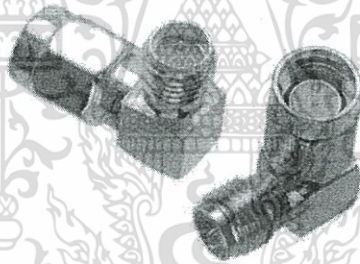
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 RP-SMA Male to RP-TNC Reverse Polarity Connector Male

### 3.2.7 RF Adapter SMA Mate to SMA Male plug right angle

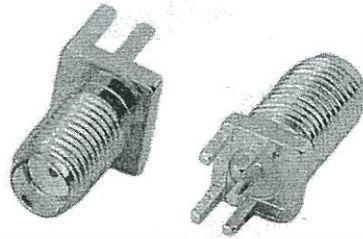
RF Adapter SMA Mate to SMA Male plug right angle เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง RP-SMA Male to RP-TNC Male และ SMA-Female ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 RF Adapter SMA Mate to SMA Male plug right angle

### 3.2.8 SMA-Female

SMA-Female เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับ RF Adapter SMA Male plus right angle ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 SMA-Female

### 3.2.9 SMA Male to SMA Male Plug in series RF Coaxial Adapter Connector

SMA Male to SMA Male Plug in series RF Coaxial Adapter Connector เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสายสายโคแอกซ์เข้ากับคอนเนคเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.22

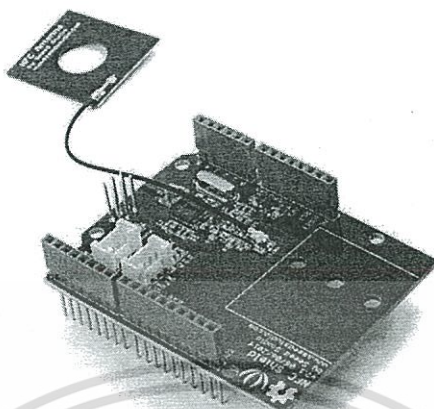


รูปที่ 3.22 SMA Male to SMA Male Plug in series RF Coaxial Adapter Connector

### 3.2.10 NFC Shield V2.0

NFC Shield V2.0 เป็นโมดูลรับส่งสัญญาณ PN532 ซึ่งจัดการการสื่อสารแบบไร้สายที่ 13.56 MHz ซึ่งสามารถอ่านและเขียนแท็ก หรือใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบจุดต่อจุด (P2P) แสดงในรูปที่ 3.23

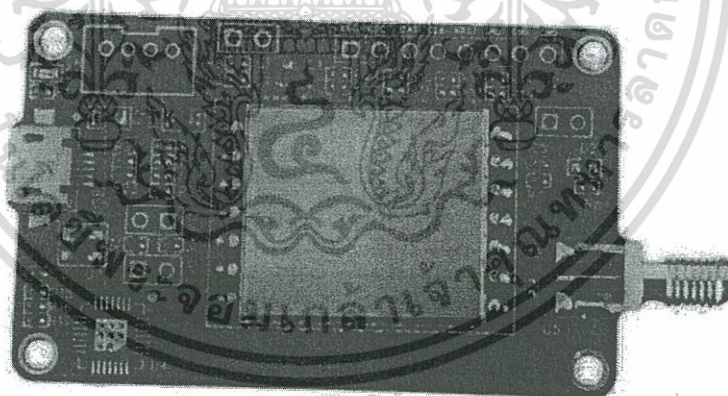
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 NFC Shield V2.0

### 3.2.11 UART UHF Passive 6C

UART UHF Passive 6C เป็นโมดูล RFID ที่ใช้ในการอ่านแท็กจากสายอากาศแท็กยูเอชเอฟ ที่ย่านความถี่ครอบคลุม 902-928 Mhz (US)/920-925MHz (CHN)/865-868MHz (EU) แสดงแสดงดังรูปที่ 3.24

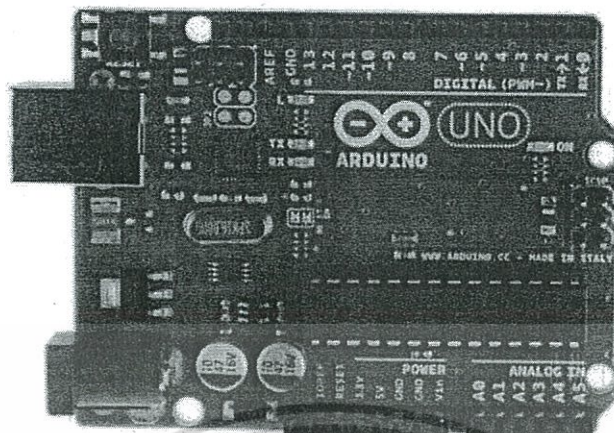


รูปที่ 3.24 UART UHF Passive 6C

### 3.2.12 Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานโมดูล NFC Shield V2.0 และโมดูล ยูเอชเอฟ RFID Module RT400 โดยการเขียนโค้ดสั่งการทำงานด้วยภาษา C แสดงแสดงดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 Arduino Uno R3

### 3.13 แท็กเหรียญ NFC

แท็กเหรียญ NFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอ่านแท็กอาร์เอฟไอดีจากโมดูล NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 3.26

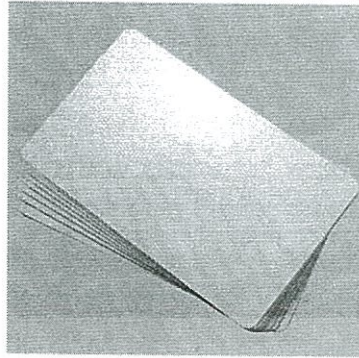


รูปที่ 3.26 แท็กเหรียญ NFC

### 3.14 แท็กบัตร NFC

แท็กบัตร NFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอ่านแท็กอาร์เอฟไอดีจากโมดูล NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แท็กเหรียญ NFC

### 3.14 แท็กสมาร์ทโฟน NFC

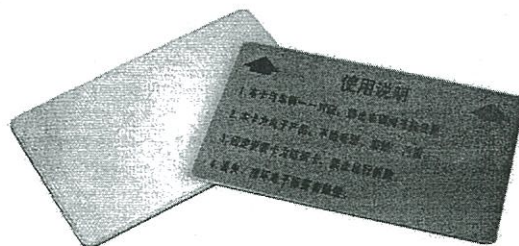
แท็กบัตร NFC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอ่านแท็กอาร์เอฟไอดีจากโมดูล NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 แท็กสมาร์ทโฟน NFC

### 3.15 แท็กบัตรยูเอชเอฟ

แท็กบัตรยูเอชเอฟเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอ่านแท็กอาร์เอฟไอดีจากโมดูล ยูเอชเอฟ RFID Module RT400 แสดงแสดงดังรูปที่ 3.29



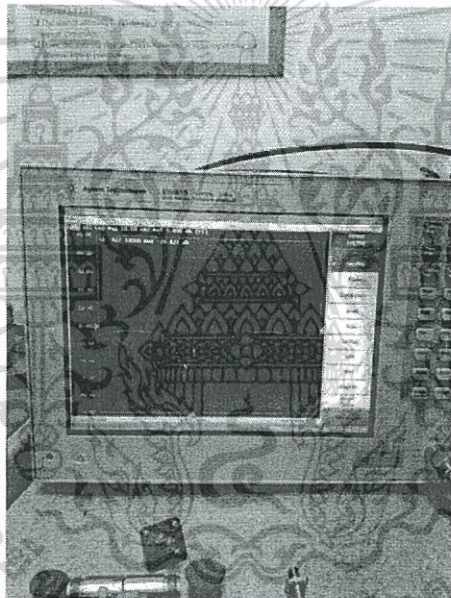
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรรูปที่ 3.29 แท็กบัตรยูเอชเอฟ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

ในการเก็บบันทึกผลการทดลองนั้นจะแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆ ดังนี้

#### 3.3.1 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนหรือ  $|S_{11}|$  จากรูปที่ 3.30 จะเป็นการทดสอบสายอากาศแบบพาสซีฟ (Passive) ผ่านเครื่อง Network analyzer ในช่วงความถี่ที่เราสนใจ ในที่นี้ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ ยูเอชเอฟ และ Near Field Communication (NFC) ย่านความถี่ 13.56 MHz จากนั้นทำการเลือกคำสั่งแสดงค่า  $|S_{11}|$  (dB) ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ และนำค่าที่ได้ไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



รูปที่ 3.30 ทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

#### 3.3.2 การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ ยูเอชเอฟ

การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศจากรูปที่ 3.31 นั้น ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบจำเป็นต้องใช้สมการการส่งผ่านฟรีส (Friis transmission equation) สำหรับสมการการส่งผ่านของฟรีสจะเกี่ยวข้องกับกำลังงานภาครับไปถึงกำลังงานในการส่งผ่านระหว่างสายอากาศทั้งสองที่มีระยะ  $R > 2D^2 / \lambda$  โดยที่  $D$  เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ ขนาดของสายอากาศที่สร้างขึ้นมีขนาดที่ใหญ่ที่สุด 0.25 m กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่งเป็นสนามระยะไกลเป็น 0.37 m นำสายอากาศตัวส่งและตัวรับที่ออกแบบมาทดสอบผ่านเครื่อง Network analyzer ในช่วงความถี่ยูเอชเอฟที่เหมาะสมกับการใช้งานโมดูลอาร์เอฟไอดีที่ได้ศึกษาไว้ เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์สมัยใหม่โดยเลือกคำสั่ง  $|S_{12}|$  จากนั้นทำการปรับเทียบสายโคแอกเซียลให้พร้อมใช้งานและทำการทดสอบวัดอัตราขยายของสายอากาศตัวส่งและตัวรับในระนาบ XZ และ YZ เมื่อสายอากาศตัวรับและตัวส่งที่ทำการออกแบบมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

$$(G_{0t})_{dB} = (G_{0r})_{dB} = 0.5 \left( 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right) \quad (3.1)$$

โดยที่	$P_r$	คือ กำลังงานด้านรับ
	$P_t$	คือ กำลังงานด้านส่ง
	$R$	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่น
	$(G_{0t})_{dB}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง
	$(G_{0r})_{dB}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ
	$10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right)$	คือ อัตราส่วนกำลังของภาครับและภาคส่ง



รูปที่ 3.31 ทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่น

การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากรูปที่ 3.32 (Radiation Pattern) หรือคุณลักษณะการแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันเปลี่ยนไปตามมุมรอบสายอากาศ โดยใช้อุปกรณ์ ME1300 Antenna Training kit ในการหมุนระยะของสายอากาศตัวส่งและตัวรับของสายอากาศโดยเชื่อมต่อผ่านเครื่อง Field Fox ทำการเลือกคำสั่งให้แสดงค่าเลือกช่วงความถี่ที่เราสนใจ ซึ่งในที่คือย่านความถี่ 886 MHz แสดงค่าบนโปรแกรมซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างมุมกับค่าสัญญาณความย่านยูเอชเอฟ จากนั้นนำค่ามาทำให้เป็นค่าบรรทัดฐานและแสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีรูปแบบแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional) จากทฤษฎีของ Principle plane การอธิบายการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจาก 3 มิติ ด้วยกราฟ ที่เป็น 2 มิติ ในระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยพิจารณาลักษณะสองทิศทางด้วย Beam width คือความกว้างลำคลื่นหรือมุมระหว่างองศาที่อยู่ตรงข้ามกัน เมื่ออ้างอิงจากจุดสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งความกว้างลำคลื่นที่นิยมใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศประกอบด้วย ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth : HPBW) และช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะของสายอากาศ อิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ (Impedance bandwidth) จะคำนึงถึงค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งที่ต้องการของระบบ (ระบบสื่อสารโดยทั่วไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณเท่ากับ  $50\ \Omega$ ) โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 หรือ ค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $-10\ \text{dB}$



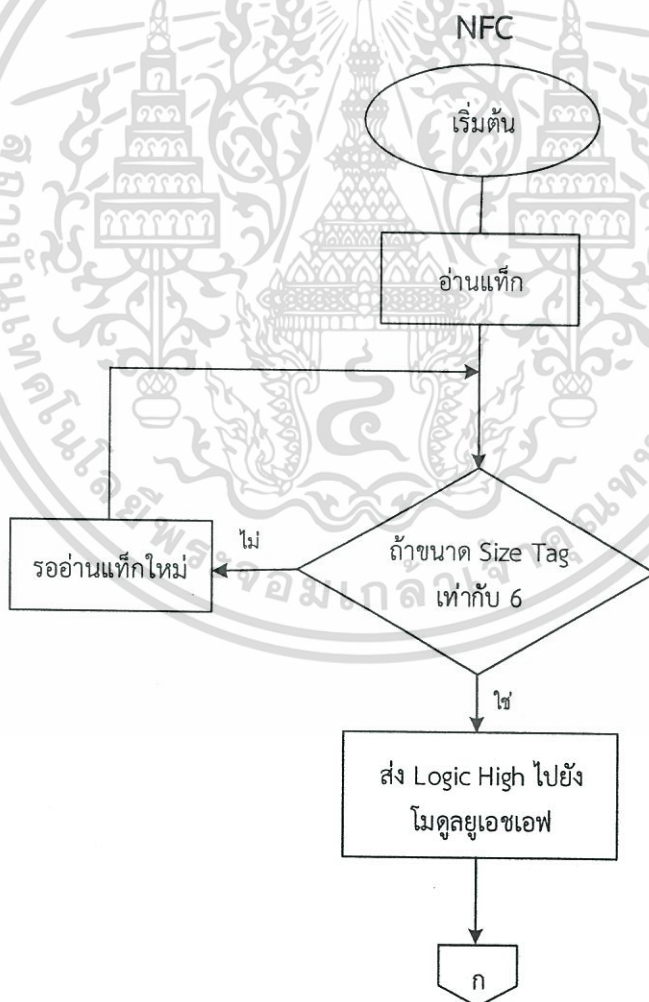
รูปที่ 3.32 ทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ทดสอบการรับแท็ก NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีด้วย NFC Shield V2.0 Module

แสดงแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการสื่อสารแบบไร้สาย ด้วยคลื่นความถี่สูงถึงกระบวนการทำงานระหว่างโมดูลด้วย NFC Shield V2.0 Module ของเครื่องอ่านแท็กข้อมูลอาร์เอฟไอดี เพื่อติดต่อสื่อสารกับสายอากาศแท็กและควบคุมการทำงานระหว่างโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีในรูปที่ 3.33 เมื่อมีการติดต่อสื่อสารในการอ่านแท็กข้อมูลได้ จะทำการส่งข้อมูลออกไปยังกระบวนการทำงานต่อไป (ก)

#### 3.3.4.1 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC Shield V2.0 Module ด้วยโปรแกรม Arduino



รูปที่ 3.33 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง NFC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเขียนคำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC Shield V2.0 Module แสดงแสดงดังรูปที่ 3.34 โดยการเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม Arduino เพื่อให้สามารถอ่านแท็กได้และนำข้อมูลจากการอ่านแท็กไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าในที่นี้ใช้แบบหลอดไฟในการใช้งานและทำการแก้ไขให้สามารถควบคุม เมื่อได้รับข้อมูลจากแท็ก โดยหลอดไฟจะติด เมื่อได้รับการแท็กและหลอดไฟจะดับก็ต่อเมื่ออ่านแท็กอีกครั้ง ซึ่งการทำงานจะอยู่ในรูปแบบของสวิตซ์

```
NFC_tag_scan_code_rev2$
#include "NfcAdapter.h"
int pinA =9;

PN532_SPI interface(SPI, 10); // create a PN532 SPI interface with the SPI CS terminal located at digital pin 10
NfcAdapter nfc = NfcAdapter(interface); // create an NFC adapter object

void setup(void) {
  Serial.begin(115200); // begin serial communication
  Serial.println("NDEF Reader");
  nfc.begin(); // begin NFC communication
  pinMode(pinA, OUTPUT);
  digitalWrite(pinA, LOW);
}

void loop(void) {
  Serial.println("\nScan an NFC tag\n");
  if (nfc.tagPresent()) // Do an NFC scan to see if an NFC tag is present
  {
    NfcTag tag = nfc.read(); // read the NFC tag into an object, nfc.read() returns an NfcTag object.
    if (sizeof(tag.getUidString())==6) // every tag won't have a message
    {
      Serial.println(tag.getUidString());
      digitalWrite(pinA,HIGH);
      delay(500);
      digitalWrite(9,LOW);
      delay(500);
    }
  }
}
```

รูปที่ 3.34 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC Shield V2.0 Module ด้วยโปรแกรม Arduino

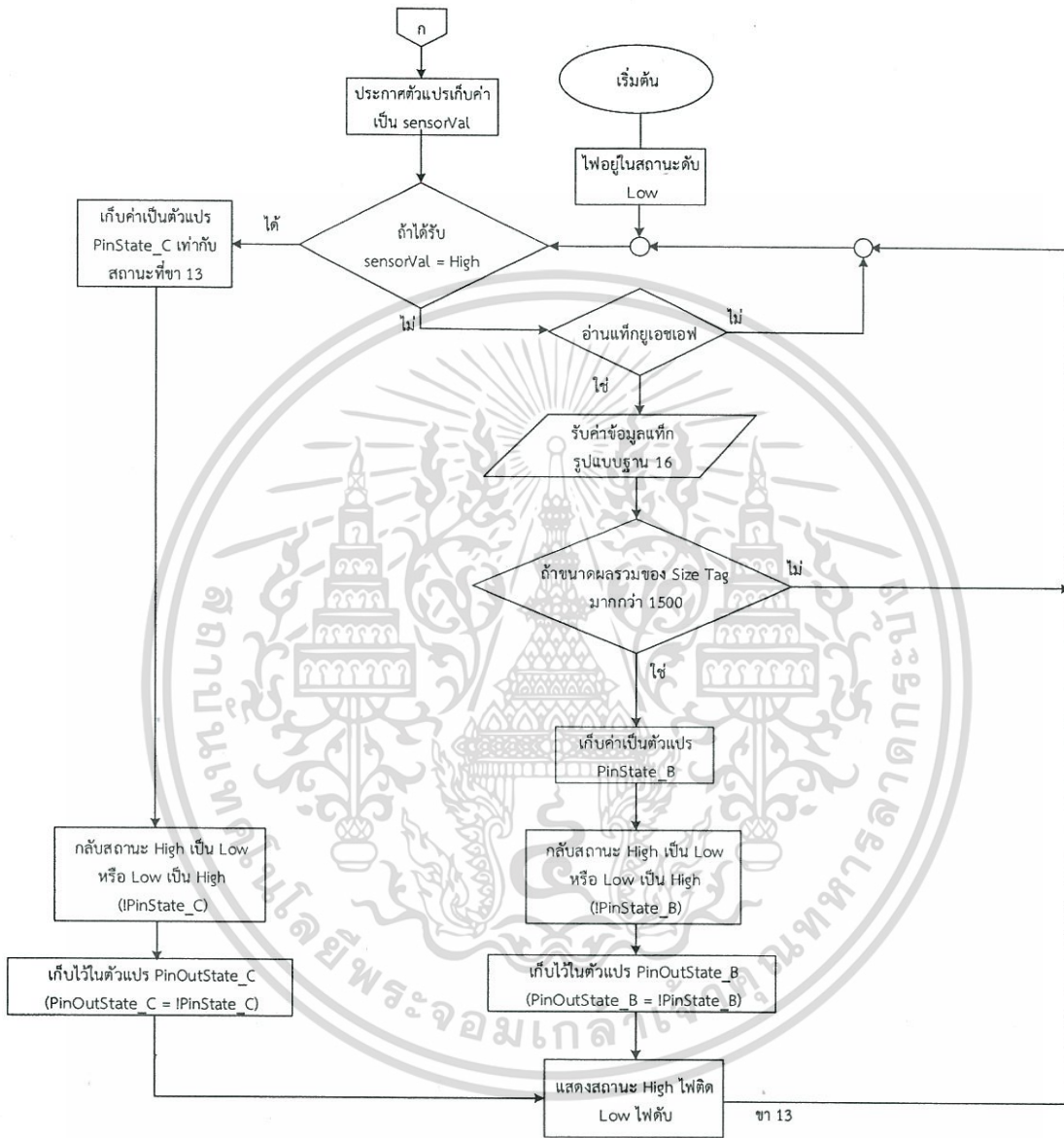
### 3.3.5 ทดสอบการรับแท็กยูเอชเอฟ จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีด้วย UART UHF Passive 6C

แสดงแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการสื่อสารแบบไร้สาย ด้วยคลื่นความถี่สูงถึงกระบวนการทำงานระหว่างโมดูลด้วย UART UHF Passive ของเครื่องอ่านแท็กข้อมูลอาร์เอฟไอดี เพื่อติดต่อสื่อสารกับสายอากาศแท็กและควบคุมการทำงานระหว่างโมดูลของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีในรูปที่ 3.35 โดยมีการรับข้อมูลจากกระบวนการทำงาน (ก) ระหว่างโมดูล NFC Shield V2.0 Module ในทำงานร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.1 คำสั่งควบคุมการการอ่านแท็ก UHF Passive 6C ด้วย

โปรแกรม Arduino



รูปที่ 3.35 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีในการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเขียนคำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก UHF UHF Passive 6C แสดงแสดงดังรูปที่ 3.36 และ 3.37 ตามลำดับ โดยการเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม Arduino เพื่อให้สามารถอ่านแท็กได้และนำข้อมูลจากการอ่านแท็กไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าในที่นี้ใช้แบบหลอดไฟในการใช้งานและทำการแก้ไขให้สามารถควบคุม เมื่อได้รับข้อมูลจากแท็ก โดยหลอดไฟจะติด เมื่อได้รับการแท็กและหลอดไฟจะดับก็ต่อเมื่ออ่านแท็กอีกครั้ง ซึ่งการทำงานจะอยู่ในรูปแบบของสวิตช์

```

UHF_Read_Tag
#include "Arduino.h"
#include <SoftwareSerial.h>
int myArray[30];
unsigned int index;
long arraySum;

SoftwareSerial mySerial (10,11);
unsigned char incomingByte;

void sendIdentifyCmd ()
{
  byte message[] = {0xBB,0x00,0x22,0x00,0x00,0x22,0x7E};
  Serial.write(message, sizeof(message));
}

void setup ()
{
  Serial.begin (115200);
  mySerial.begin (115200);
  pinMode (13, OUTPUT);
  digitalWrite(13, LOW);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
}

void loop ()

```

รูปที่ 3.36 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก UHF UHF Passive 6C ด้วยโปรแกรม Arduino

```

UHF_Read_Tag$
{
  int sensorVal = digitalRead(2);
  byte message[] = {0xBB,0x00,0x22,0x00,0x00,0x22,0x7E};
  mySerial.write(message, sizeof(message));
  arraySum = 0;
  for (int i = 0; i < 30; i++)
  {
    while (mySerial.available()<0); // wait for a character
    int incomingByte = mySerial.read ();
    myArray[i]=incomingByte;
    arraySum += myArray[i];
  }
  Serial.print("Size of tag code = ");Serial.println(arraySum);
  if(arraySum > 1500) // tag
  {
    boolean pinState_B = digitalRead(13);
    boolean pinOutState_B;
    pinOutState_B = !pinState_B;
    digitalWrite (13,pinOutState_B);
    delay(1000);
  }
  if(sensorVal == HIGH) // tag
  {
    boolean pinState_C = digitalRead(13);
    boolean pinOutState_C;
    pinOutState_C = !pinState_C;
    digitalWrite (13,pinOutState_C);
    delay(1000);
  }
}

```

รูปที่ 3.37 คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก UART UHF Passive 6C ด้วยโปรแกรม Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

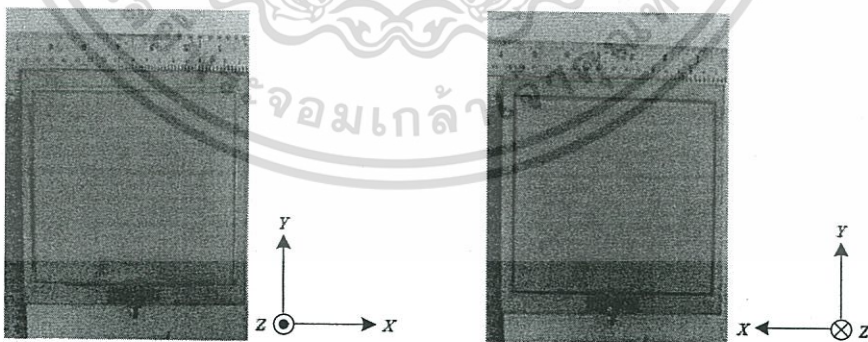
## บทที่ 4 ผลการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศบ่วงขดลวดรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซ์ Impedance ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ และ เอชเอฟ (ความถี่ 13.56 MHz) ออกแบบสายอากาศและปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศให้เหมาะสม NFC และ ยูเอชเอฟ ที่ความถี่ 13.56 MHz และ 900 MHz ซึ่งพิจารณาจากคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยาย โดยศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ แล้วทำการปรับขนาดพารามิเตอร์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของสายอากาศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่ ซึ่งได้จากบทที่ 3 เพื่อยืนยันความถูกต้องและแม่นยำระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ

### 4.1 สร้างสายอากาศที่ทำการการออกแบบ

#### 4.1.1 โครงสร้างสายอากาศยูเอชเอฟ

สร้างสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบบนโปรแกรมจำลองผล ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศบ่วงขดลวดรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซ์ Impedance ซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ ยูเอชเอฟ แสดงแสดงดังรูปที่ 4.1



(ก)

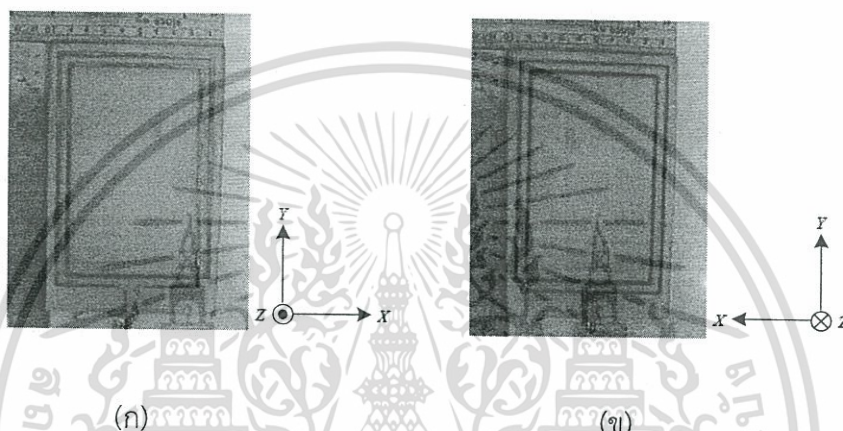
(ข)

รูปที่ 4.1 สายอากาศสร้างขั้วย่านความถี่ยูเอชเอฟที่สร้างขึ้น (ก) มุมมองด้านหน้า และ (ข) มุมมองด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 โครงสร้างสายอากาศ NFC

สร้างสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบบนโปรแกรมจำลองผล ซึ่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปในรูปแบบของสายอากาศบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมและใช้หลักการแมตซิ่ง Impedance ซึ่งจะสามารถใช้สำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ NFC แสดงแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายสายอากาศ NFC ย่านความถี่ 13.56 MHz (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง

### 4.2 ผลการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน ( $|S_{11}|$ ) ของสายอากาศ

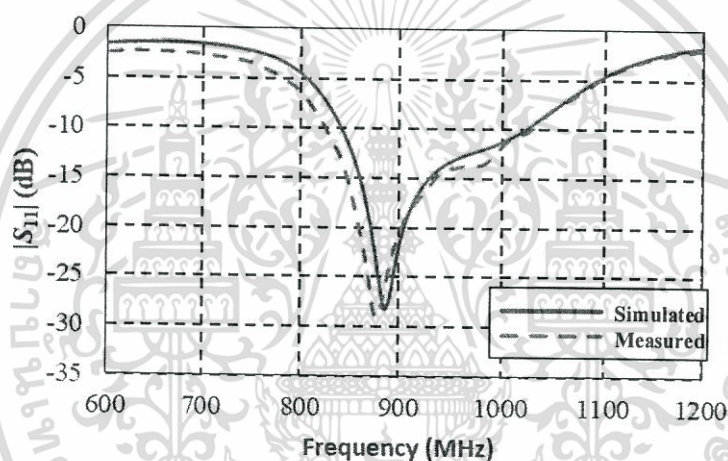
4.2.1 เมื่อเปรียบเทียบค่า  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศต้นแบบกับผลวัดจริงของสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น

#### 4.2.1.1 สายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

นำสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบสายอากาศ เปรียบเทียบกับผลการจำลองลักษณะของสายอากาศที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 ด้วยโปรแกรมจำลอง โดยคุณลักษณะที่ใช้ในการพิจารณา คือ  $|S_{11}|$  และ Radiation pattern โดยเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างขึ้นจากรูปที่ 4.1 พิจารณาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ  $|S_{11}|$  และคุณลักษณะ Radiation pattern ด้วยเครื่อง ME1300 Antenna Training Kit และอัตราขยายด้วยเครื่องมือ Network Analyzers แสดงแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 ตามลำดับ

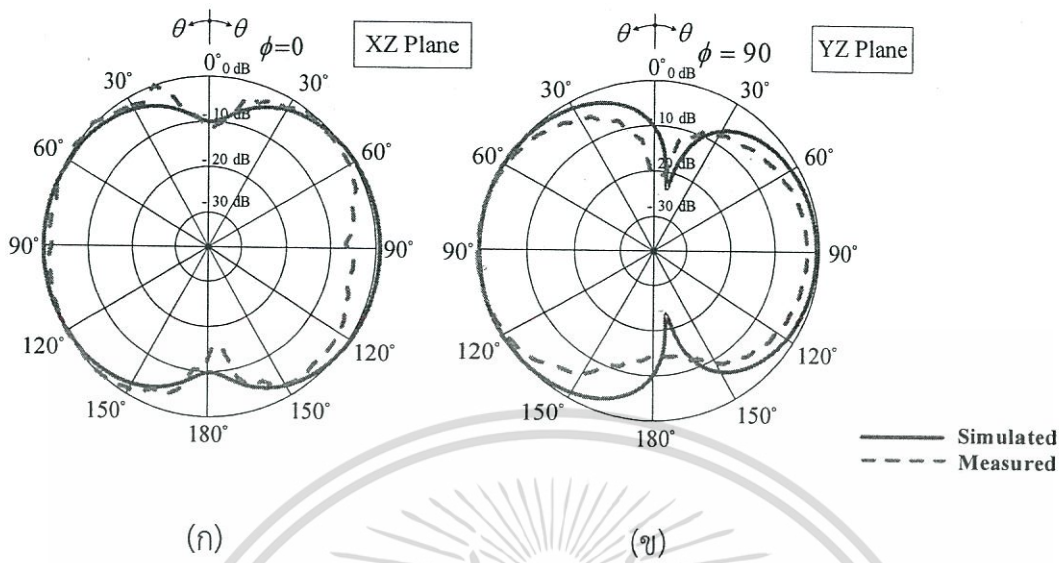
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างในโปรแกรมการจำลองสามารถทำงานได้ในย่านความถี่เอชเอฟ ซึ่งต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สมัยใหม่ ในส่วนของการพิจารณาว่าสายอากาศจะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะพิจารณาคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $-10$  dB ซึ่งหมายความว่า กำลังของคลื่นที่สะท้อนกลับมา มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดขึ้นใน IEEE โดยความถี่ที่พิจารณาคุณลักษณะที่  $|S_{11}|$  จากผลการจำลองและผลการทดสอบเท่ากับ  $-28.34$  dB และ  $-26.06$  dB ตามลำดับ ที่ความถี่ 886 MHz และครอบคลุมการทำงานได้ดีช่วงความถี่ 842 – 1021 MHz และ 826 – 1027 MHz ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงย่านความถี่ที่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่ของแต่ละประเทศ มีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 20.20% และ 22.68% ตามลำดับ

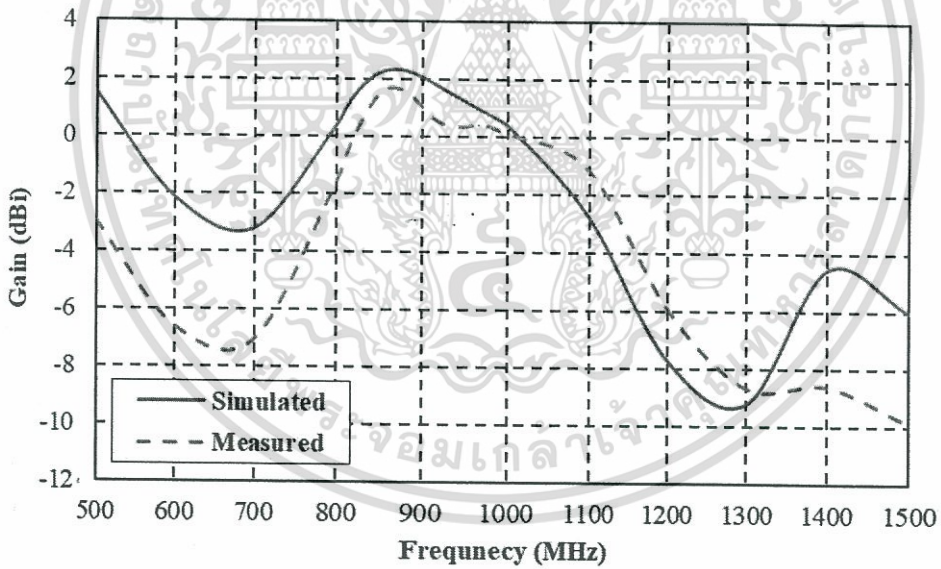


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศย่านความถี่เอชเอฟ

ในรูปที่ 4.4 แสดงถึงผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XZ และระนาบ YZ โดยพิจารณาที่ความถี่ 886 MHz ซึ่งมีลักษณะแบบสายอากาศรอบทิศทาง (Omnidirectional) และมีความกว้างยาวคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beamwidth : HPBW) เท่ากับ 119.6 องศา และ 115 องศา ตามลำดับ โดยผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศพบว่าในย่านความถี่เอชเอฟมีอัตราขยายสูงสุด 2.35 dBi และ 1.69 dBi ที่ความถี่ 886 MHz แสดงแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ (ก) ระนาบ XZ และ (ข) ระนาบ YZ



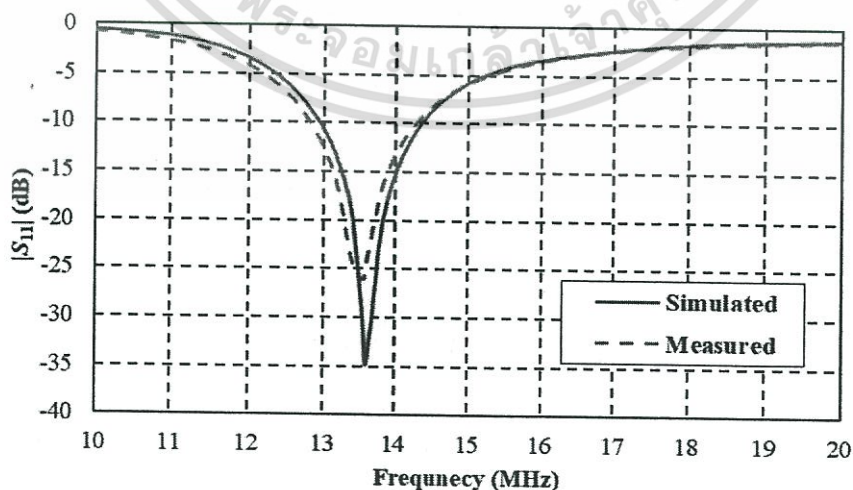
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศย่านความถี่ยูเอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 สายอากาศย่านความถี่ NFC

จากรูปที่ 4.2 สายอากาศขึ้นอยู่กับช่วงขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของพื้นผิวเรียบ ประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่แสดงนั้นเป็นค่าที่ได้มาจากการจำลองเพื่อให้สายอากาศแผ่นพิมพ์แบบขดลวดควมรูปลี่เหลี่ยมนี้สามารถที่จะกระจายสนามแม่เหล็กได้ในทุกทิศทาง จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบจากผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 ด้วยโปรแกรมจำลอง โดยคุณลักษณะที่ใช้ในการพิจารณา คือ  $|S_{11}|$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กโดยเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างขึ้นจากรูปที่ 4.2 พิจารณาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ  $|S_{11}|$  ด้วยเครื่องมือ Network Analyzers แสดงแสดงดังรูปที่ 4.6 และทดสอบสายอากาศ NFC ที่สร้างขึ้นใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กต่อไป

ในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้ออกแบบในโปรแกรมการจำลองมีแนวโน้มที่จะสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ต่ำกว่าความถี่ 13.56 MHz นั้น ซึ่งต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้าน อุปกรณ์สมัยใหม่ ในส่วนของการพิจารณาว่าสายอากาศจะสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะพิจารณาคคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งหมายความว่า กำลังของคลื่นที่สะท้อนกลับมามีค่าน้อยกว่ากำลังของคลื่นที่ป้อนเข้าป้อนนั้นเอง โดยความถี่ที่ทำงานได้ดีในช่วงความถี่ 13.20 - 13.99 MHz จากโปรแกรมจำลองผล และ 13.23 - 13.96 MHz จากผลการทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 13.56 MHz ของ NFC Shield module ที่รองรับ มีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 5.82% และ 5.38% ตามลำดับ



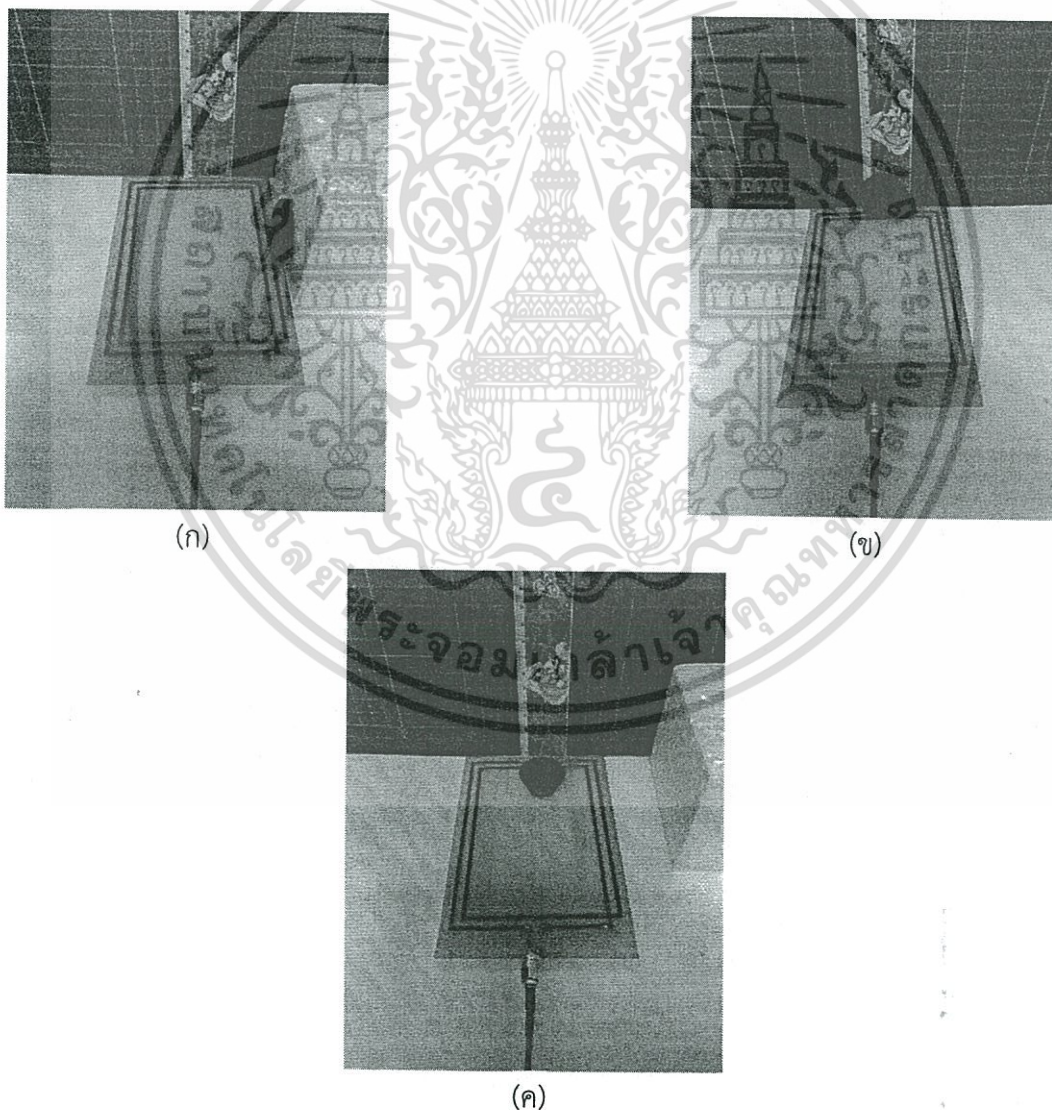
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองและผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ NFC ที่

ความถี่ 13.56 MHz นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลทดสอบการรับแท็ก NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี

#### 4.3.1 ผลทดสอบการรับแท็กชนิดเหรียญ NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0

ลักษณะการรับแท็กเหรียญกับสายอากาศที่สร้างขึ้นใช้ร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 4.7 จากการเขียนคำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC ด้วยโปรแกรม Arduino แล้ว ทำการทดสอบการรับแท็กเหรียญ NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ตามระนาบแกน X Y และระนาบแกน Z แสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



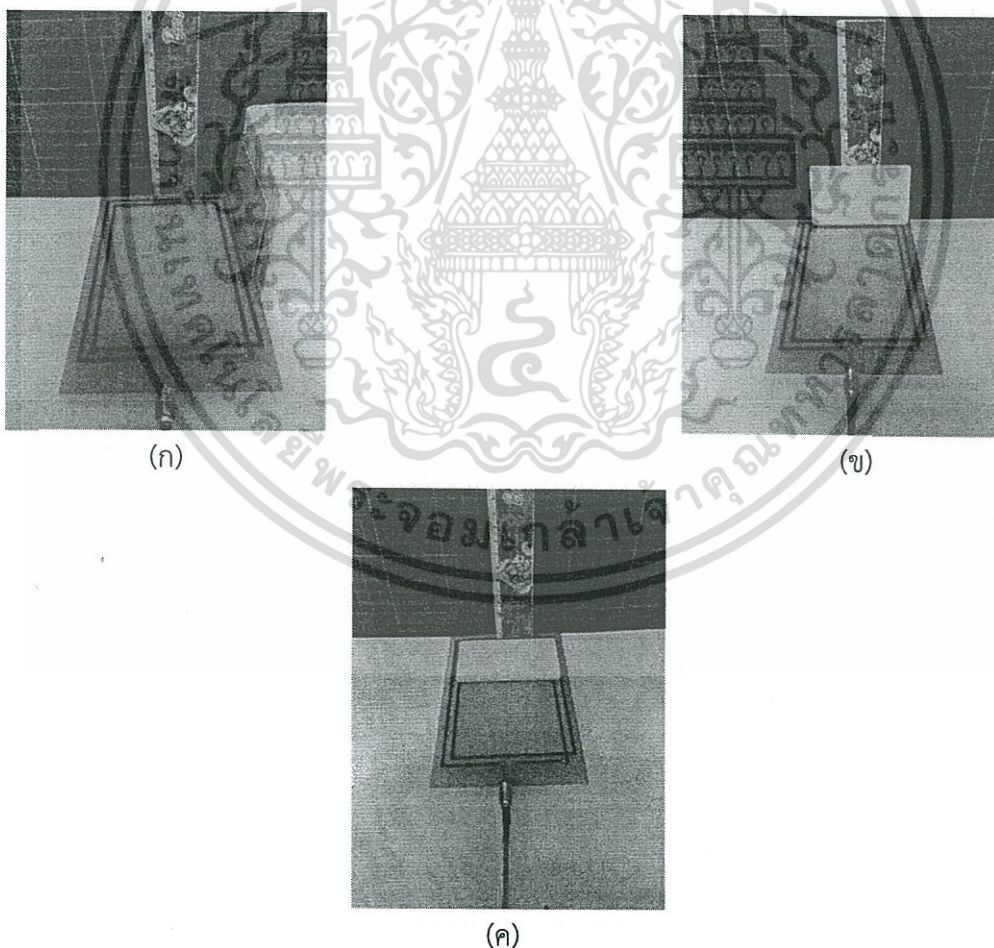
รูปที่ 4.7 การรับแท็กชนิดเหรียญ (ก) ระนาบแกน X (ข) ระนาบแกน Y และ (ค) ระนาบแกน Z  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศกับการรับแท็กระนาบแกน X Y และระนาบแกน Z ที่ 1 m 0 m และ 2 m ตามลำดับ

#### 4.3.2 ผลทดสอบการรับแท็กชนิดบัตร NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0

ลักษณะการรับแท็กบัตรกับสายอากาศที่สร้างขึ้นใช้ร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 4.11 จากการเขียนคำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC ด้วยโปรแกรม Arduino แล้ว ทำการทดสอบการรับแท็กบัตร NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ตามระนาบแกน X Y และระนาบแกน Z แสดงดังรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การรับแท็กชนิดบัตร (ก) ระนาบแกน X (ข) ระนาบแกน Y และ (ค) ระนาบแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	0	0	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	0	1

1	0	0	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	1	1
1	0	0	1

1	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	0
0	0	0	0

0 cm
1 cm
2 cm
3 cm

0	0	0	0
0	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

4 cm
5 cm

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน X

1	1	1	1
0	1	1	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

1	1	1	1
0	1	1	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

1	1	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

0	1	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	1	1	0
0	1	1	1

0 cm
1 cm
2 cm
3 cm

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	1	1	0

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

4 cm
5 cm

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	1	1	1
0	1	1	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

0 cm

1	1	1	1
0	1	1	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

7 cm

1	1	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	1	1	1

8 cm

0	1	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	1	1	0
0	1	1	1

9 cm

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

10 cm

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการรับแท็กชนิดบัตรระนาบแกน Z

เมื่อเครื่องอ่านข้อมูลได้รับการอ่านแท็ก NFC ชนิดบัตรระนาบแกน X Y และระนาบแกน Z การรับแท็กชนิดบัตรแสดงดังรูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการรับแท็กเมื่อเทียบกับสายอากาศด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.14 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศกับการรับแท็กระนาบแกน X Y และระนาบแกน Z ที่ 4 m 4 m และ 9 m ตามลำดับ

#### 4.3.3 ผลทดสอบการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนด้วยเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0

ลักษณะการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนกับสายอากาศที่สร้างขึ้นใช้ร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี NFC Shield V2.0 แสดงแสดงดังรูปที่ 4.15 จากการเขียนคำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC ด้วยโปรแกรม Arduino แล้ว ทำการทดสอบการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนในระบบ NFC จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ตามระนาบแกน Z แสดงดังรูปที่ 4.16



(ก)

รูปที่ 4.15 การรับแท็กจากสมาร์ทโฟน (ก) ระนาบแกน Z

1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0

0 cm

1 cm

2 cm

3 cm

4 cm

5 cm

6 cm

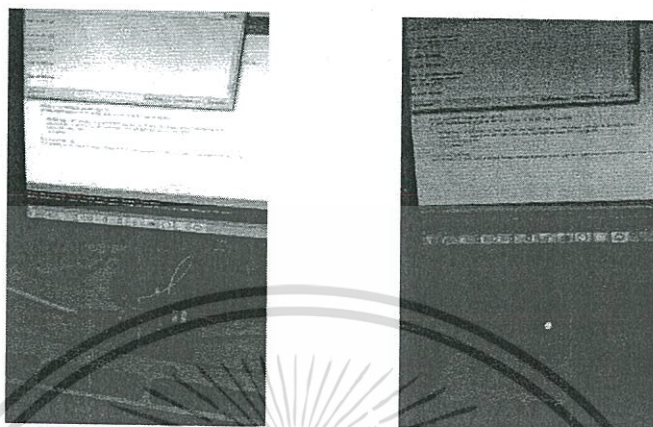
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการรับแท็กจากสมาร์ทโฟนระนาบแกน Z

จากผลการทดสอบ 4.3.3 เมื่อได้รับการอ่านแท็ก NFC จากสมาร์ทโฟนระนาบแกน Z ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15 เทียบกับสายอากาศด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศที่ 5 m

โดยผลการทดสอบรับแท็กจากสมาร์ทโฟนบนสายอากาศที่สร้างขึ้นกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูง NFC ไม่สามารถรับแท็กได้จากระนาบแกน X และระนาบแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลการทดสอบระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ในสนาม ระยะใกล้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.17 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ด้วยระบบ RFID

(ก) ไม่อ่านแท็กไฟ LED ติดสีแดง (ข) อ่านแท็กไฟ LED ติดสีเขียว



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบ ไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง

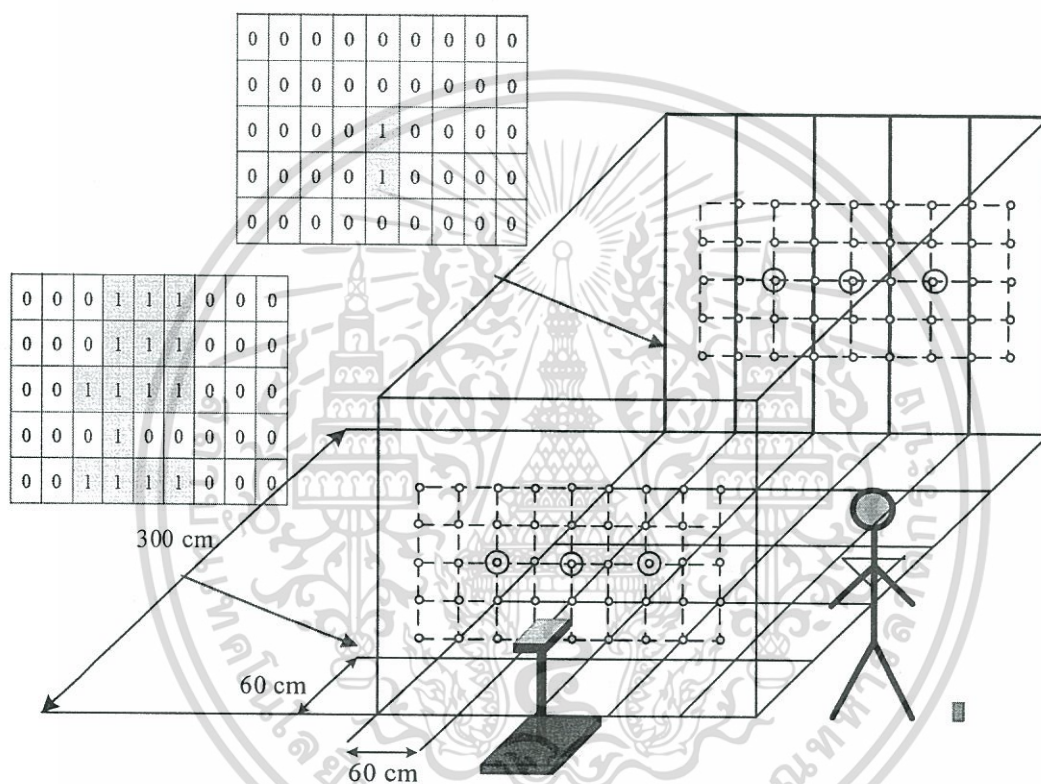
(ก) ไม่อ่านแท็ก หลอดไฟไม่ติด และ (ข) อ่านแท็ก หลอดไฟติด

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงเป็นการอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูง NFC และ แสดงผลการทำงานในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง เมื่อได้รับการแท็กข้อมูลจากบัตร โดยจะทำให้หลอดไฟติดเมื่อได้รับแท็กและหลอดจะดับต่อเมื่อได้รับการอ่านแท็กอีกครั้ง ซึ่งการทำงานจะอยู่ในรูปแบบของสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

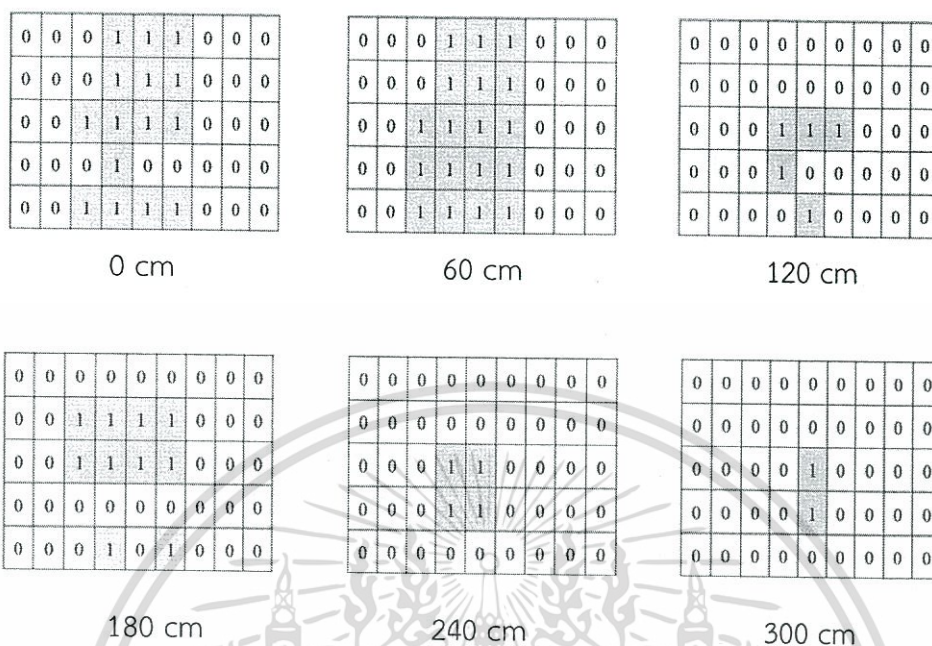
#### 4.4 ผลทดสอบการรับแท็กยูเอชเอฟ จากเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี

##### 4.4.1 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ XY

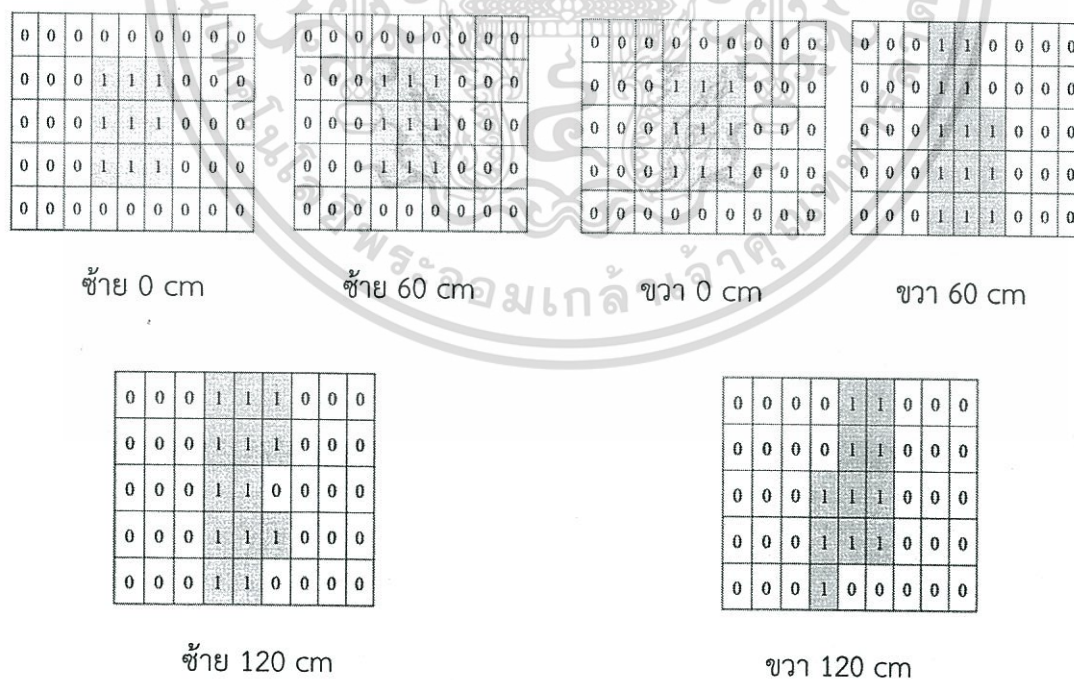


รูปที่ 4.19 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic chamber) ในระนาบ XY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XY (ด้านหน้า)



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XY (ด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0

0 cm

0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0

60 cm

0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0

120 cm

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

180 cm

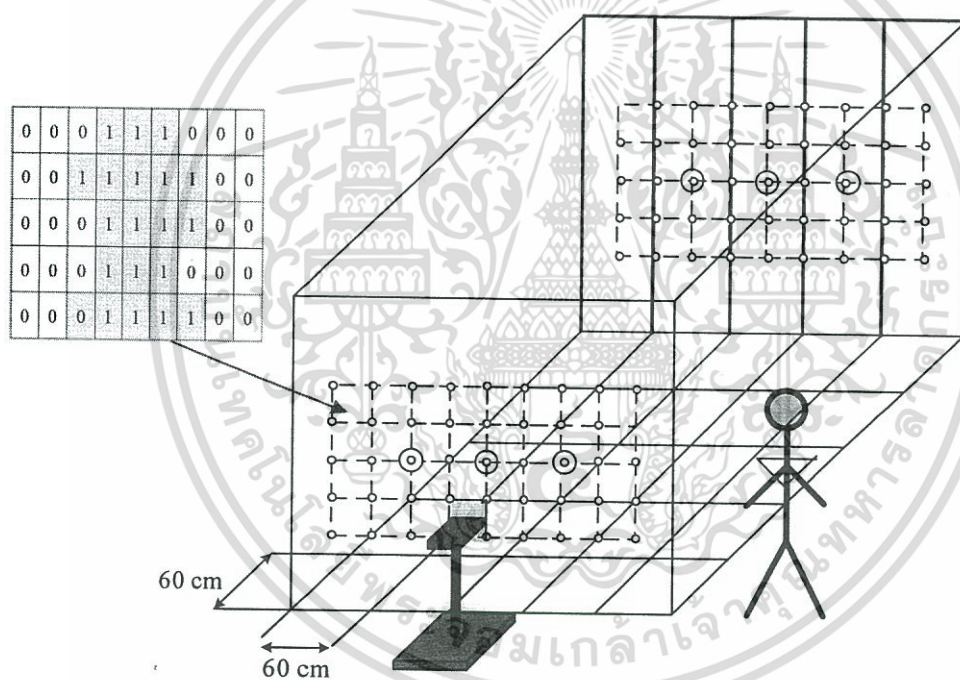
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XY (ด้านหลัง)

		60 cm				
	60 cm	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	1	0	0
		0	1	1	0	0
		0	0	1	0	0
		1	1	1	1	1
		0	1	1	0	0
		0	0	1	0	0
		0	1	1	1	0
		0	0	1	0	0
		0	0	1	0	0
		0	0	0	0	0

รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XY (มมบน)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นเป็นชอบจะขอคืนค่า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบ 4.4.1 เมื่อได้รับการอ่านแท็ก ยูเอชเอฟ ชนิดบัตรระนาบแกน Y จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.19 เมื่อเทียบกับสายอากาศด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศ (ด้านหน้า) ที่ 3 m และทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศในทิศทางด้านหน้าสามารถรับการแท็กได้ระยะทางไกลสุดที่ 1.2 m และด้านหลังของสายอากาศรับการอ่านแท็กระยะทางได้ไกลสุดที่ 1.8 m

4.4.2 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ XZ



รูปที่ 4.24 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic chamber) ในระนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0

0 cm

0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0

30 cm

0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0

60 cm

0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0

90 cm

รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XZ (ด้านหน้า)

0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0

ซ้าย 0 cm

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ซ้าย 30 cm

0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0

ขวา 0 cm

0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ขวา 30 cm

0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ซ้าย 60 cm

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ขวา 60 cm

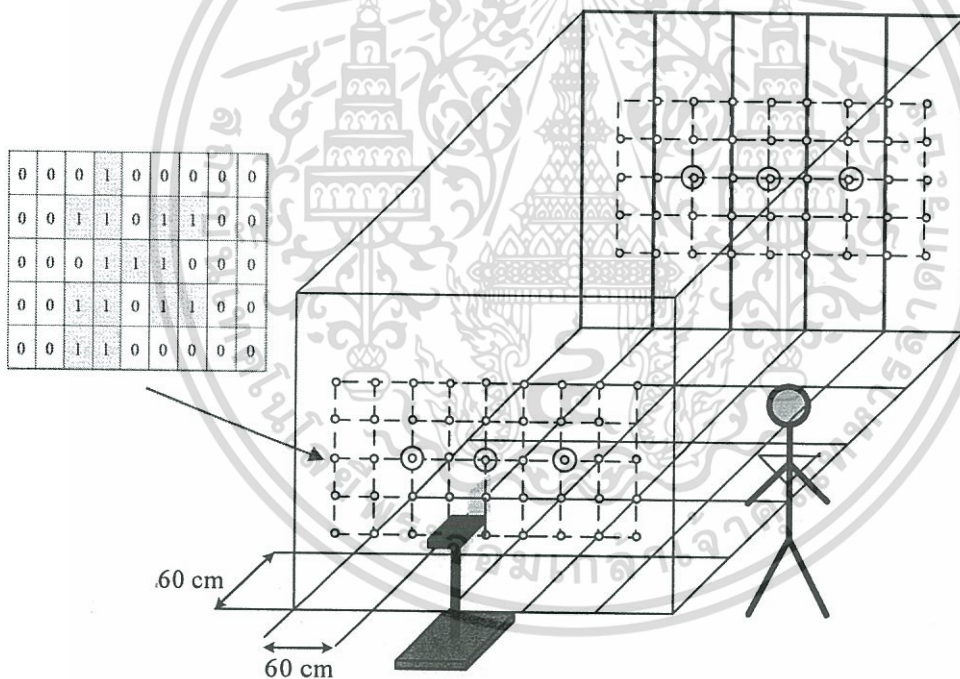
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบการรับ Tag ของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ XZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (เพื่อการศึกษาเท่านั้น) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากผลการทดสอบ 4.4.2 เมื่อได้รับการอ่านแท็ก ยูเอชเอฟ ชนิดบัตรระนาบแกน Y จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 เมื่อเทียบกับสายอากาศด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.28 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XZ ของสายอากาศ (ด้านหน้า) ที่ 0.6 m และทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศในทิศทางด้านหน้าสามารถรับการแท็กได้ระยะทางไกลสุดที่ 0.6 m และ 1.2 m ตามลำดับ และด้านหลังของสายอากาศรับการอ่านแท็ก ระยะทางได้ไกลสุดที่ 0.6 m

#### 4.4.3 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศยูเอชเอฟที่สร้างขึ้นกับกับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในระนาบ YZ



รูปที่ 4.29 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic chamber) ในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0

0 cm

0	1	1	1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0

30 cm

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0

60 cm

รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ YZ (ด้านหน้า)

0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0

ซ้าย 0 cm

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ซ้าย 30 cm

0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0

ขวา 0 cm

0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0

ขวา 30 cm

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ซ้าย 60 cm

0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0

ขวา 60 cm

รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบการรับแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ YZ (ด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0

0 cm

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0	0

30 cm

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

60 cm

รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ YZ (ด้านหลัง)

60 cm	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในระนาบ YZ (มุมบน)

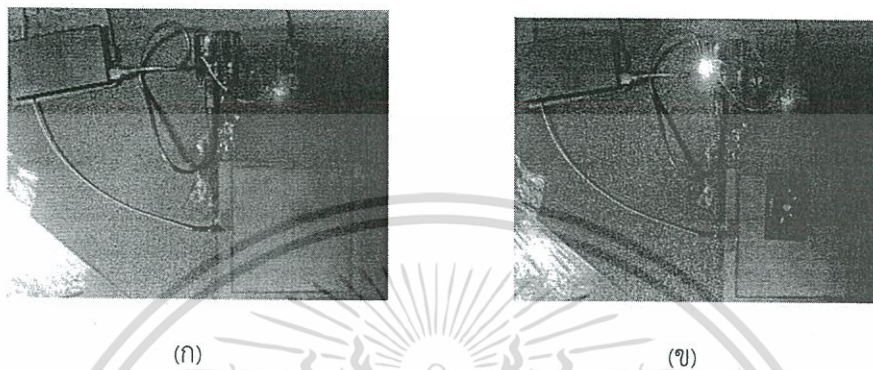
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบ 4.4.3 เมื่อได้รับการอ่านแท็ก ยูเอชเอฟ ชนิดบัตรระนาบแกน Y จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.29 เมื่อเทียบกับสายอากาศด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.30 ถึง 4.33 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ YZ ของสายอากาศ (ด้านหน้า) ที่ 0.6 m และทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศในทิศทางด้านหน้าสามารถรับการแท็กได้ระยะทางไกลสุดที่ 0 m และ 0.6 m ตามลำดับ และด้านหลังของสายอากาศรับการอ่านแท็ก ระยะทางได้ไกลสุดที่ 0.6 m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 ผลการทดสอบระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่ง ยูเอชเอฟ ในสนามระยะไกล



รูปที่ 4.34 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟ ด้วยระบบ RFID  
(ก) ไม่อ่านแท็กไฟ LED สีแดงไม่ติด และ (ข) อ่านแท็กไฟ LED สีแดงติด



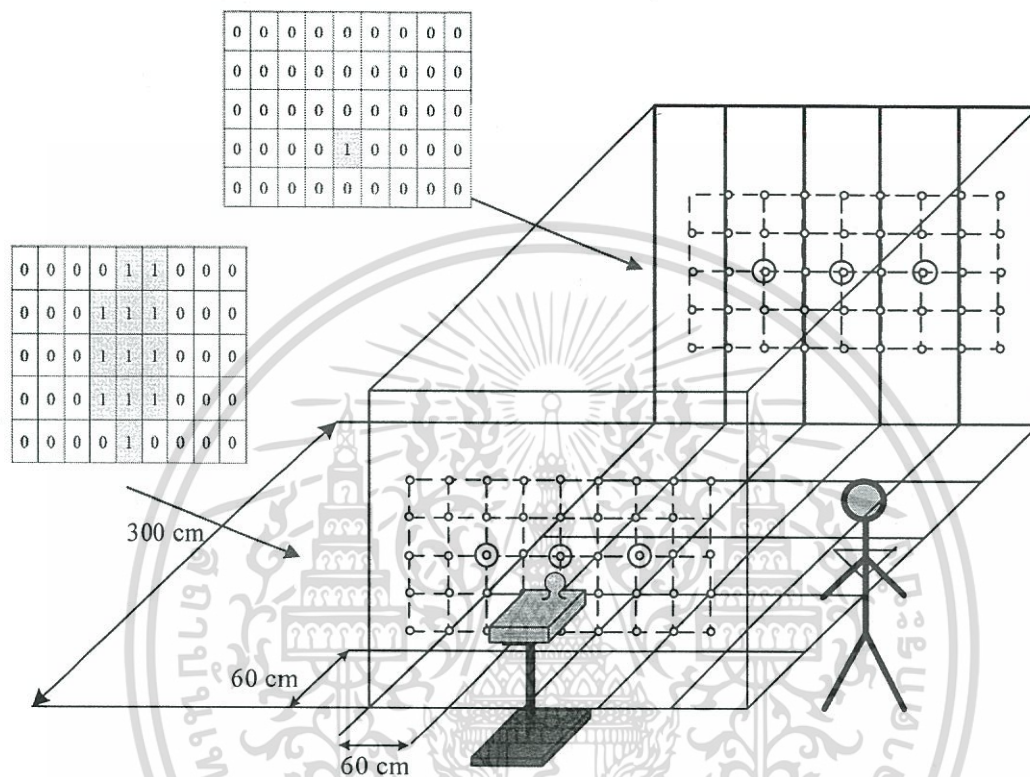
รูปที่ 4.35 การอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสาร  
แบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง

(ก) ไม่อ่านแท็ก หลอดไฟไม่ติด และ (ข) อ่านแท็ก หลอดไฟติด

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 แสดงเป็นการอ่านแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟ และ แสดงผลการทำงานในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูง เมื่อได้รับการแท็กข้อมูลจากบัตร โดยจะทำให้หลอดไฟติดเมื่อได้รับแท็กและหลอดจะดับต่อเมื่อได้รับการอ่านแท็กอีกครั้ง ซึ่งการทำงานจะอยู่ในรูปแบบของสวิตช์

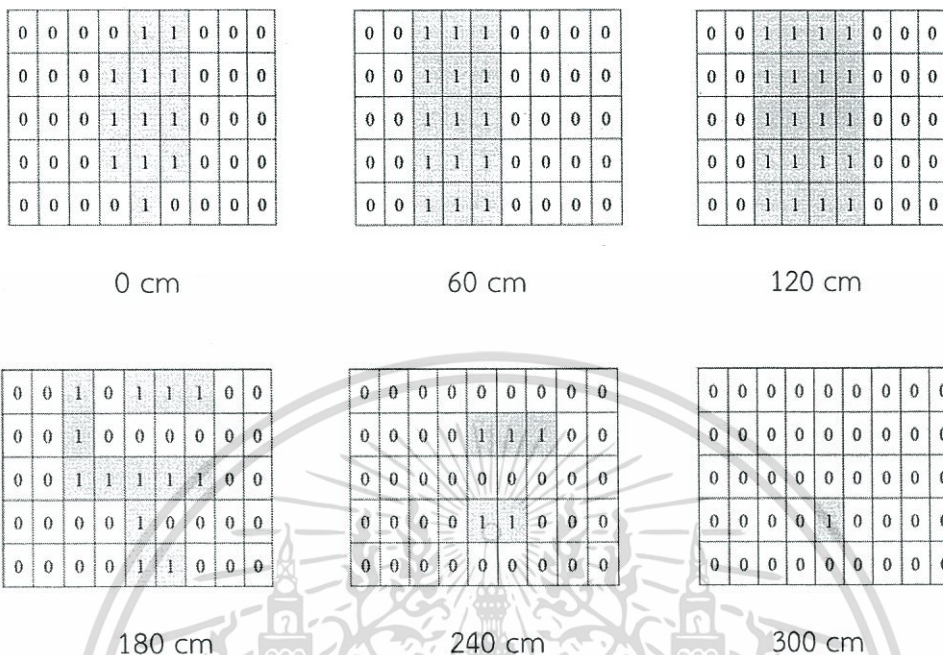
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 ผลการทดสอบจากระบบอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟภายในโครงสร้างกล่อง ในสนามระยะไกล

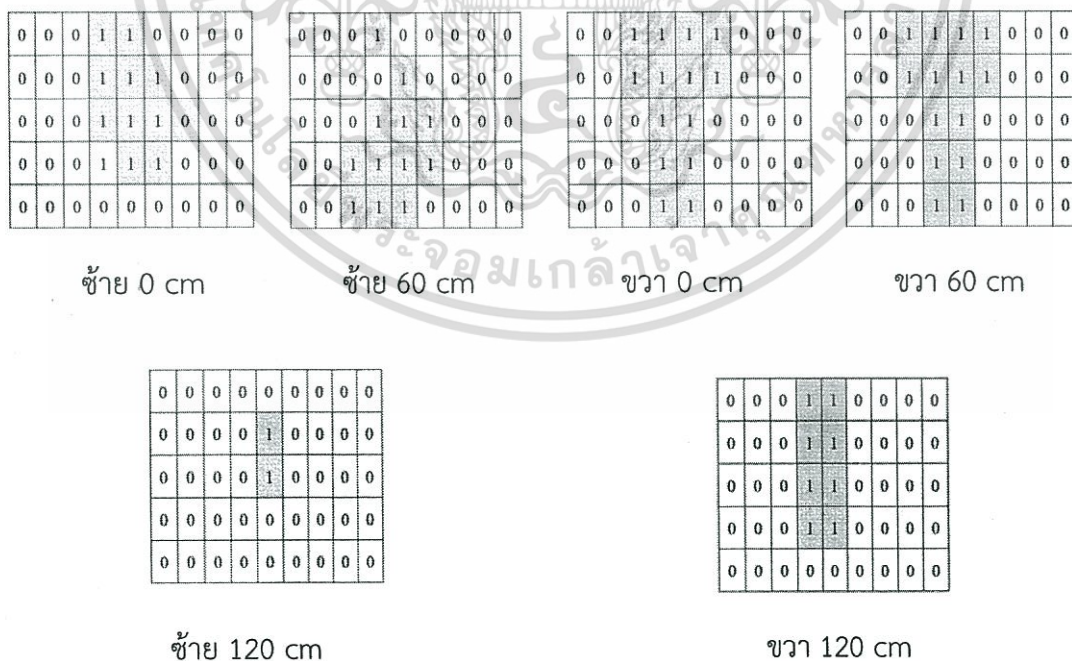


รูปที่ 4.36 แบบจำลองในการทดสอบรับแท็กสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ภายในห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic chamber) ในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

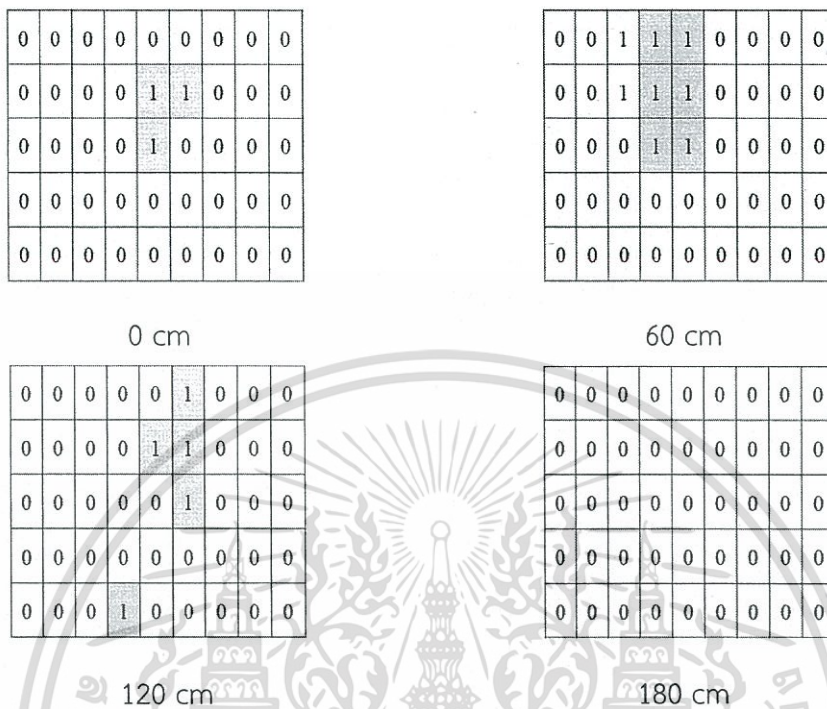


รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านหน้า)

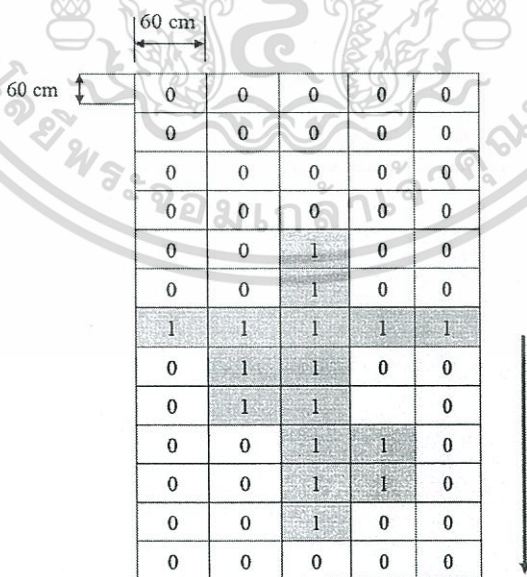


รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (ด้านหลัง)



รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟในโครงสร้างกล่อง ระนาบ XY (มุมบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบ 4.4.5 เมื่อได้รับการอ่านแท็กยูเอชเอฟ ชนิดบัตร์ระนาบแกน Y จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.36 เมื่อเทียบกับสายอากาศที่อยู่ภายในโครงสร้างกล่องด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.37 ถึง 4.40 ซึ่งสามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศ (ด้านหน้า) ที่ 3 m และทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศในทิศทางด้านหน้าสามารถรับการแท็กได้ระยะทางไกลสุดที่ 1.2 m และด้านหลังของสายอากาศรับการอ่านแท็กระยะทางได้ไกลสุดที่ 1.2 m

ซึ่งผลการรับแท็กระยะไกลนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศคือ  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย ที่นำมาใช้ในการพิจารณา และหลักการหนึ่งจากทฤษฎีกฎมือขวาลอเรนซ์ (Lorentz Force Law Rule) ที่ช่วยในการพิจารณากำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเส้นทองแดงของสายอากาศแบบบ่วงที่ได้ทำการออกแบบกระแสไฟฟ้าที่วิ่งวนเป็นบ่วงจะเกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสโดยให้นิ้วหัวแม่มือชี้ไปในทิศทางเดียวกับกระแส นิ้วที่เหลือจะชี้ตามทิศของสนามแม่เหล็ก จึงส่งผลทำให้การอ่านแท็กแต่ละระนาบต่างๆ แตกต่างกัน



## บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์นี้ต้องการพัฒนาด้านสายอากาศเพื่อประยุกต์การใช้งานทางด้าน อุปกรณ์สมัยใหม่ โดยทำการออกแบบและทดสอบสายอากาศสำหรับแอปพลิเคชัน NFC (13.56 MHz) และ Far-field (UHF band) เพื่อนำไปใช้ติดต่อสื่อสารร่วมกับสายอากาศแท็กโดยมีพื้นที่ใช้งานขนาดใหญ่ ในการประยุกต์การใช้งานในการอ่านแท็กสายอากาศอาร์เอฟไอดีที่เหมาะสม จากการนำสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบสายอากาศ เปรียบเทียบกับผลการจำลองลักษณะของสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลอง โดยคุณลักษณะที่ใช้ในการพิจารณา คือ  $|S_{11}|$  และ Radiation pattern โดยเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้าง โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ คือ  $|S_{11}|$  และ อัตราขยายด้วยเครื่องมือ Network Analyzers และคุณลักษณะ Radiation pattern ด้วยเครื่อง ME1300 Antenna Training Kit

สำหรับภาคการศึกษาที่ 2 คณะผู้จัดทำจะดำเนินงานต่อโดยจัดทำในส่วนของการออกแบบคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีและสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อติดต่อสื่อสารร่วมกับสายอากาศแท็กและนำไปประยุกต์การใช้งานทางด้าน อุปกรณ์สมัยใหม่ โดยในที่นี้เป็นกรนำไปทดสอบการรับแท็กเมื่อเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของสายอากาศย่านความถี่สูง NFC และย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟทำงานร่วมกันได้ ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สายในสนามระยะไกลและสนามระยะไกลในย่านความถี่สูง

จากผลการทดสอบเมื่อเครื่องอ่านข้อมูลรับการอ่านแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูงยิ่งยูเอชเอฟที่สร้างขึ้น สามารถรับแท็กได้ระยะทางไกลสุดในระนาบ XY ของสายอากาศ (ด้านหน้า) ที่ 3 m และทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายอากาศในทิศทางด้านหน้าสามารถรับการแท็กได้ระยะทางไกลสุดที่ 1.2 m และด้านหลังของสายอากาศรับการอ่านแท็กได้ระยะทางได้ไกลสุดที่ 1.2 m โดยผลการทดสอบเมื่อเครื่องอ่านข้อมูลรับการอ่านแท็กของสายอากาศย่านความถี่สูง NFC ที่สร้างขึ้น สามารถรับการอ่านแท็กได้ระยะไกลสุดที่ 9 m

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบสายอากาศ 2 ย่านความถี่เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์สมัยใหม่ ที่มุ่งเน้นเพื่อให้ได้สายอากาศสำหรับการสื่อสารอาร์เอฟไอดีโดยมีพื้นที่ใช้งานขนาดใหญ่ย่านความถี่ยูเอชเอฟ และ เอชเอฟ (ความถี่ 13.56 MHz) ประสิทธิภาพการทำงาน ผลกระทบจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของสายอากาศ จากการศึกษาพบว่า สายอากาศที่ออกแบบย่านความถี่ยูเอชเอฟ ให้มีช่วงความถี่ที่ทำงานได้ดีคือช่วงความถี่ 838 - 1026 MHz เป็นโครงสร้างที่เรียบง่ายสามารถรับการอ่านแท็กได้ไกล 3 m สำหรับสนามระยะไกล สำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์นั้นการทำสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ไปประยุกต์ใช้งานในการที่เป็นระบบอาร์เอฟไอดีทางด้านอุปกรณ์สมัยใหม่ เช่น บัตรประจำตัวพนักงาน บัตรโดยสาร บัตรสำหรับเข้าออกห้องพัก เป็นต้น

ซึ่งในปฏิญญานิพนธ์เป็นการนำเสนอการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางเพื่อพัฒนาปรับเปลี่ยนประยุกต์การใช้งานต่อไปได้



## บรรณานุกรม

- [1] C.A., Balanis, “Antenna theory analysis and design”, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] Ferran Paredes, Ignasi Cairó, Simone Zuffanelli, Gerard Zamora, Jordi Bonache and Ferran Martin , “Compact design of UHF RFID and NFC antennas for mobile phones” , *IET Microw. Antennas Propag.*, 2017, Vol. 11 Iss. 7, pp. 1016-1019
- [3] Prabakar Parthiban, “Low-Cost Scalable UHF RFID Reader Antenna with No Surface Dead Zones”, Department of Electrical and Electronic Engineering Auckland University of Technology Auckland, New Zealand ,2016 INC,11-13 Dec 2016.
- [4] Dipl.-Ing. Dr.Michael Gebhart, *MSc RFID Qualification Network, University of Applied Sciences*, Campus 2 WS 2013/14, September 30<sup>th</sup>
- [5] ผศ.ดร.เดชฤทธิ์ มณีธรรม. “คัมภีร์การใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์” . กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2560.
- [6] ECTI สมาคมวิชาการ “การออกแบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบ RFID”  
<http://www.ecti-thailand.org/emagazine/views/106>
- [7] ขวัญชนก วิริยกุลโอภาส. “รายงาน RFID(Radio Frequency Identification)”  
<http://www.student.chula.ac.th/~49801110/RFID>
- [8] Mr. Andea Electronics “เครื่องอ่าน RFID”  
<http://thai.iotrfidreader.com/sale-9364254- handy-rfid-reader-and-antenna-for-rfid-security-system-pcb-and-metal-plate-material.html>
- [9] ประเมศวร์ กุมารบุญ. “มารู้จัก RFID เทคโนโลยีนี้ จะพลิกโลก”  
<http://www.marinerthai.com/forum/index.php?topic=757.msg2069>

ภาคผนวก ก

คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก NFC Shield V2.0 Module ด้วยโปรแกรม Arduino



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <SPI.h>
#include "PN532_SPI.h"
#include "PN532.h"
#include "NfcAdapter.h"
int pinA = 9;

PN532_SPI interface(SPI, 10); // create a PN532 SPI interface with the SPI
CS terminal located at digital pin 10
NfcAdapter nfc = NfcAdapter(interface); // create an NFC adapter object
void setup(void) {
  Serial.begin(115200); // begin serial communication
  Serial.println("NDEF Reader");
  nfc.begin(); // begin NFC communication
  pinMode(pinA, OUTPUT);
  digitalWrite(pinA, LOW);
}
void loop(void) {
  Serial.println("\nScan an NFC tag\n");
  if (nfc.tagPresent()) // Do an NFC scan to see if an NFC tag is present
  {
    NfcTag tag = nfc.read();
    if (sizeof(tag.getUidString())==6) // every tag won't have a message
    {
      Serial.println(tag.getUidString());
      digitalWrite(pinA, HIGH);
      delay(500);
    }
    digitalWrite(9, LOW);
    delay(500);
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

คำสั่งควบคุมการอ่านแท็ก UART ยูเอชเอพ Passive 6C ด้วยโปรแกรม Arduino



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include "Arduino.h"
#include <SoftwareSerial.h>
int myArray[30];
unsigned int index;
long arraySum;

SoftwareSerial mySerial (10,11);
unsigned char incomingByte;

void sendIdentifyCmd ()
{
  byte message[] = {0xBB,0x00,0x22,0x00,0x00,0x22,0x7E};
  Serial.write(message, sizeof(message));
}

void setup ()
{
  Serial.begin (115200);
  mySerial.begin (115200);
  pinMode (13, OUTPUT);
  digitalWrite(13,LOW);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
}

void loop ()
{
  int sensorVal = digitalRead(2);
  byte message[] = {0xBB,0x00,0x22,0x00,0x00,0x22,0x7E};
  mySerial.write(message, sizeof(message));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < 30; i++)
{
    while (mySerial.available()<0); // wait for a character
    int incomingByte = mySerial.read ();
    myArray[i]=incomingByte;
    arraySum += myArray[i];
}
Serial.print("Size of tag code = ");Serial.println(arraySum);
    if(arraySum > 1500) // tag
    {
        boolean pinState_B = digitalRead(13);
        boolean pinOutState_B;
        pinOutState_B = !pinState_B;
        digitalWrite(13,pinOutState_B);
        delay(1000);
    }
    if(sensorVal == HIGH) // tag
    {
        boolean pinState_C = digitalRead(13);
        boolean pinOutState_C;
        pinOutState_C = !pinState_C;
        digitalWrite(13,pinOutState_C);
        delay(1000);
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้