

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอและออกแบบสายอากาศ  
แท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสำหรับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ

UNIFORM THEORY OF DIFFRACTION ANALYSIS AND UHF RFID TAG  
ANTENNA DESIGN FOR METALLIC CYLINDRICAL SURFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-098

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอและออกแบบสายอากาศ  
แท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟสำหรับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ

UNIFORM THEORY OF DIFFRACTION ANALYSIS AND UHF RFID TAG  
ANTENNA DESIGN FOR METALLIC CYLINDRICAL SURFACE



T144006

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร  
PITCHANUN WONGSIRITORN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144006  
วันเดือนปี 25 มี.ค. 2559

b. 00267024  
l. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2559  
KMITL-2016-EN-D-018-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNIFORM THEORY OF DIFFRACTION ANALYSIS AND UHF RFID TAG  
ANTENNA DESIGN FOR METALLIC CYLINDRICAL SURFACE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-D-018-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอและออกแบบสายอากาศ  
แท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟสำหรับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ

Thesis Title Uniform Theory of Diffraction Analysis and UHF RFID Tag Antenna Design  
for Metallic Cylindrical Surface

นักศึกษา นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

รหัสประจำตัว 54610142

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

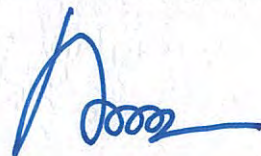
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-098

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์		
ศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกฉालิน		
ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว		
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์		
รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอและออกแบบสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟสำหรับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ
นักศึกษา	นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร
รหัสประจำตัว	54610142
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอและการออกแบบสายอากาศแท่งขนาดเล็กในระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุพื้นผิวเคลือบโค้งทรงกระบอกโลหะ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแท่งที่มีคุณลักษณะพื้นฐานเป็นแหล่งกำเนิดชนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลเมื่อประยุกต์ใช้กับวัสดุพื้นผิวเคลือบโค้งทรงกระบอกโลหะ การวิเคราะห์ที่ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอและเปรียบเทียบกับผลเฉลยสมการคลื่นจากผลการจำลองและผลการวิเคราะห์พบว่าสายอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะคล้ายกับแหล่งกำเนิดชนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลสามารถให้บริเวณการติดต่อสื่อสารที่กว้างกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณขอบเขตเงาเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแท่งโดยทั่วไปที่มีคุณลักษณะพื้นฐานเป็นแหล่งกำเนิดชนิดกระแสไฟฟ้า สายอากาศแท่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูมีขนาดทางไฟฟ้า  $0.1845 \lambda_0 \times 0.0769 \lambda_0$  และออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกับชิพ NXP G2XL สายอากาศสามารถทำงานได้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 908.7 ถึง 927.8 MHz มีอัตราขยาย -1.7 dBi สายอากาศมีระยะการอ่านได้ไกลที่สุด 3.7 เมตร เมื่อทำการทดสอบโดยเครื่องอ่านข้อมูล 4 W EIRP จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณ ผลการจำลองและผลการทดสอบ พบว่าการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอเป็นระเบียบวิธีการที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ และสายอากาศแท่งที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกที่เคลือบด้วยวัสดุ

Thesis Title	Uniform Theory of Diffraction Analysis and UHF RFID Tag Antenna Design for Metallic Cylindrical Surface
Student	Miss Pitchanun Wongsiritorn
Student ID.	54610142
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

#### ABSTRACT

This thesis presents the UTD analysis and small UHF-RFID tag antenna designed for locating on a metallic cylindrical surface. The uniform theory of diffraction (UTD) is the numerical electromagnetic tool for antenna analysis. The radiation patterns of the UHF tag based on E-source and M-source located on coated cylindrical surface are analyzed and compared to evaluate their radiation performance when they are attached in the actual application. It is obvious that the tag antenna design based on M-source can provide a wider communication range compared to conventional tag antenna especially in the shadow region. The propose U-slot tag antenna has the electrical size of  $0.1845 \lambda_0 \times 0.0769 \lambda_0$ . It is designed for NXP G2XL IC Chip. The proposed tag antenna can be operated covering from 908.7 to 927.8 MHz with the gain of -1.7 dBi and the maximum read-range of 3.7 meters, measured by 4 W EIRP reader. The calculated, simulated and measured results are compared and discussed. The slot tag antenna is designed and fabricated. It is obvious that the proposed method (UTD) is efficient for applying to use in the UHF RFID application for radiation problem. The proposed tag antenna is suitable for using on a coated cylindrical surface.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อย ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือ ดูแลในด้านการศึกษา งานวิจัย แนวคิดในการดำรงชีวิต ทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ พร้อมทั้งได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าได้เข้ามาเรียนระดับปริญญาตรีจนถึงระดับปริญญาเอก นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์อีกหลายท่าน คือ ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติพงษ์ เลิศวิริยะประภา รองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คำแนะนำพื้นฐานด้านวิชาการ และการดำรงชีวิตชี้แนะแนวทางในการทำการวิจัย พร้อมทั้งให้กำลังใจในการเรียนปริญญาเอก และอาจารย์อีกท่านหนึ่งคือ Prof. Prabhakar H. Pathak ข้าพเจ้าขอขอบคุณที่ท่านมอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสได้ไปทำงานวิจัย พร้อมทั้งการเรียนรู้ชีวิตนักวิจัยในต่างประเทศ ขอขอบคุณที่ท่านอดทนพร่ำสอนพร้อมทั้งแนะแนวการวิจัยให้แก่ข้าพเจ้า ณ มหาวิทยาลัยแห่งรัฐโอไฮโอ (The Ohio State University) ทำให้ข้าพเจ้าได้นำความรู้เหล่านั้นนำมา พัฒนา เพื่อทำงานวิจัยในระดับปริญญาเอกให้สำเร็จลุล่วง ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกโดยกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ภายใต้สัญญาเลขที่ PHD/0073/2553 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ธัชชัย พุ่มพวงที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัย และเป็นเพื่อนที่ดีของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และคุณมารินทร์ ปานจันทร์ ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนและส่งเสริมการศึกษาของข้าพเจ้า เป็นแรงผลักดันและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จลุล่วงด้วยดีหากปราศจากท่านเหล่านี้ ดังนั้นข้าพเจ้าขอขอบคุณค่าและประโยชน์อันพึงได้ที่มาจากวิทยานิพนธ์นี้ให้แก่ผู้มีพระคุณอันสูงยิ่งของข้าพเจ้าทุกท่าน

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 การวิเคราะห์การแผ่พลังงานบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโดยใช้ ผลเฉลยสมการคลื่น.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสเชิงเส้น.....	8
2.2.1 แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์.....	8
2.2.1.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้น.....	9
2.2.1.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น.....	15
2.3 อิมพีแดนซ์พื้นผิว.....	16
2.4 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นที่วางอยู่บน พื้นผิวไดอิเล็กตริกโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น.....	19
2.4.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิว ไดอิเล็กตริก.....	20
2.4.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิว ไดอิเล็กตริก.....	23
2.4.3 ผลการคำนวณและการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ แหล่งกำเนิดบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกตัวนำ.....	26
2.5 บทสรุป.....	27
บทที่ 3 การวิเคราะห์การแผ่พลังงานบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะ โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ.....	28
3.1 บทนำ.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ.....	28
3.3 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริกของวัสดุทรงกระบอกโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ.....	33
3.3.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะวิเคราะห์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ.....	37
3.3.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะวิเคราะห์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ.....	39
3.4 ผลการคำนวณและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ.....	39
3.5 บทสรุป.....	41
บทที่ 4 การออกแบบสายอากาศ.....	43
4.1 บทนำ.....	43
4.2 สายอากาศแท่งในระบบบอร์เอพไอดีอันความถี่เอชเอฟ.....	43
4.2.1 การออกแบบสายอากาศแท่งในระบบบอร์เอพไอดี.....	46
4.2.1.1 ช่วงความถี่ที่ใช้งาน.....	46
4.2.1.2 ขนาดและรูปแบบ.....	47
4.2.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	48
4.2.1.4 ราคาและวัสดุ.....	49
4.2.1.5 ความอ่อนไหวในการใช้งานร่วมกับวัสดุ.....	49
4.3 การแมตซ์ซิงค์.....	50
4.4 การออกแบบและจำลองสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	53
4.4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	54
4.4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	62
4.4.3 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	63
4.4.4 ค่าอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู.....	64
4.5 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูร่วมกับพื้นผิวดำและวัสดุทรงกระบอก.....	65
4.6 ผลการจำลองสายอากาศโค้งช่องเปิดรูปตัวยูร่วมกับวัสดุทรงกระบอก.....	66

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 บทสรุป.....	67
บทที่ 5 การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	69
5.1 บทนำ.....	69
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	69
5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ.....	70
5.3.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ.....	71
5.3.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ.....	75
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	77
5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	79
5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ..	81
5.4 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูกับสายอากาศชนิดอื่นๆ.....	82
5.5 บทสรุป.....	83
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
6.1 บทนำ.....	85
6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	85
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก การคำนวณขอบเขตบริเวณที่เกิดการแมตซ์สังยุค.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	97

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยสมการคลื่นกับการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) กรณีของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล.....	27
4.1	ช่วงความถี่และการประยุกต์ใช้งานอาร์เอฟไอดี .....	46
4.2	ความอ่อนไหวต่อวัสดุในแต่ละย่านความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดี.....	49
4.3	พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู.....	62
4.4	ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดคือสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูวางบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอก.....	66
5.1	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท่งสำหรับการใช้งานบนวัสดุรูปแบบต่างๆ.....	82



# สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	1
1.2	การประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	2
1.3	รูปแบบและโครงสร้างของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟเชิงพาณิชย์ [5].....	3
1.4	สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า.....	3
1.5	แรงจูงใจและปัญหาที่สนใจในการทำวิจัย.....	4
1.6	ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้สายอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า.....	5
2.1	โครงสร้างและระบบพิกัดของแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์.....	8
2.2	แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางตัวอยู่บนทรงกระบอก (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านบน.....	16
2.3	แผ่นวัสดุครึ่งระนาบอนันต์.....	17
2.4	แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นที่วางตัวบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะ.....	19
2.5	การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy กรณีที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนทรงกระบอกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก $\alpha=2\lambda, \epsilon_r=2.1, \mu_r=1$ .....	26
3.1	รูปแบบทางเรขาคณิต [20] (ก) ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (GO) (ข) ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (GTD).....	29
3.2	การคำนวณโดยใช้ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต.....	29
3.3	การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเปรียบเทียบกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ (ก) ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในกรณีที่แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) TE ( $E_z^i$ ) ตกกระทบที่มุม $\phi' = 90^\circ$ บนวัสดุครึ่งระนาบ (ข) ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอในกรณีที่แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) TE ( $E_z^i$ ) ตกกระทบที่มุม $\phi' = 90^\circ$ บนวัสดุครึ่งระนาบ.....	30
3.4	การแบ่งขอบเขตบริเวณของสนาม.....	31
3.5	รูปแบบทางเรขาคณิตของการทำงานของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ (ก) กรณีการกระจัดกระจาย (ข) กรณีการแพร่กระจายคลื่น (ค) กรณีการเชื่อมต่อ.....	32

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	รูปทรงเรขาคณิตมุมมองกว้าง (Perspective view) ของสายอากาศแท่งบนทรงกระบอก (ก) ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและจุดเลี้ยวเบน (ข) เวกเตอร์หนึ่งหน่วย.....	34
3.7	เส้นทางของรังสีของปัญหาที่สนใจ (ก) ภาพด้านบนในบริเวณขอบเขตแสง (Lit region) ในระนาบ xy (ข) ภาพด้านบนในบริเวณขอบเขตเงา (Shadow region) ในระนาบ xy (ค) เส้นรังสีสามมิติ (3D ray path).....	37
3.8	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสบนพื้นผิวอิมพีแดนซ์เมื่อทรงกระบอกมีขนาด $d = 1.7838 \lambda$ เคลือบด้วยเทพลอนที่มีความหนา $0.002 \lambda$ (ก) $\theta = 90$ องศา (ข) $\theta = 70$ องศา.....	41
3.9	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมด้านหน้าทรงกระบอกของแหล่งกำเนิดกระแสบนพื้นผิวอิมพีแดนซ์เมื่อทรงกระบอกมีขนาด $d = 1.7838 \lambda$ เคลือบด้วยเทพลอนที่มีความหนา $0.002 \lambda$ .....	41
4.1	สายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ [25]-[28].....	44
4.2	สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟที่ออกแบบสำหรับมาตรฐานภายในประเทศ.....	45
4.3	ย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตสำหรับการใช้งานอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟในแต่ละประเทศ [35].....	47
4.4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามมิติ ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	48
4.5	วงจรเสมือนของแท่งในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ.....	50
4.6	กำลังงานที่ส่งมายังแท่งและวงจรสมมูล (ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท่ง (ข) วงจรสมมูล.....	51
4.7	ค่าอิมพีแดนซ์ของชิพในช่วงความถี่ที่ใช้งาน.....	52
4.8	โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้น.....	54
4.9	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศเริ่มต้นเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ (ก) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.50 \lambda - 2.30 \lambda$ ) (ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ จาก ( $1.39 \lambda - 1.41 \lambda$ ).....	54
4.10	รูปความสัมพันธ์ระหว่างระยะการอ่านได้ไกลที่สุด (ในหน่วยฟุต ; ft) และค่ากำลังงานเริ่มต้นของชิพ (ในหน่วย dBm) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงานต่างกัน ( $\tau$ ) (โดยกำหนดให้การทดสอบอยู่ในสภาวะช่องว่างอิสระ: (Free space) ค่ากำลังงานที่ส่งออกจากเครื่องส่งและสายอากาศมีค่าเท่ากับ 4 W EIRP สายอากาศแท่งมีอัตราขยาย 2-dBi โดยโพลาริซของสายอากาศแท่งและเครื่องอ่านข้อมูลแมตซ์กัน[37].....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.50\lambda - 2.30\lambda$ ) (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อ $w_0 = 1.41\lambda$ .....	57
4.12	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ของสายอากาศเริ่มต้นที่มีแท่งลวดวงจร (ก) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.1\lambda - 0.5\lambda$ ) (ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.1\lambda - 0.09\lambda$ ).....	58
4.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นที่มีแท่งลวดวงจรเมื่อพารามิเตอร์ $w_0 = 0.095\lambda$ .....	58
4.14	ค่าอิมพีแดนซ์และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.02\lambda - 0.05\lambda$ ) และ $l_0$ ( $0.02\lambda - 0.2\lambda$ ) (ก) ความต้านทาน (ข) รีแอกแตนซ์ (ค) อัตราขยาย.....	60
4.15	ค่าอิมพีแดนซ์และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $w_0$ ( $0.039\lambda - 0.045\lambda$ ) และ $l_0$ ( $0.155\lambda - 0.175\lambda$ ) (ก) ความต้านทาน (ข) รีแอกแตนซ์ (ค) อัตราขยาย.....	61
4.16	โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู.....	62
4.17	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูที่ความถี่ 922.5 MHz.....	63
4.18	ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	63
4.19	ผลการจำลองสายอากาศในรูปแบบแผนภูมิสมิท (Smith chart).....	64
4.20	ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู.....	64
4.21	ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสวางอยู่บนทรงกระบอกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริกตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยเทฟลอน ( $\epsilon_r = 2.1, \mu_r = 1$ ) (ก) สายอากาศถูกติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร $\times$ 58 เซนติเมตร (ข) สายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อสายอากาศถูกติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน.....	65
4.22	ผลการจำลองแท่งโค้งช่องเปิดรูปตัวยูติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (ค) อัตราขยายของสายอากาศ.....	67
5.1	สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่เอชเอฟ.....	69

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.2	อุปกรณ์ที่จำเป็นที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ (ก) เครื่องวิเคราะห์โครมข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C (ข) เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟยี่ห้อ Symbol รุ่น XR480 (ค) สายอากาศโพลาริซเชิงเส้นมาตรฐานยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411.....	71
5.3	โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล [44].....	71
5.4	แผนผังติดตั้งการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู.....	72
5.5	ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร (ก) ความต้านทาน (ข) รีแอกแตนซ์.....	73
5.6	ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน (ก) ความต้านทาน (ข) รีแอกแตนซ์.....	74
5.7	ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูในรูปแบบแผนภูมิสมิท (Smith chart).....	75
5.8	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (PRC) ของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู (ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร (ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน.....	76
5.9	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขั้วพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz.....	77
5.10	ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราขยายของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยูที่ความถี่ 922.5 MHz (ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร (ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน.....	78
5.11	แผนผังการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู.....	79
5.12	ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู (ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร (ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ $0.89\lambda$ เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน.....	80
5.13	แผนผังการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู.....	81
5.14	ผลการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู.....	82

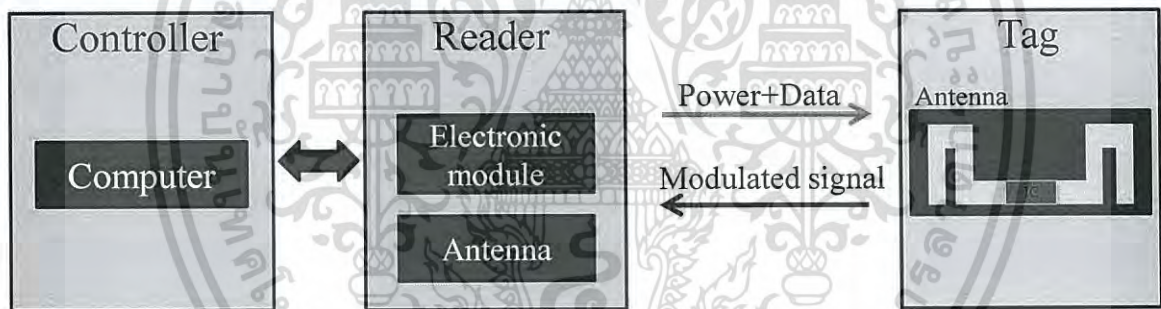
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากในปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุหรือระบบอาร์เอฟไอดี (RFID: Radio Frequency Identification) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการกล่าวถึงเป็นอย่างมาก ด้วยความสามารถในการติดต่อสื่อสารโดยไม่ต้องใช้การสัมผัส ความสะดวกในการอ่านและเขียนข้อมูลที่มีความรวดเร็ว ทนต่อสภาวะความเสียหายอันเนื่องมาจากการขนส่ง สิ่งสกปรกและความสามารถสื่อสารได้ในระยะไกลในทุกทิศทาง [1]-[2] ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทเช่นการขนส่งสินค้า การจัดเก็บสินค้า หรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรมการค้าปลีก ได้นำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง

โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีประกอบด้วย เครื่องอ่านข้อมูล (Reader) แท็ก (Tag) และอุปกรณ์ควบคุม (Controller) โดยเครื่องอ่านข้อมูลจะเชื่อมต่อกับส่วนควบคุมซึ่งส่วนมากจะเป็นคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการอ่านและเก็บข้อมูลที่รับมาจากแท็ก โดยแท็กประกอบไปด้วยสายอากาศแท็กและชิพวงจรรวม [3]



รูปที่ 1.1 ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ

มาตรฐานการแบ่งย่านความถี่การใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี สามารถแบ่งออกเป็น 4 ย่านความถี่ [4] ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low frequency) 125-134 kHz ย่านความถี่สูง (HF: High Frequency) 13.56 MHz ย่านความถี่สูงยิ่งหรือย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF: Ultra high frequency) 860-960 MHz และย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) 2.4 GHz และ 5.8 GHz โดยในช่วงย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงใช้รูปแบบการติดต่อสื่อสารบนพื้นฐานของการเชื่อมต่อ (Coupling) ของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) ระหว่างขดลวดของสายอากาศแท็กและสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ส่วนย่านความถี่ยูเอชเอฟ และย่านความถี่ไมโครเวฟ รูปแบบการติดต่อสื่อสารของระบบจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายอากาศโดยการติดต่อสื่อสารในรูปแบบนี้จะเรียกว่าการติดต่อสื่อสารระยะไกล ซึ่งจะสามารถให้ระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF RFID)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟซึ่งในปัจจุบันได้มีรูปแบบการนำไปใช้งานที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้กับการจัดระบบสินค้าภายในโกดัง การติดตามระบุตัวตนของสินค้าปลีก และการนำไปใช้ในห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain) หรือระบบเครือข่ายขนส่งสินค้า (Logistics) [5] ดังที่ทราบกันว่าระบบห่วงโซ่อุปทานเป็นการรวมเอาหัวใจสำคัญของกระบวนการทางธุรกิจ ซึ่งเริ่มตั้งแต่การแยกวัตถุดิบไปจนกระทั่งถึงเสร็จสิ้นกระบวนการหรือการส่งถึงผู้บริโภค ตลอดจนกระบวนการที่อยู่ระหว่างกลางทางอันได้แก่ การขนส่ง การเก็บสินค้า และการขายสินค้าให้กับลูกค้า ทำให้ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟเป็นระบบที่มีความต้องการเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการรับและส่งข้อมูล ในรูปแบบของใช้การติดต่อสื่อสารในสนามระยะไกล (Far-field communication) ซึ่งอยู่บนพื้นฐาน การกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) [6]

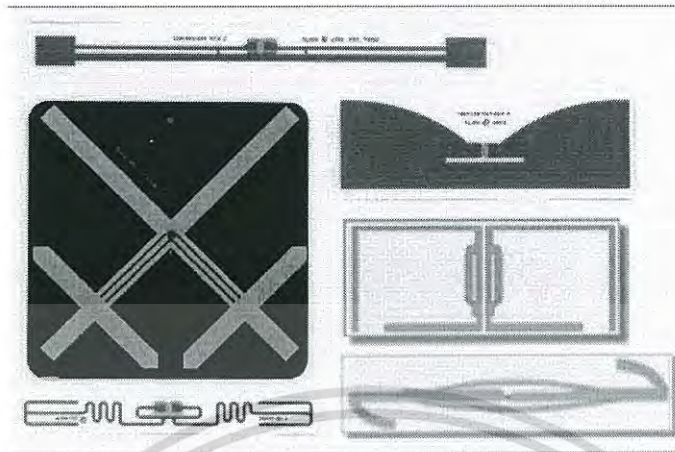
กุญแจสำคัญอย่างหนึ่งของสมรรถนะโดยรวมของระบบอาร์เอฟไอดีได้แก่ความไวของชิพ (Sensitivity) และสายอากาศแท็ก ตัวอย่างเช่น ขนาดโดยรวม ระยะการอ่านได้ไกลที่สุด และความสามารถในการระบุตัวตนของวัตถุ สายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟเกือบทั้งหมดมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni-directional) สายอากาศมีโครงสร้างพื้นฐานมาจากสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ (Printed dipole) โดยส่วนสำคัญในการออกแบบสายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟคือ การออกแบบให้สายอากาศแท็กมีอิมพีแดนซ์เป็นค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งต้องออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ (Impedance) แมตช์สังยุค (Conjugate match) กับชิพที่นำมาใช้งาน โดยเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการมีหลากหลายรูปแบบ [7] เช่นการหักงอ (Bent) การขดวอกวน (Meander-line) การใช้โครงสร้างรูปตัวเอฟหัวกลับ (Inverted F) การใช้แท่งลัดวงจร (Shorted-pin)



รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ

การใช้งานของแท็กโดยทั่วไปสายอากาศแท็กจะนำไปติดบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 1.2 พื้นผิวของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อออกแบบสายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศแท็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม [8] หรือสภาพพื้นผิวได้แก่ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ อัตราขยาย (Gain) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (Power reflection coefficient : PRC) และระยะการอ่านได้ไกลที่สุด [9]-[10] ดังนั้นการออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปใช้ในกรณีเฉพาะเจาะจงเช่นบนพื้นผิวแก้ว พื้นผิวความชื้นมาก พื้นผิวโลหะ การออกแบบสายอากาศแท็กจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบให้สามารถใช้กับพื้นผิวดังกล่าวได้ เช่นการใช้ระนาบกราวด์ หรือการออกแบบร่วมกับวัสดุที่จะนำไปใช้ด้วย



รูปที่ 1.3 รูปแบบและโครงสร้างของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟเชิงพาณิชย์ [5]

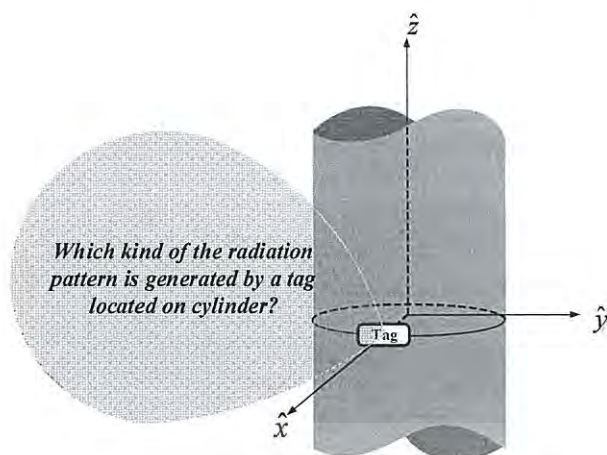
จากความต้องการในการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีที่มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่นการนำไปติดกับกล่องสินค้า ตู้คอนเทนเนอร์ ลังไม้และถังแก๊ส เป็นต้น ซึ่งส่วนมากสายอากาศแท่งจะสร้างโดยใช้หลักการพื้นฐานของสายอากาศไดโพล สายอากาศขดลวดวน [5] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า [11] ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

กำลังงานทางด้านหลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อนำแท่งดังกล่าวไปติดบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ ตัวอย่างเช่น ถังแก๊ส ถังน้ำมันรถยนต์ และอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานกับวัสดุดังกล่าวอาจก่อให้เกิดผลกระทบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแท่งที่นำไปติดด้วย [12]

การทำนายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสบนพื้นผิวโค้งที่ประกอบไปด้วยพื้นผิววัสดุจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแท่ง ในขณะที่ปัญหาการจำลองเมื่อสายอากาศติดอยู่บนวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมักจะใช้เวลาในการจำลองที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้การทำนายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น (Wave equation) [13]-[14] และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ (Uniform theory of diffraction : UTD) [15]-[20]



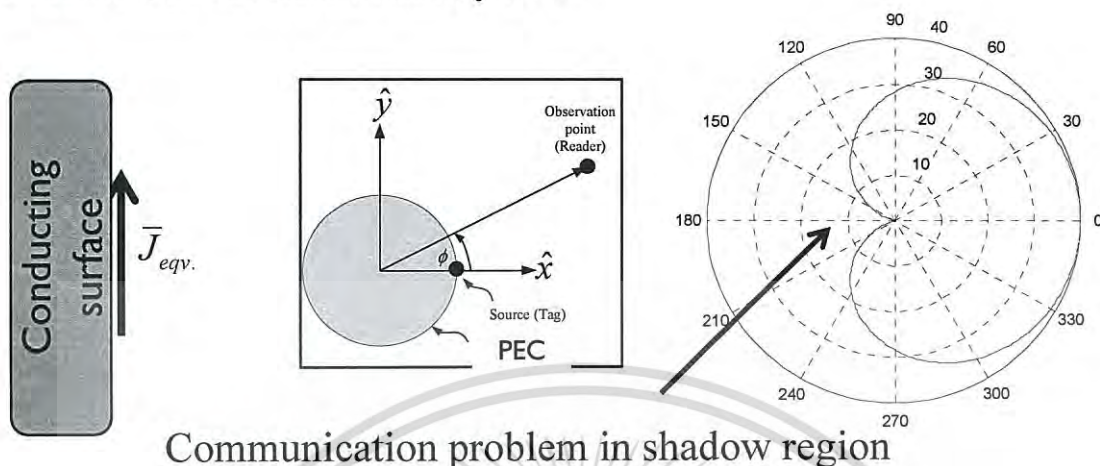
รูปที่ 1.5 แรงจูงใจและปัญหาที่สนใจในการทำวิจัย

ระเบียบวิธีการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นเป็นการหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อหา ผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) สำหรับในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า และกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นวางอยู่บนพื้นผิวโลหะเคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริก (Dielectric) การหาผลเฉลยในวิทยานิพนธ์นี้จะหาผลเฉลยผ่านสมการของฟังก์ชันคลื่น (Wave equation) การคำนวณโดยใช้ไอเคนของฟังก์ชันคลื่นสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST microwave studio: CST) [21] อย่างไรก็ตามการคำนวณดังกล่าวยังต้องคำนึงถึงการลู่เข้าของผลเฉลยซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณยังค่อนข้างนาน และเนื่องจากเป็นการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงจึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน ในกรณีที่ปัญหาที่พิจารณามีความซับซ้อน ดังนั้นเพื่อปรับปรุงระเบียบวิธีที่ใช้วิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จึงได้ใช้วิธีการคำนวณโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ

ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ เป็นระเบียบวิธีการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านความถี่สูง (High frequency technique) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์การกระจัดกระจาย (Scattering problem) เพื่อใช้ในการทำนายการกระจัดกระจายจากพื้นผิววัสดุ เมื่อแหล่งกำเนิดไม่ได้อยู่บนพื้นผิวของวัสดุหรือปัญหาการแพร่กระจายคลื่นซึ่งใช้ในการทำนายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดเมื่อแหล่งกำเนิดวางอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอเหมาะสำหรับการพิจารณาปัญหาที่ใช้งานในย่านความถี่สูง หรือเมื่อพิจารณาให้แหล่งกำเนิดมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุที่นำมาใช้ในการพิจารณา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ (UTD) มาประยุกต์ในการศึกษาและวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟบนวัสดุผิวโค้งทรงกระบอกเคลือบด้วยไดอิเล็กตริก จากผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น และผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จากผลการเปรียบเทียบพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้อง โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอใช้เวลาในการคำนวณสั้นที่สุด โดยปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์คือการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งในกรณีที่กำหนดให้สายอากาศแท่งเป็นแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล โดยพบว่าเมื่อนำแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามาติดตั้งบนวัสดุทรงบอกโลหะที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลัง จะเกิดการลดทอนเป็นอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 1.6



Communication problem in shadow region

รูปที่ 1.6 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้สายอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นการทำนายสนามแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้งที่ประกอบไปด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กทริกเช่น ถังน้ำมันหรือถังแก๊ส [22] นั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแท่ง งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้วิธีผลเฉลยสมการคลื่น ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ จากนั้นคำนวณการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยอิมพีแดนซ์ไดอิเล็กทริกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท่งที่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป โดยแท่งที่นำเสนอคือสายอากาศแท่งช่องเปิดขนาดเล็กสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี สายอากาศออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบบอาร์เอฟไอดีภายในประเทศ ซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ วิธีการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสองวิธีการได้แก่

การวิเคราะห์โดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น และการใช้ระเบียบวิธีการวิเคราะห์โดยใช้การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ เพื่อนำไปใช้กับสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเช่นถังแก๊ส หรือถังน้ำมัน

ขอบเขตของงานวิจัยเริ่มต้นจากการเกริ่นนำถึงที่มาของงานวิจัย ความสำคัญ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เพื่อให้เข้าใจถึงความเป็นมาและความจำเป็นสำหรับการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเบื้องต้นเป็นการเกริ่นนำถึงความสำคัญของระบบอาร์เอฟไอดี โครงสร้างพื้นฐานของระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งย่านความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี ความจำเป็นและความสำคัญในการเลือกใช้ย่านความถี่ยูเอชเอฟในงานวิจัย รูปแบบการนำเอาระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟไปประยุกต์ใช้งาน ความสำคัญของปัญหาเมื่อมีการนำแท็กไปติดบนวัสดุโลหะทรงกระบอกผิวเคลือบ ในบทที่ 2 ระเบียบวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นยาวอนันต์ โดยการคำนวณในบทที่ 2 นี้จะเป็นการคำนวณในรูปแบบของมุมมองสองมิติ จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองและยังใช้เวลาในการคำนวณที่สั้นกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นยังต้องคำนึงถึงการลู่เข้าของผลเฉลยซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณยังค่อนข้างนาน ดังนั้นในบทที่ 3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กเมื่อกำหนดให้สายอากาศแท็กเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดจะใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอในการวิเคราะห์ โดยผลที่ได้จากการคำนวณโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอจะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น และผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) โดยจะพบว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ สามารถใช้ในการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อมีแหล่งกำเนิดวางอยู่บนพื้นผิวโลหะทรงกระบอกหุ้มด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ โดยจะใช้เวลาในการคำนวณที่สั้นที่สุด หลังจากนั้นในบทที่ 4 นำเสนอสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศ ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz ออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกับชิพรุ่น NXP G2XL [23] พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและเป็นไปตามความต้องการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ โดยในบทที่ 5 แสดงผลการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้นำเสนอเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในการออกแบบสายอากาศแท็กในบทที่ 4 โดยคุณสมบัติของคุณสมบัติเบื้องต้นที่นำมาพิจารณาได้แก่ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (PRC) [24] อัตราขยายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และระยะการอ่านได้ไกลที่สุด ส่วนเนื้อหาในบทที่ 6 จะกล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อดีข้อเสีย แนวทางแก้ไข และแนวทางการนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปพัฒนาต่อยอดต่อไป

### 1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์การศึกษา ขอบเขตการวิจัยและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 การวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าในทิศ  $z$  บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสเชิงเส้นยาวอนันต์ โดยแบ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น อิมพีแดนซ์พื้นผิว ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (CST)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะสำหรับระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่ยูเอชเอฟโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ โดยพิจารณาจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดจุด ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอเบื้องต้น ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (CST)

บทที่ 4 สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่ยูเอชเอฟสำหรับวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอก โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ ทฤษฎีที่มีความจำเป็นสำหรับการนำไปประยุกต์ในการออกแบบสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่ยูเอชเอฟ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ ผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู เช่นผลการจำลองอิมพีแดนซ์สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน อัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และผลการจำลองเมื่อนำสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูไปติดตั้งใช้งานกับวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอก

บทที่ 5 การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่ยูเอชเอฟ จากการวิเคราะห์และการออกแบบพร้อมทั้งทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศที่ได้นำเสนอแล้ว เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการอธิบายขั้นตอนในการทดสอบคุณสมบัติพร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ โดยผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศประกอบด้วย อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และระยะการอ่านไกลที่สุด

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ข้อเสนอแนะ ข้อดี และ ข้อเสียของสายอากาศและระเบียบวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ พร้อมทั้งอธิบายถึงการนำงานวิจัยนี้เป็นพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# การวิเคราะห์การแผ่พลังงานบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์ โค้งทรงกระบอกโลหะโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น

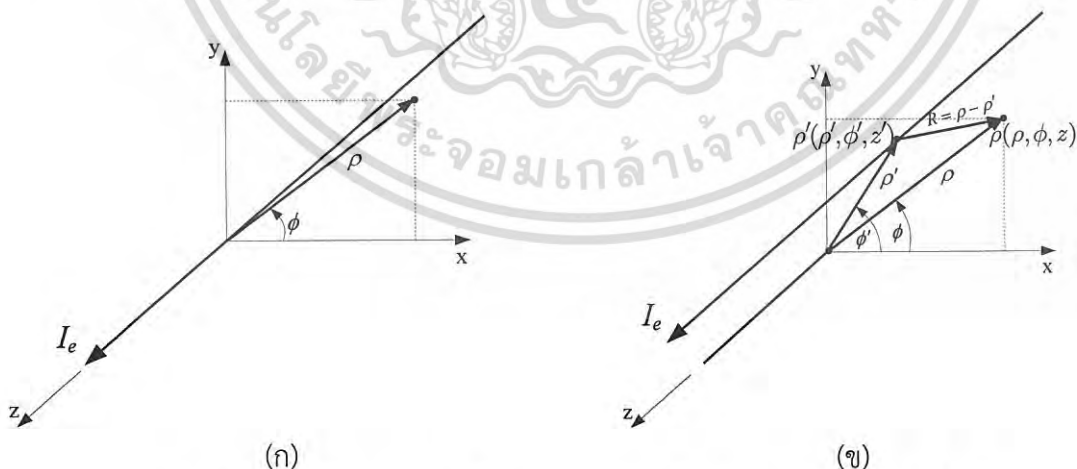
### 2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและการคำนวณพร้อมทั้งการวิเคราะห์การแผ่พลังงานหรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดโดยใช้ผลเฉลยของสมการคลื่น การคำนวณการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น (Line Source) ที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท่งที่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป จากโจทย์วิจัยของสายอากาศแท่งที่ติดกับถังโลหะหรือถังน้ำมันขนาดใหญ่ ถังน้ำมันหรือถังโลหะจะพิจารณาให้เป็นวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยในขั้นตอนแรกนี้จะพิจารณาในรูปแบบสองมิติ การวิเคราะห์แท่งสามารถกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางบนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

### 2.2 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้น

ในส่วนนี้อธิบายถึงทฤษฎีที่ใช้แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นสำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้น การแบ่งประเภทของแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นจะสามารถแบ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น การคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายคลื่นจากทั้งแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูล

#### 2.2.1 แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและระบบพิกัดของแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์

แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นได้นำมาใช้ในการพิจารณาเนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดกระแสประเภทหนึ่งที่สามารถใช้เป็นตัวอย่างและอธิบายคุณสมบัติของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่กระจายคลื่น โดยแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์นี้จะสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้น และแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น [13]

### 2.2.1.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้น

โครงสร้างของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นแสดงดังรูป 2.1 (ก)-(ข) เมื่อกำหนดให้ความยาวของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามีความยาวเป็นอนันต์ กระแสไฟฟ้าจะแสดงได้ดังสมการ

$$\bar{I}_e(z') = \hat{a}_z I_e \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I_e$  เป็นค่าคงที่ เนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าจะไหลไปตามแนวแกน  $z$  สนามจะแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดเป็นโหมด  $TM^z$  ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก

$$\begin{aligned} \bar{F} &= 0 \\ \bar{A} &= \hat{a}_z A_z(\rho, \phi, z) \\ &= \hat{a}_z [C_1 H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho)] \\ &\quad \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] (A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

เนื่องมาจากแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นนั้นมีความยาวเป็นอนันต์ สนามจะเป็นสองมิติ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศ  $z$  ดังนั้น

$$\beta_z = 0 \Rightarrow \beta_\rho^2 + \beta_z^2 = \beta^2 \Rightarrow \beta_\rho = \beta \quad (2.3)$$

นอกจากนี้ เนื่องมาจากคลื่นจะมีการแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดเท่านั้น จึงทำให้

$$C_1 = 0 \quad (2.4ก)$$

$$m = 0 \quad (2.4ข)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.2) สามารถลดรูปเป็น

$$\bar{A} = \hat{a}_z A_z(\rho) = \hat{a}_z A_0 H_0^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$E_\rho = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho\partial z} = 0 \quad (2.6ก)$$

$$E_\phi = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial\phi\partial z} = 0 \quad (2.6ข)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) A_z = -j\omega A_0 H_0^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.6ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_\rho = \frac{1}{\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} = 0 \quad (2.6\text{ง})$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} = -\frac{A_0}{\mu} H_0^{(2)'}(\beta\rho) = A_0 \frac{\beta}{\mu} H_1^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.6\text{จ})$$

$$H_z = 0 \quad (2.6\text{ฉ})$$

เมื่อ  $' \equiv \partial / \partial \rho$

ค่าคงที่  $A_0$  สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$I_e = \lim_{\rho \rightarrow 0} \int_C \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} (\hat{a}_\phi H_\phi) \cdot (\hat{a}_\phi \rho d\phi) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} H_\phi \rho d\phi \quad (2.7)$$

เนื่องจากการอินทิเกรตของสมการที่ (2.7) จะสามารถแสดงในรูปของลิมิตเมื่อ  $\rho \rightarrow 0$  จากสมการที่ (2.6จ) ฟังก์ชันแฮงเกิล (Hankel function) จะสามารถแสดงในรูปของการกระจายเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic expansion) ของเงื่อนไขที่  $\beta\rho$  มีขนาดเล็กมาก

$$H_1^{(2)}(\beta\rho) = J_1(\beta\rho) - jY_1(\beta\rho) \stackrel{\beta\rho \ll 1}{\simeq} \frac{\beta\rho}{2} + j \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{\beta\rho} \right) \stackrel{\beta\rho \ll 1}{\simeq} j \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{\beta\rho} \right) \quad (2.8)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.7) จะสามารถลดรูปได้ จากการใช้สมการที่ (2.6จ) และ (2.8)

$$I_e = \lim_{\rho \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} \left[ A_0 \frac{\beta}{\mu} H_1^{(2)}(\beta\rho) \right] \rho d\phi \simeq j A_0 \frac{2}{\pi \mu} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\rho} \rho d\phi = j A_0 \frac{4}{\mu} \quad (2.9\text{ก})$$

หรือ

$$A_0 = -j \frac{\mu}{4} I_e \quad (2.9\text{ข})$$

ดังนั้นจากสมการที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นจะสามารถเขียนได้ในรูป

$$E_z = -I_e \frac{\omega\mu}{4} H_0^{(2)}(\beta\rho) = -I_e \frac{\beta^2}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.10\text{ก})$$

$$H_\phi = -j I_e \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.10\text{ข})$$

ในแต่ละองค์ประกอบของสนามจะเป็นสัดส่วนกับฟังก์ชันแฮงเกิลอันดับที่สอง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดกระแสไปยังจุดสังเกต เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสน้ำยจากจุดกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Origin) ไปยังตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1(ข) จากสมการที่ (2.10ก) และ (2.10ข) จะสามารถเขียนได้ในรูป

$$E_z = -I_e \frac{\omega\mu}{4} H_0^{(2)}(\beta R) = -I_e \frac{\beta^2}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \quad (2.11ก)$$

$$H_\phi = -jI_e \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta R) = -jI_e \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \quad (2.11ข)$$

เมื่อ

$$R = |\bar{\rho} - \bar{\rho}'| = \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')} \quad (2.11ค)$$

$\phi$  = มุมในแนวเส้นรอบวงโดยรอบแหล่งกำเนิด (Circumferential angle around source)

ณ จุดสังเกตระยะไกลจนกระทั่งเมื่อ  $\beta\rho \rightarrow$  มีขนาดใหญ่ฟังก์ชันแฮงเกิล ในสมการที่ (2.10ก) และ (2.10ข) สามารถที่จะประมาณค่าได้จากการกระจายเชิงเส้นกำกับ สำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

$$H_0^{(2)}(\beta\rho) \stackrel{\beta\rho \gg 1}{\approx} \sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho}} e^{-j\beta\rho} \quad (2.12ก)$$

$$H_1^{(2)}(\beta\rho) \stackrel{\beta\rho \gg 1}{\approx} j\sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho}} e^{-j\beta\rho} \quad (2.12ข)$$

ดังนั้น (2.10ก) และ (2.10ข) สามารถที่จะทำให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายสำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

$$E_z = -I_e \frac{\beta^2}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta\rho) \stackrel{\beta\rho \gg 1}{\approx} -\eta I_e \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (2.13ก)$$

$$H_\phi = -jI_e \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta\rho) \stackrel{\beta\rho \gg 1}{\approx} I_e \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (2.13ข)$$

โดยอัตราส่วนของสมการที่ (2.13ก) ต่อ (2.13ข) จะสามารถอธิบายในรูปแบบของอิมพีแดนซ์คลื่น (Wave impedance) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Z_w^{+\rho} = \frac{E_z}{-H_\phi} = \eta \quad (2.14)$$

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของคลื่นมีค่าเท่ากับ อิมพีแดนซ์อินทรินซิก (Intrinsic impedance) โดยคลื่นที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นเป็น TEM<sup>z</sup> จากสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.11ก) เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสดำเนินจากจุดกำเนิดไปยังตำแหน่ง  $\rho'$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 ข สนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสดำเนินคือ

$$E_z(\rho, \phi) = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|$  คือระยะทางจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดสังเกต จากรูปที่ 2.1 และกฎของโคไซน์ (Cosines) สมการที่ (2.15) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปดังนี้

$$\begin{aligned} E_z(\rho, \phi) &= -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \\ &= -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')}\right] \end{aligned} \quad (2.16ก)$$

สมการที่ (2.16) อธิบายสนามไฟฟ้าในเทอมของฟังก์ชันแองเกิล ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่  $|\bar{\rho} - \bar{\rho}'| = 0$  สำหรับปัญหาการกระจายจะสะดวกกว่าที่จะอธิบายสนามในเทอมของ ฟังก์ชันคลื่นในพิกัดทรงกระบอก ตัวอย่างเช่นฟังก์ชันแองเกิล หรือฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) ซึ่งระยะในแนวรัศมีที่จุดกำเนิด  $\rho = 0$  และเนื่องมาจากทฤษฎีสภาวะย้อนกลับ (Reciprocity) สนามจะต้องสมมาตรในเทอมของระยะพิกัดของแหล่งกำเนิดกระแสและจุดสังเกต ดังนั้นฟังก์ชันของคลื่น (ซึ่งระยะในแนวรัศมีเริ่มต้นมาจากจุดกำเนิดของระบบพิกัด) เพื่อใช้ในการอธิบายฟังก์ชันแองเกิล ของสมการที่ (2.16ก) จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} &\rho \leq \rho' \\ &f(\beta\rho') J_n(\beta\rho) e^{jn(\phi - \phi')} \end{aligned} \quad (2.16 ข)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็ม และจะมีค่าจำกัดที่  $\rho = 0$  จะเข้าไปเข้ามาด้วยคาบเวลาทุกๆ  $2\pi$

$$\begin{aligned} &\rho \geq \rho' \\ &g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho) e^{jn(\phi - \phi')} \end{aligned} \quad (2.16 ค)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็ม และเนื่องจากฟังก์ชันแองเกิลอันดับที่สอง จะแสดงถึงคลื่นที่มีการเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดและจะเข้าไปเข้ามาด้วยคาบเวลาทุกๆ  $2\pi$  ดังนั้น สมการที่ (2.16) จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) = \begin{cases} \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n f(\beta\rho') J_n(\beta\rho) e^{jn(\phi - \phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{-\infty}^{+\infty} d_n g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho) e^{jn(\phi - \phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.17ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ ตำแหน่งที่  $\rho = \rho'$  สนามของทั้งสองบริเวณจะต้องมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.17ก) และ (2.17ข) จะได้ว่า

$$c_n f(\beta\rho') J_n(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} = d_n g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad (2.18)$$

ซึ่งจะสามารถกำหนดให้เป็นดังนี้

$$c_n = d_n = b_n \quad (2.19ก)$$

$$f(\beta\rho') = H_n^2(\beta\rho') \quad (2.19ข)$$

$$g(\beta\rho') = J_n(\beta\rho') \quad (2.19ค)$$

จากการใช้สมการ (2.19ก)-(2.19ค) จะสามารถเขียนสมการที่ (2.17ก) และ (2.17ข) ได้ว่า

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) = \begin{cases} \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.20ก)$$

$$(2.20ข)$$

โดย  $b_n$  นั้นจะสามารถหาได้จากการใช้สมการที่ (2.16) กล่าวคือ

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) = H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')}\right] \quad (2.21)$$

เมื่อย้ายแหล่งกำเนิดไปยังระยะอนันต์ ( $\rho' \rightarrow \infty$ ) โดย  $\phi' = 0$  ระยะ R ในสมการที่ (2.21) ที่แสดงในรูปของรากที่สองสามารถที่จะประมาณค่าได้โดยการใช้ทฤษฎีบททวินาม (Binomial Theorem)

$$\begin{aligned} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')} &\stackrel{\phi'=0}{\underset{\rho'\rightarrow\infty}{\simeq}} \sqrt{(\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos\phi} = \rho' \sqrt{1 - 2\left(\frac{\rho}{\rho'}\right) \cos\phi} \\ &\stackrel{\phi'=0}{\underset{\rho'\rightarrow\infty}{\simeq}} = \rho' \left(1 - 2\left(\frac{\rho}{\rho'}\right) \cos\phi\right) = \rho' - \rho \cos\phi \end{aligned} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.22) เราสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ได้ว่า

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) = H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2 + (\rho')^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')}\right]$$

$$\underset{\rho' \rightarrow \infty}{\overset{\phi' = 0}{\simeq}} H_0^{(2)}[\beta(\rho' - \rho \cos \phi)] \quad (2.23)$$

สำหรับรูปแบบเชิงเส้นกำกับ (Asymptotic form) ของฟังก์ชันแอสกิลอันดับที่ 2 สำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

$$H_0^{(2)}(\alpha x) \underset{\alpha x \rightarrow \infty}{\simeq} \sqrt{\frac{2j}{\pi \alpha x}} j^n e^{-j\alpha x} \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) จะสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \underset{\rho' \rightarrow \infty}{\overset{\phi' = 0}{\simeq}} \sqrt{\frac{2j}{\pi \alpha x}} j^n e^{-j\alpha x} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(\beta\rho) e^{jn\phi} \quad (2.24)$$

แทนสมการที่ (2.23) ในสมการที่ (2.20ก) สำหรับในกรณีที่  $\phi' = 0$  และ  $\rho' \rightarrow \infty$

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \underset{\rho' \rightarrow \infty}{\overset{\phi' = 0}{\simeq}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n J_n(\beta\rho) H_0^{(2)}(\beta\rho') e^{jn\phi}$$

$$\underset{\rho' \rightarrow \infty}{\overset{\phi' = 0}{\simeq}} \sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho'}} e^{-j\beta\rho'} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n j^n J_n(\beta\rho) e^{jn\phi} \quad (2.25)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.23) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.20ก) จะพบว่า

$$b_n = 1 \quad (2.26)$$

ดังนั้นรูปแบบของสมการ (2.20) ในรูปแบบสำเร็จคือ

$$H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi - \phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi - \phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.27ก)$$

$$(2.27ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.27) สามารถนำไปแทนค่าในสมการที่ (2.15) ได้ดังนี้

$$E_z(\rho, \phi) = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|)$$

$$= -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.28\text{ก})$$

$$(2.28\text{ข})$$

### 2.2.1.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้น

สนามที่แพร่กระจายโดยแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลสามารถคำนวณได้จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equation) หรือ สมการคลื่น หรือจาก ทฤษฎีบทการเข้าคู่ (Duality Theorem) ซึ่งจากการใช้ทฤษฎีบทการเข้าคู่ สนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นที่มีความยาวอนันต์ ของกระแส  $I_m$  ที่คงที่ จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_\phi = +jI_m \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}(\beta\rho) \beta\rho \stackrel{\beta\rho \gg \text{large}}{\approx} -I_m \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (2.29\text{ก})$$

$$H_z = -I_m \frac{\beta^2}{4\omega\epsilon} H_0^{(2)}(\beta\rho) \beta\rho \stackrel{\beta\rho \gg \text{large}}{\approx} -\frac{1}{\eta} I_m \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (2.29\text{ข})$$

ซึ่งเมื่อแหล่งกำเนิดกระแสเปลี่ยนแปลงไปจากจุดกำเนิด สมการของสนามจะสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมการที่ (2.11ก) และ (2.11ข)

$$E_\phi = +jI_m \frac{\beta}{4} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \quad (2.30\text{ก})$$

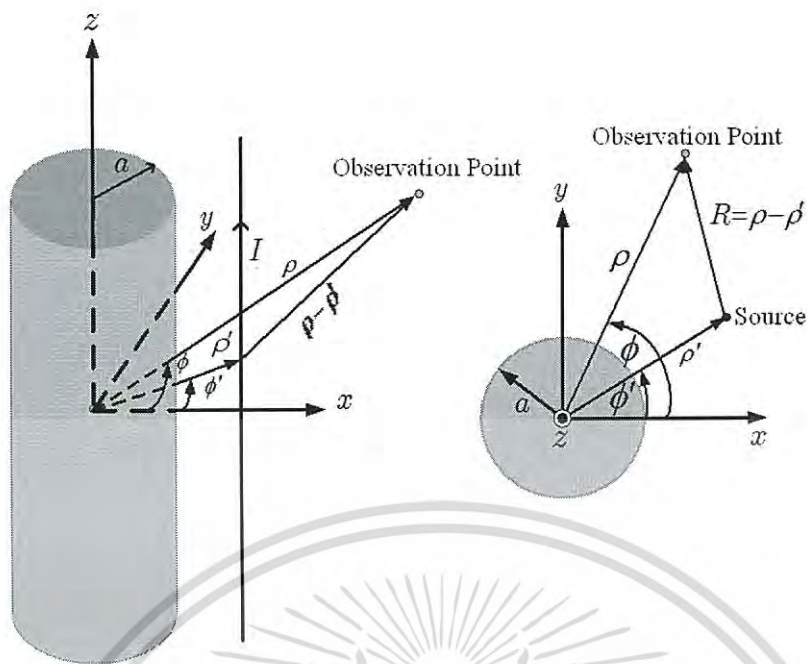
$$H_z = -I_m \frac{\beta^2}{4\omega\mu} H_0^{(2)}(\beta|\bar{\rho} - \bar{\rho}'|) \quad (2.31\text{ข})$$

เช่นเดียวกับกับสมการที่ (2.28) เราจะสามารถเขียนสมการที่ (2.31ข) ได้ใหม่ดังนี้

$$H_z(\rho, \phi) = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \quad (\text{a}) \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \quad (\text{b}) \end{cases} \quad (2.32\text{ก})$$

$$(2.32\text{ข})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ด้านข้าง

(ข) ด้านบน

รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดกระแสชนิดขดเส้นยาวอนันต์ที่วางตัวอยู่บนทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.2 เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นยาวอนันต์มีกระแสคงที่ ( $I_e$  สำหรับกระแสไฟฟ้าและ  $I_m$  สำหรับแม่เหล็ก) ซึ่งวางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำที่มีความยาวอนันต์ โดยเมื่อแหล่งกำเนิดชนิดเส้นยาวอนันต์แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นกระแสไฟฟ้า และกระแสแม่เหล็กคงที่ สนามจะสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกๆ ที่จากแหล่งกำเนิดที่ปราศจากทรงกระบอกดังแสดงในสมการที่ (2.28) สำหรับ  $I_e$  และ (2.32) สำหรับ  $I_m$  โดยเมื่อพิจารณาสำหรับวัสดุใดๆ ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) ที่เคลื่อนอยู่บนพื้นผิวดำนำ นั้นสามารถประมาณค่าขอบเขตจริง (Actual boundary) บนพื้นผิวด้านนอกโดยใช้อิมพีแดนซ์พื้นผิว (Surface impedance) ( $Z_s$ )

### 2.3 อิมพีแดนซ์พื้นผิว

การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุไม่ว่าจะเป็นวัสดุธรรมดา หรือวัสดุที่เป็นตัวนำยิ่งยวด จะสามารถอธิบายได้จากอิมพีแดนซ์พื้นผิวเชิงซ้อนดังแสดงในสมการที่ (2.33) เมื่อ  $R$  คือความต้านทานพื้นผิว และ  $X$  คือรีแอกแตนซ์พื้นผิว โดยทั้ง  $R$  และ  $X$  จะเป็นค่าจริง

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.33)$$

โดยอิมพีแดนซ์พื้นผิวจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสนามที่มาตกกระทบ (Incident field) ตัวอย่างเช่น โพลารไรซ์ มุมของคลื่นที่มาตกกระทบ และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่พิจารณา เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Medium) ที่ไม่ต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่นคลื่นเดินทางตกกระทบบนพื้นผิวดำนำหรือพื้นผิวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใดๆคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของพื้นผิวที่รอยต่อนั้นๆ ซึ่งจะเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อนั้นๆ [15]-[18] ดังสมการดังนี้

$$\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H} \quad (2.34)$$

เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดมุมฉาก (Rectangular coordinate) สนามไฟฟ้า (Electric field) สามารถจะเขียนได้ใน 3 องค์ประกอบดังนี้  $\bar{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$  เมื่อ  $\hat{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Normal unit vector) ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่คลื่นตกกระทบ เมื่อกำหนดให้  $\hat{n} = \hat{z}$

$$\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = \hat{n} \times (\hat{n} \times \bar{E}) \quad (2.35)$$

ดังนั้น  $\hat{n} \times (\hat{n} \times \bar{E})$

$$\hat{n} \times (\hat{n} \times \bar{E}) = -E_x \hat{x} - E_y \hat{y} \quad (2.36)$$

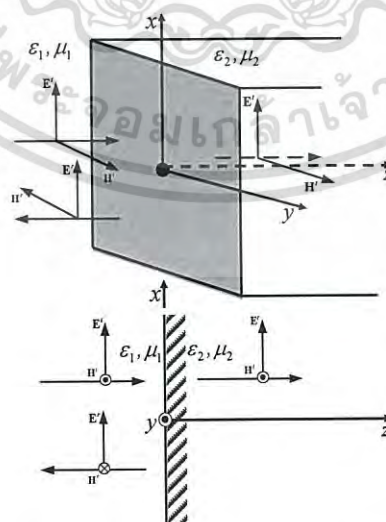
พิจารณา  $-Z_s \hat{n} \times \bar{H}$

$$-Z_s (\hat{n} \times \bar{H}) = -Z_s (-H_y \hat{x} + H_x \hat{y}) = Z_s H_y \hat{x} - Z_s H_x \hat{y} \quad (2.37)$$

ดังนั้นจากเงื่อนไขขอบเขตอิมพีแดนซ์จากสมการที่ (2.34) จะได้ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าดังนี้

$$E_x \hat{x} = -Z_s H_y \hat{x} \text{ และ } E_y \hat{y} = Z_s H_x \hat{y} \quad (2.38)$$

โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถหลีกเลี่ยงการคำนวณที่มีความซับซ้อนจากการใช้สมการของแมกซ์เวลล์ โดยใช้อิมพีแดนซ์พื้นผิวมาช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Magnetic field)



รูปที่ 2.3 แผ่นวัสดุครึ่งระนาบอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาตัวนำที่ดี (Good Conductor) ณ บริเวณ  $z > 0$  เมื่อขอบเขตเชื่อมต่อกับช่องว่างอิสระอยู่ที่  $z=0$  และเมื่อมีคลื่นระนาบ (Plane wave) มาตกกระทบ ณ ตัวนำนี้จะเกิดการสะท้อน (Reflection) กลับเกือบทั้งหมด และพลังงานที่ส่งผ่านไปยังตัวนำดังกล่าวนี้จะสูญเสียไปในรูปของความร้อนภายในระยะทางสั้น ซึ่งจะสามารถเขียนสนามที่ตกกระทบและสะท้อนกลับได้ดังนี้

$$\vec{E}^i = \hat{a}_x E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.39)$$

$$\vec{H}^i = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta} e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.40)$$

$$\vec{E}^r = \hat{a}_x \Gamma^b E_0 e^{+\alpha_1 z} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.41)$$

$$\vec{H}^r = -\hat{a}_y \frac{\Gamma^b E_0}{\eta_1} e^{+\alpha_1 z} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.42)$$

$E_0$  คือ สนามไฟฟ้า ณ  $z=0$

$\Gamma^b$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ขอบเขตรอยต่อ  $\left( \Gamma^b = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \right)$

$\eta_1$  และ  $\eta_2$  คือ อิมพีแดนซ์ตัวกลางตัวที่ 1 และ 2

$\alpha_1$  คือ ค่าคงที่การลดทอน

$\beta_1$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น

เมื่อสนามรวม (Total field) เกิดจากผลรวมของสนามที่ตกกระทบและสนามที่สะท้อนกลับ ณ ตัวกลางที่ 1

$$\vec{E}^t = \vec{E}^i + \vec{E}^r = \underbrace{\hat{a}_x E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z}}_{\text{Traveling wave}} \underbrace{(1 + \Gamma^b e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})}_{\text{Standing wave}} \quad (2.43)$$

$$\vec{H}^t = \vec{H}^i + \vec{H}^r = \underbrace{\hat{a}_y (E_0 / \eta_1) e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z}}_{\text{Traveling wave}} \underbrace{(1 + \Gamma^b e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})}_{\text{Standing wave}} \quad (2.44)$$

จากความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์พื้นผิว (พิจารณาที่  $z=0$ )

$$Z_s = \frac{E_t^i}{H_t^i} = \frac{E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma^b e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})}{(E_0 / \eta_1) e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} (1 - \Gamma^b e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})} = \frac{\eta_1 (1 + \Gamma^b)}{(1 - \Gamma^b)} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

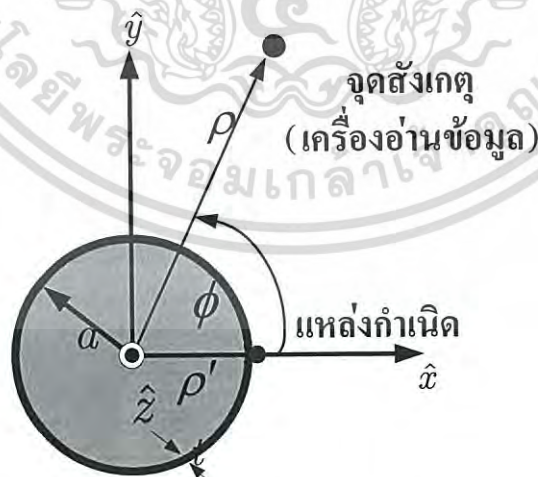
$$Z_s = \frac{E'}{H'} = \eta_1 \frac{\left(1 + \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}\right)}{\left(1 - \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}\right)} = \eta_2 \quad (2.46)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์พื้นผิวของขอบเขตรอยต่อระหว่างวัสดุที่เป็นตัวนำที่ดี ที่เชื่อมต่อกับช่องว่างอิสระ (Free-space) จะมีค่า  $Z_s = \eta_2$  และเมื่ออิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สองนั้นคืออิมพีแดนซ์ของตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ  $Z_{\text{Good conductor}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j)$  ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์พื้นผิวของขอบเขตเชื่อมต่อระหว่างช่องว่างอิสระกับตัวนำที่ดีที่มีความหนาอนันต์จะมีค่าเท่ากับ

$$Z_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j) \quad (2.47)$$

## 2.4 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริกโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น

จากโจทย์ปัญหาทางวิจัยสายอากาศแท่งบนดิ่งเหล็กหรือบนดิ่งน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ถึงน้ำมันหรือดิ่งเหล็กกำหนดให้เป็นวัสดุทรงกระบอกที่เป็นตัวนำขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และกำหนดให้แหล่งกำเนิดกระแสนิดเส้นยาวอนันต์เป็นแท่งที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริกดังแสดงในรูปที่ 2.4 สนามรวมเกิดจากสนามตกกระทบและสนามกระจัดกระจาย (Scattering field) สนามกระจัดกระจายเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของทรงกระบอกโลหะซึ่งประพุดิตัวเสมือนเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นอีกตัวหนึ่ง



รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดกระแสนิดเส้นที่วางตัวบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะ

### 2.4.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามีโพลาไรซ์ของแม่เหล็กตามขวางในแนวแกน Z (TM<sup>z</sup> polarization) วางบนพื้นผิวทรงกระบอกโลหะตามแนวแกน Z สนามกระจัดกระจายจะมีเพียงองค์ประกอบในทิศ Z ( $E_z$ ) ซึ่งจะไม่มียังองค์ประกอบที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.48) สนามตกกระทบแสดงในสมการที่ (2.49) และสนามรวมแสดงในสมการที่ (2.50) ตามลำดับ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.48)$$

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad (2.49)$$

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta a) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n^{(2)}(\beta a) \right] \quad (2.50)$$

- $\rho'$  คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงแหล่งกำเนิดในทิศ  $\hat{\rho}$  (m)  
 $\rho$  คือ ระยะจากจุดกำเนิดถึงจุดสังเกตในทิศ  $\hat{\rho}$  (m)  
 $\phi$  คือ มุมกวาดของจุดสังเกต (rad)  
 $\phi'$  คือ มุมกวาดของแหล่งกำเนิด (rad)  
 $a$  คือ รัศมีทรงกระบอกโลหะ (m)  
 $\beta$  คือ ค่าคงที่เฟส (rad/m) เมื่อ  $\beta^2 = \omega^2 \mu\epsilon$   
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)  
 $I_e$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (A)  
 $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (F/m)  
 $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (H/m)  
 $J_n(\beta\rho)$  คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับที่ n  
 $H_n^{(2)}(\beta\rho)$  คือ ฟังก์ชันแฮงเกลชนิดที่สองอันดับที่ n

มีปัญหาคำนวณไม่น้อยที่เป็นปัญหาการกระจายของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดเส้น (ทั้งไฟฟ้าและแม่เหล็ก) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อเส้นความยาวอนันต์ของกระแสคงที่ ( $I_e$  สำหรับกระแสไฟฟ้าและ  $I_m$  สำหรับกระแสแม่เหล็ก) ซึ่งวางอยู่ใกล้กับทรงกระบอกตัวนำที่มีความยาวอนันต์ โดยเมื่อแหล่งกำเนิดกระแสชนิดเส้นแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นกระแสไฟฟ้าคงที่  $I_e$  สนามจะสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ในทุกๆที่จากแหล่งกำเนิดกระแสที่ปราศจากทรงกระบอกดังแสดงในสมการที่ 2.50

$$H_0^2(\beta|\rho - \rho'|) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.51\text{ก})$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for } \rho \geq \rho' \quad (2.51\text{ข})$$

จากสมการที่ 2.49 ซึ่งจะแสดงถึงสนามตกกระทบ เมื่อทำการแทนสมการที่ได้มาจากทฤษฎี สำหรับฟังก์ชันแรงแกลกจากสมการที่ 2.51 ลงในสมการที่ 2.49 จะได้ว่า

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.52\text{ก})$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for } \rho \geq \rho' \quad (2.52\text{ข})$$

ฟังก์ชันเบสเซล  $J_n(\beta\rho)$  ใช้เพื่อแสดงให้เห็นสนามเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  เนื่องจากสนามมีค่าจำกัดในทุกๆจุดโดยรวมไปถึงที่จุด  $\rho = 0$  และ ฟังก์ชันแกลกจะสามารถนำมาใช้เมื่อ  $\rho \geq \rho'$  เพื่อแสดงให้เห็นธรรมชาติของการเดินทางของคลื่น แต่เมื่อสนามรวมนั้นเกิดจากสนามที่ตกกระทบและสนามกระจัดกระจาย

$$E_s^i = E_z^i + E_z^s \quad (2.53)$$

สนามกระจัดกระจายเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของทรงกระบอกซึ่งจะประพฤติตัวเหมือนกับว่าเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นอีกตัวหนึ่ง สนามกระจัดกระจายจะมีเพียงองค์ประกอบในทิศ  $Z$  ( $E_z$ ) ซึ่งจะไม่มียังองค์ประกอบที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad \text{for } a \leq \rho \leq \rho', \rho \geq \rho' \quad (2.54)$$

จากงานวิจัยเมื่อกำหนดให้จุดสังเกตอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอก ( $\rho = a$ ) เพื่อศึกษาสนามตกกระทบที่ผิวของตัวนำทรงกระบอก ดังนั้นเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  สนามตกกระทบเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  คือ

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for } \rho \leq \rho' \quad (2.55)$$

และสนามกระจัดกระจายเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  คือ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad \text{for } a \leq \rho \leq \rho' \quad (2.56)$$

โดยสนามรวมนั้นคือ  $E_s^i = E_z^i + E_z^s$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] \quad \text{for } \rho \leq \rho' \quad (2.57)$$

โดยอิมพีแดนซ์พื้นผิวจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสนามที่มาตกกระทบ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของพื้นผิวที่รอยต่ออื่นๆ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อนั้นๆ ดังสมการ

$$\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $\hat{n}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิวทรงกระบอกโลหะ สำหรับวัสดุใดๆ ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวดังนั้นสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของพื้นผิว ( $Z_s$ ) [22] ดังสมการที่ (2.59)

$$Z_s \approx -jZ_0 \beta t \left[ \frac{1 - \epsilon_r \mu_r}{\epsilon_r} \right] \left[ 1 + \frac{(\beta t)^2}{2} (1 - \epsilon_r \mu_r) \right]^{-1} \quad (2.59)$$

โดย

$Z_s$  = อิมพีแดนซ์พื้นผิว (โอห์ม)

$Z_0$  = อิมพีแดนซ์ของช่องว่างอิสระ (โอห์ม)

$t$  = ความหนาวัสดุเคลือบ (เมตร)

$\epsilon_r$  = ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์

$\mu_r$  = ค่าความซบซึ่มแม่เหล็กได้สัมพัทธ์

เมื่อทำการพิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate)

$$\bar{E} = E_\rho \hat{\rho} + E_\phi \hat{\phi} + E_z \hat{z} \quad (2.60)$$

ดังนั้นจากสมการ  $\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H}$  จะได้ว่า

$$-Z_s (\hat{n} \times \bar{H}) = -Z_s H_\phi \hat{z} - Z_s H_z \hat{\phi} \quad (2.61)$$

$$\boxed{E_z \hat{z} = Z_s H_\phi \hat{z}} \quad (2.62ก)$$

และ

$$E_\phi \hat{\phi} = -Z_s H_z \hat{\phi} \quad (2.62ข)$$

เมื่อองค์ประกอบแม่เหล็กสามารถหาได้จากการใช้สมการแมกซ์เวลล์

$$\bar{H}^t = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \bar{E}^t = -\frac{1}{j\omega\mu} \left( \hat{a}_\rho \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^t}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{\partial E_z^t}{\partial \rho} \right) \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{H}^t = -\hat{a}_\rho \frac{1}{j\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^t}{\partial \phi} + \hat{a}_\phi \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z^t}{\partial \rho} \quad (2.64)$$

หรือ

$$H_\rho^t = -\frac{1}{j\omega\mu} \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^t}{\partial \phi} \quad (2.65ก)$$

$$H_\phi^t = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z^t}{\partial \rho} \quad (2.65ข)$$

จากสมการที่ 2.65ข จะสามารถหาสนามแม่เหล็กในทิศ  $\phi$  ได้ จากสนามไฟฟ้าในทิศ  $z$  โดยการแทนสมการที่ 2.54 ลงในสมการที่ 2.65ข จะได้ว่า

$$H_\phi^t = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] \right)$$

$$H_\phi^t = \frac{jI_e \beta}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n'(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.66)$$

$c_n$  คือสัมประสิทธิ์ที่สามารถหาได้จากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขต เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก โดยมีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉาก ( $\hat{n}$ ) อยู่ในแนวรัศมี กล่าวคือ  $\hat{n} = \hat{\rho}$  องค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ โดยองค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถเขียนในรูปดังสมการที่ (2.66) ทำการจัดรูปสมการใหม่

$$c_n = \frac{[J_n'(\beta\rho) - j\eta^{-1} J_n(\beta\rho)]}{[H_n^{(2)'}(\beta\rho) - j\eta^{-1} H_n^{(2)}(\beta\rho)]} \quad (2.67)$$

ดังนั้นสามารถหาสนามรวมได้ว่า

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta\rho) - \frac{[J_n'(\beta\rho) - j\eta^{-1} J_n(\beta\rho)]}{[H_n^{(2)'}(\beta\rho) - j\eta^{-1} H_n^{(2)}(\beta\rho)]} H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad (2.68)$$

for  $\rho \leq \rho'$

#### 2.4.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

ถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดแม่เหล็กสมมูลจะไม่มีอยู่จริงทางกายภาพ แต่ก็สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสมือนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิด จากรูปที่ 2.4 พบว่าถ้าหากแหล่งกำเนิดชนิดเส้นเป็นกระแสแม่เหล็กสมมูลด้วยกระแสคงที่  $I_m$  เราสามารถจะหาสนามได้จากทฤษฎีบทการเข้าคู่จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu} H_0^2(\beta R) \quad \rightarrow \quad H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu} H_0^2(\beta|\rho - \rho'|) \quad (2.69)$$

$$H_0^2(\beta|\rho - \rho'|) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.70)$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ 2.69 ใหม่ได้ว่า

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (2.71ก)$$

$$(2.71ข)$$

สนามแม่เหล็กกระจัดกระจายจะสามารถเขียนได้ในรูปแบบที่คล้ายคลึงกับสมการที่ 2.54 ซึ่งจะสามารถเขียนได้ว่า

$$H_z^s = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad \text{for } a \leq \rho \leq \rho', \rho \geq \rho' \quad (2.72)$$

$d_n$  คือสัมประสิทธิ์ของสนามที่กระจัดกระจาย และเมื่อสนามรวมนั้นเกิดจากสนามที่ตกกระทบและสนามกระจัดกระจาย

$$H_z^t = H_z^i + H_z^s \quad (2.73)$$

จากงานวิจัยเมื่อกำหนดให้จุดสังเกตมาอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอก ( $\rho = a$ ) เพื่อศึกษาถึงสนามตกกระทบที่ผิวของตัวนำทรงกระบอก ดังนั้นเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  จะสามารถหาสนามตกกระทบเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  ได้ดังสมการ

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for } \rho \leq \rho' \quad (2.74)$$

และสนามกระจัดกระจายเมื่อ  $\rho \leq \rho'$  คือ

$$H_z^s = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \quad \text{for } a \leq \rho \leq \rho' \quad (2.75)$$

โดยสนามรวมนั้นคือ  $H_z^t = H_z^i + H_z^s$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ H_n^{(2)}(\beta\rho') J_n(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} + d_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] \quad \text{for } \rho \leq \rho' \quad (2.76)$$

สำหรับวัสดุบาง ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวตัวนำนั้นสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์เชิงพื้นผิว ( $Z_s$ ) จากสมการ (2.57) และ (2.58) จะได้ว่า

$$E_z \hat{z} = Z_s H_\phi \hat{z} \quad (2.77)$$

$$E_\phi \hat{\phi} = -Z_s H_z \hat{\phi} \quad (2.78)$$

เมื่อองค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากการใช้สมการแมกซ์เวลล์

$$\bar{E}^t = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H}^t = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \hat{a}_\rho \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{\partial H_z^t}{\partial \rho} \right) \quad (2.79)$$

$$\bar{E}^t = \hat{a}_\rho \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial H_z^t}{\partial \rho} \quad (2.80)$$

หรือ

$$E_\rho^t = \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} \quad (2.81ก)$$

$$E_\phi^t = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial H_z^t}{\partial \rho} \quad (2.81ข)$$

จากสมการที่ (2.81ข) จะสามารถหาสนามแม่เหล็กในทิศ  $\phi$  ได้ จากสนามไฟฟ้าในทิศ  $z$  โดยการแทนสมการที่ (2.74) ลงในสมการที่ (2.81ข) จะได้ว่า

$$E_\phi^t = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + d_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] \right)$$

$$E_\phi^t = -\frac{jI_m \beta}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n'(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} + d_n H_n'^{(2)}(\beta\rho) \quad (2.82)$$

หาสัมประสิทธิ์  $d_n$  จากสมการที่ (2.78)  $E_\phi \hat{\phi} = -Z_s H_z \hat{\phi}$  สมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.81)

$$d_n = -\frac{[J_n'(\beta\rho) - j\eta J_n(\beta\rho)]}{[H_n'^{(2)}(\beta\rho) - j\eta H_n^{(2)}(\beta\rho)]} \quad (2.83)$$

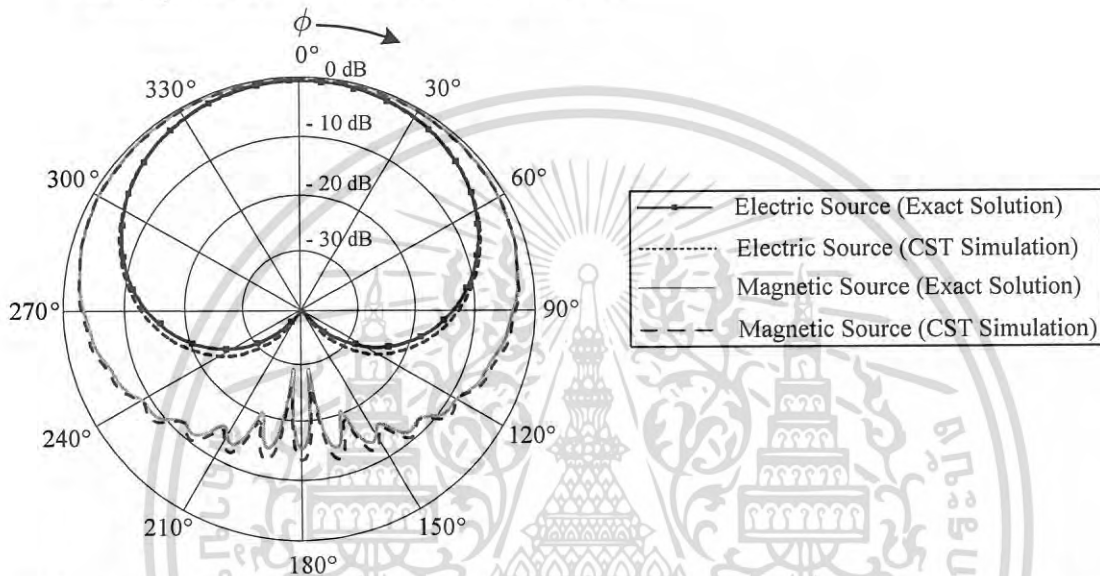
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถหาสนามรวมได้ว่า

$$H_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ J_n(\beta\rho) - \frac{[J_n'(\beta\rho) - j\eta J_n(\beta\rho)]}{[H_n^{(2)'}(\beta\rho) - j\eta H_n^{(2)}(\beta\rho)]} H_n^{(2)}(\beta\rho) \right] H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \quad (2.84)$$

for  $\rho \leq \rho'$

### 2.4.3 ผลการคำนวณและการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกตัวนำ



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy กรณีที่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนทรงกระบอกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก  $a=2\lambda$   $\epsilon_r=2.1$   $\mu_r=1$

รูปที่ 2.5 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ในรูปแบบสองมิติ (2D) ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนทรงกระบอกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริกเมื่อกำหนดให้วัสดุทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 2 เท่าของความยาวคลื่น พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz เคลือบด้วยวัสดุเพลอนที่มี  $\epsilon_r=2.1$   $\mu_r=1$  ผลการคำนวณจากวิธีผลเฉลยสมการคลื่นจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จากรูปจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีผลเฉลยสมการคลื่นจะให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) แต่อย่างไรก็ตามในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีผลเฉลยสมการคลื่นในตารางที่ 2.1

ในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) นั้นจะแปรผันตรงกับขนาดของทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกโดยขนาดที่ใหญ่ขึ้นและใช้ระยะเวลาในการจำลองที่นานขึ้น ในขณะที่การเลือกใช้ผลเฉลยสมการคลื่นจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยประมาณ 3.14 นาที และนอกจากระยะเวลาที่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วขึ้นแล้วประโยชน์ของงานวิจัยที่ได้ศึกษานี้คือ การที่พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังเมื่อ

นำเอาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลไปติดกับทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่เกิดการลดทอนจากวัสดุดังกล่าวดีกว่าในกรณีของการนำเอาแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าไปใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 ตารางเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยสมการคลื่นกับการจำลอง โดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) กรณีของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล

กรณีที่	รัศมี $a$	ความหนา $t$	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง:นาที:วินาที) (Intel(R) Core(TM) i7-2700K CPU @ 3.50 GHz, RAM 16.0 GB)	
			การจำลองโดย โปรแกรมจำลองทาง แม่เหล็กไฟฟ้า (CST)	ผลเฉลยสมการคลื่น
1	$\lambda$	$0.02\lambda$	1:9:14	0:3:14
		$0.06\lambda$	1:37:50	0:3:13
2	$2\lambda$	$0.02\lambda$	2:2:36	0:3:14
		$0.06\lambda$	4:5:30	0:3:56
3	$3\lambda$	$0.02\lambda$	4:17:18	0:3:73
		$0.06\lambda$	8:48:56	0:3:70

## 2.5 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลชนิดเส้นที่วางอยู่บนวัสดุอิมพีแดนซ์บนผิวโค้งรูปทรงกระบอก จากการใช้วิธีการคำนวณผลเฉลยของสมการคลื่น และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) ผลการคำนวณและผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม ทั้งความหนาที่เพิ่มขึ้นและขนาดของทรงกระบอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาในการจำลองจากการใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) ซึ่งในบางกรณีจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่มากกว่า 8 ชั่วโมง ในขณะที่การคำนวณจากการผลเฉลยสมการคลื่น จะใช้ระยะเวลาในการคำนวณเฉลี่ยประมาณ 3 นาที ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเวลาในการประมวลผลที่ได้จากวิธีผลเฉลยสมการคลื่นจะใช้เวลาน้อยกว่าการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) เป็นอย่างมาก จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลบนพื้นผิวดังกล่าว แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในขอบเขตเงา(ด้านหลังทรงกระบอก) ของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลจะมีการลดทอนน้อยกว่าแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้างั้นนั้นสายอากาศแท่งที่ทำการออกแบบจึงควรออกแบบให้สายอากาศมีลักษณะเป็นช่องเปิดซึ่งสามารถสมมูลให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์การแผ่พลังงานบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้ง ทรงกระบอกโลหะโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ

### 3.1 บทนำ

บทที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดชนิดเส้นเมื่อวางบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์โดยใช้วิธีการคำนวณโดยผลเฉลยสมการคลื่น โดยในวิธีที่นำเสนอบทที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบสองมิติ และเนื่องจากคำนวณด้วยผลเฉลยสมการคลื่นที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 ต้องใช้การคำนวณในรูปแบบการรวมกันของสนาม ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งที่วางบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์นำเสนอและวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ ผลเฉลยสมการคลื่น และผลที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จากนั้นผลจากการคำนวณที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบโดยแหล่งกำเนิด (Source) ในบทนี้จะกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุด (Point Source)

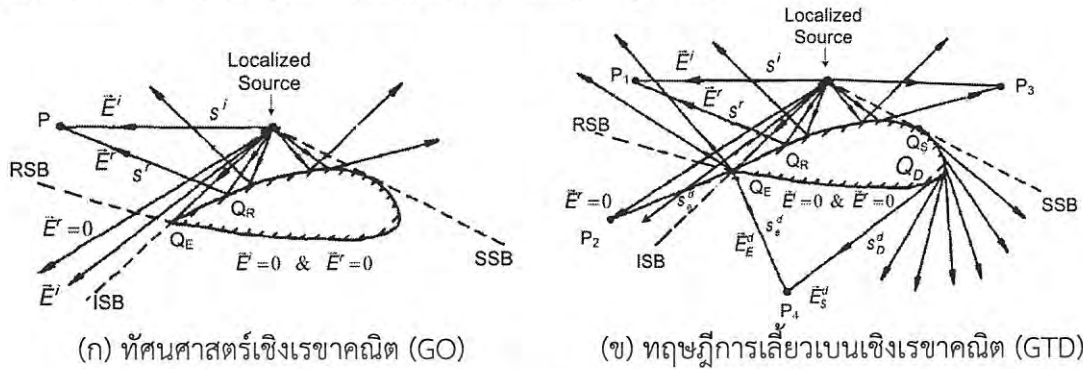
### 3.2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ

หัวข้อนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ ในการศึกษาและวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่ประยุกต์บนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอเป็นระเบียบวิธีหนึ่งของผลเฉลยเชิงเส้นกำกับที่ความถี่สูง โดยระเบียบวิธีดังกล่าวได้นำมาใช้ในการพัฒนาและแก้ปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กไฟฟ้า การแพร่กระจายคลื่น และการกระจายของแม่เหล็กไฟฟ้า [15]-[18] หากเปรียบเทียบกับผลเฉลยสมการคลื่นพบว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอสามารถช่วยลดปัญหาของการลู่อื่นซึ่งเกิดจากการใช้อินทิเกรต ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาในการคำนวณเนื่องมาจากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอไม่จำเป็นต้องใช้อินทิเกรตกระแสทั้งหมดบนพื้นผิว [20]

ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่สูงจากแหล่งกำเนิดซึ่งวางอยู่ใกล้หรือติดกับพื้นผิววัสดุที่สนใจ ซึ่งทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของสายอากาศได้อย่างหลากหลาย ในช่วงปี ค.ศ. 1950 โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ใช้เส้นรังสีในการอธิบายถึงปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction of wave) ในบริเวณขอบของวัตถุ โดยต่อมา โจเซฟ คิลเลอร์ (Joseph Keller) ได้นำเสนอทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (Geometrical theory of diffraction :GTD) ระเบียบวิธีนี้มีประโยชน์เป็นอย่างมากในการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CEM) สำหรับการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (High-frequency EM)

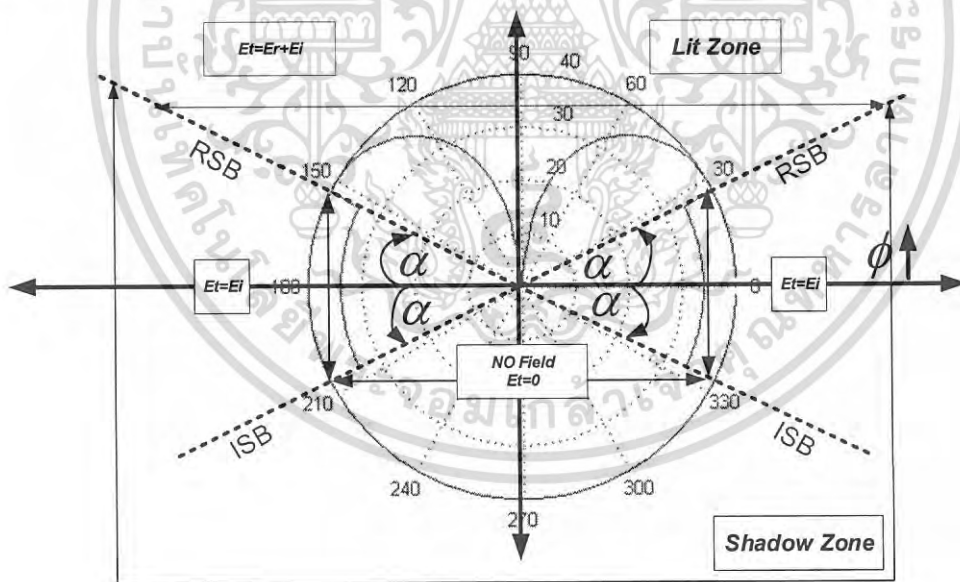
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เกิดจาก ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometrical Optic : GO) รวมกับสนามรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction ray field)



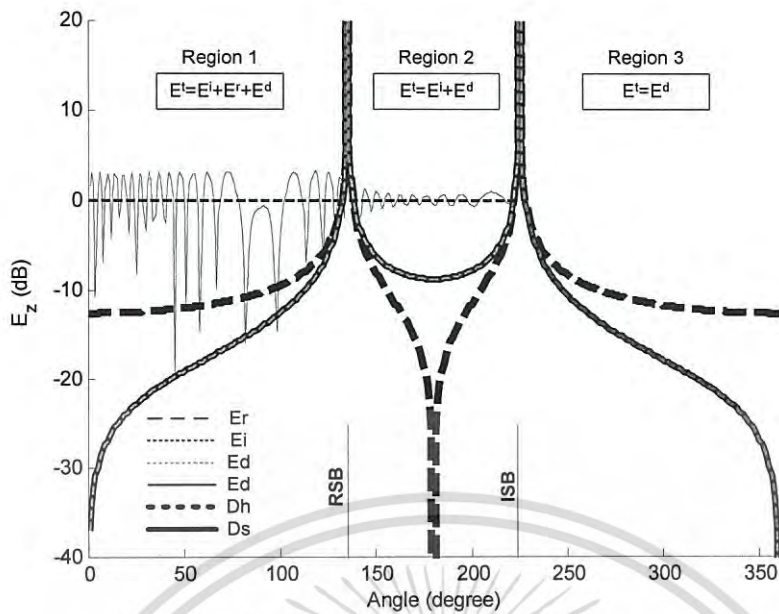
รูปที่ 3.1 รูปแบบทางเรขาคณิต [20]

ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (GO) เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงธรรมชาติของแสงสามารถแสดงพฤติกรรมที่เป็นไปได้คล้ายกับคลื่น เช่นการสะท้อน (Reflection) และการหักเห (Refraction) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณโดยใช้ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณขอบเขตเงา (Shadow region) จะพิจารณาเพียงสนามที่ตกกระทบ (Incident field) กับสนามที่เกิดจากการสะท้อน (Reflected field) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) โดยตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตแสดงในรูปที่ 3.1(ข) จากรูปจะพบว่าการคำนวณโดยใช้ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตจะได้สนามที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกิดเนื่องมาจากการไม่คำนึงถึงสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน (Diffraction field)

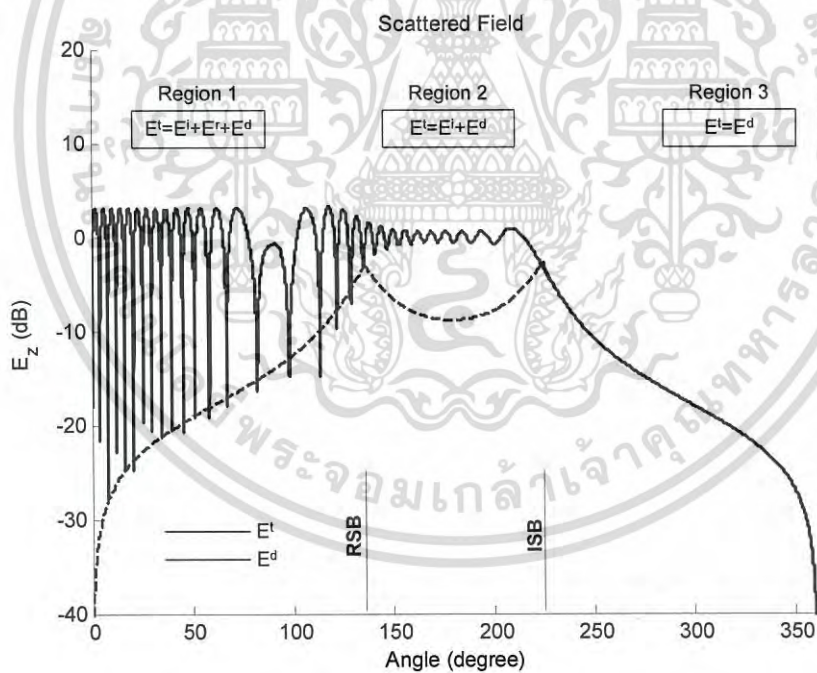


รูปที่ 3.2 การคำนวณโดยใช้ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในกรณีที่แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) TE ( $E_z^i$ ) ตกกระทบบนมุม  $\phi' = 90^\circ$  บนวัสดุครึ่งระนาบ

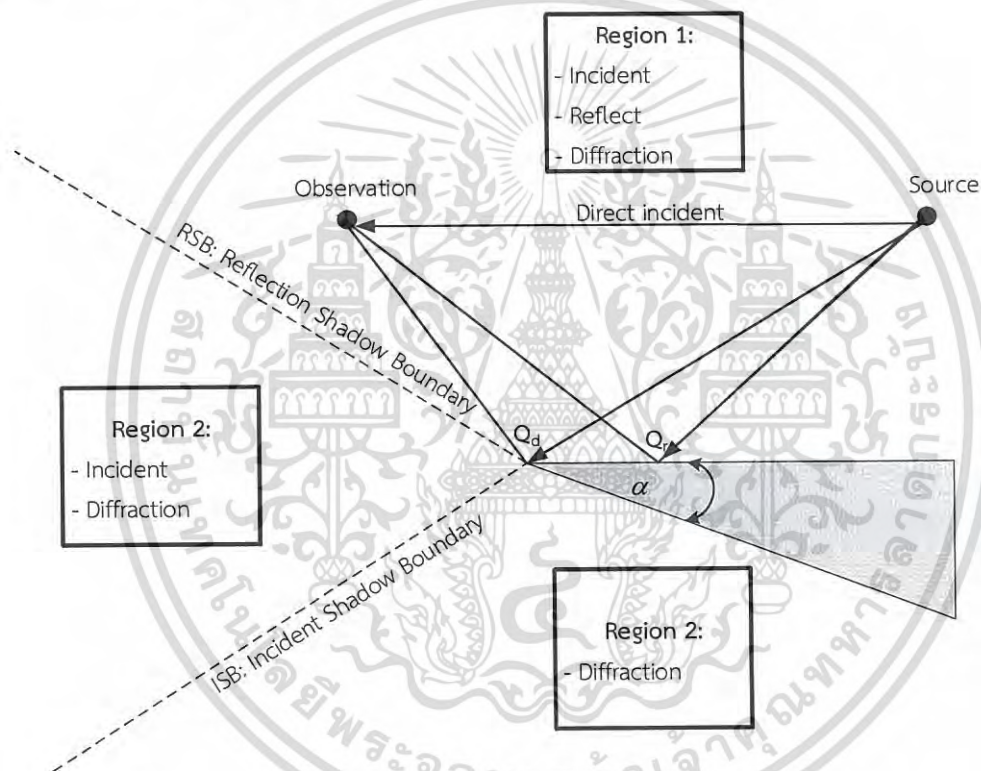


(ข) ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอในกรณีที่แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) TE ( $E_z^i$ ) ตกกระทบบนมุม  $\phi' = 90^\circ$  บนวัสดุครึ่งระนาบ

รูปที่ 3.3 การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเปรียบเทียบกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (GTD) จะมีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้ในการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ในรูปแบบดั้งเดิมนั้นสนามจะเกิดเป็นเอกฐาน (Singularities) ที่ใกล้บริเวณขอบเขตเงา ซึ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงแล้วจุดที่เกิดการไม่ต่อเนื่อง ดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องแก้ไข ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ จึงนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาค่าการเกิดการไม่ต่อเนื่อง ของสนามที่บริเวณดังกล่าว โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอจะสามารถแก้ไขจุดที่เกิดการไม่ต่อเนื่อง ในบริเวณรอยต่อของขอบเขต ในขณะที่เมื่อออกจากขอบเขตดังกล่าวทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ จะลู่เข้าสู่ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต โดยรูปแบบทางเรขาคณิตของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ในรูปที่ 3.2 (ก) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในการแก้ปัญหา และ 3.2 (ข) แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อใช้ของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอในการแก้ปัญหา จากรูปจะพบว่าจะสามารถแก้ไขปัญหาการไม่ต่อเนื่องได้



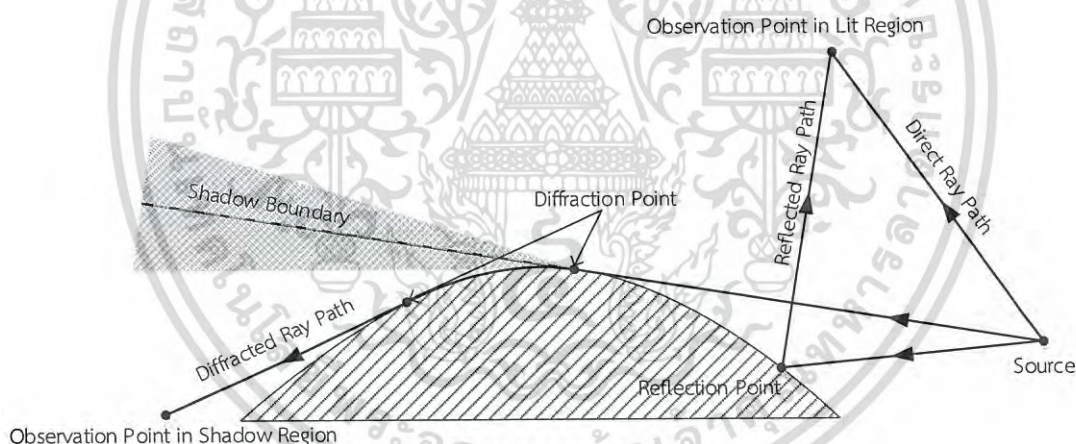
รูปที่ 3.4 การแบ่งขอบเขตบริเวณของสนาม

บริเวณที่ 1 และ 2 แบ่งขอบเขตโดย RSB (Reflection shadow boundary) บริเวณที่ 1 สนามจะประกอบไปด้วย สนามที่เกิดจากการตกกระทบ ( $E^i$ ) สนามที่เกิดจากการสะท้อน ( $E^r$ ) และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ( $E^d$ ) บริเวณที่ 2 สนามจะประกอบไปด้วยสนามที่ตกกระทบ และสนามที่กระจัดกระจาย บริเวณที่ 2 และ 3 แบ่งด้วยขอบเขต ISB (Incident shadow boundary) ในบริเวณที่ 3 สนามจะมีเพียงสนามที่เกิดจากสนามเลี้ยวเบน โดยสนามรวมจะสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

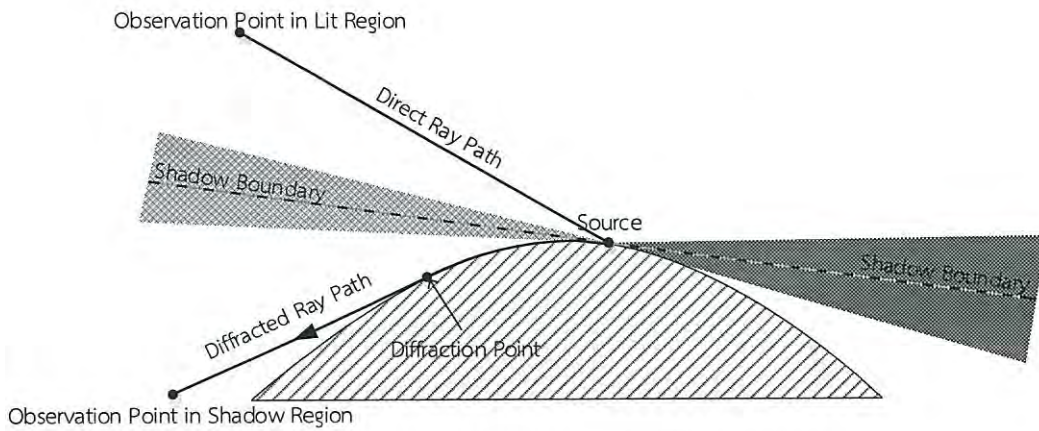
$$E^t = \begin{cases} E^i + E^r + E^d ; & 0 \leq \phi < \phi_{RSB} \\ E^i + E^d & ; \phi_{RSB} < \phi < \phi_{ISB} \\ E^d & ; \phi_{ISB} < \phi < 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (3.1)$$

รูปแบบการใช้งานของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ 1 คือปัญหาการกระจัดกระจาย (Scattering problem) ใช้ในการทำนายการกระจัดกระจายจากพื้นผิววัสดุเช่นส่วนลำเครื่องของเครื่องบิน ส่วนเสาของเรือ หรือดาวเทียม ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดกับจุดสังเกตจะอยู่นอกเหนือจากบริเวณพื้นผิวของวัตถุ โดยจุดสังเกตจะแบ่งออกเป็นจุดสังเกตที่อยู่ในขอบเขตแสง (Lit Region) และจุดสังเกตที่อยู่ในขอบเขตเงา (Shadow Region) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) กรณีที่ 2 คือปัญหาการแผ่กระจายคลื่น (Radiation problem) จะใช้ในการทำนายแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ติดอยู่กับจรวด เครื่องบินรบและยานอวกาศ ซึ่งกรณีนี้จะมีความแตกต่างจากกรณีแรกคือ แหล่งกำเนิดจะวางอยู่บนวัสดุพื้นผิวที่สนใจ ส่วนจุดสังเกตจะอยู่นอกเหนือจากพื้นผิวดังกล่าว โดยเช่นเดียวกันกับในกรณีแรกจุดสังเกตจะแบ่งออกเป็นจุดสังเกตที่อยู่ในบริเวณขอบเขตแสง และจุดสังเกตที่อยู่ในบริเวณขอบเขตเงา ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) นอกจากนี้ยังมีกรณีย่อยที่แยกออกมาจากกรณีที่สองคือ กรณีที่ทั้งแหล่งกำเนิดและจุดสังเกตอยู่บนพื้นผิวเดียวกันโดยในกรณีนี้จะเรียกว่ากรณีการเชื่อมต่อกัน (Mutual coupling) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค) โดยกรณีที่น่ามาใช้ในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้คือกรณีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการแผ่กระจายคลื่น (Radiation problem)

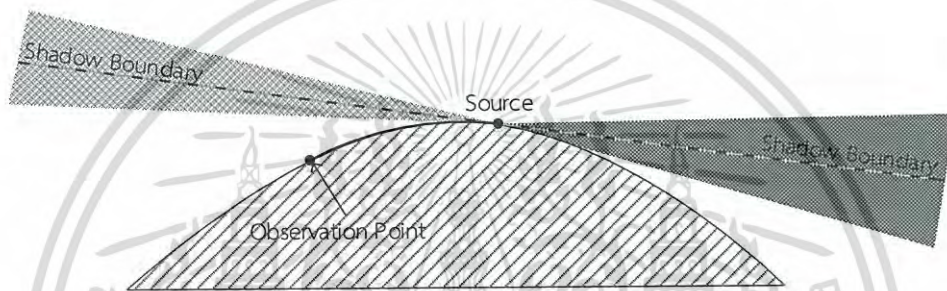


(ก) กรณีการกระจัดกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กรณีการแพร่กระจายคลื่น



(ค) กรณีการเชื่อมต่อร่วม

รูปที่ 3.5 รูปแบบทางเรขาคณิตของการทำงานของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ

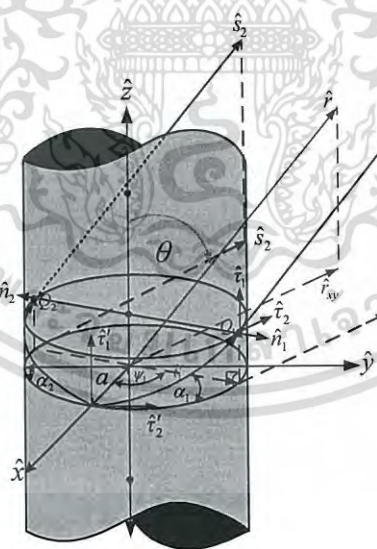
### 3.3 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กทริกของวัสดุทรงกระบอกโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ

ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอคือระเบียบวิธีการของผลเฉลยเชิงเส้นกำกับที่ความถี่สูงวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถใช้คำนวณในการแก้ปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุที่มีขนาดทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Electrically large object) โดยในการคำนวณในบทนี้ สายอากาศแท่งขนาดเล็กซึ่งมีขนาดไม่เกิน  $0.2\lambda$  จะถูกนำไปวางบนวัสดุพื้นผิวโค้งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d = 1.7838\lambda$  โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบขนาดของแท่งได้นำเสนอกับขนาดของวัสดุที่จะนำมาประยุกต์ใช้งาน กล่าวคือวัสดุทรงกระบอก ขนาดของทรงกระบอกที่นำมาศึกษามีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศแท่งประมาณ  $10\lambda$  จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นข้อสันนิษฐานในเบื้องต้นได้ว่าทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

วิธีการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดที่วางบนวัสดุผิวโค้งที่ได้นำเสนอใน [20] สำหรับโจทย์ปัญหาทางงานวิจัยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอสำหรับพื้นผิวอิมพีแดนซ์ได้นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแท่งที่วางอยู่บนถังแก๊ส โดยขนาดของถังแก๊สมีรัศมี  $0.8918\lambda$  สมการเงื่อนไขขอบเขตอิมพีแดนซ์ (Impedance boundary condition) แสดงในสมการที่ 3.1 [22]  $\epsilon_r$  คือ  $\mu_r$  สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) และ ความซาบซึ่มแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) ของวัสดุ เมื่อ  $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์ของช่องว่างอิสระซึ่งมีค่าเท่ากับ  $120\pi$  และ  $k$  คือเลขคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ  $k=2\pi/\lambda$



(ก) ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและจุดเลี้ยวเบน



(ข) เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

รูปที่ 3.6 รูปทรงเรขาคณิตมุมมองกว้าง (Perspective view) ของสายอากาศแท่งบนทรงกระบอก

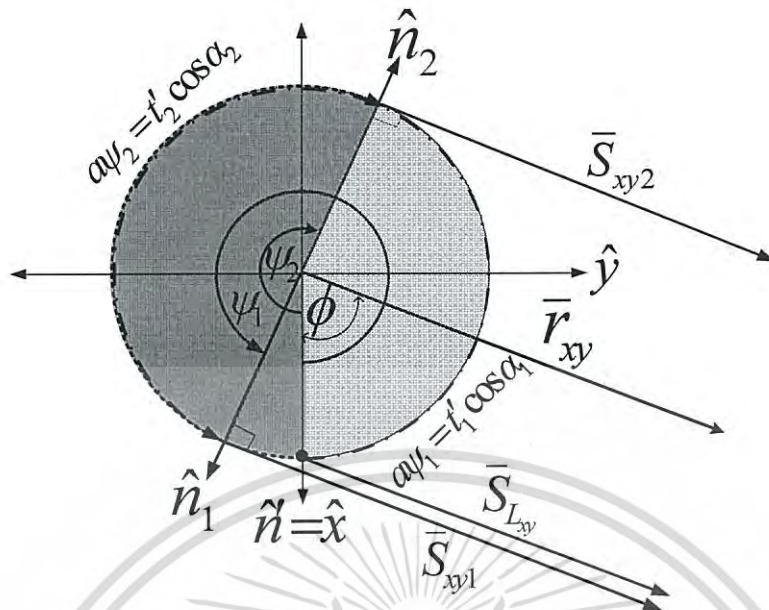
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้งานแท็กกับถังแก๊ส แท็กกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุด ส่วนถังแก๊สกำหนดให้เป็นวัสดุทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยในรูปที่ 3.6 (ก) แสดงพารามิเตอร์เบื้องต้นและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและจุดเลี้ยวเบน สำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นนั้นวัสดุเคลือบจะกำหนดให้เป็นเทฟลอน (Teflon) ซึ่งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.1 ความหนาของวัสดุเคลือบกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์  $t$ , รัศมีของทรงกระบอกคือ  $a$  พารามิเตอร์  $r$  คือระยะทางระหว่างจุดกำเนิด (Origin) ไปยังตำแหน่งสังเกต (Observation Point) พารามิเตอร์  $s'$  คือระยะทางจากแหล่งกำเนิด (Source) ไปยังตำแหน่งสังเกต พารามิเตอร์  $t$  คือระยะทางจากแหล่งกำเนิด (Source) ไปยังจุดที่เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction point) และพารามิเตอร์  $s$  คือระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนไปยังตำแหน่งสังเกต

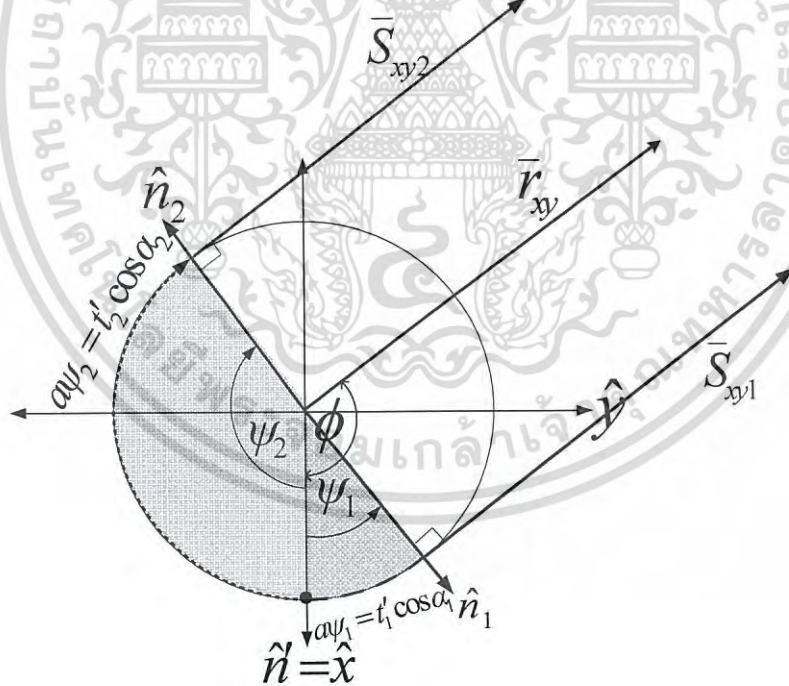
ในรูปที่ 3.6 (ข) แสดงเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแต่ละพารามิเตอร์  $\hat{s}$  เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนไปยังตำแหน่งสังเกต เวกเตอร์ดังกล่าวได้จากความสัมพันธ์ดังนี้  $\hat{s} = \cos\theta' \hat{k}' + \sin\theta' \hat{i}'$  ส่วนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{k}$   $\hat{b}$  และ  $\hat{i}$  คือ เวกเตอร์แนวฉาก (Normal) เวกเตอร์คู่แนวฉาก (Bi-normal) และเวกเตอร์สัมผัส (Tangential) หนึ่งหน่วย โดย  $\hat{k}'$   $\hat{b}'$  และ  $\hat{i}'$  คือ เวกเตอร์แนวฉาก (Normal) เวกเตอร์คู่แนวฉาก (Bi-normal) และเวกเตอร์สัมผัส (Tangential) หนึ่งหน่วยของแหล่งกำเนิด โดยความสัมพันธ์ของเวกเตอร์แนวฉาก เวกเตอร์คู่แนวฉากและเวกเตอร์สัมผัสคือ  $\hat{b} = \hat{i} \times \hat{k}$  เช่นเดียวกันกับ  $\hat{b}' = \hat{i}' \times \hat{k}'$

ในบริเวณขอบเขตแสง (Lit region) เวกเตอร์หนึ่งหน่วยคู่แนวฉากของแหล่งกำเนิดและจุดสังเกตจะมีค่าเท่ากันกล่าวคือ  $\hat{b} = \hat{b}'$  โดยกำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยแนวฉากอยู่ในแนวแกน  $x$  ( $x$ -axis) กล่าวคือ  $\hat{k}' = \hat{x}$  ส่วนในบริเวณขอบเขตเงาความสัมพันธ์ของแต่ละเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะมีความคล้ายคลึงกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในขอบเขตแสง ยกเว้นแต่ในกรณีของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยคู่แนวฉาก ของแหล่งกำเนิดกับจุดสังเกตจะมีค่าที่แตกต่างกันกล่าวคือ  $\hat{b} \neq \hat{b}'$  มุมตกกระทบคือ  $\theta'$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์  $\theta' = \arccos(\hat{k}' \cdot \hat{s})$  โดยมุม  $\alpha$  จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์  $\alpha = \arctan((r \cos\theta)/(a\psi + r))$  และ  $\alpha' = (\pi/2) - \alpha$

ในรูปที่ 3.7 แสดงเส้นทางของรังสีของปัญหาที่สนใจ ในรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) แสดงเส้นทางของรังสีในรูปแบบสองมิติ (2D) หรือการพิจารณาเส้นทางของรังสีในระนาบ  $xy$  โดยในรูปที่ 3.7 (ก) กำหนดให้จุดสังเกตอยู่ในบริเวณขอบเขตแสง ส่วนในรูป 3.7 (ข) กำหนดให้จุดสังเกตอยู่ในบริเวณขอบเขตเงา เส้นทางของรังสีสามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยกำหนดให้จุดสังเกตอยู่ในสนามระยะใกล้ดังนั้น  $\hat{s}_{xy1}$ ,  $\hat{s}_{xy2}$  และ  $\hat{r}_{xy}$  จะขนานกันและกัน ในรูปที่ 3.7 (ค) แสดงเส้นทางของรังสีในรูปแบบสามมิติ (3D) เมื่อมุม  $\alpha$  คือมุมยกซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามจุดสังเกตในกรณีของสองมิติ (2D) มุมยกหรือมุม  $\alpha$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์

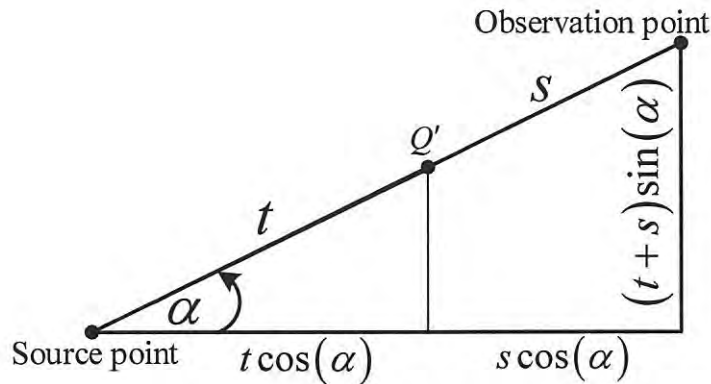


(ก) ภาพด้านบนในบริเวณขอบเขตแสง (Lit region) ในระนาบ xy



(ข) ภาพด้านบนในบริเวณขอบเขตเงา (Shadow region) ในระนาบ xy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เส้นรังสีสามมิติ (3D ray path)

รูปที่ 3.7 เส้นทางของรังสีของปัญหาที่สนใจ

สนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดที่วางอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอกสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 เมื่อ  $Q'$  ตำแหน่งที่เกิดการเลี้ยวเบน เมื่อพิจารณาในขอบเขตแสงสนามไฟฟ้ารวมจะเกิดจากสนามไฟฟ้าตกกระทบรวมกับสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบน ส่วนในขอบเขตเงาสถาณไฟฟ้ารวมจะเกิดจากสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากแหล่งกำเนิดวางบนพื้นผิวทรงกระบอก

$$\bar{E}_m(Q) = \begin{cases} \bar{E}_i + \bar{E}_d(Q_1) + \bar{E}_d(Q_2) & , \text{Lit region} \\ \bar{E}_d(Q_1) + \bar{E}_d(Q_2) & , \text{Shadow region} \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$\bar{E}_m(Q)$  = สนามไฟฟ้า ณ จุด  $Q$

$\bar{E}_d(Q_1), \bar{E}_d(Q_2)$  = สนามไฟฟ้า ณ จุดเลี้ยวเบนที่จุด  $Q_1$  และ  $Q_2$

$\bar{p}_m(Q')$  = แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กเสมือน (Equivalent magnetic current source) ณ จุด  $Q'$

$\bar{p}_e(Q')$  = แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเสมือน (Equivalent electric current source) ณ จุด  $Q'$

### 3.3.1 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะวิเคราะห์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดชนิดกระแสไฟฟ้าในบริเวณขอบเขตเงา (Shadow region) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 และในขอบเขตแสงในสมการที่ 3.4

$$\bar{E}_{d_e}(Q'_n) \approx -\frac{jkZ_0}{4\pi} \bar{p}_{et}(Q') \left[ \begin{array}{l} \hat{n}'\hat{n} g(q\beta) \\ +\hat{n}'\hat{b} \left( \frac{\sin 2\alpha'}{2\sin^2 \alpha'} \right) \tilde{g}(q\beta) \end{array} \right] \quad (3.3)$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{s \times (t_n + s)}} \frac{e^{-jkr}}{r} e^{jka \sin \phi \cos \theta}$$

$$\bar{E}_{i_e}(Q) \approx -\frac{jkZ_0}{4\pi} \bar{p}_{et}(Q') \left[ \begin{array}{l} \hat{n}'\hat{n} M_{imp} \\ +\hat{n}'\hat{b} N_{imp} \end{array} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} e^{+jka \sin \phi \cos \theta} \quad (3.4)$$

Hard case (TE<sub>z</sub>) สำหรับพื้นผิวอิมพีแดนซ์

$$g(q\beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\tau} \frac{e^{-jq\beta\tau}}{w'_2(\tau) - qw_2(\tau)} d\tau \quad (3.5)$$

Hard case (TE<sub>z</sub>) สำหรับพื้นผิวดำนำสมบูรณ์ (PEC) ( $Z_s=0$ )

$$g(m,\beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\tau} \frac{e^{-jm,\beta\tau}}{w'_2(\tau)} d\tau \quad (3.6)$$

Soft case (TM<sub>z</sub>) สำหรับพื้นผิวอิมพีแดนซ์

$$\tilde{g}(q\beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\tau} \frac{\left( \frac{Z_0}{Z_s} \right) e^{-jq\beta\tau}}{w'_2(\tau) - qw_2(\tau)} d\tau \quad (3.7)$$

Soft case (TM<sub>z</sub>) สำหรับพื้นผิวดำนำสมบูรณ์ (PEC) ( $Z_s=0$ )

$$\tilde{g}(m,\beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\tau} \frac{e^{-jm,\beta\tau}}{jm w_2(\tau)} d\tau \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$q = j \left( \frac{ka}{2} \right)^{1/3} \left( \frac{Z_s}{Z_0} \right) \quad (3.9)$$

เมื่อ โดย  $\beta = \psi$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆที่มีความสำคัญในการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ในกรณีของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Electric current source)

$$M_{imp} = \sin(\theta^i) (g(q\beta) - T_0^2 T \cos(\theta^i)) \quad (3.10)$$

$$N_{imp} = T_0 T \sin(\theta^i) \quad (3.11)$$

$$T_0(Q') = T(Q') \rho_s(Q') \quad (3.12)$$

$$T = \frac{\tilde{g}(q\beta) - g(q\beta) \cos \theta^i}{1 + T_0^2 \cos \theta^i} \quad (3.13)$$

### 3.3.2 แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะวิเคราะห์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ

สำหรับการวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลเมื่อวางอยู่บนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ ในบริเวณขอบเขตเงา (Shadow region) คำนวณได้จากสมการที่ 3.14 และในขอบเขตแสง (Lit region) แสดงในสมการที่ 3.15

$$\begin{aligned} \bar{E}_{dm}(Q'_n) \approx & -\frac{jk}{4\pi} \frac{1}{p_{mt}(Q')} \left[ \begin{aligned} & \hat{b}' \hat{n} A_{imp} + i' \hat{b} B_{imp} \\ & + \hat{b}' \hat{b} T_0(Q') C_{imp} + i' \hat{n} D_{imp} \end{aligned} \right] \\ & \times \sqrt{\frac{1}{s \times (t_n + s)}} \frac{e^{-jkr}}{r} e^{jka \sin \phi \cos \theta} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\bar{E}_{im}(Q) \approx -\frac{jk}{4\pi} \frac{1}{p_{mt}(Q')} \left[ \begin{aligned} & \hat{b}' \hat{n} g(q\beta) + i' \hat{b} \tilde{g}(q\beta) \\ & + \hat{b}' \hat{b} \left( \frac{\sin 2\alpha'}{2 \sin^2 \alpha'} \right) \tilde{g}(q\beta) \end{aligned} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} e^{jka \sin \phi \cos \theta} \quad (3.15)$$

พารามิเตอร์ในกรณีของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก (Magnetic current source)

$$A_{imp} = g(q\beta) + T_0^2 T \cos \theta^i \quad (3.16)$$

$$B_{imp} = \tilde{g}(m, \beta) + T_0^2 T \cos^2 \theta^i \quad (3.17)$$

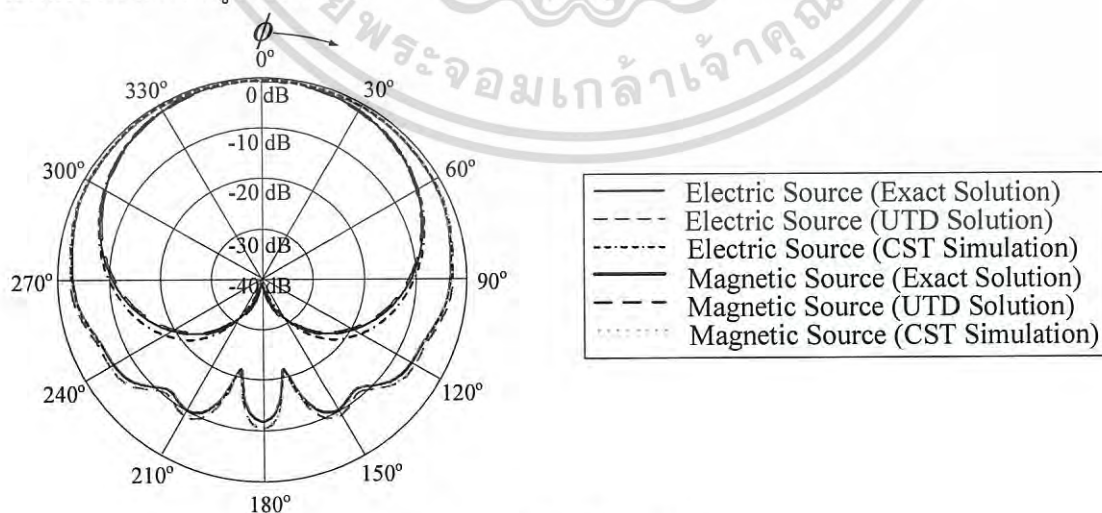
$$C_{imp} = T_0 T \quad (3.18)$$

$$D_{imp} = T_0 T \cos \theta^i \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

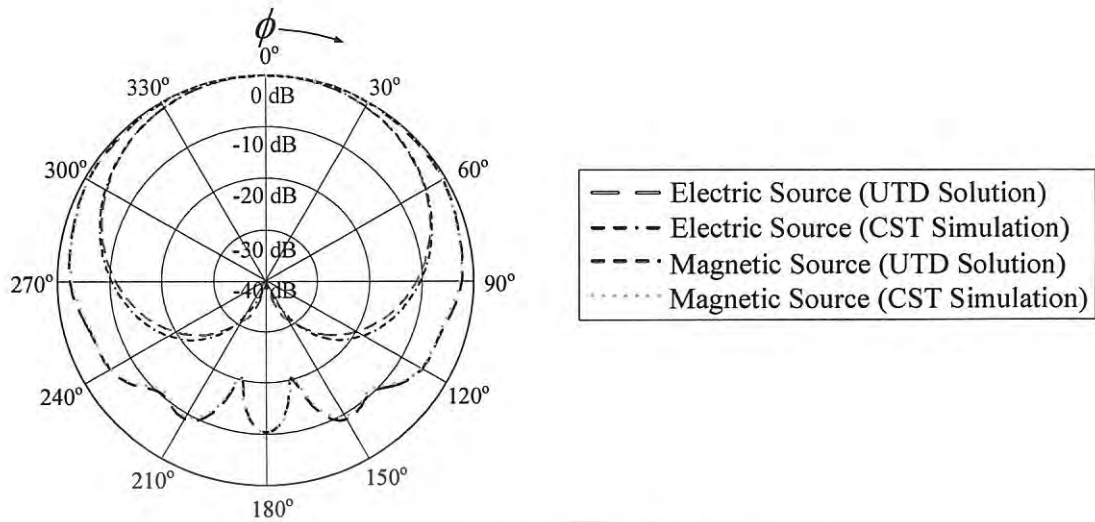
### 3.4 ผลการคำนวณและผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยูบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ

จากโจทย์งานวิจัยแหล่งกำเนิดกำหนดให้วางบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ เมื่อวัสดุทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $1.7838\lambda$  โดยชั้นพื้นผิวไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.1 และมีความหนาเท่ากับ  $0.002\lambda$  แหล่งกำเนิดกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุด และกำหนดทรงกระบอกที่หุ้มด้วยพื้นผิววัสดุให้เป็นถังแก๊ส ในรูปที่ 3.8 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดชนิดกระแสแม่เหล็กและชนิดกระแสไฟฟ้า ในรูป 3.8 (ก) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อให้มุมยก ( $\theta$ ) มีค่าเท่ากับ 90 องศา หรือพิจารณาที่ระนาบ xy ในรูป 3.8 (ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อให้มุมยก ( $\theta$ ) มีค่าเท่ากับ 70 องศา จากรูปจะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในบริเวณขอบเขตเงาที่กว้างกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงแบบรูปการแพร่กระจายกระแสที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กสามารถให้บริเวณระยะการทำงานที่มากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า และจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอบริเวณเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากผลเฉลยสมการคลื่นและผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและการจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมด้านหน้า ( $\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$ ) ของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวอิมพีแดนซ์เมื่อทรงกระบอกมีขนาด  $d = 1.7838\lambda$  เคลือบด้วยเพปลอนที่มีความหนา  $0.002\lambda$  จะพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล และแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกันโดย ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 3.5 dBi ซึ่งจะต่ำกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลประมาณ 4.9 dBi เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 3.9



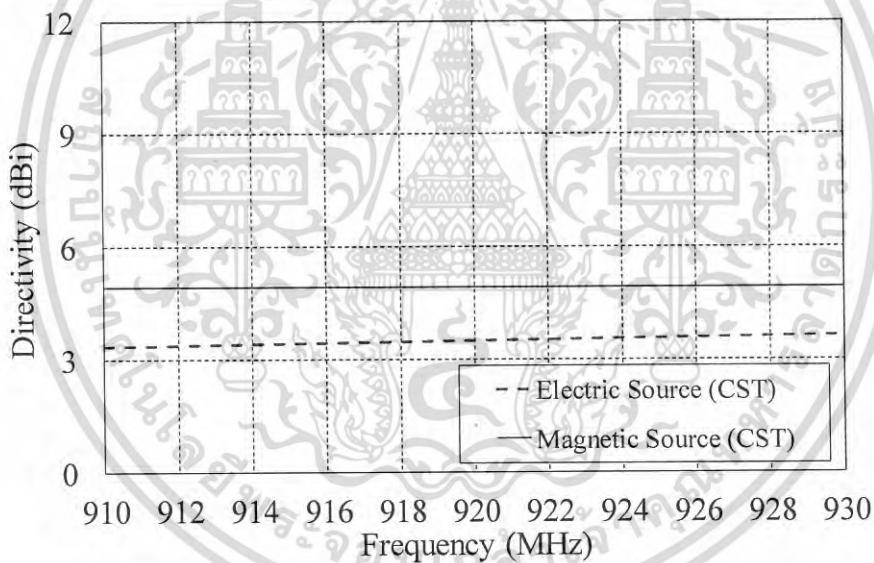
(ก)  $\theta = 90$  องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)  $\theta = 70$  องศา

รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวอิมพีแดนซ์เมื่อทรงกระบอกมีขนาด  $d = 1.7838 \lambda$  เคลือบด้วยเทฟลอนที่มีความหนา  $0.002 \lambda$



รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มุมด้านหน้าทรงกระบอกของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวอิมพีแดนซ์เมื่อทรงกระบอกมีขนาด  $d = 1.7838 \lambda$  เคลือบด้วยเทฟลอนที่มีความหนา  $0.002 \lambda$

### 3.5 บทสรุป

การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับพื้นผิวอิมพีแดนซ์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ จากผลการวิเคราะห์พบว่าคุณสมบัติของสายอากาศที่กช่องเปิดรูปตัวยู (แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล) ประยุกต์ใช้บนวัสดุโลหะทรงกระบอกเคลือบจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าในกรณีของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต วิธีการคำนวณโดยผลเฉลยสมการคลื่น (ระเบียบวิธีแมนตรง) และการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จะพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปรียบเทียบกับขอบเขตเงาแล้วสายอากาศที่นำเสนอจะมีสนามแพร่กระจายคลื่นมากกว่าสายอากาศที่มีคุณลักษณะพื้นฐานที่คล้ายคลึงกับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าจากการคำนวณและการจำลองสายอากาศที่มีคุณลักษณะพื้นฐานดังเช่นแหล่งกำเนิดแม่เหล็กเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ เพื่อใช้ในระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่เอชเอฟจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในบริเวณขอบเขตเงาที่มากกว่าสายอากาศที่มีคุณลักษณะพื้นฐานดังเช่นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยเมื่อพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลจะพบว่าสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กจะสูงกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าประมาณ 1.4 dBi

จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากทั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ เช่น ถังแก๊ส ถังน้ำมัน ถังน้ำยาเคมี คือสายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล เช่น สายอากาศบ่วง (Loop antenna) หรือสายอากาศช่องเปิด (Slot antenna) โดยในบทถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบและการจำลองสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่เอชเอฟที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดแม่เหล็กสมมูล ซึ่งสามารถใช้ได้ตามมาตรฐานภายในประเทศไทยและออกแบบให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์

## บทที่ 4

### การออกแบบสายอากาศ

#### 4.1 บทนำ

จากบทที่ 2 และบทที่ 3 เป็นการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลวางบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น และระเบียบวิธีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ จากผลการคำนวณสามารถยืนยันได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลมีการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังและมีการลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำข้อดีของการใช้แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณานำสายอากาศไปติดกับวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเช่นชั้นสีที่ทาลงบนตัวถังเป็นต้น ในบทที่ 4 ทำการออกแบบสายอากาศโดยการลดผลกระทบที่เกิดจากการนำแท็กไปติดบนพื้นผิวโลหะทรงกระบอกเคลือบ สายอากาศต้นแบบจะมีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลได้แก่สายอากาศบ่วง และสายอากาศช่องเปิด แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือการนำสายอากาศแท็กไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ ดังนั้นสายอากาศบ่วงจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งาน สายอากาศช่องเปิดจึงนำมาใช้ในการออกแบบเป็นโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ จากนั้นโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศจะทำการดัดแปลงเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะที่มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในบทนี้

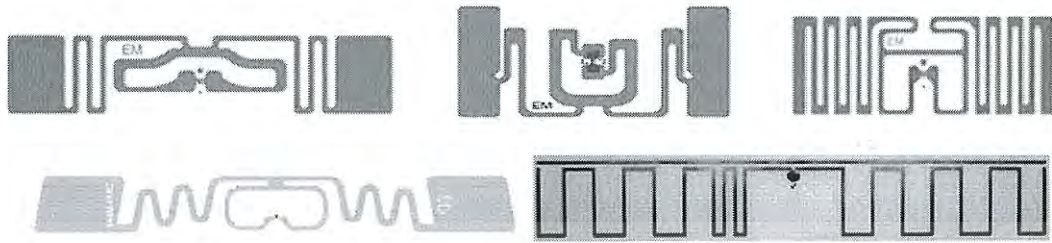
อย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ สายอากาศควรมีคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื้อหาโดยรวมในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีเบื้องต้นในการออกแบบสายอากาศแท็ก คุณสมบัติของสายอากาศแท็ก ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศแท็ก การออกแบบสายอากาศโดยการจำลองร่วมกับวัสดุทรงกระบอกที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริก แล้วนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีผลเฉลยสมการคลื่น และระเบียบวิธีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในการออกแบบสายอากาศแท็ก โดยคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแท็กที่ได้ออกแบบจะนำไปทดสอบและแสดงผลไว้ในลำดับถัดไปในบทที่ 5

#### 4.2 สายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

สายอากาศแท็ก (แท็กพาสซีฟ) ประกอบไปด้วยชิพอาร์เอฟไอดีและสายอากาศ ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้ไปเป็นพลังงานสำหรับชิพอาร์เอฟไอดี และส่งข้อมูลดิจิทัลแฝงไปกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล

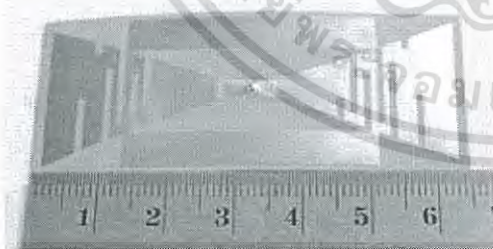
สายอากาศแท็กจะมีส่วนที่ยึดติดไว้กับชิพโดยที่ ชิพจะประกอบไปด้วยวงจรที่ใช้ในการเปลี่ยนแรงดันขนาดเล็กไปเป็นแรงดันกระแสตรงขนาดใหญ่เพื่อที่จะป้อนให้แก่ตัวชิพ ซึ่งโดยส่วนมากจะ

ประกอบไปด้วยไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้อิมพีแดนซ์ของชิพไม่ได้มีเพียงแต่ส่วนจริงแต่จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบรีแอคทีฟ ในกรณีนี้เนื่องมาจากมีการใช้ไดโอดในชิพ อิมพีแดนซ์จึงค่อนข้างจะเป็นความจุไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นชิพองค์ประกอบความต้านทาน 15.87 โอห์ม และมีองค์ประกอบรีแอคทีฟ  $-j148.7$  โอห์ม ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของชิพจะเท่ากับ  $15.87-j148.7$  โอห์ม



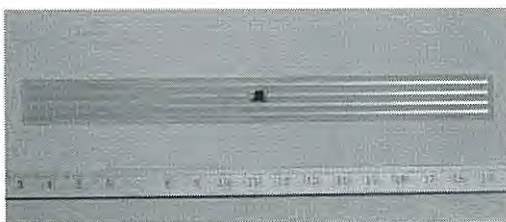
รูปที่ 4.1 สายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่เอชเอฟ [25]-[28]

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่เอชเอฟ โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศส่วนมากจะมีโครงสร้างพื้นฐานคือ สายอากาศไดโพล และสายอากาศขดกวน รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ใช้งานทั่วไปเชิงพาณิชย์ จากโครงสร้างของสายอากาศจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าถึงแม้ว่าสายอากาศจะมีรูปแบบและลักษณะที่แตกต่างกันออกไป แต่สายอากาศจะมีขนาดที่หลากหลาย โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีส่วนมากจะนำไปใช้ในการระบุตัวตนของสินค้าซึ่งขนาดของวัสดุก็จะมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กมากจนไปถึงขนาดที่ใหญ่มาก อย่างไรก็ตามเหตุผลหลักอีกส่วนหนึ่งนั่นคือสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีควรมีขนาดที่กะทัดรัดเนื่องมาจากเป็นการลดต้นทุนในการนำระบบอาร์เอฟไอดีไปใช้งาน ขนาดความยาวของสายอากาศนั้นจะเป็นสัดส่วนกับความยาวคลื่นของความถี่ที่เลือกนำมาใช้งาน โดยขนาดของสายอากาศแท่งโดยทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิพ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าการพิจารณารูปแบบของแท่งจึงพิจารณาจากขนาดของสายอากาศแท่ง โครงสร้างของสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีเป็นอีกหัวข้อวิจัยหนึ่งที่ได้รับค่านิยมโดยตัวอย่างของสายอากาศแท่งจากงานวิจัยที่สามารถใช้ได้ภายในความถี่ภายในประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 4.2



สายอากาศขดกวนแบบเรียว [29]

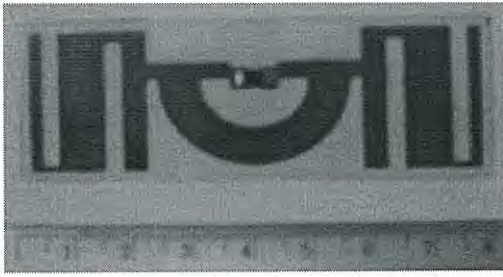
สายอากาศขนาด : 3.0x6.5 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : 0.8 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz : 73.2 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz



สายอากาศไดโพลกับเส้นพาราซิติค [30]

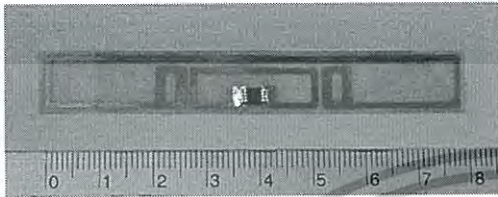
สายอากาศขนาด : 1.5x16.0 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : 0.64 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz: 98.6 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



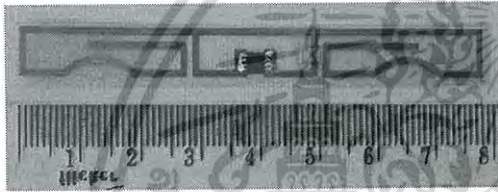
สายอากาศขดวงวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน [31]

สายอากาศขนาด : 3.0x8.0 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : 1.8 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz: 97.74 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz



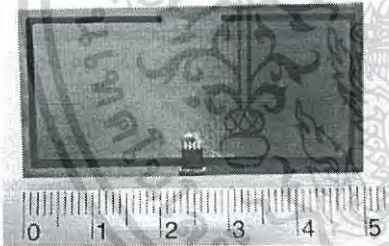
สายอากาศวงสี่เหลี่ยม [32]

สายอากาศขนาด : 1.0x7.8 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : 0.8 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz : 98.8 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz



สายอากาศขดวงวนและโครงสร้างโค้ง [33]

สายอากาศขนาด : 1.0x8.0 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : 0.91 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz: 99.9 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz



สายอากาศช่องเปิดรูปตัวซีสำหรับวัสดุโลหะ [34]

สายอากาศขนาด : 2.5x5.0 ตารางเซนติเมตร  
 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : รอบทิศทาง  
 อัตราขยายของสายอากาศ : -4 dBi  
 กำลังงานการส่งผ่าน @922.5 MHz: 99.9 %  
 ย่านความถี่ที่ใช้งาน : 920-925 MHz

## รูปที่ 4.2 สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่ออกแบบสำหรับมาตรฐานภายในประเทศ

### 4.2.1 การออกแบบสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดี

การใช้งานแท่งของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่แตกต่างกันออกไปทำให้ต้องมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาการออกแบบสายอากาศแท่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการออกแบบนั้นก็จะมีความสัมพันธ์กับการนำไปใช้งานของแท่ง โดยจะมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาสำหรับการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.1 ช่วงความถี่ที่ใช้งาน

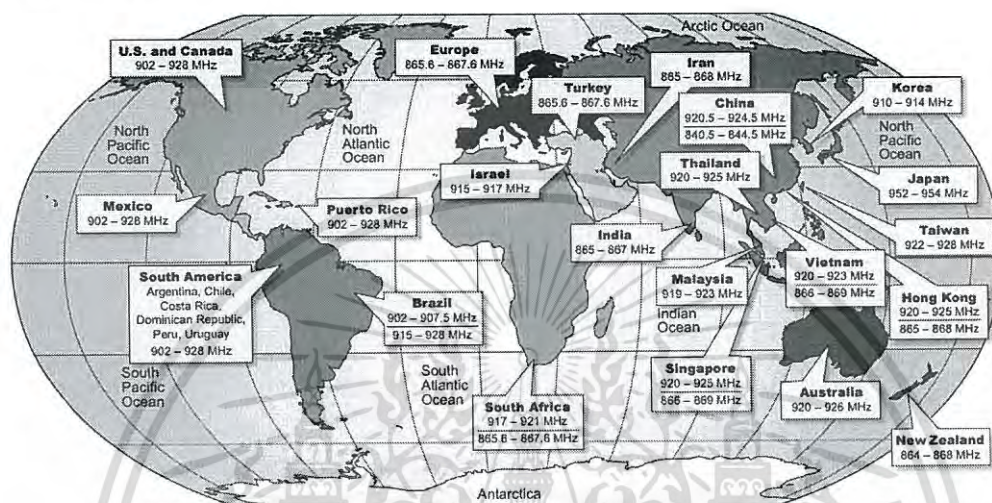
การเลือกใช้ช่วงความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดีนั้นมีความจำเป็นเนื่องจากในแต่ละช่วงความถี่จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันและทั้งยังมีรูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกันอีกด้วย โดยชนิดของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ที่ใช้งาน ในการใช้งานสำหรับย่านความถี่สูง (HF) และย่านความถี่ต่ำ (LF) จะนิยมใช้สายอากาศเส้นลวดขดเป็นวงก้นหอย (Spiral coil antenna) ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ จะนิยมใช้สายอากาศไดโพล สายอากาศขดคววนและสายอากาศแผ่นบางเรียบ ส่วนการเลือกช่วงความถี่ที่ใช้งานจะต้องขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทำงานและข้อกำหนดของแต่ละประเทศที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่และการประยุกต์ใช้งานอาร์เอฟไอดี

ย่านความถี่		LF 125 MHz	HF 13.56 MHz	UHF 860-960 MHz	Microwave 2.4 GHz, 5.8 GHz
ระยะการติดต่อสื่อสาร (แท็กชนิดพาสซีฟ)		น้อยกว่า 0.5 เมตร	ประมาณ 1 เมตร	1-10 เมตร	1 เมตร
การพัฒนาในปัจจุบัน		พัฒนาสมบูรณ์	พัฒนาจนเป็นที่ยอมรับ	เทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับ ความสนใจ	เทคโนโลยีใหม่ที่กำลัง พัฒนา
คุณลักษณะ โดยทั่วไป	ข้อดี	- คงทนต่อสภาพแวดล้อมที่นำไปใช้มากที่สุด - คงทนต่อน้ำและความชื้นมากที่สุด	- แท้กราคาต่ำกว่าย่านความถี่ต่ำ - ระยะการติดต่อไกลกว่าย่านความถี่ต่ำ - มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารระยะไกลมากที่สุด - เป็นย่านความถี่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในระบบอาร์เอฟไอดี	- แท้กมีราคาถูกกว่าย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง - ระบบตัวต้นของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว - ระยะการอ่านไกล - เป็นย่านความถี่ที่กำลังได้รับความนิยมในการใช้งาน	- ระบบตัวต้นของวัตถุได้อย่างรวดเร็วมากที่สุด - เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีอ่านแท็กจำนวนมากในคราวเดียวมากที่สุด - ความเร็วสูง
	ข้อเสีย	- สายอากาศขนาดใหญ่ - แท้กมีราคาสูง - ระยะการติดต่อต่ำ - ไม่สามารถอ่านแท็กจำนวนมากภายในครั้งเดียว - ความเร็วต่ำ	- ระยะการติดต่อสื่อสารต่ำกว่าย่านความถี่เอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟ - ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในกรณีอ่านแท็กเป็นจำนวนมากในคราวเดียว	- อ่อนไหวต่อวัสดุและสิ่งแวดลอมที่นำไปใช้ - มีความซับซ้อนในการส่งสัญญาณมากกว่าย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง	- อ่อนไหวต่อวัสดุและสิ่งแวดลอมที่นำไปใช้มากที่สุด
การติดต่อสื่อสาร		Inductive coupling	Inductive coupling	Back scattering	Back scattering
ราคาเครื่องอ่านข้อมูล		ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง
ราคาแท็กชนิดพาสซีฟ		สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
การนำไปประยุกต์ใช้งาน		- ระบบการควบคุมการเข้าออก - ระบบการจำหน่ายหน้าร้าน - ระบบปศุสัตว์ - ระบบการควบคุมกระบวนการผลิต	- ระบบการจัดการในห้องสมุด - ระบบการจัดการกระเป๋าสำหรับสายพานลำเลียง - ระบบสมาร์ตการ์ด	- ระบบการขนส่งสินค้า - ระบบการจ่ายเงินค่าธรรมเนียมบนทางด่วน - ระบบการควบคุมการเข้าออกที่จอดรถ	- ระบบการระบุกระเป๋า - ระบบการชำระเงินค่าธรรมเนียมบนทางด่วนโดยไม่ต้องหยุดรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่เอชเอฟเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ กำลังได้รับการพัฒนาทั้งยังมีความสามารถในการใช้งานที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการระบุวัตถุใน ระบบห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) การจัดการสินค้า เนื่องมาจากในย่านความถี่ดังกล่าวแท็กมี ราคาที่ไม่แพง และมีระยะเวลาติดต่อสื่อสารที่ค่อนข้างไกลเมื่อเทียบกับย่านความถี่อื่นๆ แต่อย่างไรก็ ตามในย่านความถี่เอชเอฟในแต่ละประเทศก็จะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยข้อกำหนดมาตรฐานในประเทศไทยตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบจะต้อง ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว



รูปที่ 4.3 ย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตสำหรับการใช้งานอาร์เอฟไอทีในย่านความถี่เอชเอฟในแต่ละ ประเทศ [35]

#### 4.2.1.2 ขนาดและรูปแบบ

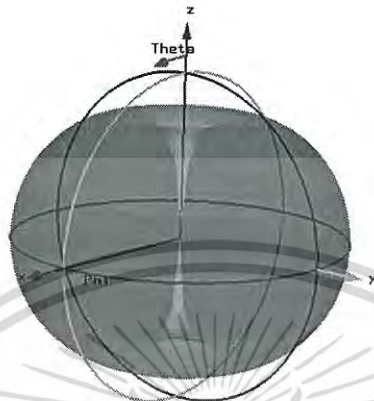
การนำแท็กไปใช้งานในระบบห่วงโซ่อุปทาน แท็กโดยทั่วไปจะมีขนาดที่ไม่เกิน 4 นิ้ว หรือโดยประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อให้มีขนาดกะทัดรัดและง่ายต่อการใช้งาน ในขณะที่คุณสมบัติ ของการเรโซแนนซ์เมื่อสายอากาศมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวหรือมีขนาดโดยประมาณ 16 เซนติเมตร จึงทำให้การออกแบบสายอากาศแท็กต้องมีการนำเทคนิคในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นการลด ขนาดทางกายภาพ โดยการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า เทคนิคที่สามารถนำไปใช้ลดขนาดของสายอากาศมี หลายหลายรูปแบบเช่นการการดัดงอหรือการขดขมวด เป็นต้น

เทคนิคการหักงอ เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถช่วยลดขนาดของสายอากาศให้เล็กลงได้ ซึ่ง จะขึ้นอยู่กับความยาวในการหักโค้งของสายอากาศ โดยการออกแบบแท็กมีความต้องการในเบื้องต้น คือ ต้องการให้แท็กมีขนาดที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้ เช่น การนำไปใช้เป็นแผ่นป้าย การนำไปใช้กับกล่องกระดาษหรือการนำไปติดกระดาษเดินทางสำหรับสายการบิน ซึ่งการออกแบบให้ สายอากาศที่มีขนาดเล็กนั้นก็มีความท้าทายสำหรับผู้ออกแบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากสายอากาศที่ มีขนาดเล็ก ก็จะมีความสามารถในการอ่านข้อมูลที่จำกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสายอากาศบ่งที่ใช้ใน ย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ จะส่งผลให้ ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ซึ่งผลทั้งหมดของการลดขนาดสายอากาศก็คือ การลดลงของ ระยะเวลาติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นการแสดงการพล็อตของสนามที่แพร่กระจายหรือกำลังงานที่แพร่กระจายที่เป็นฟังก์ชันของมุมในแต่ละทิศทางใดๆที่พิจารณา โดยจะต้องมีระยะที่มากกว่าบริเวณที่พิจารณาเป็นสนามระยะไกลของสายอากาศที่ทำการพิจารณา ตัวอย่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงในรูปที่ 4.4 โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบสามมิติ



รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติ ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบ สามมิติสามารถแสดงการแพร่กระจายของสนามที่เป็นฟังก์ชันของมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ใดๆก็ตามเป็นการยากและใช้เวลามากที่จะสามารถทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบ สามมิติ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบเพียงแต่ในระนาบที่ใช้งานหลักของสายอากาศเท่านั้น กล่าวคือ E-Plane และ H-Plane โดย E-Plane คือ ระนาบที่สนามไฟฟ้า ( $E$ ) วางตัวอยู่ (ขนานกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสนามไฟฟ้า) และ H-Plane คือ ระนาบที่สนามแม่เหล็ก ( $H$ ) วางตัวอยู่ (ตั้งฉากกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสนามไฟฟ้า) โดยสิ่งที่ควรคำนึงถึงคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-Plane นั้นเป็นการทดสอบสนามไฟฟ้า ไม่ใช่เป็นการทดสอบสนามแม่เหล็ก ซึ่งในการใช้งานแต่ละประเภทนั้นก็มีความต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดรอบตัวแสดงในรูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดชี้เจาะจงทิศทาง หรือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดครึ่งทรงกลม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในรูปแบบสองมิติ เพื่อแสดงถึงการแพร่กระจายของสนามของสายอากาศที่ออกแบบในระนาบหลักที่มีความสำคัญ โดยพิจารณาในระนาบ  $xy$  กล่าวคือระนาบมุมกวาด (Horizontal Plane)

### 4.2.1.4 ราคาและวัสดุ

แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ จะต้องมีราคาที่ไม่แพงเพราะแท็กจะต้องนำไปใช้จำนวนมากในแต่ละการใช้งาน ราคาของแท็กไม่ควรเกิน 1 US โดยข้อจำกัดนี้จะเป็นตัวกำหนดทั้งโครงสร้างและวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างแท็กที่ซึ่งจะประกอบไปด้วยไมโครชิพ วัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างแท็กได้แก่แถบหรือสายตัวนำไฟฟ้าและไดอิเล็กตริก (Dielectric) ในส่วนของไดอิเล็กตริกนั้นจะประกอบไปด้วยโพลีเอสเตอร์ที่ตัดได้ สำหรับการใช้งานในย่านความถี่สูง (HF) และ

ความถี่ต่ำ (LF) ส่วนวัสดุฐานรองที่เป็นแผ่นพิมพ์อย่างเช่น FR-4 สามารถนำไปใช้งานสำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะเป็นพวกทองแดง อลูมิเนียม และหมึกเงิน

แม้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอสายอากาศที่มีคุณสมบัติที่ดีเช่น สายอากาศมีขนาดเล็ก แบนด์วิดท์กว้าง อัตราขยายสูง แต่การเลือกใช้วัสดุใช้วัสดุที่มีราคาค่อนข้างสูงเช่น ทาโคนิค (Taconic) วัสดุแม่เหล็กเทียม ซึ่งการนำไปผลิตใช้งานจริงนั้นจะทำให้ราคาต่อหน่วยของสายอากาศค่อนข้างสูงตามไปด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้วัสดุฐานรองของสายอากาศคือ FR-4 เพื่อให้ได้สายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟที่สามารถหาวัสดุได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพง

#### 4.2.1.5 ความอ่อนไหวในการใช้งานร่วมกับวัตถุ

โดยปรกติแท่งจะนำไปติดตั้งเพื่อระบุตัวตนของวัตถุนั้นๆ ถ้าวัสดุดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว การทำงานของสายอากาศแท่งย่อมจะเกิดผลกระทบ โดยสมรรถนะในการทำงานของแท่งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันออกไปเช่น กล่องกระดาษที่มีสิ่งของภายในที่แตกต่างกัน จะมีประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อติดตั้งบนวัสดุที่มีการสูญเสียตัวอย่างเช่นขวดน้ำพลาสติกที่มีน้ำหรือน้ำมันบรรจุอยู่ หรือกระป๋องโลหะ โดยสายอากาศแท่งจะออกแบบให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการจะนำไปติดตั้งเพื่อให้ได้สมรรถนะในการทำงานที่ดีที่สุดหรือทำการออกแบบให้แท่งมีความอ่อนไหวต่อการใช้งานร่วมกับวัสดุแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันให้น้อยที่สุด

#### ตารางที่ 4.2 ความอ่อนไหวต่อวัสดุในแต่ละย่านความถี่ของระบบอาร์เอฟไอดี

	LF	HF	UHF	Microwave
น้ำและความชื้น	น้อย	ปานกลาง	มาก	มากที่สุด
โลหะ	น้อย	มากที่สุด	มาก	มาก

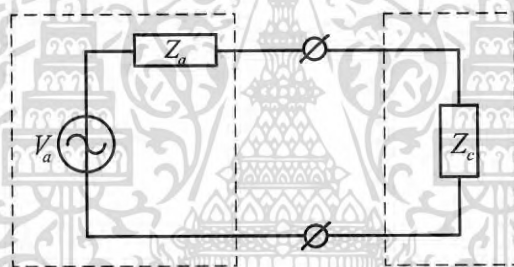
ในระบบห่วงโซ่อุปทานโดยปรกติแท่งจะติดตั้งบนกระดาษหรือกล่องพลาสติก ขนาดความหนาของกล่องมีความหนาโดยประมาณ 1-3 มิลลิเมตร โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของกระดาษแท่งมีค่าประมาณ 3 ดังนั้นเมื่อกระดาษแท่งที่มีความหนาดังกล่าวนำมาวางไว้ใกล้กับแท่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสายอากาศเพิ่มขึ้นและมีผลเล็กน้อยต่อความเหนียวนำของสายอากาศ ซึ่งจะให้ความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศเกิดเลื่อนเล็กน้อย ยกเว้นสายอากาศขนาดเล็กที่มีความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นต่ำ

โดยส่วนงานที่เกี่ยวข้องเนื่องในการทำวิจัยคือ การออกแบบสายอากาศแท่งให้สามารถนำไปใช้กับถังเหล็ก หรือถังน้ำมันขนาดใหญ่ โดยทำการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลและแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้สายอากาศแท่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสนิวอนันต์ ที่วางอยู่บนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะ ได้ถูกนำมาศึกษาและวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศแท่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุตัวนำที่เคลือบด้วยไดอิเล็กตริก ในส่วนของการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นนั้น แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลยวอนันต์ได้ถูกนำมาใช้โดยนำมาวิเคราะห์ร่วมกับอิมพีแดนซ์เชิงพื้นผิวที่เกิดจากการนำเอาวัสดุไดอิเล็กตริกมาหุ้ม

### 4.3 การแมตซ์ลิ่งยุค

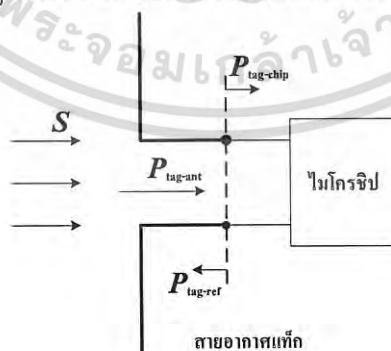
ความสัมพันธ์กันระหว่างชิพและสายอากาศแท่งนั้นเป็นหนึ่งในความสำคัญของการออกแบบแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ซึ่งกำหนดโดยการแมตซ์ลิ่งยุคระหว่างอิมพีแดนซ์ของชิพอาร์เอฟไอดี และสายอากาศซึ่งสามารถพิจารณาจากสมการของฟรีส (Friis formula) เพื่อที่จะให้เกิดการส่งผ่านพลังงานที่มากที่สุดจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับแหล่งจ่ายจะต้องมีความสัมพันธ์กัน

การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟในรูปแบบของการกระจายย้อนกลับของแท่งซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยสายอากาศและชิพ โดยชิพจะติดอยู่บนสายอากาศ โดยทั้งสายอากาศและชิพมีอิมพีแดนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน จากรูปวงจรเสมือนของแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อ  $Z_c = R_c + jX_c$  คืออิมพีแดนซ์เชิงซ้อน และ  $Z_a = R_a + jX_a$  คืออิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของสายอากาศแท่ง ซึ่งอิมพีแดนซ์ของชิพจะรวมไปถึงส่วนประกอบที่เป็นส่วนประกอบภายนอกของชิพ โดยทั้ง  $Z_a$  และ  $Z_c$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่นำไปใช้งาน นอกจากนี้อิมพีแดนซ์ของชิพ  $Z_c$  ยังเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานที่ดูดกลืน โดยปรกติสายอากาศจะมีการออกแบบให้แมตซ์อิมพีแดนซ์ต่อชิพที่ระดับกำลังงานขีดเริ่ม (Threshold power) ของชิพที่ต้องการ [6]



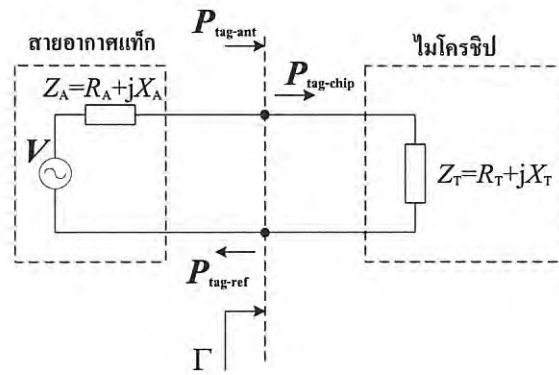
รูปที่ 4.5 วงจรเสมือนของแท่งในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงานสามารถกำหนดโดยอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ  $Z_a$  ของแท่งและอิมพีแดนซ์ของชิพ  $Z_T$  ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิพ



(ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 4.6 กำลังงานที่ส่งมายังแท่งและวงจรสมมูล

จากรูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป  $Z_T$  จะรวมผลของตัวล่องที่ใส่ชิป โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (4.1)$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (4.2)$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (4.3)$$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิป คือ

$$P_{tag-chip} = (1 - |\Gamma|^2) P_{tag-ant} \quad (4.4)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงานสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{tag-chip}}{P_{tag-ant}} = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (4.5)$$

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

$$P_{tag-chip-max} = P_{tag-ant} = S A_{e-max} \quad (4.6)$$

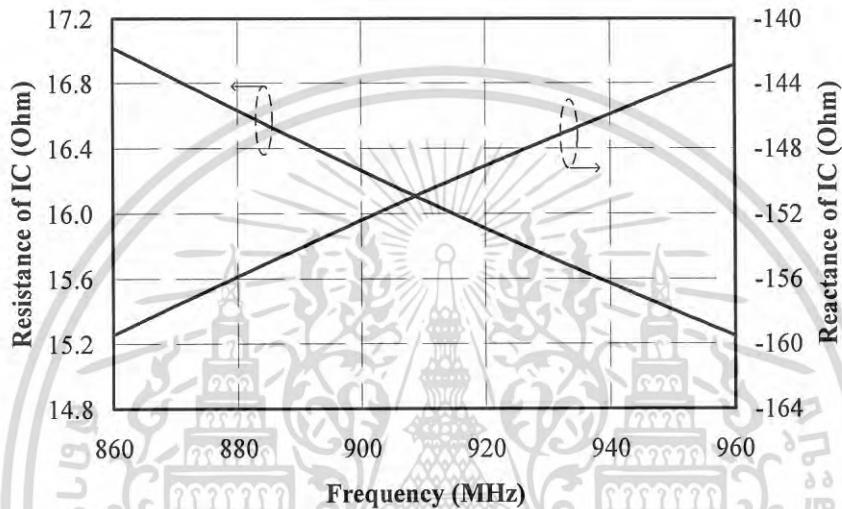
ในขณะที่สายอากาศลัดวงจรอิมพีแดนซ์ของชิปมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $Z_T = 0$ ) ส่งผลให้  $|\Gamma| = 1$  และ  $\tau = 0$  ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังชิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงาน (Power transmission coefficient) ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการแมตช์ของอิมพีแดนซ์กำหนดได้ดังนี้

$$RL(dB) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (4.7)$$

จากข้อมูลของผู้ผลิตชิพรุ่น G2XL ภายในรูปแบบของ TSSOP8 ค่า  $Q = 9.37$  ความจุไฟฟ้า = 1.16 พิโคฟารัด [7] สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ของชิพในช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อิมพีแดนซ์ของชิพในช่วงความถี่ที่ใช้งาน

ชิพมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.87 - j148.7$  โอห์ม การออกแบบสายอากาศแท้ก็ให้สามารถส่งผ่านกำลังงานได้สูงที่สุดนั้นสายอากาศแท้ก็ควรมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.87 + j148.7$  โอห์ม ที่ 922.5 MHz โดยโครงสร้างของสายอากาศแท้ก็จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการนำเอาระบบอาร์เอฟไอดีไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่าง เช่นขนาดของวัสดุที่นำไปประยุกต์ใช้งาน รูปแบบการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่นการนำเอาแท่งไปใช้กับวัสดุที่มีความชื้น หรือวัสดุที่เป็นโลหะ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศแท้ก็มีความสำคัญของระบบอาร์เอฟไอดีเป็นอย่างมาก

#### 4.4 การออกแบบและจำลองสายอากาศแท้ก็ช่องเปิดรูปตัวยู

ในการคำนวณเบื้องต้นที่ได้เปรียบเทียบกับระหว่างแบบรูปแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ( $\alpha = 2\lambda$ ,  $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\mu = 1$ ) ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางบนตัวนำทรงกระบอกสามารถยืนยันว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลมีการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่มีการลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำข้อดีของการใช้แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลที่วางอยู่บนตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

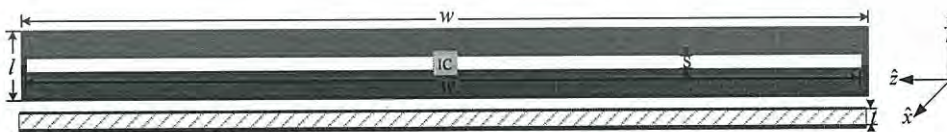
ทรงกระบอกที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเสาอากาศเปิดติดกับวัสดุตัวนำทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกเช่นชั้นสีที่ทาลงบนตัวถัง เป็นต้น

เนื่องจากงานที่ได้นำเสนอในเบื้องต้นเมื่อนำแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล มาใช้กับทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยสารไดอิเล็กทริกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ดีกว่า ดังนั้นในส่วนของงานที่สนใจในการออกแบบคือเสาอากาศที่มีคุณลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความสมมาตรและลำคลื่นไม่แตก (Split beam)

เนื้อหาในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอเสาอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่ยูเอชเอฟขนาดเล็กช่องเปิดรูปตัวยูที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศกล่าวคือตั้งแต่ 920 MHz ถึง 925 MHz สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 โดยมีความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร การจำลองเสาอากาศใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพงมากทั้งยังสามารถนำไปสร้างได้โดยง่ายซึ่งจะมีการศึกษาถึงโครงสร้างเริ่มต้นของเสาอากาศที่จะนำมาออกแบบ และโครงสร้างของเสาอากาศที่มีความเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับชิพรุ่น NXP G2XL โดยวัตถุประสงค์ในเนื้อหาของบทนี้คือการให้ได้มาซึ่งเสาอากาศที่มีขนาดจำกัดภายใต้ข้อกำหนดเบื้องต้นแต่ยังสามารถมีสมรรถนะในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เพื่อให้เสาอากาศสามารถส่งต่อกำลังงานไปยังชิพให้ได้สูงที่สุดนั้น เสาอากาศแท่งควรที่จะแมตช์สังยุคกับชิพที่จะนำมาออกแบบ ดังนั้นจากการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของชิพข้างต้นทำให้เราทราบว่าอิมพีแดนซ์ของเสาอากาศแท่งที่พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz ควรมีค่าที่ใกล้เคียงกับ  $15.87 + j148.7$  โอห์ม การออกแบบเสาอากาศแท่งในเบื้องต้นนั้นจะเป็นการนำเสาอากาศช่องเปิดมาพิจารณาเป็นส่วนแรก ออกแบบและจำลองผลเสาอากาศใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) เนื่องจากการนำเสาอากาศแท่งไปใช้ร่วมกับถังน้ำมัน ที่มีพื้นผิวเป็นโลหะเคลือบด้วยชั้นสี การจำลองเสาอากาศแท่งในโปรแกรมจำลองจะจำลองร่วมกับระนาบกราวด์ที่เป็นวัสดุตัวนำสมบูรณ์

ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้วว่าสนามไฟฟ้าจากเสาอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะพื้นฐานของแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลเมื่อพิจารณาในบริเวณขอบเขตเงาจะให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าแท่งที่มีคุณลักษณะอยู่บนพื้นฐานของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้างดเช่นเสาอากาศไดโพล ดังนั้นในหัวข้อนี้เสาอากาศเริ่มต้นจึงมีโครงสร้างเสาอากาศจะอยู่บนพื้นฐานของเสาอากาศช่องเปิดขนาดเล็กเพื่อให้เสาอากาศแท่งมีคุณลักษณะที่คล้ายคลึงกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล โดยโครงสร้างของเสาอากาศต้นแบบแสดงในรูปที่ 4.8

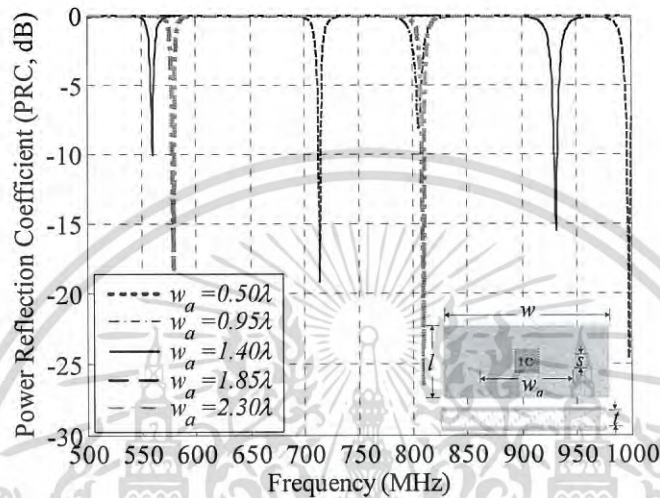


รูปที่ 4.8 โครงสร้างเสาอากาศเริ่มต้น

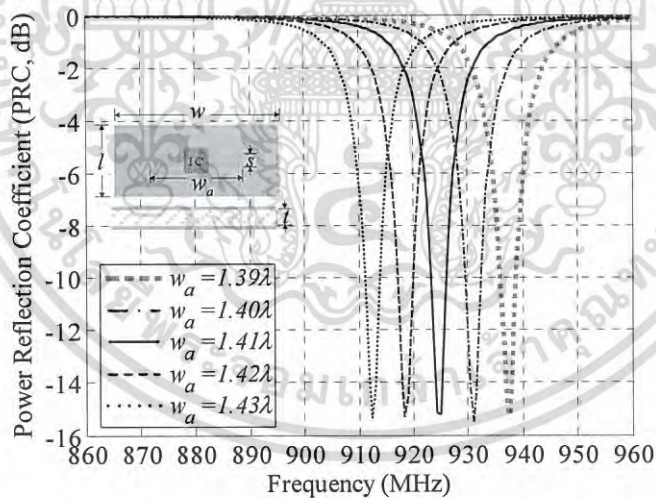
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

ในรูปที่ 4.8 สายอากาศเริ่มต้นมีความยาว  $w$  และกว้าง  $l$  โดยมีความยาวของช่องเปิด  $w_o$  และความกว้างของช่องเปิดมีขนาด  $s$  โดยการกำหนดความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศจะกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับชิพที่นำมาใช้ (NXP G2XL) สายอากาศออกแบบบนฐานรองชนิด FR 4 ซึ่งมี  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร พารามิเตอร์  $w_o$  ได้ทำการเปลี่ยนแปลงเพื่อหาอิมพีแดนซ์สังยุค  $w_o$  จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $0.5\lambda$  ถึง  $2.3\lambda$  ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก)



(ก) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_o$  ( $0.50\lambda$ - $2.30\lambda$ )



(ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_o$  จาก  $(1.39\lambda$ - $1.41\lambda)$

รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศตั้งต้นเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_o$

ในรูปที่ 4.9 (ก) แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน ((Power reflection coefficient :PRC) [36]-[38] เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_o$  ความถี่ จาก 500 MHz ถึง 1000 MHz จากรูปพบว่าสายอากาศจะเรโซแนนซ์เข้าใกล้กับความถี่ที่ต้องการ กล่าวคือ 922.5 MHz เมื่อ  $w_o = 1.4\lambda$  ดังนั้นเพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานที่ความถี่ 922.5 MHz ขนาดของ  $w_o$  จะมี

การเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในช่วง  $1.39\lambda$  ถึง  $1.43\lambda$  เพื่อที่จะหาจุดที่ทำให้เกิดการแมตช์ของอิมพีแดนซ์มากที่สุด พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อ  $w_0$  เท่ากับ  $1.41\lambda$  สายอากาศจะแมตช์ที่ความถี่ 922.5 MHz มากที่สุด

ความหมายของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน นั้นแตกต่างจาก  $|S_{11}|$  โดย  $s$  คือสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนเชิงกำลังงาน (Power wave reflection coefficient :PWRC) [30] ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$s = \frac{Z_L - Z_s^*}{Z_L + Z_s} \quad (4.8)$$

เมื่อ  $Z_L$  คืออิมพีแดนซ์ของโหลด (อิมพีแดนซ์ของชิพ)  $Z_s$  คืออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายหรือกล่าวคือแท็กอิมพีแดนซ์  $Z_s^*$  คืออิมพีแดนซ์สังยุคเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน ( $|s|^2$ ) หรือ ตัวย่อคือ PRC สามารถคำนวณได้จาก

$$|s|^2 = \left| \frac{Z_L - Z_s^*}{Z_L + Z_s} \right|^2, \quad 0 \leq |s|^2 \leq 1 \quad (4.9)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงาน (power transmission coefficient ( $\tau$ )) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = (1 - |s|^2) \quad (4.10)$$

เมื่อ

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad (4.11)$$

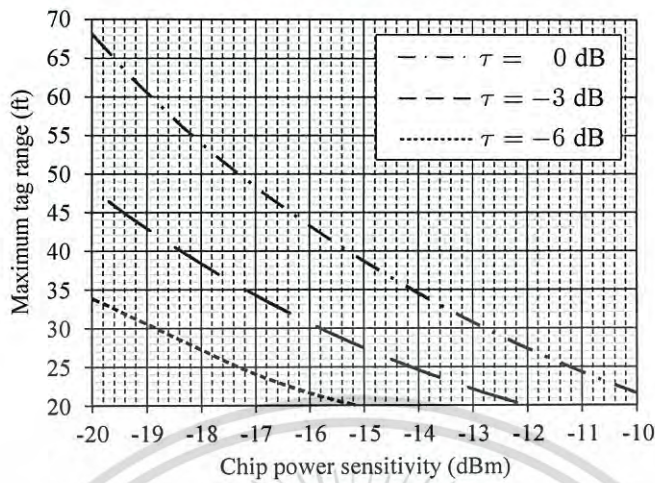
$R_c$  และ  $R_a$  คือความต้านทานของชิพและของสายอากาศแท็ก ระยะการอ่านได้ไกลที่สุดจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.12) เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น  $P_t$  คือกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูล  $G_r$  คืออัตราขยายของสายอากาศ และ  $P_{th}$  คือกำลังงานขีดเริ่มของชิพ

$$D_{tag} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (4.12)$$

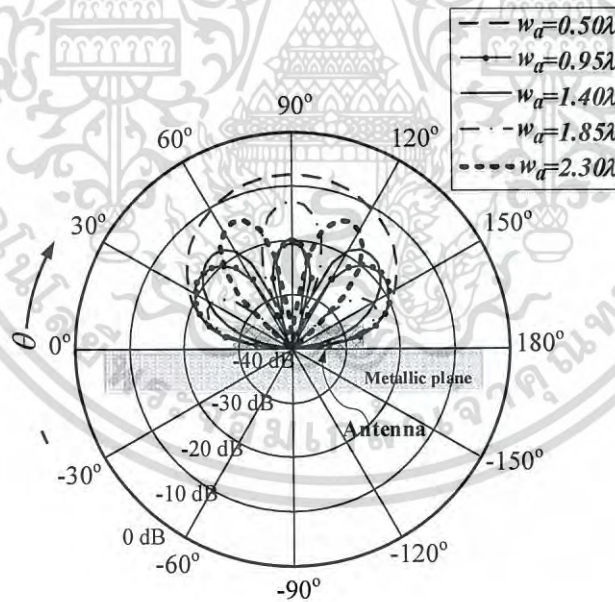
ในรูปที่ 4.10 แสดงระยะการอ่านได้ของแท็ก ( $D_{tag}$ ) ต่อกำลังงานขีดเริ่ม ( $P_{th}$ ) ของชิพเมื่อมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (PRC) ต่างกัน โดยเป็นการแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงาน ( $\tau$ ) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $\tau = -3$  dB หรือ 0.5 ระยะการอ่านได้จะลดลงประมาณ 40% หรือกล่าวคือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเท่ากับ -3 dB โดยหลักเกณฑ์นี้สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการเป็นข้อกำหนดของสายอากาศแท็กที่สร้างบนวัสดุที่เป็นโลหะและสายอากาศแท็กที่สร้างบนวัสดุชนิดอื่นๆ ดังปรากฏในบทความตัวอย่างดังนี้ [38] - [41]

ในรูปที่ 4.11 (ก) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง  $w_0$  โดยพบว่าเมื่อ  $w_0$  มีค่ามากกว่า  $0.5\lambda$  ลำคลื่นของสายอากาศจะแตกออกไม่ชี้ทิศทางเดียว โดยเมื่อพิจารณาที่  $w_0$  เท่ากับ  $1.41\lambda$  จะพบว่าลำคลื่นของสายอากาศแตกออกตั้งนั้นถึงแม้ว่าที่ความยาว

$w_0$  มีขนาดเท่ากับ  $1.41\lambda$  จะทำให้สายอากาศแท่งเกิดการแมตซ์ที่ดีที่สุดที่ความถี่ 922.5 MHz สายอากาศแท่งที่ได้จะยังคงมีขนาดใหญ่และลำคลื่นของสายอากาศจะแตกออก

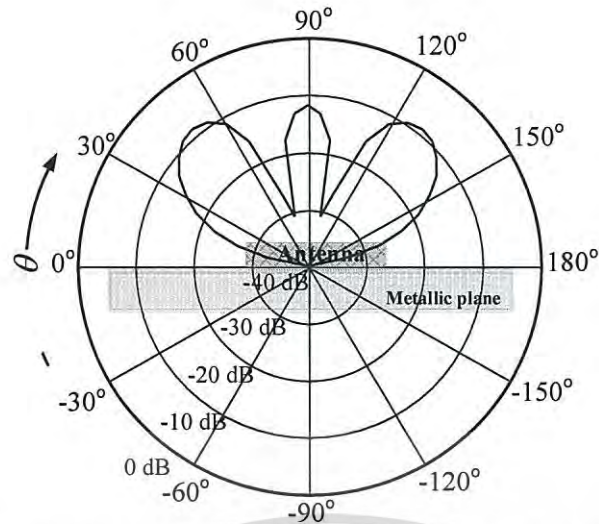


รูปที่ 4.10 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการอ่านได้ไกลที่สุดในหน่วยฟุต (ft) และกำลังงานเริ่มต้นของชิป (dBm) เมื่อสัมพันธ์ประสิทธิภาพการส่งผ่านเชิงกำลังงานต่างกัน ( $\tau$ ) (โดยกำหนดให้การทดสอบอยู่ในสภาวะช่องว่างอิสระ (Free space) กำลังงานที่ส่งออกจากเครื่องส่งและสายอากาศมีค่าเท่ากับ 4 W EIRP สายอากาศแท่งมีอัตราขยาย 2 dBi โดยโพลาริซของสายอากาศแท่งและเครื่องอ่านแมตซ์กัน [37])



(ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_0$  ( $0.50\lambda - 2.30\lambda$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



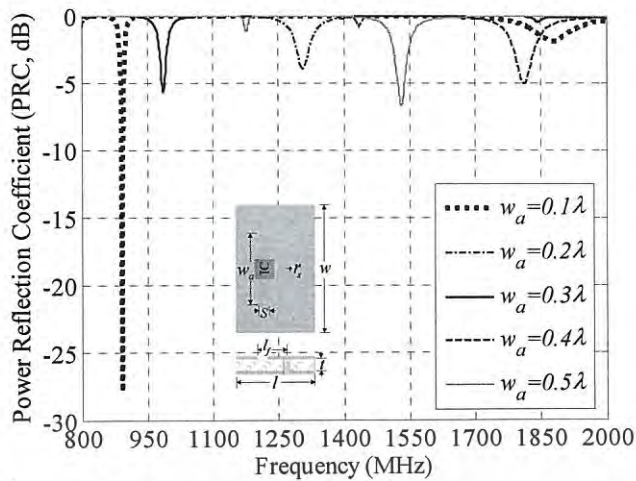
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อ  $w_a$  เท่ากับ  $1.41 \lambda$

**รูปที่ 4.11** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$

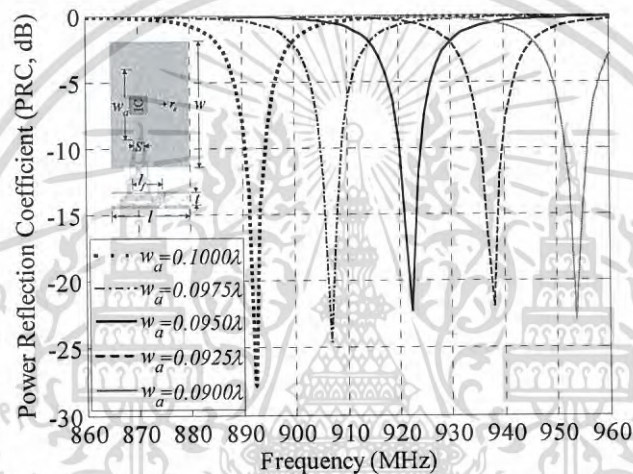
เนื่องจากหลักการเบื้องต้นของการออกแบบสายอากาศแท่งที่จะต้องคำนึงถึงคือขนาดของสายอากาศจะต้องมีขนาดที่ไม่ใหญ่เทอะทะ ดังนั้นจึงได้มีการนำแท่งลวดวงจรมาใช้ในการปรับปรุงขนาดของสายอากาศไปพร้อมกันกับการปรับปรุงอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง จากรูปที่ 4.11 (ก) จะพบว่าสายอากาศช่องเปิดไม่ควรมีความยาวกว่า  $0.5 \lambda$  เนื่องจากหากความยาวของสายอากาศมากกว่าความยาวดังกล่าว ลำคลื่นของสายอากาศจะแตกออกไปชี้ทิศทางที่ต้องการ

ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มโครงสร้างของแท่งลวดวงจรไปในสายอากาศแล้ว พารามิเตอร์  $w_a$  ของสายอากาศจะปรับเปลี่ยนให้อยู่ในช่วง  $0.1 \lambda$  ถึง  $0.5 \lambda$  ซึ่งจะไม่เกินความยาว  $0.5 \lambda$  โดยสัมพันธ์กับการสะท้อนเชิงกำลังงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาว  $w_a$  ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ก) โดยจากรูปพบว่าที่ความยาว  $w_a = 0.1 \lambda$  สายอากาศเรโซแนนซ์เข้าใกล้กับความถี่ 922.5 MHz หรือประมาณ 893 MHz หลังจากนั้นความยาวของสายอากาศจะมีการปรับเปลี่ยนอีกครั้ง เพื่อหาความยาว  $w_a$  ที่สายอากาศจะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 922.5 MHz โดยความยาวจะทำการปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง  $w_a$  จากรูปที่ 4.12(ข) พบว่าเมื่อ  $w_a = 0.095 \lambda$  สายอากาศเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 922.5 MHz

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มุมด้านหน้าของสายอากาศ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยุบตัวลงในด้านหน้าโดยสายอากาศจะมีอัตราขยายที่มุมด้านหน้าเพียง -12 dB

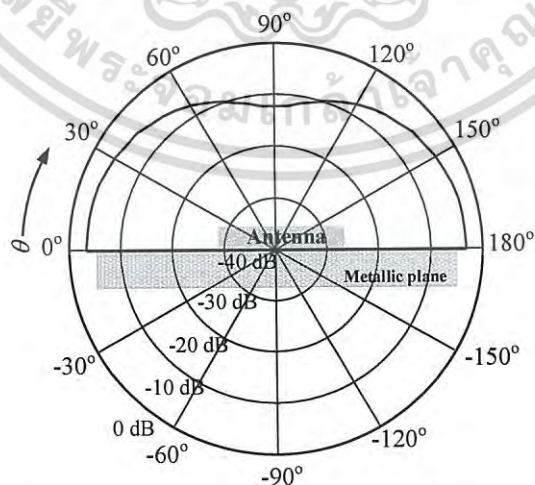


(ก) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ( $0.1\lambda - 0.5\lambda$ )



(ข) สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ( $0.1\lambda - 0.09\lambda$ )

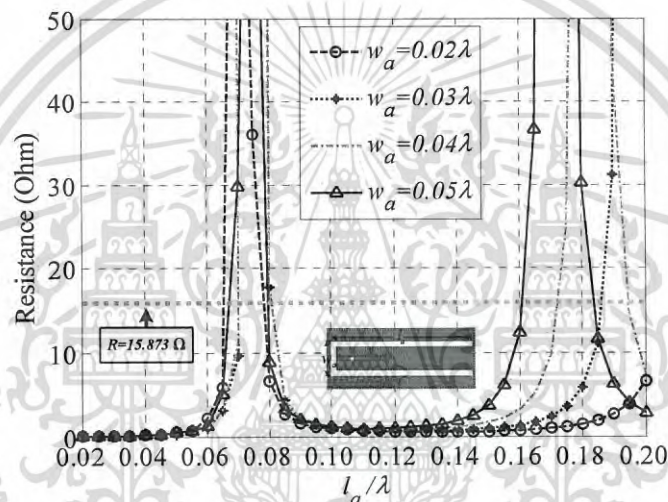
รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ของสายอากาศเริ่มต้นที่มีแท่งลวดวงจร



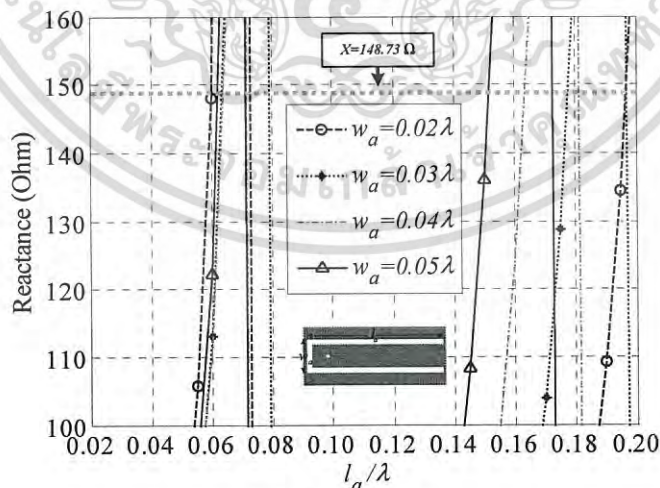
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นที่มีแท่งลวดวงจรเมื่อพารามิเตอร์  $w_a$  เท่ากับ  $0.095\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศพร้อมกับการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแผ่นแพร่กระจายคลื่น จึงทำการเพิ่มพื้นที่แผ่นที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยในส่วนของแล้วพบว่าเมื่อทำการขยายขนาดของช่องเปิดและแผ่นระนาบที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นในระนาบแนวนอนที่เกินกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่นจะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแตกออกไม่ชี้ทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นการเพิ่มความยาวของช่องเปิดและเพิ่มขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่นความยาวของช่องเปิด ( $l_a$ ) จะเพิ่มไปในทิศทางตั้งฉากกับความยาวช่องเปิดเดิม หลังจากนั้นพารามิเตอร์  $l_a$  และ  $w_a$  จะมีการปรับเปลี่ยนอีกครั้งเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับมีอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมกับชิพและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่แตกออก โดย  $w_a$  จะมีการปรับเปลี่ยนระหว่าง  $0.02\lambda$  ถึง  $0.05\lambda$  และ  $l_a$  จะปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วงตั้งแต่  $0.02\lambda$  ถึง  $0.20\lambda$  รูปที่ 4.14 แสดงอิมพีแดนซ์และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ตั้งแต่  $0.02\lambda$  ถึง  $0.05\lambda$ ) และ  $l_a$  ตั้งแต่  $0.02\lambda$  ถึง  $0.05\lambda$

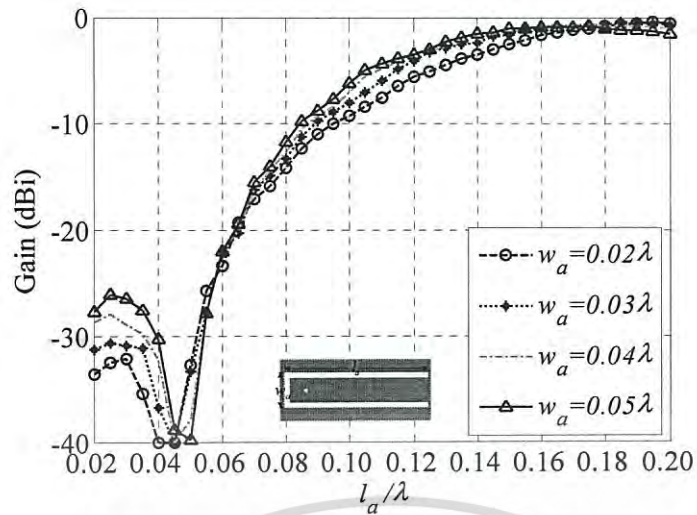


(ก) ความต้านทาน



(ข) รีแอกแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

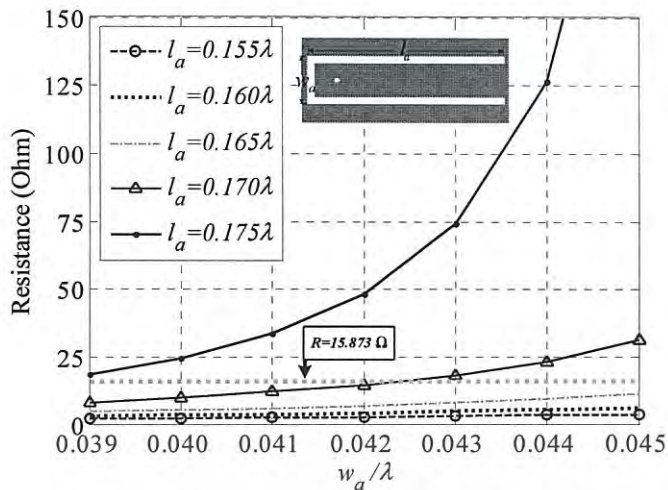


(ค) อัตราขยาย

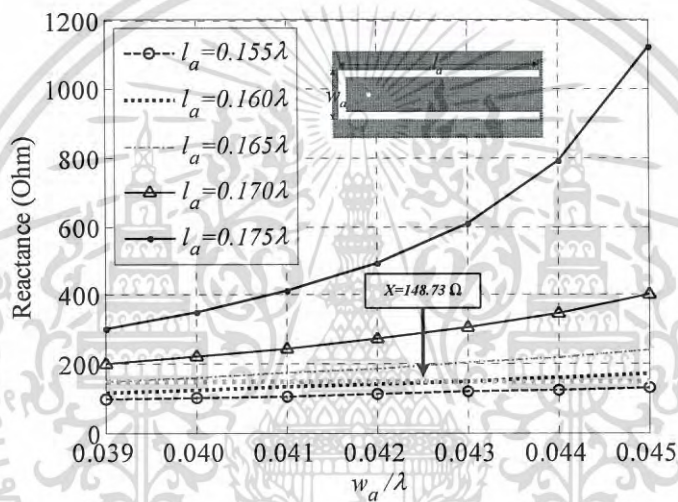
รูปที่ 4.14 อิมพีแดนซ์และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ( $0.02\lambda - 0.05\lambda$ ) และ  $l_a$  ( $0.02\lambda - 0.2\lambda$ )

รูปที่ 4.14 (ก) แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ระหว่าง  $0.02\lambda$  ถึง  $0.05\lambda$  และ  $l_a$  ระหว่าง  $0.02\lambda$  ถึง  $0.2\lambda$  ในรูปที่ 4.14 (ก) เส้นสีฟ้าแสดงความต้านทานของซีพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz และรูปที่ 4.14 (ข) เส้นสีฟ้าแสดงเส้นแมตซ์ส่งยุคของซีพิจที่ความถี่ 922.5 MHz ในรูปที่ 4.14 (ค) แสดงอัตราขยายของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  และ  $l_a$  ดังที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น โดยจากรูปจะพบว่าอัตราขยายของสายอากาศในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาว  $w_a$  และ  $l_a$  เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นอัตราขยายจะลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นในช่วง  $l_a$  ตั้งแต่  $0.16\lambda$  ถึง  $0.20\lambda$  หลังจากนั้นอัตราขยายจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเริ่มคงประมาณ -1 dBi ที่ในช่วง  $l_a$  ตั้งแต่  $0.16\lambda$  ถึง  $0.20\lambda$  ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากรูปที่ 4.14 (ก)-(ค) จะทำให้สามารถตัดสินใจเลือกความยาว  $w_a$  และ  $l_a$  ที่ทำให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงอิมพีแดนซ์ที่แมตซ์กับอิมพีแดนซ์ของซีพิจพร้อมกับมีอัตราขยายที่มีความเหมาะสม โดยจุดที่  $w_a$  เท่ากับ  $0.04\lambda$  และ  $l_a$  เท่ากับ  $0.165\lambda$  สายอากาศจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $5.22 + j159.9$  โอห์ม พร้อมกับมีอัตราขยายเท่ากับ -0.804 dBi พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz

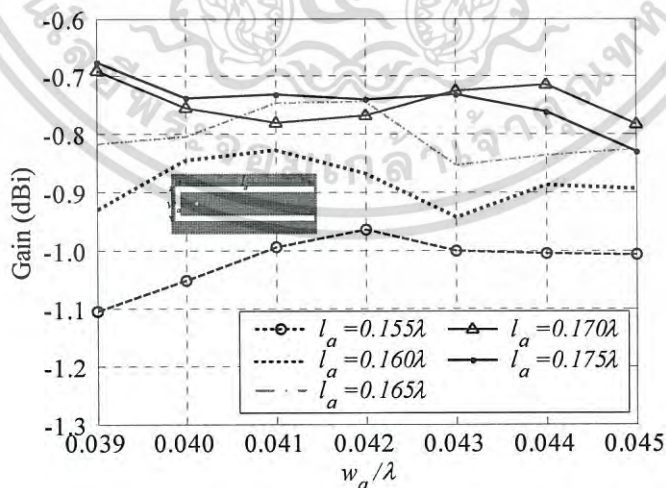
หลังจากนั้นจะเป็นการปรับพารามิเตอร์  $l_a$  และ  $w_a$  ของสายอากาศ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก)-(ค) โดยความกว้าง  $w_a$  จะมีการปรับเปลี่ยนในช่วงตั้งแต่  $0.039\lambda$  ถึง  $0.045\lambda$  และ  $l_a$  จะมีการปรับเปลี่ยนในช่วงตั้งแต่  $0.155\lambda$  ถึง  $0.175\lambda$



(ก) ความต้านทาน



(ข) รีแอกแตนซ์

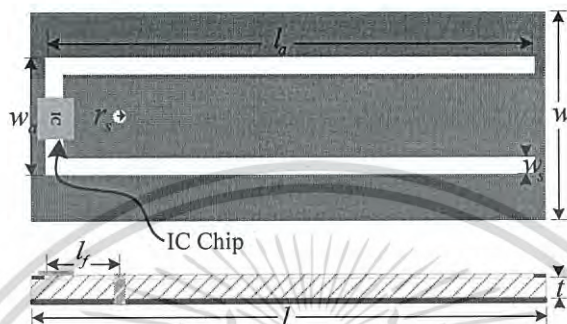


(ค) อัตราขยาย

รูปที่ 4.15 อิมพีแดนซ์และอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $w_a$  ( $0.039\lambda - 0.045\lambda$ ) และ  $l_a$  ( $0.155\lambda - 0.175\lambda$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 (ก)-(ข) พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือพารามิเตอร์  $w_a$  และ  $l_a$  ที่  $0.039 \lambda$  และ  $0.165 \lambda$  จากความยาวและความกว้างดังกล่าวจะได้สายอากาศที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $-0.8$  dBi และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $4.6 + j148.8$  โอห์ม ที่ความถี่  $922.5$  MHz จากนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของสายอากาศจะใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) โดยขนาดของสายอากาศที่ได้แสดงในรูปที่ 4.16 และพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดแสดงในตารางที่ 4.3 โดยผลจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จะแสดงในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.16 โครงสร้างของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู

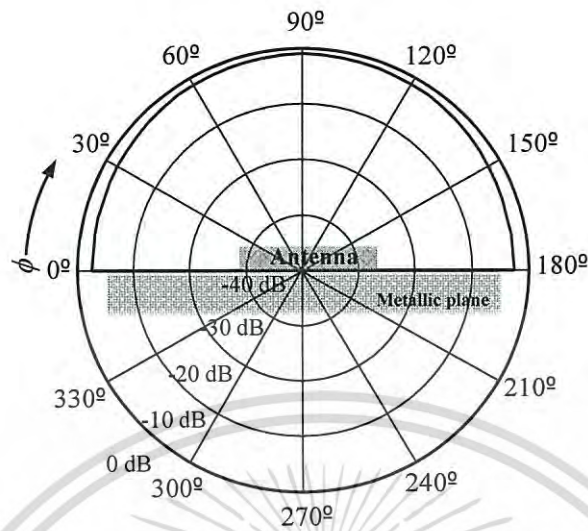
พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า ( $\lambda$ )
$l$	60.0	0.1845
$l_a$	57.0	0.1753
$l_f$	4.1	0.0123
$w$	25.0	0.0769
$w_a$	14.0	0.0431
$w_s$	2.0	0.0062
$t$	3.1	0.0095
$r_s$	0.4	0.0012

สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูมีขนาดความยาว ( $l$ ) เท่ากับ 60 มิลลิเมตร และมีขนาดความกว้างเท่ากับ ( $w$ ) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร หรือ  $0.1845 \lambda \times 0.0769 \lambda$  จำลองบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา ( $t$ ) เท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร สายอากาศสร้างบนระนาบกราวด์เพื่อลดผลกระทบของพื้นผิวโลหะที่นำไปใช้ ขนาดของช่องเปิดมีขนาด ( $w_s$ ) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร โครงสร้างแท่งลัดวงจรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $r_s$ ) เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร

#### 4.4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

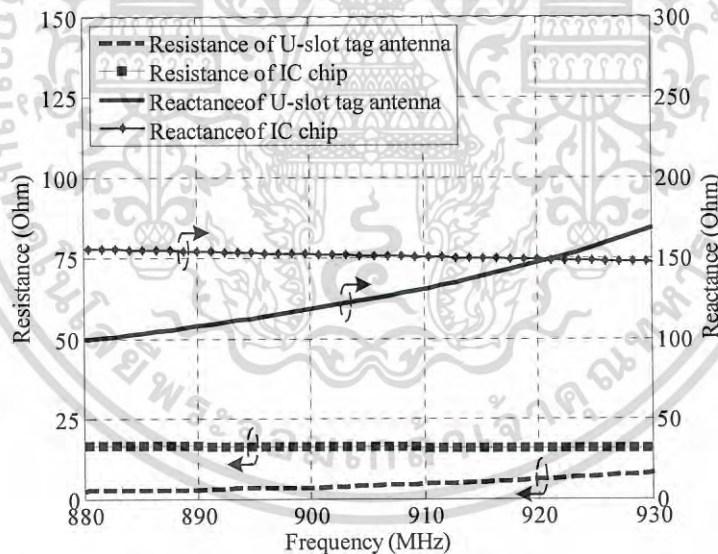
รูปที่ 4.17 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู โดยสายอากาศจะทำการจำลองบนพื้นผิวตัวนำสมบูรณ์มีขนาดความกว้างและยาวอนันต์ เมื่อพิจารณาแบบรูปการ

แพร์กระจายคลื่นในระนาบ xy จะพบว่าสายอากาศจะชี้ทิศทางเดียวมีลำคลื่นที่สมมาตรและลำคลื่นไม่แตกออก พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งรูปตัวยูที่ความถี่ 922.5 MHz

#### 4.4.3 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

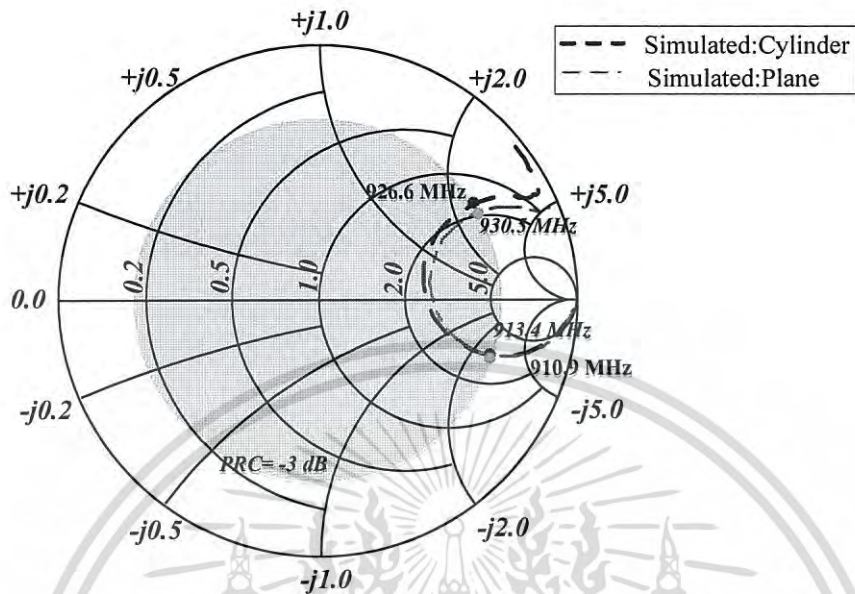


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชิพรุ่น NXP G2XL [23] ซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $15.873-j148.7$  โอห์ม พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz ดังนั้นสายอากาศแท่งควรออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงแมตซ์สังยุคกับชิพที่นำมาใช้โดยสายอากาศควรมีอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับ  $15.873+j148.7$  โอห์ม พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz โดยหลังจากทำการออกแบบสายอากาศและทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปรียบเทียบกับชิพแสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

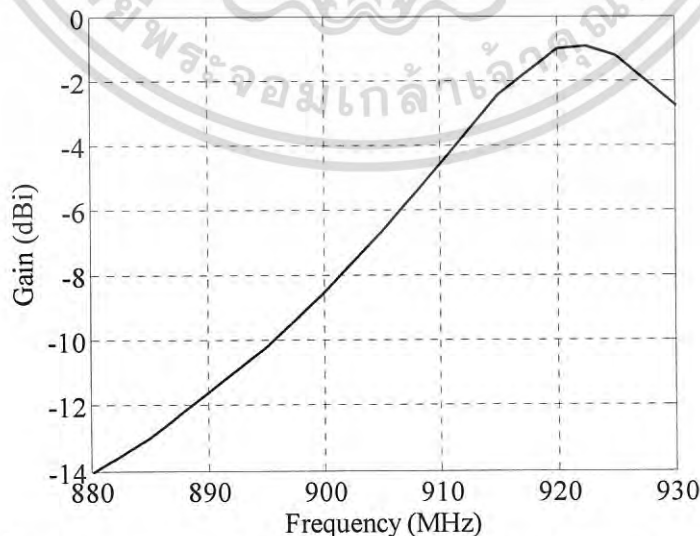
รูปที่ 4.18 โดยจากกราฟจะพบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แท้ก็เปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์สังยุคของซีพที่นำมาใช้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz สายอากาศที่ทำการจำลองมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $6.5+j151.67$  โอห์ม



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสายอากาศในรูปแบบแผนภูมิสมิท (Smith chart)

#### 4.4.4 อัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู

รูปที่ 4.20 แสดงอัตราขยายของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อทำการจำลองบนวัสดุตัวนำ สมบูรณ์ขนาดกว้างยาวอนันต์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 880 ถึง 930 MHz โดยพบว่าอัตราขยายของสายอากาศเมื่อพิจารณาที่ความถี่ภายในประเทศกล่าวคือตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz สายอากาศจะมีอัตราขยายประมาณ -1 dBi และเมื่อพิจารณาอัตราของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz สายอากาศจะมีอัตราขยายประมาณ -0.9 dBi

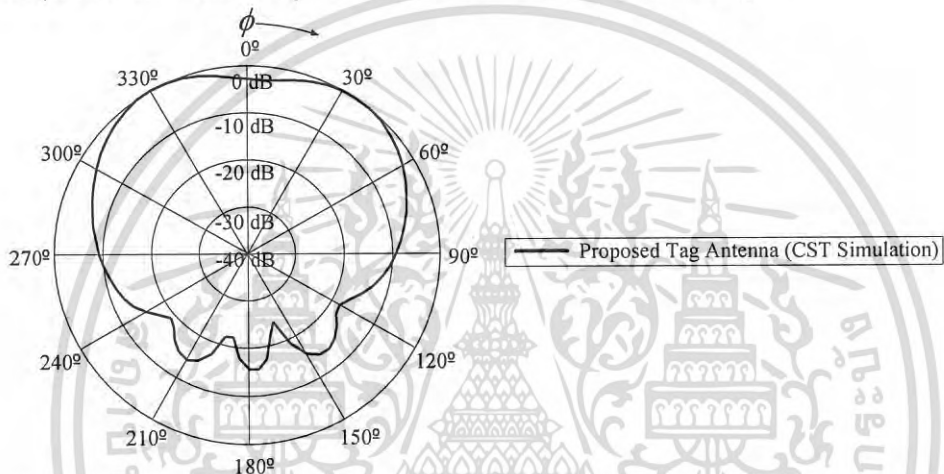


รูปที่ 4.20 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

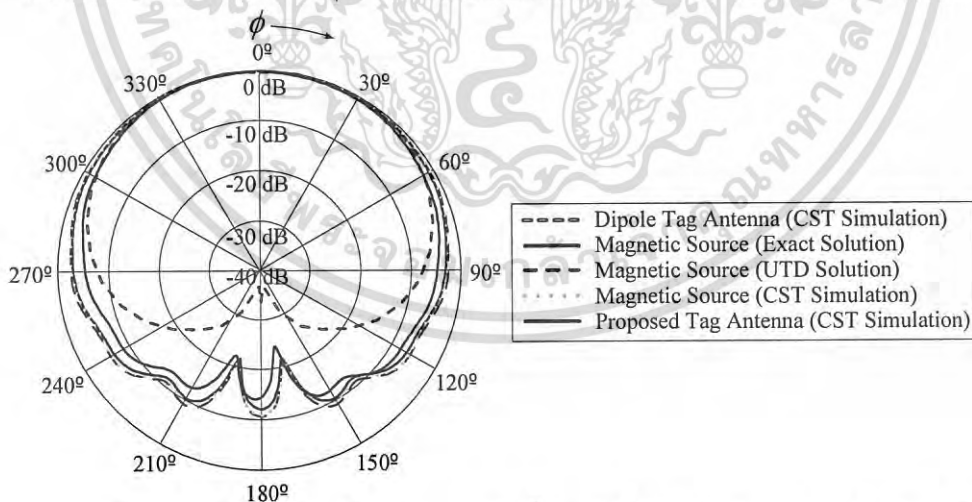
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการจำลองสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูร่วมกับพื้นผิวตัวนำและวัสดุทรงกระบอก

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสายอากาศแท่งช่องเปิดขนาดรูปตัวยูที่ได้ทำการออกแบบร่วมกับทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ รัศมี  $0.89\lambda$  ที่เคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon) ( $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\mu_r = 1$ ) หนา  $0.002\lambda$  ด้วยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากผลเฉลยสมการคลื่นและผลที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กยวอนันต์ที่วางอยู่บนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดรัศมี  $0.89\lambda$  ที่เคลือบด้วยเทฟลอน ( $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\mu_r = 1$ ) หนา  $0.002\lambda$  เพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศแท่งช่องเปิดขนาดเล็กที่ออกแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ไม่ถูกลดทอนจากการนำไปติดตั้งบนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงในระนาบ xy



(ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร



(ข) สายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

**รูปที่ 4.21** ผลการคำนวณเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy เมื่อแหล่งกำเนิดวางอยู่บนทรงกระบอกที่เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริกตัวนำทรงกระบอกที่หุ้มด้วยเทฟลอน ( $\epsilon_r = 2.1$ ,  $\mu_r = 1$ )

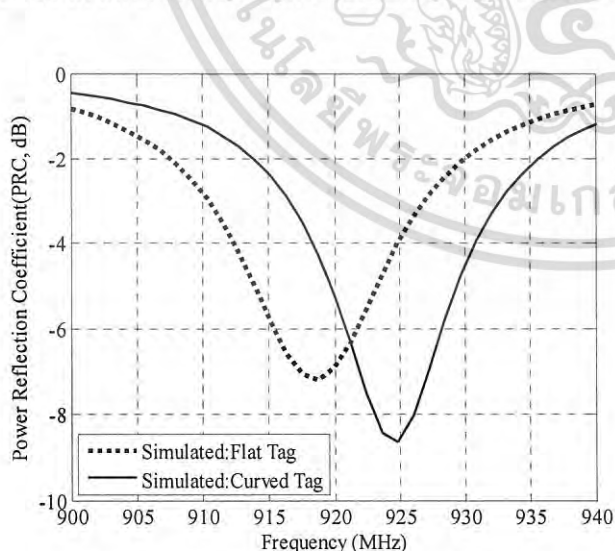
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดคือสายอากาศแท่งช่องเปิด รูปตัวยว้างบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอก

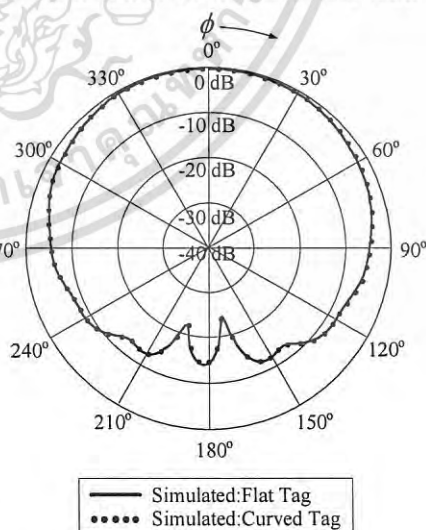
รัศมี	ความหนา $t$	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง:นาที:วินาที) (Intel Core i7-2700K CPU @ 3.50 GHz RAM 16.0 GB)		
		โปรแกรมจำลอง ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST)	ผลเฉลยสมการคลื่น	ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิง เรขาคณิตสม่ำเสมอ
$0.89 \lambda$	$0.002 \lambda$	4:33:34	0:3:14	0:0:29
$2.00 \lambda$	$0.02 \lambda$	9:22:49	0:3:14	0:0:29

#### 4.6 ผลการจำลองสายอากาศโค้งช่องเปิดรูปตัวยว้างร่วมกับวัสดุทรงกระบอก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการติดตั้งสายอากาศบนพื้นผิวทรงกระบอกเคลือบเมื่อสายอากาศโค้งเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ไม่มีการดัดโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก)-(ค) รูปที่ 4.22 (ก) แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน จากรูปพบว่าถึงแม้จะทำการโค้งงอสายอากาศ สายอากาศยังสามารถใช้งานได้ครอบคลุมย่านความถี่ 916.6-932.5 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่มาตรฐานภายในประเทศกล่าวคือ 920-925 MHz รูปที่ 4.22 (ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสายอากาศมีการดัดโค้งเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ไม่มีการดัดโค้ง จากผลการจำลองพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก โดยมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เท่ากัน โดยมีค่าเท่ากับ 140.5 องศา เมื่อพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศดัดโค้งพบว่าม้อัตราขยายประมาณ 0 dBi ซึ่งสูงกว่าสายอากาศที่ไม่มีการดัดโค้งเล็กน้อย

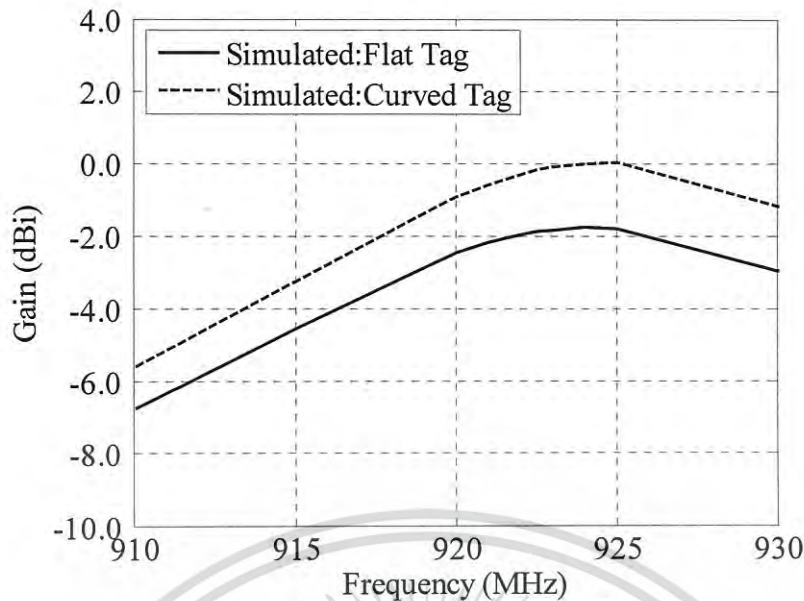


(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) อัตราขยายของสายอากาศ

รูปที่ 4.22 ผลการจำลองแท็กโค้งช่องเปิดรูปตัวยูติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

#### 4.6 บทสรุป

จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดชนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าในบทที่ 2 และบทที่ 3 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังของสายอากาศเมื่อนำไปติดกับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดการลดทอน หากสายอากาศแท็กที่นำไปประยุกต์ใช้งานมีลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว สายอากาศแท็กควรมีคุณลักษณะที่เหมือนกับแหล่งกำเนิดชนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล โดยสายอากาศที่เหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลได้แก่สายอากาศช่องเปิด ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยู สายอากาศรูปตัวยูเป็นสายอากาศที่มีพื้นฐานการออกแบบมาจากสายอากาศช่องเปิดอย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศแท็กขนาดของสายอากาศและการแมตซ์อิมพีแดนซ์กับชิพที่ใช้มีความจำเป็น โดยในงานวิจัยนี้ชิพรุ่น NXP G2XL ที่มีอิมพีแดนซ์พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ  $15.87 + j148.7$  โอห์ม ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบจึงต้องทำการปรับปรุงให้โครงสร้างของสายอากาศมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับวัสดุทรงกระบอกเคลือบและทั้งยังสามารถให้คุณลักษณะที่มีความเหมาะสมกับวัสดุประสงค์การใช้งาน เช่นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่แตกออก มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แมตซ์กับชิพที่เลือกใช้งาน มีอัตราขยายที่ไม่ต่ำจนเกินไปและสามารถใช้งานได้ครอบคลุมมาตรฐานภายในประเทศ และเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความเหมาะสมและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน จึงได้ทำการศึกษาวารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูมีขนาด 60 มิลลิเมตร  $\times$  25 มิลลิเมตร และมีความหนา 3.1 มิลลิเมตร สร้างโดยใช้วัสดุฐานรองประเภท FR-4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 โดยสายอากาศที่ออกแบบเมื่อพิจารณา ณ ความถี่กลางของมาตรฐานในประเทศที่ความถี่ 922.5 MHz สายอากาศที่นำเสนอมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $6.5 + j151.67$  โอห์ม มีอัตราขยายเท่ากับ -0.9 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อนำไปจำลองผลร่วมกับวัสดุทรงกระบอก และจากผลการจำลองสายอากาศโค้งเมื่อนำไปติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89 \lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ 916.6-932.5 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คล้ายคลึงกับสายอากาศที่ไม่มีการโค้งงอ ผลการจำลองได้ถูกนำไปเปรียบเทียบผลจากการคำนวณโดยผลเฉลยสมการคลื่น และระเบียบวิธีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการจำลอง ผลการคำนวณ และสายอากาศที่นำเสนอมีผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งที่มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของสายอากาศที่นำเสนอเกิดการลดทอนน้อยกว่าแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเมื่อวางอยู่บนวัสดุพื้นผิวฉนวนพีแวนซีโค้งทรงกระบอกโลหะ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าสายอากาศที่ออกแบบมีคุณสมบัติที่มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ เช่น ถังสี ถังน้ำมันและถังผลิตภัณฑ์ทางเคมี (Chemical drum) เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

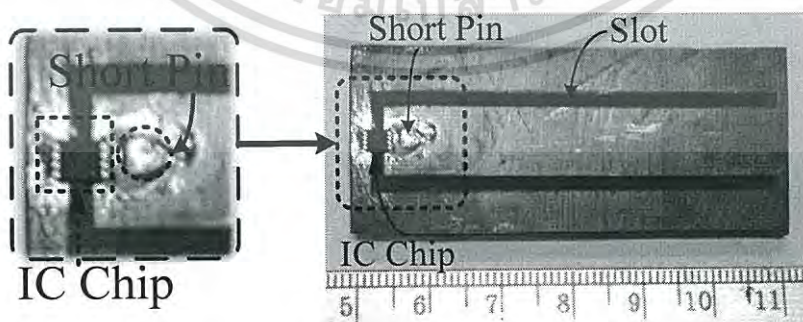
# การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ แท่งอาร์เอฟไอดีช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่เอชเอฟ

### 5.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและการทดสอบสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่เอชเอฟจากการจำลองและออกแบบสายอากาศในบทที่ 4 โดยเนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศบนวัสดุโลหะแผ่นเรียบ และวัสดุทรงกระบอกหุ้มด้วยพื้นผิวไดอิเล็กตริก ประกอบไปด้วย การทดสอบ อิมพีแดนซ์ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศและระยะการอ่านได้ไกลที่สุด โดยการทดสอบได้ทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน ซึ่งระเบียบวิธีการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแท่งจะได้อธิบายในลำดับถัดไป เช่น วิธีการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง วิธีการคำนวณกำลังงานการสะท้อนเชิงกำลังงานที่ได้จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ วิธีการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท่ง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีการอธิบายในบทนี้ โดยผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ และส่วนสุดท้ายของบทคือบทสรุป

### 5.2 สายอากาศต้นแบบ

สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟต้นแบบที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะโครงสร้างและคุณลักษณะพื้นฐานมาจากสายอากาศช่องเปิดขนาดเล็ก โดยโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบของสายอากาศต้นแบบจะมีลักษณะเป็นสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูบนระนาบกราวนด์ โดยมีขนาดทางไฟฟ้าพิจารณาที่ความถี่กลางของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟที่เป็นไปตามมาตรฐานภายในประเทศที่ความถี่  $922.5 \text{ MHz}$  เท่ากับ  $0.1845 \lambda \times 0.0769 \lambda$



รูปที่ 5.1 สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่เอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.1 แสดงสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูย่านความถี่เอชเอฟ โดยสายอากาศต้นแบบ จะสร้างตามพารามิเตอร์ที่ได้ทำการหาค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจากตารางที่ 3.1 ซิปของสายอากาศจะติดตั้งโดยการบัดกรี ณ ตำแหน่งกึ่งกลางช่องเปิดด้านล่างดังแสดงในรูปขยายด้านซ้ายมือ สายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูมีขนาด ความยาว ( $l$ ) และความกว้าง ( $w$ ) เท่ากับ 60 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 มีความสูงวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริก ( $t$ ) เท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร บนระนาบกราวด์ ขนาดของช่องเปิดขนาดเล็ก ( $w_s$ ) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร โครงสร้างแท่งลัดวงจรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $r_s$ ) เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างด้านล่างของซิปกับแท่งลัดวงจร ( $l_f$ ) เท่ากับ 4.1 มิลลิเมตร ความยาวในแนวตั้งของช่องเปิด ( $l_o$ ) เท่ากับ 57 มิลลิเมตร และมีความยาวในแนวนอนของช่องเปิด ( $w_a$ ) เท่ากับ 14 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.1

### 5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

แม้ว่าสายอากาศแท่งที่นำเสนอจะมีอิมพีแดนซ์ที่ไม่ได้อยู่ในระบบมาตรฐาน 50 โอห์ม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการนำเสนอการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแท่งที่สามารถนำอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ 50 โอห์มโดยปรกติมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ เช่นการทดสอบอิมพีแดนซ์ [37] และ [42-43] การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ [42] และระยะการอ่านได้ไกลที่สุด เนื่องจากสายอากาศแท่งจะทำการออกแบบร่วมกับแผ่นตัวนำสมบูรณ์ขนาดกว้างยาวอนันต์ ดังนั้นในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบและเปรียบเทียบสายอากาศแท่งในสองกรณี โดยกรณีหนึ่งคือเมื่อสายอากาศแท่งตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร และกรณีที่สองคือเมื่อสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับผลจากการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของการออกแบบและเพื่อเป็นการยืนยันว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

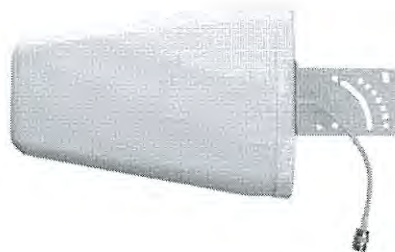


(ก) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C



(ข) เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟยี่ห้อ Symbol รุ่น XR480

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



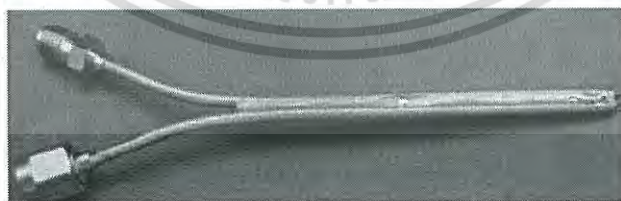
(ค) สายอากาศโพลาริซเซชันเส้นมาตรฐานยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411

### รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่จำเป็นที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศ

การทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศและสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานจะทดสอบโดยใช้โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C ส่วนการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะทำการทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อน ใช้สายอากาศส่งเป็นสายอากาศโพลาริซเซชันเส้นมาตรฐานยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศจะทำการทดสอบโดยใช้สายอากาศคู่เหมือนซึ่งก็คือสายอากาศแท่งช่องเปิดขนาดเล็กกรุปตัวยู โดยใน ส่วนการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟยี่ห้อ Symbol รุ่น XR480 ทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 902 ถึง 928 MHz โดยใช้สายอากาศตัวส่งโพลาริซเซชันเส้นมาตรฐาน ยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411

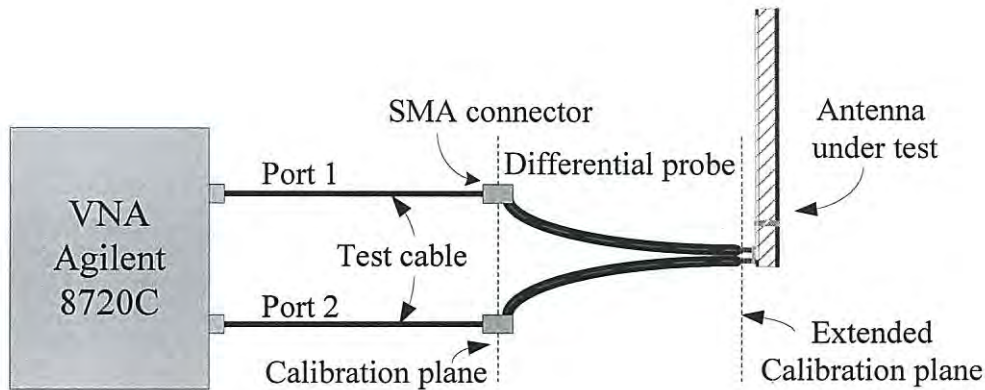
#### 5.3.1 การทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ

การทดสอบสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู ทดสอบภายในห้องไร้การสะท้อนโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C ร่วมกับ โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล โดยการทดสอบจะแบ่งเป็นเมื่อสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร และเมื่อสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน ตัวอย่างโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลแสดงในรูปที่ 5.3 การทดสอบเริ่มต้นจากการปรับเทียบ (Calibration) โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



รูปที่ 5.3 โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



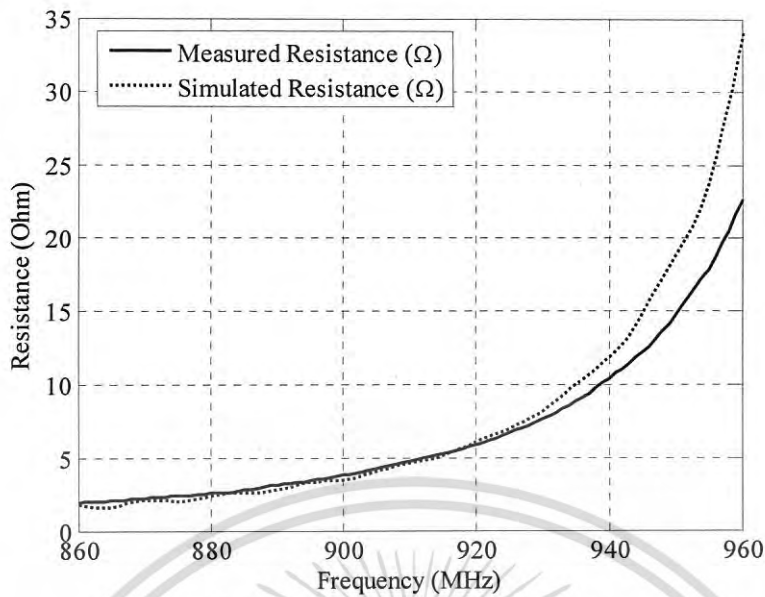
รูปที่ 5.4 แผนผังการติดตั้งทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

สำหรับการปรับเทียบโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะทำการปรับเทียบแบบเต็มสองพอร์ต (full two-port) หรือ “SOLT” (short-open load-through) โดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบมาตรฐาน (Standard calibration kit) โดยทำการปรับเทียบที่ละขั้วของโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลหลังจากการปรับเทียบแล้วจึงนำสายอากาศต้นแบบมาเชื่อมต่อกับ โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล โดยปลายของโพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียลเชื่อมต่อกับสายอากาศที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูป 5.4

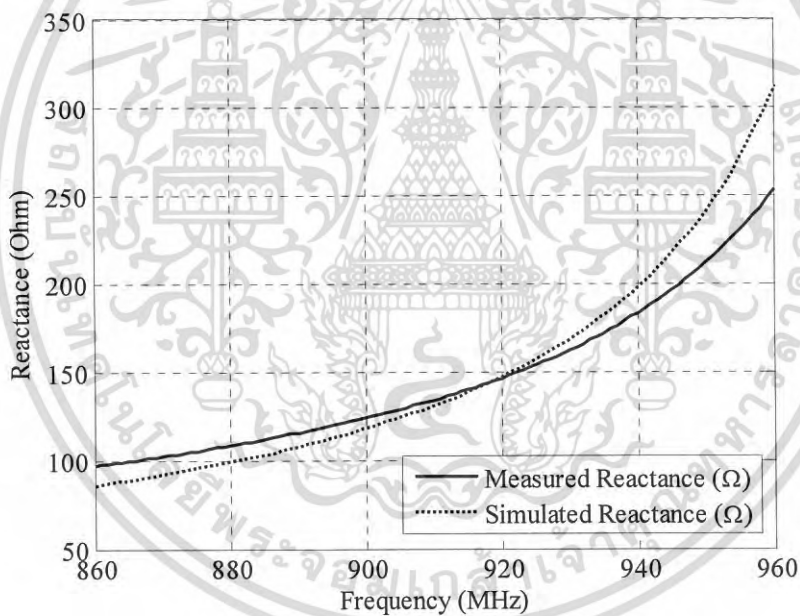
ผลการทดสอบในเบื้องต้นที่ทดสอบได้จะอยู่ในรูปของพารามิเตอร์  $S_{11}$   $S_{12}$   $S_{21}$  และ  $S_{22}$  โดยเมื่อได้พารามิเตอร์  $S$  ดังกล่าวจากการทดสอบแล้ว

$$Z_{Tag} = \frac{2Z_0(1-S_{11}S_{22}+S_{12}S_{21}-S_{12}-S_{21})}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}} \quad (5.1)$$

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งจะเกิดจากการคำนวณผ่านพารามิเตอร์ดังกล่าวและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสามารถหาได้จากการคำนวณผ่านสมการที่ 5.1 รูปที่ 5.5 (ก) และ (ข) แสดงผลการทดสอบความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร จากรูปพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยทั้งความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ  $6.2+j149.2$  โอห์ม



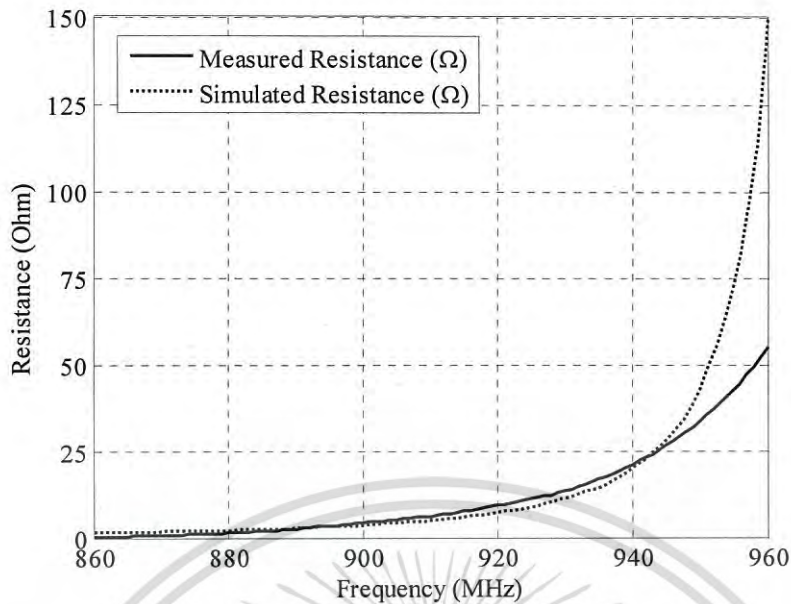
(ก) ความต้านทาน



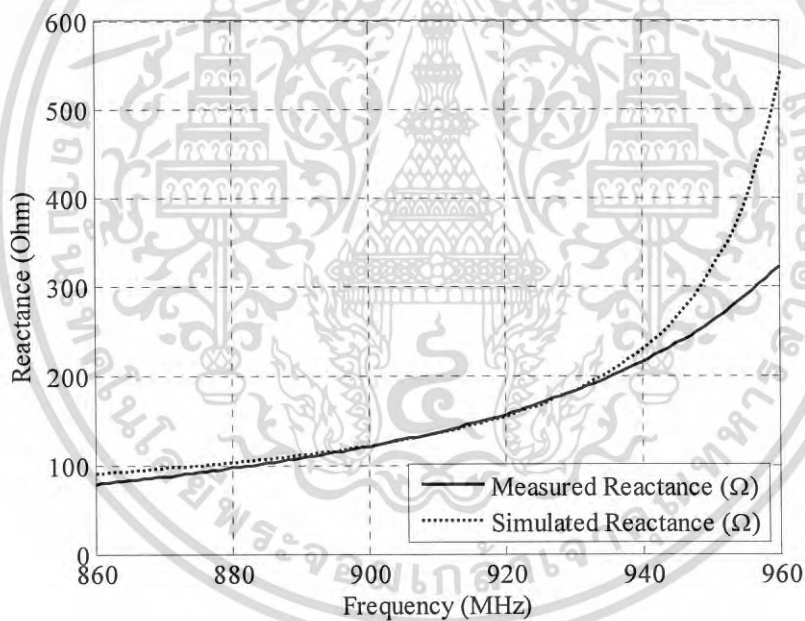
(ข) รีแอกแตนซ์

รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อติดตั้งบนวัสดุตัวนำ  
แผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความต้านทาน



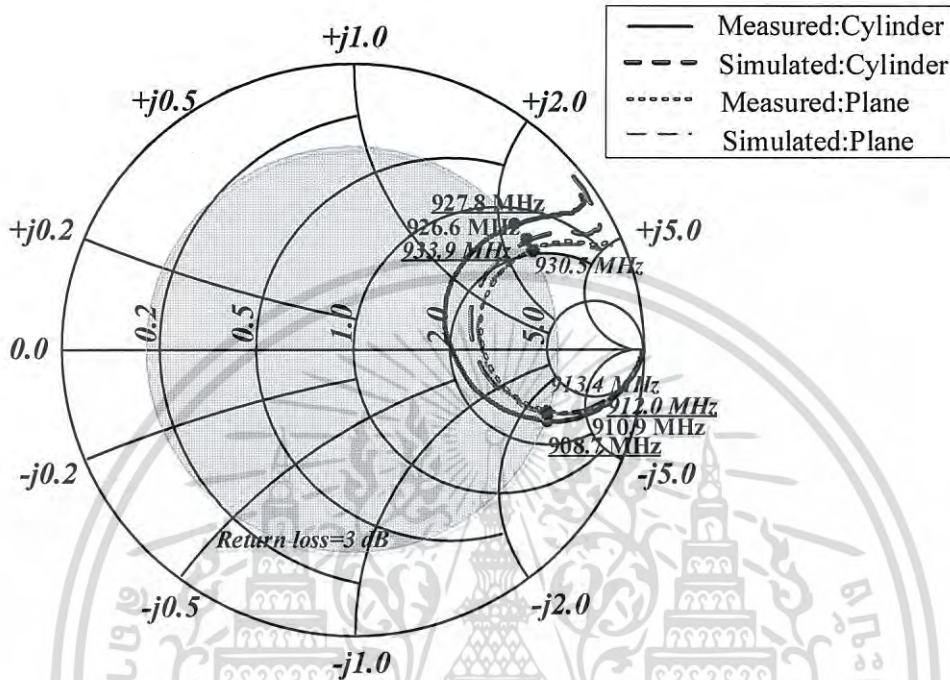
(ข) รีแอกแตนซ์

รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89 \lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

รูปที่ 5.6(ก) แสดงความต้านทานของสายอากาศ และ รูปที่ 5.6 (ข) แสดงรีแอกแตนซ์และเมือสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89 \lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยจากการทดสอบอิมพีแดนซ์จะสูงขึ้นเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความถี่ตั้งแต่ 920 ถึง 960 MHz เมื่อเทียบกับผลการจำลองจะพบว่ามีค่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดีในช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

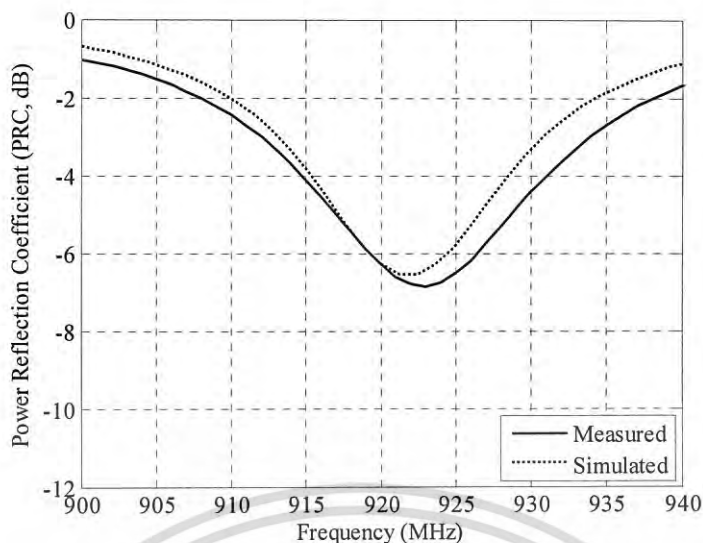
ที่ใช้งานกล่าวคือตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz และมีค่าเข้าใกล้กับจุดที่เกิดการแมตช์แบบสังยุคกับซีพีทีเลือก โดยจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $9.97+j160.9$  โอห์ม นอกเหนือจากการแสดงในรูปแบบของกราฟอิมพีแดนซ์ต่อความถี่แล้ว สายอากาศแท่งอาร์เอฟไอดีสามารถนำมาพล็อตในรูปแบบของแผนภูมิสมิทได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยการใช้ Kurokawa method



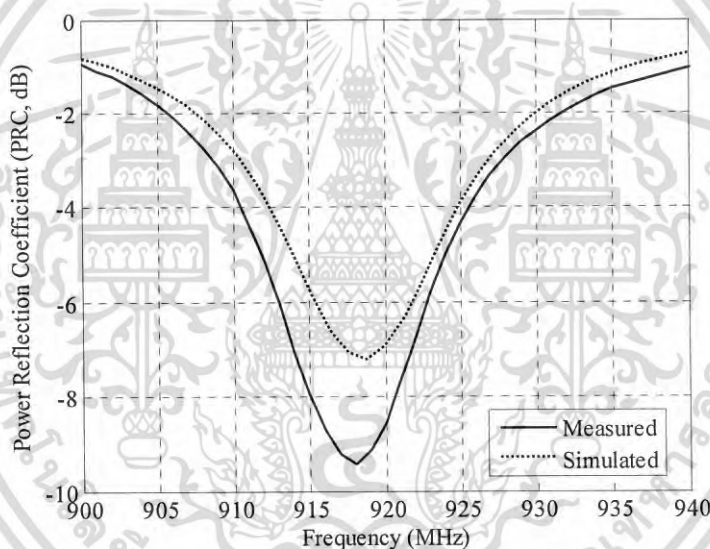
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูในรูปแบบของแผนภูมิสมิท (Smith chart)

### 5.3.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) พบว่าสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านถี่ที่เป็นไปตามมาตรฐานภายในประเทศตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz ทั้งเมื่อมีการนำสายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร และเมื่อนำสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยเมื่อพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเชิงกำลังงานต่ำกว่า  $-3\text{dB}$  ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับสายอากาศแท่งที่ออกแบบบนพื้นผิวโลหะจะพบว่า สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 912.0 ถึง 933.9 MHz ในกรณีที่น่าไปติดตั้งบนตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร และสายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 908.7 - 927.8 MHz ในกรณีที่สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีขนาดของรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยผลจากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



(ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร



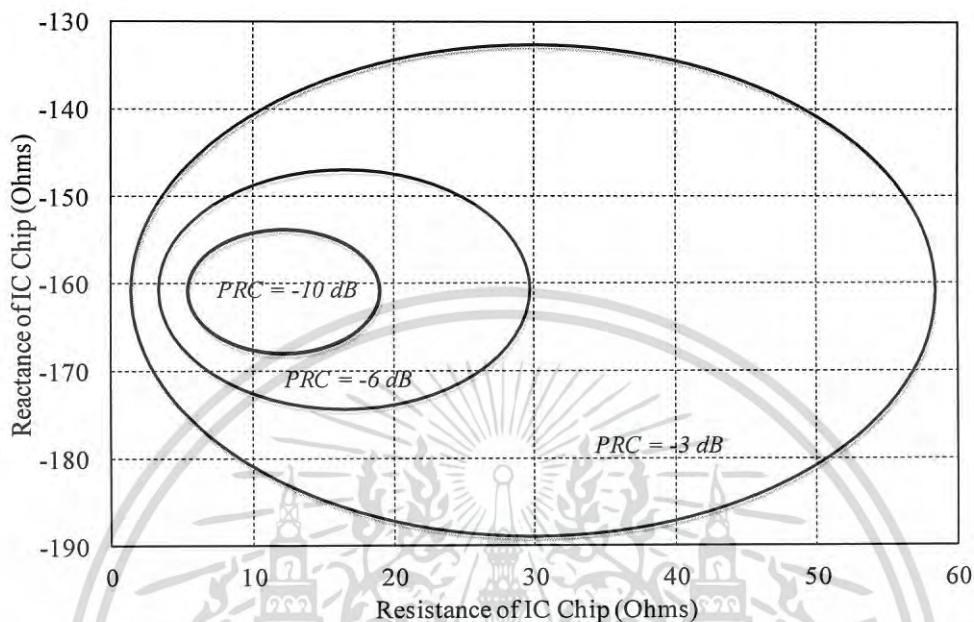
(ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89 \lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์

รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน (PRC) ของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

เมื่อพิจารณาถึงการนำสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูไปประยุกต์ใช้กับชิพรุ่นอื่นๆ โครงสร้างของสายอากาศแท่งสามารถนำไปออกแบบร่วมกับ Alien H3 RFID [45] ที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z_{ic}=16-j160$  โอห์ม พิจารณาที่ความถี่ 925 MHz โดยมี (สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน = -8.1dB) และชิพในเอกสารอ้างอิง [46] ที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z_{ic}=7-j170$  โอห์ม โดยจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเท่ากับ -13 dB โดยการศึกษาถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำเสนอกับชิพรุ่นอื่นที่ความถี่ 922.5 MHz แสดงในรูปที่ 5.9 ในรูปจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของชิพจะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน ของสายอากาศ

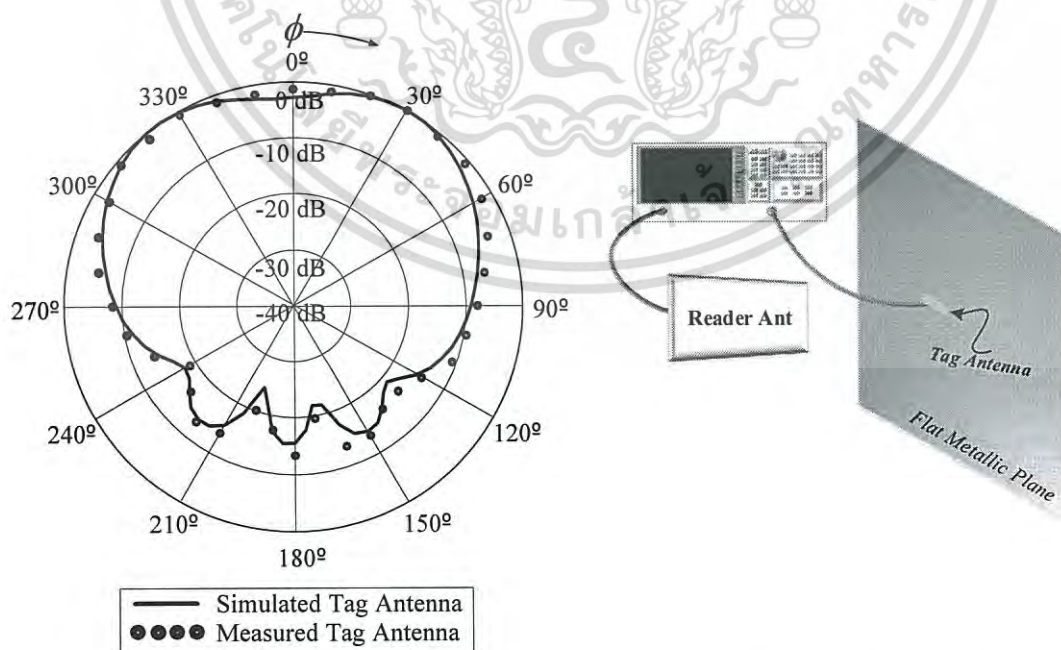
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท็กและชิพที่เลือกใช้งาน โดยในรูปที่แสดงขอบเขตของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเท่ากับ  $-3\text{dB}$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเท่ากับ  $-6\text{dB}$  และสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเท่ากับ  $-10\text{ dB}$  ซึ่งกราฟในรูปที่ 5.9 นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกใช้ชิพที่มีความเหมาะสมได้อีกด้วย

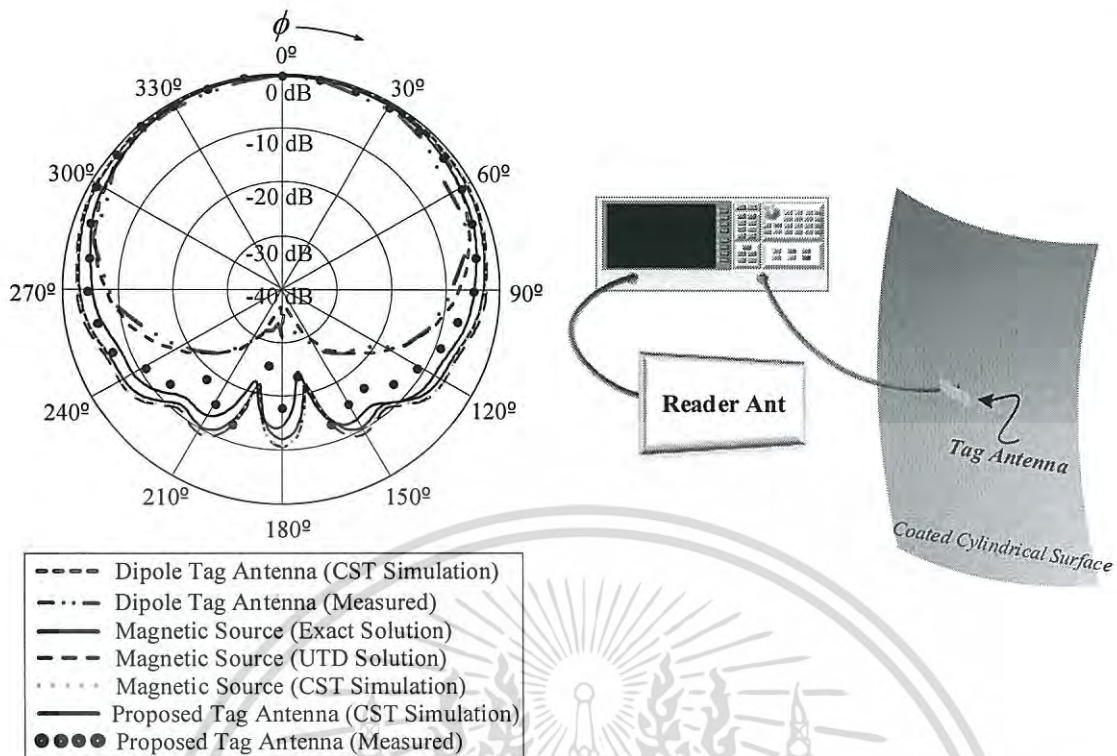


รูปที่ 5.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของชิพพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz

### 5.3.3 การทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ



(ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี  $(a)$  เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

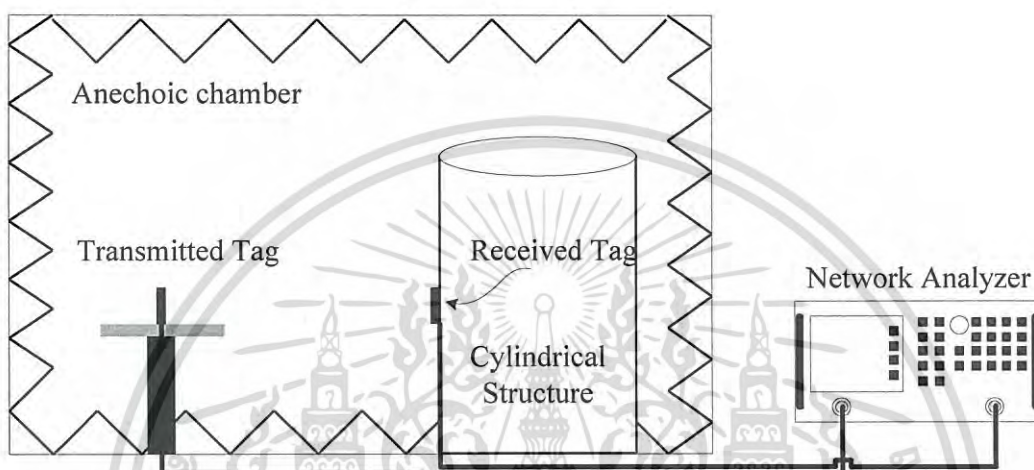
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราขยายของสายอากาศแท่งช่องเปิด  
รูปตัวยูที่ความถี่ 922.5 MHz

รูปที่ 5.10 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C ร่วมกับสายอากาศส่งซึ่งเป็นสายอากาศโพลาริซิงเส้นมาตรฐานยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411 โดยทำการทดสอบในเทอมของ  $|S_{21}|$  or  $|S_{12}|$  โดยสายอากาศแท่งจะเชื่อมต่อกับคอนเน็คเตอร์ (50 โอห์ม) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทดสอบในระนาบ  $xy$  ในรูปที่ 5.10 (ก) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งเมื่อ (ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลในการจำลองและผลการทดสอบ ในรูปที่ 5.10 (ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี  $(a)$  เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน ผลการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นและการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นโดยแบ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูที่มีคุณลักษณะเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล กับแท่งไดโพลบนแผ่นพิมพ์ที่มีคุณลักษณะเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์มีขนาด 14.0 เซนติเมตร  $\times$  2.0 เซนติเมตร สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 หนา 3.1 มิลลิเมตร โดยจากการทดสอบพบว่าผลจากการคำนวณ การจำลอง และการทดสอบมีความสอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะพบว่านำสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยูที่นำเสนอ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณขอบเขตเงา หรือบริเวณด้านหลังของวัสดุ ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยูที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลสามารถให้บริเวณการติดต่อสื่อสารที่กว้างกว่าสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

### 5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 5.11 แผนผังการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยู

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท็กในห้องไร้การสะท้อนกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C ร่วมกับสายอากาศแท็กคู่เหมือนที่ต้องการทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ด้วยวิธีการทดสอบอัตราขยายจากการคำนวณโดยสมการของฟรีส (Friis formula) และสมการอัตราขยายสมบูรณ์ (Absolute gain) การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท็กจะทำการทดสอบโดยผ่านค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ร่วมกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแท็ก [42] โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบอัตราขยายเมื่อสายอากาศแท็กเชื่อมต่อกับคอนเน็คเตอร์ในระบบ 50 โอห์ม ( $G_{(50ohms)}$ )
2. หาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ( $D$ ) และสัมประสิทธิ์ของตัวนำและไดอิเล็กตริก ( $e_{cd}$ ) จากสมการที่ 5.2 โดย  $\Gamma_1$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงาน ซึ่งสามารถได้จากการทดสอบเมื่อสายอากาศเชื่อมต่อกับกับคอนเน็คเตอร์ในระบบ 50 โอห์ม และ  $Z_{ant}$  คืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็ก

$$e_{cd}D = G_{(50ohms)} / (1 - |\Gamma_1|^2) \quad (5.2)$$

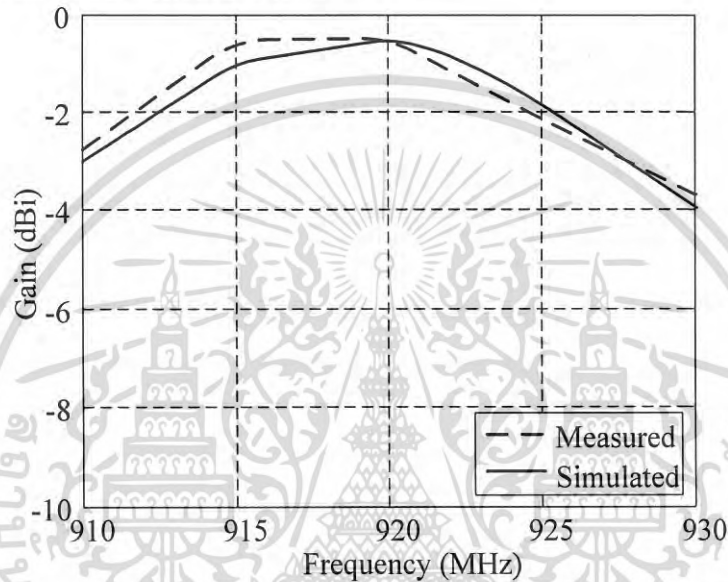
3. ทำการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแท็ก โดยใช้สมการที่ 5.3 โดยการแทนค่า  $e_{cd}D$  ที่ได้จากสมการที่ 5.2  $\Gamma_2$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานที่เกิดจากการสายอากาศแท็กและซีพแสดงดังสมการที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

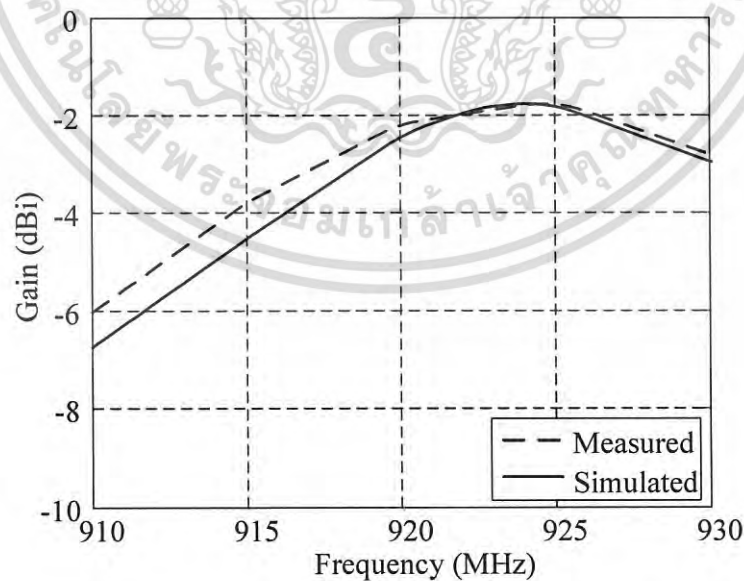
$$G_{(Tag)} = (1 - |\Gamma_2|^2) e_{cd} D \quad (5.3)$$

$$\Gamma_2 = (Z_{IC} - Z_{ant}^*) / (Z_{IC} + Z_{ant}^*) \quad (5.4)$$

ในรูปที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู โดยรูปที่ 5.12(ก) และ (ข) แสดงอัตราขยายของสายอากาศเมื่อ (ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร โดยจากผลการทดสอบสายอากาศจะมีอัตราขยายเท่ากับ -1.4 dBi (ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยจากผลการทดสอบสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ -1.7 dBi



(ก) สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร



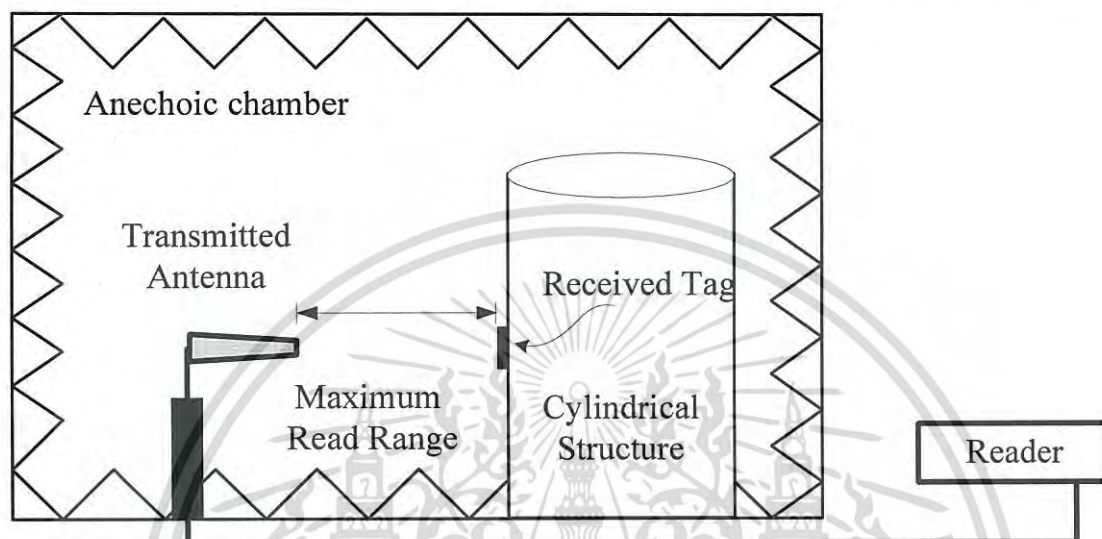
(ข) สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี (a) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

### รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

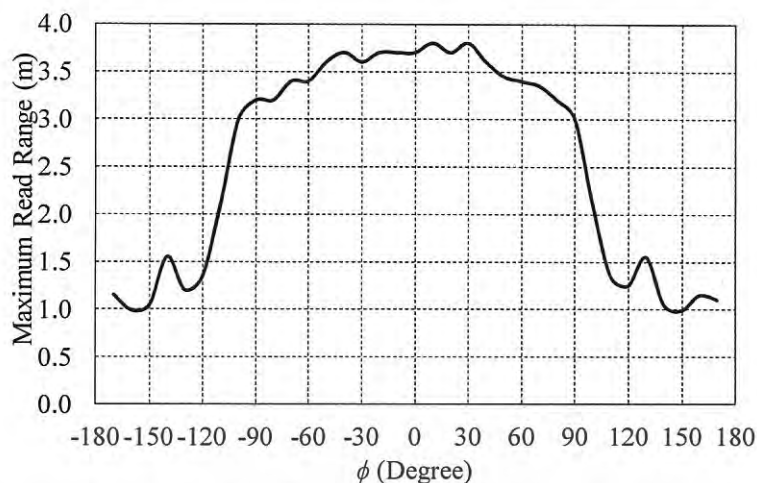
### 5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

การทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูประกอบด้วยสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูที่นำเสนอติดตั้งกับที่นำไปใช้งาน สายอากาศส่งเป็นสายอากาศโพลาริซ์แบบเชิงเส้นมาตรฐานยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411 เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟยี่ห้อ Symbol รุ่น XR480 โดยแผนผังการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แผนผังการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

ผลการทดสอบทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู พิจารณาระยะการติดต่อสื่อสารได้ที่มุม  $\theta = 90^\circ$  และ  $\phi = 0^\circ$  ในกรณีที่สายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน ระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุดมีระยะประมาณ 3.7 เมตร และเมื่อพิจารณาระยะการติดต่อสื่อสารได้ที่มุม  $\theta = 90^\circ$  และ  $\phi = 0^\circ$  ในกรณีที่สายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร  $\times$  58 เซนติเมตร จะได้ระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุดประมาณ 4.2 เมตร โดยในรูปที่ 5.14 แสดงระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุดของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุม  $\phi$  ซึ่งจะทำให้การทดสอบโดยการหมุนถังที่มีสายอากาศแท่งติดตั้งอยู่ที่ละ 10 องศา โดยจากรูปพบว่าระยะการติดต่อสื่อสารจะสั้นลงเมื่ออยู่ในบริเวณขอบเขตเงาหรือบริเวณด้านหลังของวัสดุ



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยู

#### 5.4 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูกับสายอากาศชนิดอื่นๆ

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท่งเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุประสงค์ต่างๆ โดยในตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของสายอากาศแท่งจากงานวิจัยที่มีมาก่อน และจากในวิทยานิพนธ์ที่ได้นำเสนอสายอากาศแท่งช่องเปิดรูปตัวยูซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท่งสำหรับการใช้งานบนวัสดุรูปแบบต่างๆ

#	Ref.	Tested structure	Antenna size [mm]	Antenna material	Measured gain [dBi]	Maximum read range [m]	EIRP (W)
1	[44]	Flat metallic plate 200 mm×200 mm	120.0×30.0×3.2	FR-4	N/A	4.0	4.0
2	[40]	Gas cylinder with the diameter of 150 mm	113.0×21.0×1.5	PET and neoprene	N/A	0.95	0.5
3	[38]	Flat metallic plate 0.5 λ × 0.5 λ	68.0×30.0×3.0	FR-4	N/A	3.3	0.4
4	[47]	Human body Phantom 120 mm×80 mm	105.0×60.0×0.7 6	GML 1000 woven-glass	1.1	7.3	N/A
5	[48]	Flat metallic plate 150 mm × 150 mm	88.0×60.0×0.76	GIL GM 1000	N/A	5.4	6.3
6	[41]	Flat metallic plate 300 mm×300 mm	80.0×25.0×3.5 45.5×20.0×3.5 30.0×20.0×3.5	FR-4 and paper	-3.6 -6.9 -11.8	5.0 2.5 1.0	N/A
7	[49]	Flat metallic plate 200 mm×200 mm	72.1×25.5×3.2	Aluminum sheet with polystyrene	N/A	8.9	4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#	Ref.	Tested structure	Antenna size [mm]	Antenna material	Measured gain [dBi]	Maximum read range [m]	EIRP (W)
8	This work	Coated metallic cylinder with the diameter of 580 mm	60.0×25.0×3.1	FR-4	-1.4	3.7 1.2	4.0 0.5

จากตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศจากงานวิจัยที่มีมาก่อนโดยเปรียบเทียบในลักษณะของโครงสร้างเช่น ขนาดและวัสดุที่เลือกใช้ พร้อมทั้งเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น ระยะเวลาติดต่อสื่อสารไกลที่สุดและอัตราขยายของสายอากาศและ กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกประสิทธิภาพที่ใช้ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศนั้นเป็นเรื่องที่มีข้อจำกัดเนื่องจากมีความแตกต่างกันทั้งในด้านการเลือกใช้ชิพ ซึ่งชิพแต่ละตัวก็จะมีควมไวที่แตกต่างกัน การใช้กำลังงานในการส่งที่แตกต่างกัน อัตราขยายของสายอากาศส่งที่มีความแตกต่างกันด้วย

จากตารางจะพบว่าขนาดของสายอากาศส่งผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศเป็นอย่างมากสำหรับการเปรียบเทียบแท่งที่ได้มีการนำมาใช้งานที่มีความใกล้เคียงกับแท่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่สายอากาศแท่งในเอกสารอ้างอิงที่ [40] ซึ่งเป็นสายอากาศแท่งที่ออกแบบสำหรับวัสดุทรงกระบอกเช่นกัน แต่เป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร โดยจากการเปรียบเทียบจะพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีระยะทางการติดต่อสื่อสารไกลที่สุดที่ไกลกว่า และใช้วัสดุที่หาง่ายและราคาไม่แพงในการออกแบบพร้อมทั้งมีขนาดที่กะทัดรัดอีกด้วย

## 5.5 บทสรุป

สายอากาศแท่งช่องเปิดรูปถ้วยที่นำเสนอได้ทำการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ โดยสายอากาศมีขนาด 60 มิลลิเมตร×25 มิลลิเมตร×3.1 มิลลิเมตร สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ซึ่งเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และนำไปสร้างชิ้นงานได้ง่าย เนื่องจากวัตถุประสงค์การใช้งานของสายอากาศแท่งนั้นคือการออกแบบสายอากาศแท่งให้สามารถใช้งานได้กับพื้นผิวโลหะเคลือบดังนั้นการออกแบบเบื้องต้นสายอากาศจะทำการออกแบบร่วมกับพื้นผิวโลหะ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นผิวดังกล่าวได้ ดังนั้นการทดสอบสายอากาศจะทำการทดสอบแยกเป็นสองกรณีกล่าวคือเมื่อแท่งนำไปติดบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58 เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร และเมื่อสายอากาศติดตั้งบนถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน

จากการออกแบบสายอากาศเนื่องจากสายอากาศออกแบบให้ใช้งานร่วมกับชิพรุ่น NXP G2XL ซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15.87-j148.7 โอห์ม เพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานร่วมกับชิพที่เลือกใช้งานได้เป็นอย่างดี สายอากาศควรมีอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับแมตซ์สังยุคกับชิพ ดังนั้นการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจึงมีความจำเป็น โดยจากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับชิพรุ่น NXP G2XL โดยสายอากาศมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 6.2+j149.2 โอห์ม เมื่อแท่งนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุที่เป็นตัวนำแผ่นระนาบขนาด 58

เซนติเมตร × 58 เซนติเมตร และสายอากาศที่นำเสนอจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $9.97 + j160.9$  โอห์ม เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบ

เพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ครอบคลุมย่านความถี่ของอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟภายในประเทศ สายอากาศที่ออกแบบควรมีช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์ที่ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศจึงถูกพิจารณา แต่เนื่องจากสายอากาศแท้ที่ออกแบบเป็นสายอากาศขนาดเล็กที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานบนพื้นฐานของการใช้งานสำหรับพื้นผิวโลหะ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศจึงถูกพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานของสายอากาศที่ต่ำกว่า  $-3$  dB โดยจากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่ครอบคลุมย่านความถี่ภายในประเทศ โดยเมื่อสายอากาศนำมาประยุกต์ใช้งานบนพื้นฐานของการใช้งานสำหรับพื้นผิวโลหะเรียบสายอากาศมีช่วงกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 912.0 ถึง 934.5 MHz และเมื่อสายอากาศนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบเพฟลอน ที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  สายอากาศมีช่วงกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 908.7 ถึง 927.8 MHz นอกจากสายอากาศที่นำเสนอจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับชิพ NXP G2XL ได้ สายอากาศยังสามารถนำไปใช้กับชิพชนิดอื่นๆได้อีกด้วยพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz

อีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญคือการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท้ที่นำเสนอโดยการทดสอบสายอากาศจะทำการติดตั้งบนทั้งวัสดุแผ่นระนาบและวัสดุทรงกระบอกที่หุ้มด้วยพื้นผิวไดอิเล็กตริก โดยการทดสอบจะทำการทดสอบทั้งสายอากาศแท้ที่นำเสนอซึ่งมีคุณลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล และทำการทดสอบกับสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ ที่มีคุณลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยจากผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพบว่าแท้ที่นำเสนอมีบริเวณการติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่าสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ ในบริเวณขอบเขตเงา โดยในส่วนนี้ผลจากการคำนวณการจำลองและการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง โดยจะพบว่าทั้งผลจากการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ การจำลองโดยโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) และผลการทดสอบ มีความสอดคล้องกัน

สำหรับการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสาร สายอากาศแท้ที่นำเสนอจะนำไปติดกับวัสดุโลหะแผ่นระนาบ และวัสดุทรงกระบอก และทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด โดยจากการทดสอบพบว่าสายอากาศมีระยะการติดต่อสื่อสารพิจารณาที่มุมด้านหน้าของสายอากาศประมาณ 4.2 เมตร เมื่อสายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบ และมีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลที่สุด 3.7 เมตร เมื่อสายอากาศนำไปใช้งานร่วมกับถังที่มีรัศมี ( $a$ ) เท่ากับ  $0.89\lambda$  เคลือบด้วยเพฟลอน และจากการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่าสายอากาศแท้ที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทั้งกับวัสดุทรงกระบอก และวัสดุตัวนำแผ่นระนาบ โดยสายอากาศที่ออกแบบจะมีขนาดที่กะทัดรัด ออกแบบง่าย และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอและออกแบบสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดียความถี่ยูเอชเอฟสำหรับพื้นผิวอิมพีแดนซ์ทรงกระบอกโลหะ โดยใช้การวิเคราะห์ระเบียบวิธีการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ โดยสายอากาศแท่งกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล โดยแหล่งกำเนิดจะนำไปติดตั้งกับวัสดุทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ ผลที่ได้จากการคำนวณจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง จากผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งบนวัสดุทรงกระบอกโลหะเคลือบพบว่าสามารถเพิ่มระยะติดต่อสื่อสารได้เมื่อนำสายอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะที่เสมือนกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล เนื่องจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังหรือบริเวณขอบเขตเงาของแท่งที่มีคุณลักษณะที่เสมือนกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลจะมีการลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแท่งที่มีคุณลักษณะที่เสมือนกับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศจึงนำเสนอ สายอากาศแท่งที่มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์ทรงกระบอกโลหะ โดยสายอากาศที่ออกแบบจะมุ่งเน้นให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศ ตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz ซึ่งมีความถี่กลางเท่ากับ 922.5 MHz สายอากาศจะออกแบบให้เหมาะสมกับชิปรุ่น NXP G2XL สายอากาศแท่งมีโครงสร้างเป็นช่องเปิดขนาดเล็กรูปตัวยู มีขนาดโดยรวม 6.0 เซนติเมตร × 2.5 เซนติเมตร บนระนาบกราวด์ สร้างโดยใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 และทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศร่วมกับวัสดุทรงกระบอกโลหะเคลือบเพื่อยืนยันผลจากการวิเคราะห์และการจำลองผล เนื้อหาในบทที่ 6 นี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งสรุปข้อดีข้อเสียของงานวิจัย และในที่สุดท้ายจะเป็นการอธิบายแนะแนวทางในการนำเอางานวิจัยฉบับนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจต่อไป

### 6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับส่วนแรก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มจากอธิบายถึงความจำเป็นและความสำคัญของงานวิจัย ความจำเป็นและความสำคัญของโจทย์ในการวิจัย ความจำเป็นในการเลือกใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอเดียเพื่อนำมาใช้งานในการระบุตัวตนของวัสดุ โดยหนึ่งในกุญแจสำคัญของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอเดียคือสายอากาศแท่ง ซึ่งการออกแบบสายอากาศแท่งควรมีขนาดที่กะทัดรัด และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับรูปแบบการนำไปใช้งาน แต่คุณสมบัติของสายอากาศแท่งเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นสายอากาศแท่งอาร์เอฟไอเดียที่ออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงวัสดุที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานด้วย แต่เนื่องจากการออกแบบสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่ยูเอชเอฟจะมีโครงสร้างพื้นฐานคือสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ซึ่งจะเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสชนิดไฟฟ้า

เมื่อนำแท่งไปติดบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไค่งทรงกระบอกจะพบว่าการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังของทรงกระบอกที่เกิดจากแท่งที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะลดทอนเป็นอย่างมากในบริเวณด้านหลังทรงกระบอก แต่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากแท่งที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูล แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังจะลดทอนน้อยกว่าแท่งที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นสายอากาศแท่งที่มีคุณลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลจึงได้ถูกนำมาออกแบบและทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายสรุปงานวิจัยโดยภาพรวม

ส่วนที่สองกล่าวถึงการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งที่ติดตั้งบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์ไค่งทรงกระบอกโลหะ ระเบียบวิธีการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่นในการวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าในทิศ  $z$  โดยในส่วนนี้การวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบสองมิติ โดยแหล่งกำเนิดซึ่งก็คือแท่งที่กำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสนิดเส้นยาวอนันต์ การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะทำการพิจารณาในระนาบ  $xy$  โดยผลการคำนวณจากวิธีผลเฉลยสมการคลื่นจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) โดยสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีผลเฉลยสมการคลื่นจะให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรงกระบอกจะพบว่า เวลาที่ใช้ในการจำลองของโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) นั้นจะแปรผันตรงกับขนาดของทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ในขณะที่การเลือกใช้ผลเฉลยสมการคลื่นจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยประมาณ 3.14 นาที

ในส่วนที่สามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการแพร่กระจายซึ่งจะใช้ในการทำนายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดเมื่อแหล่งกำเนิดวางอยู่บนพื้นผิวของวัสดุทรงกระบอกโลหะเคลือบ ในส่วนที่สามนี้การวิเคราะห์จะสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปแบบของสามมิติ แต่แสดงผลในรูปแบบสองมิติ โดยจะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xy$  เมื่อกำหนดให้มุม  $\theta$  มีค่า 90 องศา และ 70 องศา ผลที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากผลเฉลยสมการคลื่นและผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและการจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ส่วนที่สี่กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแท่งในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ สายอากาศมีโครงสร้างเป็นสายอากาศช่องเปิดรูปตัวยูขนาดเล็กบนระนาบกราวด์ที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานภายในประเทศกล่าวคือตั้งแต่ 920 ถึง 925 MHz สายอากาศจะทำการออกแบบให้มีคุณลักษณะเป็นเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กสมมูลเพื่อนำไปใช้กับทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยสารไดอิเล็กตริก ออกแบบสำหรับประยุกต์ใช้กับชิพรุ่น NXP G2XL จากผลการจำลองสายอากาศสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ 910.9 ถึง 926.6 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ -0.9 dBi พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz โดยเมื่อนำไปจำลองร่วมกับวัสดุทรงกระบอกเคลือบแล้วพบว่ากระจายคลื่นทางด้านหลังของสายอากาศที่นำเสนอมีการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่กว้างกว่าสายอากาศโดโพลบนแผ่นพิมพ์และจากการเปรียบเทียบผลการจำลอง ผลการคำนวณ และสายอากาศที่นำเสนอพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี อีกทั้งเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยสมการคลื่น การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่าเสมอ และการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์จะพบว่า

ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจากการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยที่สุดเพียง 29 วินาที

และส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอเดีย่น ความถี่ของช่องเปิดรูปตัวยู ทำการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้โพรบแบบดิฟเฟอเรนเชียล อิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบที่ทดสอบได้มีค่าเท่ากับ  $6.2 + j149.2$  โอห์ม เมื่อสายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบ และจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $9.97 + j160.9$  โอห์ม เมื่อสายอากาศติดตั้งบนวัสดุทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุเทฟลอน โดยจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า  $-3\text{dB}$  เมื่อสายอากาศติดตั้งบนวัสดุตัวนำแผ่นระนาบครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่  $912.0$  ถึง  $933.9$  MHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า  $<-3\text{dB}$  เมื่อสายอากาศติดตั้งบนวัสดุทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุเทฟลอนครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่  $908.7$  ถึง  $927.8$  MHz ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่มาตรฐานการใช้งานของระบบอาร์เอฟไอเดีย่นในประเทศ จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยูเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดรูปตัวยู สามารถที่จะเพิ่มบริเวณการติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่าสายอากาศไดโพลบนแผ่นพิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณขอบเขตเงาของสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทรงกระบอกเคลือบมีเท่ากับ  $-1.7\text{dBi}$  ระยะการอ่านได้ไกลที่สุดพิจารณาที่มุมด้านหน้า ที่มุม  $\theta = 90^\circ$  and  $\phi = 0^\circ$  มีระยะโดยประมาณ 3.7 เมตร

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

เนื่องจกงานวิจัยนี้กำหนดสายอากาศแท็กให้เป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุด ความถูกต้องของการวิเคราะห์สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบวิธีแบบผสมผสานโดยจะเป็นการนำไปโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์เช่นโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) มาคำนวณร่วมกับระเบียบวิธีเชิงเรขาคณิตสมำเสมอ ซึ่งโปรแกรมจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST) จะใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศแท็ก แล้วนำสนามไฟฟ้าที่ได้มาใช้ในการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเสมอสำหรับปัญหาการแพร่กระจายคลื่นเมื่อพื้นผิวเป็นวัสดุทรงกระบอก ด้วยการคำนวณในลักษณะผสมผสาน (Hybrid UTD) นี้จะทำให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับสายอากาศในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น

นอกจากนี้ระเบียบวิธีการทางเรขาคณิตสมำเออยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุรูปทรงอื่นๆได้เช่นกันตัวอย่างเช่น การนำไปประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนวัสดุทรงกลมเป็นต้น และไม่เพียงแต่การวิเคราะห์สำหรับในระบบอาร์เอฟไอเดีย่น ความถี่สูงอื่นก็สามารถนำเอาระเบียบวิธีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสมำเออบบผสมผสานไปใช้งานได้เช่นกัน

ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของสายอากาศเมื่อเกิดการโค้งงอตามรูปทรงของพื้นผิวที่นำไปติดเนื่องจากวัสดุฐานรองที่ใช้เป็นวัสดุฐานรองประเภท FR-4 ที่มีความหนา 3.1

มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถโค้งงอแท็กให้เป็นไปตามรูปทรงของพื้นผิวที่นำไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยทางการโค้งงอแท็กบนวัสดุผิวโค้งและการเลือกใช้วัสดุฐานรองที่โค้งงอได้ จึงเป็นอีกหัวข้อวิจัยหนึ่งที่ผู้สนใจสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Finkenzeller K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication**. 3rd ED. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [2] Yu B., Harackiewicz F. and Lee B. **Radio frequency identification fundamentals and applications design methods and solutions**. Shanghai: InTech; 2010.
- [3] Banks J., Hanny D., Pachano M.A. and Thompson L.G. **RFID Applied**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [4] Preradovic S., **Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications**, InTech, 2011.
- [5] Dobkin D.M. **The RF in RFID: passive UHF in practice**. Newnes: Elsevier; 2008.
- [6] Chen Z.N. **Antennas for Portable Devices**. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc. 2007.
- [7] Marrocco G., "The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques," **IEEE Antennas and Propagation Magazine**. vol. 50, no. 1, Feb. 2008. pp. 66-79.
- [8] Griffin J.D., Durgin G.D., Haldi A., et al. "RF tag antenna performance on various materials using radio link budgets." **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. vol. 5, Dec. 2006. pp.247-250.
- [9] Dobkin D.M., Weigand S.M. "Environmental effects on RFID tag antennas." **Proc. of IEEE MTT-S International in Microwave Symposium Digest**. June 2005. pp.135-138.
- [10] Foster, P.R., and R.A.Burberry, "Antenna Problems in RFID Systems." **Proc. of IEE Colloquium on RFID Technology**. 1999. pp.1-5.
- [11] M. Bolic, Ryl D.S., and Stojmenovic I., **RFID Systems: Research Trends and Challenges**, John Wiley& Sons, 2010.
- [12] Tashi I., Hasan M.S., Yu H. "Design and simulation of UHF RFID tag antennas and performance evaluation in presence of a metallic surface." **Proc. of 5th IEEE International Conference on Software, Knowledge, Information, Industrial Management and Applications: Development and Assessment of Sustainable Ecosystems**. Sept. 2011. pp.1-5.
- [13] Balanis C.A. **Advanced Engineering Electromagnetics (Second edition)**. New Jersey: John Wiley& Sons, 2012.
- [14] Wongsiritorn P., Lertwiriaprapa T., Phongcharoenpanich C., Phaebua K. "Characteristics of RFID c-slot tag antenna on a coated metallic cylindrical surface." **Proc. of IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) 2012**. Nov. 2012. pp.1-4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] McNamara D.A., Pistotius C.W.I. and Malherbe J.A.G. **Introduction to the uniform geometrical theory of diffraction.** Norwood: Artech House; 1955.
- [16] Pathak P.H., "High frequency techniques for antenna analysis." **Proc. of the IEEE.** Vol 80, No.1, Jan 1992. pp.44-65.
- [17] Pathak P.H. and Kouyoumjian R.G. "An analysis of the radiation from apertures in curved surfaces by the geometrical theory of diffraction." **Proc. of the IEEE.** vol.62, no. 11, Nov. 1974. pp.1438-1447.
- [18] Lertwiryaprapa T., Pathak P.H., and Volakis J.L. "An approximate UTD ray solution for the radiation and scattering by antennas near a junction between two different thin planar material slab on ground plane." **Progress In Electromagnetics Research.** vol.102, 2010. pp.227-248.
- [19] Pathak P.H., Carluccio G., Albani M. "The Uniform Geometrical Theory of Diffraction and Some of Its Applications," **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, vol.55, no.4, Aug. 2013. pp.41-69.
- [20] Pathak P.H., Wang N., Burnside W.D., et al. "A Uniform GTD Solution for the Radiation from Sources on a Convex Surface," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol.29, no.4, Jul 1981. pp.609-622.
- [21] "CST Microwave Studio" (User's Manual, 2011)
- [22] Tokgoz C. **Asymptotic high frequency analysis of the surface fields of a source excited circular cylinder with an impedance boundary condition [dissertation].** Columbus (OH): The Ohio State University; 2002.
- [23] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency smart label ICs [online] Available [www.nxp.com/acrobat\\_download/literature/9397/75016225.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/literature/9397/75016225.pdf)
- [24] Nikitin P.V. and Rao K.V.S. "Antennas and propagation in UHF RFID systems." **Proc. of IEEE International Conference on RFID.** Apr 2008. pp.277-288.
- [25] <http://rfid4u.com/resources/basics-rfid-regulations/>
- [26] <https://www.smartrac-group.com/shortdipole.html>
- [27] <http://www.veryfields.net/wp-content/uploads/2013/09/Avery-Dennison-RFID-inlays-EM4124-b.jpg>
- [28] Rao K.V.S., Nikitin P.V. and Lam S.F. "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application." **IEEE Transactions on Antennas and Propagations.** vol. 53, no. 12, Dec 2005. pp.3870-3876.
- [29] Wongsiritorn P., and Phongcharoenpanich C., "Design of a UHF RFID Tag Antenna Using Tapered-Meander-Line Structure." **Journal of Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics**, vol.17 Supplement, Sept. 2009. pp.49-52

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Wongsiritorn P., Phongcharoenpanich C., Torrungrueng D. and Krairiksh M. "UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines." *Proc. of the 2009 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference*. vol.2, May 2009. pp.794-797.
- [31] Wongsiritorn P., Phongcharoenpanich C., Torrungrueng D. and Krairiksh M., "Meander-Line UHF RFID Tag Antenna with Semi-Circular Structure." *Proc. of the 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2009)*. Oct. 2009. pp.859-862.
- [32] Wongsiritorn P., Pumpoung T., Phongcharoenpanich C. and Kosulvit S., "UHF-RFID Tag Antenna with Rectangular Loops." *Proc. of the 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011)*. Oct. 2011. pp.1-4.
- [33] Wongsiritorn P., Pumpoung T., Phongcharoenpanich C., Nuangwongsa K., and Kosulvit S., "Meander-Line Antenna with Arc Structure for UHF-RFID Tag." *Proc. of the 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2011)*. Dec. 2011. pp.1-4.
- [34] Wongsiritorn P., Lertwiriyaprapa T., Phongcharoenpanich C., Phaebua K., "Characteristics of RFID C-slot tag antenna on a coated metallic cylindrical surface." *Proc. of IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS 2012)*. Nov. 2012. pp.1-4.
- [35] <http://rfidsecu.com/uploadfile/UHF%20RFID%20Frequency%20Map.jpg>
- [36] Nikitin P.V., Rao K.V.S., Lam S.F., Pillai V., Martinez R., Heinrich H. "Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. vol.53 no.9. pp.2721-2725.
- [37] Nikitin P.V., Rao K.V.S., Martinez R., et al. Sensitivity and impedance measurements of UHF RFID chips. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. vol.57, no.5, pp.1297-1302.
- [38] Lin K.H., Chen S.H. and Mittra R. "A looped-bowtie RFID tag antenna design for metallic objects." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. vol 61, no.2, pp.499-505.
- [39] Mo L., and Qin C. "Planar UHF RFID tag antenna with open stub feed for metallic objects." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. vol.58, no.9, pp.3037-3043.

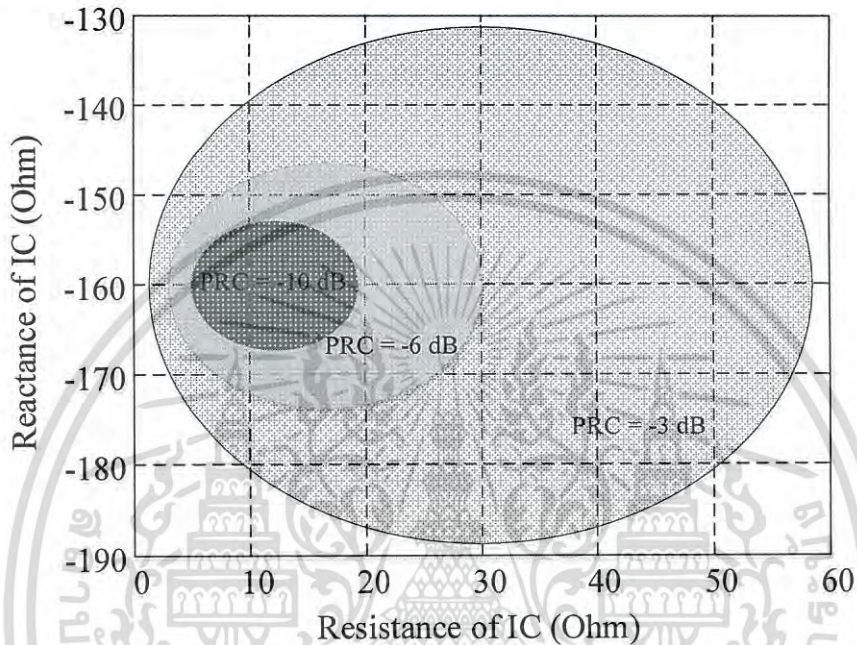
## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] Ziai M.A. and Batchelor J.C. “Curved RFID tags for metallic gas cylinders.” **Electronics Lett.** vol 45, no.17, pp.867-869.
- [41] Peng H.Y., Yan L., Lijun J., et al. “Compact metallic RFID tag antennas with a loop-fed method.” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.** vol.59. no.12. pp.4454–4462.
- [42] Pumpoung T. and Phongcharoenpanich C. “Design of wideband tag antenna for UHF RFID system using modified T-match and meander-line techniques.” **Electromagnetics Journal.** vol.35. no.5. pp.340-354.
- [43] Qing X., Goh C.K., Chen Z.N., Impedance Characterization of RFID Tag Antennas and Application in Tag Co-Design, **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, vol. 57, no. 5, May 2009. pp.1268-1274.
- [44] Kim K.H., Song J.g., Kim D.H., et al. “Fork-shaped RFID tag antenna mountable on metallic surfaces.” **Electronics Letters.** vol.43 pp.1400–1402.
- [45] Hirvonen M., Pursula P., Jaakkola K, et al. “Planar inverted-F antenna for radio frequency identification.” **Electronics Letters.** vol.40 pp.848–850.
- [46] Casula G.A., Montisci G. and Mazzarella G. “A wideband PET inkjet-printed antenna for UHF RFID.” **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.** vol.12. pp.1400–1403.
- [47] Svanda M., and Polivka M. “Matching technique for an on-body low-profile coupled-patches UHF RFID tag and for sensor antennas.” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.** vol.63. pp.2295–2301.
- [48] Polivka M., Svanda M. “Stepped impedance coupled-patches tag antenna for platform-tolerant UHF RFID applications.” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.** vol.63. pp.3791–3797.
- [49] Son H.W. and Jeong S.H. “Wideband RFID tag antenna for metallic surfaces using proximity-coupled feed.” **IEEE Antennas Wireless Propagation Letters.** vol.10 pp.377–380.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยพบว่าในการออกแบบสายอากาศแท่งในแต่ละครั้ง การออกแบบสายอากาศแท่งจะออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับชิพที่ได้ถูกกำหนดไว้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันผู้ผลิตชิพนั้นมีผู้ผลิตที่หลากหลายทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของชิพนั้นมีค่าแตกต่างกันออกไป ดังนั้นกราฟขอบเขตบริเวณที่เกิดการแมตซ์สัญญาณจึงมีความสำคัญ ในหัวนี้ได้อธิบายถึงการคำนวณการหาขอบเขตบริเวณที่เกิดการแมตซ์สัญญาณของการนำสายอากาศแท่งที่ได้ทำการออกแบบไปประยุกต์ใช้งานกับชิพรุ่นอื่นๆที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างออกไป ชุดสมการนี้นำเสนอเพื่อให้ผู้ที่นำเอาสายอากาศแท่งจากงานวิจัยชิ้นนี้และชิ้นอื่นไปพัฒนาต่อยอดได้โดยง่าย โดยรูปแบบกราฟจะแสดงในรูปที่ 1ก



รูปที่ ก.1 สัมประสิทธิ์กำลังงานการสะท้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของชิพ

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$\Gamma = \Gamma_R + j\Gamma_i \quad (ก.1)$$

$$|\Gamma| = \sqrt{(\Gamma_R)^2 + (\Gamma_i)^2} \quad (ก.2)$$

$$\Gamma^2 = (\Gamma_R)^2 + (\Gamma_i)^2 \quad (ก.3)$$

$$\Gamma = \frac{(R_{ic} - R_{tag}) + j(X_{ic} + X_{tag})}{(R_{ic} + R_{tag}) + j(X_{ic} + X_{tag})} \quad (ก.4)$$

$$\Gamma = \frac{(R_{ic} - R_{tag}) + j(X_{ic} + X_{tag})}{(R_{ic} + R_{tag}) + j(X_{ic} + X_{tag})} \times \frac{(R_{ic} + R_{tag}) - j(X_{ic} + X_{tag})}{(R_{ic} + R_{tag}) - j(X_{ic} + X_{tag})} \quad (ก.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma = \frac{(R_{ic} - R_{tag} + jX_{ic} + jX_{tag})}{(R_{ic} + R_{tag} + jX_{ic} + jX_{tag})} \times \frac{(R_{ic} + R_{tag} - jX_{ic} - jX_{tag})}{(R_{ic} + R_{tag} - jX_{ic} - jX_{tag})} \quad (ก.6)$$

$$\Gamma = \left[ \frac{\left( (R_{ic} - R_{tag}) \times (R_{ic} + R_{tag}) \right) + (X_{ic} + X_{tag})^2}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right] + j \left[ \frac{(X_{ic} + X_{tag}) \times \left( (R_{ic} + R_{tag}) - (R_{ic} - R_{tag}) \right)}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right] \quad (ก.7)$$

$$|\Gamma| = \sqrt{\left[ \frac{\left( (R_{ic} - R_{tag}) \times (R_{ic} + R_{tag}) \right) + (X_{ic} + X_{tag})^2}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right]^2 + \left[ \frac{(X_{ic} + X_{tag}) \times \left( (R_{ic} + R_{tag}) - (R_{ic} - R_{tag}) \right)}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right]^2} \quad (ก.8)$$

$$\Gamma^2 = \left[ \frac{\left( (R_{ic} - R_{tag}) \times (R_{ic} + R_{tag}) \right) + (X_{ic} + X_{tag})^2}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right]^2 + \left[ \frac{(X_{ic} + X_{tag}) \times \left( (R_{ic} + R_{tag}) - (R_{ic} - R_{tag}) \right)}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \right]^2 \quad (ก.9)$$

จัดรูปสมการจากสมการที่ ก.9

$$\Gamma^2 = \frac{(R_{ic} - R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} = 1 - \frac{4R_{ic} R_{tag}}{(R_{ic} + R_{tag})^2 + (X_{ic} + X_{tag})^2} \quad (ก.10)$$

$$R_{ic}^2 (\Gamma^2 - 1) + 2R_{tag} R_{ic} (\Gamma^2 - 1) + R_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + X_{ic}^2 (\Gamma^2 - 1) + 2X_{ic} X_{tag} (\Gamma^2 - 1) + X_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + 4R_{ic} R_{tag} = 0 \quad (ก.11)$$

แปลงรูปสมการที่ ก.11 จะพบว่ารูปแบบของสมการเป็นสมการพหุนามกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{ic}^2 (\Gamma^2 - 1) + 2X_{ic} X_{tag} (\Gamma^2 - 1) + R_{ic}^2 (\Gamma^2 - 1) + 2R_{tag} R_{ic} (\Gamma^2 - 1) + R_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + X_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + 4R_{ic} R_{tag} = 0 \quad (ก.12)$$

พารามิเตอร์ที่ระบุค่าคือพารามิเตอร์  $R_{ic}$ ,  $R_{tag}$ ,  $X_{tag}$  และ  $\Gamma$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงกำลังงานที่กำหนดเช่น -3 dB, -6 dB และ -10 dB

จากสมการที่ ก.12 จะพบว่าสมการที่หาได้เป็นสมการพหุนามกำลังสอง ดังนั้นจึงสามารถหาคำตอบของสมการได้ดังนี้

$$AX^2 + BX + C = 0 \quad (ก.13)$$

จากสมการที่ ก.12 และ ก.13 กำหนดให้ A B C มีค่าดังนี้

$$A = (\Gamma^2 - 1) \quad (ก.14)$$

$$B = 2X_{tag} (\Gamma^2 - 1) \quad (ก.15)$$

$$C = R_{ic}^2 (\Gamma^2 - 1) + 2R_{tag} R_{ic} (\Gamma^2 - 1) + R_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + X_{tag}^2 (\Gamma^2 - 1) + 4R_{ic} R_{tag} \quad (ก.16)$$

โดยคำตอบจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$X_{ic_1} = -B + \frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (ก.17)$$

$$X_{ic_2} = -B - \frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (ก.18)$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร  
 วัน เดือน ปีเกิด 23 เมษายน 2528  
 ที่อยู่ 16/1 หมู่ 2 ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมืองปทุมธานี  
 จังหวัดปทุมธานี 12000 ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2550  
 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม)  
 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาโท สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2552  
 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน สายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

ทุนการศึกษา โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกรุ่นที่ 13

รางวัล Best Presentation จากการประชุมวิชาการ 2014 Thailand-  
 Japan Microwave (TJMW2014) จัดโดย สถาบันเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ IEICE Technical  
 Committee 11 ธันวาคม 2014

### วารสารที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร, ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์, กิตติศักดิ์ แพบัว, ฐิติพงษ์ เลิศวิริยะประภา  
 การวิเคราะห์การแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์โค้งทรงกระบอกโลหะ  
 สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่: 32 ฉบับที่: 1  
 เลขหน้า: 13-18 ปีพ.ศ. : 2558
- [2] Wongsiritorn P., Phongcharoenpanich C., Pumpoung T., Phaebua K., and  
 Lertwiryaprapa T., "Modified UTD-based UHF-RFID Tag Antenna with Two-  
 pronged-fork Slot for Coated Metallic Cylindrical Surface," *Journal of  
 Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA)*, pp.805-823, Apr.2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Wongsiritorn P., Pumpoung T., Phongcharoenpanich C., Nuangwongsa K. and Kosulvit S., "Meander-Line Antenna with Arc Structure for UHF- RFID Tag," *Proceedings of Intelligent Signal Processing and Communication System 2011*, Chiang Mai, pp. 1-4, Dec 7-9, 2011.
- [2] Wongsiritorn P., Lertwiryaprapa T., Phongcharoenpanich C. and Phaebua K., "Characteristics of RFID C-slot tag antenna on a coated metallic cylindrical surface," *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS 2012)*, Hawaii, pp.1-4, 11-16 Nov. 2012.
- [3] Wongsiritorn P., Pumpoung T., Phongcharoenpanich C., Lertwiryaprapa T. and Phaebua K., "Analysis of Electromagnetic Wave Radiation from C-Slot RFID Tag Mounted on Impedance Curved Surface Using the UTD Solution," *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting 2013*, Orlando, pp. 1076-1077, July 7-13, 2013.

