

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอทีบนแผ่นกราฟีน  
สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

ANALYSIS AND DESIGN OF GRAPHENE-BASED RFID ANTENNA  
FOR INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM

ปราชญ์ อัครนรากุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วิชาเอกวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีน  
สำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

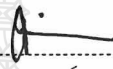
ปราชณั์ อัครนรากุล


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วิชาเอกวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ  
Analysis and Design of Graphene-Based RFID Antenna for Intelligent Transport System

ชื่อ - นามสกุล      นายปราชน์ อิศวนรากุล  
สาขาวิชา      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนาจ เรืองวารี, Dr.-Ing.  
ปีการศึกษา      2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมศักดิ์ อรรถทิมากุล, Ph.D.)


  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พฤตชน นินทนางศา, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนาจ เรืองวารี, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)  
วันที่ 25 เดือน มกราคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ
ชื่อ - นามสกุล	นายปราชญ์ อัครนรากุล
วิชาเอก	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวยการ เรืองวารี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2564

## บทคัดย่อ

โลกาภิวัตน์ได้ผลักดันให้การคมนาคมขนส่งขยายตัวในทุกภูมิภาคทั่วโลก ปริมาณยานพาหนะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ก่อให้เกิดปัญหาการจราจรและมลพิษ ระบบขนส่งอัจฉริยะเป็นวิธีแก้ปัญหาจราจรที่นำมาใช้งานในหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย อย่างเช่น ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ เป็นต้น อาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้บังคับและยืนยันตนของยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้อาร์เอฟไอดียังเป็นความท้าทาย เนื่องจากการใช้งานป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแข็งในปัจจุบันอาจนำไปสู่การทำลาย การจราจร หรือการสับเปลี่ยนที่ยากแก่การติดตาม การใช้สติ๊กเกอร์อาร์เอฟไอดีแทนป้ายอาร์เอฟไอดีเป็นวิธีแก้ปัญหาดังกล่าว

ดุษฎีนิพนธ์นี้เสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอดีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากวัสดุกราฟีน การออกแบบใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ร่วมกับโปรแกรมจำลองแบบ CST เพื่อหาค่าพารามิเตอร์สายอากาศที่เหมาะสมที่สุด นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างสายอากาศบนแผ่นกราฟีนที่จัดเตรียมขึ้น ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าวัดทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศที่นำเสนอ ผลการวัดทดสอบพบว่าสายอากาศอาร์เอฟไอดีติดบนกระจกหน้ายานพาหนะมีความกว้างแถบเท่ากับ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ช่วงความถี่ 1.8 ถึง 2.7 กิกะเฮิร์ตซ์โดยประมาณ มีอัตราขยายสูงสุดที่ 1.23 dBi ที่ความถี่กลาง 2.2 กิกะเฮิร์ตซ์ แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง สายอากาศอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอมีขนาดเล็ก ราคาถูก โค้งงอตามพื้นผิวของกระจกหน้ายานพาหนะได้ดีและยังคงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นที่ดี

นอกจากนี้ดุษฎีนิพนธ์ยังได้เสนอการออกแบบและสร้างรหัส MetalDs สำหรับโปรโตคอลยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดี การจำลองสถานการณ์พบว่าระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส MetalDs และโปรโตคอลที่นำเสนอมีความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการลี้วรหัสต่ำกว่าระบบดั้งเดิมที่ใช้งานอยู่แล้ว ผลสรุปของการวิจัยในดุษฎีนิพนธ์ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศอาร์เอฟไอดีที่ทำจากแผ่นกราฟีน รวมถึง โปรโตคอลยืนยันตัวตนของระบบอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอ มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะ

**คำสำคัญ:** ระบบขนส่งอัจฉริยะ อาร์เอฟไอดี สายอากาศกราฟีน

<b>Thesis Title</b>	Analysis and Design of Graphene-Based RFID Antenna for Intelligent Transport System
<b>Name - Surname</b>	Mr. Prach Asavanarakul
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof. Amnoiy Ruengwaree, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2021

## ABSTRACT

Globalization has driven the expansion of transport in every region of the world. The volume of vehicles has increased significantly, causing traffic and pollution problems. Intelligent Transport System (ITS) is a traffic solution implemented in many countries including Thailand, such as a system called Electronic Toll Collection (ETC). Radio-Frequency Identification (RFID) has been used as a new method to identify and authenticate a vehicle in ITS. However, the application of RFID is a challenge. This is because the current use of solid RFID tags can lead to loss, despoil, or swapping that is difficult to track. Instead, RFID stickers would replace RFID tags to solve the problem.

This dissertation proposed the design and construction of a rectangular RFID antenna made from graphene material. The design used mathematical methods in combination with a CST simulation program to determine the most suitable antenna parameters. The obtained parameters were used to create an antenna on the prepared graphene sheet. The antenna efficiency was tested by an electrical network analyzer. The results of the test revealed that an RFID antenna mounted on a vehicle's windshield has a band width of 900 MHz at a frequency range of approximately 1.8 to 2.7 GHz. It had a maximum gain of 1.23 dBi at a mid-frequency of 2.2 GHz. The form of energy radiating was omni-directional. The proposed RFID antenna was compact, low-cost, and bendable to fit into the surface of the windshield while retaining good wave propagation properties.

Moreover, this dissertation also proposed the design and code creation of MetalDs for the RFID authentication protocol. The simulation revealed that the automated toll collection system using MetalDs code and the proposed protocol had

lower probability of success in hacking than the traditional system. The conclusions of the dissertation research indicated that the graphene-based RFID antennas, and the proposed RFID system authentication protocol had the potential to be applied to the Intelligent Transport System.

**Keywords:** intelligent transport system: ITS, radio frequency identification: RFID, graphene antenna



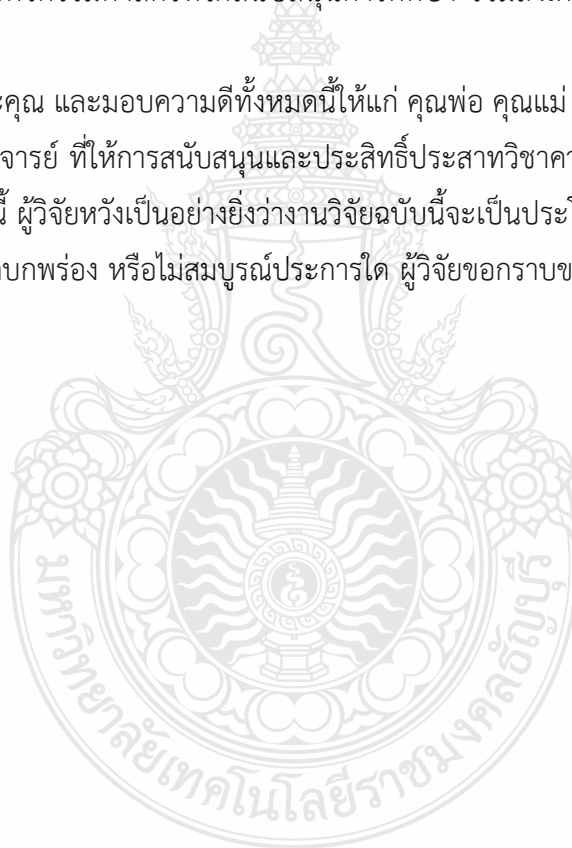
## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ อรรถทิมากุล ประธานกรรมการสอบ และกรรมการสอบทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนการศึกษา รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับดำเนินการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคณะครูอาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากมีส่วนหนึ่งส่วนใดขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ปราชญ์ อัครนรากุล



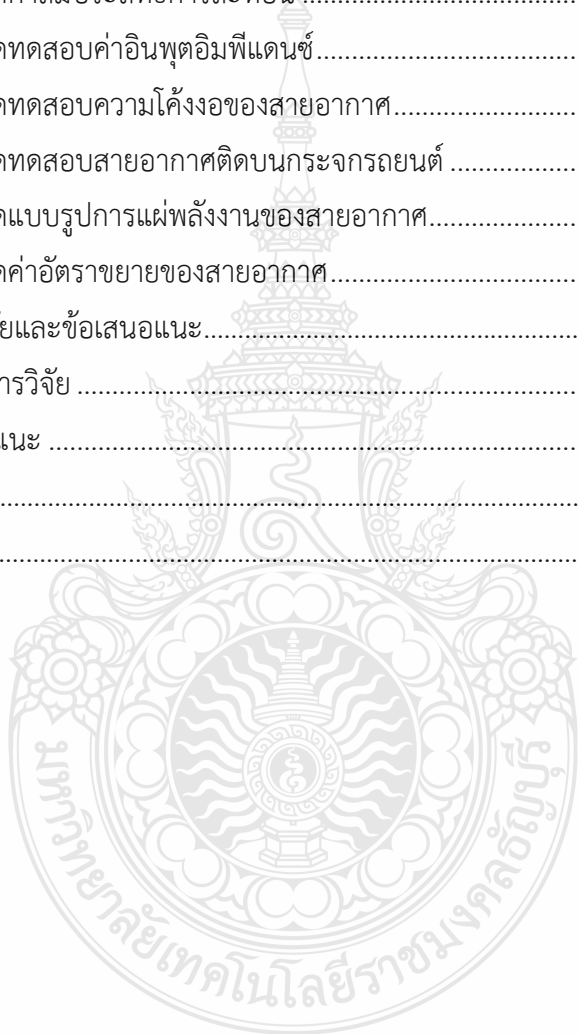
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	18
2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทย.....	23
2.3 อาร์เอฟไอดี.....	24
2.4 อาร์เอฟไอดีที่ใช้ในระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	39
2.5 ทฤษฎีสายอากาศ.....	41
2.6 กราฟีน.....	54
2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	57
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 อาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	61
3.2 การออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	62
3.3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST.....	67
3.4 การวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	81
3.5 การออกแบบและสร้างรหัส MetalDs สำหรับอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	84
3.6 การออกแบบโพโรโทคอลอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	86



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	93
4.1 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอทีบนแผ่นกราฟีน .....	93
4.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดและการวัดค่าความสูญเสียจากการสะท้อน .....	94
4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน .....	94
4.4 ผลการวัดทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์.....	95
4.5 ผลการวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศ.....	96
4.6 ผลการวัดทดสอบสายอากาศติดบนกระจกรถยนต์ .....	98
4.7 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	100
4.8 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	103
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	106
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	107
บรรณานุกรม.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	113



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล AQS.....	37
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องอ่าน/เขียนบัตรสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	39
ตารางที่ 2.3	การแผ่พลังงานในระยะต่าง ๆ.....	42
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติกราฟีน.....	57
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	67
ตารางที่ 3.2	ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ W3.....	69
ตารางที่ 3.3	ผลการจำลองจากการปรับความยาวของระนาบกราวด์ L3.....	70
ตารางที่ 3.4	ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ L4.....	72
ตารางที่ 3.5	ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ g.....	73
ตารางที่ 3.6	ผลการจำลองจากการปรับความยาวของแพตช์ L2.....	75
ตารางที่ 3.7	ผลการจำลองความโค้งงอของสายอากาศตามแกน X.....	76
ตารางที่ 3.8	ผลการจำลองโค้งงอสายอากาศตามแนวแกน Z.....	78
ตารางที่ 3.9	ผลการจำลองจากการติดสายอากาศบนกระจก.....	79
ตารางที่ 3.10	พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์.....	89
ตารางที่ 3.11	ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ใช้โพรโทคอลที่นำเสนอ.....	89
ตารางที่ 3.12	ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม.....	90
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบผลการจำลองกับการวัดสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีน.....	105

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบแนะนำเส้นทางจราจร.....	19
รูปที่ 2.2 ระบบ Advanced Driver Assistance System: ADAS.....	19
รูปที่ 2.3 ระบบเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์.....	22
รูปที่ 2.4 ป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์แจ้งความเร็วการใช้นานพาหนะ.....	22
รูปที่ 2.5 ป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์แจ้งข่าวสารและอุบัติเหตุ.....	24
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี.....	25
รูปที่ 2.7 ยุคแรกของการใช้อาร์เอฟไอดีในเชิงพาณิชย์.....	26
รูปที่ 2.8 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิพ.....	26
รูปที่ 2.9 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิพชนิดพาสซีฟ.....	27
รูปที่ 2.10 ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟ.....	28
รูปที่ 2.11 ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอกทีฟ.....	28
รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของเครื่องอ่าน เขียนข้อมูลอาร์เอฟไอดี.....	29
รูปที่ 2.13 ชนิดของรหัสเส้นที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดี.....	31
รูปที่ 2.14 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	32
รูปที่ 2.15 การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่.....	32
รูปที่ 2.16 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส.....	33
รูปที่ 2.17 ย่านความถี่ที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกใช้งาน.....	34
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล QT.....	35
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล BT.....	36
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล ABS.....	38
รูปที่ 2.21 ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ.....	38
รูปที่ 2.22 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน.....	41
รูปที่ 2.23 สนามบริเวณรอบสายอากาศ.....	42
รูปที่ 2.24 ลักษณะของโพลาริเซชัน.....	48
รูปที่ 2.25 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพล.....	49
รูปที่ 2.26 แบบจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	49
รูปที่ 2.27 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.28	โครงสร้างเครือข่ายของอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์และกราฟีน.....	54
รูปที่ 2.29	กราฟีนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	55
รูปที่ 2.30	ความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของกราฟีน.....	55
รูปที่ 2.31	โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน.....	57
รูปที่ 3.1	ระบบขนส่งอัจฉริยะ.....	61
รูปที่ 3.2	โปรแกรมคำนวณสายนำสัญญาณระนาบรวมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง.....	63
รูปที่ 3.3	โครงสร้างสายอากาศโมนโพลรูบี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	64
รูปที่ 3.4	โครงสร้างสายอากาศโมนโพลรูบี่เหลี่ยมผืนผ้าจากโปรแกรมจำลอง.....	67
รูปที่ 3.5	พารามิเตอร์ความกว้างของระนาบกราวด์ W3.....	68
รูปที่ 3.6	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ W3.....	68
รูปที่ 3.7	พารามิเตอร์ความยาวของระนาบกราวด์ L3.....	69
รูปที่ 3.8	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของระนาบกราวด์ L3.....	70
รูปที่ 3.9	พารามิเตอร์ความยาวของสายนำสัญญาณ L4.....	71
รูปที่ 3.10	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของสายนำสัญญาณ L4.....	71
รูปที่ 3.11	พารามิเตอร์ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์ g.....	72
รูปที่ 3.12	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับช่องว่าง g.....	73
รูปที่ 3.13	พารามิเตอร์ความยาวของแพตช์ L2.....	74
รูปที่ 3.14	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของแพตช์ L2.....	74
รูปที่ 3.15	แบบจำลองความโค้งงอของสายอากาศตามแกน X.....	75
รูปที่ 3.16	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการโค้งงอสายอากาศตามแกน X.....	76
รูปที่ 3.17	แบบจำลองความโค้งงอของสายอากาศตามแกน Z.....	77
รูปที่ 3.18	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการโค้งงอสายอากาศตามแกน Z.....	77
รูปที่ 3.19	แบบจำลองสายอากาศเมื่อติดบนกระจก.....	78
รูปที่ 3.20	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการติดสายอากาศบนกระจก.....	79
รูปที่ 3.21	แบบจำลองสายอากาศเมื่อติดสายอากาศบนกระจกโค้งงอ.....	80
รูปที่ 3.22	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการติดสายอากาศบนกระจกโค้งงอจากการจำลอง.....	80
รูปที่ 3.23	ผลการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.24	ผลการจำลองผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง.....	82
รูปที่ 3.25	ผลการจำลองผลค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปแบบ Smith Chart.....	82
รูปที่ 3.26	ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แบบ 2 มิติ.....	83
รูปที่ 3.27	ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แบบ 3 มิติ.....	84
รูปที่ 3.28	วงจรสร้างรหัสเลขสุ่มเทียม Maximum length sequence pseudorandom noise....	85
รูปที่ 3.29	ผลรวมแบบมอดูโล 2 ของรหัส PN กับข้อมูลจริง.....	86
รูปที่ 3.30	โพรโทคอลการสื่อสารและยืนยันตัวตนระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับป้ายอาร์เอฟไอดี.....	87
รูปที่ 3.31	การจำลองสถานการณ์รหัส MetalDs สำหรับอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ (ระบบ ผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ).....	88
รูปที่ 3.32	ผลการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสระหว่างระบบขนส่ง อัจฉริยะที่ใช้โพรโทคอลแบบที่นำเสนอ กับแบบดั้งเดิม.....	92
รูปที่ 4.1	สายอากาศต้นแบบที่สร้างสำเร็จ.....	93
รูปที่ 4.2	Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B.....	94
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองและการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้น .....	95
รูปที่ 4.4	ผลการทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....	95
รูปที่ 4.5	การวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศโพมขนาดรัศมี 3.5 เซนติเมตร.....	96
รูปที่ 4.6	การวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศโพมขนาดรัศมี 5 เซนติเมตร.....	96
รูปที่ 4.7	การวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศโพมขนาดรัศมี 6 เซนติเมตร.....	97
รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบผลการทดสอบความโค้งงอของสายอากาศ.....	97
รูปที่ 4.9	ผลการเปรียบเทียบความโค้งงอของสายอากาศระหว่างการจำลองและการวัดทดสอบ สายอากาศที่สร้างขึ้น.....	98
รูปที่ 4.10	สายอากาศอาร์เอฟไอดีต้นแบบติดบนกระจกยนต์.....	99
รูปที่ 4.11	เปรียบเทียบผลการวัดระหว่างสายอากาศที่ติดบนกระจกยนต์และไม่ติดบนกระจก ยนต์.....	99
รูปที่ 4.12	เปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดทดสอบสายอากาศที่ติดบนกระจกยนต์.....	100
รูปที่ 4.13	การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ XZ.....	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ YZ.....	101
รูปที่ 4.15 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติ.....	102
รูปที่ 4.16 การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....	103
รูปที่ 4.17 อัตราขยายของสายอากาศแบบฮอร์น Double Ridged Model 3117 ที่ภาคส่ง.....	104



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวของสังคมเมืองอย่างรวดเร็ว ทำให้การใช้ยานพาหนะในการคมนาคมขนส่งเพิ่มขึ้นด้วยอัตราสูงตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดสภาวะการจราจรติดขัดในเมืองใหญ่ทั่วโลก รวมถึงกรุงเทพมหานครของประเทศไทย นอกเหนือจากปัญหาการจราจรติดขัดแล้วปัญหาอีกอย่างที่เกิดควบคู่กันคือ มลภาวะทางอากาศ (Air pollution) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) เป็นตัวแปรของการเพิ่มปริมาณผงดำ (Black carbon) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เป็นองค์ประกอบของมลพิษในอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการจราจรติดขัด [1], [2]

ปัญหาด้านการจราจรในประเทศไทยเป็นปัญหาที่มีความสำคัญและรุนแรงขึ้นทุกปี ปัจจุบันปัญหานี้ไม่ได้พบในเฉพาะกรุงเทพมหานครเท่านั้น แต่ยังรุกรามออกไปยังเขตปริมณฑล และจังหวัดใหญ่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ ในปี พ.ศ. 2558 รัฐบาลไทยได้กำหนดวิสัยทัศน์เชิงนโยบายที่เรียกว่า ประเทศไทย 4.0 (Thailand 4.0) เพื่อพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไปสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ด้วยการพัฒนาอุตสาหกรรม 10 กลุ่ม หนึ่งในนั้นซึ่งถือว่ามีความสำคัญคืออุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ (Aviation and Logistics) กลไกสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมกลุ่มนี้คือการขนส่งและบริการด้านโลจิสติกส์ที่ต้องการความรวดเร็ว ปลอดภัย และมีความน่าเชื่อถือสูง ทั้งการคมนาคมทางอากาศ และภาคพื้นดิน ทั้งนี้เพื่อผลักดันให้เกิดการพัฒนาด้านการคมนาคมขนส่งสาธารณะ และการลดการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลจะทำให้สามารถลดปัญหาด้านการจราจรลงได้ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งสาธารณะขนาดใหญ่ต้องใช้งบประมาณในการลงทุนสูงมาก อาจจะดำเนินการได้ช้าเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาวะทางการเงินของประเทศ รวมทั้งสภาวะเศรษฐกิจโลกด้วย

ปัจจุบันได้มีระบบที่สามารถแก้ไขปัญหารถติดโดยใช้เงินทุนไม่สูงมาก และได้รับการพิสูจน์จากหลายประเทศว่าสามารถแก้ไขปัญหารถติดได้เป็นอย่างดีจนถึงระดับหนึ่ง ระบบนี้เรียกว่า ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transport System: ITS) เป็นการนำเทคโนโลยีเข้ามาพัฒนาปรับใช้ในกระบวนการ การสื่อสารข้อมูลจราจร การตรวจสอบและยืนยันตัวตนในการผ่านทาง การผ่านด่าน และการขนส่งสินค้า ซึ่งถือว่าจำเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันประเทศไทยพัฒนาการคมนาคมขนส่งไปสู่ระบบอัตโนมัติเพื่อรองรับปริมาณประชากร ยานพาหนะ และการขนส่งสินค้าที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งเป็นการแก้ปัญหารถติดที่เป็นสิ่งบั่นทอนการพัฒนาประเทศ

นอกจากการพัฒนาาระบบขนส่งอัจฉริยะแล้ว การพัฒนายานพาหนะไฟฟ้า (Electric Vehicles: EVs) ยานพาหนะไร้คนขับ(Unmanned Vehicles: UVs) และยานพาหนะอัจฉริยะ (Intelligence vehicles) เป็นอีกทางหนึ่งที่จะช่วยลดมลภาวะทางอากาศ ยานพาหนะสมัยใหม่เหล่านี้ยังมีความอัจฉริยะทั้งการช่วยเหลือผู้ขับขี่ในสถานะคับขัน การค้นหาเส้นทางอัตโนมัติ การหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีการจราจรติดขัด และอื่น ๆ ช่วยให้ผู้ขับขี่หรือผู้โดยสารใช้เวลาบนท้องถนนน้อยลง ในอนาคตคาดว่าจะมีเมืองใหญ่หลายเมืองที่นำยานพาหนะอัจฉริยะมาใช้แทนยานพาหนะที่ก่อให้เกิดมลพิษ อาทิเช่น เมืองปักกิ่ง เมืองเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน เมืองลอนดอน ประเทศอังกฤษ หรือแม้กระทั่งเมืองสิงคโปร์ ประเทศสิงคโปร์ที่มีแผนจะนำ Flying Taxi มาใช้ในการคมนาคมขนส่ง [3]

ปัจจุบันการพัฒนาด้านยานพาหนะไฟฟ้า ยานพาหนะอัจฉริยะ รวมทั้งอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Ariel Vehicles: UAVs or DRONE) มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ลักษณะที่สำคัญของยานพาหนะหรือยานยนต์อัจฉริยะประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ได้แก่ การขับขี่ด้วยตนเอง การขับขี่ที่ปลอดภัย การขับขี่เป็นสังคม เป็นยานยนต์ไฟฟ้า และมีแอปพลิเคชันบนมือถือ [4], [5] ยานพาหนะสมัยใหม่เหล่านี้ต้องใช้โครงข่ายสื่อสารและโทรคมนาคมในการเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อการตรวจวัด การควบคุมและแสดงผลการขับขี่ รวมทั้งการประมวลผลสถานการณ์ต่าง ๆ ทั้งในตัวยานพาหนะ ท้องถนน โครงสร้างพื้นฐาน และข้อมูลจราจร ปัจจุบันได้มีการนำอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IoT) มาใช้กับยานพาหนะ เรียกว่า อินเทอร์เน็ตของยานพาหนะ ((Internet of Vehicles: IoV) [4], [6], [7]

อินเทอร์เน็ตของยานพาหนะ (IoV) ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในระบบขนส่งอัจฉริยะซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Smart city) ยานพาหนะสมัยใหม่จะถูกรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ซึ่งเป็นเครือข่ายสื่อสารที่รวมทุกสิ่งเข้าด้วยกัน และเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งด้านการวิจัยและด้านการพาณิชย์ มีนักวิจัยจำนวนมากได้เสนอแนวทางการพัฒนาโครงข่ายการสื่อสารและการตรวจรู้สำหรับยานพาหนะสมัยใหม่ที่จะกลายเป็นส่วนประกอบของระบบขนส่งอัจฉริยะ

เทคโนโลยีการบ่งชี้วัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency identification) ในที่นี้จะเรียกสั้น ๆ ว่า อาร์เอฟไอดี (RFID) เป็นเทคโนโลยีการตรวจรู้ไร้สายที่มีประสิทธิภาพสูงที่นำมาใช้ในระบบขนส่งอัจฉริยะ อาทิเช่น ระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ระบบตัวโดยสารอิเล็กทรอนิกส์ของการขนส่งมวลชน ระบบบัตรผ่านที่จอดรถของศูนย์การค้าหรืออาคารในหน่วยงานราชการ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้งานอาร์เอฟไอดีในกรณีดังกล่าวข้างต้น มีวัตถุประสงค์หลักในการบริการการผ่านทางหรือที่จอดของยานพาหนะ ไม่มีการบ่งชี้ลักษณะเฉพาะของยานพาหนะแต่อย่างใด จึงเป็นระบบที่ยังไม่คำนึงถึงด้านความปลอดภัย การแยกแยะประเภทของยานพาหนะ การติดตามตรวจสอบถึงพฤติกรรม



การใช้ยานพาหนะแต่หากเป็นระบบที่มุ่งเน้นด้านความปลอดภัยและการติดตาม ตรวจสอบสิทธิ์การใช้งาน เช่น ระบบผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบผ่านด่านพรมแดนที่ขออนุญาตข้ามประเทศเพื่อวัตถุประสงค์ด้านการค้าหรือการท่องเที่ยว จำเป็นต้องพัฒนาอาร์เอฟไอดีให้รองรับประเด็นความปลอดภัยด้วย มิเช่นนั้นอาจเกิดการสวมสิทธิ์ การแอบอ้างสิทธิ์ การโจรกรรมยานพาหนะข้ามพรมแดน ที่ยากจะติดตามตรวจสอบได้

การวิจัยในดุษฎีนิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เทคโนโลยีที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ ประกอบด้วยเทคโนโลยีการตรวจรู้ด้วยอาร์เอฟไอดีที่สามารถรองรับการยืนยันตัวตนของยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะ และยังมีคำแนะนำการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในงานตรวจสอบและยืนยันตนของยานพาหนะสำหรับการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะที่จะนำไปสู่การพัฒนาเมืองอัจฉริยะในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบและแนวทางพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะ
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีและการประยุกต์ใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนวัสดุกราฟีน
- 1.2.4 เพื่อสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนวัสดุกราฟีนสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะ และประเมินผลการประยุกต์ใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาเทคโนโลยีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบขนส่งอัจฉริยะ และแนวทางในการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทย
- 1.3.2 ศึกษาเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.3.3 ศึกษาการออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนวัสดุกราฟีน
- 1.3.4 ออกแบบและสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะ เพื่อวัดทดสอบสมรรถนะ ประเมินผล และเสนอแนวทางการนำไปใช้งานจริงต่อไป

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทยเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัย
- 1.4.2 วิเคราะห์เทคโนโลยีการสื่อสารที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.4.3 วิเคราะห์เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.4.4 ออกแบบและสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับการขนส่งอัจฉริยะเพื่อวัดทดสอบสมรรถนะ
- 1.4.5 ประเมินผลการสร้างแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีน และเสนอแนวทางการนำไปใช้งานจริงต่อไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงเทคโนโลยีการสื่อสารที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.5.2 ทราบถึงเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่รองรับการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.5.3 ได้ต้นแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีที่นำไปประยุกต์ใช้ในการขนส่งอัจฉริยะ
- 1.5.4 เสนอแนวทางในการนำสายอากาศอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงความเป็นมาของระบบขนส่งอัจฉริยะ รวมถึงระบบที่นำมาใช้ในประเทศไทย เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี ทฤษฎีของสายอากาศ วัสดุกราฟีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ ที่นำเสนอในดุษฎีนิพนธ์นี้

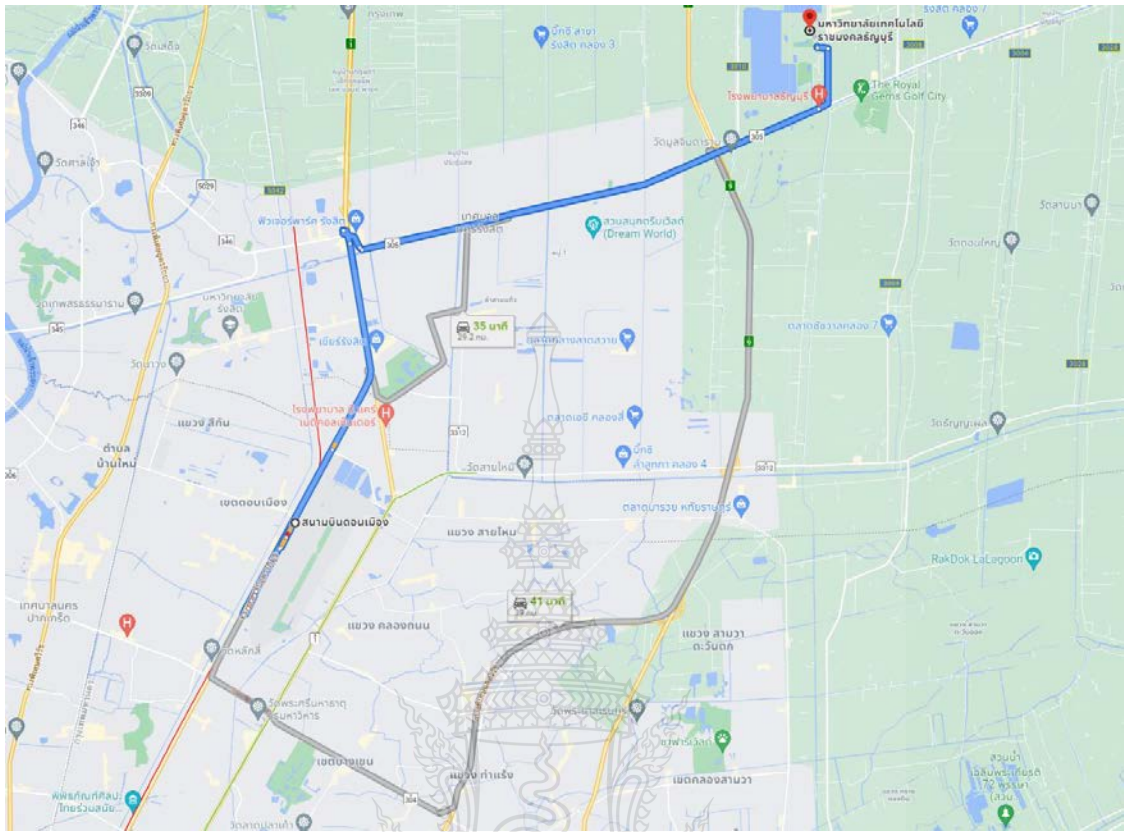
#### 2.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะ

ระบบขนส่งอัจฉริยะหรือ ITS มีหลายรูปแบบ สามารถแบ่งหมวดหมู่ตามการจัดของประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศญี่ปุ่น ได้ดังนี้ [8]

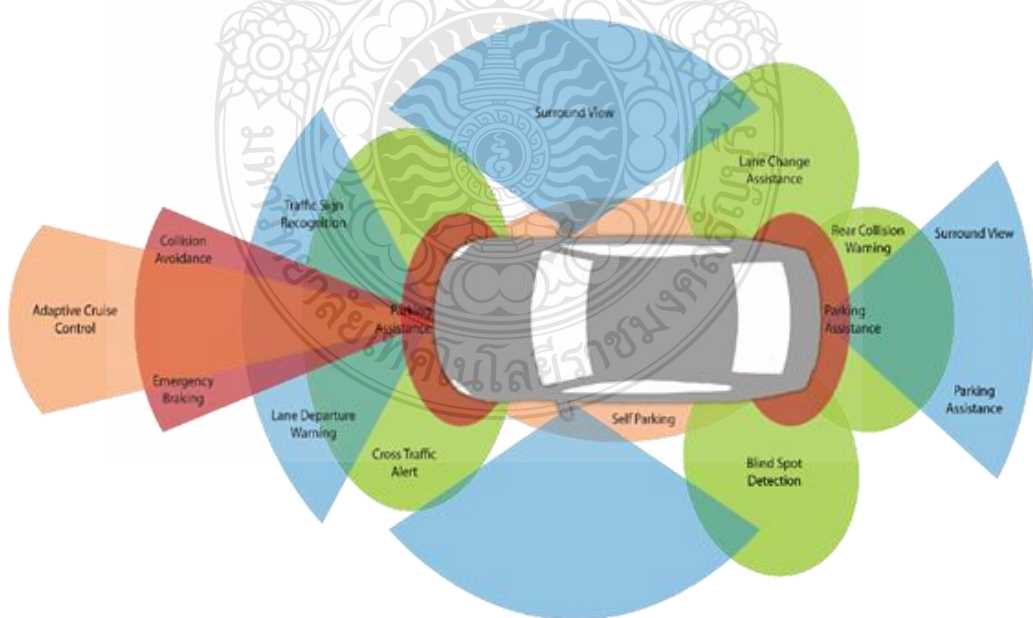
##### 2.1.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะตามการจัดของประเทศสหรัฐอเมริกา

2.1.1.1 Advance Traffic Management Systems: ATMS เป็นระบบตรวจติดตามการติดขัดของการจราจร เพื่อขจัดปัญหาหรือลดสถานะการติดขัด โดยอาศัยข้อมูลเส้นทางการจราจรแบบทันกาล (Real Time) จากจุดต่าง ๆ ที่ติดตั้งตัวตรวจรู้ปริมาณการจราจร (Tracking Sensor) ส่งเข้าระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล และส่งข้อมูลการจราจรที่จำเป็นเผยแพร่แก่ผู้เดินทางทั้งยานพาหนะส่วนบุคคลและระบบขนส่งสาธารณะถึงเส้นทางใหม่ ๆ ที่เหมาะสม

2.1.1.2 Advance Traveler Information Systems: ATIS เป็นระบบจัดหาข้อมูลให้แก่ผู้เดินทางเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ผู้ที่กำลังเดินทางอยู่ในยานพาหนะบนท้องถนน อาทิเช่น แผ่นป้ายอิเล็กทรอนิกส์แจ้งข้อมูลบนทางด่วนต่าง ๆ และผู้ใช้ข้อมูลทางออนไลน์ (Online) บนแอปพลิเคชันมือถือ (Mobile Application) อาทิเช่น Google MAP เป็นต้น นอกจากนี้รวมถึงอุปกรณ์แนะนำเส้นทาง (Navigators) ที่ติดตั้งมาในรถยนต์บางรุ่น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 Advance Vehicle Control Systems: AVCS เป็นระบบควบคุมยานพาหนะเพื่อการขับขี่อย่างปลอดภัย เช่น ตัวตรวจรู้เพื่อแจ้งเตือนสภาพถนน ตัวตรวจรู้ยานพาหนะด้านหน้าเพื่อแจ้งเตือนระยะปลอดภัยและควบคุมการเบรกของรถยนต์สมัยใหม่ เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้คือการช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่และลดจำนวนอุบัติเหตุลง ทำให้การจราจรมีการติดขัดน้อยลงตามไปด้วยระบบที่คล้ายกันนี้ในยุโรปเรียกว่า Advanced Driver Assistance System: ADAS ได้รับการพัฒนาโดยบริษัทผู้ผลิตรถยนต์และบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือวัดทดสอบหลายค่าย ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ยานยนต์สมัยใหม่ในระบบขนส่งอัจฉริยะจะได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ กล้องถ่ายภาพ และระบบสื่อสารเพื่อช่วยเหลือผู้ขับขี่ให้ได้รับความสะดวกสบายและปลอดภัยมากขึ้น



รูปที่ 2.1 ระบบแนะนำเส้นทางจราจร



รูปที่ 2.2 ระบบ Advanced Driver Assistance System: ADAS [9]

2.1.1.3 Commercial Vehicle Operations: CVO เป็นระบบที่นำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในการขนส่งของเอกชน อาทิเช่น ระบบ GPS (Global Positioning System) สำหรับการติดตามตำแหน่งของรถบรรทุก รถแท็กซี่ รถส่งสินค้าเอกชน รวมถึงการนำไปใช้กับรถโดยสารสาธารณะ อย่างเช่น รถปรับอากาศ รถร่วมบริการ และรถตู้โดยสาร เป็นต้น

2.1.1.4 Advance Public Transportation Systems: APTS เป็นระบบบริการข้อมูลการขนส่งสาธารณะแก่ผู้เดินทาง เพื่อใช้ในการวางแผนการเดินทาง ทำให้กำหนดเวลาการเดินทางได้แน่นอนขึ้น ช่วยลดเวลาที่ต้องรอคอยก่อนเดินทาง ทำให้ความแออัดในสถานีส่งสารณะลดลง

2.1.1.5 Advance Rural Transport Systems: ARTS เป็นระบบขนส่งอัจฉริยะที่ใช้กับถนนที่มีการสัญจรน้อย ถนนชนบท หรือพื้นที่ห่างไกล เพื่อให้บริการข้อมูลสภาพถนน สภาพภูมิอากาศ การแนะนำเส้นทางสำหรับผู้ที่กำลังจะเดินทางไปในพื้นที่นั้น ระบบนี้จะช่วยลดอุบัติเหตุ และลดเวลาในการเดินทางได้ด้วย

## 2.1.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะตามการจัดของประเทศญี่ปุ่น

2.1.2.1 Advance in Navigation Systems เป็นระบบบริการข้อมูลสภาพการจราจรเพื่อช่วยให้ผู้ขับขี่วางแผนการเดินทาง การเลือกเส้นทางที่มีการจราจรคล่องตัว หลีกเลียงเส้นทางที่มีการจราจรติดขัด ในประเทศญี่ปุ่นยังเพิ่มข้อมูลจุดจอดรถและสถานที่บริการรับจอดรถอีกด้วย เพราะถ้าไม่มีบริการส่วนนี้แล้วการขับรถเข้าเมืองใหญ่แทบจะหาที่จอดรถไม่ได้เลย ระบบนี้จะถูกติดตั้งมาในรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ เป็นจอแสดงผลบนบริเวณคอนโซลด้านหน้าผู้ขับขี่

2.1.2.2 Electronic Toll Collection: ETC เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยเรียกว่า ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ เนื่องจากระบบนี้ติดตั้งอยู่บนเส้นทางพิเศษ เช่น ทางยกระดับ (Tollway) ทางมอเตอร์เวย์ (Motorway) ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมทั้งเส้นทางใหม่ที่ขยายไปยังจังหวัดในเขตภาคตะวันออก ระบบ ETC จะช่วยลดเวลาในการรอคิวจ่ายค่าผ่านทางแบบเงินสดได้โดยอาศัยเทคโนโลยีการชี้เฉพาะวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification: RFID) ในการตรวจสอบและยืนยันตัวตนของยานพาหนะ และทำการตัดยอดค่าผ่านทางในบัญชีผู้ใช้แบบอัตโนมัติ

2.1.2.3 Assistance for Safe Driving เป็นระบบช่วยควบคุมการขับขี่อย่างปลอดภัย ระบบนี้จะเก็บข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุและสภาพถนนในเส้นทางและนำมาใช้ในการแจ้งเตือนผู้ขับขี่ รวมถึงการควบคุมยานพาหนะที่ติดตั้งระบบนี้ให้ชะลอความเร็วเพื่อความปลอดภัย ระบบจะถูกนำไปใช้ในระบบขนส่งสาธารณะและระบบขนส่งเอกชน เพื่อลดการสูญเสียจากอุบัติเหตุและความสับสนในการเดินทาง

2.1.2.4 Optimization of Traffic Management เป็นระบบบริหารการจราจร บริเวณทางแยก หรือบริเวณที่เกิดอุบัติเหตุบ่อยครั้ง เพื่อแจ้งข้อมูลแก่ผู้ขับขี่ยานพาหนะให้หลีกเลี่ยงทางแยกหรือบริเวณที่เกิดอุบัติเหตุที่มีการจราจรติดขัด

2.1.2.5 Increasing Efficiency in Road Management ระบบตรวจรู้นี้จะติดตั้งบนยานพาหนะและเก็บข้อมูลสภาพถนนทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และใช้ช่องทางสื่อสารที่ติดตั้งบนยานพาหนะในการส่งข้อมูล เมื่อถนนหรือบริเวณข้างเคียงเกิดการชำรุดจะส่งข้อมูลแจ้งเตือนไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้เข้ามาตรวจสอบ และทำการซ่อมแซมปรับปรุงอย่างทันทั่วทั้ง

2.1.2.6 Support for Public Transport เป็นระบบบริการข้อมูลรถโดยสารสาธารณะ เช่น หมายเลขรถประจำทาง เวลาที่รถจะมาถึง อัตราค่าโดยสาร ป้ายที่รถจะจอด เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ผู้โดยสารสามารถวางแผนการเดินทางได้ ทำให้ลดการแออัดในสถานีรถโดยสาร การจัดการในสถานีมีความคล่องตัวและปลอดภัยมากขึ้น

2.1.2.7 Increasing Efficiency in Commercial Vehicle Operations ระบบนี้จะใช้กับรถบรรทุกและรถขนส่งสินค้า เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งและลดปริมาณรถบรรทุกและรถขนส่งสินค้าในท้องถนน โดยการบริหารเส้นทางขนส่งให้มีประสิทธิภาพ ผู้ประกอบการสามารถรู้ตำแหน่งรถและวางแผนในการรับและส่งสินค้าได้

2.1.2.8 Support for Pedestrians เป็นระบบช่วยผู้เดินเท้าหรือผู้พิการ คนชรา ให้สามารถเดินทางได้อย่างปลอดภัย โดยใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและอุปกรณ์พกพาขนาดเล็กในการแนะนำเส้นทาง จุดข้ามถนน สัญญาณเตือนบริเวณทางแยกต่าง ๆ ในเทคโนโลยีขั้นสูงกว่านี้ รถเซ็นเซอร์อาจติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณแจ้งเตือนผู้ขับขี่ยานพาหนะให้ระมัดระวังเมื่อมีรถเซ็นเซอร์อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

2.1.2.9 Support for Emergency Vehicle Operations เป็นระบบที่ใช้สำหรับแจ้งข้อมูลข่าวสารเมื่อเกิดอุบัติเหตุ โดยระบบจะแจ้งสถานที่ที่เกิดอุบัติเหตุไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อเข้ามาช่วยเหลือผู้ประสบอุบัติเหตุ และส่งข้อมูลไปยังระบบแจ้งข้อมูลแก่ผู้ขับขี่ยานพาหนะให้หลีกเลี่ยงเส้นทางที่เกิดอุบัติเหตุ



รูปที่ 2.3 ระบบเก็บค่าผ่านทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.4 ป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์แจ้งความเร็วการใช้งานพาหนะ

## 2.2 ระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทย

ประเทศไทยได้มีการนำระบบขนส่งอัจฉริยะมาใช้งานหลายระบบและหลายเส้นทางเพื่อแก้ปัญหาการจราจร รวมถึงเพื่อความสะดวก ปลอดภัยในการขับขี่ ที่พบเห็นอยู่เป็นประจำสำหรับผู้ใช้งานพาหนะ คือ

1) ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การทางพิเศษแห่งประเทศไทยได้ติดตั้งระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติในหลายเส้นทางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เพื่อความสะดวก รวดเร็ว ในการผ่านทางพิเศษหรือทางด่วน เนื่องจากระบบอิเล็กทรอนิกส์ใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบจ่ายเงินสด ทำให้การจราจรบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางคล่องตัวขึ้น ระบบนี้เรียกว่า Easy Pass

2) ระบบป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์บนทางด่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นระบบป้ายอิเล็กทรอนิกส์แจ้งข้อมูลสภาพจราจรบนทางด่วนหรือทางพิเศษ เช่น การแจ้งข้อมูลการซ่อมทางที่บริเวณหลักกิโลเมตรหรือช่วงถนนที่กำหนด การแจ้งสภาพการจราจรติดขัดที่บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง ข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุบนทางพิเศษ เป็นต้น ดำเนินการโดย การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

3) ระบบป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์ในเขตเมือง สำหรับการแจ้งข้อมูลสภาพการจราจรในหลายเส้นทางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดำเนินการโดย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กรุงเทพมหานคร

4) ระบบจัดการรถโดยสารสาธารณะ เป็นระบบที่แสดงข้อมูลรถโดยสารสาธารณะเกี่ยวกับหมายเลขขบวนรถ เส้นทาง ป้ายที่รถจอด เวลาที่ต้องรอรถมาถึง ดำเนินการโดย ขสมก. กรมการขนส่งทางบก

5) ระบบแจ้งข่าวสารและอุบัติเหตุ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นศูนย์รับแจ้งอุบัติเหตุเพื่อประสานงานกับหน่วยงานที่ให้ความช่วยเหลือผู้ประสบอุบัติเหตุและโรงพยาบาลในระแวกใกล้เคียงเพื่อเตรียมการให้ความช่วยเหลืออย่างทันท่วงที ดำเนินการโดย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กรมทางหลวง ตำรวจทางหลวง และมูลนิธิที่เข้าร่วม





รูปที่ 2.5 ป้ายจราจรอิเล็กทรอนิกส์แจ้งข่าวสารและอุบัติเหตุ

## 2.3 อาร์เอฟไอดี

อาร์เอฟไอดี (RFID) ย่อมาจาก Radio Frequency Identification หรือระบบชี้เฉพาะวัตถุอัตโนมัติ (Automatic Identification) แบบไร้สาย (Wireless) ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ แนวคิดในการนำคลื่นวิทยุมาใช้แสดงตำแหน่งหรือแสดงตนเองได้เกิดขึ้นตั้งแต่ประมาณปลายสงครามโลกครั้งที่สองโดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการผสมหรือมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศที่อยู่ในตัวรับข้อมูล ซึ่งตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา อาร์เอฟไอดีได้ถูกพัฒนาเพื่อวัตถุประสงค์หลัก คือ การนำไปใช้แทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) และเนื่องจากอุปกรณ์อาร์เอฟไอดีในขณะนั้นไม่สะดวกที่จะนำมาใช้งานเพราะมีขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังมีราคาแพงจึงไม่ได้รับความนิยมมากเพียงพอที่จะนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์กรรมและเชิงราชการ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาอาร์เอฟไอดีอย่างต่อเนื่องจนสามารถลดขนาดให้เป็นแผ่นเล็ก ๆ (Chip) ได้ในปัจจุบัน

### 2.3.1 ความหมายของอาร์เอฟไอดี

อาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีระบุบุคลิกเฉพาะของวัตถุ บุคคล สัตว์ หรือสิ่งของ ที่มีป้ายอาร์เอฟไอดีติดอยู่ซึ่งจะสามารถแจ้งข้อมูลประวัติ หรือลักษณะเฉพาะผ่านทางคลื่นวิทยุโดยอัตโนมัติเพื่อใช้ในการตรวจสอบ ติดตาม ควบคุม และบริหารจัดการวัตถุอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความมั่นคงปลอดภัย เช่น ผลิตภัณฑ์ กล่อง หรือสิ่งของใด ๆ สามารถติดตามข้อมูลของวัตถุ 1 ชิ้นว่า คืออะไร ผลิตที่ไหน ใครเป็นผู้ผลิต ผลิตอย่างไร ผลิตวันไหน และเมื่อไร ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนกี่ชิ้น และแต่ละชิ้นมาจากที่ไหน รวมทั้งตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุนั้น ๆ ในปัจจุบันว่าอยู่ส่วนใดในโลกโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสัมผัส (Contact-less) หรือต้องเห็นวัตถุนั้น ๆ ก่อน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี [10]

ป้ายอาร์เอฟไอดี จะมีไอซีประเภทไมโครชิพ (Microchip) ใส่ไว้ภายใน ซึ่งไมโครชิพ จะเก็บข้อมูลที่สำคัญและจำเป็นไว้ และส่งสัญญาณข้อมูลออกมาด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่กำหนดไว้ ไปยังเครื่องอ่านเขียนข้อมูลที่อยู่ในระยะส่ง เครื่องอ่านเขียนข้อมูลก็สามารถอ่านข้อมูลจากป้ายอาร์เอฟไอดี ได้หลาย ๆ ใบพร้อมกันแบบไร้สัมผัส สามารถที่จะอ่านค่าได้แม้ในทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือนการกระทบกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

### 2.3.2 ประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี

เทคโนโลยีของอาร์เอฟไอดีมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ต้น ค.ศ.1920 โดยที่อุปกรณ์ RFI ที่มีการประดิษฐ์ขึ้นใช้งานเป็นครั้งแรกนั้น เป็นผลงานของ Leon Theremin ที่สร้างให้กับรัฐบาลของประเทศไทยในปี ค.ศ. 1945 ซึ่งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาในเวลานั้นทำหน้าที่เป็นเครื่องมือตรวจจับสัญญาณ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวระบุเอกลักษณ์อย่างที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

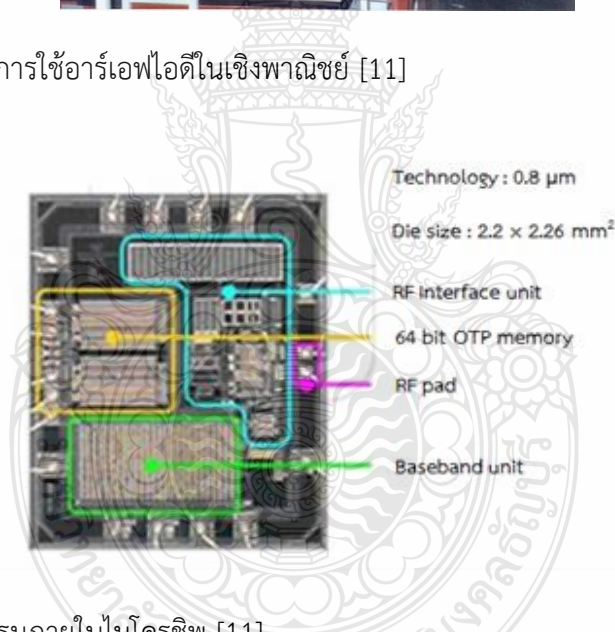
ประวัติการเริ่มต้นของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีนั้น ย้อนกลับไปสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งประเทศพันธมิตรและกลุ่มอักษะได้มีการใช้เรดาร์ ซึ่งถูกค้นพบโดย Sir Robert Watson-Watt ในปี ค.ศ. 1935 ใช้ในการตรวจจับและเตือนเครื่องบินที่กำลังเข้ามา แต่ปัญหาของการใช้ในยุคนั้นคือไม่สามารถแยกแยะระหว่างเครื่องบินรบว่าเป็นฝ่ายไหน ต่อมาทางฝั่งเยอรมันได้ค้นพบว่า เมื่อนักบินเริ่มหมุนตัวจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ที่เปลี่ยนไป ทำให้ทราบว่าเครื่องบินที่บินเข้ามาเป็นของเยอรมัน และเป็นจุดกำเนิดของอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟ (Passive RFID) ที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุ

เมื่อเทคโนโลยีเรดาร์มีการพัฒนามากขึ้น ทำให้นักบินสามารถที่จะสื่อสารระหว่างเครื่องบินกับสถานีภาคพื้นดินหรือระหว่างนักบินด้วยกันที่เราเรียกว่าระบบแยกแยะระหว่างมิตรกับศัตรู (Identification Friend or Foe : IFF) โดยที่ขณะนั้นมีเครื่องบินได้รับสัญญาณเรดาร์จากภาคพื้นดินหรือระหว่างเครื่องบิน ตัวเครื่องบินจะส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กลับไปทำให้ทราบว่าเป็นเครื่องบินจากฝั่งไหนซึ่งถือว่าเป็น RFID ชนิดแอ็กทีฟ (Active RFID) ที่วัตถุส่งสัญญาณจากตัวเอง

จากรูปที่ 2.7 แสดงการใช้อาร์เอฟไอดียุคเริ่มแรกในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ระบบกันขโมย (Electric Article Surveillance : EAS) ในห้างสรรพสินค้า ซึ่งตัวสินค้าจะมีการติดอาร์เอฟไอดีแบบ 1 บิต ซึ่งจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เมื่อสินค้ามีการชำระเงินแล้ว ตัวบิตถูกตั้งค่าเป็น 0 สามารถนำออกจากร้านได้ ในกรณีที่ไม่ได้ชำระเงิน เมื่อนำสินค้าผ่านระบบกันขโมย เมื่ออ่านค่าจากวัตถุในถุงลูกค้าเป็น 1 ก็จะมีสัญญาณเตือน



รูปที่ 2.7 ยุคแรกของการใช้อาร์เอฟไอดีในเชิงพาณิชย์ [11]



รูปที่ 2.8 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิพ [11]

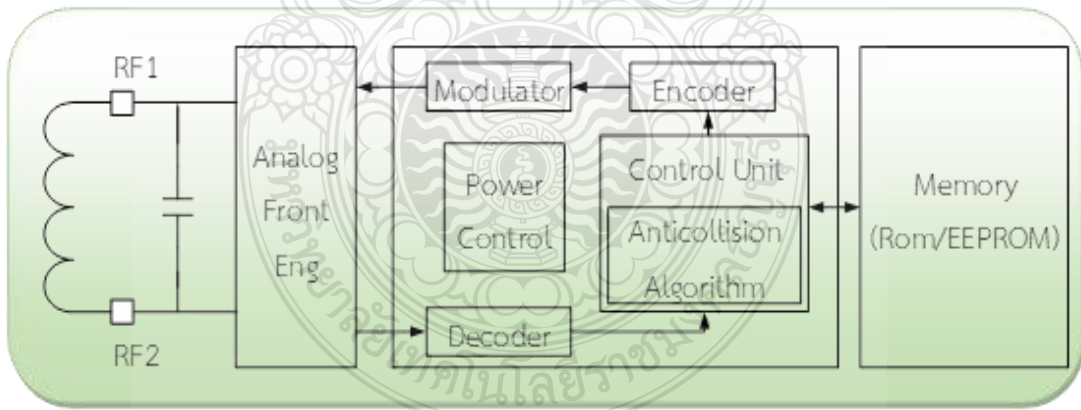
### 2.3.3 ส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดีมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 3 ส่วนดังนี้

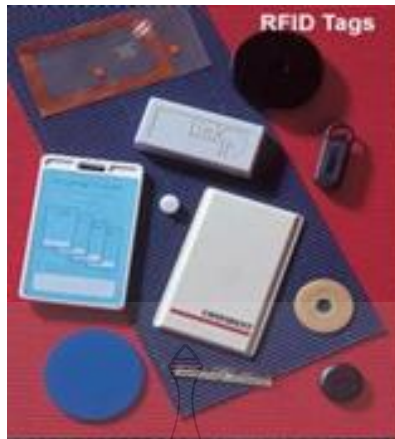
- 1) ส่วนที่ 1 คือบัตรหรือป้ายอาร์เอฟไอดี (RFID Tag) โดยป้ายอาร์เอฟไอดี นั้นจะประกอบด้วยสายอากาศและไมโครชิพที่มีการบันทึกหมายเลขประจำตัว (Identification: ID) หรือข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ ป้ายมี 2 ชนิดคือ ป้ายพาสซีฟ (Passive Tag) และป้ายชนิดแอคทีฟ (Active Tag)

จากรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างภายในป้ายอาร์เอฟไอดี ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของไมโครชิพ ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ เช่น รหัสสินค้าและส่วนของขดลวดขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นเสาอากาศขนาดเล็กซึ่งนิยมใช้แบบไดโพล ใช้สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนที่เป็นไมโครชิพ โดยทั่วไปป้ายอาร์เอฟไอดี จะอยู่ในรูปแบบที่เป็นกระดาษแผ่นฟิล์มพลาสติกมีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันไป ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำไปติดและมีหลายรูปแบบ เช่น บัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล หรือป้ายอาร์เอฟไอดี

ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอก เพราะภายในป้ายมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ระยะในการอ่านสูงสุดประมาณ 1 เมตร ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่ง และคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ปกติ ป้าย อาร์เอฟไอดี ชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก ซึ่งโดยทั่วไปประมาณ 16 ถึง 1,024 ไบต์ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ราคาต่อหน่วยต่ำ ไอซีของป้ายอาร์เอฟไอดี ชนิดพาสซีฟที่มีการผลิตออกมา จะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นแท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน ส่วนโครงสร้างภายในที่เป็น IC ของป้ายอาร์เอฟไอดี นั้น ก็จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนควบคุมการทำงานของภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ (Analog Front-End) ส่วนควบคุมภาคลอจิก (Digital Control Unit) ส่วนของหน่วยความจำ (Memory) ซึ่ง อาจจะเป็นแบบ Read Only Memory (ROM) หรือ Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 สถาปัตยกรรมภายในไมโครชิพชนิดพาสซีฟ [11]



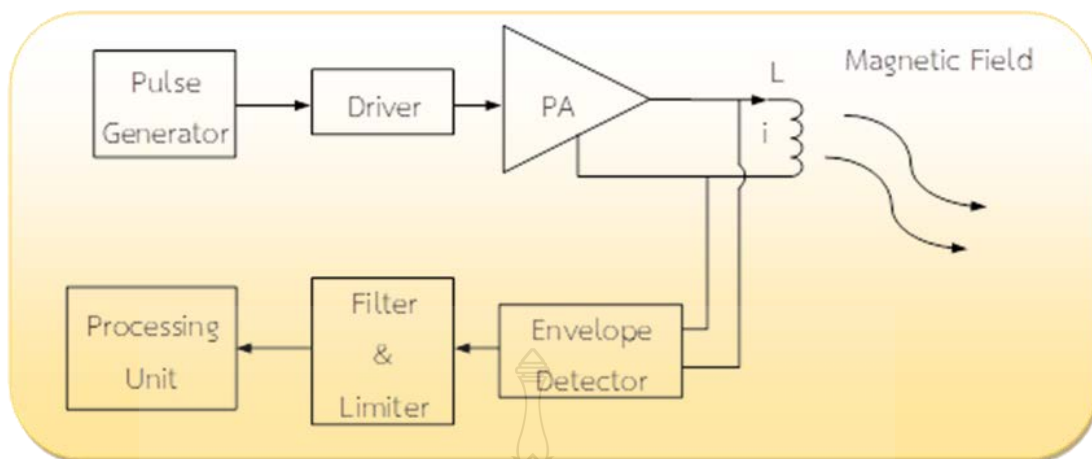
รูปที่ 2.10 ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟ [11]

ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟจะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน โดยหลักใหญ่อาจสามารถแบ่งตามหลักการทำงานได้ ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟจะทำการส่งข้อมูลออกต่อเมื่อได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่านและแบบเครื่องบอกตำแหน่ง (Beacon) ซึ่งสัญญาณจะถูกปล่อยออกมาเป็นระยะๆ ตลอดเวลา โดยป้ายอาร์เอฟไอดีแบบนี้สามารถมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ได้ถึง 1 เมกกะไบต์ และจะสามารถอ่านได้ในระยะไกลสูงสุดประมาณ 10 เมตร แม้ว่าป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดนี้มีข้อดีอยู่หลายข้อ แต่มีข้อเสีย เช่น มีราคาแพง และมีอายุการใช้งานจำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ ปกติจะมีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 3 - 7 ปี ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11

นอกจากป้ายอาร์เอฟไอดีแบ่งจากชนิดที่ว่ามาแล้ว ป้ายอาร์เอฟไอดี ก็ยังถูกแบ่งประเภทจากรูปแบบในการใช้งานได้เป็น 3 แบบ คือ เป็นแบบที่สามารถถูกอ่าน และเขียนข้อมูลได้อย่างอิสระ (Read-Write) เป็นแบบเขียนได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นแต่อ่านได้อย่างอิสระ Write-One Read Many (WORM) และแบบอ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read-Only)



รูปที่ 2.11 ป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอคทีฟ [11]



รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของเครื่องอ่าน เขียนข้อมูลอาร์เอฟไอดี [11]

2) เครื่องอ่านเขียนข้อมูลอาร์เอฟไอดี (RFID Reader) เรียกสั้น ๆ ว่า เครื่องอ่านทำหน้าที่เชื่อมต่อสื่อสารเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในป้ายอาร์เอฟไอดีด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ วงจรภายในเครื่องอ่านดังแสดงในรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุ ส่วนควบคุมและสายอากาศ ความถี่ที่สร้างขึ้นมีขนาดเท่ากับความถี่ที่ป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นสามารถตอบสนองได้ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อคลื่นสัญญาณกระทบกับป้ายอาร์เอฟไอดี เพื่อให้ป้ายอาร์เอฟไอดีส่งข้อมูลของตัวเองกลับมายังเครื่องอ่านเขียนข้อมูล จากนั้นจะแปลงสัญญาณที่ได้รับให้อยู่ในรูปดิจิทัล เพื่อใช้ประมวลผลทางคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ต่อไป เครื่องอ่านเขียนข้อมูลมีทั้งแบบอยู่กับที่และแบบพกพา เครื่องอ่านเขียนข้อมูลจะเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูลที่จัดเก็บข้อมูลของสินค้าหรือผู้ใช้เพื่อการตรวจสอบและยืนยันตัวตน เครื่องอ่านเขียนข้อมูลอาจรวมหรือแยกกับระบบฐานข้อมูลขึ้นอยู่กับขนาดของระบบรวมถึงรูปแบบการใช้งาน

#### 2.3.4 หลักการทำงานเบื้องต้นของอาร์เอฟไอดี

หลักการทำงานของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี นั้นคือ การส่งข้อมูลโดยอาศัยคลื่นวิทยุ ไปยังอุปกรณ์ภาครับ ซึ่งจะเป็นการลดความผิดพลาดที่เกิดจากการพิมพ์รหัสแท่ง หรือความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ นอกจากนี้รหัสดังกล่าวก็ยังมีการเก็บข้อมูลที่อาศัยตัวเลข 10 ถึง 12 หลักในการแทนข้อมูลที่เก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำงานโดยอ้างอิงจากระบบฐานข้อมูลที่มีอยู่ เช่น การที่เราไปซื้อสินค้าในซูเปอร์มาร์เก็ต และนำสินค้านั้นมาให้พนักงานอ่านรหัสดังกล่าว ซึ่งเครื่องอ่านเขียนข้อมูลจะอ่านตัวเลขจากรหัสแท่ง แล้วดึงข้อมูลของสินค้า และราคาจากระบบคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล เป็นต้น

ข้อควรคำนึงถึงในการใช้งานอาร์เอฟไอดี

1) ระยะเวลาในการอ่านข้อมูล

ระยะเวลาในการอ่านของเครื่องอ่านเขียนข้อมูลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ กำลังส่งของเครื่องอ่านเขียนข้อมูล และชนิดของป้ายอาร์เอฟไอดี ในการใช้งานทั่วไป ป้ายอาร์เอฟไอดี ความถี่ต่ำ (Low Frequency : LF) มีระยะทางในการอ่านประมาณ 10 - 30 เซนติเมตร ป้ายอาร์เอฟไอดี ความถี่สูง (High Frequency: HF) มีระยะทางการอ่านประมาณ 15 - 100 เซนติเมตร ป้ายอาร์เอฟไอดี ชนิดความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) มีระยะทางในการอ่านถึง 15 เมตร หรือถ้าเป็นป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดแอกทีฟจะอ่านได้ถึง 100 เมตร

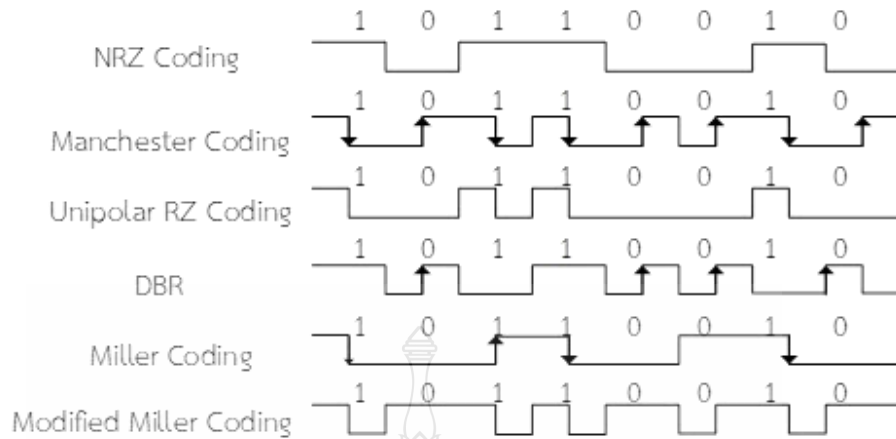
2) การชนกันของข้อมูล

เมื่อมีป้ายอาร์เอฟไอดีหลาย ๆ ใบเข้ามาอยู่ใกล้เครื่องอ่านเขียนข้อมูล ป้ายอาร์เอฟไอดี แต่ละอันจะพยายามส่งข้อมูลของตัวเองมาที่เครื่องอ่านเขียนข้อมูลพร้อม ๆ กัน ทำให้เครื่องอ่านเขียนข้อมูลไม่สามารถแยกแยะข้อมูลที่ส่งมาได้ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การชนกันของข้อมูล (Collision) วิธีการแก้ไขโดยการทำการเพิ่มฟังก์ชันป้องกันการชน (Anti-Collision) กันบนป้ายอาร์เอฟไอดี และเครื่องอ่านเขียนข้อมูล ซึ่งจะมีหลายเทคนิค เช่น จัดคิวการอ่านป้ายอาร์เอฟไอดี โดยทำเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ เมื่อป้ายอาร์เอฟไอดี โดนอ่านแล้วจะไม่มี การอ่านซ้ำอีก เช่น เทคนิคการเข้าถึงหลายแบบการแบ่งสเปซ (Space Division Multiple Access: SDMA) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (FDMA) และการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (CDMA) หรือเทคนิคขั้นสูงจะใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ และการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency Hopping: FH) เข้าช่วย

2.3.5 การเข้ารหัสและการมอดูเลต

2.3.5.1 การเข้ารหัส

การส่งรับข้อมูลแบบตรงไปตรงมา จะทำให้ข้อมูลที่ส่ง และรับนั้นมีความยาวเกินไป จึงมีการคิดค้นวิธีการเข้ารหัส ซึ่งการใช้รหัสจะช่วยให้การส่ง และรับข้อมูลสั้นสุดลง และไม่ถูกรบกวนจากสิ่งรบกวนภายนอก การเข้ารหัสมักเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการสื่อสารแบบดิจิทัล ในระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลนั้นจะใช้สัญลักษณ์ “0” กับ “1” แทนข้อมูล โดยความแตกต่างของข้อมูลจะเป็น ตัวกำหนดค่า “0” กับ “1” ของแต่ละบิตข้อมูล ข้อมูลจะถูกจัดเรียงเป็นแนวนอนหรือรหัสเส้น (Line code) ซึ่งมาตรฐานของรหัสเส้นจะมีหลายมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ชนิดของรหัสเส้นที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดี [12]

จากรูปที่ 2.13 จะพบว่า มาตรฐานของรหัสเส้นมีอยู่หลายชนิด ความแตกต่างของมันก็คือ ลักษณะการแสดงค่า “0” กับ “1” ที่ให้ลักษณะสัญญาณแตกต่างกัน แทนค่า “1” คือช่วงสัญญาณเป็น “High” สัญลักษณ์แทนค่า “0” คือช่วงสัญญาณเป็น “Low” Manchester Coding สัญลักษณ์ “1” จะแทนด้วยช่วงขอบขาลงของสัญญาณ สัญลักษณ์ “0” จะแทนด้วยขอบขาขึ้นของสัญญาณ โดยส่วนมากเทคนิคในการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านเขียนข้อมูลและป้ายอาร์เอฟไอดี จะใช้หลักการมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM) หรือใช้การมอดูเลตทางแอมพลิจูดบวกกับการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ (Manchester Encoded AM) แต่ในปัจจุบันก็มีป้ายอาร์เอฟไอดี ที่ใช้การมอดูเลตแบบอื่น ๆ ด้วย เช่น การมอดูเลตแบบเฟสชิฟคีย์อิง (Phase Shift Keying: PSK), ฟรีควเอนซีชิฟคีย์อิง (Frequency Shift Keying: FSK) หรืออาจจะเลือกใช้วิธีการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation: FM)

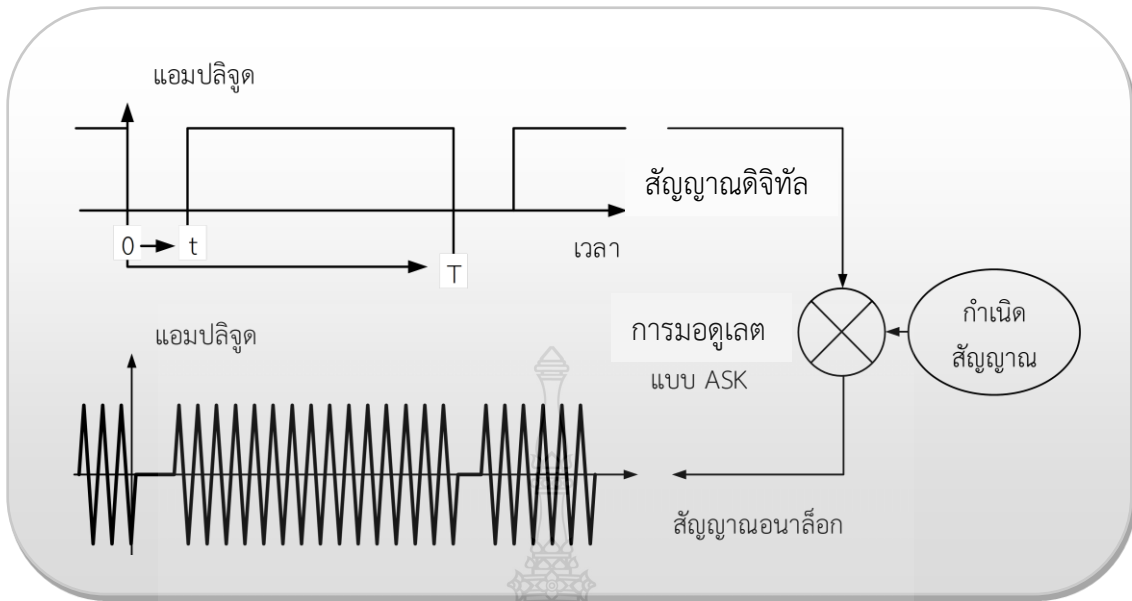
### 2.3.5.2 การมอดูเลตแบบดิจิตอล (Digital Modulation)

เนื่องจากหลักการพื้นฐานของอาร์เอฟไอดี คือใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสื่อสารรับและส่งข้อมูล ดังนั้นก่อนการสื่อสารจะต้องมีกระบวนการผสมข้อมูลที่เข้ารหัสไว้แล้วไปกับคลื่นพาหะ แต่เนื่องจากลักษณะข้อมูลเป็นดิจิตอลจึงต้องใช้วิธีมอดูเลตแบบดิจิตอล ซึ่งจะแตกต่างจากการผสมแบบอนาล็อกที่ใช้กันอยู่หลายระบบในปัจจุบัน เช่น การมอดูเลตทางความถี่ และการมอดูเลตทางแอมพลิจูด การผสมข้อมูลแบบดิจิตอลมี 3 วิธีดังนี้

#### (1) การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying: ASK)

เป็นวิธีของการผสมข้อมูลโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงยอดคลื่นพาหะ (Amplitude) เป็นตัวแสดงลักษณะของข้อมูลโดยความถี่ของคลื่นพาหะที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.14

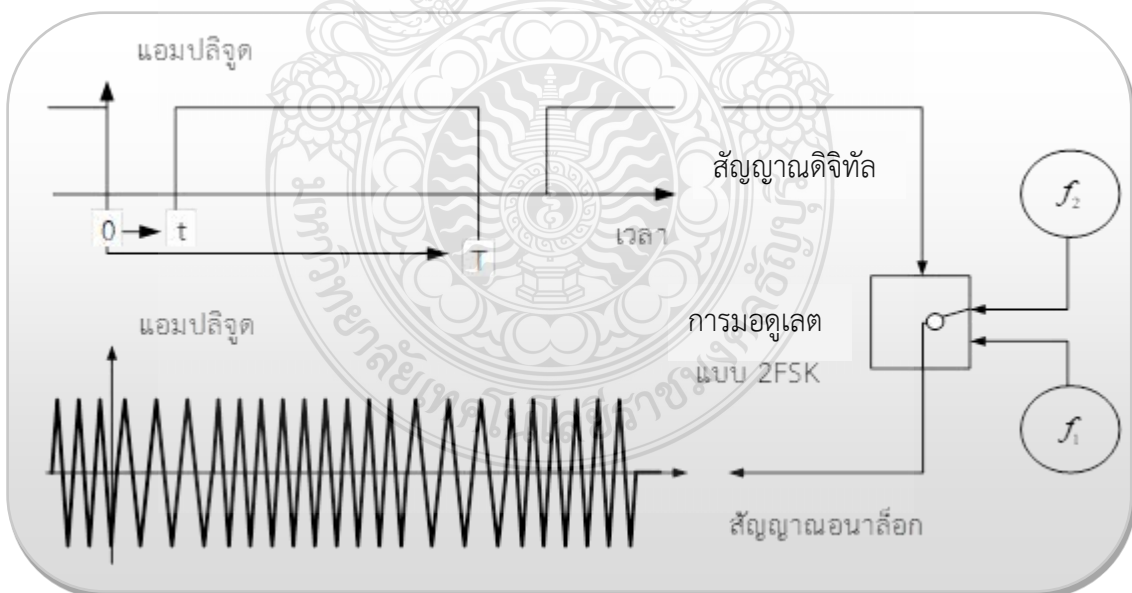




รูปที่ 2.14 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด [12]

(2) การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่

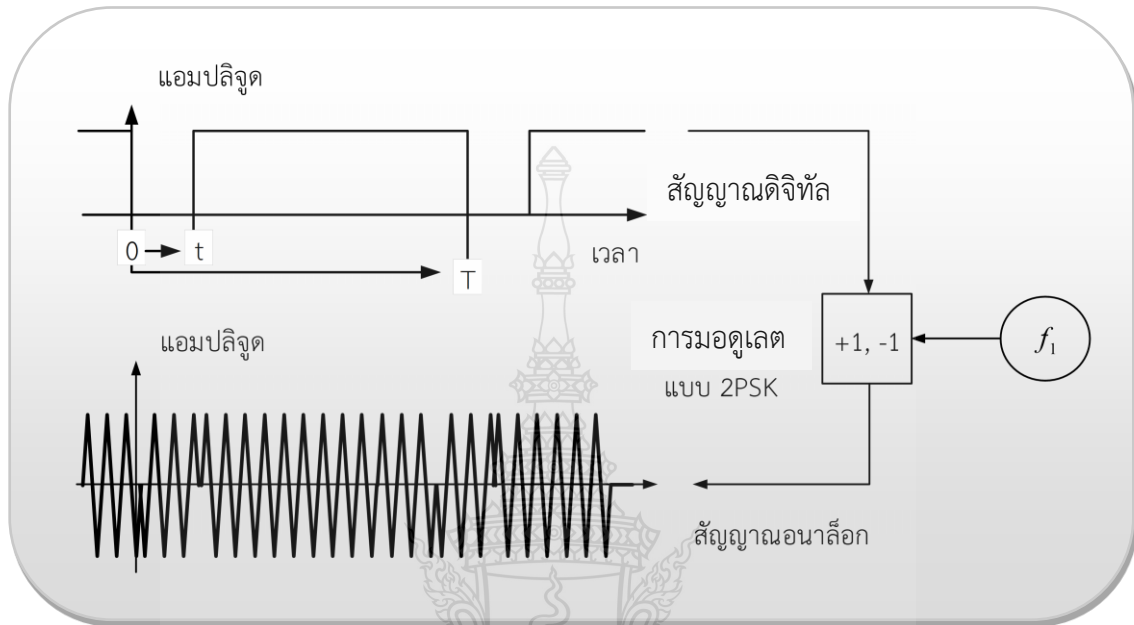
วิธีนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาหะระหว่าง 2 ความถี่ขึ้นอยู่กับสถานะของข้อมูล 0 กับ 1 โดยความสูงของยอดคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ [12]

### (3) การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส

วิธีนี้ใช้หลักการเปลี่ยนเฟสของลูกคลื่นเป็นตรงกันข้าม (0 องศา กับ 180 องศา) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2.16

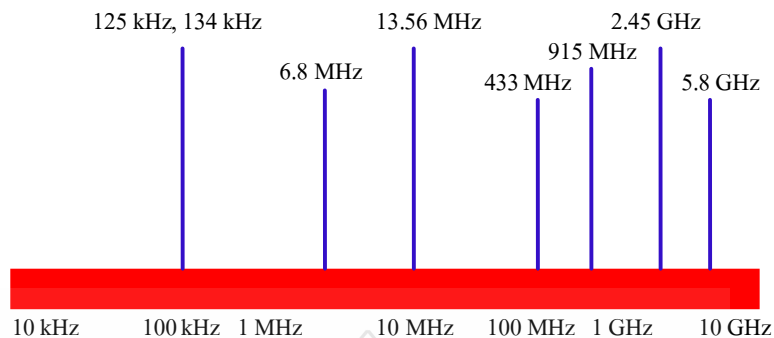


รูปที่ 2.16 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส [12]

#### 2.3.6 ย่านความถี่ใช้งานในอาร์เอฟไอดี

ปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานอยู่ในระบบอาร์เอฟไอดี จะอยู่ในย่านความถี่พลเรือน (Industrial Scientific Medical: ISM) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมี 4 ย่านความถี่ใช้งานคือ สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบอาร์เอฟไอดี อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านใหญ่ ๆ ได้แก่

- 1) ย่านความถี่ต่ำ ความถี่น้อยกว่า 150 kHz
- 2) ย่านความถี่สูง ความถี่ 13.56 - 27.125 MHz
- 3) ย่านความถี่สูงยิ่ง ความถี่ 433 - 915 MHz
- 4) ย่านความถี่ไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 - 5.8 GHz



รูปที่ 2.17 ย่านความถี่ที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกใช้งาน [12]

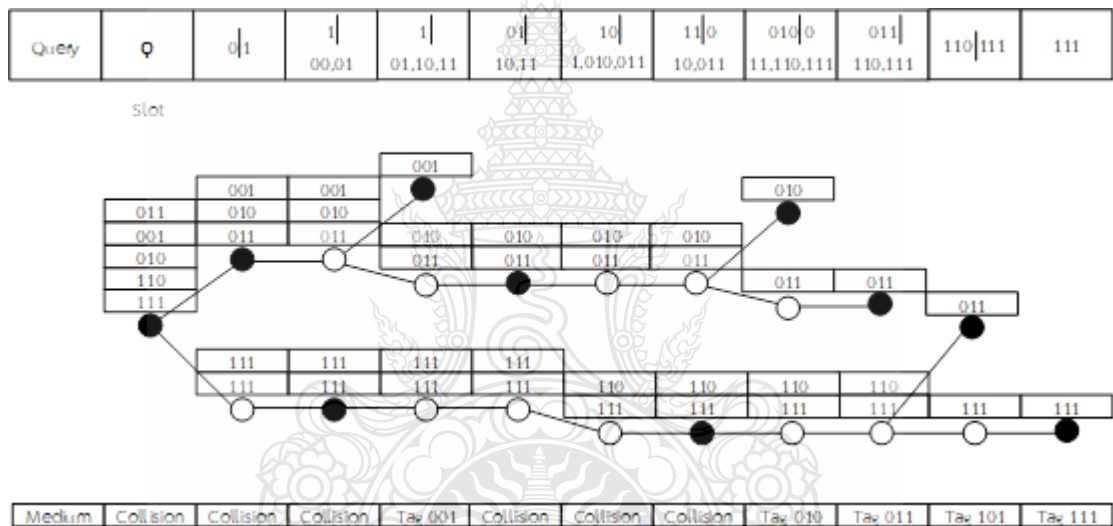
จากรูปที่ 2.17 จะแสดงถึงย่านความถี่ที่อาร์เอฟไอดี ส่วนในการใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ โดยย่านความถี่ต่ำ 125 kHz และ 134 kHz นิยมใช้สำหรับควบคุมการเข้า-ออกสถานที่ และการลงทะเบียนสัตว์ ส่วนย่านความถี่สูง 13.56 MHz นิยมใช้ในบัตรเอนกประสงค์ และหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกนำมาใช้กับการสื่อสารที่มีระยะทางที่ไกล

### 2.3.7 โพรโทคอลของระบบอาร์เอฟไอดี

โพรโทคอล (Protocol) คือ วิธีการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารเป็นข้อกำหนดหรือข้อตกลงที่ใช้ควบคุมการสื่อสารข้อมูลในเครือข่าย เครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์เครือข่ายที่ใช้โพรโทคอลชนิดเดียวกันเท่านั้นจึงจะสามารถติดต่อและส่งข้อมูลระหว่างกันได้ โพรโทคอลจึงมีลักษณะเช่นเดียวกับภาษาที่ใช้ในการสื่อสารของมนุษย์ที่ต้องใช้ภาษาเดียวกันจึงจะสามารถสื่อสารกันได้เข้าใจ ในเครือข่ายโพรโทคอลจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะหรือองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสื่อสาร ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการแทนข้อมูลวิธีการในการรับส่งข้อมูล รูปแบบสัญญาณการรับส่งอุปกรณ์หรือสื่อกลางในการส่งข้อมูลการกำหนดหรือการอ้างตำแหน่ง การตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลรวมถึงความเร็วในการรับส่งข้อมูล ในที่นี้หมายถึงป้ายอาร์เอฟไอดี และตัวอ่าน โพรโทคอลที่ใช้ในระบบสื่อสารโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ โพรโทคอลแบบฐานต้นไม้ (Tree Base Protocol) และโพรโทคอลแบบความน่าจะเป็น (Probabilistic Base Protocol) โพรโทคอลทั้งสองดังกล่าวยังแบ่งได้หลายชนิดตามกรรมวิธีที่แตกต่างกัน

โพรโทคอลที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดี ที่ใช้ในปัจจุบันอยู่บนพื้นฐานของสิ่งที่เรียกว่า กุญแจลับ โดยที่ผู้ส่งและรับต้องรักษาความลับของกุญแจนี้เช่น ดังนั้นอัลกอริทึมที่ใช้งานต้องมีความสามารถรับรองการลักลอบอ่านสัญญาณคลื่นพาหะของข้อมูล การลักลอบเข้าถึงระบบเพื่อเข้าใช้บริการโดยไม่ต้องจ่ายค่าบริการหรือ การดักฟังการติดต่อสื่อสาร และการนำข้อมูลเดิมกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโพรโทคอลสำหรับป้องกันการชนกันของข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดี 4 ชนิด ดังนี้

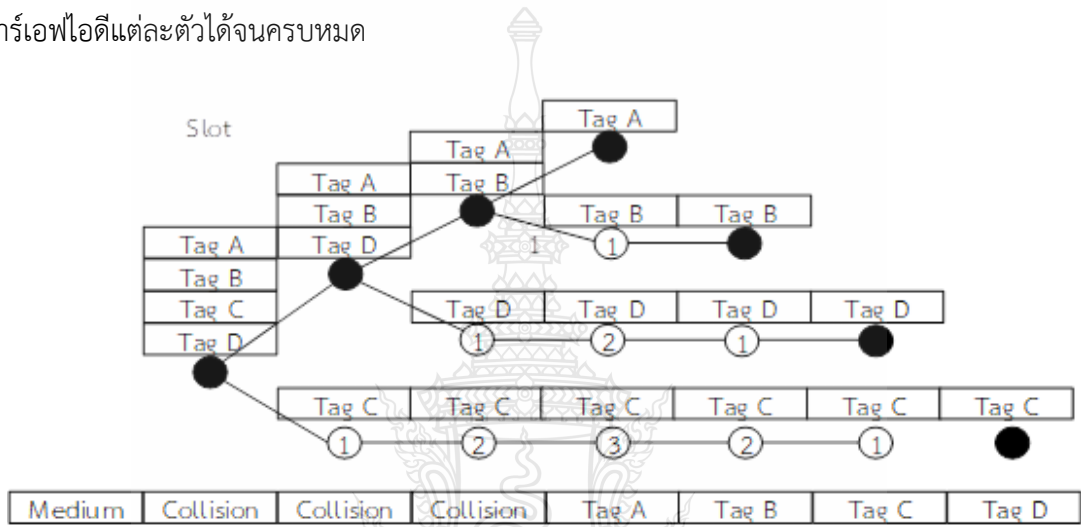
1) โพรโทคอล Query Tree (QT) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18 จะเป็นตัวกำหนดคิว (Queue) ให้กับ Tag ที่อยู่ในวิสัยการทำงานเพื่อส่งข้อมูลสำหรับการบวกรหัสเฉพาะ โดยเริ่มจากเครื่องอ่านเขียนข้อมูลทำการใส่ 0 กับ 1 ในคิวแล้วส่งให้กับป้ายอาร์เอฟไอดี จะเริ่มคิว 0 ก่อนเสมอ เฉพาะป้ายอาร์เอฟไอดีที่มีรหัสหน้าตรงกับคิวเท่านั้นที่จะส่งรหัสเฉพาะกลับไปเครื่องอ่านเขียนข้อมูลได้ ในกรณีป้ายอาร์เอฟไอดีหลายตัวที่มีรหัสตรงกับคิวจะเกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น จะทำให้เครื่องอ่านเขียนข้อมูลไม่สามารถชี้เฉพาะป้ายอาร์เอฟไอดีได้ เครื่องอ่านเขียนข้อมูลจะเพิ่ม 0 และ 1 เข้าไปในคิวเดิมที่มีการชนกันของข้อมูล เช่น จาก 0 และ 1 เป็น 00 และ 01 และนำคิวที่กำหนดขึ้นใหม่ต่อท้ายคิวที่มีอยู่จากนั้นจะทำการอ่านลำดับถัดไป และทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสามารถชี้เฉพาะป้ายอาร์เอฟไอดีที่อยู่ในวิสัยทำการได้ครบทั้งหมด



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล QT [13]

2) โพรโทคอล Binary Tree (BT) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.19 จะส่งข้อความ Identified หรือ Collided ให้กับป้ายอาร์เอฟไอดีที่อยู่ในวิสัยทำการ เมื่อป้ายอาร์เอฟไอดีได้รับข้อความ Identified แสดงว่า เครื่องอ่านเขียนข้อมูลทำการเรียกอ่านรหัสชี้เฉพาะ ป้ายอาร์เอฟไอดีจะทำการสุ่มตัวเลข 0 และ 1 ขึ้นเป็นเลขแสดงลำดับคิว ป้ายอาร์เอฟไอดีที่สุ่มได้ 0 จะส่งรหัสชี้เฉพาะให้ตัวอ่าน ส่วนป้ายอาร์เอฟไอดี ที่สุ่มได้ 1 จะต้องรอคิว 1 ช่องเวลา (Time Slot) เป็นอย่างน้อย กรณีมีป้ายอาร์เอฟไอดีหลายตัวสุ่มได้ 0 ในช่วงเวลาเดียวกันจะเกิดการชนกันของข้อมูลในกระบวนการชี้เฉพาะ เครื่องอ่านเขียนข้อมูลจะส่งข้อความ Collided ให้ป้ายอาร์เอฟไอดีรู้ว่าไม่สามารถชี้เฉพาะได้ในช่องเวลานี้ ป้ายอาร์เอฟไอดีที่คิวเป็น 0 จะทำการสุ่ม 0 หรือ 1 ขึ้นใหม่ ถ้าสุ่มได้ 0 จะส่งรหัสชี้เฉพาะให้เครื่องอ่าน ถ้าสุ่มได้ 1 จะต้องรอคิวช่องเวลาถัดไป ป้ายอาร์เอฟไอดีที่อยู่ในสถานะรอในช่วงเวลาก่อนหน้านี้จะบวกรหัสอีก

1 ในคิว และรอต่อไปอีกอย่างน้อย 2 ช่องเวลา กระบวนการจะทำวนซ้ำจนไม่เกิดการชนกันของข้อมูล  
 ใดๆ ก็ตาม เมื่อถึงเวลาหนึ่งจะมีป้ายอาร์เอฟไอดี เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ส่งได้ 0 ในช่องเวลานี้จะ  
 มีเพียงป้ายอาร์เอฟไอดีตัวนี้เท่านั้นที่ส่งรหัสชี้เฉพาะกลับไปยังเครื่องอ่านเขียนข้อมูลแล้วเครื่องอ่านเขียน  
 ข้อมูลจะสามารถชี้เฉพาะป้ายอาร์เอฟไอดีตัวนี้ได้ และส่งข้อความ Identified ให้ป้ายอาร์เอฟไอดี  
 ทั้งหมดได้รับรู้ ป้ายอาร์เอฟไอดีที่ถูกชี้เฉพาะไปแล้วจะหยุดตอบสนองในรอบนั้น ๆ ส่วนป้ายอาร์เอฟไอดี  
 ที่อยู่ในสถานะรอจะลดลำดับคิวลงครึ่งละ 1 คิว ซึ่งจะทำให้ตัวอ่านสามารถเรียงลำดับตัวชี้เฉพาะป้าย  
 อาร์เอฟไอดีแต่ละตัวได้จนครบหมด



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล BT [13]

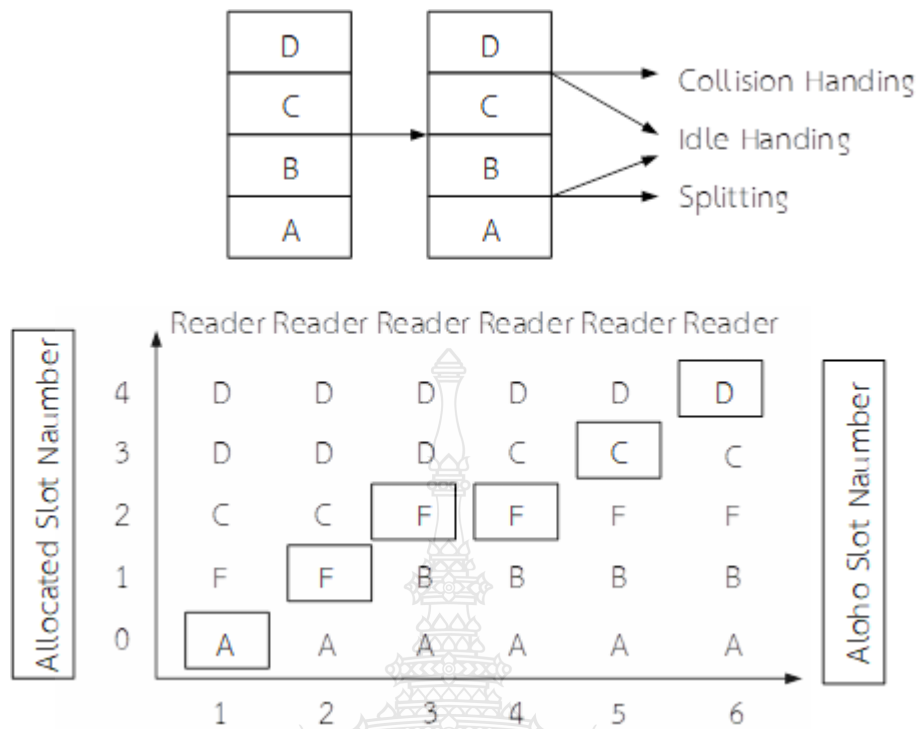
3) โพรโทคอล Adaptive Query Splitting (AQS) ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1  
 ข้อความในโพรโทคอล AQS ได้รับการพัฒนาจากโพรโทคอล QT เพื่อลดกระบวนการแตกแขนงให้  
 กระชับขึ้น กล่าวคือในโพรโทคอล QT เป็นการแตกแขนงจากรากไปหาใบแต่ในโพรโทคอล AQS เป็น  
 การแตกแขนงจากใบไปหาราก เครื่องอ่านจะจำค่าคิวในรอบการอ่านครั้งก่อนไว้เรียกว่า Candidate  
 Queue (CQ) เมื่อเริ่มการอ่านรอบใหม่ตัวอ่านจะจ่าย CQ ให้ป้ายอาร์เอฟไอดี เริ่มจากคิวใบไปหาราก  
 ถ้าไม่มีป้ายอาร์เอฟไอดี ใหม่เพิ่มเข้ามาในโครงข่ายโพรโทคอล AQS จะไม่เกิดการชนกันของข้อมูลแต่ถ้า  
 มีป้ายอาร์เอฟไอดี ใหม่เข้ามาเพิ่มกระบวนการแตกแขนงจะทำเฉพาะกิ่งนั้นทำให้กระบวนการอ่าน  
 กระชับขึ้นเพราะไม่ต้องไปเริ่มที่ราก

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล AQS

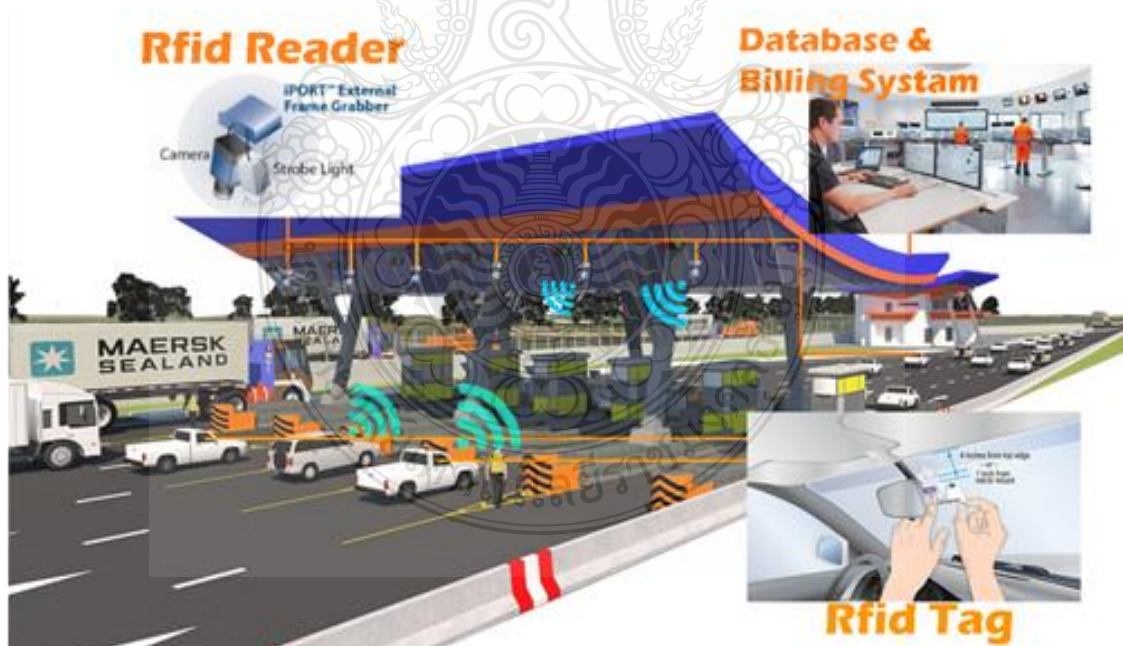
Query	Medium	000	001	011	010	111
0010010011110111	Collision	●				
10010011110111000001	Idle	○				
010011110111000001	Idle	○				
011110111000001	Readable	○		●		
011111000111	Readable	○			○	
111000001	Readable	○			●	
000001	Readable	○	●			
001	Readable		○			●

4) โพรโทคอล Adaptive Binary Splitting (ABS) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.20 ข้อความในโพรโทคอล ABS Tag จะจัดลำดับในรอบนั้นๆ ไว้ 2 ค่าคือ Allocated Slot Counter (ASC) และ Progressed Slot Counter (PSC) ค่า ASC กำหนดขึ้นด้วยวิธีการสุ่มในครั้งแรกเช่นเดียวกับโพรโทคอล BT โดยจะเพิ่มค่าทีละค่า 1 เมื่อต้องรอคิว และหยุดนับเมื่อชี้เฉพาะสำเร็จส่วนค่า PSC จะเริ่มที่ 0 เมื่อเริ่มอ่านข้อมูล และเพิ่มค่าขึ้นตามจำนวนช่องเวลาที่ผ่านไปป้ายอาร์เอฟไอดีอยู่ใน 3 สถานะ ดังนี้

- สถานะรอ (Wait State) เมื่อค่า ASC มากกว่า PSC สถานะนี้ป้ายอาร์เอฟไอดีจะรอข้อความจากตัวอ่าน
- สถานะแอคทีฟ (Active State) เมื่อค่า ASC เท่ากับ PSC สถานะนี้ป้ายอาร์เอฟไอดีจะทำการส่งรหัสชี้เฉพาะให้เครื่องอ่านเขียนข้อมูล
- สถานะหลับ (Sleep State) เมื่อค่า ASC น้อยกว่า PSC นั้นแสดงว่าป้ายอาร์เอฟไอดีตัวนี้ถูกชี้เฉพาะไปแล้ว ในสถานะนี้ป้ายอาร์เอฟไอดี จะหยุดตอบสนองการอ่าน และรอการเริ่มอ่านรอบใหม่เมื่อเครื่องอ่านเขียนข้อมูลสามารถชี้เฉพาะป้ายอาร์เอฟไอดี ได้ครบทั้งหมดในรอบนี้



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างรูปแบบการรับส่งข้อมูลโพรโทคอล ABS [13]



รูปที่ 2.21 ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ [14]

## 2.4 อาร์เอฟไอดีที่ใช้ในระบบขนส่งอัจฉริยะ

การนำอาร์เอฟไอดีมาใช้งานในระบบขนส่งอัจฉริยะในประเทศไทยที่เห็นได้อย่างเด่นชัด คือ ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ หรือที่นิยมเรียกว่า Easy Pass ดังแสดงในรูปที่ 2.21 องค์ประกอบของอาร์เอฟไอดีในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติมี 3 ส่วน คือ (1) ป้ายอาร์เอฟไอดี (RFID Tag) เป็นตัวเก็บรหัสหรือหมายเลข ID ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและยืนยันตัวตน โดยทั่วไปแล้วป้ายอาร์เอฟไอดีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ป้ายพาสซีฟ เป็นป้ายที่ไม่มีแบตเตอรี่ในตัวเอง ทำงานโดยอาศัยพลังงานจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน มีวิสัยการรับส่งข้อมูลระยะสั้น ๆ ใช้กับช่องทางจ่ายเงินสด และป้ายแอคทีฟ เป็นป้ายที่มีแบตเตอรี่ในตัวเองทำงานโดยอาศัยพลังงานแบตเตอรี่และพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่านข้อมูล วิสัยการรับส่งข้อมูลมีระยะไกล สามารถติดตั้งบริเวณกระจกหน้ายานพาหนะได้ (2) เครื่องอ่านข้อมูล (RFID Reader) ประกอบด้วยวงจรถ่ายทอดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรรับส่งข้อมูลและอ่านรหัสหรือหมายเลข ID จากป้ายที่เข้ามาในวิสัยทำการเครื่องอ่านข้อมูลจะติดตั้งบริเวณทางเข้าช่องทางอัตโนมัติ และ (3) ระบบฐานข้อมูลและการเรียกเก็บเงิน (Database and Billing System) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งเลขรหัสสำหรับการยืนยันตัวตน ยอดเงินในบัญชี การคำนวณค่าผ่านทางและการตัดยอดบัญชีอัตโนมัติ ระบบฐานข้อมูลจะติดตั้งในอาคารสำนักงานควบคุมด่านผ่านทาง และเชื่อมต่อผ่านโครงข่ายสื่อสารไปยังฐานข้อมูลกลางเพื่อให้บริการครอบคลุมได้หลายเส้นทาง คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องอ่าน/เขียนบัตรสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะแสดงดังตารางที่ 2.2



## ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องอ่าน/เขียนบัตรสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

Contactless Smart Card Reader/Writer Specification	Minimum Requirement Specification For Transit System	Recommended Specification For Transit System
<b>Standard Compliant</b>		
ICC Card	ISO 7816	ISO 7816
<b>Technical Specification</b>		
Power supply	12 V.	5-12 V.
Transmission Frequency	13.56MHz	13.56 MHz
CPU	32 bit processor	32 bit processor or above
Flash Memory Capacity	2 Mbyte	512 Mbyte or above
Card/CSC Reader	≥ 7 cm.	≥ 7 cm.
Communication distance		
Interface	RS232, speed ≥ 11.5kbps	RS232, speed ≥ 11.5kbps RS422, speed ≥ 465kbps (Optional) USB (Optional) 3G / Wifi / Bluetooth (Optional) Ethernet (optional)
Card Compliance	ISO 14443 TypeA (T-CL) Desfire	ISO 14443 TypeA (T-CL) or Type A/B/Felica
Hardware Compliance		Support EMVCo Level 1
Speaker		Buzzer or Speaker
SAM Slot	ISO 7816 T-0/1 Number of SAM Slot 2 slots	ISO 7816 T-0/1 Number of SAM Slot ≥ 4 slots
SAM Type	Support Native DESFire SAM	Support Native DESFire SAM, Java SAM, SAM
Special Feature	Anti-collision Encrypted data transmission 3DES	Anti-collision Encrypted data transmission 3DES or AES
<b>Environmental Specification</b>		
Operating Temperature	0C to +55C	0C to +55C
Storage Temperature	-20C to +60C	20C to +60C
RoHs Compliance	Support	Support
Operating Humidity	80% RH non-condensing.	80%RH non-condensing.

## 2.5 ทฤษฎีสายอากาศ

### 2.5.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.5.1.1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ การสูญเสียนี้เกิดขึ้นทุกครั้งที่เมื่อระบบการสื่อสารเริ่มทำงาน ซึ่งผลอาจไม่เป็นที่ต้องการเพราะจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง โดยการสูญเสียที่จะกล่าวในหัวข้อนี้คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งการสูญเสียประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลเข้าไปในระบบแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน [15]

ซึ่งค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return Loss} = -10 \log\left(\frac{P_r}{P_i}\right) \quad (2.1)$$

โดยที่  $P_i$  คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต  
 $P_r$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่ย้อนกลับ

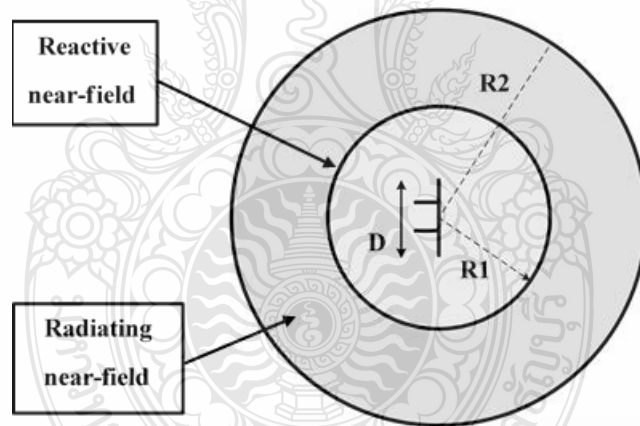
จากสมการจะเห็นว่าค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) คืออัตราส่วนของ  $P_r$  ต่อ  $P_i$  กับแสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมาก จะยิ่งดีเนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดี [15]

2.5.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation Pattern) เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่พลังงานของสายอากาศในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ตามพิกัด การพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานมี 3 ระยะ คือบริเวณสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field) สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Near field) และสนามระยะไกล (Far field) โดยแต่ละบริเวณจะพิจารณาจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปรอบ ๆ เป็นรัศมีเท่าใด ซึ่งพิจารณาจากตารางที่ 2.3 [16]

ตารางที่ 2.3 การแผ่พลังงานในระยะต่าง ๆ

ขนาดของ			
สายอากาศ (D)	$D \approx \lambda$	$D \approx \lambda$	$D \approx \lambda$
สนามระยะใกล้			
รีแอกทีฟ	$r < \lambda / 2\pi$	$r < \lambda / 2\pi$	$r < \lambda / 2\pi$
สนามระยะใกล้			
รีแอกทีฟ	$\lambda / 2\pi < r < 3\lambda$	$\lambda / 2\pi < r < 3\lambda$ and $2D^2 / \lambda$	$\lambda / 2\pi < r < 2D^2 / \lambda$
สนามระยะไกล	$r > 3\lambda$	$r > 3\lambda$ and $2D^2 / \lambda$	$r > 2D^2 / \lambda$

เมื่อ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณาและ r เป็นรัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงสนามแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่พลังงานในตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งบริเวณรอบ ๆ สายอากาศ



รูปที่ 2.23 สนามบริเวณรอบสายอากาศ [15]

ดังนั้น เส้นการกวาดของการแผ่พลังงานที่ตำแหน่งรัศมีคงที่และรอบสายอากาศเรียกว่าแบบรูปการแผ่พลังงาน ในการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานสามารถแสดงได้ทั้งแบบสองมิติและสามมิติ แต่นิยมรูปแบบสองมิติเพราะเพียงพอต่อการพิจารณา แบบรูปการแผ่พลังงานที่ออกไปรอบสายอากาศเท่ากันทั้งหมดหรือรอบทิศทางเรียกว่า การแผ่พลังงานแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งเป็นแบบรูปในอุดมคติที่พิจารณาได้จากสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก ส่วนแบบภาพที่ได้จากสายอากาศไดโพลในอุดมคตินั้นจะเป็นแบบรอบทิศทางระนาบเดียว (Omni direction)

2.5.1.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่งในทิศทางตรงกันข้ามคลื่นทั้งสองจะรวมตัวและหักล้างกันสลับกันไปผลที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันบนสายนำสัญญาณ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหนดผิดไปจากสภาวะที่โหนดแมตช์มากที่สุดเท่าไร เช่น VSWR = 1 หมายความว่าคลื่นสม่ำเสมอตลอดสาย ซึ่งเป็นสภาวะที่โหนดที่แมตช์พอดี VSWR = อนันต์ เมื่อโหนดเปิดวงจร หรือลัดวงจร

ถ้าโหนดที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ  $R_L$  และสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ  $Z_0$  เราสามารถคำนวณค่า VSWR ได้จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) [15]

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.2)$$

$$|\Gamma| = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.3)$$

โดยที่  $|\Gamma|$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน  
 $Z_{in}$  คือ อิมพีแดนซ์ของอินพุต  
 $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์ของเอาต์พุต

2.5.1.4 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) เป็นพารามิเตอร์ที่รวมประสิทธิภาพการสูญเสียที่สายอากาศและในโครงสร้างของสายอากาศ การสูญเสียต่าง ๆ หาได้จากค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจากการไม่แมตช์ซึ่งระหว่างสายส่งกับสายอากาศการสูญเสียจากตัวนำและฉนวนประสิทธิภาพรวมของสายอากาศสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.4) [15]

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.4)$$

โดยที่  $e_t$  คือ ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ  
 $e_r$  คือ  $(1 - |\Gamma|^2)$  ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์ซึ่ง  
 $e_c$  คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ  
 $e_d$  คือ ประสิทธิภาพของฉนวน

โดยทั่วไป  $e_c$  และ  $e_d$  จะรวมเป็นตัวเดียวกันตามสมการที่ (2.5)

$$e_{cd} = e_c e_d = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.5)$$

โดยที่  $R_r$  คือ ความต้านทานจากการแผ่พลังงานคลื่นออกไป  
 $R_L$  คือ ความต้านทานที่โหลด

2.5.1.5 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) เป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศเป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่พลังงานโดยเฉลี่ย เมื่อมีการแผ่พลังงานออกไปรอบทิศทางอย่างเท่าเทียมกัน โดยไม่คิดกำลังส่วนที่สูญเสียไปดังสมการที่ (2.6) [15]

$$D = \frac{U}{U_t} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $D$  คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ  
 $U$  คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงาน  
 $U_t$  คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานเฉลี่ย  
 $P_{rad}$  คือ กำลังงานที่สายอากาศแผ่ออกไป

โดยทั่วไปไม่กำหนดทิศทางใช้สภาพเจาะจงทิศทางในทิศที่สายอากาศแผ่พลังงานได้ดีที่สุดจากสมการที่ (2.7)

$$D = \frac{U_{max}}{U_t} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $D$  คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูงสุด  
 $U_{max}$  คือ ความเข้มของการแผ่กำลังงานที่สูงที่สุด

2.5.1.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่สภาพเจาะจงทิศทางแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้นการคิดอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับสายอากาศอ้างอิง โดยอัตราขยายของสายอากาศที่ภาคส่ง คือ กำลังสองของอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กตามทิศทางที่มีการแพร่พลังงานมากที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิงสายอากาศอ้างอิงมักจะใช้เป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) หรือแบบไดโพลขนาด  $\lambda / 2$  ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ มีการพลังงานได้รอบตัวทุกทิศทางในปริมาณที่เท่ากัน ทรายขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นจะมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่พลังงานในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่กำหนดทิศทางไว้ โดยทั่วไปคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานแรงที่สุดดังสมการที่ (2.8) [15]

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $P_{in}$  คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซโทรปิกพอยน์เตอร์ที่ไม่มี การสูญเสีย  
 $U(\theta, \phi)$  คือ ความแรงของการแพร่พลังงาน

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงอัตราขยายหมายถึงอัตราขยายกำลังที่มีค่าสูงสุด ดังสมการที่ (2.9)

$$G_0 = 10 \log_{10} [e_t D_0] \quad (2.9)$$

การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศเป็นการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายอากาศว่า มีประสิทธิภาพใดโดยทำการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องมือวัดวิเคราะห์ที่ทำให้สามารถหาอัตราขยายจากสมการที่ (2.10) [15]

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (2.10)$$

โดยที่  $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาครับ  
 $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาคส่ง

$L_f$  คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศเท่ากับ  $20 \log \frac{4\pi D}{\lambda}$

$L_{line}$  คือ กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งทั้งด้านส่งและภาครับ

$P_r$  คือ กำลังงานทางภาครับ

$P_t$  คือ กำลังงานทางด้านส่ง

2.5.1.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ พิจารณาสายอากาศเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เมื่อต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ พลังงานจะไหลเข้าสู่สายอากาศทีละน้อยเนื่องจากการต้านการไหลของพลังงานที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์ (Impedance) หรือความต้านทานเชิงซ้อนเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะปรากฏที่หัวของสายอากาศเรียกว่า อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ดังสมการที่ (2.11)

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $X_{in}$  คือความต้านทานเชิงจินตภาพที่ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานในบริเวณสนามใกล้สายอากาศโดยไม่แผ่กระจายออกไปและ  $R_{in}$  ประกอบด้วยสองส่วนคือ หมายถึง  $R_r$  ความต้านทานพลังคลื่นที่แผ่ออกไปโดยสายอากาศและ  $R_L$  หมายถึงความต้านทานที่ไหลลงซึ่งรวมถึงความต้านทานจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความร้อนสารไดอิเล็กตริกและตัวนำ [2]

2.5.1.8 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดย  $VSWR \cong 2$  หรือพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ที่ระดับ - 10 dB ตามสมการดังนี้ [15]

$$\text{Bandwidth} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_r} \times 100\% \quad (2.12)$$

โดยที่ Bandwidth คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ

$f_{max}$  คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่

$f_{min}$  คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่

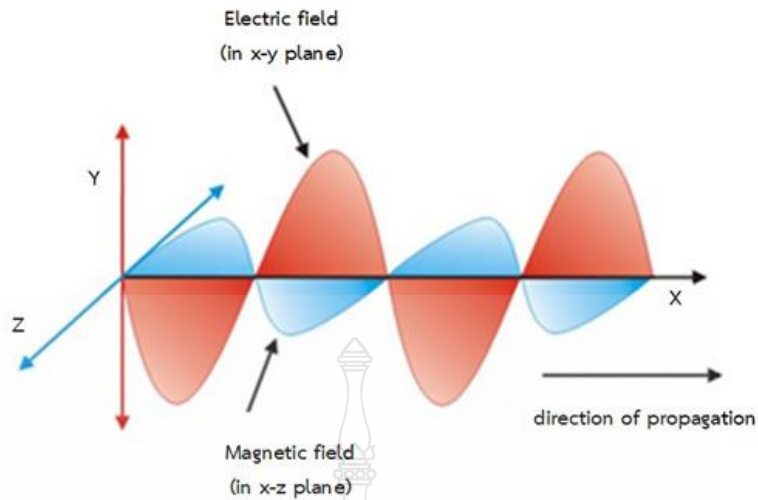
$f_r$  คือ ความถี่กลางของย่านความถี่

2.5.1.9 โพลาริเซชัน (Polarization) ของสายอากาศในทิศทางที่ถูกกำหนดถูกนิยามว่า โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศตัวส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น (เมื่อสายอากาศเป็นตัวรับ) จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่หัวของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้ จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะมีค่าแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดโพลาริเซชันแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization) โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization) ซึ่งแต่ละแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใด ๆ ในอวกาศ ซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่า โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนแบบวงรีจะเรียกสนามแบบนี้ว่า โพลาริเซชันแบบวงรี ทั้งโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น และโพลาริเซชันแบบวงกลมต่างก็เป็นหนึ่งในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรี โดยถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) คือ เมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว จะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันมือขวา (Right-hand Polarization: RP) ในขณะที่ถ้าหากสนามไฟฟ้าเกิดหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CCW) จะเป็นโพลาริเซชันมือซ้าย (Left-hand Polarization: LP)

โดยทั่วไปคุณลักษณะของโพลาริเซชันของสายอากาศจะแสดงด้วยแบบรูปโพลาริเซชัน ซึ่งถูกนิยามว่าเป็น การกระจายโพลาริเซชันในอวกาศของเวกเตอร์สนามของการแผ่พลังงานเมื่ออธิบายโพลาริเซชันบนทรงกลมการแผ่พลังงาน จะมีเส้นอ้างอิงบนทรงกลมเพื่อที่จะใช้วัดมุมเอียง (Tilt) ของโพลาริเซชันแบบวงรีและทิศทางของโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นโดยนิยามใช้กันคือระบบโคออดิเนตทรงกลมที่ใช้มุม  $\theta$  กับ  $\phi$  ในการระบุถึงเส้นอ้างอิงที่จุดใด ๆ บนทรงกลมการแผ่พลังงาน โพลาริเซชันจะแบ่งออกเป็นสองโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกันคือ โพลาริเซชันตาม (Co-polarization) และโพลาริเซชันไขว้ (Cross-polarization) โดยโพลาริเซชันตามแสดงถึงโพลาริเซชันของสายอากาศที่ตรงกับโพลาริเซชันในการที่จะส่ง(รับ) ขณะที่โพลาริเซชันแบบไขว้จะแสดงถึงโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกับโพลาริเซชันที่ต้องการ โดยปกติ โพลาริเซชันที่ต้องการหมายถึงโพลาริเซชันแสดงดังรูปที่ 2.24 แสดงการเดินทางของคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [15]

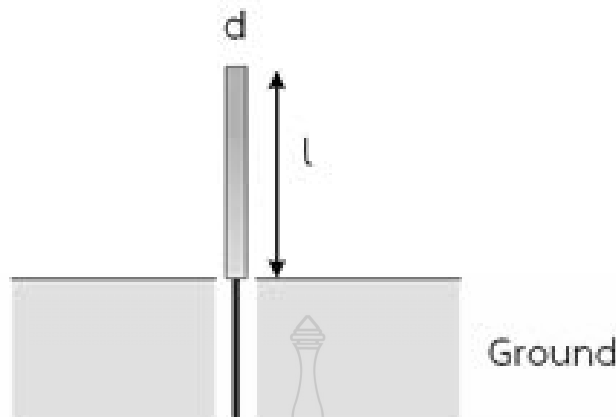




รูปที่ 2.24 ลักษณะของโพลาไรเซชัน [16]

### 2.5.2 สายอากาศโมโนโพล

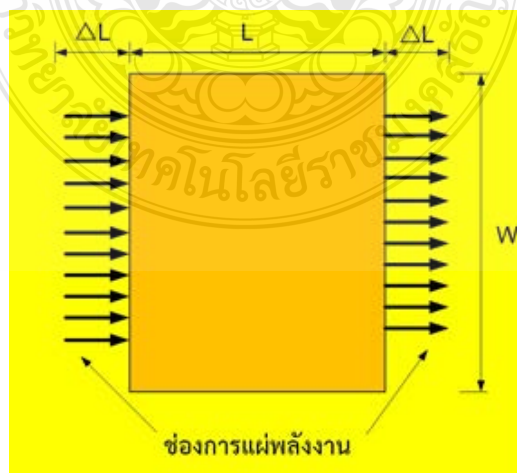
สายอากาศโมโนโพลเป็นการพัฒนารูปแบบและการทำงานจากสายอากาศไดโพลที่ทำงานแบบสองขั้วพื้นฐานการทำงานของสายอากาศไดโพล โครงสร้างจะเป็นสายส่งสองตัวนำปลายเปิดสองเส้น จุดที่ความยาวจากปลายสุดเท่ากับ  $\lambda/2$  เมื่อโค้งหรือหักงอให้ปลายสายมีลักษณะบานออกหรือหันไปทางตรงข้ามกันจะทำให้สายตัวนำเกิดการแผ่พลังงานออกไป ซึ่งเรียกว่าสายอากาศไดโพล ความยาวทั้งหมดของสายอากาศไดโพลเป็นเท่ากับ  $\lambda/2$  ของความถี่ที่ใช้งานส่วนสายอากาศโมโนโพลจะใช้ตัวนำด้านบนเพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแผ่พลังงานส่วนตัวนำด้านล่างจะเป็นระนาบกราวด์จะเห็นได้ว่าที่ความถี่เดียวกันสายอากาศโมโนโพลจะมีความยาวตัวแผ่พลังงานเท่ากับ  $\lambda/2$  แต่สายอากาศไดโพลจะเป็นเท่ากับ  $\lambda/2$  สองข้างสามารถพิจารณาได้ว่าสายอากาศไดโพลอาศัยหลักการทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลและมีระนาบกราวด์เข้ามาทดแทน อีกครึ่งหนึ่งเพื่อให้กระบวนการทำงานสมบูรณ์สายอากาศโมโนโพลจะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียวและจะใช้ระนาบกราวด์แทนขั้วที่เหลือแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพลจะคล้ายกับสายอากาศไดโพลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของระนาบกราวด์ซึ่งในทางอุดมคติแล้วระนาบกราวด์ของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นระนาบกราวด์สมบูรณ์แบบและเป็นอนันต์ ส่งผลให้แบบรูปการแผ่พลังงานมีเพียงด้านบนหรือเพียงครึ่งด้านบนของสายอากาศไดโพล แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะพบว่า ไม่สามารถออกแบบระนาบกราวด์ได้ตามอุดมคติดังนั้นระนาบกราวด์สายอากาศโมโนโพลในทางปฏิบัติจึงเล็กกว่าในทางทฤษฎีมากจึงทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานเกิดการเปลี่ยนทิศทางออกไปทางด้านหลังของระนาบกราวด์ด้วยหากออกแบบให้สายอากาศโมโนโพลมีระนาบกราวด์ขนาดเล็กมากจะพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานมีลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพลซึ่งมักจะเรียกกันว่า มีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายรอบตัว [17]



รูปที่ 2.25 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศโมโนโพล [17]

### 2.5.3 สายอากาศแบบไมโครสตริบ

การออกแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยช่องการแผ่พลังงานทั้งสองมีระยะห่าง  $L$  ดังรูปที่ 2.26 แบบของเส้นแนวไฟฟ้าที่อยู่ในฉนวนชั้นสเตรทและบางส่วนของเส้นที่อยู่ในอากาศมีผลต่อความไม่สมบูรณ์ของโหมด Transverse Electric-Magnetic (TEM) ความเร็วเฟสที่ระยะต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันออกไปทั้งที่อยู่ในอากาศและที่อยู่ในชั้นสเตรท เมื่อนำมาแทนในโหมดพื้นฐานของการแผ่พลังงานด้วยโหมด Quasi-TEM ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{re}$ ) จะต้องคำนวณหาใหม่เพื่อความถูกต้องสำหรับสนามฟรินจิง (Fringing) และการแผ่พลังงานในเส้นสนามไฟฟ้าค่า ( $\epsilon_{re}$ ) ที่ถูกต้องนั้นจะต้องน้อยกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวน ( $\epsilon_r$ ) เนื่องจากสนามฟรินจิงรอบ ๆ เส้นรอบวงของตัวสายอากาศจะไม่มีขอบเขตในฉนวนชั้นสเตรทแต่ยังแผ่พลังงานในอากาศ โดยที่ค่า ( $\epsilon_{re}$ ) แสดงดังนี้ [5]



รูปที่ 2.26 แบบจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศ [18]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

เมื่อสนามพริ้นจิงก์ตามแบบจำลองที่ขอบตัวสายอากาศทั้งสองด้านแสดงได้ ดังนี้

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.14)$$

ค่าความยาว L ของตัวสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหาได้จาก

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (2.15)$$

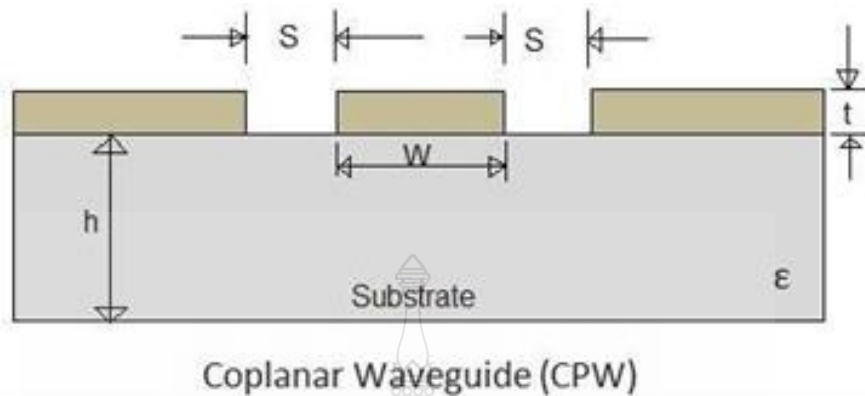
ค่าความกว้าง W ของตัวสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหาได้จาก

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.16)$$

ค่าความยาวสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) แสดงได้ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.17)$$

#### 2.5.4 สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 2.27 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมชนิดมีกราวด์ด้านล่าง [19]

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมจะใช้วิเคราะห์แบบสมมูลตลอดช่วง (Quasi static) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งคงรูป (Conformal mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณ การวิเคราะห์แบบนี้สามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมได้โดยค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบน ซึ่งอยู่ในอากาศกับระนาบครึ่งด้านล่างซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ขั้นแรก โดยใช้สมการต่อไปนี้ [20]

- โดยที่  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ  
 $C^a$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับ  $C$  แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศโดยจะได้

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \quad (2.18)$$

$$V_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.19)$$

$$\lambda_g = \frac{C}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.20)$$

$$Z_o = \frac{1}{Cv_p} = \frac{1}{C\sqrt{\epsilon_{re}}C^a} \quad (2.21)$$

- โดยที่  $\epsilon_{re}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผลของฐานรอง  
 $v_p$  คือ ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ  
 $\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ  
 $C$  คือ ความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง  
 $Z_o$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ในการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณจะใช้วิธีการส่งผ่านซึ่งในที่นี้ จะไม่ขอกล่าวถึงวิธีการหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำสัญญาณแต่จะพิจารณาเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จากสมการต่อไปนี้ [20]

$$Z_o = \frac{30\pi K(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \quad (2.22)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \quad (2.23)$$

$$q = \frac{1}{2} \left( \frac{K(k_2) K'(k_1)}{K'(k_2) K(k_1)} \right) \quad (2.24)$$

โดยที่  $q$  คือ ตัวประกอบการคูณ (Filling Factor)

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (2.25)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$a = \frac{w}{2} \quad (2.27)$$

$$b = \frac{(2g + w)}{2} \quad (2.28)$$

โดยที่  $g$  คือ ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์  
การอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้โดย

$$k_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.29)$$

โดยที่  $\theta$  คือ ตัวแปรเชิงซ้อน

เมื่อ

$$K(k_1) = K(k_1') \quad (2.30)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (2.31)$$

และอัตราส่วนของ  $K(k) / K(k')$  สามารถหาได้โดยการประมาณ คือ  
กรณี  $0 \leq k \leq 0.707$

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{\pi}{\ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k})}{(1 - \sqrt{k})} \right]} \quad (2.32)$$

กรณี  $0.707 \leq k \leq 1$

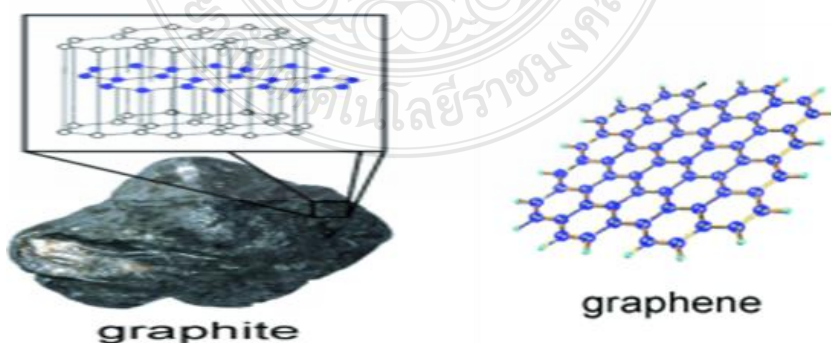
$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{2(1 + \sqrt{k})}{(1 - \sqrt{k})} \right] \quad (2.33)$$

## 2.6 กราฟีน

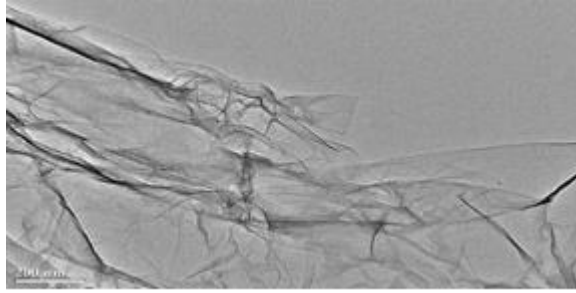
กราฟีน (Graphene) คือ 1 ชั้นอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม หากนำกราฟีนมาวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นจะได้แกรไฟต์ที่รู้จักกันดีในรูปของไส้ดินสอ เนื่องจาก กราฟีนมีความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียวทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไปจากคาร์บอนอัญรูปอื่น ๆ ก่อนหน้าการค้นพบกราฟีน นักวิทยาศาสตร์มีความคิดว่าวัสดุสองมิติไม่มีความเสถียรมากพอที่จะแยกออกมาให้มีความหนาเพียงแค่อะตอมชั้นเดียวได้ เพราะแต่ละชั้นจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน ที่เรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals) หรืออาจจะห่อตัวกันกลายเป็นทรงกลมเพื่อรักษาความเสถียรก็ได้แต่อย่างไรก็ตามนักฟิสิกส์รางวัลโนเบล ทั้งสองท่านก็สามารถแยกกราฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมได้สำเร็จ

การแยกชั้นกราฟีนจากแกรไฟต์ในเบื้องต้นนั้นสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยเทคนิค Micromechanical Cleavage หรือการนำสก็อตเทปทาบบนแกรไฟต์แล้วดึงออก จากนั้นก็นำไปทาบบนสก็อตเทปอีกอันหนึ่งแล้วดึงออก ในแต่ละครั้งแผ่นแกรไฟต์ที่ติดอยู่บนสก็อตเทปก็จะบางลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้แผ่นที่บางที่สุดแค่อะตอมเดียวเท่านั้น

วิธีที่ดีที่สุดที่บ่งชี้ว่าเราสร้างกราฟีนแล้ว คือ การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) และกล้องจุลทรรศน์แบบอะตอมมิกฟอร์ซ (Atomic Force Microscope) โดยจะเห็นชั้นของ กราฟีนเป็นแผ่นเยื่อบาง ๆ หรือเห็นกราฟีนมากกว่าหนึ่งชั้นที่ซ้อนทับกันอยู่แม้จะบางเพียงหนึ่งชั้นอะตอมเท่านั้นแต่กราฟีนก็มีความเสถียรและคงตัวอยู่ได้เนื่องจากกราฟีนไม่ได้วางตัวเรียบไปกับผิวสัมผัสแต่มีโครงสร้างพื้นผิวที่โค้งงอได้ลักษณะคล้ายกับเกลียวคลื่นอันเป็นรูปร่างที่สามารถช่วยลดพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ลงได้กราฟีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงและเชื่อมต่อกันเป็น โครงสร้างลักษณะเหมือนกับรังผึ้งทำให้กราฟีนมีความแข็งแรงกว่าเหล็กกล้า [21]

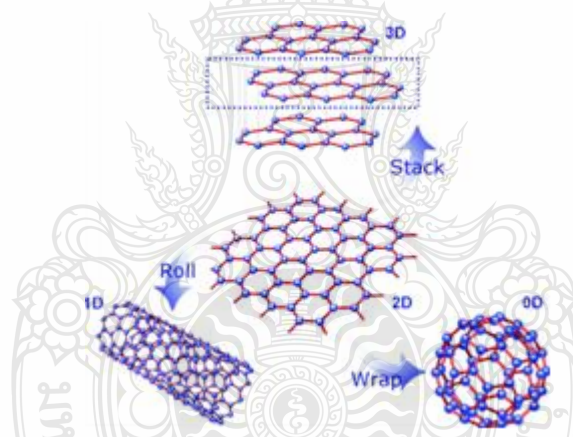


รูปที่ 2.28 โครงสร้างเครือข่ายของอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์และกราฟีน [21]



รูปที่ 2.29 กราฟีนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) [21]

ขณะเดียวกันกราฟีนยังนำไฟฟ้าได้ดีเพราะการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างรวดเร็วและในทางทฤษฎีกราฟีนที่มีน้ำหนักเพียงแค่ 1 กรัม จะมีพื้นที่ผิวมากถึง 2,360 ตารางเมตร หรือเทียบได้กับสนามเทนนิสถึง 10 สนามรวมกันหากนำวัสดุสองมิติอย่างกราฟีนมาต่อกันเป็นชั้น ๆ ก็จะได้วัสดุสามมิติคือแกรไฟต์ แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอกจะได้วัสดุหนึ่งมิติอย่างท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) และถ้าถูกห่อให้เป็นทรงกลมจะได้ฟูลเลอร์หรือ Bucky ball [21]



รูปที่ 2.30 ความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของกราฟีน [21]

### 2.6.1 คุณสมบัติของกราฟีนและการนำไปประยุกต์ใช้

1) เป็นวัสดุที่บางที่สุดเท่าที่มีการค้นพบ แม้ว่าในทางทฤษฎีจะไม่สามารถวัดความหนาของอะตอมได้แต่สามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมได้ ทำให้สามารถประเมินคร่าว ๆ ได้ว่าแผ่นกราฟีนหนาประมาณ 0.335 นาโนเมตร

2) กราฟีนชั้นเดียวสามารถมองเห็นได้โดยมีค่าการดูดซับแสงอยู่ที่ 2.3%

3) ความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก สามารถเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดี แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง



4) ในทางควอนตัมวัสดุที่มีขนาดเล็กจะมีคุณสมบัติพิเศษต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกราฟีนที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียว ในด้านความหนาจึงแสดงคุณสมบัติในทางควอนตัมออกมาแต่ว่าในทางกว้างและยาวมีคุณสมบัติตามวัสดุปกติกราฟีนจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนทั้งวัสดุธรรมดาและอนุภาคควอนตัมพร้อม ๆ กัน

5) กราฟีนสามารถบิดงอ ม้วน หรือพับ ได้อย่างง่ายดายโดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย

6) Thermal conductivity หรือความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะ ซึ่งวัดค่าความนำความร้อนจำเพาะของกราฟีนได้สูงกว่า วัสดุประเภทอื่น ๆ ด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนใน CPU

7) Electronic กราฟีนมีค่า mobility หรือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูงมากจะทำให้สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเร็วมาก ๆ ได้

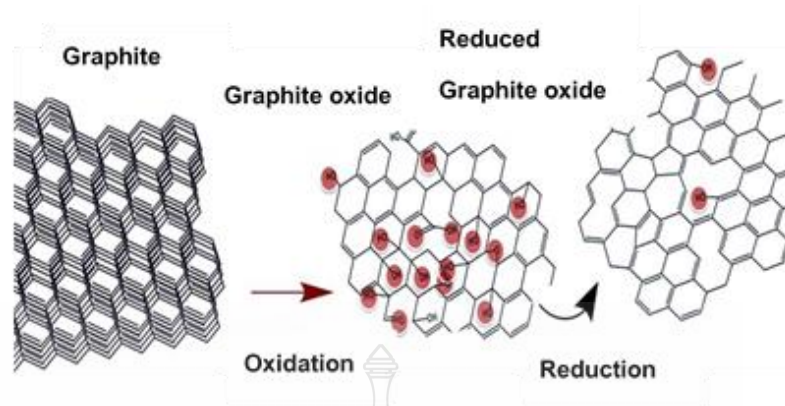
ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานกราฟีนที่หลากหลาย ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนา เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คาปาซิเตอร์ความจุสูง โซลาร์เซลล์ อารูธชีวภาพ เป็นต้น [21]

#### 2.6.2 การสังเคราะห์กราฟีนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

กราฟีนที่ได้จากวิธีการลอกด้วยสก็อตเทป นั้นมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่สม่ำเสมอจึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตกราฟีนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีสมบัติที่ควบคุมได้จากการควบคุมโครงสร้างการสังเคราะห์ที่นิยมและเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 การผลิตกราฟีนโดย Chemical Vapor Deposition หรือ CVD เป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนแผ่นโลหะโดยเริ่มต้นจากการปล่อยก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผา ที่มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่ด้วยเล็กน้อย เมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะที่อุณหภูมิสูงระดับ 1000 องศา จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนเกาะอยู่บนแผ่นโลหะและจัดเรียงโครงสร้างเป็นกราฟีนได้ในสภาวะที่เหมาะสม

วิธีที่ 2 การผลิตกราฟีนโดยกระบวนการทางเคมีเริ่มจากการออกซิไดซ์แกรไฟต์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่าแกรไฟต์ออกไซด์ หรือ กราฟีนออกไซด์ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (กราฟีนออกไซด์ 1 ชั้นมีความหนาประมาณ 0.9 นาโนเมตรเท่านั้น จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลง และเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วยซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถผลิต กราฟีนได้ในจำนวนมาก ๆ และต้นทุนต่ำกว่าวิธีแรกมาก แม้กราฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณภาพที่ด้อยกว่าก็ตาม แต่ก็ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิต เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ [22]



รูปที่ 2.31 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน [22]

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติกราฟีน]

คุณสมบัติกราฟีน	
ความหนา	0.012±0.003 mm.
สภาพนำความร้อน	1700-1900 w/m.k
ความหนาแน่น	>2.05 g/cm <sup>3</sup>
ความแข็ง	85 shore A
ความเค้น	650 psi
ความต้านทานความร้อน	400 °C
สภาพนำไฟฟ้า	19000 S/cm

## 2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและระบบขนส่งอัจฉริยะในชุมชนนิพนธ์นี้ในข้างต้น เนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยและพัฒนาสายอากาศ ที่นำไปสู่การออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

Z. Tang [24] ได้ศึกษาการออกแบบระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ (ETC) ที่ใช้วิธีบ่งชี้ยานพาหนะด้วยอาร์เอฟไอดีและภาพ พบว่ามีข้อดีมากกว่าการใช้เจ้าหน้าที่เป็นผู้บ่งชี้ยานพาหนะ

A. Bhavke และ S. Pai [25] ได้ศึกษาการออกแบบระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติเพื่อตรวจจับยานพาหนะด้วยระบบอาร์เอฟไอดี โดยมีการตรวจจับน้ำหนักการบรรทุกสิ่งของ เพื่อใช้จำแนกอัตราค่าบริการการผ่านทางเรียกว่า Smart weight based toll collection ผลการวิจัยพบว่าสามารถลดความติดขัดการจราจรบริเวณด่านเก็บเงินค่าผ่านทางลงได้

L. Cheng [26] และคณะได้พัฒนาโปรโตคอลการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีที่ปลอดภัย และน้ำหนักเบาที่นำไปใช้ในการบ่งชี้สินค้า โดยการปรับปรุงโปรโตคอลที่เพิ่มรหัสลับของยี่ห้อและลำดับของสินค้า ทำให้การยืนยันตัวตนสินค้ามีความปลอดภัยขึ้น

P. Peng และ Y. Zhao [27] ได้พัฒนาโปรโตคอลยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีที่มีความปลอดภัยและต่อต้านการทำซ้ำ (Anti-Cloning) ด้วยการปรับปรุงโปรโตคอลของ Vaudenay ที่เพิ่มฟังก์ชันการเป็นส่วนตัว ฟังก์ชันการต่อต้านการทำซ้ำทางกายภาพ กลไกการยืนยันตนเสมือน ทำให้การยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีมีความปลอดภัยขึ้น

A. Ruengwaree และคณะ [28] ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปทีและตัววี สายอากาศที่สร้างนั้นใช้วัสดุฐานรองประเภท FR-4 PCB มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.3 และค่าความหนา 0.764 มิลลิเมตร เพื่อทำให้ช่วงความถี่ใช้งานกว้างมากยิ่งขึ้นตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ช่วงความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีช่วงความถี่ใช้งานร้อยละ 110.56 จากความถี่ 3.09 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.73 กิกะเฮิรตซ์

W. Naktong และคณะ [29] ได้พัฒนาการออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูป H และตัว T สายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรองประเภท FR-4 มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 และ 35 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 และค่าความหนาเท่ากับ 0.764 มิลลิเมตร เพื่อทำให้ช่วงความถี่ใช้งานกว้างมากยิ่งขึ้นเป็นร้อยละ 130.49 จากความถี่ 2.82 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 13.41 กิกะเฮิรตซ์ โดยเพิ่มมากยิ่งขึ้นร้อยละ 53.35 ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a จากความถี่ 3.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 10.6 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 4.76 dBi เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสาร Ultra-Wideband

A. Ruengwaree และคณะ [30] ได้ใช้เทคนิคการเซาะร่องรูปตัวแอล (L) และการเพิ่มสัดับรูปตัวไอ (I) คู่ แบบใหม่ ใช้งานกับสายอากาศที่มีโครงสร้างช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้ครอบคลุมการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสาร WLAN/WiMAX มีช่วงความถี่ใช้งานร้อยละ 100.67 จากความถี่ 2.05 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 6.18 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 4.76 dBi

W. Naktong และคณะ [31], [32] ได้ใช้เทคนิคการเซาะร่องที่ ระนาบกราวด์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม จากการปรับแต่งพบว่า รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าส่งผลต่อการครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานในระบบสื่อสาร WLAN/WiMAX และ Ultra-Wideband มากที่สุด โดยมีช่วงความถี่ใช้งานร้อยละ 136.74 จากความถี่ 2.35 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 12.51 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศที่สร้างบนวัสดุฐานรองประเภท FR-4 มีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 7.46 dBi

W. Naktong และคณะ [33] ได้นำโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล ที่สร้างบนวัสดุฐานรองประเภท FR-4 มาจัดวางแบบ 2x2 กล่าวคือ แบบหน้ากับหน้า แบบหัวกับหัว แบบหัวกับท้าย และแบบตั้งฉาก โดยการจัดวางที่ดีที่สุดเป็นแบบตั้งฉากสามารถลดค่า isolation ได้ต่ำกว่า -20 dB ค่า ECC ต่ำกว่า 0.5 และมีข้อดีในด้านระยะการจัดวางใกล้มากที่สุด นำมาใช้งานในระบบรับส่งสัญญาณแบบ MIMO มาตรฐาน IEEE 802.15.3a มีช่วงความถี่ใช้งาน 2.60 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 11 กิกะเฮิรตซ์

W. Naktong และคณะ [34] ได้พัฒนาโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบ ที่สร้างบนวัสดุฐานรองประเภท FR-4 ใช้งานร่วมกับแผ่น EBG มาจัดวางรูปแบบ 3x3 นำมาใช้งานด้านดักเก็บพลังงานในระบบ WiFi ที่ย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สามารถดักเก็บพลังงานได้ 0.53 ไมโครวัตต์

W. Naktong และ N. Wattikornsirikul [35] ได้ออกแบบสายอากาศไดโพลที่มีการปรับด้วยสตัปรูปตัว U และ L สำหรับตามมาตรฐานโทรทัศน์ Digital Video Broadcasting (DVB) ใช้งานในช่วงความถี่ 510 – 790 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อนำไปติดตั้งบนโทรทัศน์ โดยใช้เทคนิคการลดการสะท้อนคลื่นสัญญาณด้วยแผ่นแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า Electromagnetic band gap (EBG) รูปไอ 1x40 หน่วย นำมาสร้างบนแผ่นฐานรองฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์มีค่าความหนา 0.3 มิลลิเมตร ค่าไดอิเล็กตริก 3.2 โดยการทำพื้นผิวลดการสะท้อนด้วยแผ่น EBG มีคุณสมบัติเข้าใกล้ศูนย์ MENZ (Mu-Epsilon Near Zero) ค่าเป็นบวกเข้าใกล้ศูนย์ จากการทดสอบพบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธช่วงความถี่ใช้งานร้อยละ 46.01 จากความถี่ 502 ถึง 802 เมกะเฮิรตซ์ โดยมีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 3.62 dBi ระยะห่างระหว่างแผ่น EBG กับสายอากาศที่ดีที่สุดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเมื่อนำไปทดสอบการจัดวางกับโครงสร้างโทรทัศน์ทั้ง 3 ด้าน คือ ด้านบน (Top View) ด้านขวา (Right View) และด้านซ้าย (Left View) พบว่าการติดตั้งที่ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานด้านบนมีช่วงความถี่ร้อยละ 44.32 จากความถี่ 504 ถึง 791 เมกะเฮิรตซ์

W. Naktong และ N. Wattikornsirikul [36] ได้ออกแบบสายอากาศไดโพล ใช้งานร่วมกับแผ่นแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (EBG) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อตรวจสอบเด็กติดในรถยนต์ใช้งานย่านความถี่ 750 ซึ่งตอบสนองต่อตรวจการเคลื่อนไหวของกายมนุษย์มากที่สุด นำมาออกแบบโครงสร้างสายอากาศบนแผ่นทองแดงที่มีค่าความหนา 0.297 มิลลิเมตร และแผ่นฐานรองฟิล์มไมลาร์โพลีเอสเตอร์มีค่าความหนา 0.3 มิลลิเมตร ค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 จากการออกแบบสายอากาศไดโพลมีขนาดเท่ากับ 201.56x12.5 ตารางมิลลิเมตร และแผ่นแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 18x5 หน่วย มีขนาดเท่ากับ 254.64x71.86 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งผลจากการวัดพบว่ามีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิธช่วงความถี่ใช้งานช่วงความถี่ร้อยละ 4.78 จากความถี่ 735 ถึง 771 เมกะเฮิรตซ์ โดยมีค่าอัตราขยาย 6.33 dBi รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นรอบทิศทาง ซึ่งสายอากาศไดโพลมีระยะห่างระหว่างแผ่น EBG ที่ดีที่สุด 30 มิลลิเมตร เมื่อนำไปตรวจสอบในระยะ 500 ถึง 1,600 มิลลิเมตร สามารถตรวจสอบได้มีประสิทธิภาพ

มากที่สุดที่ค่าความเข้มของสัญญาณเฉลี่ยประมาณ 0.032 มิลลิวัตต์ ทุกครั้งที่มีการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ในรถยนต์

T. Leng และคณะ [37] ได้ออกแบบสายอากาศไดโพลด้วยเทคนิคการพิมพ์กราฟีนลงบนวัสดุฐานรองกระดาษเพื่อประยุกต์ใช้ในงานอาร์เอฟไอดีและการตรวจจับทั่วไป หมึกกราฟีนถูกพิมพ์ลงบนกระดาษได้ค่าความนำ  $0.43 \times 10^5$  S/m สายอากาศไดโพลที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กและโครงสร้างอย่างง่าย มีอัตราขยายสูงสุดที่ -4 dBi แลบกว้างความถี่ -10 dB จาก 984 ถึง 1052 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงความถี่ใช้งานร้อยละ 6.67 แบบรูปการแผ่เป็นแบบปกติของไดโพล มีประสิทธิภาพการแผ่ร้อยละ 32 ผลการวัดได้ค่าที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอาร์เอฟไอดีและการตรวจจับทั่วไป

P. Kopyt และคณะ[38] ได้ออกแบบป้ายอาร์เอฟไอดีจากสายอากาศไดโพลบนวัสดุกราฟีนประกอบเข้ากับชิปไอซีที่ทำงานย่าน UHF ตามข้อกำหนดมาตรฐาน EPC Global Class 1 Gen. 2 พบว่าอาร์เอฟไอดีที่สร้างบนวัสดุกราฟีนมีข้อจำกัดด้านระยะทางการอ่านเมื่อเทียบกับป้ายอาร์เอฟไอดีมาตรฐานที่สร้างบนแผ่นทองแดง ป้ายอาร์เอฟไอดีบนวัสดุกราฟีนจะเหมาะกับงานที่ใช้ระยะการอ่านสั้นและราคาต่ำ ส่วนงานที่มีระยะการอ่านไกลและราคาสูงสามารถเปลี่ยนไปใช้เทคนิคการพิมพ์ด้วยหมึกเงิน

N. Curreli และคณะ [39] ได้ออกแบบสายอากาศแบบ Bow-Tie ย่านความถี่กว้างบนวัสดุกราฟีนย่านสำหรับใช้ในงานตรวจจับระยะไกล โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ผงหมึกกราฟีนผสมเงินสายอากาศแบบ Bow-Tie ผลการวัดประสิทธิภาพสายอากาศมีอัตราขยายสูงสุดที่ 0.4 dBi ที่ความถี่กลาง 2 กิกะเฮิร์ตซ์ แบบรูปการแผ่เป็นแบบรอบทิศทาง สายอากาศที่ได้มีน้ำหนักเบา สามารถสร้างได้ง่ายเหมาะกับการนำไปในงานอาร์เอฟไอดีและบลูทูธ

K. Jaakkola และคณะ [40] ได้ออกแบบอาร์เอฟไอดีทรานสปอนเดอร์ (RFID transponder) ย่านความถี่ UHF ด้วยสายอากาศกราฟีนที่ใช้เทคนิคการพิมพ์ สายอากาศมีขนาดเล็กเพียง 21x18 มิลลิเมตร เชื่อมต่อชิปไอซีด้วยกาวนำไฟฟ้าไอโซโทรปิก (Isotropic Conductive Adhesive: ICA) มีระยะการอ่าน 10 มิลลิเมตรด้วยกำลังงาน 19 dB อาร์เอฟไอดีทรานสปอนเดอร์นี้สามารถสร้างได้ง่ายด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้ต้นทุนต่ำ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

จากทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2 สามารถนำมาสู่การออกแบบอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบขนส่งอัจฉริยะ [41]

ระบบขนส่งอัจฉริยะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) ระบบฐานข้อมูลที่จะออกแบบสร้างไว้บนระบบคลาวด์ (Clouds/Database) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งเลขรหัสสำหรับการยืนยันตัวตน ข้อมูลเจ้าของยานพาหนะ หมายเลขป้ายทะเบียน เลขรหัส VIN ที่ใช้ในการยืนยันตัวยานพาหนะ ระบบฐานข้อมูลจะติดตั้งในอาคารสำนักงานควบคุมด่านผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ รวมถึงด่านข้ามพรมแดนที่ใช้งานระบบนี้ และเชื่อมต่อกับโครงข่ายสื่อสารไปยังฐานข้อมูลกลางเพื่อให้บริการครอบคลุมได้หลายช่องทาง (2) เครื่องอ่านข้อมูล (RFID Reader) ประกอบด้วยวงจรรำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรรับส่งข้อมูลและอ่านรหัสหรือหมายเลข ID จากป้ายที่เข้ามาในวิสัยทำการ เครื่องอ่านข้อมูลจะติดตั้งบริเวณทางเข้าช่องทางทางพิเศษอัตโนมัติรวมถึงช่องทางด่านข้ามพรมแดน และ (3) สติกเกอร์อาร์เอฟไอดี (RFID Sticker) เป็นตัวเก็บรหัสหรือหมายเลข ID ที่ใช้สำหรับติดบนกระถกรถยนต์ หรือยานพาหนะเพื่อการตรวจสอบและยืนยันตัวตน

ในดัชนีนิพนธ์นี้ได้เสนอการออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ เพื่อนำไปใช้แทนป้ายอาร์เอฟไอดีแบบที่ใช้งานอยู่ในระบบขนส่งอัจฉริยะ ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาด้านความปลอดภัยของระบบขนส่งอัจฉริยะ อาทิเช่น กรณีการผ่านช่องทางพิเศษอัตโนมัติ หรือการข้ามด่านพรมแดน ซึ่งการให้ผู้ขับขี่หรือผู้ผ่านแดนถือป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นอาจจะส่งผลให้เกิดการสูญหาย การทำเลียนแบบ การสับเปลี่ยนยานพาหนะ ที่ส่งผลต่อการติดตามตรวจสอบยานพาหนะ โดยสายอากาศอาร์เอฟไอดีในดัชนีนิพนธ์นี้เรียกว่า สติกเกอร์อาร์เอฟไอดี สามารถติดบนกระจกหน้าหรือคอนโซลของยานพาหนะแทนป้ายอาร์เอฟไอดี สติกเกอร์อาร์เอฟไอดีที่เสนอมีคุณลักษณะทางกายภาพคล้ายกับสติกเกอร์วาร์นตีลีนค้ำ หากมีการฉีกขาดหรือการลอกออกของสติกเกอร์จากพื้นที่ที่ติดตั้งจะไม่สามารถใช้งานได้อีก เมื่อมีการขออนุญาตใช้ทางพิเศษอัตโนมัติหรือการผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ระบบจะทำการสแกนสติกเกอร์อาร์เอฟไอดีเพื่อตรวจสอบกับฐานข้อมูลและยืนยันตัวตนการผ่านทาง หรือกรณีการขออนุญาตข้ามด่านพรมแดนพร้อมยานพาหนะ เจ้าหน้าที่จะทำการตรวจสอบเอกสารและบันทึกข้อมูลขออนุญาตผ่านแดนพร้อมกับยานพาหนะ จากนั้นจะออกสติกเกอร์อาร์เอฟไอดีเพื่อนำไปติดบนกระจกหน้าหรือคอนโซลของยานพาหนะ และเมื่อมีการกลับเข้าผ่านพรมแดนอาจจะฉีกลอกสติกเกอร์อาร์เอฟไอดีนั้นทิ้งไปเพื่อไม่ให้นำกลับมาใช้ซ้ำ ระบบนี้จะทำให้การผ่านทางพิเศษหรือด่านพรมแดนมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยยิ่งขึ้น นอกเหนือจากนี้ ดัชนีนิพนธ์เล่มนี้ยังได้เสนอวิธีการออกแบบและสร้างรหัส MetalDs ที่ใช้ในกระบวนการยืนยันตัวตนของโปรโตคอลอาร์เอฟไอดี เพื่อพัฒนาระบบการยืนยันตัวตนของยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะให้มีความปลอดภัยขึ้นกว่าระบบเดิม

### 3.2 การออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ

จากการศึกษาทฤษฎีสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 รวมทั้งการสืบค้นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศอาร์เอฟไอดี [28] ถึง [40] พบว่า สายอากาศโมโนโพลรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular-shape monopole antenna) มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับสถานะการณีนี เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก รูปทรงเป็นสี่เหลี่ยม สามารถสร้างขึ้นรูปบนแผ่นกราฟิกได้ง่ายด้วยเครื่องมือที่มีราคาไม่สูงมาก การออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในส่วนแรกศึกษาคุนสมบัติวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบ ต่อไปในส่วนที่สองออกแบบสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกรวดด้านล่างโดยใช้โปรแกรมจำลอง AppCAD for Window และส่วนสุดท้ายออกแบบขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า

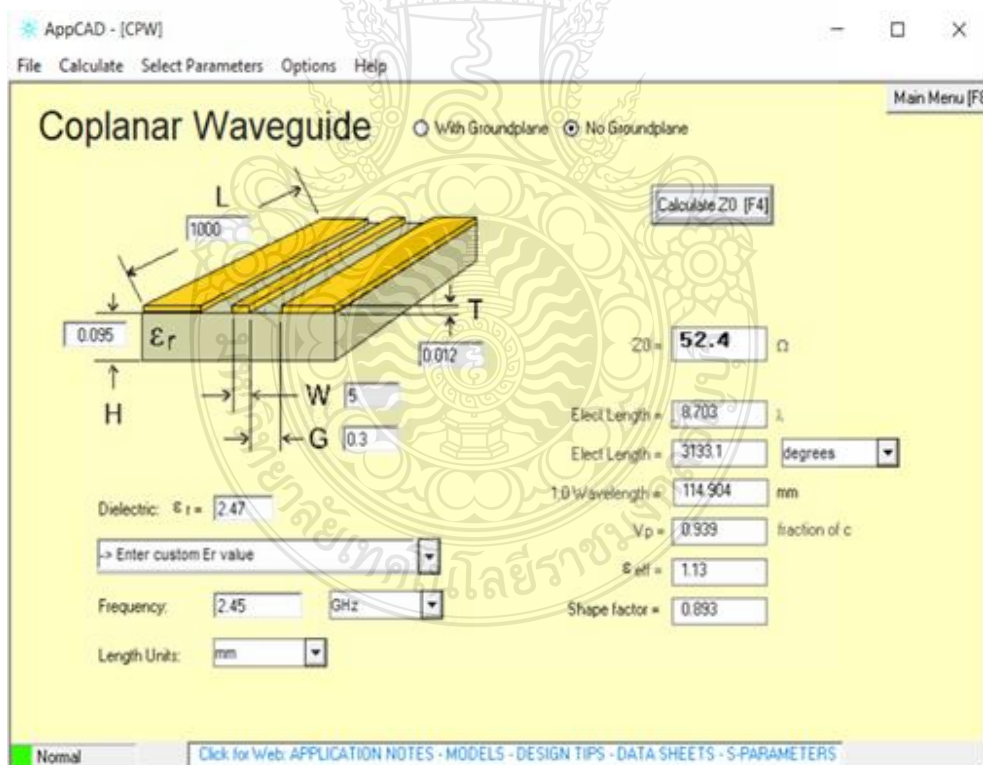
### 3.2.1 พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศโมนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนวัสดุกราฟีนที่มีวัสดุฐานรองชนิดพอลิเอไมต์ โดยมีคุณสมบัติของวัสดุฐานรองและค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ )	= 2.47
ความหนาวัสดุฐานรอง (h)	= 0.095 มิลลิเมตร
ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (กราไฟท์หรือกราฟีน) ( $\sigma$ )	= $1.9 \times 10^6$ S/m
ความหนาของวัสดุตัวนำ (t)	= 0.012 มิลลิเมตร
ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ( $\tan \sigma$ )	= 0.0019

### 3.2.2 การออกแบบสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การออกแบบสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่างของสายอากาศอาร์เอฟไอเดียความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีแถบกว้างความถี่ให้ใช้ไปถึง 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ขึ้นอยู่กับภูมิภาคอย่างไรก็ตาม การในการออกแบบค่าคำนวณจะกำหนดความถี่ใช้งานที่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้โปรแกรม AppCAD for Window ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.2



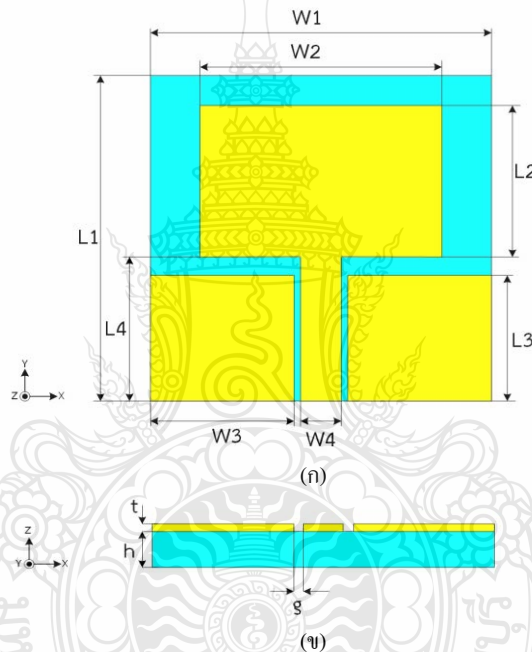
รูปที่ 3.2 โปรแกรมคำนวณสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



ในการออกแบบสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมต้องการให้อิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50  $\Omega$  จากการคำนวณด้วยโปรแกรมได้อิมพีแดนซ์ 52.4  $\Omega$  ความกว้างของสายนำสัญญาณ W เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์ g เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร

### 3.2.3 การออกแบบขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนวัสดุกราฟีนจากการออกแบบจะมีส่วนประกอบของสายอากาศที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีกราวด์อยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งวางอยู่บนฐานรองไดอิเล็กตริกได้ทำการออกแบบจำลองสภาวะการทำงานโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO จะมีรูปร่างลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านล่าง

- เมื่อ  $W1$  คือ ความกว้างของวัสดุฐานรอง  
 $W2$  คือ ความกว้างของแพทช์รูปสี่เหลี่ยม  
 $W3$  คือ ความกว้างของระนาบกราวด์  
 $W4$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณ  
 $L1$  คือ ความยาวของวัสดุฐานรอง

- L2 คือ ความยาวของแพทช์รูบสี่เหลี่ยม
- L3 คือ ความยาวของระนาบกราวด์
- L4 คือ ความยาวของสายนำสัญญาณ
- t คือ ความหนาวัสดุตัวนำ
- h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง
- g คือ ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณกับระนาบกราวด์

ซึ่งการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูบสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น สิ่งแรกที่ต้องการหาคือค่าความกว้างของวัสดุฐานรอง (W1) และค่าความยาวของวัสดุฐานรอง (L1) ซึ่งเป็นการกำหนดขนาดของสายอากาศโดยสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.16)

$$W1 = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

- เมื่อ C คือ ความเร็วแสง (ประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที)
- $f_r$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ
- $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง
- $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล
- $L_{eff}$  คือ ความยาวประสิทธิผล
- $\Delta L$  คือ ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า

ดังนั้น

$$W1 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9 \sqrt{\frac{(2.47 + 1)}{2}}}$$

$$W1 = 47 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{2.47 + 1}{2} + \frac{2.47 - 1}{2} \left[ 1 + \frac{12 \times 0.095}{47} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = 2.46$$

โดยที่ค่า  $\epsilon_{\text{eff}} \leq \epsilon_r$

$$\Delta L = (0.412)(0.095) \frac{(2.47 + 0.3) \left( \frac{47}{0.095} + 0.264 \right)}{(2.46 - 0.258) \left( \frac{47}{0.095} + 0.8 \right)}$$
$$= 0.049$$

$$L1 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.45 \times 10^9 \sqrt{2.46}} - 2(0.049)$$
$$= 39 \text{ มิลลิเมตร}$$

โดย  $\lambda_g$  หาได้จากสมการ (2.17)

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

ดังนั้น

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9 \sqrt{\frac{2.47 + 1}{2}}}$$

$$= 0.093 \text{ มิลลิเมตร}$$

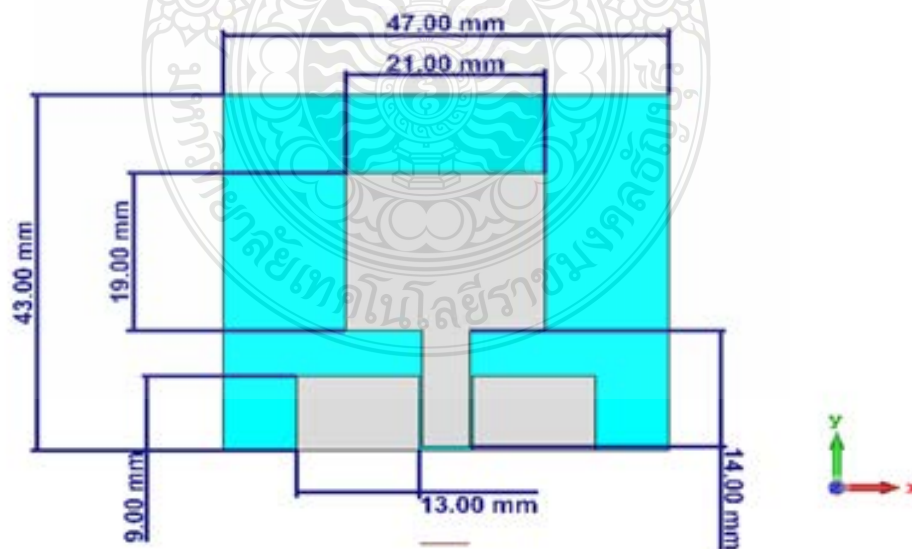
ดังนั้นจากการคำนวณจะได้ความกว้างของสายอากาศอาร์เอฟไอเดียอัน 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ความกว้างของวัสดุฐานรอง (W1) เท่ากับ 47 มิลลิเมตร และความยาวของวัสดุฐานรอง (L1) เท่ากับ 39 มิลลิเมตร และได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยการปรับค่าที่เหมาะสม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สายอากาศโมนโพลรูบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)	ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
W1	47	L1	40
W2	21	L2	23
W3	13	L3	9
W4	5	L4	14
g	0.3	h	0.095

### 3.3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST

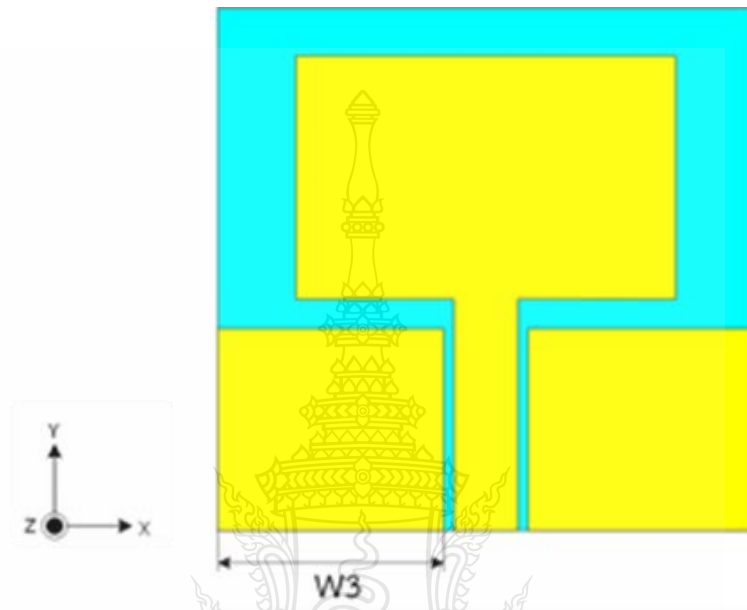
การวิเคราะห์การจำลองแบบสายอากาศ นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดจากตารางที่ 3.1 นำมาสร้างสายอากาศบนโปรแกรมจำลอง CST MICROWAVE STUDIO ความถี่ในการจำลองตั้งแต่ 1 ถึง 4 กิกะเฮิร์ตซ์ ได้โครงสร้างของสายอากาศจากโปรแกรมจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.4



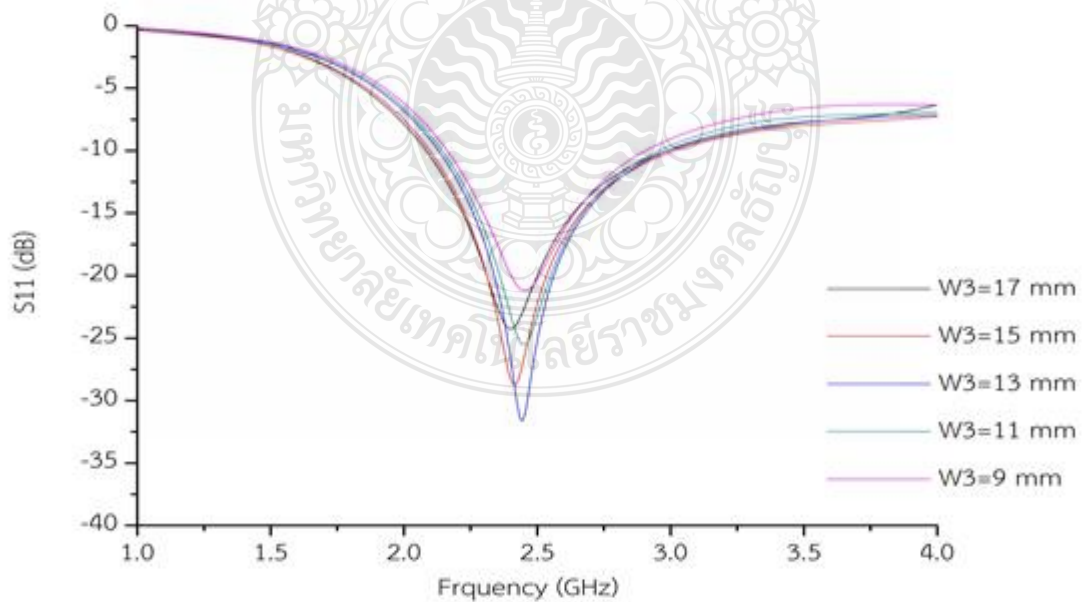
รูปที่ 3.4 โครงสร้างสายอากาศโมนโพลรูบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากโปรแกรมจำลอง

### 3.3.1 ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศโดยส่วนแรกทำการจำลองปรับความกว้างของระนาบกราวด์ ( $W3$ ) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) และความถี่เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ความกว้างของระนาบกราวด์  $W3$



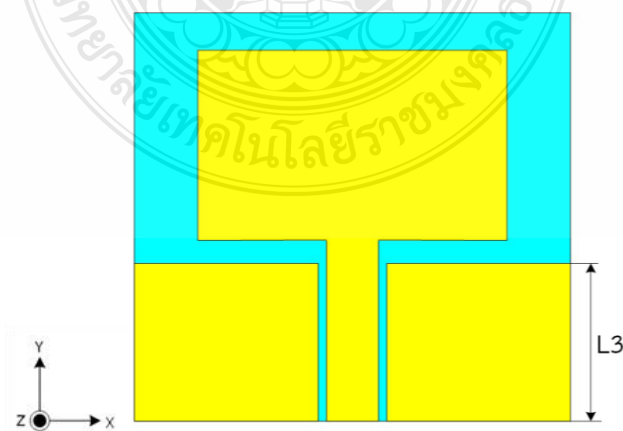
รูปที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์  $W3$

จากรูปที่ 3.6 ผลการจำลองการปรับค่า W3 หรือความกว้างระนาบกราวด์จากกราฟเส้นสีดำ W3 เท่ากับ 17 มิลลิเมตร เส้นสีแดง W3 เท่ากับ 15 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน W3 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว W3 เท่ากับ 11 มิลลิเมตร และเส้นสีม่วง W3 เท่ากับ 9 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของระนาบกราวด์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ พิจารณาที่ W3 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร เมื่อขนาดความกว้างของระนาบกราวด์ลดลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อความกว้างของระนาบกราวด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดย W3 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -31.5 dB ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด โดยค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.2

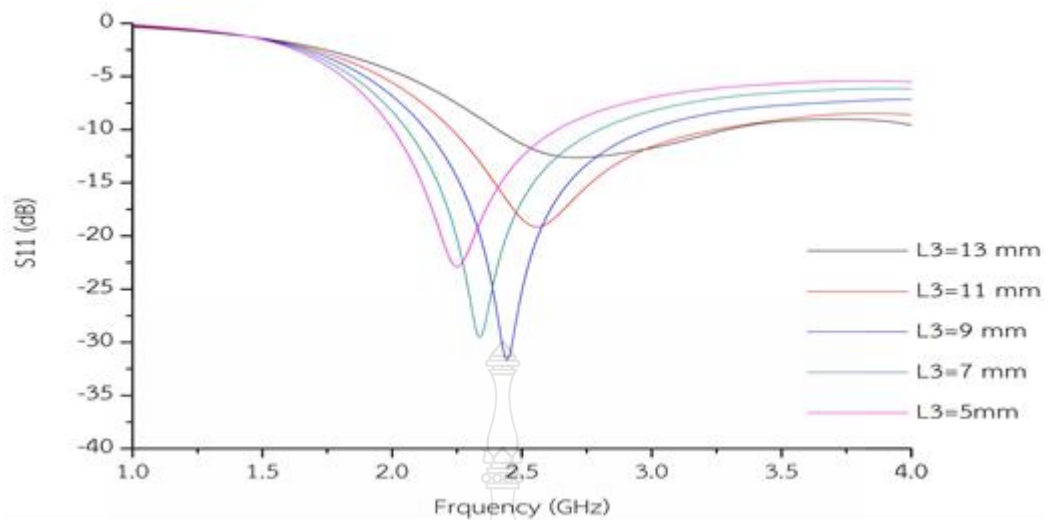
**ตารางที่ 3.2** ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ W3

ความกว้าง W3 (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
17	-24.24	2.4	2-3
15	-28.7	2.41	2-3
13	-31.5	2.45	2.1-3
11	-25.5	2.45	2.1-3
9	-21.1	2.45	2.1-3

ทำการศึกษารามิเตอร์ในส่วนที่สองทำการจำลองปรับความยาวของระนาบกราวด์ (L3) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) และความถี่เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.7



**รูปที่ 3.7** พารามิเตอร์ความยาวของระนาบกราวด์ L3



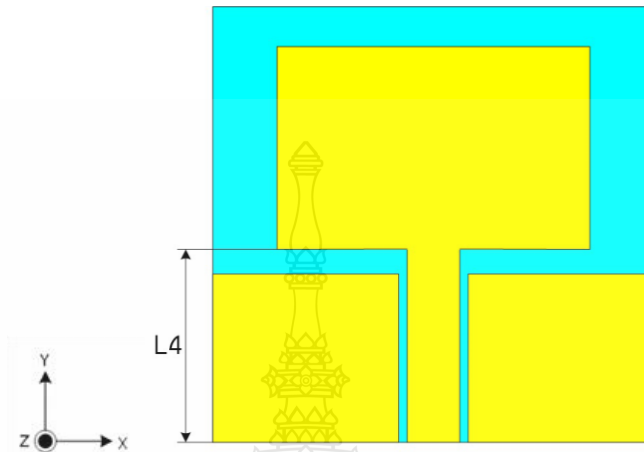
รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของระนาบกราวด์ L3

จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลองการปรับค่า L3 หรือความยาวของระนาบกราวด์จากกราฟเส้นสีดำ L3 เท่ากับ 13 มิลลิเมตร เส้นสีแดง L3 เท่ากับ 11 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน L3 เท่ากับ 9 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว L3 เท่ากับ 7 มิลลิเมตร และเส้นสีม่วง L3 เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ขนาดความยาวของระนาบกราวด์มีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ พิจารณาที่ L3 เท่ากับ 9 มิลลิเมตร เมื่อขนาดความยาวของระนาบกราวด์ลดลงจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยส่วนความถี่ เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่ต่ำ และเมื่อเพิ่มความยาวของระนาบกราวด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นมากส่วนความถี่เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่สูง โดย L3 เท่ากับ 9 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ  $-31.5$  dB และมีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุด โดยค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3

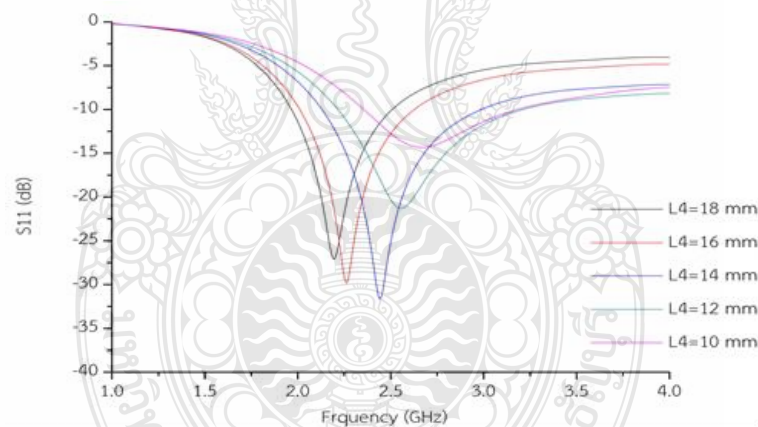
ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองจากการปรับความยาวของระนาบกราวด์ L3

ความกว้าง L3 (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
13	-12.6	2.7	2.4-3.2
11	-19.14	2.5	2.2-3.2
9	-31.5	2.45	2.1-3
7	-29.5	2.33	2-2.8
5	-22.8	2.2	2-2.6

ทำการศึกษาพารามิเตอร์ในส่วนที่สามทำการจำลองปรับขนาดความยาวของสายนำสัญญาณ (L4) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) และความถี่เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ความยาวของสายนำสัญญาณ L4



รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของสายนำสัญญาณ L4

จากรูปที่ 3.10 ผลการจำลองการปรับค่า L4 หรือความยาวของสายนำสัญญาณจากกราฟเส้นสีดำ L4 เท่ากับ 18 มิลลิเมตร เส้นสีแดง L4 เท่ากับ 16 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน L4 เท่ากับ 14 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว L4 เท่ากับ 18 มิลลิเมตร และเส้นสีม่วง L4 เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขนาดความยาวของสายนำสัญญาณ มีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ พิจารณาที่ L4 เท่ากับ 14 มิลลิเมตร เมื่อขนาดความยาวของสายนำสัญญาณลดลงจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นมาก ส่วนความถี่เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่สูงและเมื่อขนาดความยาวของสายนำ

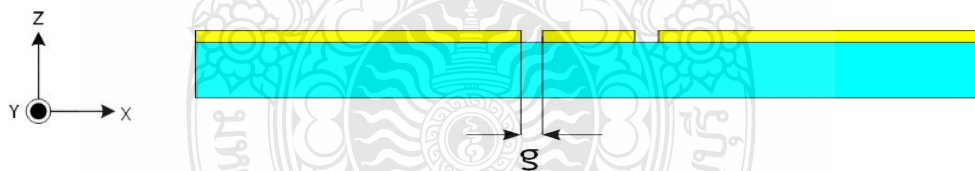


สัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยส่วนความถี่เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่ต่ำ โดย L4 เท่ากับ 14 มิลลิเมตร จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ  $-31.5$  dB และมีความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุด โดยค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.4

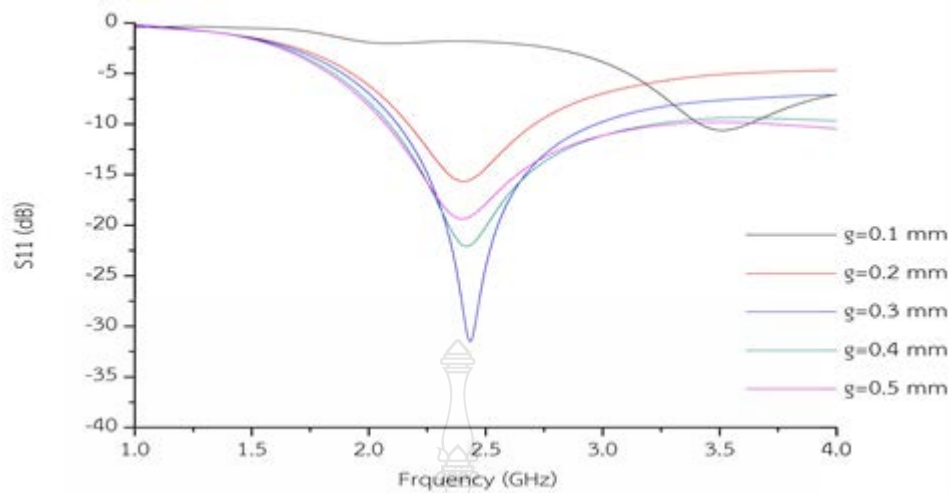
**ตารางที่ 3.4** ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์ L4

ความกว้าง L4 (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
18	-27	2.1	1.9-2.5
16	-29.5	2.2	2-2.6
14	-31.5	2.45	2.1-3
12	-21.2	2.5	2.2-3.2
10	-14.3	2.68	2.3-3.1

ในส่วนที่สี่ทำการจำลองปรับช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์ (g) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) และความถี่เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.11



**รูปที่ 3.11** พารามิเตอร์ช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์ g



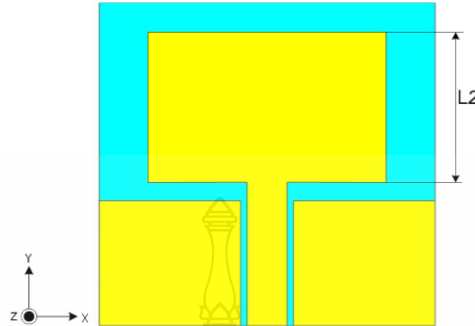
รูปที่ 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับช่องว่าง  $g$

จากรูปที่ 3.12 ผลการจำลองการปรับค่า  $g$  หรือช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณ และระนาบกราวด์ จากกราฟเส้นสีดำ  $g$  เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร เส้นสีแดง  $g$  เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน  $g$  เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว  $g$  เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร และเส้นสีม่วง  $g$  เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ขนาดช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์มีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศพิจารณาที่  $g$  เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร เมื่อขนาดช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์ลดลงจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นและเมื่อขนาดช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณและระนาบกราวด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดย  $g$  เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -31.5 dB และมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุด โดยค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.5

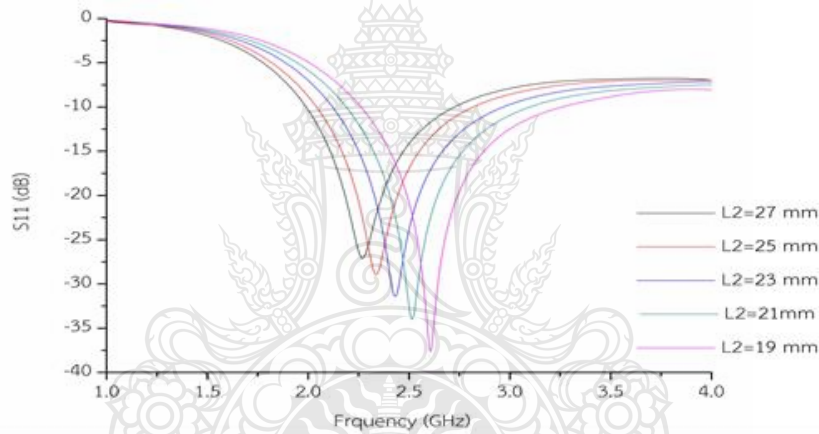
ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองจากการปรับความกว้างของระนาบกราวด์  $g$

ช่องว่าง $g$ (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
0.1	-10.6	3.5	3.4-3.6
0.2	-15.6	2.4	2.1-2.7
0.3	-31.5	2.45	2-3
0.4	-22	2.42	2-3.1
0.5	-19.3	2.39	2-3.2

ในส่วนสุดท้ายทำการจำลองปรับความยาวของแพตช์ ( $L_2$ ) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) และค่าความถี่เรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 พารามิเตอร์ความยาวของแพตช์  $L_2$



รูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการปรับความยาวของแพตช์  $L_2$

จากรูปที่ 3.14 ผลการจำลองการปรับค่า  $L_2$  หรือความยาวของแพตช์ จากกราฟเส้นสีแดง  $L_2$  เท่ากับ 27 มิลลิเมตร เส้นสีแดง  $L_2$  เท่ากับ 25 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน  $L_2$  เท่ากับ 23 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว  $L_2$  เท่ากับ 21 มิลลิเมตร และเส้นสีม่วง  $L_2$  เท่ากับ 19 มิลลิเมตร ขนาดความยาวของแพตช์มีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ พิจารณาที่  $L_2$  เท่ากับ 23 มิลลิเมตร เมื่อขนาดความยาวของแพตช์ลดลงจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นส่วนความถี่เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่ต่ำและเมื่อขนาดความยาวของแพตช์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงส่วนความถี่เรโซแนนซ์ขยับไปทางความถี่สูง โดย  $L_2$  เท่ากับ 23 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ - 31.5 dB ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุดโดยค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองจากการปรับความยาวของแพตช์ L2

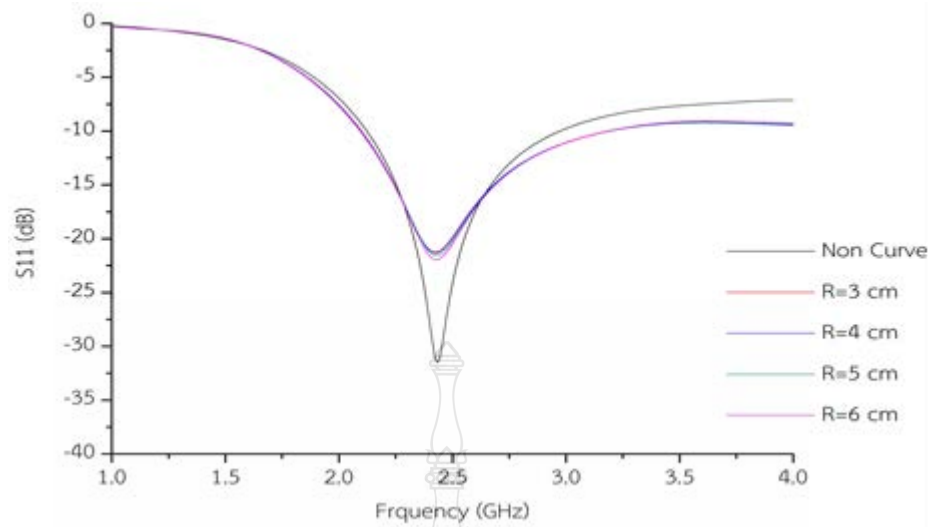
ความยาวของแพตช์ L2 (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
27	-27	2.2	1.9-2.7
25	-28.8	2.33	2.1-2.9
23	-31.5	2.45	2-3
21	-33.9	2.5	2.1-3.1
19	-37.6	2.6	2.2-3.2

### 3.3.2 การจำลองแบบความโค้งงอของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองแบบความโค้งงอของสายอากาศเพื่อดูผลกระทบของสายอากาศเมื่อสายอากาศเกิดความโค้งงอ โดยในการจำลองจะทดสอบความโค้งงอของสายอากาศจะทดสอบความโค้งงอด้วยรัศมี 3 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร 5 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร สายอากาศที่เกิดความโค้งงอจะแสดงดังรูปที่ 3.15 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความถี่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แบบจำลองความโค้งงอของสายอากาศตามแกน X

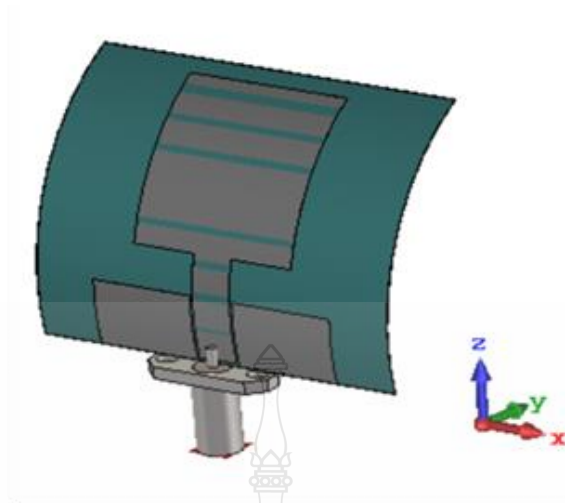


รูปที่ 3.16 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการโค้งงอสายอากาศตามแกน X

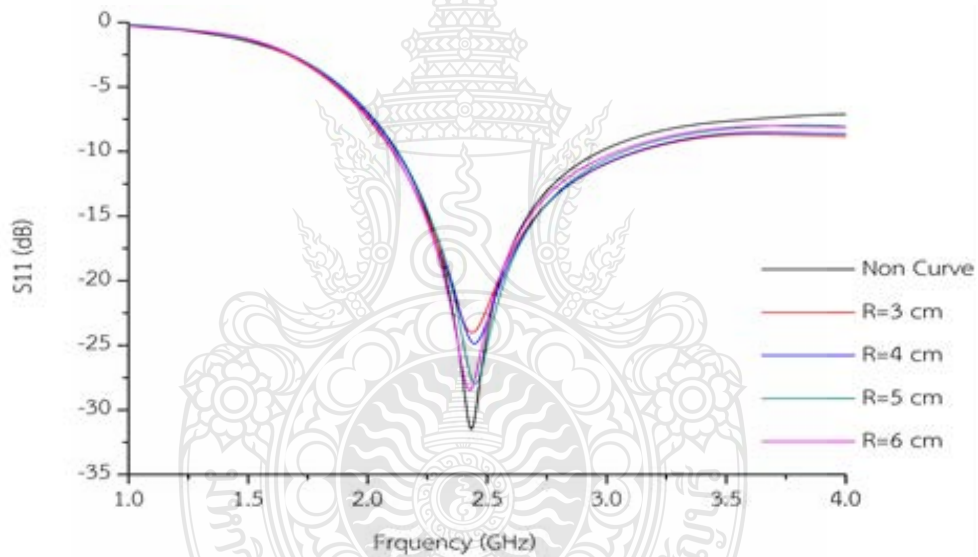
จากรูปที่ 3.16 ผลการจำลองความโค้งงอของสายอากาศ โดย R คือ รัศมีที่สายอากาศเกิดความโค้งงอตามแกน X จากกราฟเส้นสีแดง R เท่ากับ 3 เซนติเมตร เส้นสีน้ำเงิน R เท่ากับ 4 เซนติเมตร เส้นสีเขียว R เท่ากับ 5 เซนติเมตร เส้นสีม่วง R เท่ากับ 6 เซนติเมตร และเส้นสีดำคือสายอากาศในระนาบปกติ จะเห็นผลกระทบบว่าหากสายอากาศเกิดความโค้งงอด้านข้างที่ระดับต่างกันค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสายอากาศยังสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ได้ค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองความโค้งงอของสายอากาศตามแกน X

รัศมีความโค้งงอ (เซนติเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
0	-31.5	2.45	2.1-3
3	-21.1	2.44	2-2.9
4	-21.3	2.44	2-2.9
5	-21.5	2.44	2-2.9
6	-21.9	2.44	2-2.9



รูปที่ 3.17 แบบจำลองความโค้งของสายอากาศตามแกน Z



รูปที่ 3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการโค้งสายอากาศตามแกน Z

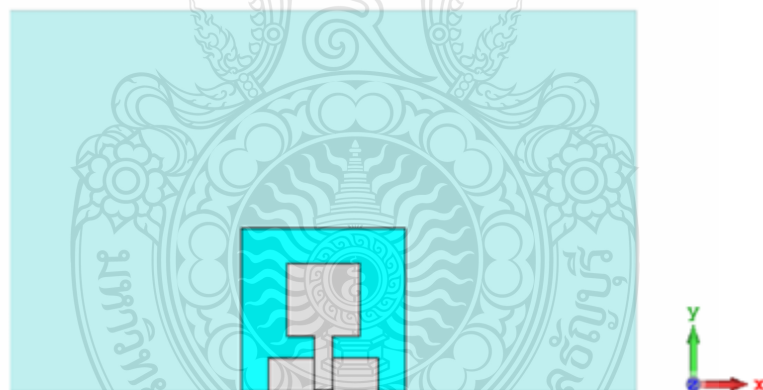
จากรูปที่ 3.18 ผลการจำลองความโค้งของสายอากาศตามแกน Z โดย R คือ รัศมีที่สายอากาศเกิดความโค้ง จากกราฟเส้นสีแดง R เท่ากับ 3 เซนติเมตร เส้นสีน้ำเงิน R เท่ากับ 4 เซนติเมตร เส้นสีเขียว R เท่ากับ 5 เซนติเมตร เส้นสีม่วง R เท่ากับ 6 เซนติเมตร และเส้นสีดำคือสายอากาศ ในระนาบปกติ จะเห็นผลกระทบบว่าหากสายอากาศเกิดความโค้งตามแกน Z ที่รัศมีต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสายอากาศยังสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ได้ ค่าจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองโค้งงอสายอากาศตามแนวแกน Z

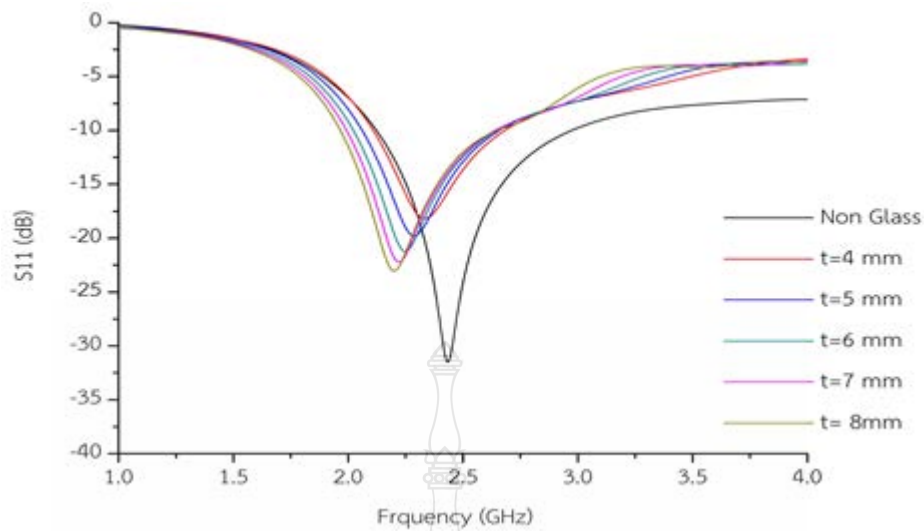
รัศมีความโค้งงอ (เซนติเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
0	-31.5	2.45	2.1-3
3	-24	2.43	2.1-2.9
4	-24.8	2.44	2.1-2.9
5	-27	2.44	2.1-2.9
6	-28.4	2.44	2.1-2.9

### 3.3.3 การจำลองแบบสายอากาศเมื่อติดบนกระจก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองแบบสายอากาศเมื่อนำสายอากาศไปติดบนกระจกเพื่อดูผลกระทบของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศติดบนกระจกและศึกษาความหนาของกระจกส่งกระทบอย่างไรต่อสายอากาศ โดยสายอากาศที่ติดบนกระจกแสดงดังรูปที่ 3.19 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าความถี่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 แบบจำลองสายอากาศเมื่อติดบนกระจก



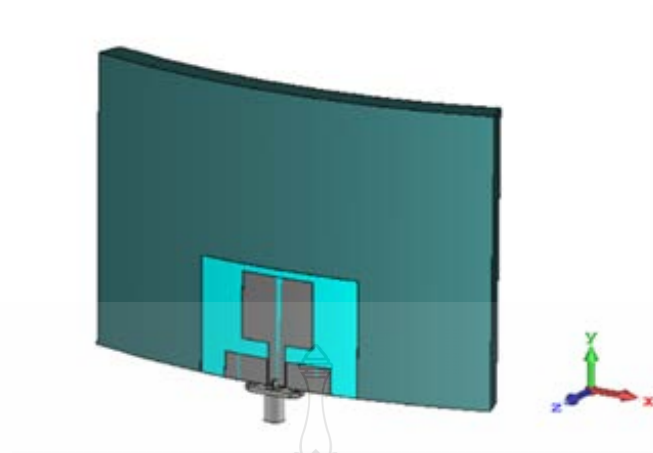
รูปที่ 3.20 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการติดสายอากาศบนกระจก

จากรูปที่ 3.20 ผลการจำลองเมื่อนำสายอากาศติดบนกระจก โดย  $t$  คือ ความหนาของกระจก จากกราฟเส้นสีแดง  $t$  เท่ากับ 4 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำเงิน  $t$  เท่ากับ 5 มิลลิเมตร เส้นสีเขียว  $t$  เท่ากับ 6 มิลลิเมตร เส้นสีม่วง  $t$  เท่ากับ 7 มิลลิเมตร เส้นสีน้ำตาล  $t$  เท่ากับ 8 มิลลิเมตร และเส้นสีดำคือไม่ติดบนกระจก จะเห็นว่ากระจกและความหนาของกระจกมีผลกระทบทำให้ความถี่เรโซแนนซ์นั้นขยับไปทางความถี่ต่ำส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนั้นเพิ่มขึ้น โดยสายอากาศยังครอบคลุมความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยแสดงดังตารางที่ 3.9

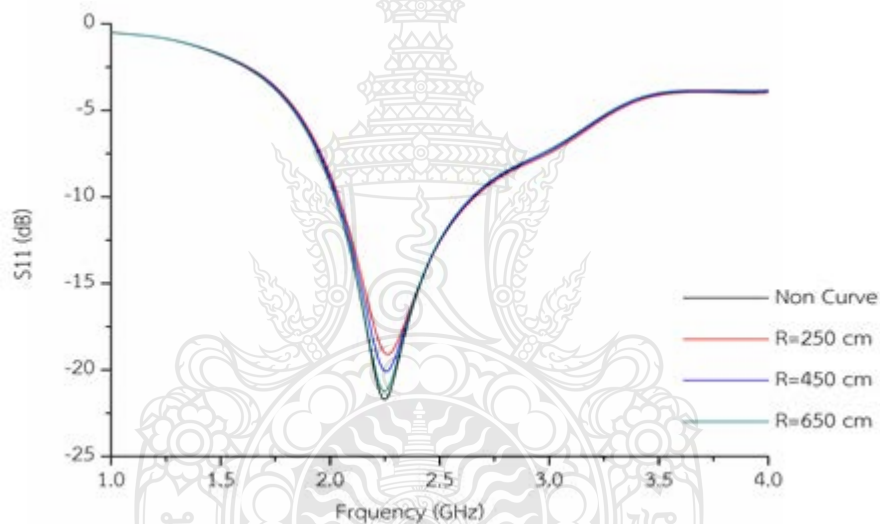
ตารางที่ 3.9 ผลการจำลองจากการติดสายอากาศบนกระจก

ความหนาของกระจก (มิลลิเมตร)	$S_{11}$ (dB)	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิกะเฮิรตซ์)	ช่วงความถี่ใช้งาน (กิกะเฮิรตซ์)
4	-18.1	2.34	2-2.6
5	-19.7	2.29	2-2.6
6	-21.1	2.26	2-2.6
7	-22.1	2.23	2-2.6
8	-22.9	2.2	2-2.6





รูปที่ 3.21 แบบจำลองสายอากาศเมื่อติดสายอากาศบนกระจกโค้งงอ



รูปที่ 3.22 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการติดสายอากาศบนกระจกโค้งงอจากการจำลอง

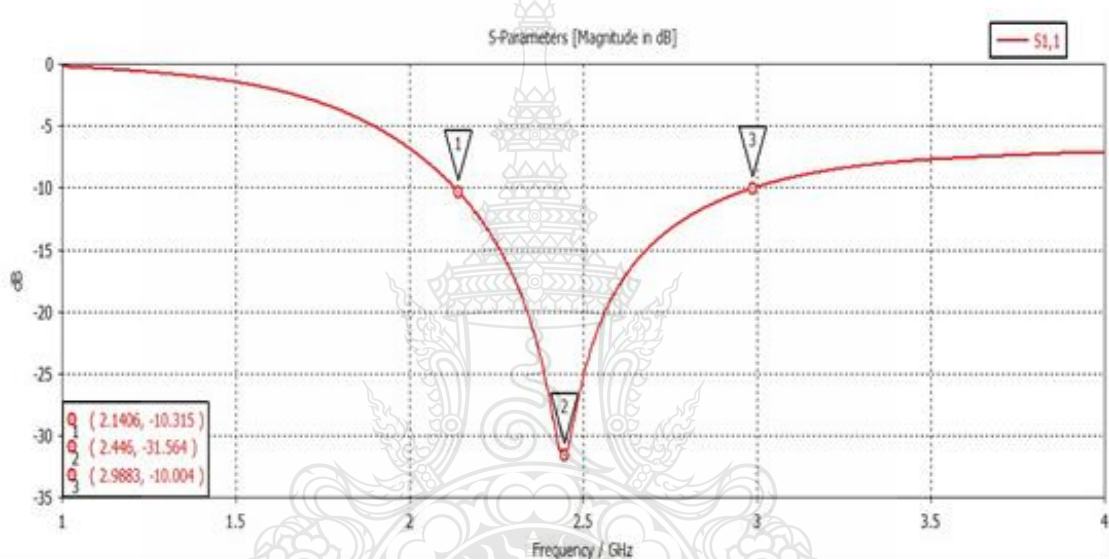
จากรูปที่ 3.22 ผลการจำลองบนกระจกความหนา 6 มิลลิเมตร จากกราฟเส้นสีเขียว R เท่ากับ 650 เซนติเมตร เส้นสีน้ำเงิน R เท่ากับ 450 เซนติเมตร เส้นสีแดง R เท่ากับ 250 เซนติเมตร และ เส้นสีดำคือสายอากาศที่ติดบนกระจกในระนาบปกติ จะเห็นว่า เมื่อรัศมีความโค้งงอของกระจก ลดลงจะเกิดผลกระทบทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้น โดยสายอากาศยังครอบคลุมความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

### 3.4 การวิเคราะห์ผลการจำลอง

จากการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนวัสดุกราฟีน ซึ่งใช้โปรแกรมจำลอง CST MICROWAVE STUDIO ช่วยในการออกแบบและประมวลผล ซึ่งทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ต้องการดังนี้

#### 3.4.1 การจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

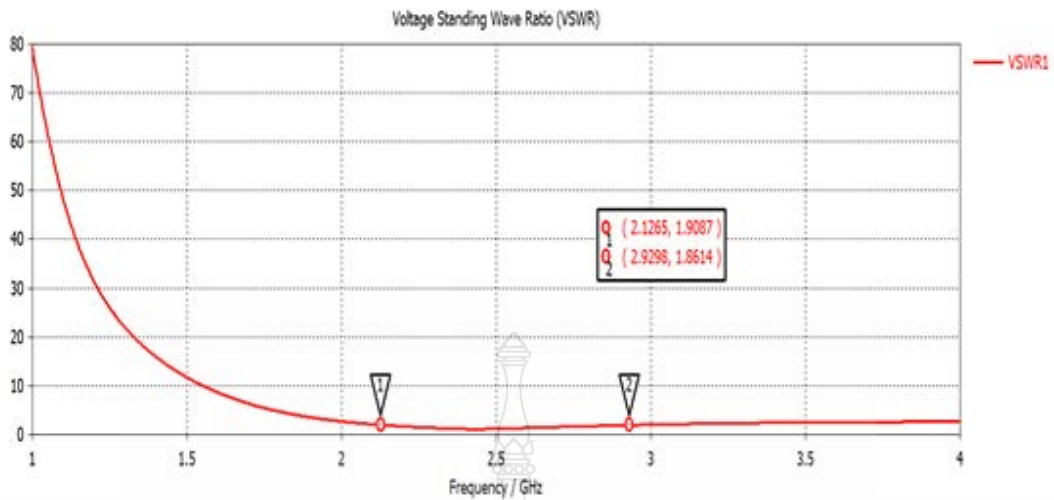
จากการจำลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) เท่ากับ -31.5 dB ได้แบนด์วิดท์ในช่วงความถี่ 2.1 ถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

#### 3.4.2 การจำลองผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

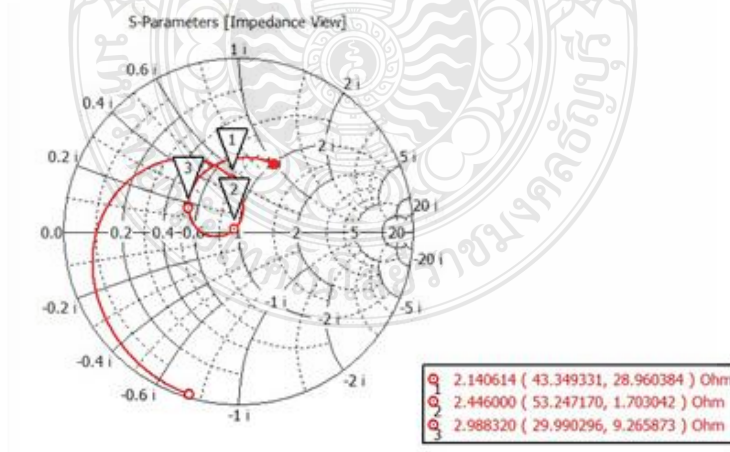
ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งจะต้องเขาใกล้ 1 คือค่าที่ดีที่สุด จากการจำลองได้ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งซึ่งต่ำกว่า 2 ในช่วงความถี่ 2.1 ถึง 2.9 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งผลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้



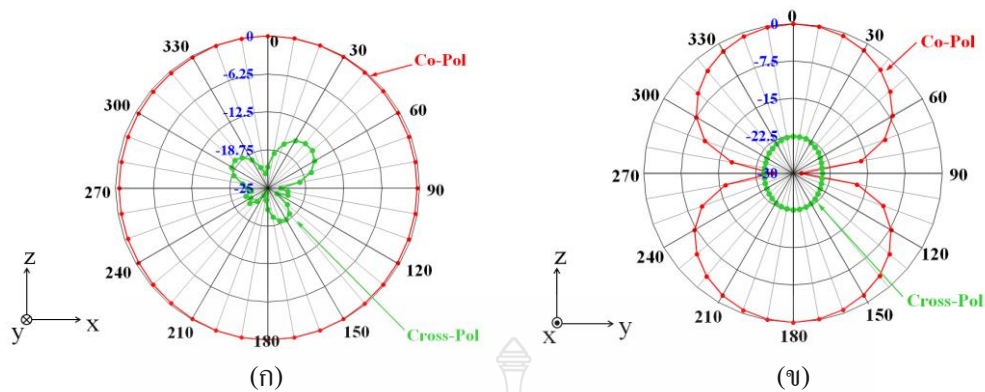
รูปที่ 3.24 ผลการจำลองผลอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

### 3.4.3 การจำลองผลค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปแบบ Smith Chart

จากการจำลองความถี่ที่ใช้ในการจำลองจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ของสายอากาศจะเริ่มที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่  $1.09 - j41.3 \Omega$  ที่ความถี่ 4 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่  $57.8 + j55.5 \Omega$  ที่ความถี่ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเท่ากับ  $43.3 + j28.9 \Omega$  ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเท่ากับ  $53.2 + j1.7 \Omega$  และที่ความถี่ 2.9 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเท่ากับ  $29.9 + j9.2 \Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองผลค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปแบบ Smith Chart



รูปที่ 3.26 ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แบบ 2 มิติ

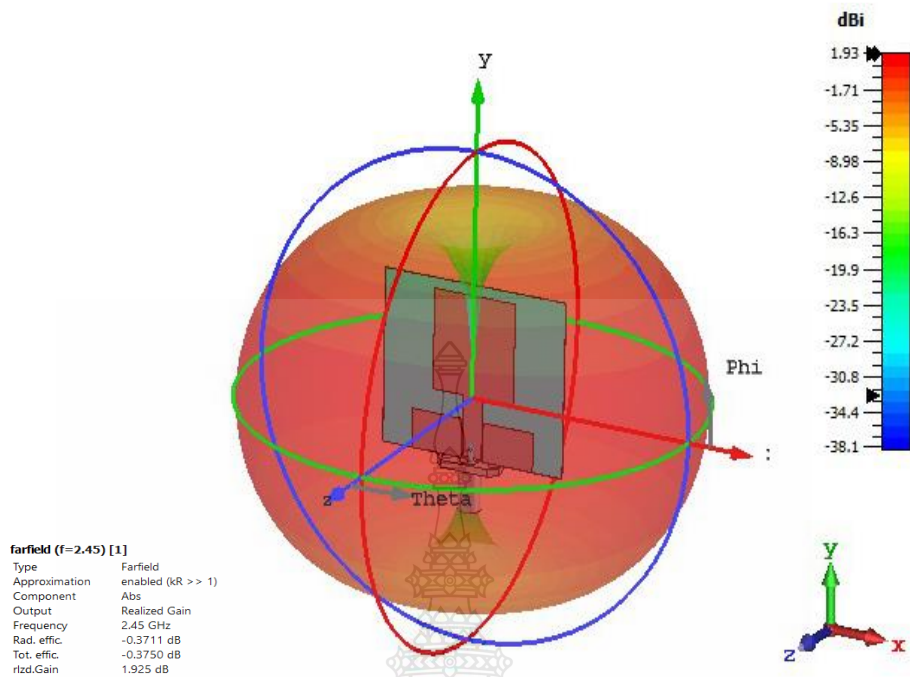
(ก) ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระนาบ XZ

(ข) ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระนาบ YZ

#### 3.4.4 การจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.26 (ก) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของการจำลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ บนระนาบ XZ ที่ Co-Polar มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-directional) ซึ่งรับกำลังงานได้รอบทิศทาง ส่วนระนาบ XZ ที่ Cross-Polar แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง แต่ประสิทธิภาพที่รับกำลังงานได้จะต่ำลงเนื่องจากสายอากาศทำมุมในทิศทาง ตรงข้ามกับสายอากาศด้านส่ง

จากรูปที่ 3.26 (ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของการจำลองที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ บนระนาบ YZ มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ซึ่งรับกำลังงานได้สองทิศทาง ส่วนระนาบ YZ ที่ Cross-Polar แบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง แต่ประสิทธิภาพที่รับกำลังงานได้จะต่ำลงเนื่องจากสายอากาศทำมุมในทิศทางตรงข้ามกับสายอากาศด้านส่ง



รูปที่ 3.27 ผลจำลองการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แบบ 3 มิติ

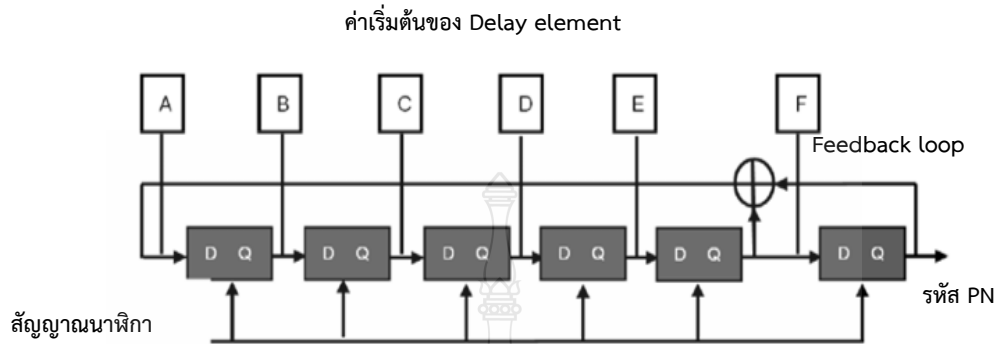
จากรูปที่ 3.27 เป็นรูปแบบการแผ่พลังงาน 3 มิติ มีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียวกันซึ่งเป็นลักษณะของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนวัสดุกราฟีนมีอัตราขยายเท่ากับ 1.93 dBi

### 3.5 การออกแบบและสร้างรหัส MetalDs สำหรับอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ

#### 3.5.1 ออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัย

กุญแจรหัสเพื่อการรักษาความปลอดภัย คือรหัสลับข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะต้องมีหนึ่งเดียวในระบบ (Uniqueness) รหัสนี้จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อปกป้องข้อมูลเฉพาะตัวในกระบวนการตรวจเอกลักษณ์ และการยืนยันตน (Identification and Authentication) ของผู้ใช้นิยามพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะ เครื่องอ่านจะทำการติดต่อกับป้ายหรือสติ๊กเกอร์อาร์เอฟไอดีที่ติดบนยานพาหนะ เมื่อเครื่องอ่านสามารถอ่านข้อมูลรหัสจากป้ายและเปรียบเทียบตรงกับฐานข้อมูลรหัสได้ เครื่องอ่านจะยืนยันตัวตนของป้ายหรืออีกนัยหนึ่งคือยืนยัน ผู้ใช้หรือยานพาหนะนั้นเอง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลรหัสนี้จะต้องเป็นความลับระหว่างเครื่องอ่านและป้ายนี้เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแทรกแซง หรือการล้วงข้อมูล หรือการโจมตีเพื่อล้วงรหัส (Hacking) จากผู้ไม่ประสงค์ดี

วิธีการสร้างรหัสลับจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Maximum Length Sequence Pseudo-Random Noise Generation เรียกสั้นๆ ว่ารหัส PN แสดงในรูปที่ 3.28 [14]



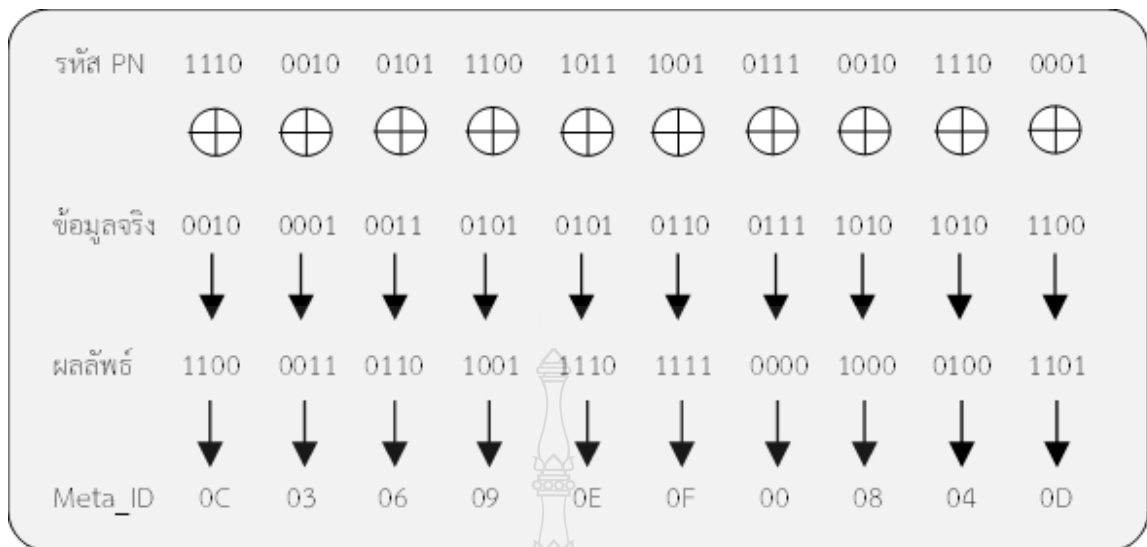
รูปที่ 3.28 วงจรสร้างรหัสเลขสุ่มเทียม Maximum length sequence pseudorandom noise [14]

รหัส PN เป็นรหัสที่สร้างขึ้นจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยชิพตรีจิสเตอร์ (Shift Register) จำนวนหนึ่งที่อยู่ต่อกันแบบอนุกรมเพื่อทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบการประวิง (Delay Element) และมีการป้อนกลับของสัญญาณจากชิพตรีจิสเตอร์ (Feedback Loop) อย่างน้อย 2 ตำแหน่งกลับไปยังทางด้านขาเข้าของชิพตรีจิสเตอร์ตัวแรก ชุดวงจรนี้สามารถสร้างลำดับความยาวสูงสุด (Maximum-Sequence หรือ M-Sequence) ได้เท่ากับ  $2^n - 1$  เมื่อ  $n$  คือ จำนวนของชิพตรีจิสเตอร์ที่ใช้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม การให้ได้มาซึ่งรหัสที่มีความแตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของ Delay Element และตำแหน่งแท็ป (Taps) ของ Feedback Loop ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งเขียนอยู่ในรูปโพลิโนเมียลได้ดังสมการที่ (3.1)

$$X^n + \dots + X^4 + X^3 + X^2 + X + 1 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $X^n$  คือตำแหน่งของชิพตรีจิสเตอร์ที่ทำการแท็ปสัญญาณทางด้านขาออกอย่างน้อย 2 ตำแหน่งที่นำมาบวกกันตามกฎมอดุโล 2 (Modulo 2) แทนด้วยเครื่องหมาย  $\oplus$  ในรูปที่ 3.28

เมื่อนำรหัส PN ที่ออกแบบและสร้างขึ้นไปรวมแบบมอดุโล 2 กับข้อมูลจริง จะได้รับรหัสลับที่เรียกว่า MetalDs ซึ่งเป็นรหัสที่จะนำไปเขียนลงหน่วยความจำในไมโครชิพของป้ายอาร์เอฟไอดี ความสลับซับซ้อนหรือความยากในการแก้รหัสจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ Feedback Loop รวมถึงข้อมูลค่าเริ่มต้นใน Delay Element ที่กำหนดโดยผู้สร้าง ตัวอย่างเช่น ข้อมูลจริงที่ต้องการบันทึกในป้ายคือ 2135567AAC แปลงเป็นเลขฐานสองแล้วนำไปรวมกับรหัส PN ที่สร้างขึ้น จากนั้นแปลงผลลัพธ์เลขฐานสองเป็นฐานสิบหก จะได้รับรหัส MetalDs ที่จะเขียนลงหน่วยความจำในไมโครชิพของป้ายดังแสดงในรูปที่ 3.29

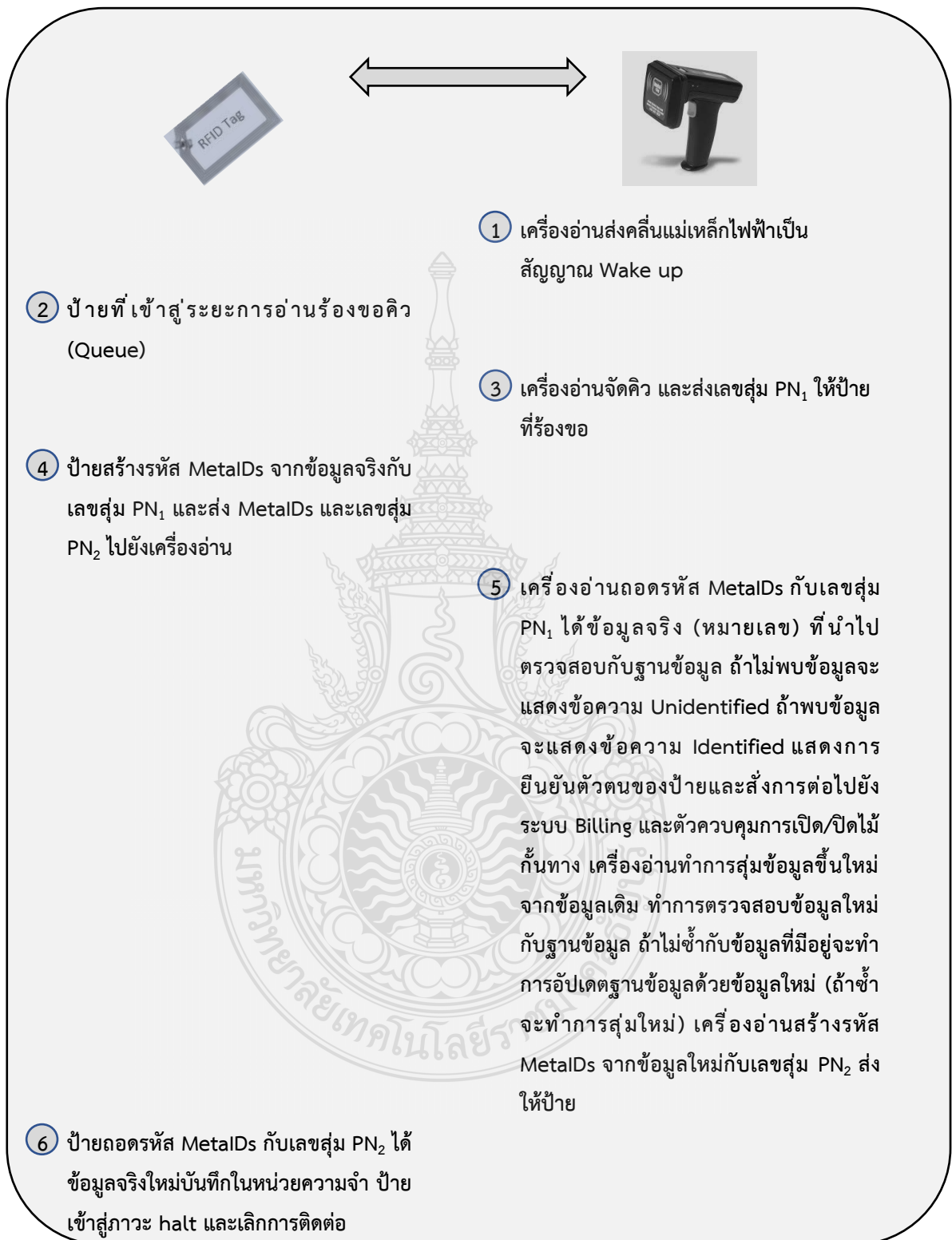


รูปที่ 3.29 ผลรวมแบบมอดูโล 2 ของรหัส PN กับข้อมูลจริง [14]

### 3.6 การออกแบบโพรโทคอลอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ

ลำดับขั้นตอนและข้อกำหนดในกระบวนการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (รวมทั้งฐานข้อมูล) กับป้ายเรียกว่า โพรโทคอล (Protocol) มีกระบวนการโดยรวมคือ เมื่อป้ายเข้ามาในวิสัยทำการของเครื่องอ่าน เครื่องอ่านจะทำการจัดคิวอ่านป้ายเพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล กรณีมีป้ายปริมาณมาก ๆ อยู่ในวิสัยทำการของเครื่องอ่าน ซึ่งจะส่งผลให้การยืนยันตนเกิดความผิดพลาด โดยเฉพาะการยืนยันตนของป้ายบัตรโดยสาร หรือกรณีการประยุกต์ใช้กับสินค้าที่อยู่บนสายพานลำเลียงหรือสินค้าที่บรรจุในตู้คอนเทนเนอร์เคลื่อนที่ ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้นำโพรโทคอลป้องกันการชนกันของข้อมูลมาประยุกต์ใช้เพื่อทดสอบกับป้ายอาร์เอฟไอดีชนิด 13.56 MHz ISM band class 1 radio frequency identification tag interface standard ทำการออกแบบโพรโทคอลการสื่อสารและการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัสรักษาความปลอดภัยที่นำเสนอขั้นตอนต่าง ๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.30

จากรูปที่ 3.30 กระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและป้ายอาร์เอฟไอดีจะผ่านการเข้ารหัสลับเพื่อรักษาความปลอดภัยสำหรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติทั้งขาไปและขากลับ รหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารจะสร้างจากเลขสุ่มด้วยวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Maximum length sequence pseudo-random noise generator ดังกล่าวในหัวข้อข้างต้น รหัสลับดังกล่าวมีเฉพาะเครื่องอ่านกับป้ายที่กำลังติดต่อสื่อสารเท่านั้นที่รู้จัก อีกทั้งรหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารในแต่ละครั้งถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เพียงครั้งเดียว จึงเป็นการยากที่จะติดตามแกะรอยข้อมูลจริงได้ในเวลาอันสั้น ซึ่งในการติดต่อสื่อสารแต่ละครั้งจะใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาทีเท่านั้น



รูปที่ 3.30 โพรโทคอลการสื่อสารและยืนยันตัวตนระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับป้ายอาร์เอฟไอดี [14]



### 3.6.1 จำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ระบบขนส่งอัจฉริยะ กรณีการเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ ในส่วนของการออกแบบและสร้างรหัส MetalDs ตั้งแต่การสร้างรหัส PN การรวมแบบมอดูล 2 การแปลงเลขฐาน และการยืนยันตัวตนของป้าย (คือการเข้ารหัส ถอดรหัส และตรวจสอบรหัสข้อมูล) จะดำเนินการอยู่บนเฟิร์มแวร์ (Firmware) ที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่าน/เขียนข้อมูลกับป้ายอาร์เอฟไอดี จะทำการเชื่อมต่อผ่าน RFID 13.56 MHZ Read/Write Mifare Module ตามข้อกำหนดมาตรฐาน 13.56 MHZ ISM band class 1 radio frequency identification tag interface standard โดยการจำลองสถานการณ์นี้ มุ่งทดสอบโพรโตคอลที่นำเสนอ ส่วนอุปกรณ์สำหรับการจำลองนั้น จะใช้อาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำที่ใช้ในระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.31 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือโปรแกรมที่ใช้สร้าง ตรวจสอบ และยืนยันตัวตนจะทำงานอยู่บนระบบคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สองคือเครื่องอ่าน/เขียนรหัสเลือกใช้ตัวเทียบเท่ากับเครื่องอ่านบัตรผ่านเข้า/ออกของด่านผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ และส่วนสุดท้ายคือป้ายอาร์เอฟไอดีเลือกใช้แบบเดียวกับบัตรผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.10



รูปที่ 3.31 การจำลองสถานการณ์รหัส MetalDs สำหรับอาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ (ระบบผ่านทางพิเศษอัตโนมัติ)

### ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
Standard	ISO/IEC 14443 Type A
Device	RFID 13.56 MHz Read/Write Mifare Module
MetalDs length (HEX)	10 บิต
Delay element	64
PN maximum length	18446744073709551615

#### 3.6.2 ผลการจำลองสถานการณ์

ทำการทดสอบโปรแกรมรหัส (หมายเลข) ตัวอย่าง 7D 74 DB 66 9A ลงในป้ายอาร์เอฟไอดีของผู้ใช้งานด้วยโปรแกรมที่ใช้สร้างรหัส MetalDs และโพรโทคอลที่นำเสนอ แล้วนำไปอ่านและยืนยันตัวตนตามสถานการณ์จำลองในรูปที่ 5 จำนวน 5 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 3.11 พบว่า ข้อมูลที่อ่านได้มีค่าตรงกับฐานข้อมูล แต่มีค่าเปลี่ยนไปทุกรอบการอ่าน เนื่องจากการอัปเดตรหัสใหม่ทุกครั้งที่ประสบผลสำเร็จ สถานะของการยืนยันตัวตนคือ Identified แสดงถึงการยืนยันตัวตนสำเร็จ จากนั้นนำป้ายอาร์เอฟไอดีเดียวกันนี้มาโปรแกรมรหัสตัวอย่าง 7D 74 DB 66 9A อีกครั้ง แล้วนำไปอ่านด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม ได้ผลดังตารางที่ 3.12 พบว่า เครื่องอ่านทำการอ่านข้อมูลซ้ำหลายครั้ง แต่ข้อมูลที่อ่านได้ไม่ตรงกับรหัส (หมายเลข) ในฐานข้อมูล สถานะของการยืนยันตัวตนคือ Unidentified แสดงถึงการยืนยันตัวตนไม่สำเร็จ

### ตารางที่ 3.11 ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ใช้โพรโทคอลที่นำเสนอ

ครั้งที่	ข้อมูลรหัส (หมายเลข) ที่เขียนลงป้ายและฐานข้อมูล	ข้อมูลที่อ่านได้จากตัวอ่านอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอ	สถานะ (Status)
1	7D 74 DB 66 9A	7D 74 DB 66 9A	Identified
2	1A 26 12 C1 70	1A 26 12 C1 70	Identified
3	D8 40 E9 91 26	D8 40 E9 91 26	Identified
4	08 7A 52 64 f2	08 7A 52 64 f2	Identified
5	87 36 3C DA 60	87 36 3C DA 60	Identified

ตารางที่ 3.12 ผลการยืนยันตัวตนของป้ายด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม

ครั้งที่	ข้อมูลรหัส (หมายเลข) ที่เขียนลงป้ายและ ฐานข้อมูล	ข้อมูลที่อ่านได้โดย ตัวอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิม	สถานะ (Status)
1	7D 74 DB 66 9A	FF FF E8 13 9E 26 AF C5 72 44 BC 6D 78 50 66 2F 66 8F 95 67 45 40 35 DF 54 56 7D 1D A0 10 8F BE 40 0B FF FF	Unidentified
2	7D 74 DB 66 9A	FF FF 8E 4F A0 34 03 7C 72 20 46 12 BD 7B 74 BE F7 38 F3 3B 7B 52 99 66 54 32 87 62 65 3B 9D 2F D1 BC FF FF	Unidentified
3	7D 74 DB 66 9A	FF FF 11 9D E6 03 8B 4F CC 42 16 A7 D0 8D 9B 7D 9E 10 6C E9 3D 65 11 55 EA 50 D7 D7 08 CD 72 EC B8 94 FF FF	Unidentified
4	7D 74 DB 66 9A	FF FF 36 9D 38 35 76 31 A3 23 54 74 1E C1 16 D3 18 59 4B E9 E3 53 EC 2B 85 31 95 04 C6 81 FF 42 3E DD FF FF	Unidentified
5	7D 74 DB 66 9A	FF FF FB DF 2A 7B E4 2B 0D D3 A0 B2 0F 9A E9 7E C8 0E 86 AB F1 1D 7E 31 2B C1 61 C2 D7 DA 00 EF EE	Unidentified

ผลการทดสอบในตารางที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่า การเขียน/อ่านข้อมูลในป้ายอาร์เอฟไอดีด้วยเครื่องอ่านที่ใช้รหัส MetalDs ตามโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถยืนยันตัวตนของป้ายได้ร้อยละ 100 ส่วน ตารางที่ 3.12 แสดงให้เห็นว่า เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีแบบดั้งเดิมไม่สามารถอ่านและยืนยันตัวตนป้ายอาร์เอฟไอดีที่ใช้รหัส MetalDs ตามโพรโทคอลแบบใหม่ที่นำเสนอได้

การวิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบที่นำเสนอจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในตารางที่ 1 ป้ายอาร์เอฟไอดีที่ใช้เป็นแบบ Mifare Classic 1K สามารถบันทึกข้อมูลซ้ำได้ 100,000 ครั้ง บน

มาตรฐาน ISO/IEC 14443 Type A เป็นป้าย อาร์เอฟไอดีที่มีต้นทุนต่ำ มีความยาวของรหัสเท่ากับ 10 บิต (HEX) โดยในหนึ่งระบบสามารถกำหนดรหัส (หมายเลข) ที่ไม่ซ้ำกันได้ทั้งหมด  $16^{10} = 1,099,511,627,776$  หรือประมาณ 1 ล้านล้านรหัส ข้อแตกต่างของระบบที่นำเสนอกับระบบดั้งเดิมคือ ระบบดั้งเดิมเมื่อทำการโปรแกรมรหัส (หมายเลข) ลงในป้ายของผู้ใช้งานใดๆ แล้วจะไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก รหัส (หมายเลข) ได้จากการสุ่มเลือกและเขียนลงในหน่วยความจำของป้ายเมื่อเปิดใช้งาน ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัส (Probability of Hacking Success) แทนด้วย  $p(N_A)$  จะขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้ในระบบ และจำนวนครั้งของความพยายามโจมตีเพื่อล้วงรหัส (Number of attraction) ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสกำหนดดังสมการที่ (3.2)

$$p(N_A) = \frac{N_A \times N_L}{16^{10}} \quad (3.2)$$

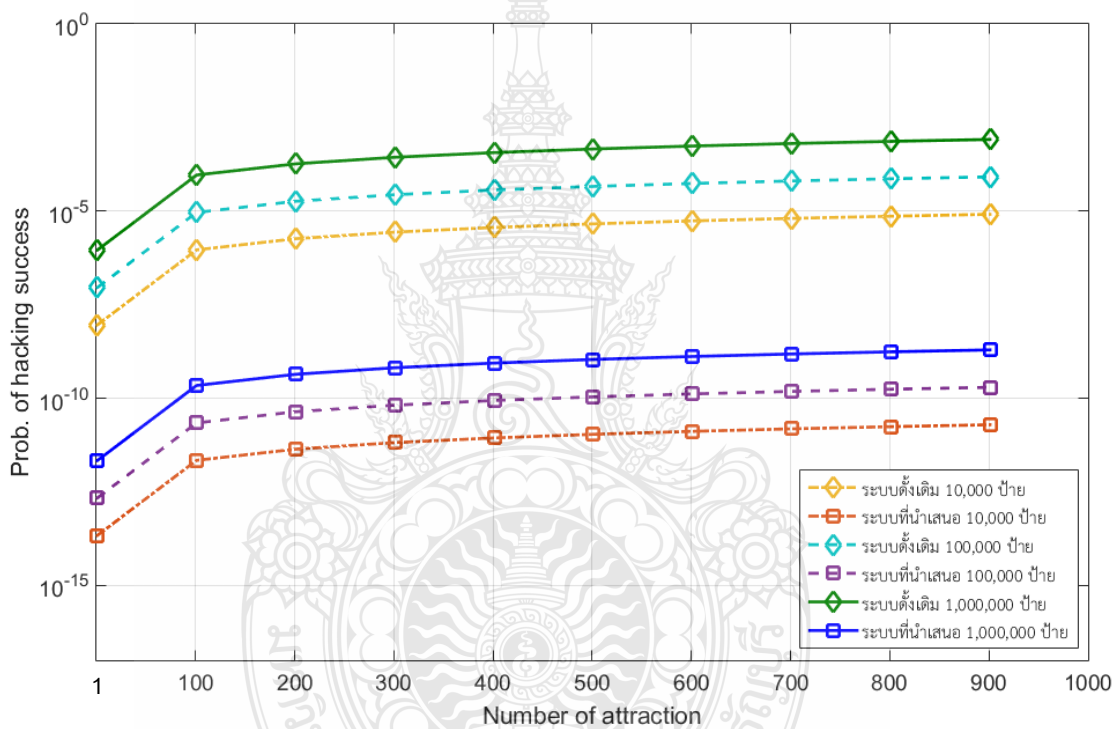
โดยที่  $N_A$  คือ จำนวนครั้งที่พยายามโจมตี และ  $N_L$  คือ จำนวนผู้ใช้หรือป้าย

ในที่นี้กำหนดองค์ประกอบการประวิง (Delay element) จำนวน 64 ตัว สามารถสร้างรหัสที่มีความยาวรอบเท่ากับ  $2^{64} - 1 = 18,446,744,073,709,551,615$  หรือประมาณ  $18 \times 10^{18}$  ซิป ระบบจะทำการสุ่มดัดรหัสครั้งละ 40 ซิปจากทั้งหมดเพื่อรวมกับข้อมูลจริง (หมายเลขของป้าย) 10 หลักแบบมอดูโล 2 การรวมเป็นแบบบิตต่อบิต นอกจากนี้ ระบบมีการดำเนินการอัปเดตรหัสใหม่ทุกครั้งที่มีการยืนยันตัวตนสำเร็จ รหัสลับที่ใช้ติดต่อสื่อสารเป็นเลขสุ่มขึ้นมา และเปลี่ยนทุกครั้งที่ทำการสื่อสารทั้งขาไปและขากลับ ตามโพรโทคอลที่นำเสนอทำให้ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสยากขึ้นไปอีก ความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสดังกล่าวสามารถกำหนดดังสมการที่ (3.3)

$$p(N_A) = \frac{N_A \times N_L}{16^{10}} \quad (3.3)$$

ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสระหว่างระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัส (หมายเลข) ลงในป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัวเมื่อเปิดใช้งานกับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส MetalIDs และอัปเดตรหัสทุกครั้งที่ใช้งานและมีการยืนยันตัวตนสำเร็จตามโพรโทคอลที่นำเสนอดังรูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.32

จากรูปที่ 3.32 ผลการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้ RFID แบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัสลงบนป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัว (แทนด้วยสัญลักษณ์  $\diamond$ ) เทียบกับแบบใหม่ที่ใช้รหัส MetalIDs และอัปเดตรหัสทุกครั้งที่ใช้งานและมีการยืนยันตัวตนสำเร็จตามโพรโทคอลที่นำเสนอ (แทนด้วยสัญลักษณ์  $\square$ ) ในสถานการณ์ที่มีจำนวนป้ายหรือผู้ใช้ป้ายในระบบ 3 กรณีคือ 10,000 100,000 และ 1,000,000 ป้าย/ผู้ใช้ และใช้ความพยายามโจมตีเพื่อล้วงรหัสจำนวน 1 100 200 300 400 500 600 700 800 900 ครั้ง จะพบว่ากราฟความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสของแบบที่นำเสนอมีค่าต่ำกว่าแบบดั้งเดิมทุกกรณี



รูปที่ 3.32 ผลการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสระหว่างระบบขนส่งอัจฉริยะที่ใช้โพรโทคอลแบบที่นำเสนอกับแบบดั้งเดิม

## บทที่ 4

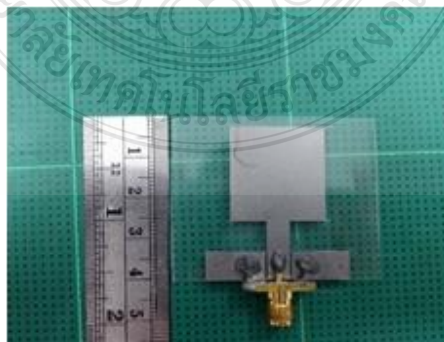
### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและวัดผลสายอากาศอาร์เอฟไอเดียัน 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่สร้างขึ้นบนวัสดุกราฟีน จากการนำผลจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม CST ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำการเปรียบและวิเคราะห์ผลการวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล และอัตราขยายของสายอากาศ

#### 4.1 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอเดียบนแผ่นกราฟีน

ขั้นตอนการสร้างสายอากาศอาร์เอฟไอเดียบนแผ่นกราฟีน มีดังนี้

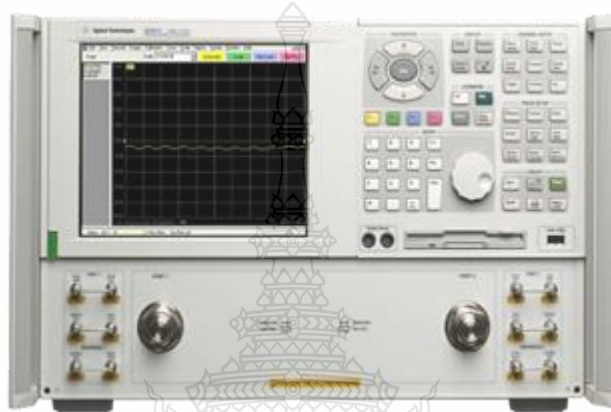
- 1) พิมพ์แบบร่างสายอากาศโมโนโพลรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามขนาดที่ออกแบบได้ในบทที่ 3 บนกระดาษด้วยเครื่องพิมพ์ความละเอียดสูง
- 2) นำกระดาษแบบร่างสายอากาศอาร์เอฟไอเดียติดบนแผ่นกราฟีนที่ตัดไว้ ซึ่งแผ่นกราฟีนที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีวัสดุฐานรองเป็นพอลิเอไมด์มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 2.47 มีความหนา 0.095 มิลลิเมตร วัสดุตัวนำเป็นกราฟีนมีค่าความนำไฟฟ้า  $1900000 \text{ S/m}$  มีความหนา 0.012 มิลลิเมตร
- 3) ใช้เครื่องมือตัดสายอากาศอาร์เอฟไอเดียตามแบบร่างให้ลึกเพียงแค่ความหนาของชั้นตัวนำกราฟีน โดยไม่ให้ลึกเข้าเนื้อส่วนฐานรองพอลิเอไมด์
- 4) ลอกเอาส่วนของตัวนำกราฟีนที่ไม่ใช้งานออกจากส่วนฐานรองพอลิเอไมด์
- 5) ตัดหัวคอนเนกเตอร์ชนิด SMA เข้ากับส่วนของตัวนำกราฟีนด้วยกาวนำไฟฟ้า จะได้สายอากาศอาร์เอฟไอเดียบนแผ่นกราฟีน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบที่สร้างสำเร็จ

## 4.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดและการวัดค่าความสูญเสียจากการสะท้อน

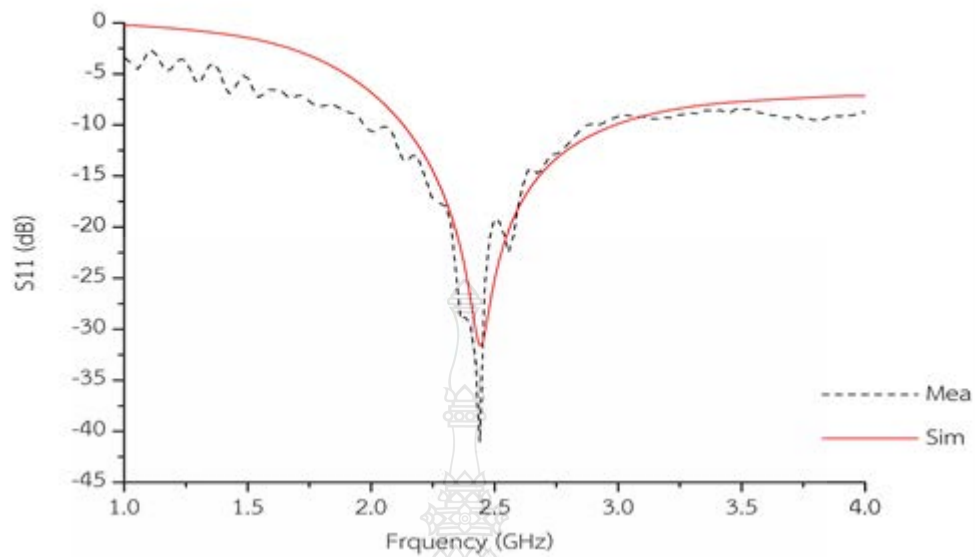
การวัดค่าสัมประสิทธิ์จากการสะท้อน ( $S_{11}$ ) ด้วยการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า (Network Analyzer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น E8363B ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยตั้งย่านความถี่ในการวัด ตั้งแต่ 1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 4 กิกะเฮิรตซ์ การต่ออุปกรณ์และสายในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ของสายอากาศ ทำการทดสอบสายอากาศในห้องปฏิบัติการระบบสื่อสารและโทรคมนาคม



รูปที่ 4.2 Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B

## 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

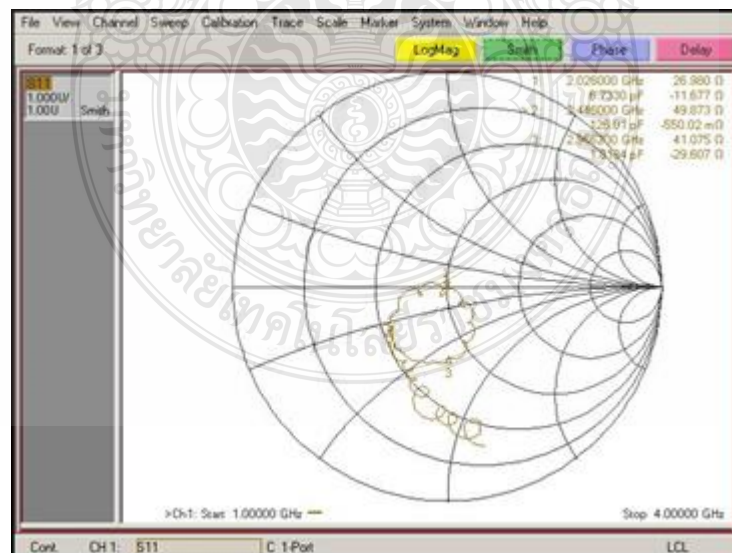
รูปที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ที่ได้จากการจำลองด้วย โปรแกรม CST กับการวัดทดสอบการทำงานของสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าจากกราฟพบว่า ผลการจำลองมีค่าแบนด์วิดท์ ตั้งแต่ 2.1 ถึง 2.9 กิกะเฮิรตซ์ หรือความกว้างแถบความถี่เท่ากับร้อยละ 32.78 โดยมีการตอบสนองความถี่ที่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-31.5$  dB ส่วนผลที่ได้จากการวัดจริงพบว่า สายอากาศที่สร้างขึ้นแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 2 ถึง 2.8 กิกะเฮิรตซ์ หรือความกว้างแถบความถี่เท่ากับร้อยละ 32.78 โดยมีการตอบสนองความถี่ที่ 2.44 กิกะเฮิรตซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-40.9$  dB โดยรวมแล้วการตอบสนองความถี่มีความสอดคล้องกัน แต่ผลที่ได้จากการวัดจริงมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ดีกว่าผลการจำลอง



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองและการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้น

#### 4.4 ผลการวัดทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์

รูปที่ 4.4 แสดงผลการวัดทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาร์เอฟไอเดียบนแผ่นกราฟีน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $49.783 - j0.55 \Omega$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้คือ  $50 \Omega$

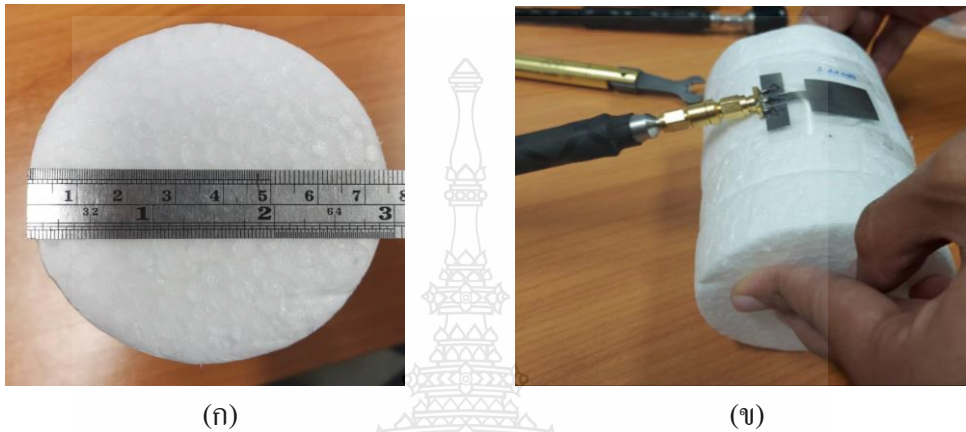


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



#### 4.5 ผลการวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศ

ในการทดสอบความโค้งงอของสายอากาศจะทดสอบ โดยการติดสายอากาศที่สร้างขึ้นติดตั้งลงบนโฟมวงกลมที่มีขนาดรัศมี 3.5 เซนติเมตร 5 เซนติเมตรและ 6 เซนติเมตร ตามลำดับเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศโฟมขนาดรัศมี 3.5 เซนติเมตร

(ก) โฟมขนาดรัศมี 3.5 เซนติเมตร

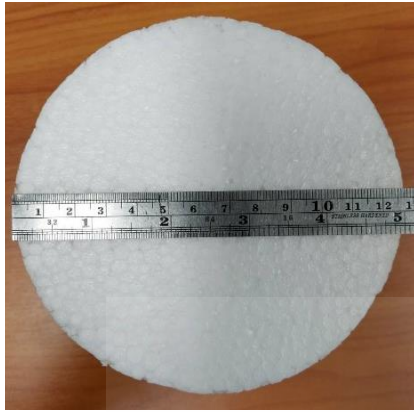
(ข) การติดตั้งสายอากาศบนโฟมขนาดรัศมี 3.5 เซนติเมตร



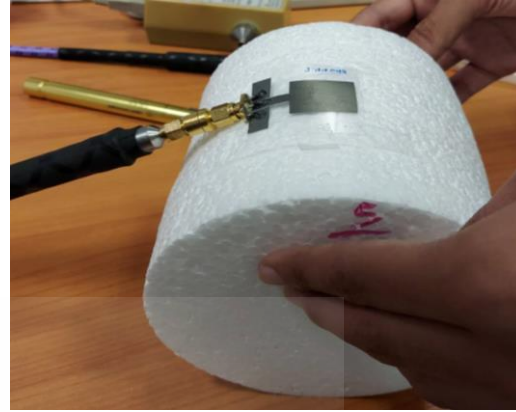
รูปที่ 4.6 การวัดทดสอบความโค้งงอของสายอากาศโฟมขนาดรัศมี 5 เซนติเมตร

(ก) โฟมขนาดรัศมี 5 เซนติเมตร

(ข) การติดตั้งสายอากาศบนโฟมขนาดรัศมี 5 เซนติเมตร



(ก)

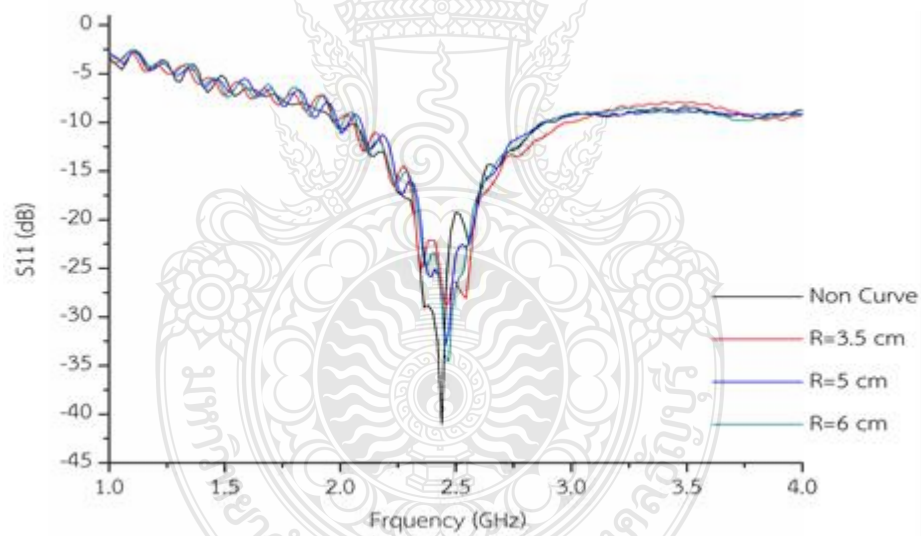


(ข)

รูปที่ 4.7 การวัดทดสอบความโค้งของสายอากาศโฟมขนาดรัศมี 6 เซนติเมตร

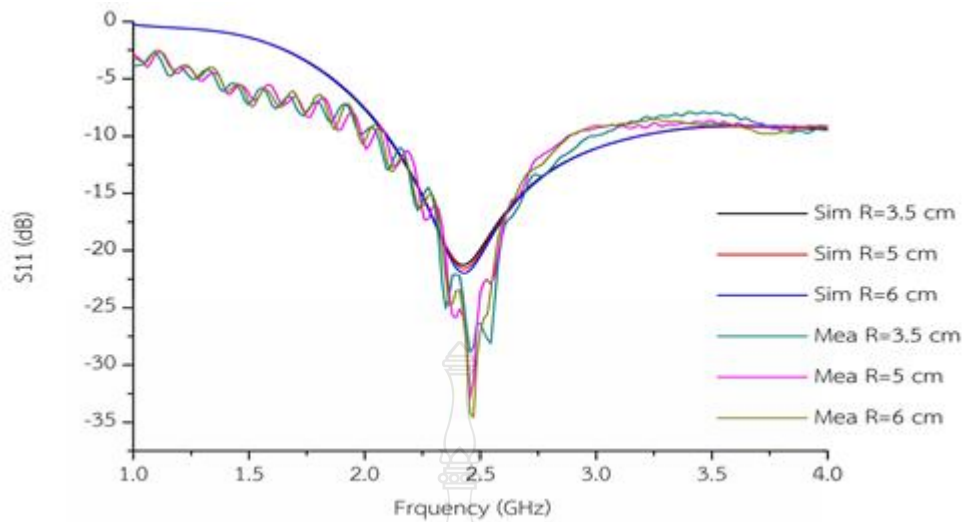
(ก) โฟมขนาดรัศมี 6 เซนติเมตร

(ข) การติดตั้งสายอากาศบนโฟมขนาดรัศมี 6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการทดสอบความโค้งของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความโค้งของสายอากาศโดย R คือ รัศมีความโค้งกราฟ เส้นสีแดง R เท่ากับ 3.5 เซนติเมตร เส้นสีน้ำเงิน R เท่ากับ 5 เซนติเมตร เส้นสีเขียว R เท่ากับ 6 เซนติเมตร และเส้นสีดำคือสายอากาศในระนาบปกติ ผลการทดสอบเมื่อสายอากาศเกิดความโค้ง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสายอากาศอยู่ในเกณฑ์สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ได้

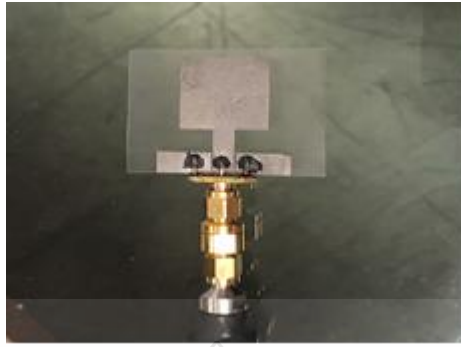


**รูปที่ 4.9** ผลการเปรียบเทียบความโค้งงอของสายอากาศระหว่างการจำลองและการวัดทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้น

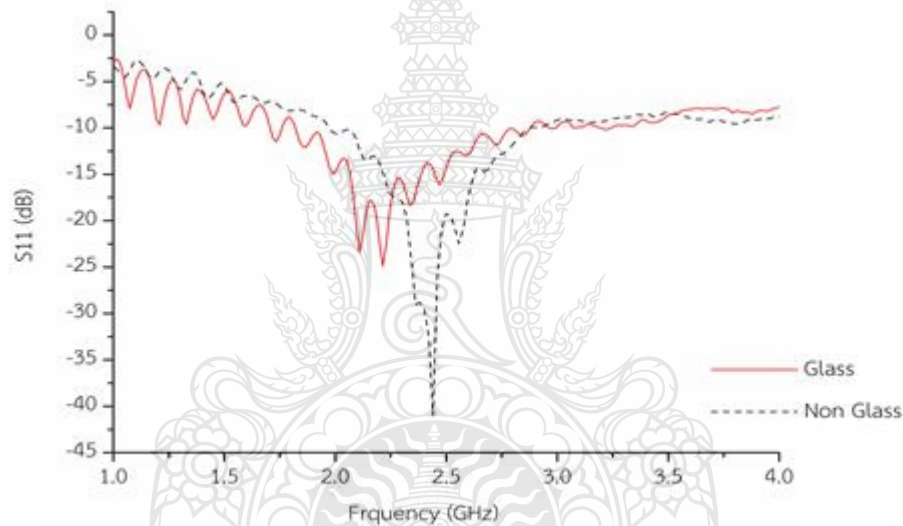
จากรูปที่ 4.9 กราฟเส้นสีเขียวคือค่าจากการวัดทดสอบความโค้งงอรัศมี 3.5 เซนติเมตร เส้นสีม่วงคือค่าจากการวัดทดสอบความโค้งงอรัศมี 5 เซนติเมตร เส้นสีเหลืองคือค่าจากการวัดทดสอบความโค้งงอรัศมี 6 เซนติเมตร เส้นสีดำคือค่าจากการจำลองความโค้งงอรัศมี 3.5 เซนติเมตร เส้นสีแดงคือค่าจากการจำลองความโค้งงอรัศมี 5 เซนติเมตร และเส้นสีน้ำเงินคือค่าจากการจำลองความโค้งงอรัศมี 6 เซนติเมตร จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการวัดทดสอบและการจำลองมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และความถี่เรโซแนนซ์สอดคล้องกัน ค่าจากการวัดทดสอบนั้นมีผลที่ดีกว่าค่าจากการจำลอง

#### 4.6 ผลการวัดทดสอบสายอากาศติดบนกระจกรถยนต์

นำสายอากาศอาร์เอฟไอดีต้นแบบที่สร้างขึ้นติดลงบนกระจกรถยนต์ ดังรูปที่ 4.10 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศขณะใช้งานจริง เพื่อจำลองสถานการณ์กรณีที่น่าไปประยุกต์ใช้งานเป็นสติ๊กเกอร์อาร์เอฟไอดีสำหรับระบบขนส่งอัจฉริยะ และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) ระหว่างสายอากาศที่ติดบนกระจกรถยนต์และสายอากาศที่ไม่ได้ติดบนกระจกรถยนต์ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.11

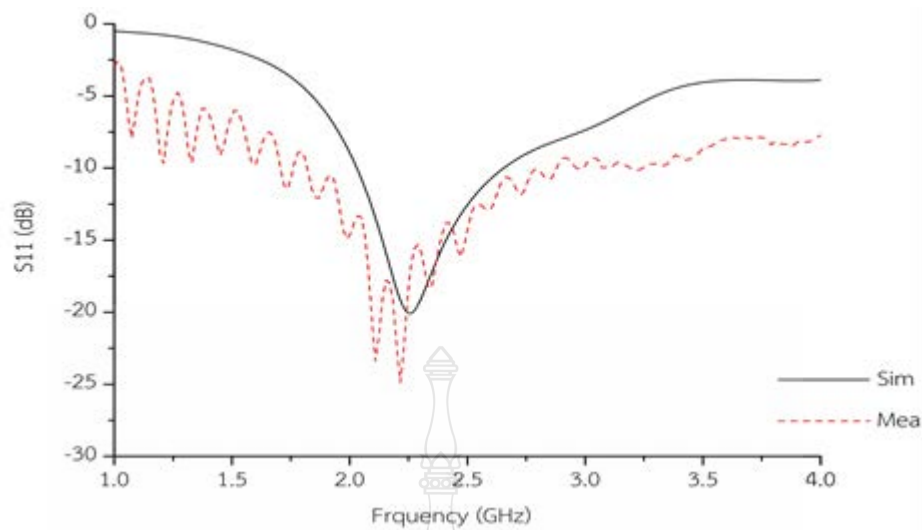


รูปที่ 4.10 สายอากาศอาร์เอฟไอดีต้นแบบติดบนกระจกยนต์



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการวัดระหว่างสายอากาศที่ติดบนกระจกยนต์และไม่ติดบนกระจกยนต์

จากรูปที่ 4.11 จากกราฟเส้นสีแดงแสดงถึงสายอากาศที่ติดบนกระจกยนต์และเส้นสีดำแสดงถึงสายอากาศที่ไม่ได้ติดบนกระจกยนต์ จากกการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) พบว่าสายอากาศที่นำไปติดบนกระจกยนต์ค่าความความถี่เรโซแนนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการตอบสนองความถี่ที่ดีที่สุดที่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ ค่าแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 1.8 ถึง 2.7 กิกะเฮิรตซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-24.87$  dB จากค่าแบนด์วิดธ์นี้ยังครอบคลุมย่านความถี่อาร์เอฟไอดี 2.4 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดทดสอบสายอากาศที่ติดบนกระจกนยนต์

จากรูปที่ 4.12 กราฟเส้นสีแดงแสดงถึงการจำลองสายอากาศที่ติดบนกระจก และเส้นสีดำแสดงถึงการวัดสายอากาศที่ติดบนกระจก จากการเปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจากการจำลองเท่ากับ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ และค่าจากการวัดจริงเท่ากับ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ จากการจำลองมีค่าแบนด์วิดธ์เท่ากับ 2 ถึง 2.6 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -21.1 dB จากการวัดจริงมีค่าแบนด์วิดธ์เท่ากับ 1.8 ถึง 2.7 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -24.87 dB จะเห็นได้ว่าค่าจากการวัดจริงนั้นดีกว่าการจำลอง

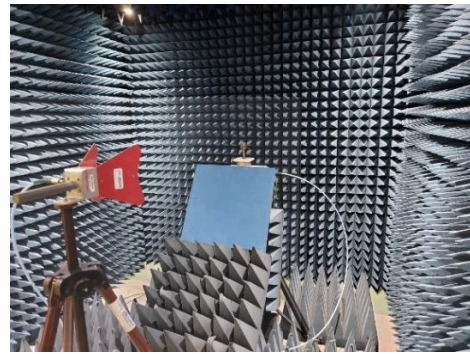
#### 4.7 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

ในส่วนการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศต้นแบบ เลือกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า ร่วมกับโปรแกรมแสดงค่าการแผ่พลังงาน การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศต้นแบบ จัดตั้งระบบการวัดขึ้นในห้องทดสอบวัดสายอากาศ วิธีการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานจะใช้สายอากาศรูปปากแตร Double Ridged Model 3117 เป็นสายอากาศส่งความถี่ที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงไปยังสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้น ทำหน้าเป็นตัวรับสัญญาณที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า และเครื่องพล็อตกราฟที่ควบคุมการหมุนสายอากาศตัวรับสัญญาณแบบรอบตัว กำหนดความสูงจากพื้นถึงตัวสายอากาศของภาครับและภาคส่งมีค่าเท่ากับ 1.26 เมตร มีระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับเท่ากับ 2 เมตร ในการวัดจะทำการปรับมุมระนาบที่สายอากาศด้านรับครั้งละ 10 องศา เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน จะทำการทดสอบวัดสองระนาบ คือ ระนาบ XZ และระนาบ YZ ทั้งสองระนาบจะวัดสัญญาณที่เป็นโพลาไรซ์เซชันเดียวกัน (Co-Polarization) และโพลาไรซ์เซชันไขว้ (Cross-Polarization) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



(ก)

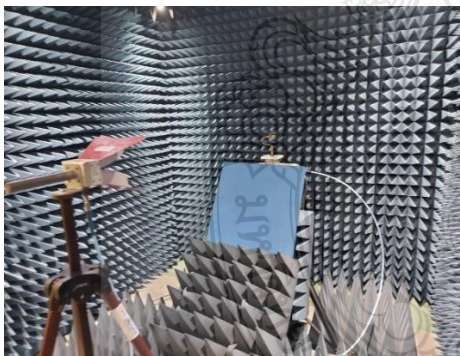


(ข)

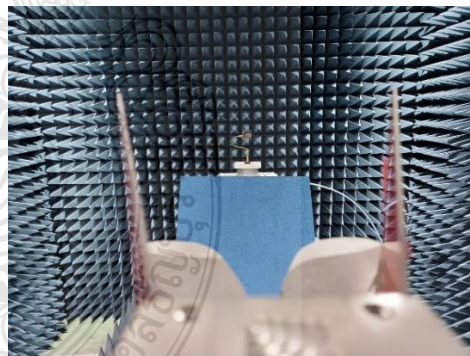
รูปที่ 4.13 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ XZ

(ก) การติดตั้งอุปกรณ์ในระนาบ XZ (Co-Polarization)

(ข) การติดตั้งอุปกรณ์ในระนาบ XZ (Cross-Polarization)



(ก)

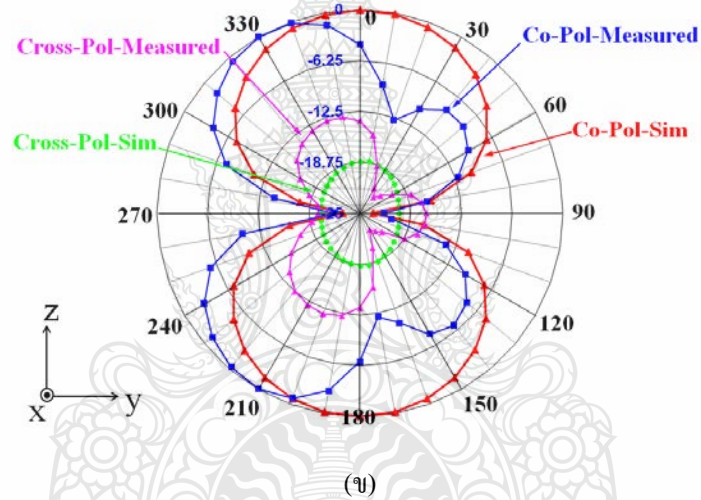
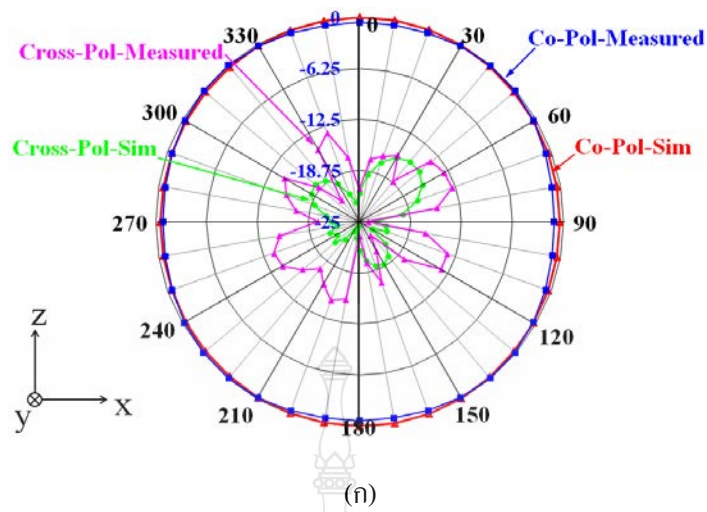


(ข)

รูปที่ 4.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ YZ

(ก) การติดตั้งอุปกรณ์ในระนาบ YZ (Cross-Polarization)

(ข) การติดตั้งอุปกรณ์ในระนาบ YZ (Co-Polarization)



รูปที่ 4.15 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติ

(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ XZ

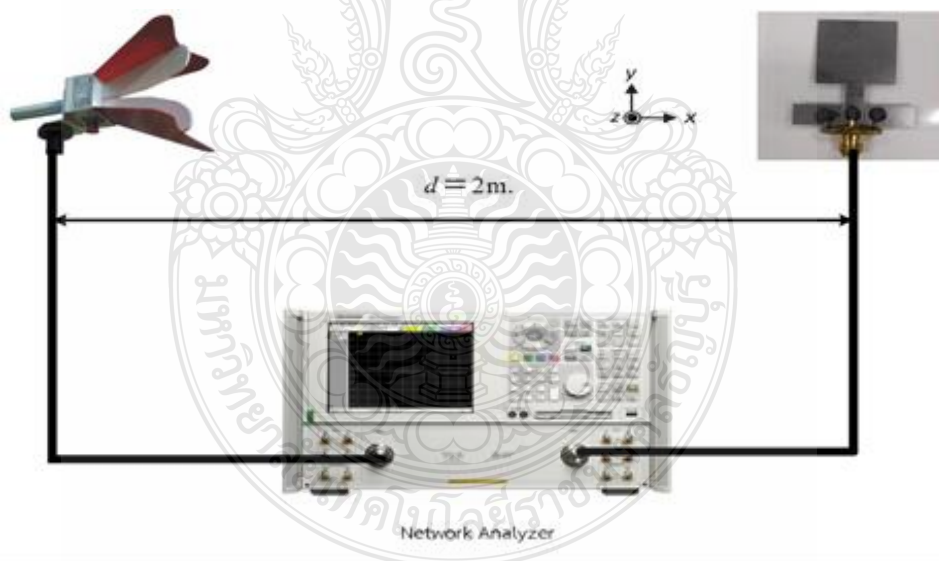
(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ YZ

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ บนระนาบ XZ เส้นสีเขียวแสดงถึงแบบรูปการวัดการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-XZ เส้นสีแดงแสดงถึงการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ Cross-XZ เส้นสีน้ำเงินแสดงถึงแบบรูปการจำลองการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-XZ และเส้นสีส้มแสดงถึงแบบรูปการจำลองการแผ่พลังงานบนระนาบ Cross-XZ ผลเปรียบเทียบพบว่า ผลการวัดที่ระนาบ XZ แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-XZ มีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni directional) สอดคล้องกับการจำลองในโปรแกรมจำลอง

รูปที่ 4.15 (ข) แสดงรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ บนระนาบ YZ เส้นสีเขียวแสดงถึงแบบรูปการวัดการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-YZ เส้นสีแดงแสดงถึงการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ Cross-YZ เส้นสีน้ำเงินแสดงถึงแบบรูปการจำลองการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-YZ และเส้นสีส้มแสดงถึงแบบรูปการจำลองการแผ่พลังงานบนระนาบ Cross-YZ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าผลการวัดที่ระนาบ Co-YZ แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบ Co-XZ มีลักษณะการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (Bi directional) อาจเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นบ้างแต่สอดคล้องกับการจำลองในโปรแกรม CST

#### 4.8 ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ ได้ใช้สายอากาศแบบฮอร์น Double Ridged Model 3117 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและในวิจัยนี้นำเสนอรูปตัวอย่างสายอากาศอาร์เอฟไอเดีย 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ บนวัสดุกราฟีนทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับและต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเท่ากับ 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

คำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการที่ (2.10) โดยการจัดลำดับใหม่ได้ดังนี้

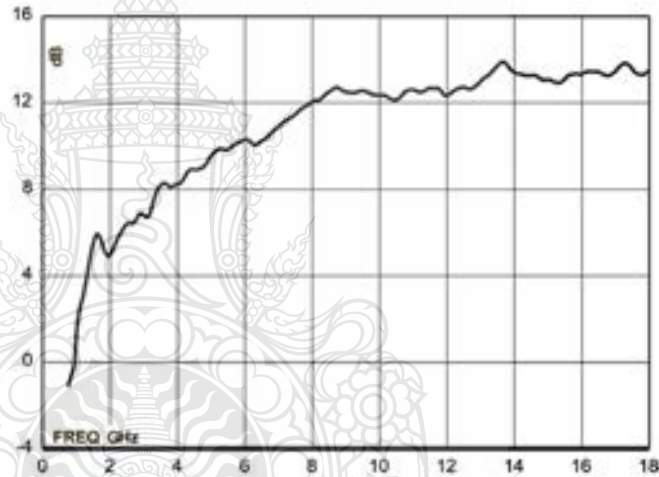
$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (4.1)$$



- เมื่อ  $P_t$  คือ กำลังงานทางภาคส่ง (dBm)  
 $P_r$  คือ กำลังงานทางภาครับ (dBm)  
 $L_{line}$  คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศเท่ากับ  $20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$   
 $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาคส่ง  
 $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาครับ

อัตราขยายของสายอากาศอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอในวิจัยนี้จะพิจารณาที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์  
 คำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่สร้างจริงจากสมการที่ (4.1) โดยมีอัตราขยายของภาคส่ง 6.3  
 dB โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

Typical Gain



รูปที่ 4.17 อัตราขยายของสายอากาศแบบฮอร์น Double Ridged Model 3117 ที่ภาคส่ง

อัตราขยายของสายอากาศอาร์เอฟไอดีในงานวิจัยนี้จะคำนวณที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์  
 การคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการที่ (4.1) มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง ( $G_t$ ) = 6.3 dB  
 กำลังที่ส่งออก ( $P_t$ ) กำหนดไว้ที่ = 0 dBm  
 คาระยะห่างสายอากาศภาครับและภาคส่ง (d) = 2 m  
 การสูญเสียในสายอากาศ ( $L_r$ ) =  $20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}$  = 46.2 dB  
 สูญเสียในสายนำสัญญาณทั้งด้านส่งและด้านรับ ( $L_{line}$ ) = 5.03 dB  
 กำลังงานที่ได้รับสูงสุด ( $P_r$ ) = - 43.7 dBm

แทนค่าในสมการที่ (4.1) ได้ดังนี้

$$G_r = -43.7 - 0 - 46.2 + 5.03 - 6.3$$

$$= 1.23 \text{ dBi}$$

ดังนั้น อัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ คือ 1.23 dBi

**ตารางที่ 4.1** เปรียบเทียบผลการจำลองกับการวัดสายอากาศอาร์เอฟไอเดียบนแผ่นกราฟีน

พารามิเตอร์	2.45 กิกะเฮิรตซ์	
	การจำลอง	การวัดจริง
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	-31.5 dB	-40.9 dB
ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์	53.2+j1.7 $\Omega$	49.873-j0.55 $\Omega$
การแผ่พลังงานบนระนาบ xz	แบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni directional)	แบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni directional)
การแผ่พลังงานบนระนาบ yz	แบบสองทิศทาง (Bi directional)	แบบสองทิศทาง (Bi directional)
อัตราขยาย	1.92 dBi	1.23 dBi

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่ได้จากการวัดในตารางและการจำลองผลของโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองกับการวัดจริงจะเห็นว่าค่าของการวัดจริงดีกว่าการจำลอง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากการจำลองกับผลการวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกัน การแผ่พลังงานบนระนาบ XZ และบนระนาบ YZ จากการจำลองกับผลการวัดจริงมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่สอดคล้องกัน ส่วนอัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการวัดจริงค่าที่ได้จากการจำลองจะดีกว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงเล็กน้อย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปของการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นอาร์เอฟไอดีสติกเกอร์ของระบบขนส่งอัจฉริยะที่ได้ศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้จะทำการสรุปคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST และการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการวัดวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า รวมถึงผลสรุปการออกแบบโพโรโทคอลยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดีสำหรับระบบจัดเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติในระบบขนส่งอัจฉริยะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

คุณลักษณะฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นอาร์เอฟไอดีสติกเกอร์ของระบบขนส่งอัจฉริยะ โครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบโมโนโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง มีวัสดุฐานรองพอลิเอไมด์ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 2.47 มีความหนา 0.095 มิลลิเมตร วัสดุกราฟีนมีค่าความนำไฟฟ้า 1900000 S/m มีความหนา 0.012 มิลลิเมตร โดยหลักในการออกแบบสายอากาศนี้มีข้อดีคือ สายอากาศที่ได้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา โค้งงอได้ สามารถทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และสายอากาศที่นำเสนอมีค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ ตามตรงตามวัตถุประสงค์

ผลการวัดทดสอบสายอากาศอาร์เอฟไอดีติดบนกระจกหน้ายานพาหนะมีแถบกว้างความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ จากความถี่ 1.8 กิกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2.7 กิกะเฮิร์ตซ์โดยประมาณ มีแกนขยายสูงสุดที่ 1.23 dBi ที่ความถี่กลาง 2.2 กิกะเฮิร์ตซ์ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง สายอากาศอาร์เอฟไอดีที่นำเสนอมีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถโค้งงอตามพื้นผิวของกระจกหน้ารถยนต์หรือยานพาหนะได้โดยยังคงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นที่ดี

นอกจากนี้ คุณลักษณะเล่มนี้ยังได้เสนอวิธีการออกแบบและสร้างรหัส MetalDs ในกระบวนการยืนยันตัวตนของอาร์เอฟไอดี เพื่อพัฒนาระบบการยืนยันตัวตนของยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะให้มีความปลอดภัยขึ้นกว่าระบบเดิม โดยการออกแบบรหัสรักษาความปลอดภัยที่เรียกว่า MetalDs เพื่อประยุกต์เข้ากับโพโรโทคอลยืนยันตัวตนของระบบอาร์เอฟไอดี การจำลองสถานการณ์ของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่มีจำนวนผู้ใช้งานในระบบ 3 กรณีคือ 10,000 100,000 และ 1,000,000 ผู้ใช้ ผลการจำลองพบว่า ระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติที่ใช้รหัส MetalDs และอัปเดต

รหัสทุกครั้งที่ใช้งานตามโพรโทคอลที่นำเสนอมีค่าความน่าจะเป็นของความสำเร็จในการล้วงรหัสต่ำกว่าระบบดั้งเดิมที่ใช้อาร์เอฟไอดีที่โปรแกรมรหัสลงบนป้ายของผู้ใช้งานแบบตายตัวทั้ง 3 กรณี จากข้อมูลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะด้านการรักษาความลับหรือความปลอดภัยดีกว่าระบบดั้งเดิม รหัส MetalDs ที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถโปรแกรมลงในไมโครชิพของป้าย อาร์เอฟไอดีชนิดต้นทุนต่ำที่ใช้เป็นบัตรผ่านทางพิเศษได้

ผลสรุปการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศอาร์เอฟไอดีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากแผ่นกราฟีนที่นำเสนอมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสติกเกอร์อาร์เอฟไอดีในระบบขนส่งอัจฉริยะ เมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับโพรโทคอลรักษาความปลอดภัยในการยืนยันตัวตนของยานพาหนะ จะทำให้ระบบขนส่งอัจฉริยะมีประสิทธิภาพและปลอดภัยยิ่งขึ้น นำไปสู่การพัฒนาประเทศให้เป็น Smart City Smart Country ได้ในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาระบบขนส่งอัจฉริยะนั้นยังมีหลายส่วนที่ต้องดำเนินการไปพร้อมกัน ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาร์เอฟไอดีบนแผ่นกราฟีนสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นอาร์เอฟไอดีสติกเกอร์ของระบบขนส่งอัจฉริยะ รวมถึงการพัฒนาโพรโทคอลรักษาความปลอดภัยในการยืนยันตัวตนของยานพาหนะ สายอากาศกราฟีนที่ออกแบบและสร้างขึ้นเหมาะกับการนำไปติดตั้งบนกระจกยานพาหนะในระบบขนส่งอัจฉริยะ อย่างไรก็ตาม หากต้องการนำสายอากาศกราฟีนนี้ไปติดตั้งบนส่วนอื่น อย่างเช่น ฝากระโปรงยานพาหนะ จำเป็นต้องศึกษาวิจัยการนำแผ่น EBG มาใช้งานร่วมกันเพิ่มเติม อีกทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องอื่นๆ คือการพัฒนาไมโครชิพอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่จะนำมาประกอบเข้าด้วยกัน และยังมีส่วนของการพัฒนาระบบฐานข้อมูลของยานพาหนะที่ยังเป็นความท้าทายในการวิจัยต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] M.G. Richard, *25% of cars are causing 90% of the air pollution that we breathe, new study finds*, *Treehugger (online)*, 2015, Available: <https://www.treehugger.com/cars/25-cars-are-causing-90-air-pollution-we-breathe-new-study-finds.html> (14 February 2019).
- [2] H. Ritchie, and F. Roser, *CO2 and other Greenhouse Gas Emissions, Our World in Data (online)*, 2017, Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (14 February 2019).
- [3] H. Robertson, *Singapore flying taxi trial set begin in second haft of 2019 (online)*, 2018, Available: <https://www.abc.net.au/news/2018-10-22/singapore-flying-taxi-trial-annouced-second-half-2019/10403706> (14 February 2019).
- [4] M.N. Sadiku, M. Tembely, and S.M. Musa, "Internet of vehicles: an introduction," *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 8(1), pp. 11-13, 2018.
- [5] L.A. Maglaras, A.H. Al-Bayaati, Y. He, I. Wagner. and H. Janicke, "Social internet of vehicles for smart cities," *Journals of Sensor and Actuator Networks*, vol. 5(3), 2016.
- [6] J. Contreras-Castilo, S. Zeadally, and J. Guerrero-Ibanez, "Internet of vehicles: Achitecture, Protocols, and Security," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5(5), pp. 3701-3709, 2018.
- [7] W. Xu, H. Zhou, N. Cheng, F. Lyu, W. Shi, J. Chen, and X. Shen, "Internet of vehicles in big data era," *Journals of Automatica Sinica*, vol. 5(1), pp. 19-35, 2018.
- [8] สรวิต นฤปิติ, ความรู้เรื่องระบบขนส่งอัจฉริยะ, กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [9] Teledyneecroy, *Advanced Driver Assistance System: ADAS (online)*, 2019, Available: <https://teledyneecroy.com/automotive/adas> (14 September 2019).
- [10] QUALCOMM, *Making 5G NR a Commercial Reality (online)*, 2017, Available: <https://www.qualcomm.com> (14 September 2019).
- [11] ประสิทธิ์ ทิณฑุฒิ และไพโรจน์ ไววานิชกิจ, *เทคโนโลยี RFID*, กรุงเทพมหานคร : ดอกหญ้ากรุ๊ป, 2549.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] ปิยะ โควิินทร์ทวีวัฒน์, *RFID ระบบป้องกันด้วยคลื่นความถี่วิทยุ*, ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2552.
- [13] ประชาญ์ ดาบบัง, สมควร แหวดี และจักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร, *เอกสารสรุปผลวิจัยการพัฒนาโปรโตคอลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี* ทุนวิจัย: 217 ทุนงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ. 2553, กรุงเทพมหานคร : สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ, 2553.
- [14] ประชาญ์ อัครนรากุล และอำนาจ เรืองวารีย์, “การออกแบบและสร้างรหัสรักษาความปลอดภัยสำหรับกระบวนการตรวจสอบและยืนยันตัวตนของระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ,” *วารสารมทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 12 ฉบับที่ 3, นน.138-149, 2562.
- [15] C.A. Balanis, *Antenna Theory*, 2nd Edition, New York, John, Wiley & Son, Inc, 1982.
- [16] ขวัญฤทัย โพธิ์แจ้ง, “สายอากาศไดโพลลูปหรือดิกแบบแถวลำดับสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบอัลตราไวด์แบนด์,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2561.
- [17] นิพนธ์ ทางทอง, “สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบพื่อนำคลื่นระนาบร่วม,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2554.
- [18] จิรวัดน์ แก้วใส, และทศพล ทิพสูงเนิน, “สายอากาศผ้าสำหรับโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคลความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์,” *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2560.
- [19] Coplanar Waveguide (*online*), 2020, Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/CPW-Coplanar-Waveguide-basics.html> (1 March 2020).
- [20] สุภณ พลสิงห์, “สายอากาศแพทช์ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2554.
- [21] แกรฟีน วัสดุ 2 มิติเพื่ออนาคต [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/302\\_65](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/302_65) (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2563)
- [22] คุณสมบัติกราฟีน [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/site/cs5404061636216/khornng-ngan-wicay/> [สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2563]

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Graphite Sheet (*online*), 2020, Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/CPW-Coplanar-Waveguide-basics.html> (1 March 2020).
- [24] Z. Tang, "The design of ETC system based on RFID and image identification," in the International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering, Shenzhen, China, pp. 236-240, 2016.
- [25] A. Bhavke and S. Pai, "Smart weight based toll collection & vehicle detection during collision using RFID," in 2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems, Vellore, India, pp. 1-6, 2017.
- [26] L. Cheng, L. Shenwen, L. Yingbo, L. Na and W.Xuren, "A secure and lightweight authentication protocol for RFID," in 2015 IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing, China, pp. 317-320, 2015.
- [27] P. Peng and Y. Zhao, "Anti-cloning and secure RFID mutual authentication protocols," in the 4th IEEE Conference on Broadband Network and Multimedia Technology, Shenzhen, China, pp. 379-384, 2011.
- [28] A. Ruengwaree, W. Naktong and A. Namsang, "A TE-shaped monopole antenna with semicircle etching technique on ground plane for UWB applications," in *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, Nanjing, China, pp. 95-98, 2013.
- [29] W. Naktong, S. Kronsing and A. Ruengwaree, "The bandwidth enhancement of rectangular slot antenna with H and T-shaped slot tuning for ultrawideband applications," in *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp. 1-4, 2014.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] A. Ruengwaree, A. Innok, W. Naktong and P. Boonmaitree, "The bandwidth enhancement of rectangular slot antenna with L-shaped and double I-shaped stub tuning for WLAN/WiMAX applications," in *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Hua Hin, Thailand, pp. 1-4, 2015.
- [31] W. Naktong, A. Ruengwaree and T. Pumpoung, "A study of tuning the CPW fed basic geometric monopole antenna for UWB applications," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 15(1), pp. 17-32, 2020.
- [32] W. Naktong, A. Ruengwaree and T. Pumpoung "A study of tuning the CPW fed basic geometric monopole antenna for UWB applications" *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 15(1), pp.17-32, 2020.
- [33] W. Naktong and A. Ruengwaree, "Four-port rectangular monopole antenna for UWB-MIMO applications," *Progress in electromagnetics research B*, vol. 87, pp.19-38, 2020.
- [34] W. Naktong et al, "Resonator rectenna design based on metamaterials for low-RF energy harvesting," *Computer, Materials & Continua*, vol. 68(2), pp.1732-1750, 2021.
- [35] W. Naktong, and N. Wattikornsirikul, Dipole Antenna with Horn Waveguide for Energy Harvesting in DTV Systems. *Progress In Electromagnetics Research M*, 111, 145-157, 2022.
- [36] W. Naktong, and N. Wattikornsirikul, Dipole Antenna with 18x 5 Square Electromagnetic Band Gap for Applications Used in Monitoring Children Trapped in Cars. *Progress In Electromagnetics Research M*, 112, 163-176, 2022.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] T. Leng, X. Huang, K. H. Chang, J. C. Chen, M. A. Abdalla *et al.*, “Graphene nanoflakes printed flexible meandered-line dipole antenna on paper substrate for low-cost RFID and sensing applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1565-1568, 2016.
- [38] P. Kopyt, B. Salski, M. Olszewska-Placha, D. Janczak, M. Sloma *et al.*, “Graphene-based dipole antenna for a UHF RFID tag,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp. 2862-2868, 2016.
- [39] N. Curreli, L. Schirru, L. Gagliani, E. Maniero, G. Montisci *et al.*, “Graphene-based ultra-wideband printed bow-tie antenna for remote tracking,” in *13th European Conference on Antennas and Propagation*, Krakow, Poland, pp. 1-4, 2019.
- [40] K. Jaakkola, H. Sandberg, M. Lahti and V. Ermolov, “Near-field UHF RFID transponder with a screen-printed graphene antenna,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 616-623, 2019
- [41] P. Asavanarakul, A. Ruengwaree and S. Skulchart, “Graphene-based RFID Tag Antenna for Vehicular Smart Border Passes,” *Computer, Materials & Continua*, vol. 71(3), pp.4737-4748, 2022.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปราชัญ อิศวนรากุล
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2516
ที่อยู่	130/378 สัมมากรคลอง7 ซอย 1/21 ต.ลำผักกูด อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
การศึกษา	ปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ประสบการณ์	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	0991162444
อีเมล	prach.d@en.rmutt.ac.th

