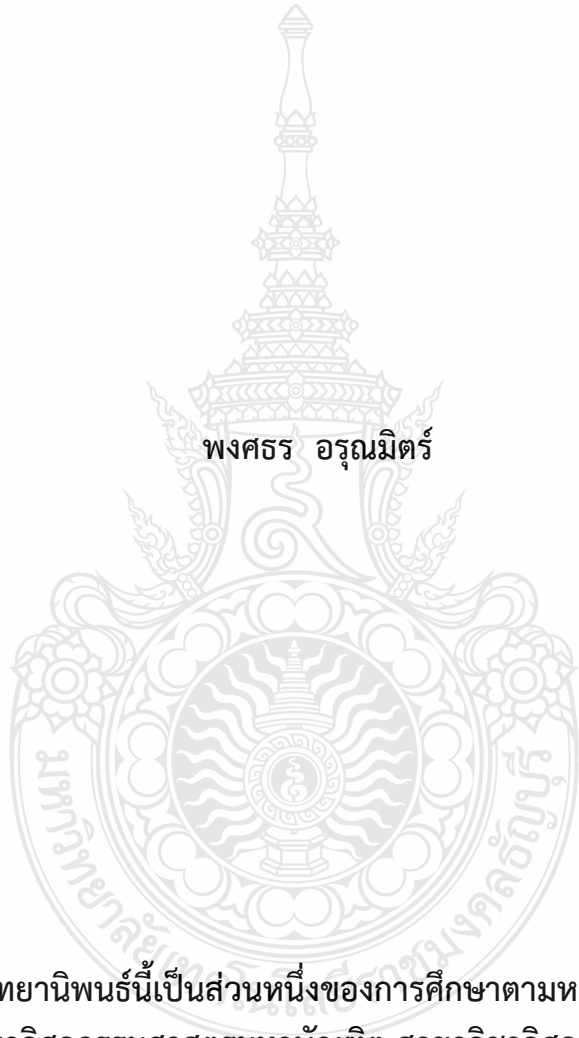


สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย

THIN-FILM ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATIONS



พงศธร อรุณมิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย

พงศธร อรุณมิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

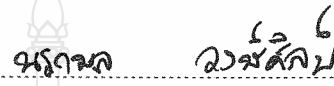
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

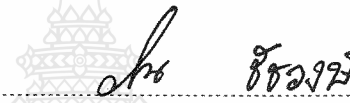
ปีการศึกษา 2565

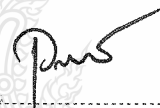
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย
Thin-Film Antenna for Wireless Communications
ชื่อ - นามสกุล นายพงศธร อรุณมิตร
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรกมล วงษ์ศิลป์, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา ชัชวงษ์, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์ ทางทอง, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 24 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2566

| | |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย |
| ชื่อ-นามสกุล | นายพงศธร อรุณมิตร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด. |
| ปีการศึกษา | 2565 |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยวัสดุฐานรองนั้นเป็นฟิล์มกรองแสงติตรถยนต์คาร์บอนสีดำ มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.016 และความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.056 มม. สายอากาศถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST Microwave Studio) เพื่อให้ได้คุณลักษณะต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกล และค่าประวิงกลุ่ม

สายอากาศ 2 พอร์ตได้ถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองที่เป็นฟิล์มบาง โดยทำการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมทั้ง 2 พอร์ต โดยมีรูปร่างสายอากาศเป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม ที่มีขนาดเท่ากับ 64×27 มม.² และในงานวิจัยได้พัฒนาสายอากาศเป็นแบบ 3 พอร์ต โดยเพิ่มสายอากาศแพทช์วงกลม ที่ใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเช่นกัน มีขนาดเท่ากับ 64×70 มม.²

ผลการการวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบางแบบ 2 พอร์ต มีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB S_{11} กับ S_{22} อยู่ในช่วง 3 – 12 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 1.5 ns. อัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย 4 dBi สำหรับสายอากาศแบบฟิล์มบางแบบ 3 พอร์ต พบว่ามีค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} อยู่ในช่วง 1.77 – 17.39 GHz และ S_{22} กับ S_{33} อยู่ในช่วง 1.63 – 17.22 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดช่วงการใช้งาน ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 1.5 ns. มีอัตราการขยายสูงสุดอยู่ที่ 5 dBi โดยสายอากาศทั้ง 2 แบบ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าต่ำกว่า -15 dB และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลแบบรอบทิศทาง จากผลการทดสอบสายอากาศสามารถไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารไร้สายในระบบต่าง ๆ เช่น WLAN WPAN WBAN UWB และ WiMAX

คำสำคัญ : สายอากาศแพทช์ วัสดุฟิล์มบาง การสื่อสารไร้สาย สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

| | |
|----------------|---|
| Thesis Title | Thin-Film Antenna for Wireless Communications |
| Name - Surname | Mr. Pongsathorn Aroonmitr |
| Program | Electrical Engineering |
| Thesis Advisor | Assistant Professor Paitoon Rakluea, D.Eng. |
| Academic Year | 2022 |

ABSTRACT

This thesis presented the thin-film antenna for wireless communications. The substrate is a black carbon-car film. The dielectric constant (ϵ_r) was 3.2, the loss tangent ($\tan \delta$) was 0.016, and the thickness of the substrate was 0.056 mm. The antenna was designed by Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST Microwave Studio) program to make the various characteristics that were analyzed, including return loss, correlation coefficient, antenna gain, far-field radiation pattern, and group delay.

The 2 ports antenna was designed on the thin film substrate. The design and analysis were performed by using the coplanar waveguide for both ports, with the rectangular-shaped patch antenna. The dimensions were 64 x 27 mm². The 3 ports antenna was developed by adding a circular patch antenna that used a coplanar waveguide. The dimensions were equal to 64 x 70 mm².

According to the results of the 2 ports thin film antenna, a return loss was lower than -10 dB. S_{11} and S_{22} were in the range of 3 – 12 GHz, correlation coefficient was less than 0.5, and a group delay of less than 1.5 ns. The average antenna gain was 4 dBi. For the 3 ports thin film antenna, it was found that a return loss of S_{11} was in the range of 1.77 – 17.39 GHz and S_{22} and S_{33} were in the range of 1.63 – 17.22 GHz, a correlation coefficient was less than 0.5, and a group delay was less than 1.5 ns with a maximum gain of 5 dBi. Both antennas had a transmission coefficient of less than -15 dB. It had a far-field radiation pattern, an omni-directional, and bi-directional. From the test results, these antennas can be applied to wireless communications in various systems such as WLAN, WPAN, WBAN, UWB, and WiMAX.

Keywords: patch antenna, thin-film, wireless communications, coplanar waveguide

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจาก ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.นรภมล วงษ์ศิลป์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้าและได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำงาน ทั้งนี้ยังรวมถึงคณาจารย์ประจำห้องวิจัย “กลุ่มวิจัยสื่อสารไร้สาย” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้ความรู้และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและสถานที่ทำงาน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณแก่พระคุณของ บิดา มารดา และครอบครัว รวมไปถึงญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ามอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

พงศธร อรุณมิตร



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (8) |
| สารบัญรูป | (9) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | (18) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 19 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 19 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 19 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 20 |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัย..... | 20 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 20 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง | 21 |
| 2.1 นิยามของสายอากาศ..... | 21 |
| 2.2 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล | 21 |
| 2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในงานวิจัย..... | 22 |
| 2.4 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม | 27 |
| 2.5 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ | 30 |
| 2.6 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย..... | 36 |
| 2.7 เทคโนโลยีโมโม..... | 38 |
| 2.8 ทบทวนวรรณกรรม | 39 |
| บทที่ 3 การออกแบบสายอากาศ..... | 49 |
| 3.1 บทนำ | 49 |
| 3.2 การออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 49 |
| 3.3 การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ของสายอากาศ แบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 52 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.4 ผลการจำลองสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 55 |
| 3.5 การออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 69 |
| 3.6 การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ของสายอากาศ แบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 72 |
| 3.7 ผลการจำลองสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 76 |
| 3.8 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย | 97 |
| บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดลอง | 98 |
| 4.1 บทนำ | 98 |
| 4.2 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 99 |
| 4.3 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 109 |
| 4.4 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศขณะประยุกต์ใช้งาน | 121 |
| บทที่ 5 บทสรุป | 122 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 122 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา | 123 |
| บรรณานุกรม | 124 |
| ภาคผนวก | 129 |
| ภาคผนวก ก คุณสมบัติของสายอากาศภาคส่ง | 130 |
| ภาคผนวก ข คุณสมบัติของหัว SMA Connector | 137 |
| ภาคผนวก ค คุณสมบัติของฟิล์มกรองแสงติตรอยนต์คาร์บอนสีดำ | 139 |
| ภาคผนวก ง ผลงานที่ได้ตีพิมพ์ | 141 |
| ประวัติผู้เขียน | 157 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่าง ๆ | 23 |
| ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่าง ๆ | 33 |
| ตารางที่ 2.3 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ FCC | 34 |
| ตารางที่ 2.4 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ ITU | 34 |
| ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่าง ๆ | 38 |
| ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ตที่นำเสนอ..... | 54 |
| ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ตที่นำเสนอ..... | 75 |



สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพล | 22 |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างตามทฤษฎีของสายอากาศโมโนโพล | 22 |
| รูปที่ 2.3 การเกิดการย้อนกลับของสัญญาณของสายอากาศ..... | 22 |
| รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์เพื่อดูแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ | 23 |
| รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ | 24 |
| รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาไรซ์..... | 26 |
| รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม..... | 28 |
| รูปที่ 2.8 ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม .. | 28 |
| รูปที่ 2.9 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง | 29 |
| รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น | 31 |
| รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบความเร็วการรับส่งข้อมูลของระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น... | 32 |
| รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร..... | 35 |
| รูปที่ 2.13 การรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยี 5G | 39 |
| รูปที่ 3.1 การวัดเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรอง..... | 50 |
| รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม 2 พอร์ต..... | 50 |
| รูปที่ 3.3 ผลการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_c | 52 |
| รูปที่ 3.4 ผลการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ S | 53 |
| รูปที่ 3.5 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{12}) ของสายอากาศ ฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 56 |
| รูปที่ 3.6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ของสายอากาศ แบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 56 |
| รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 57 |
| รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศ แบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 57 |
| รูปที่ 3.9 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1..... | 58 |
| รูปที่ 3.10 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1..... | 59 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.11 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 59 |
| รูปที่ 3.12 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 60 |
| รูปที่ 3.13 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 60 |
| รูปที่ 3.14 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 61 |
| รูปที่ 3.15 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 61 |
| รูปที่ 3.16 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 62 |
| รูปที่ 3.17 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 62 |
| รูปที่ 3.18 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 63 |
| รูปที่ 3.19 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 63 |
| รูปที่ 3.20 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 64 |
| รูปที่ 3.21 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 65 |
| รูปที่ 3.22 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 65 |
| รูปที่ 3.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 66 |
| รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 66 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.25 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 67 |
| รูปที่ 3.26 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 67 |
| รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 68 |
| รูปที่ 3.28 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 68 |
| รูปที่ 3.29 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 69 |
| รูปที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 70 |
| รูปที่ 3.31 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ R..... | 72 |
| รูปที่ 3.32 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ R..... | 73 |
| รูปที่ 3.33 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ W_p | 74 |
| รูปที่ 3.34 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ W_p | 74 |
| รูปที่ 3.35 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต..... | 77 |
| รูปที่ 3.36 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต..... | 78 |
| รูปที่ 3.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต..... | 78 |
| รูปที่ 3.38 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศ แบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 79 |
| รูปที่ 3.39 ผลการจำลองความหนาแน่นกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 80 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.69 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 96 |
| รูปที่ 3.70 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 96 |
| รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B..... | 98 |
| รูปที่ 4.2 การวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 98 |
| รูปที่ 4.3 การวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต..... | 99 |
| รูปที่ 4.4 สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 99 |
| รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}) ที่ได้จากการจำลองผล กับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 100 |
| รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองผล กับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 101 |
| รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ... | 102 |
| รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผล ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต..... | 102 |
| รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของ กับการวัดชิ้นงานจริงสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 103 |
| รูปที่ 4.10 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต | 104 |
| รูปที่ 4.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 104 |
| รูปที่ 4.12 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 105 |
| รูปที่ 4.13 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 105 |
| รูปที่ 4.14 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 106 |
| รูปที่ 4.15 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 106 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.16 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 107 |
| รูปที่ 4.17 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 107 |
| รูปที่ 4.18 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 108 |
| รูปที่ 4.19 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 108 |
| รูปที่ 4.20 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 109 |
| รูปที่ 4.21 สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 109 |
| รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต.. | 110 |
| รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ที่ได้จาก การจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 111 |
| รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต.. | 111 |
| รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จาก การจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 112 |
| รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จาก การจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 113 |
| รูปที่ 4.27 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต | 113 |
| รูปที่ 4.28 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 114 |
| รูปที่ 4.29 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 114 |
| รูปที่ 4.30 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 115 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.31 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 115 |
| รูปที่ 4.32 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 115 |
| รูปที่ 4.33 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 | 116 |
| รูปที่ 4.34 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 116 |
| รูปที่ 4.35 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 117 |
| รูปที่ 4.36 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 117 |
| รูปที่ 4.37 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 118 |
| รูปที่ 4.38 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 | 118 |
| รูปที่ 4.39 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 119 |
| รูปที่ 4.40 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 119 |
| รูปที่ 4.41 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 119 |
| รูปที่ 4.42 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 120 |
| รูปที่ 4.43 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 | 120 |
| รูปที่ 4.44 การติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ | 121 |
| รูปที่ 4.45 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ | 122 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.46 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ | 122 |



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|-----------|------------------------------|
| c | Wave velocity |
| D | Directivity |
| dB | Decibel |
| dBi | Decibel Isotropic |
| dBm | Decibel milli watt |
| e_t | Total efficiency |
| e_r | Reflection efficiency |
| e_c | Conduction efficiency |
| e_d | Antenna radiation efficiency |
| f | Frequency |
| f_c | Center frequency |
| f_H | High frequency |
| f_n | Notched frequency |
| f_L | Low frequency |
| f_r | Resonance frequency |
| G | Gain |
| G_o | Maximum gain |
| GHz | Giga Hertz |
| h | Thickness of substrate |
| m | Metter |
| Mbps | Mega Bit Per Second |
| MHz | Mega Hertz |
| mm | Millimeter |
| mW | Milli watt |
| P_i | Input Power |
| P_r | Reflection Power |
| P_o | Output Power |
| P_{rad} | Power density |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|--------------------------------|---|
| Q | Quality Factor |
| Rx | Receiver |
| R_r | Radiation resistance of the antenna |
| R_L | Loss resistance of the antenna |
| S_{11} , S_{22} , S_{33} | Return Loss |
| S_{21} , S_{31} , S_{32} | Transmission Coefficient |
| t | Thickness of dipole |
| Tx | Transceiver |
| W | Wide |
| U | Radiation intensity |
| U_i | Radiation intensity of isotropic source |
| U_{\max} | Maximum radiation intensity |
| V_p | Phase velocity |
| Z_o | Characteristic impedance |
| Z_L | Load impedance |
| Z_{in} | Input impedance |
| ϵ | Absolute permittivity |
| ϵ_r | Relative dielectric constant |
| ϵ_{eff} | Effective dielectric constant |
| λ | Wavelength of free space |
| λ_g | Wavelength of material |
| σ | Electric conductivity |
| ω | Angular frequency |
| Γ | Reflection coefficient |
| BW | Bandwidth |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CST | Computer Simulation Technology |
| DCS | Digital Cellular System |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|---------|---|
| DSS | Direct-sequence Spread Spectrum |
| EDGE | Enhanced Data rates for Global Evolution |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| FCC | Federal Communication Commission |
| GPS | Global Positioning System |
| GSM | Global System for Mobile |
| HSPDA | High Speed Downlink Packet Access |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IMT2000 | International Mobile Telecommunications for the year 2000 |
| ISM | Industrial Scientific and Medical |
| ITU | International Telecommunication Union |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| TEM | Transverse Electric-Magnetic |
| TM | Transverse Mode |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| UWB | Ultra-Wideband |
| VSWR | Voltage Standing Wave Ratio |
| WiFi | Wireless Fidelity |
| WiMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์จะแสดงในบทถัดไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันที่เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้รับการพัฒนาจนมาถึงในยุคที่ทุกสรรพสิ่งมีความสามารถในการสื่อสารและทำงานร่วมกันได้ผ่านการเชื่อมต่อในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเชื่อมต่อในรูปแบบ Wireless Local Area Network (WLAN) ที่เป็นการเชื่อมต่อภายในพื้นที่ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณ การเชื่อมต่อในรูปแบบ Wireless Personal Area Network (WPAN) ที่เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รอบพื้นที่ของแต่ละบุคคล การเชื่อมต่อในรูปแบบ Wireless Body Area Network (WBAN) ที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์โครงข่ายบนร่างกายมนุษย์ไปยังเครื่องมือวัด โดยมีการนำเทคโนโลยี Ultra-wideband (UWB) ที่มีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และเทคโนโลยี Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) ที่มีการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพร้อมสำหรับการรองรับการใช้งานที่หลากหลายทั้งด้านการแพทย์ทางไกลหรือรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีความต้องการความเร็วในการรับและส่งข้อมูลในปริมาณมาก ซึ่งมีผู้กำลังศึกษาและให้ความสนใจประเด็นด้านนี้เป็นจำนวนมาก ส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์นั้น คือ สายอากาศ

ในการออกแบบและสร้างสายอากาศได้มีการจำลองการสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio เพื่อศึกษาผลตอบสนองของค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระยะไกล ค่าประวิงกลุ่ม และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม จากนั้นจึงสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมาแล้วทำการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศด้วยเครื่องวัด Agilent PNA Network Analyzer รุ่น E8363B

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยใช้แผ่นฟิล์มกรองแสงติตรอนด์คาร์บอนสีดำที่มีความหนาเพียง 0.056 มม. เป็นวัสดุฐานรอง ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงและมีน้ำหนักเบา รูปร่างสายอากาศเป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยมและแพทช์วงกลม ประกอบกับการใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม ซึ่งสายอากาศนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายแบบไร้สายได้อย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย

1.2.2 จำลองสร้างสายอากาศเพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

1.2.3 วิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับสำหรับการสื่อสารไร้สาย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สายอากาศถูกสร้างขึ้นจากฟิล์มบางโดยใช้วัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 ความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.056 มม.

1.3.2 สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สายเป็น MIMO

1.3.3 สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย มีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 3.1 – 10.6 GHz ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.4.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อทำการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

1.4.3 ออกแบบและวิเคราะห์ผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio

1.4.4 สร้างชิ้นงานสายอากาศจริงลงบนวัสดุฐานรองแบบฟิล์มบาง และทำการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

1.4.5 จัดทำบทความสำหรับนำเสนอตีพิมพ์

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความเข้าใจในทฤษฎีของการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพล

1.5.2 มีความสามารถในการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio สำหรับการออกแบบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศได้อย่างชำนาญ

1.5.3 มีความสามารถในการใช้เครื่องมือวัดค่าสายอากาศได้เป็นอย่างดี

1.5.4 มีความสามารถในการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลให้ครอบคลุมสำหรับการสื่อสารไร้สายได้

1.5.5 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาสายอากาศรูปแบบอื่น ๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสร้างสายอากาศ โดยมีรายละเอียดแสดงถึงวิธีการคำนวณโครงสร้างพื้นฐาน วิธีการป้อนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศ และการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา

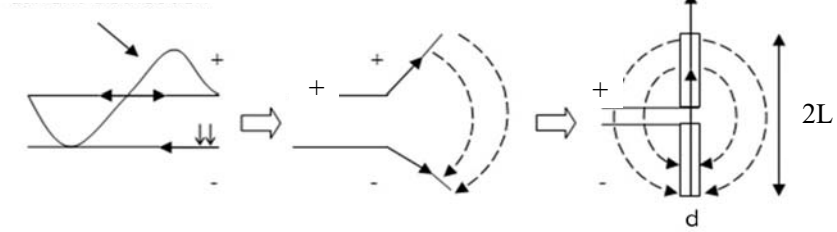
2.1 นิยามของสายอากาศ

สายอากาศ คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ในทางตรงกันข้ามก็เปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน โดยจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ โดยการส่งนี้จะส่งผ่านอากาศ ดังนั้น ในการเชื่อมต่อที่ไร้สายทุกอย่างจำเป็นต้องมีสายอากาศ

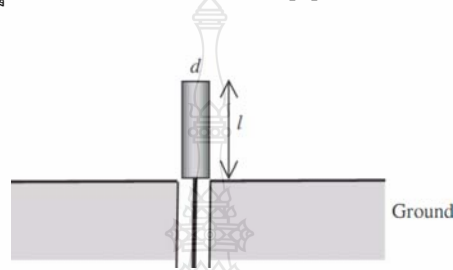
2.2 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพล เป็นสายอากาศที่ได้รับการปรับปรุงรูปแบบการทำงานจากสายอากาศไดโพล (แบบสองขั้ว) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ที่จะแสดงการทำงานของสายอากาศไดโพล จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจะเป็นเพียงเส้นลวดสองตัวนำปลายเปิดสองเส้น ซึ่ง $\lambda/4$ เท่ากับจุดที่เกิดจากความยาวเริ่มต้นจากส่วนปลาย เมื่อโค้งหรือหักงอให้ปลายเส้นลวดมีลักษณะแผ่ออกหรือกลับอีกด้านหนึ่ง จะทำให้สายตัวนำเกิดการแผ่กระจายคลื่นออกไป ซึ่งเรียกว่าสายอากาศไดโพล โดยทั่วไปแล้วความยาวทั้งหมดของสายอากาศไดโพลเท่ากับ $\lambda/2$ ของความถี่ที่ใช้งาน ในส่วนของความยาวสายอากาศโมโนโพลนั้นจะใช้ตัวนำด้านบนเพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นมีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ในขณะที่สายอากาศไดโพลจะเป็นเท่ากับ $\lambda/4$ ทั้งสองข้าง กล่าวโดยสรุปคือสายอากาศโมโนโพลจะใช้แนวคิดของทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ในขณะที่อีกครึ่งหนึ่งมีการเพิ่มระนาบพื้นเข้ามาทดแทนเพื่อให้กระบวนการทำงานของสายอากาศนี้สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศโมโนโพลจะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียวและจะใช้ระนาบพื้นแทนขั้วที่เหลือ สายอากาศโมโนโพลและสายอากาศแบบไดโพลจะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศคล้ายกัน ระนาบพื้นสายอากาศโมโนโพลในทางปฏิบัติจะเล็กกว่าทางทฤษฎีมาก เนื่องจากไม่สามารถออกแบบระนาบพื้นได้ตามอุดมคติที่ระนาบพื้นของสายอากาศโมโนโพลจะเป็นระนาบพื้นสมบูรณ์แบบและเป็นอนันต์ ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเกิดการเปลี่ยนทิศทางออกไปทางด้านหลังของระนาบพื้นด้วย หากเราออกแบบให้สายอากาศโมโนโพล ที่มีระนาบพื้นขนาดจิวมาก จะเห็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมีรูปทรงเหมือนสายอากาศไดโพลเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางระนาบเดียว (Omnidirectional)

Current distribution



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานพื้นฐานของสายอากาศไดโพล [6]

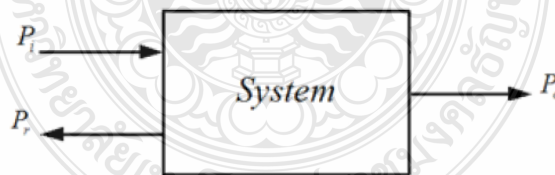


รูปที่ 2.2 โครงสร้างตามทฤษฎีของสายอากาศโมโนโพล [4]

2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในงานวิจัย

2.3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศคือค่าที่แสดงถึงการสูญเสียที่ตัวต้านทาน เมื่อเกิดการไม่แมตซ์ซึ่งกันของระบบสายส่งและสายอากาศ การแสดงการแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับสายอากาศสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.1) โดยค่าพารามิเตอร์การสูญเสียย้อนกลับหรือ S_{11} มักบอกเป็นหน่วย dB ในการศึกษาวิจัยนั้น ค่าที่ยอมรับได้ในการออกแบบสายอากาศ ค่าที่ดีคือจะต้องมีค่า S_{11} น้อยกว่า -10 dB



รูปที่ 2.3 การเกิดการย้อนกลับของสัญญาณของสายอากาศ [4]

$$S_{11} \text{ (dB)} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังของสัญญาณอินพุต
 P_r คือ กำลังของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

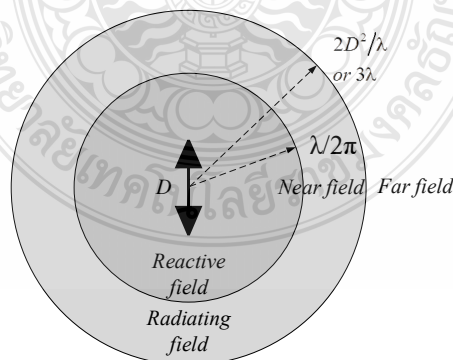
2.3.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Wave radiation pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่าสายอากาศนี้มีการแผ่กระจายคลื่นในรูปแบบใด ตามตำแหน่งต่าง ๆ (Space coordination) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นโดยทั่วไปแล้วที่นำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศมี 3 ระยะด้วยกัน คือ ที่ระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field) สนามการแผ่กระจายคลื่นระยะใกล้ (Radiating near field) และบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล (Far field) ในงานวิจัยนี้ จะแสดงการวัดบริเวณการแผ่กระจายคลื่นสนามระยะไกล โดยพิจารณาจากรายที่ 2.1 ซึ่งจะแสดงการพิจารณาแต่ละบริเวณจากระยะห่างจากสายอากาศออกไปรอบ ๆ ว่าเป็นรัศมีเท่าใด

ตารางที่ 2.1 การแผ่กระจายคลื่นในระยะต่าง ๆ [6]

| Antenna dimensions (D) | $D \ll \lambda$ | $D \approx \lambda$ | $D \gg \lambda$ |
|-------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| Reactive near field | $r < \lambda/2\pi$ | $r < \lambda/2\pi$ | $r < \lambda/2\pi$ |
| Radiating near field | $\lambda/2\pi < r < 3\lambda$ | $\lambda/2\pi < r < 3\lambda$ and $2D^2/\lambda$ | $\lambda/2\pi < r < 2D^2/\lambda$ |
| Far field | $r > 3\lambda$ | $r > 3\lambda$ and $2D^2/\lambda$ | $r > 2D^2/\lambda$ |

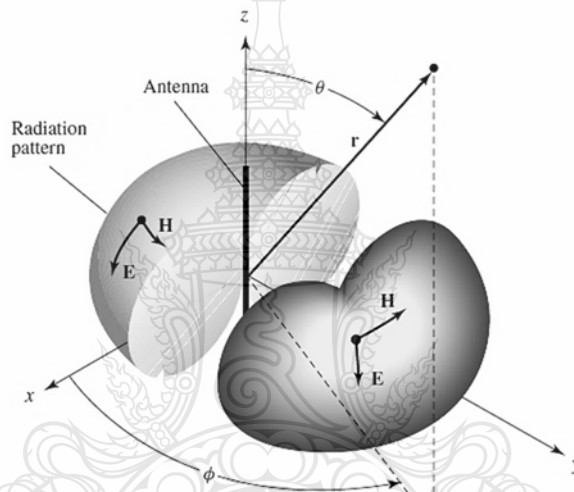
ในตารางนี้กำหนดให้ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ λ เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และ r เป็น รัศมีหรือระยะห่างจากสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงแบบรูปการแผ่พลังงานแต่ละบริเวณจึงแสดงในรูปของการแผ่กระจายคลื่นในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติในแต่ละระนาบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์เพื่อดูแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [1]

ดังนั้น เส้นการกวาดของการแผ่กระจายคลื่นที่ตำแหน่งรัศมีคงที่ และรอบสายอากาศ เรียกว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ในการแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของงานวิจัยนี้จะแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทั้งสองมิติ (ในการวัดชิ้นงานจริง) และสามมิติ (ในการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ออกไปรอบทิศทางที่เท่ากันหมด เป็นแบบรูปในอุดมคติที่มีการพิจารณาจากสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก เรียกว่า การแผ่กระจายกระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ส่วนแบบรูปที่ได้จากสายอากาศไดโพลในอุดมคตินั้น จะเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional antenna) ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ หากแบบรูปมีการเปลี่ยนหรือเบนไปก็อาจจะพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบมีทิศทาง (Direction)



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ [1]

2.3.3 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นการบอกความสามารถเชิงทิศทางของสายอากาศ (เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแพร่พลังงานในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแพร่พลังงานโดยเฉลี่ย) รวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามามีด้วย ซึ่งจะแตกต่างจากสภาพเจาะจงทิศทางโดยสิ้นเชิง ที่จะแสดงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเพียงอย่างเดียว อัตราขยายของสายอากาศนั้นจะเป็นการวัดเทียบเทียบกับสายอากาศอ้างอิง ที่ส่วนใหญ่มักเป็นสายอากาศแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือสายอากาศแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ที่กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณที่เท่ากัน โดยอัตราขยายของสายอากาศส่ง คือกำลังสองอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิงดังกล่าว หรือแสดงในรูปของอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการส่งของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกัน ในทิศทางที่มีการแผ่กระจาย

คลื่นที่มากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการแผ่พลังงานของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

ในการหาอัตราขยายของสายอากาศในงานวิจัยนี้ นั้น จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) หรือ (2.3) ดังนี้

$$P_r = P_t + L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (2.2)$$

$$G_r = P_r - P_t - L_f + L_{line} - G_t \quad (2.3)$$

| | | |
|-------|------------|--|
| เมื่อ | P_t | คือ กำลังงานทางด้านส่ง (dBm) |
| | P_r | คือ กำลังงานทางภาครับ |
| | L_{line} | คือ กำลังงานที่สูญเสียในสายส่งทั้งด้านส่งและภาครับ |
| | L_f | คือ กำลังงานที่สูญเสียในอากาศเท่ากับ $20 \log(4\pi d/\lambda)$ |
| | G_t | คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาคส่ง |
| | G_r | คือ อัตราขยายของสายอากาศทางภาครับ |

2.3.4 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นค่าที่สำคัญที่บอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้ดีที่สุดก็ว่าได้ เนื่องจากสายอากาศแต่ละประเภท แต่ละรูปแบบ ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงความถี่ ค่าแบนด์วิดท์นี้จะสามารถบ่งบอกถึงช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดีที่สุดในแต่ละการประยุกต์ใช้งานที่มีความหลากหลาย โดยพิจารณาจากการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ระดับ -10 dB ตามสมการดังนี้

$$BW = f_H - f_L \quad (2.4)$$

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \quad (2.5)$$

$$BW(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \quad (2.6)$$

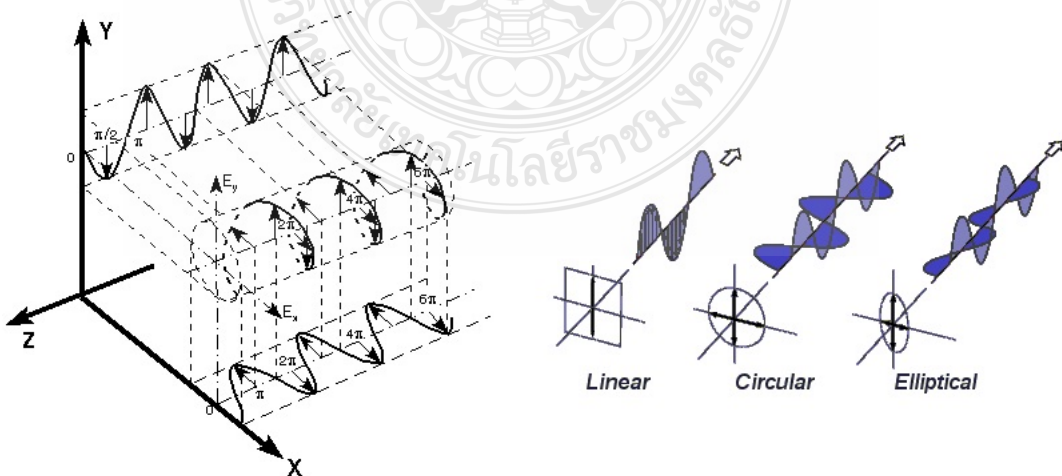
$$BW(\%) = \frac{BW}{f_c} \times 100 \quad (2.7)$$

$$BW = \frac{f_H}{f_L} : 1 \quad (2.8)$$

| | | |
|-------|-------|---------------------------------|
| เมื่อ | BW | คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ |
| | f_H | คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่ |
| | f_L | คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่ |
| | f_c | คือ ความถี่กลางของย่านความถี่ |

2.3.5 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันเป็นการบอกคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่จะอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป และโพลาริเซชันรูปแบบต่าง ๆ บปรากฏดังรูปที่ 2.6 โดยรูปแบบโพลาริเซชันนั้นมีอยู่ 3 แบบ คือโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical polarization) โดยทิศทางหมุนของคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงกลมหรือวงรีนั้นอาจเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) หรือแบบทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise: CCW) ก็ได้ ซึ่งโพลาริเซชันแต่ละรูปแบบมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่ไม่เหมือนกัน การวัดผลจึงต่างกันออกไป ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ ไม่มีโพลาริเซชันรูปแบบไหนที่ดีที่สุด แต่ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่เราต้องการใช้ ในเบื้องต้นนั้น สามารถพิจารณาว่าสายอากาศที่ออกแบบสร้างมีโพลาริเซชันรูปแบบใดได้จากแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ที่หากมีความต่างกันระหว่างค่า Co-polarized กับ ค่า Cross-polarized อยู่ที่ 0 – 3 dB คือ โพลาริเซชันแบบวงกลม หากมีความต่างกันระหว่างค่า Co-polarized กับ ค่า Cross-polarized อยู่ที่ 3 – 9 dB คือ โพลาริเซชันแบบวงรี และหากมีความต่างกันระหว่างค่า Co-polarized กับ ค่า Cross-polarized มากกว่า 9 dB ขึ้นไป คือ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและการโพลาริเซชัน [6]

2.3.6 ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling)

ปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) เกิดขึ้นจากการกระทำกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศที่อยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบสายอากาศไม่โม การลดค่าปรากฏการณ์เชื่อมต่อร่วมจึงมีความสำคัญมากกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน ที่มีความต้องการสายอากาศขนาดเล็ก โดยปกติทั่วไปที่เทคนิคที่นิยมใช้สามารถทำได้โดยการออกแบบระยะห่างระหว่างสายอากาศไม่โมแต่ละตัวให้มีระยะห่างออกจากกันในระยะที่เหมาะสม โดยสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ซึ่งจะต้องมีค่าการส่งผ่านที่น้อยกว่า -15 dB จึงจะเป็นค่าที่ยอมรับได้

2.3.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เป็นค่าที่มีความสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง กล่าวคือหากว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุกประการ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะต้องมีค่าเท่ากับ 0 ในปัจจุบันในการพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีหลายพอร์ต (MIMO) นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศจะมีค่าที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.5 ตามมาตรฐาน ซึ่งต้องนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคำนวณจากสมการที่ 2.9

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)]} \quad (2.9)$$

2.3.8 ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

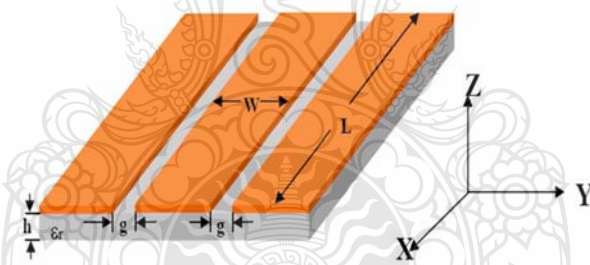
ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งในการพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศ เพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพลัสน้อยที่สุด ซึ่งมีค่ามาตรฐานที่กำหนดให้สายอากาศที่ใช้งานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ต้องมีค่าประวิงกลุ่มต่ำกว่า 2 ns จึงจะเป็นที่ยอมรับได้ว่าสายอากาศนี้สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

2.4 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

สายนำสัญญาณที่ใช้ในการออกแบบสร้างสายอากาศสำหรับการสื่อสารไร้สาย มีอยู่หลายชนิดตัวอย่าง เช่น สายนำสัญญาณโคแอกเซียลแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป เป็นต้น สายนำสัญญาณเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในงานวิจัยและการใช้งานจริง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการออกแบบสร้าง รวมทั้งยังสามารถพัฒนาไปเป็นวงจรรวมไมโครเวฟได้ ในส่วนของสายนำสัญญาณโคแอกเซียลแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วมอุปกรณ์ที่จำเป็นจะต้องมีคือช่องผ่าน (Via Hole) เพื่อเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับระนาบกราวด์ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณส่ง (High Dispersion) และการสูญเสียสัญญาณส่ง (High Insertion Loss) หรือในบางกรณีสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปก็อาจไม่ตอบโจทย์ อย่างเช่นในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ เนื่องจากผู้วิจัยไม่ต้องการให้มีกราวด์อยู่ด้านหลังของสายอากาศ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่

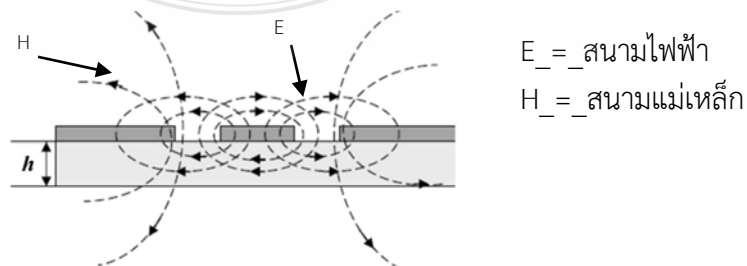
ไม่มีกรวดด้านล่างมีการบ่อนสัญญาณระหว่างช่องเปิดสองข้างอยู่ระนาบเดียวกันกับกรวด ทำให้มีข้อได้เปรียบคือเป็นสายอากาศที่ให้แถบความถี่กว้าง ออกแบบโดยใช้รูปแบบง่าย โดยใช้การปรับขนาดช่องเปิดทั้งสองข้าง และความยาวของสายบ่อนสัญญาณ ดังนั้น สายนำสัญญาณชนิดนี้จึงสามารถลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Low Dispersion) และการสูญเสีย (Low Insertion Loss) ที่สามารถลดช่องผ่านและเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบ และง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ โดยการแพร่กระจายคลื่นของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะเป็นแบบ Quasi-TEM

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จะมีรูปร่างเป็นแถบโลหะตัวนำวางอยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก ที่ถูกคั่นด้วยช่องเปิดสองช่อง คุณสมบัติหลักที่ใช้ในการพิจารณาสายนำสัญญาณ คือ คุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ และเพื่อให้ อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเข้าคู่กัน จะต้องพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ ได้แก่ ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) ความกว้างของแผ่นสตริป (W) ความกว้างของช่องเปิด (g) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ที่เป็นค่าแสดงคุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศ และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ต ที่เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสเสียดสีเพลซเมนต์ ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งต่ำยิ่งดี ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการเลือกวัสดุฐานรองจึงเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม [6]

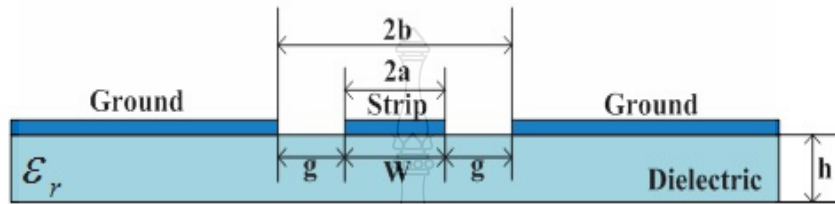
การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมนั้นจะมีลักษณะที่ต่างจากกัน โดยสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ระหว่างแถบโลหะที่ถูกคั่นด้วยช่องเปิด ส่วนสนามแม่เหล็กนั้นจะเคลื่อนที่ล้อมรอบแผ่นโลหะในทิศทางตามความหนาของวัสดุฐานรองแสดงดังรูปที่ 2.8



E = สนามไฟฟ้า
 H = สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.8 ลักษณะการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม [5]

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง โครงสร้างของสายนำสัญญาณนั้น จะประกอบไปด้วยสตริป (Strip) อยู่ตรงด้านบนของฐานรองไดอิเล็กตริก (Substrate) โดยมีความกว้างของสตริปคือ W ด้านข้างทั้งสองด้านของสตริปมีลักษณะเป็นร่อง (Slot) และระนาบกราวด์ตามลำดับ มีความกว้างระหว่างสตริปถึง ระนาบกราวด์คือ g และมีความหนาของฐานรองไดอิเล็กตริก คือ h ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง [5]

ในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบ Quasi Static ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของวิธีการส่งผ่าน (Conformal Mapping) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำ ที่กระจายอยู่บนสายนำสัญญาณการวิเคราะห์แบบนี้จะสามารถหาค่าคุณลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมได้ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าของครึ่งระนาบด้านบนซึ่งอยู่ในอากาศกับครึ่งระนาบด้านล่างซึ่งอยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric Layer) โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งผ่านเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) จะอยู่ในเทอมอัตราส่วนของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรก (Complete Elliptic Integral of First Kind) โดยกำหนดให้

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมต่อหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณ

C^a คือ ค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับ C แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมดด้วยอากาศ

โดยจะได้ว่า

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\frac{\epsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (2.10)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.11)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.12)$$

$$Z_0 = \frac{1}{CV_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{eff}}c^a} \quad (2.13)$$

โดยกำหนดให้

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง

V_p คือ ความเร็วเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

λ_g คือ ความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ

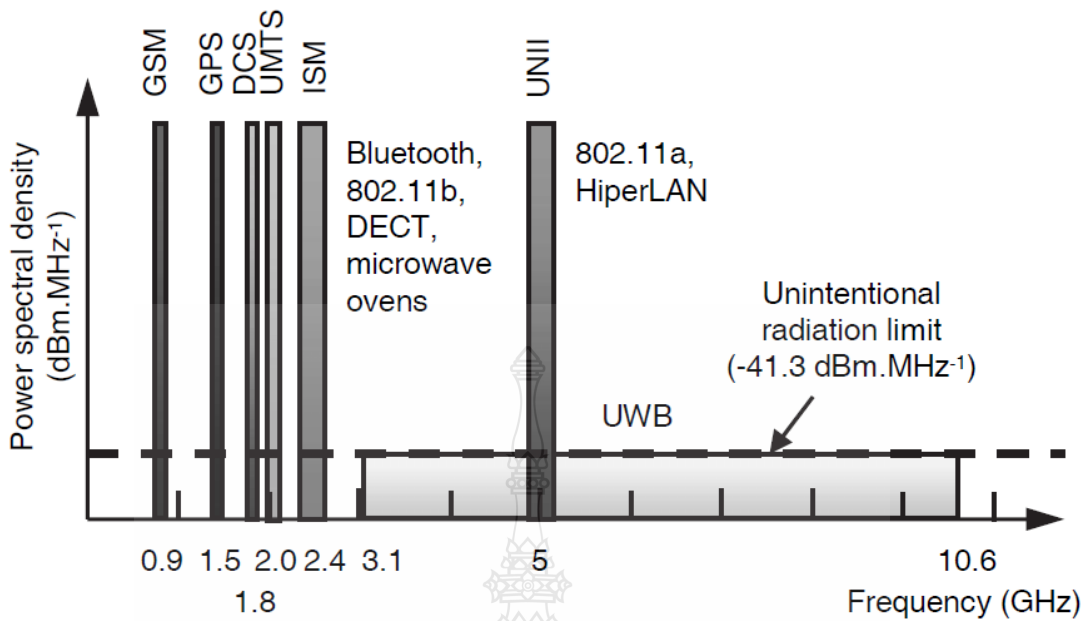
c คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

2.5 เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

ในช่วงตลอด 20 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีด้านการสื่อสารมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วอย่างก้าวกระโดดในหลาย ๆ ด้านอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ด้านธุรกิจอุตสาหกรรม ด้านนวัตกรรม รวมถึงด้านการศึกษา เป็นต้น อุปกรณ์สื่อสารหลาย ๆ อย่างยังคงพัฒนาจนถึงปัจจุบันเพื่อให้สอดคล้องและตอบโจทย์สำหรับผู้ใช้งานทั้งในด้านความเร็วการถ่ายโอนข้อมูลและจำนวนของข้อมูลที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะด้านการใช้งานให้สามารถใช้อัตราการโอนถ่ายข้อมูลที่รวดเร็วเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ซึ่งเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (UWB) เป็นเทคโนโลยีอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ช่วยให้การสื่อสารไร้สายสามารถก้าวข้ามขีดจำกัดของความถี่ได้เป็นอย่างดี เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จึงนิยมใช้งานกันอย่างมากในปัจจุบัน

ในอดีตเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้กำหนดมาตรฐานเชิงเทคนิคและข้อจำกัดสำหรับอุปกรณ์อัลตราไวด์แบนด์ โดยแบ่งตามผลกระทบที่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อกัน 3 ชนิดประกอบไปด้วย ระบบการแสดงผลเป็นรูปภาพ ระบบเซ็นเซอร์แจ้งเตือนการชนวัตถุหมุนอับสายตา และระบบการสื่อสารและการวัด โดยการพัฒนาให้สามารถใช้งานระบบการสร้างภาพอัลตราไวด์แบนด์ได้ รวมถึงระบบเรดาร์ทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) ระบบการสร้างภาพเสมือนภายใน ระบบแจ้งเตือนระวังภัย (สัญญาณกันขโมย) และระบบรังสีแพทย์ (เอกซเรย์) เนื่องจากระบบอัลตราไวด์แบนด์เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิธที่กว้างมากและมีสเปกตรัมเหมือนกับระบบที่ใช้กันอยู่ในตอนนี้ เช่น ระบบเครือข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ดังนั้น FCC จึงได้กำหนดให้ใช้ความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมมีระดับที่ต่ำกว่า -41.3 dBm/MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และได้กำหนดแบนด์วิธที่ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น [6]

2.5.1 คำจำกัดความของระบบอัลตราไวด์แบนด์

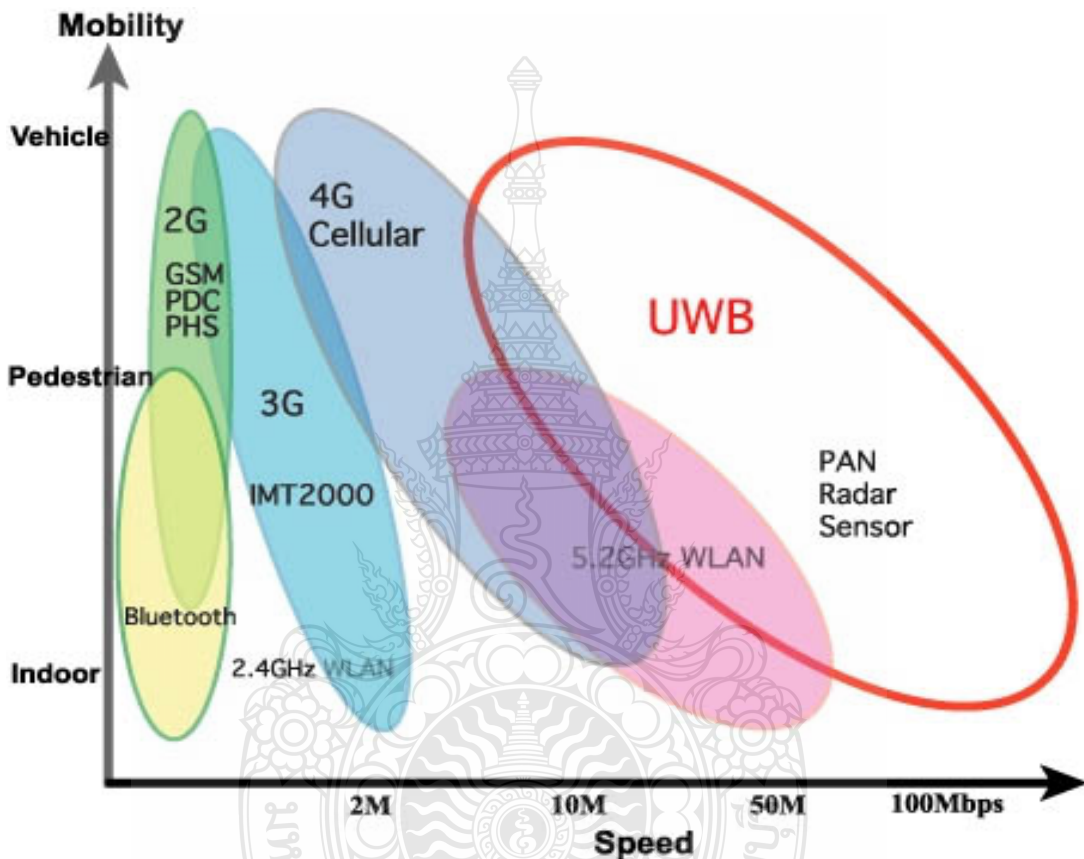
คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาได้ให้คำจำกัดความของระบบอัลตราไวด์แบนด์ เป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน ≥ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์ ≥ 500 MHz ทั้งนี้ถ้าเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีแถบแคบแล้วจะพบว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีแถบแคบทั้งด้านความเร็วในการโอนถ่ายข้อมูล การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงประสิทธิภาพในการโอนถ่ายได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ ระบบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เทคนิคการส่งต่อสัญญาณวิทยุในการติดต่อสื่อสาร โดยมีชื่อเรียกที่แตกต่างออกไปเช่น คลื่นวิทยุแบบอิมพัลส์ (Impulse radio) คลื่นพาห้แบบเสรี (Carrier-free radio) คลื่นวิทยุสัญญาณแถบความถี่ฐาน (Baseband radio) คลื่นวิทยุแบบโดเมนเวลา (Time domain radio) คลื่นวิทยุแบบไม่เป็นคลื่นไซน์ (Non-sinusoid radio) ฟังก์ชันวิทยุมุมฉาก (Orthogonal function radio) และคลื่นวิทยุที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (Large relative bandwidth radio) ซึ่งความสัมพันธ์ของแบนด์วิดท์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$B_{f,3dB} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.14)$$

2.5.2 คุณสมบัติของระบบอัลตราไวด์แบนด์

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จากข้อความข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องเมื่อนำมาพัฒนาการใช้งานในลักษณะของโครงข่ายแบบไร้สาย (WPAN) ในพื้นที่ส่วนบุคคล การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลชนิดมัลติมีเดียที่มีขนาดใหญ่

ที่ต้องการความเร็วเช่น การสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ กล้องวิดีโอ กล้องถ่ายรูป เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการที่กล่าวมาข้างต้นได้ เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่มาถึง 480 Mb/s ในระยะทาง 2 เมตร และ 110 Mb/s ในระยะทาง 10 เมตร ซึ่งการเปรียบเทียบความจุของช่องสัญญาณในระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่นดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบความเร็วการรับส่งข้อมูลของระบบอัลตราไวด์แบนด์กับระบบอื่น [6]

ขนาดความจุของเทคโนโลยีแบบอัลตราไวด์แบนด์สามารถพิจารณาได้จากทฤษฎีของ Hartley-Shannon ดังสมการที่ (2.15)

$$C_c = BW \log_2 (1 + SNR) \quad (2.15)$$

- เมื่อ
- BW คือ แบนด์วิธของช่องสัญญาณ (Hz)
 - C_c คือ ความจุของช่องสัญญาณสูงสุด (bit/s)
 - SNR คือ อัตราส่วนสัญญาณกำลังงานต่อสัญญาณรบกวน

ความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแถบแคบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลัก ๆ คือ

1) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ใช้การส่งพัลส์ที่มีความกว้างแคบมาก โดยที่ไม่มีการมอดูเลตทางความถี่ของข้อมูลร่วมกับคลื่นพาห์ ดังนั้นเครื่องรับและเครื่องส่งในระบบเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ จึงไม่มีภาคของการมอดูเลตข้อมูลเหมือนกับเทคโนโลยีแถบแคบส่งผลให้เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเทคโนโลยีแถบแคบมาก

2) เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ได้ถูกกำหนดให้มีแบนด์วิดท์ (BW) ≥ 500 MHz โดยแทนค่าได้จากสมการที่ (2.16)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีแบบต่าง ๆ [6]

| เทคโนโลยี | ความเร็วของข้อมูล | ช่วงความถี่ | กำลังงาน (EIRP) | การมอดูเลต | มาตรฐาน |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------|
| อัลตราไวด์แบนด์ | > หรือ = 100 Mb/s | 3.1 – 10.6 GHz | -43.3 dBm/MHz | PPM, OFDM, CDMA... | IEEE 802.15.3a |
| | > หรือ = 500 kb/s | 3.1 – 10.6 GHz | -43.3 dBm/MHz | PPM, OFDM, CDMA... | IEEE 802.15.3a |
| บลูทูท | < หรือ = 700 kb/s | ISM 2.4 GHz | type1: 20 dBm type2: 0 dBm | GMSK | IEEE 802.15.1 |
| Wi-Fi | < 54 Mb/s | 5 GHz | 0.2 – 1 วัตต์ | BPSK,16-QAM, QPSK,64-QAM | Wi-Fi 2 |
| | < หรือ = 11 Mb/s | ISM 2.4 GHz | 0.1 – 2 วัตต์ | CCK, BPSQ, QPSK, DSS | Wi-Fi 1 |
| | < หรือ = 54 Mb/s | ISM 2.4G Hz | 0.1 – 1 วัตต์ | BPSK,16-QAM, QPSK, OFDM, 64-QAM, | Wi-Fi 3 |

2.5.3 ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์

ในปีค.ศ. 1998 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (FCC) ได้ตั้งประกาศการตรวจสอบ (Notice of Inquiry: NOI) โดยเมื่อคำนึงถึงข้อดีเรื่องกำลังงานที่ใช้ระดับต่ำมาก ๆ ในการส่งสัญญาณ ยังมีบุคคลที่ไม่ต้อนรับการใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์และให้การสนับสนุนในระบบเดิมที่ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายของบุคคลทั่วไป ซึ่งข้อเรียกร้องจำนวนมากหลัก ๆ นั้น จะเกี่ยวข้องกับการคาดเดาถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดในช่วงความถี่ที่ใช้งานอยู่ปัจจุบันที่มีอย่างจำกัด เช่น ช่วงความถี่ที่ใช้ในกิจการโทรศัพท์ ช่วงความถี่ที่สำรองไว้ใช้สำหรับกิจการดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติรวมถึงดาวเทียมระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) โดยองค์การบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration: FAA) ได้แสดงความกังวลต่อการรบกวนของสัญญาณต่อระบบความปลอดภัยในธุรกิจเกี่ยวกับการบินและแนวโน้มในการ

ค้นคว้าเรื่องเครื่องส่งในระบบอัลตราไวด์แบนด์ด้วย เพื่อยุติปัญหาดังกล่าว ในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2002 ทาง FCC จึงได้กำหนดกฎที่ใช้สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งได้ระบุขอบเขตของการแพร่กระจายกำลังงานฉบับที่หนึ่งสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ อีกทั้งยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในด้านทางการค้าได้อีกด้วย โดยรายงานล่าสุดของข้อประกาศและระเบียบฉบับที่หนึ่งได้แพร่หลายต่อสาธารณชนเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งในเอกสารกล่าวถึงข้อกำหนดในการใช้งานระบบอัลตราไวด์แบนด์และการกำหนดขอบเขตการแพร่กระจายพลังงานเพื่อใช้ในประเภทต่าง ๆ โดยข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานของ FCC ได้แสดงดังในตารางที่ 2.3 สำหรับการใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั้งภายในและภายนอกอาคาร

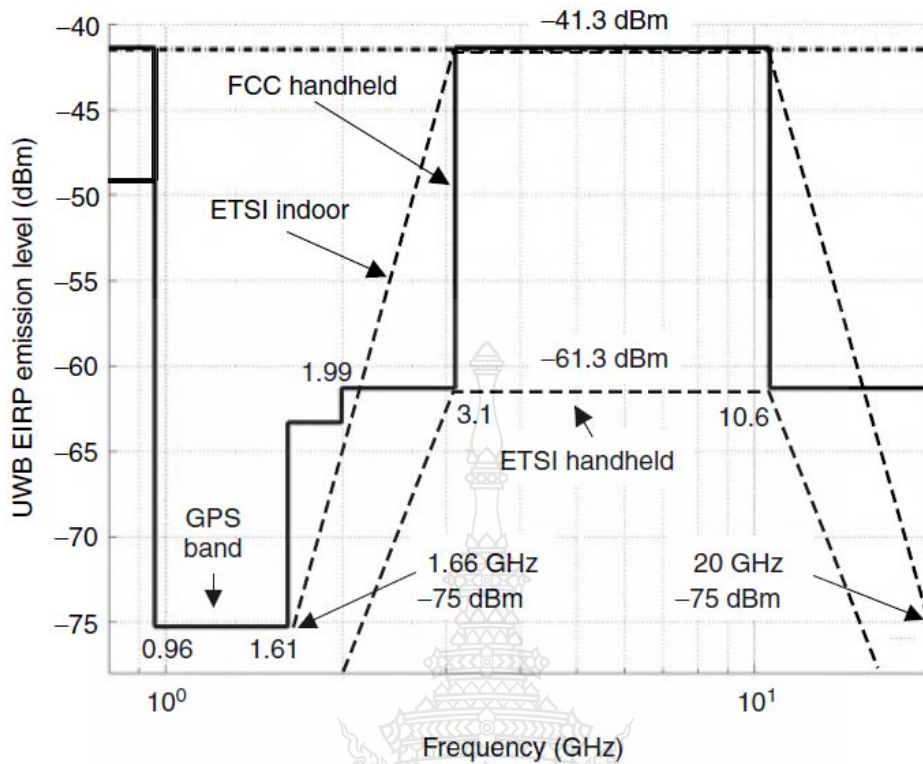
ตารางที่ 2.3 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ FCC [6]

| ความถี่ (MHz) | ภายในอาคาร (dBm) | ภายนอกอาคาร (dBm) |
|---------------|------------------|-------------------|
| 960 – 1610 | -75.3 | -75.3 |
| 1610 – 1990 | -53.3 | -63.3 |
| 1990 – 3100 | -51.3 | -61.3 |
| 3100 – 10600 | -41.3 | -41.3 |
| > 10600 | -51.3 | 61.3 |

ข้อกำหนดของระบบอัลตราไวด์แบนด์ในยุโรปนั้นปัจจุบันโครงร่างของข้อกำหนดระบบอัลตราไวด์แบนด์อยู่ในช่วงที่กำลังศึกษาและรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคที่ส่งผลกระทบต่อระบบเดิมที่มีความกังวลอยู่นั้น จากคำบอกเล่าของนักวิจัยบางส่วนเชื่อว่าข้อกำหนดนี้จะเข้มงวดกว่าข้อกำหนดของทางสหรัฐอเมริกา เพราะทางด้านยุโรปต้องการข้อมูลที่ชัดเจนในส่วนและเทคโนโลยีใหม่เพื่อเปรียบเทียบว่ามีผลกระทบต่อระบบเดิมอย่างไร โดย International Telecommunication Union (ITU) กำหนดข้อจำกัดการแพร่กระจายกำลังงานที่ใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และในรูปที่ 2.12 ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ใช้งานของระบบอัลตราไวด์แบนด์ระหว่าง FCC และ European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 การแพร่กระจายกำลังงานในระบบอัลตราไวด์แบนด์ของ ITU [6]

| ความถี่ (GHz) | ภายในอาคาร (dBm) | ภายนอกอาคาร (dBm) |
|------------------|---------------------------|---------------------------|
| $f < 3.1$ | $-51.3 + 87 \log(f/3.1)$ | $-61.3 + 87 \log(f/3.1)$ |
| $3.1 < f < 10.6$ | -41.3 | -41.3 |
| $f > 10.6$ | $-51.3 + 87 \log(10.6/f)$ | $-61.3 + 87 \log(10.6/f)$ |



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบการกำหนดสเปกตรัมกับความถี่ในระบบอัลตราไวด์แบนด์ระหว่าง FCC และ ETSI ทั้งภายในและภายนอกอาคาร [6]

2.5.4 แอปพลิเคชันต่าง ๆ ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ [3]

1) โครงข่ายไร้สายความเร็วสูง (High Data Rate-Wireless Personal Area Network: HOR) คือโครงข่ายที่แสดงถึงจำนวนการจับกลุ่มของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายขนาดปานกลาง มีความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงถึง 100 – 150 Mb/s. ในระยะ 1 – 10 m.

2) การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Ethernet Interface Link: WEIL) สามารถทำได้ภายในระยะใกล้หรือภายในรัศมี 1 – 2 m.

3) โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ (Intelligent Wireless Area Network: IWAN) คือโครงข่ายที่แสดงถึงจำนวนการจับกลุ่มของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายขนาดสูง ที่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไปภายในระยะ 30 เมตร

4) โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ (Outdoor Peer to Peer Network: OPPN) เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก

5) โครงข่ายเซ็นเซอร์ การหาตำแหน่งและการพิสูจน์อุปกรณ์ (Sensor, Position and Identification Network: SPIN) เป็นโครงข่ายของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเช่น เซ็นเซอร์ที่มีการจับกลุ่มกันของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงเก็บสินค้า ที่ส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและสามารถส่งสัญญาณข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของอุปกรณ์เพื่อใช้หาตำแหน่งได้ด้วย โดยมีความแม่นยำในการบอกตำแหน่งภายในระยะ 1 m. ไม่ผิดเพี้ยนแต่อย่างใด

2.6 มาตรฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย

สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) เป็นสถาบันที่ได้กำหนดมาตรฐานการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่สำคัญ ๆ ดังนี้

2.6.1 มาตรฐาน Wi-Fi

1) Wi-Fi 1 เป็นมาตรฐานที่ใช้ทำการถ่ายโอนข้อมูลแบบไร้สายในรูปแบบคลื่นอินฟราเรดหรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 – 5 GHz

2) Wi-Fi 2 คือการถ่ายโอนข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ซึ่งทำให้ไปได้ไกลกว่า Wi-Fi 1 เนื่องจากอัตราการรับและถ่ายโอนข้อมูลอยู่ที่ระดับ 11 Mb/s. และใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า ทำให้ผู้คนใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นวงการอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ ฯลฯ

3) Wi-Fi 3 เป็นการถ่ายโอนข้อมูลสื่อสารในระบบไร้สายที่ความถี่ 2.4 GHz แต่อัตราการรับ-ส่งข้อมูลอยู่ที่ 54 Mb/s. ซึ่งสูงกว่า Wi-Fi 2 ด้วยเหตุนี้ในยุคสมัยดังกล่าวทำให้ Wi-Fi 3 ทำให้ผู้คนใช้กันอย่างแพร่หลายมาก ในช่วงเวลาถัดจากนั้นมีเทคโนโลยีที่เข้ามาพัฒนาคือ MIMO เพื่อเพิ่มระยะทางและเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลด้วยเทคนิคการเพิ่มสายอากาศ ในขณะที่ทำการส่งข้อมูลมักจะมีสัญญาณรบกวนสัญญาณสะท้อนซึ่ง MIMO นำประโยชน์ส่วนนี้มาใช้เพื่อช่วยเพิ่มการรับสัญญาณให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลได้ในอัตรา 108 – 240 Mb/s.

4) Wi-Fi 4 เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่เข้ามาแทนที่มาตรฐาน Wi-Fi 1, Wi-Fi 2 และ Wi-Fi 3 โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 100 Mb/s.

2.6.2 มาตรฐาน IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานที่ระยะทางในการเชื่อมโยงอยู่ในช่วงระยะสั้น ๆ แค่ 1.6 – 4.8 km. เท่านั้นเป็นมาตรฐานเพียงหนึ่งเดียวที่ส่งเสริมการใช้งานในระดับสายตา หรือที่เรียกว่า Line of Sight (LoS) แต่ข้อจำกัดของมาตรฐานนี้คือเปิดใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10 – 66 GHz

1) มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16a เป็นมาตรฐานที่พัฒนาจาก IEEE 802.16 เดิมโดยมีการปรับระดับความถี่ในด้านการใช้งานให้ลดลงเพียง 2 – 11 GHz ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการปรับปรุงข้อเสียจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือเพิ่มคุณสมบัติการรองรับการทำงานที่อยู่นอกเหนือจากระดับสายตา Non Line of Sight (NLoS) และยังมีคุณสมบัติในการแจ้งเตือนสัญญาณ เมื่อมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้น ตามสภาพแวดล้อมที่มากัดกัน อาทิ ต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้ก็ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงให้มีพื้นที่มากกว่ามาตรฐานเดิม ด้วยรัศมีทำการที่ไกลเพิ่มขึ้นจากมาตรฐานแรกถึง 48 – 50 km. และมีอัตราความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลสูงถึง 75 Mb/s. ทำให้สามารถรองรับประสิทธิภาพที่เชื่อมต่อการใช้งานกับระบบเครือข่ายของบริษัทที่มีการใช้สายประเภทที่ 1 (T1-type) มากกว่า 60 ราย และการเชื่อมต่อแบบ Asynchronous Digital Subscriber Line (ADSL) โดยไม่ประสบปัญหาในการใช้งานเมื่อที่פקอาศัยของผู้คนจำนวนมากใช้งานในเวลาเดียวกัน

2) มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16e เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้ส่งเสริมการใช้งานระหว่างอุปกรณ์พกพาประเภทต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ PDA โน้ตบุ๊ก มือถือ เป็นต้น โดยให้รัศมีการทำงานอยู่ในระยะ 1.6 – 4.8 km. ได้มีระบบที่ทำให้ผู้ใช้งานยังคงสื่อสารได้อย่างมีคุณภาพและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้ผู้ใช้งานจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา

2.6.3 มาตรฐาน IEEE 802.15

มาตรฐาน IEEE 802.15.3a Ultra-Wideband (UWB) แบ่งออกเป็น 4 มาตรฐาน ได้แก่

1) IEEE 802.15.1 ศึกษาการร่างมาตรฐานชั้น Physical และ Data Link สำหรับการถ่ายโอนข้อมูลแบบ Bluetooth

2) IEEE 802.15.1 ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการใช้งานร่วมกันระหว่างโครงข่าย WPAN กับ WLAN และระบบสื่อสารไร้สายอื่น ๆ เช่น ระบบโทรศัพท์ GSM CDMA และ GPS เป็นต้น

3) IEEE 802.15.3 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้น Physical และ Data Link สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มีอัตราการโอนถ่ายข้อมูลสูงถึง 11 – 55 Mb/s. ในระยะการโอนถ่ายข้อมูลไม่เกิน 20 m. และมีการใช้พลังงานไม่เกิน 0.5 mW. โดยมีการจัดทำร่างมาตรฐานย่อยเรียกว่า IEEE 802.15.3a สำหรับการโอนถ่ายข้อมูลที่มีอัตราสูงมากกว่า 100 Mb/s. สำหรับโครงข่าย WPAN ที่มีระยะใกล้ 10 m. ซึ่งร่างมาตรฐานของผู้เสนอหลายรายมีอัตราการโอนถ่ายข้อมูลที่สูงมากกว่า 1 Gbps. การปรับในด้านการใช้งานของโครงข่าย WPAN ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a นั้นคาดการณ์ว่าจะใช้กับโครงข่ายข้อมูลระยะใกล้ เช่น เป็นมาตรฐานของชั้นกายภาพและ Data Link ของ Wireless USB โครงข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายภายในบ้าน หรือสำนักงาน หรือกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการการโอนถ่ายข้อมูลในจำนวนที่สูงมาก เช่น เครื่องเล่น DVD โทรศัพท์ที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น

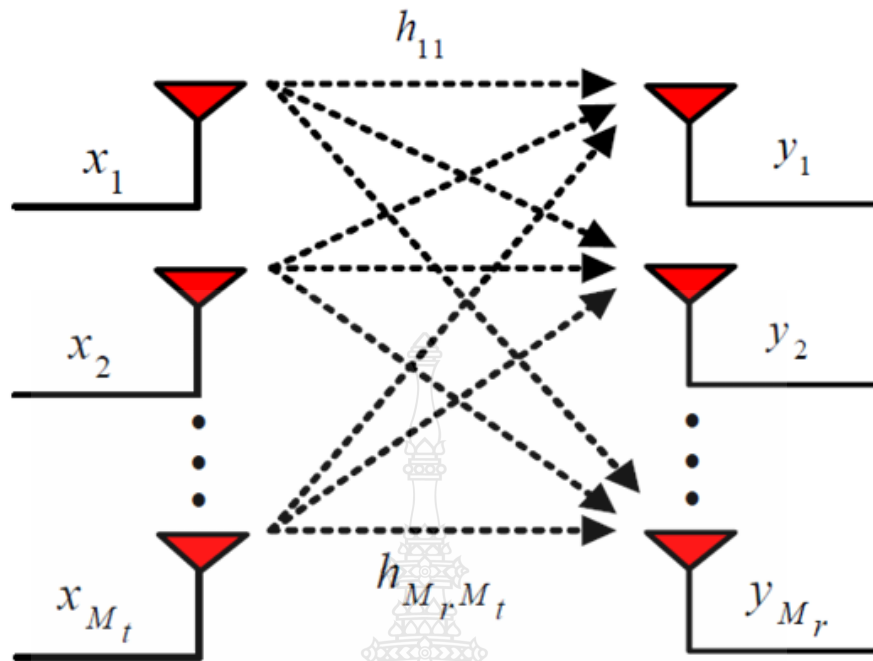
4) IEEE 802.15.4 ศึกษาการร่างมาตรฐานของชั้น Physical และ Data Link สำหรับโครงข่าย WPAN ที่ใช้พลังงานต่ำเพียง 100 uW. และมีอัตราการถ่ายโอนข้อมูลไม่สูงมากเพียงแค่ 1 – 5 Mb/s. ซึ่งจะเป็นมาตรฐานโดยทั่วไปของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา เช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป แล็บท็อป และอุปกรณ์เล่นเสียง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีร่างมาตรฐานย่อยซึ่งเรียกว่า IEEE 802.15.4a สำหรับอัตราการถ่ายโอนข้อมูลที่น้อยกว่า 1 Mb/s. โดยมีอัตราการใช้พลังงานต่ำ แต่มีระยะในการส่งไกลกว่า 75 m. ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับโครงข่าย Wireless sensor network และโครงข่ายไร้สายสำหรับอุปกรณ์สั่งการในโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่าง ๆ [6]

| เทคโนโลยี | มาตรฐาน | เครือข่าย | อัตราความเร็ว | ระยะทาง | ความถี่ |
|--------------------|---------------|----------------|-----------------------------|-------------------|---|
| Wi-Fi | Wi-Fi 1 | WLAN | Max 54 Mb/s. | 100 m. | 5.1 – 5.2 GHz |
| | Wi-Fi 2 | WLAN | Max 11 Mb/s. | 100 m. | 2.4 – 2.8 GHz |
| | Wi-Fi 3 | WLAN | Max 54 Mb/s. | 100 m. | 2.4 – 2.8 GHz |
| | Wi-Fi 4 | WLAN | 300 – 450 Mb/s. | 70 – 250 m. | 2.4 – 5 GHz |
| WiMAX | IEEE802.16d | WMAN | Max 75 Mb/s. (20 MHz BW) | ปกติ 6.4 – 10 km. | 11 GHz |
| | IEEE802.16e | Mobile WMAN | Max 30 Mb/s. (10 MHz BW) | ปกติ 1.6 – 5 km. | 2 – 6 GHz |
| WCDMA/UMTS | 3G | WWAN | Max 2 – 10 Mb/s. (HSDPA) | ปกติ 1.6 – 8 km. | 1800,1900 2100 MHz |
| CDMA2001x EV-DO | 3G | WWAN | Max 2.4 Mb/s. | ปกติ 1.6 – 8 km. | 400, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100 MHz |
| EDGE | 2.5G | WWAN | Max 348 kb/s. | ปกติ 1.6 – 8 km. | 2100 MHz |
| UWB | IEEE802.15.3a | WPAN | 110 – 480 Mb/s. | 10 m. | 7.5 GHz |

2.7 เทคโนโลยีไมโม

เทคโนโลยีไมโม (MIMO Technology) เป็นเทคโนโลยีที่ผู้คนใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในตอนนี้ เนื่องจากศักยภาพในการเพิ่มพอร์ทของช่องรับสัญญาณและเป็นที่ไว้วางใจในการสื่อสารไร้สายที่ไร้ซึ่งการใช้งานความถี่เพิ่มเติม โดยเทคโนโลยีไมโมเป็นระบบที่มีการใช้สายอากาศแบบหลากหลาย ส่วนประกอบในการรับ-ส่งสัญญาณ ในส่วนของภาคส่งและภาครับส่งทำให้เกิดความแตกต่างจากระบบสื่อสารไร้สายประเภทสายอากาศอัจฉริยะ (Smart antenna system) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดิม ที่ใช้สายอากาศจำนวนหลายองค์ประกอบเพียงฝั่งเดียวทั้งในภาคส่งหรือที่ภาครับ โดยที่เทคโนโลยีไมโมนี้ช่วยแก้ปัญหาคงที่การมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) หรือปรับปรุงคุณลักษณะให้ดีขึ้นด้วยไดเวอร์ซิตี (Diversity) ในเทคโนโลยีนี้สายอากาศจะช่วยในการรับและส่งข้อมูลเพื่อเพิ่มอัตราขยายไดเวอร์ซิตี การรวมสัญญาณจะช่วยเสริมอัตราขยายของช่องสัญญาณด้วยโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะไม่มีขอบเขตในแต่ละทิศทางของการส่งคลื่น โดยไมโมจะมีส่วนของอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการแยกสัญญาณข้อมูลออกเป็นหลายช่องสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลไปในระบบสายอากาศภาคส่งในเวลาเดียวกัน ในขณะที่สัญญาณที่ส่งในแต่ละสายอากาศจะส่งผ่านช่องการสื่อสารไร้สายไปที่ภาครับของสายอากาศ จากนั้นจึงผ่านการดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexing) เพื่อแยกสัญญาณข้อมูลแต่ละข้อมูลที่ได้รับจากสายอากาศภาครับแต่ละตัวแล้วทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้กลับออกมาก่อนจะส่งออกไป ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกับการแยกข้อมูลออกเป็นหลาย ๆ ส่วนแล้วส่งไปพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยีโมโม [6]

2.8 ทบทวนวรรณกรรม

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงในอดีต ผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการวินิจฉัยและการสร้างสายอากาศ บนวัสดุต่าง ๆ เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการรองรับการสื่อสารไร้สาย ซึ่งแต่เดิมมีผู้วิจัยมากมายนำเสนอการออกแบบโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันบนวัสดุฐาน เช่น แผ่น FR-4 หรือ แผ่น Roger RT/Rudoid 5880 หรือ แผ่น Rogers RO4003 เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมีความคงทนได้มากแต่ไม่ยืดหยุ่น จึงมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นกว่าเดิม โดยใช้ผ้าที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานในรูปแบบ WBAN ประเภทเครื่องสวมใส่หรือนุ่งห่ม ได้อย่างดีเป็นวัสดุฐาน ด้วยความเฉพาะทางที่ดีนี้อาจจะยังไม่ครอบคลุมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในที่กลางแจ้งเท่าที่ควร วัสดุฐานประเภทฟิล์มจึงถือเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ยืดหยุ่นและเหมาะสมกับที่กลางแจ้งได้ดีมากยิ่งขึ้น เพราะฟิล์มสามารถทนความร้อนและความชื้นได้ดี อีกทั้งมีความบาง ราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่าย ในปัจจุบันได้มีการวิจัย ปรับปรุง และคำนึงถึงสิ่งที่สำคัญกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับยานพาหนะ จึงเป็นที่มาของสายอากาศที่ทำการออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นฟิล์มกรองแสงติตรอยนต์ โดยผู้วิจัยได้ทบทวนหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยตามที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

B. Yang, Y. Xu, J. Tong, Y. Zhang, Y. Feng และ Y. Hu [8] ได้นำเสนอการสร้างสายอากาศ 3 พอร์ต ที่มี FR-4 เป็นวัสดุฐาน โดยการแยกคุณสมบัติตัวเองแบบใหม่พร้อมกันกับการทำให้เกิดการแผ่บนพื้นผิวภายในโทรศัพท์ โดยมีพื้นฐานตามวิธีการยกเลิโกโหมตและทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบกระตุ้น กลไกการแยกตัวเองของสายอากาศที่เสนอจะถูกวิเคราะห์ จากการทดลองพบว่าพอร์ตทั้งสามยังคงแยกกันได้ดีและไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างการแยกส่วน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการแยก

สายอากาศ 3 พอร์ตที่นำเสนอขึ้น สูงกว่า 11 dB ในแบนด์ LTE 42 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ECCs) น้อยกว่า 0.14 ระบบสายอากาศ MIMO 12×12 ที่ประกอบด้วยสายอากาศ 3 พอร์ต 4 ตัว ซึ่งได้รับการออกแบบ สร้าง และวัดผล พบว่าผลลัพธ์ที่วัดได้แสดงว่าการแยกระหว่าง 12 พอร์ตที่ดีกว่า 10 dB และ ECC น้อยกว่า 0.14 ประสิทธิภาพโดยรวมของพอร์ตทั้งหมดคือ 51% - 71% ความจุของช่องที่คำนวณได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 57.98 ถึง 59.87 bps/Hz เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) คือ 20 dB

N. Hussain และ N. Kim [9] ได้นำเสนอสายอากาศที่ใช้แผ่น Roger RT/Rudoid 5880 เป็นวัสดุฐาน มีความครอบคลุมแถบความถี่การใช้งานตั้งแต่แถบไมโครเวฟ (2.5, 3.5, 5.5 และ 7.5 GHz) ไปจนถึงแถบคลื่นมิลลิเมตร (23 - 31 GHz) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสร้างระบบ Internet of Thing (IoT) ของระบบ 5G สายอากาศนี้ยังมีประสิทธิภาพการแผ่รังสีมากกว่า 95% และอัตราขยายที่เสถียร (> 2.5 dBi ที่แถบคลื่นไมโครเวฟ และ 6.5 dBi ที่แถบคลื่นมิลลิเมตร) นอกจากนี้สายอากาศแบบขึ้นเดียวยังคงได้รับการแปลงเป็นการออกแบบสายอากาศ MIMO ขนาด 2×2 หน่วย ซึ่ง MIMO นี้ต่อมาได้พัฒนาเป็นรูปแบบ 2×4 และการกำหนดค่า MIMO 3×4 (12 พอร์ต) ที่ถูกนำเสนอเพื่อให้ได้ความหลากหลายของสเปกตรัมและรูปแบบ เมื่อพิจารณาถึงการจัดเรียงองค์ประกอบสายอากาศสามมิติที่เป็นเอกลักษณ์ ระบบ MIMO 12 พอร์ตเป็นระบบเดียวที่มีการออกแบบร่วมกันของสายอากาศไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตร จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งาน 5G IoT โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับบ้านอัจฉริยะ สำนักงาน และการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับทุกสิ่ง เป็นต้น

Y. Wang, B. Huang และ S. Yan [10] ในบทความนี้ได้นำเสนอโมดูลการทำงานของสายอากาศ MIMO 4 พอร์ตในการส่งกลองแบบแคปซูลที่ใช้แผ่น Rogers RO4003 เป็นวัสดุฐาน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการส่งภาพความละเอียดสูงตามเวลาจริงด้วยอัตราข้อมูลสูง การออกแบบที่นำเสนอใช้โครงสร้างที่สอดคล้องกันโดยใช้พื้นที่ผนังด้านในของตัวแคปซูลทำให้มีขนาดที่กะทัดรัด เป็นสายอากาศ 4 พอร์ตในพื้นที่จำกัดของกลองเอนโดสโคปแบบแคปซูล โดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน 3 วิธีในการแยกระหว่างองค์ประกอบสายอากาศที่อยู่ใกล้เคียงและระหว่างองค์ประกอบสายอากาศในแนวทแยง การพิจารณาระบบ (ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และสายอากาศในกลองเอนโดสโคป) และการประเมินอัตราส่วนการดูดซึมจำเพาะ (SAR) ดำเนินการเพื่อตรวจสอบความทนทานและความปลอดภัยสำหรับมนุษย์ของการออกแบบที่นำเสนอตามลำดับ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ลิคัมมาร์จิ้นและการศึกษาพารามิเตอร์ของ MIMO เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการรับและส่งข้อมูลทางไกลแบบไร้สาย และประสิทธิภาพการทำงานของ MIMO ตามลำดับ ต้นแบบของสายอากาศถูกประดิษฐ์ขึ้นและฝังในหมูสับสำหรับการวัดแบบ ex-vivo (พารามิเตอร์ S อัตราขยาย และรูปแบบรังสี) แบนด์วิธอิมพีแดนซ์ที่ทับซ้อนกันที่วัดได้ของสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ คือ 120 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมแบนด์วิดธ์ด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์อุตสาหกรรม (ISM) 915 MHz ได้อย่างสมบูรณ์ การแยกที่วัดได้ระหว่างองค์ประกอบสายอากาศที่อยู่คล้ายกันและองค์ประกอบสายอากาศในแนวทแยงนั้นดีกว่า 20 และ 10 dB ตามลำดับ ค่าอัตราขยายสูงสุดที่วัดได้คือ -18.1 dBi

B. Kumkhet, P. Rakluea, N. Wongsin, P. Sangmahamad, W. Thaiwirot, N. Chudpooti และ Ch. Mahatthanajatuphat [11] บทความนี้นำเสนอสายอากาศ MIMO แถบความถี่กว้างที่มีวัสดุฐานเป็นผ้าใยโพลีเอสเตอร์ การติดตั้งบนพื้นผิวโค้งหรือทรงทำได้อย่างดี เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการสวมใส่ได้ ขนาดโดยรวมของสายอากาศอยู่ที่ 115×70 ตร.มม. มีช่วงความถี่ใช้งานแรกเริ่มที่ 2 GHz – 30 GHz อัตราขยาย 3.75 dBi โดยเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 รองรับคลื่นความถี่ 5G (2.6 GHz และ 26 GHz) รวมถึงแอปพลิเคชัน WBAN (2.4 GHz, 5.2 GHz และ 3.1 GHz – 10.6 GHz) นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบ Electromagnetic Band Gap (EBG) และสร้างเพลทลูบสี่เหลี่ยมซึ่งมีคุณสมบัติสะท้อนที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยการวางยูนิตเซลล์ในเซลล์ 3×5 เพื่อลดอัตราการดูดกลืนแสงเฉพาะของสายอากาศ ซึ่งลดค่า SAR ให้เหลือ 0.088 วัตต์/กก. และ 0.070 วัตต์/กก. มีอัตราขยาย 6.59 dBi และ 11.6 dBi ที่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ ยิ่งกว่านั้น ผลลัพธ์ยังต่ำกว่าค่า SAR แบบเดิมที่ 2.0 วัตต์/กก. ที่ 10 กรัม

S. Hongdumnuen, W. Chanwattanapong และ B. Kumkhet [12] บทความนี้นำเสนอสายอากาศแบบหลายแบนด์สำหรับระบบ WLAN และ LTE MIMO โดยใช้วัสดุฐานแบบฟิล์มบาง ซึ่งมีค่า $\epsilon_r = 3.2$ และความหนา 0.3 มม. สายอากาศนี้ประกอบด้วยโมโนโพลแบบวงแหวนสองวงและแผ่นกราวด์ที่ด้านหลัง สร้างโดยใช้วัสดุนำไฟฟ้าคือทองแดงที่มีความหนา 0.1 มม. เมื่อรวมเข้ากับวัสดุพื้นผิวทำให้สายอากาศมีความหนา 0.5 มม. และมีขนาด 55.4 มม. \times 110.4 มม. (กว้าง \times ยาว) ผลการวัดสายอากาศแสดงช่วงการตอบสนองความถี่ระหว่าง 1 GHz - 3 GHz ซึ่งเป็นความถี่ในการทำงานของมัลติแบนด์ ซึ่งครอบคลุมแบนด์ WLAN (2.4 GHz), LTE 1800 MHz แบนด์ 3 (UL 1710 MHz - 1785 MHz, DL 1805 MHz - 1880 MHz), LTE 2100 MHz แบนด์ 1 (UL 1920 MHz - 1980 MHz, DL 2110 MHz - 2170 MHz) , และ LTE 2300 MHz แบนด์ 40 (2300 MHz - 2400 MHz) และ LTE 2600 MHz แบนด์ 38 (2570 MHz - 2620 MHz) ที่ S_{11} น้อยกว่า -6 dB นอกจากนี้ สายอากาศต้นแบบมีอัตราขยายเฉลี่ย 3.9 dBi และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยกว่า 0.5 ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ดังนั้น สายอากาศต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้กับเครือข่ายมือถือ LTE ได้

G. Sh. Lin, Ch. H. Sung, J. L. Chen, L. Sh. Chen และ M. Ph. Hounng [13] ได้นำฟิล์มคาร์บอนสีดำมาใช้เพื่อปรับปรุงการแยกระบบสายอากาศ MIMO สำหรับระบบ UWB ซึ่งสามารถดูดซับสัญญาณรบกวนระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ 2 พอร์ตหรือมากกว่า มีการตรวจสอบสัดส่วนของฟิล์มคาร์บอนสีดำ ตำแหน่ง และพื้นที่เคลือบ รวมถึงคุณสมบัติของระบบ MIMO พบว่ามีช่วงความถี่ใช้งานอยู่ที่ 2.5 GHz - 11 GHz ที่ $S_{11} < -10$ dB และ $S_{21} < -15$ dB ประสิทธิภาพเฉลี่ย 69.2 % อัตราขยาย > 2.11 dBi และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ < 0.02 ซึ่งผลลัพธ์บ่งชี้ว่าฟิล์มสามารถนำไปใช้กับระบบ MIMO ต่างๆ ได้

D. Sipal, M. P. Abegaonkar และ Sh. K. Koul [14] ได้นำเสนอการแบบสายอากาศอาร์เรย์สำหรับ UWB แบบระนาบขนาดกะทัดรัด 4 พอร์ต ที่มีการแยกตัวได้สูง ข้อดีหลักของการกำหนดค่าอาร์เรย์ที่เสนอคือไม่ต้องใช้วงจรแยก/แยกส่วน และการกำหนดค่าสามารถขยายเป็นอาร์เรย์ขนาดใหญ่ขึ้นได้อย่างง่ายดาย โดยแต่ละอาร์เรย์ประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพลวงแหวนรูปวงแหวนและมีช่องขนาดเล็ก แต่ละองค์ประกอบในอาร์เรย์นั้นวางตั้งฉากกับองค์ประกอบที่อยู่ติดกัน โครงสร้างที่ออกแบบ

ทำให้การจับคู่แบนด์วิธอิมพีแดนซ์ที่ดีและมีการแยกสูงระหว่างพอร์ตในช่วงความถี่เริ่มที่ 3 GHz ถึง 15 GHz การไม่มีวงจรแยกส่วนทำให้ขนาดโดยรวมของการออกแบบที่เสนอมีขนาดกะทัดรัด ผลการจำลองและผลการวัดชิ้นงานจริงบ่งชี้ว่าสายอากาศนี้มีประสิทธิภาพที่สุด นอกจากนี้ยังมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าที่สูญเสียความจุของช่องสัญญาณของอาร์เรย์ ซึ่งแสดงประสิทธิภาพ MIMO ได้เป็นอย่างดีเช่นกัน โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอรองรับการออกแบบอาร์เรย์สายอากาศ UWB MIMO แบบหลายพอร์ตพร้อมการเพิ่มจำนวนพอร์ตที่ง่ายตายและไม่ต้องมีวงจรแยกสัญญาณใด ๆ ทั้งนี้ ในบทความวิจัยนี้มีการตรวจสอบตัวอย่างของอาร์เรย์ 8 พอร์ตอีกด้วย

H. Sakli, C. Abdelhamid, C. Essid และ N. Sakli [15] บทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศ MIMO 2 พอร์ตแบบใหม่สำหรับ UWB พร้อมการศึกษาคุณสมบัติ มีการนำเสนอเทคนิคการแยกโดยใช้วัสดุพิเศษที่ออกแบบมาอย่างดีเพื่อให้บรรลุการย่อขนาดและประสิทธิภาพของสายอากาศทั้งสอง ทำงานได้อย่างดีสำหรับระบบ MIMO โดยมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบการแผ่รังสีน้อยกว่า $(\lambda/12)$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นในสุญญากาศของวัสดุพิเศษ ที่ใช้ลดการเชื่อมต่อของสายอากาศหลายตัว การประยุกต์ใช้วัสดุเหล่านี้ที่เรียกว่า Split - Ring Resonator (SRR) บนระนาบแพทช์ของสายอากาศนี้ มีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณภาพของสายอากาศที่ศึกษาในแง่ของพารามิเตอร์ S, อัตราขยาย และคุณสมบัติการแผ่รังสี รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สิ่งเหล่านี้จะช่วยเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล ระบบสายอากาศนี้มีข้อดีมากมาย เช่น การลดน้ำหนัก และปริมาณที่ลดลง ซึ่งช่วยให้การรวมเข้ากับเครื่องรับรองรับ 5G และอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อโดยเฉพาะ

J. Deng, S. Hou, L. Zhao และ L. Guo [16] บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพล 3 พอร์ตแบบทรงความถี่ที่กำหนดค่าใหม่ได้พร้อมสถานะสลับได้ 3 สถานะสำหรับแอปพลิเคชัน UWB และ WLAN (2.4 GHz และ 5.8 GHz) ที่ 2.4 GHz ผลิตโดยตัวกรองไมโครสตริปลำดับที่หนึ่งโดยใช้ตัวสะท้อนลูปเปิด และสถานะแถบแคบที่ประมาณ 5.8 GHz เกิดจากการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านลำดับที่สามในเส้นทาง RF การกำหนดค่าความถี่ใหม่ทำได้โดยการเลือกเส้นทาง RF โดยใช้ไดโอดที่ควบคุมด้วยไฟกระชาก เป็นผลทำให้สามารถบรรลุตอบสนองการกรองแถบความถี่แคบตามที่ต้องการ ต้นแบบสายอากาศถูกออกแบบ สร้าง และวัดผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่วัดได้ และรูปแบบการแผ่รังสีแสดงให้เห็นว่าสายอากาศทรงความถี่แบบกำหนดค่าใหม่ได้นั้น เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับระบบที่หลากหลายรวมทั้งระบบ UWB และ WLAN ในอนาคต

S. A และ S. Raman [17] บทความนี้ได้แนะนำสายอากาศ MIMO 3 พอร์ตสำหรับระบบ UWB ขนาดกะทัดรัดแบบใหม่ สายอากาศต้นแบบนี้ประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพลทรงกลมป้อนสายนำสัญญาณแบบ CPW ที่มีโครงสร้างระนาบพื้นเหมือนกัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศไมโครสตริป การรวมกันของสายอากาศสามชั้นสร้างแบนด์วิธอิมพีแดนซ์ 2:1 VSWR ในช่วงความถี่ UWB (3.1 GHz - 10.6 GHz) โดยไม่ต้องใช้องค์ประกอบแยกใดๆ ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของ MIMO สำหรับกรณีโพลาริเซชันที่แตกต่างกันจะได้รับการวิเคราะห์และนำเสนอในบทความนี้ด้วย ขนาดโดยรวมของสายอากาศคือ 60 มม. x 60 มม. x 1.6 มม. เมื่อออกแบบบนวัสดุฐาน FR4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 และค่าการสูญเสีย 0.02

P. Aroonmitr, Ch. Rakluea, W. Lawtammajak, P. Rakluea, M. Tangjitjetsada, Ch. Mahatthanajatuphat, P. Akkaraekthalin และ T. Thianthong [18] บทความนี้นำเสนอสายอากาศ MIMO ขนาดกะทัดรัดสำหรับแอปพลิเคชัน UWB สร้างโดยใช้ฟิล์มบางเป็นวัสดุฐาน เพื่อลดความหนาของสายอากาศ ทำให้ใช้งานได้ดีบนพื้นผิวโค้ง ความหนาของฟิล์มประมาณ 0.056 มม. ถูกนำมาใช้ในการออกแบบพร้อมกับสายอากาศช่องสี่เหลี่ยมและสล็อตสี่เหลี่ยม นอกจากนี้ช่วงความถี่ใช้งานของครอบคลุมตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz โดยที่ S_{11} และ S_{21} ต่ำกว่า -10 dB และ -15 dB ตามลำดับ ถูกป้อนโดยท่อนำคลื่นแบบ CPW อีกทั้ง ECC ยังน้อยกว่า 0.05 ตลอดช่วงความถี่ รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทาง มีอัตราขยายสูงสุดถึง 4.6 dBi สายอากาศที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้กับระบบสื่อสาร WBAN WPAN WLAN และ UWB ได้เช่นกัน

N. Manshouri, A. Yazgan, และ M. Maleki [19] ได้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลสำหรับใช้ในความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ใช้โปรแกรม HFSS และ CST Microwave Studio ในการออกแบบ โดยสายอากาศถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปวงกลม มีการใช้เทคนิคการสร้างรอยบากที่ระนาบพื้นเพื่อเพิ่มความกว้างของแบนด์วิดท์ของช่วงความถี่ใช้งาน ร่วมด้วยเทคนิคการเจาะร่องที่ตัวสายนำสัญญาณไมโครสตริปพร้อมกับการสร้างรอยบากที่ตัวสายอากาศเพื่อตัดช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานออกไปในช่วง 5.5 – 5.9 GHz และ 7.4 – 8.9 GHz สายอากาศมีขนาดเท่ากับ 20×26 มม² สามารถรองรับความถี่ในช่วง 3.1 – 11 GHz ได้

M. Akbari, N. Rojhani, M. Saberi, และ R. Movahedinia [20] ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปทรงแปดเหลี่ยมสำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศถูกออกแบบและจำลองจากโปรแกรม HSPICE ทำการสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเท่ากับ 4.4 ความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1 มม. สายอากาศที่ได้มีขนาด 25×18 มม² สามารถตอบสนองต่อความถี่ 2.55 – 21.65 GHz ที่ระนาบพื้นใช้เทคนิคการเจาะร่องคล้ายชั้นบันไดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในย่านความถี่สูง เทคนิคการเจาะร่องคล้ายตัว E ที่ระนาบแผ่นพลังงานนั้น ทำให้สายอากาศสามารถตัดความถี่ในย่าน 5.5 GHz และเทคนิคสุดท้ายคือทำการเพิ่ม สล็อตสี่เหลี่ยมที่รูปตัว E ที่ด้านบนของระนาบพื้นเพื่อตัดสัญญาณความถี่ย่าน 3.5 GHz

S. Tripathi, A. Mohan, และ S. Yadav [21] ได้นำเสนอสายอากาศขนาดกระทัดรัดรูปทรงเรขาคณิตสำหรับประยุกต์ใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ โดยออกแบบสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 4.4 มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ 50Ω วัสดุฐานรองหนาเท่ากับ 1.6 มม. สายอากาศมีขนาด 31×27 มม² ใช้เทคนิคการเจาะร่องคล้ายรูปตัว C ที่ระนาบแผ่นพลังงาน เพื่อตัดสัญญาณช่วงความถี่ 3.5 GHz ที่ใช้งานในระบบ WIMAX และ 5.5 GHz ที่ใช้งานกับระบบ WLAN

M. G. N. Alsath, และ M. Kanagasabai [22] ออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 สำหรับย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศที่ทำการออกแบบมีขนาด $24 \times 16 \times 0.8$ มม³ ใช้เทคนิคสร้างรอยบากที่ระนาบพื้นและเทคนิคการใช้สล็อตรูปตัวแอลที่ระนาบพื้นเพื่อเพิ่มความกว้างของแบนด์วิดท์ของช่วงความถี่ให้กับสายอากาศ ซึ่งสายอากาศสามารถรองรับช่วงความถี่

3.1 – 10.9 GHz และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางรอบตัว บรรลุวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้งานกับยานพาหนะ

M. Sharma, Y.K. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, และ S. Kumari [23] นำเสนอการออกแบบสายอากาศบนแผ่น Roger RT/Duroid สำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ได้ใช้รูปแบบเบื้องต้นในการออกแบบเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมร่วมกับเทคนิคการสร้างรอยบากบนสายอากาศสามรูปแบบ ซึ่งได้ค่าสูญเสียเป็นผลจากการการย้อนกลับที่ตอบรับช่วงความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ที่ความถี่ 2.49 – 19.41 GHz สายอากาศนี้เทียบความกว้างและความยาวได้ $20 \times 20 \times 0.787$ มม.³ เทคนิคการเจาะร่องทั้งสามรูปแบบนั้นทำให้ได้ช่วงความถี่แถบหยุดที่มีค่าสูงสุด 3 ช่วงที่ความถี่ได้แก่ 3.6 GHz, 5.64 GHz และ 7.64 GHz

M. Elhabchi, M. N. Srifi, และ R. Touahni [24] นำเสนอสายอากาศสำหรับย่านความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ ทำการออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio และ HFSS สายนำสัญญาณของสายอากาศเป็นแบบ Coplanar Waveguide (CPW) แผ่นแผ่พลังงานมีรูปแบบคล้ายหกเหลี่ยม ซึ่งได้ค่าสูญเสียเป็นผลจากการการย้อนกลับที่ตอบรับช่วงความถี่ของระบบอัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศนี้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 23×25 มม.² ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเท่ากับ 1.6 มม. มีการใช้เทคนิคการเจาะร่องคล้ายตัว Y เพื่อตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการในช่วง 5.72 – 5.825 GHz และทำการเพิ่มสัณฐานรูปทรงคล้ายตัว L เพื่อให้สายอากาศมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณในช่วงความถี่ 1.3 – 1.6 GHz ของระบบ GPS ได้

T. Ranadkaew, และ P. Rakluea [25] นำเสนอการออกแบบบนแผ่นฟิล์มบาง (Mylar Polyester Film) สำหรับย่านความถี่ของระบบซูเปอร์ไวด์แบนด์ ได้ใช้สายนำสัญญาณแบบ Co-Planar Waveguide (CPW) ร่วมกับแผ่นแผ่พลังงานลักษณะรูปพระจันทร์ครึ่งเสี้ยว ได้ค่าสูญเสียเป็นผลจากการการย้อนกลับที่ตอบรับช่วงความถี่ของระบบซูเปอร์ไวด์แบนด์ ที่ความถี่ 3 – 40 GHz สายอากาศนี้เทียบขนาดความกว้างและความยาวได้ 45×34 มม.² ข้อดีคือ สายอากาศนี้มีความยืดหยุ่นสามารถโค้งงอได้ เนื่องจากใช้วัสดุที่เป็นแผ่นฟิล์มบางและสายอากาศนี้มีแบนด์วิดท์กว้างมากสามารถรองรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายช่วงความถี่

N. Singh, A. K. Singh, และ V. K. Singh [26] ได้นำเสนอการออกแบบและประสิทธิภาพของสายแบบผ้าสำหรับใช้งานทางการแพทย์ สายอากาศนี้เทียบความกว้างและความยาวได้ 60×60 มม.² ใช้ผ้าใยสังเคราะห์เป็นวัสดุฐานรอง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.7 ความหนา 1 มม. ใช้แผ่นเทปทองแดงเป็นวัสดุตัวนำ สายอากาศนี้ประยุกต์ใช้ในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 13.08 GHz และนำเสนอการประยุกต์ใช้งานช่วงความถี่ 9.7 GHz ในทางการแพทย์

S. Yan, L. A. Y. Poffelie, P. J. Soh, X. Zheng, และ G. A. E. Vandenbosch [27] ได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศโมโนโพลสำหรับใช้ในช่องความถี่อัลตราไวด์แบนด์ ออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio สายอากาศมีขนาดเท่ากับ $80 \times 61 \times 4.51$ มม.³ โดยสายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าสักหลาด โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยมที่ป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีระนาบพื้นอยู่ด้านหลัง มีการใช้เทคนิคการลดกำลังงานที่มีต่อร่างกายด้วยการเพิ่มแผ่นสะท้อนสัญญาณอยู่ด้านหลังระนาบพื้นอีกหนึ่งชั้น สามารถตอบรับความถี่ช่วง 3.1 – 11 GHz

ในขั้นตอนการออกแบบ คณะผู้จัดทำได้นำเสนอการวัดค่าเมื่อสายอากาศมีลักษณะโค้งงอและทำการเปรียบเทียบการวัดผลเมื่อนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้ที่บริเวณต้นแขนและหน้าอก ค่าที่ทำการวัดได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยหากเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio

S. Li, และ J. Li [28] ได้นำเสนอสายอากาศบนผ้ายีนส์สำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยวัสดุฐานรองมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.54 ใช้วัสดุตัวนำแบบแผ่นเทพทองแดง สายอากาศมีขนาด 20×45 มม² ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบ โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายในช่วงความถี่ต่ำที่ 2.37 – 2.98 GHz และ ช่วงความถี่สูงที่ 5.69 – 6.08 GHz จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศไว้ใกล้กับผิวหนังของมนุษย์พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

K. Wang, และ J. Li [29] ได้ศึกษาการออกแบบสายอากาศสำหรับการใช้งานในย่านการสื่อสารไร้สาย ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการออกแบบโดยที่สายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้ายีนส์มีขนาดเท่ากับ 16×46 มม² สามารถใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายในช่วงความถี่ต่ำที่ 2.42 – 2.484 GHz และช่วงความถี่สูงที่ 5.75 – 5.85 GHz จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) เมื่อทำการติดตั้งสายอากาศไว้ใกล้กับผิวหนังของมนุษย์พบว่า ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับร่างกายมนุษย์

K. Shikder, และ F. Arifin [30] ได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศผ้าที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.17 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.0035 และใช้วัสดุตัวนำที่เรียกว่า ตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ PEC (Perfect Electric Conductor) ในขั้นตอนเริ่มต้นคณะผู้จัดทำได้ใช้สูตรในการคำนวณเพื่อออกแบบสายอากาศที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม มีสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเท่ากับ ใช้เทคนิคการสร้างรอยบากที่ตัวสายอากาศและที่ระนาบพื้นเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศ โดยสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $38 \times 32 \times 2.05$ มม³ สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.85 – 29.85 GHz ซึ่งรองรับกับระบบอัลตราไวด์แบนด์

S. Yan, V. Volskiy, และ G. A. E. Vandenbosch [31] ทำการออกแบบ และสร้างสายอากาศที่สามารถปรับใช้กับช่วงความถี่ ISM Bands ที่ความถี่ 433 MHz และ 2.4 GHz ออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio สายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสร้างบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าสักหลาดหนา 6 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.044 และใช้ผ้าตัวนำที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มม. และค่าความนำเท่ากับ 1.18×10^5 S/m. สายอากาศมีการใช้เทคนิคการสร้างรอยบากรูปตัวแอลที่ตัวสายอากาศเพื่อรองรับย่านความถี่ 2.4 GHz และทำการสร้างรอยบากที่ระนาบพื้นเพื่อให้ความยาวสามารถสำหรับรองรับช่วงความถี่ 433 MHz จากการติดตั้งสายอากาศไว้ที่จุดต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ปรากฏว่า จุดที่ดีที่สุดที่ค่า S_{11} มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือ ที่หัวไหล่และแขน โดยโค้งงอไปในทิศทางแกน Y ของสายอากาศ

S. Yan, P. J. Soh, และ G. A. E. Vandenbosch [32] ทำการออกแบบสายอากาศผ้าที่ใช้เทคนิคการปักเส้นด้ายตัวนำ MCEY (Metal Composite Embroidery Yarn) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 มม. ลงบนวัสดุฐานที่เป็นผ้าทอโพลีเอสเตอร์ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.15

โดยใช้เครื่องจักรเย็บผ้า จากการออกแบบสายอากาศ Five-Folded Dipole ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สำหรับการใช้งานกับย่านความถี่วิทยุ FM ที่ช่วงความถี่ 87.5 – 108 MHz โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) น้อยกว่า -5 dB ตลอดความถี่ที่ใช้งาน มีขนาดโดยรวมเท่ากับ $144 \times 10 \text{ cm}^2$ จากการวัดผลเมื่อติดตั้งสายอากาศต้นแบบเข้ากับร่างกายมนุษย์พบว่า สายอากาศมีประสิทธิภาพน้อยลงเล็กน้อยหากเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดผลในสภาวะปกติ

S. Yan, และ G. A. E. Vandenbosch [33] ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองเป็นผ้าสักหลาดที่มีความหนาเท่ากับ 6 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.044 และใช้ผ้าตัวนำที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มม. และค่าความนำเท่ากับ $1.18 \times 10^5 \text{ S/m}$. โดยออกแบบโครงสร้างให้เป็นอภิวัดวัสดุ (Metamaterial) เพื่อรองรับช่วงความถี่ ISM Band 2.4 GHz โดยที่สายอากาศมีขนาด $100 \times 100 \text{ มม}^2$ สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบคือ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวเมื่อเปิดสวิตช์และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเมื่อปิดสวิตช์ ผลที่ได้จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศเมื่อโค้งงอในแนวแกน X และแกน Y เปรียบเทียบกับสภาวะปกติ ค่าที่ได้มีคลาดเคลื่อนจากกันเพียงเล็กน้อย

I. Martinez, C. Mao, D. Vital, H. Shahariar, D. H. Werner, J. S. Jur, และ S Bhardwaj [34] นำเสนอการออกแบบสายอากาศบนวัสดุที่เป็นผ้าที่เหมาะสมต่อการใช้งานในช่วงความถี่ ISM Band 2.4 GHz โดยใช้โปรแกรม HFSS วัสดุผ้าฐานรองมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 1.7 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) 0.008 วัสดุตัวนำมีความหนาเท่ากับ $45 \mu \text{ m}$. มีค่าความนำเท่ากับ $1.3 \times 10^6 \text{ S/m}$. ทำการวิเคราะห์ค่าที่วัดได้โดยสายอากาศผ้าที่สร้างจากเทคนิคการพิมพ์ (Screen-printing) มีค่าการสูญเสียย้อนกลับใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้มากกว่าการสร้างสายอากาศผ้าที่ใช้เทคนิคการปัก (Embroidery) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของค่าการสูญเสียย้อนกลับมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการออกแบบไว้

D. Sipal, M. P. Abegaonkar, และ S. K. Koul [35] นำเสนอสายอากาศรูปวงกลมที่มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ สายอากาศมีขนาด $14 \times 39 \text{ มม}^2$ ใช้วัสดุฐานรองเป็นแผ่นพิมพ์วงจร Neltec หนา 0.762 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 3.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.0024 ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานในระบบไมโม สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) น้อยกว่า -10 dB และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) น้อยกว่า -20 dB ที่ช่วงความถี่ 3 – 10.6 GHz มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional)

S. Yan, P. J. Soh, และ G. A. E. Vandenbosch [36] นำเสนอสายอากาศผ้ารูปทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้เทคนิค SIW (Substrate-Integrated Waveguide) มีวัสดุฐานรองเป็นผ้าสักหลาดหนา 3 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 1.3 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.044 ใช้วัสดุตัวนำเป็นผ้า ShieldIt Super Conductive Textile หนา 0.17 มม. มีค่าความนำเท่ากับ $1.18 \times 10^5 \text{ S/m}$. ในช่วงความถี่ใช้งานคือ 2.4 GHz และ 5 GHz รองรับระบบไมโม จากการศึกษาคำการจำลองผลพบว่า การจัดเรียงทิศทางของสายอากาศที่ 1 และ 2 รวมถึงช่วงความห่างของสายอากาศทั้ง 2 อัน มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) โดยค่าที่นำไปใช้งานจะได้จากการจัดรูปของสายอากาศที่ 1 และ 2 หันไปในทิศทางตรงข้ามกันและสายอากาศทั้งสองมีระยะห่างกันอยู่ที่ 10 มม. เพื่อความยืดหยุ่นในการโค้งงอ

J. Ren, W. Hu, Y. Yin, และ R. Fan [37] นำเสนอสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมขนาดเหมาะสมสำหรับใช้งานช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโม โดยสร้างบนวัสดุแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 หนา 0.8 มม. สายอากาศมีขนาดเพียง 32×32 มม² เทคนิคการสร้างรอยบากรูปตัว L ที่ระนาบพื้นทั้งสองด้านที่สายอากาศที่ 1 และ 2 ช่วยให้สายอากาศสามารถรองรับย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์ได้และทำการสร้างรอยบากสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $\lambda_g/4$ ที่จุดกึ่งกลางของระนาบพื้นระหว่างสายอากาศที่ 1 และ 2 ทำให้คุณภาพของสายอากาศเหมาะกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

Y. K. Choukiker, S. K. Sharma, และ S. K. Behera [38] นำเสนอสายอากาศโมโนโพลรูปทรงแพร์ิกทรีสำหรับระบบโมโมประยุกต์ใช้งานกับระบบ LTE, WiFi, WiMAX และ WLAN โครงสร้างของสายอากาศถูกออกแบบและจำลองผลโดยใช้โปรแกรม HFSS บนวัสดุฐานรองแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 หนา 1.54 มม. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 สายอากาศมีขนาด 100×50 มม² เทคนิคการใช้สักรูปตัว T ที่ระนาบพื้นซึ่งจัดวางอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศที่ 1 และ 2 เพื่อเพิ่มคุณภาพของสายอากาศและลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) จากการวัดผลสายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ 1 คือ 1.65 – 1.9 GHz และช่องความถี่ที่ 2 คือ 2.68 – 6.25 GHz โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) น้อยกว่า -10 dB และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) น้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ที่ 1 และ น้อยกว่า -15 dB ในช่วงความถี่ที่ 2

L. Kang, H. Li, X. Wang, และ X. Shi [39] ทำการนำเสนอสายอากาศรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบช่องเปิดขนาดกะทัดรัดสำหรับใช้งานในย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโม โดยสายอากาศถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองแผ่นพิมพ์วงจร FR-4 หนา 1.6 มม. มีขนาด 38.5×38.5 มม² ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 4.4 สายนำสัญญาณถูกออกแบบให้มีขนาดที่ไม่เท่ากัน มีผลทำให้สายอากาศสามารถรองรับช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ได้ จากนั้นทำการใช้เทคนิคการวางสักรูปตัว T ระหว่างสายอากาศทั้ง 2 เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ให้น้อยกว่า -15 dB และทำการสร้างรอยบากรูปตัว L ที่ระนาบพื้นเพื่อทำการนอตซ์ความถี่ 5 – 5.9 GHz จากการวัดผลสายอากาศสามารถรองรับช่วงความถี่ 3.1 – 10.6 GHz มีช่วงความถี่นอตซ์ที่ 5.03 – 5.97 GHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านน้อยกว่า -15 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน

L. Liu, S. W. Cheung, และ T. I. Yuk [40] นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปขนาดกะทัดรัดสำหรับการใช้งานย่านความถี่อัลตราไวด์แบนด์และรองรับระบบโมโม รูปแบบของสายอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยม ออกแบบและสร้างบนวัสดุฐาน Roger R4350B หนา 1.6 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประมาณ 3.5 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.004 มีขนาด 22×36 มม² สายอากาศถูกออกแบบให้ใช้เทคนิคการวางสักรูปตัว T ที่ระนาบพื้นด้านหลังเพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ทำการเซาะร่องแนวตั้งยาวที่จุดกึ่งกลางของสักรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวสักรูปให้ดีขึ้น และทำการใช้สตริปยาววางข้าง T สักรูปเพื่อให้ได้ช่วงนอตซ์ความถี่ 5.15 – 5.85 GHz จากการวัดผลสายอากาศค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) น้อยกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.6 – 11 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) น้อยกว่า -15 dB ตั้งแต่ความถี่ที่ 3.1 GHz ขึ้นไป และมีช่วงความถี่นอตซ์ตั้งแต่ 5.15 – 5.85 GHz มีค่า S_{11} สูงสุด -1.4 dB ที่ความถี่นอตซ์กึ่งกลาง

Z. Li, C. Yin, และ X. Zhu [41] นำเสนอสายอากาศวิวอลติสำหรับการใช้งานย่านความถี่อัลตราไวต์แบนด์และรองรับระบบโมโม โดยสายอากาศมีขนาดเท่ากับ 26×26 มม² ออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานแผ่น Taconic RF-35 ที่มีความหนา 0.762 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.5 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ 0.0018 คณะผู้จัดทำได้นำเสนอเทคนิคการสร้างรอยบากรูปตัว T ที่ระนาบพื้นระหว่างพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 จากนั้นทำการใช้เทคนิคการวางนอตซ์ความถี่แบบ Split ring resonator (SSR) ที่มีขนาดไม่เท่ากันขนานข้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป เพื่อให้ความถี่นอตซ์อยู่ในช่วงตามที่ต้องการ จากการวัดผลสายอากาศวิวอลติได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) น้อยกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.9 – 11.6 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) น้อยกว่า -15 dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน มีช่วงความถี่นอตซ์ที่ย่าน WLAN ตั้งแต่ 5.3 – 5.8 GHz และที่ย่านความถี่ X-band ตั้งแต่ 7.85 – 8.55 GHz



บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศที่ใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม ทำการออกแบบและจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์หลักที่บ่งบอกถึงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ ในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างในจุดต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimize) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ จึงเป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบเท่านั้น ผลที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายจากโปรแกรมจำลองผลจึงอาจจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างออกไปจากค่าที่ได้ในขั้นตอนการคำนวณ

3.2 การออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

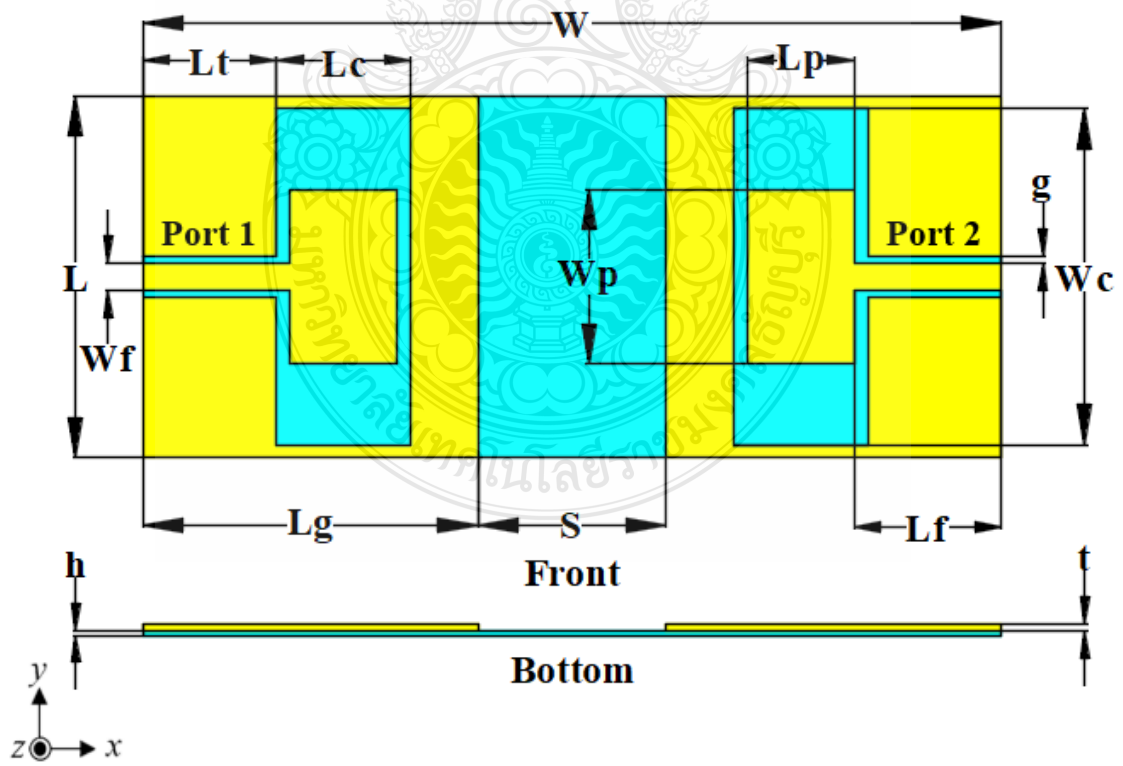
ในเบื้องต้นการออกแบบสายอากาศดังกล่าว จะทำการใช้วัสดุฐานรองที่เป็นฟิล์มและในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำมีความสนใจที่จะใช้ฟิล์มกรองแสงดีทรอยนต์คาร์บอนสีดำ โดยนำมาวัดด้วยเครื่อง Split Cylinder Resonator เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการออกแบบดังรูปที่ 3.1 ซึ่งฟิล์มดังกล่าวมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

| | |
|---|-------------|
| ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) | = 3.2 |
| ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) | = 0.016 |
| ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) | = 0.056 มม. |

จากการศึกษาทฤษฎีที่ผ่านมาในบทที่ 2 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้จัดทำจึงตั้งสมมติฐานและวางแผนที่จะทำการออกแบบสายอากาศที่มีความยืดหยุ่น โค้งงอได้ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งยังให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศที่ดี จากคุณลักษณะดังที่กล่าวมาทางผู้จัดทำจึงเลือกที่จะออกแบบสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองเป็นฟิล์ม ทำการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม โดยมีรูปร่างสายอากาศเป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การวัดเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ของวัสดุฐานรอง



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม 2 พอร์ต

การออกแบบสายอากาศช่องที่เป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม สิ่งที่ต้องการหาในเบื้องต้นคือ การหาขนาดของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง $50\ \Omega$ ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในระบบสื่อสาร โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.10) และ สมการ (2.13) ตามลำดับดังนี้

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

$$Z_0 = \frac{1}{Cv_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{eff}}} c^a$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r(\sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.10) และ (2.13) จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{3.2 + 1}{2} + \left[\frac{3.2 - 1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{0.056}{2} \right)}} \right]$$

$$\epsilon_{eff} = 4.003$$

$$Z_o = 56.2\ \Omega$$

เมื่อได้ขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมแล้วซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 2 มม. ขั้นตอนต่อมาจะทำการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณ นำค่าที่ได้จากสมการที่ (2.10) แทนค่าในสมการที่ (2.12) เพื่อหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ในขั้นตอนเริ่มต้นของการออกแบบนั้น จะทำการออกแบบให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ตั้งแต่ที่ช่วงความถี่ 3 GHz โดยจะใช้

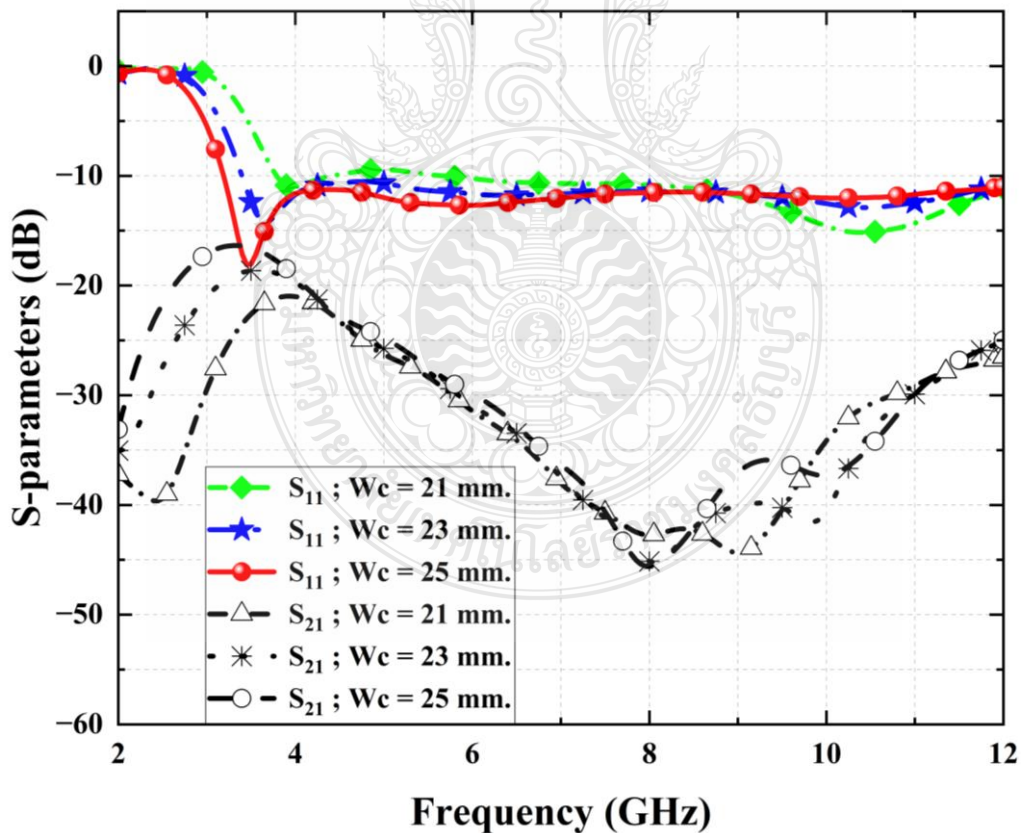
ช่วงความถี่ดังกล่าวในการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งของสายอากาศ

$$\lambda_g = \frac{(3 \times 10^8)}{(3 \times 10^9)(\sqrt{4.003})} = 49.98 \text{ มม.}$$

สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จะใช้ค่าความยาวของสายนำสัญญาณประมาณ $\lambda_g/4$ หรือมีความยาวโดยประมาณ 12.5 มม. โดยช่วงความถี่ต่ำที่สายอากาศรูปวงกลมสามารถตอบสนองได้ที่ช่วงความถี่ประมาณ 3 GHz ซึ่งจะใช้งานในขั้นตอนการจำลองค่าเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป

3.3 การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_c ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



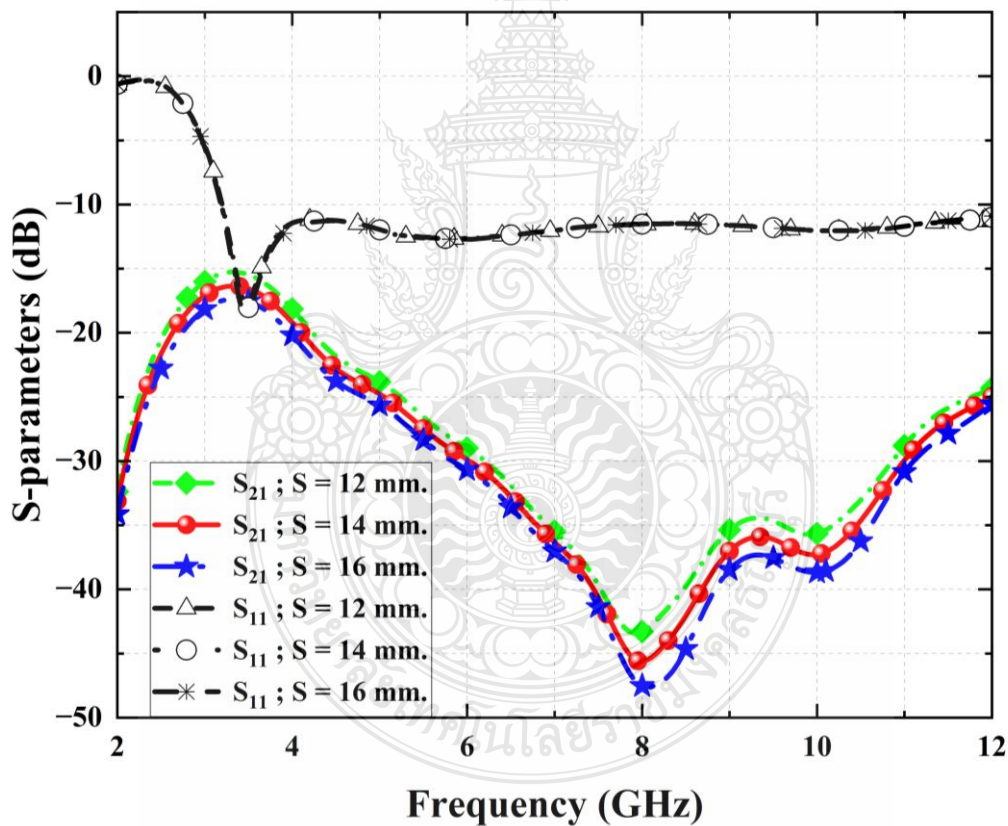
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_c

การศึกษาค่าพารามิเตอร์ W_c ความยาวของสายอากาศช่องที่เป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ง่ายต่อการปรับเพิ่มหรือลดค่าได้ง่ายที่สุด โดยจะทำการปรับเพิ่มและลดค่าของพารามิเตอร์ W_c ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ดังรูปที่ 3.3

หลังจากการทำการศึกษาผลกระทบจากการปรับเพิ่มและลดค่าพารามิเตอร์ W_c พบว่าพารามิเตอร์นี้มีความเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดท์และค่าอิมพีแดนซ์แมชชิงของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21})

เมื่อความยาวของสายอากาศช่องมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น สายอากาศจะตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ดีขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ $W_c = 25$ มม. คือค่าที่เหมาะสม มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 12 GHz ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) มีค่าที่ต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่าน

3.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ S ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ S

ทำการศึกษาค่าระยะ S ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ จากรูปที่ 3.4 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ของสายอากาศเมื่อค่าพารามิเตอร์ S มีการเปลี่ยนแปลงระยะจาก 12 มม., 14 มม. และ 16 มม. จากการจำลองผล

พบว่าระยะห่าง S ไม่ส่งผลกระทบต่อ S_{11} แต่อย่างไรในทุกๆระยะของการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อระยะ S เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ลดลง โดยค่าที่ยอมรับได้นั้นจะต้องมีค่าที่ต่ำกว่า -15 dB ซึ่งระยะที่เหมาะสมคือ $S = 14$ มม.

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกับสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต โดยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจะถูกนำมาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ตที่นำเสนอ

| ชื่อพารามิเตอร์ | ขนาด (มม.) | ชื่อพารามิเตอร์ | ขนาด (มม.) |
|-----------------|------------|-----------------|------------|
| W | 64 | L | 27 |
| Wp | 13 | Lp | 8 |
| Wc | 25 | Lc | 10 |
| Wf | 2 | Lf | 11 |
| S | 14 | Lg | 25 |
| g | 0.5 | Lt | 10 |
| h | 0.056 | t | 0.07 |

การคำนวณหาแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สามารถหาได้จากสมการ (2.4) ซึ่งจะคำนวณจากกราฟค่าความสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ได้จากการจำลองผล ดังตัวอย่าง

พอร์ตที่ 1 และ 2

$$\begin{aligned}
 BW &= f_H - f_L \\
 &= 12 - 3 = 9 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่าความถี่กลางดังสมการที่ (2.5)

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L$$

$$= \frac{12 - 3}{2} + 3$$

$$= 6.5 \text{ GHz}$$

คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ดังสมการที่ (2.6)

$$\begin{aligned} BW(\%) &= \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \\ &= \left(\frac{9 - 3}{6.5} \right) \times 100\% \\ &= 92.31\% \end{aligned}$$

3.4 ผลการจำลองสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

เมื่อทำการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ด้วยโปรแกรม CST จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}), ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}), ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient), ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay), อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22})

ในรูปที่ 3.5 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ซึ่งในการหาแบนด์วิดท์ของสายอากาศจะคิดจากช่วงที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีค่าต่ำกว่า -10 dB โดย S_{11} และ S_{22} ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 12 GHz หรือความกว้างแถบ 92.31% ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของ UWB

3.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21})

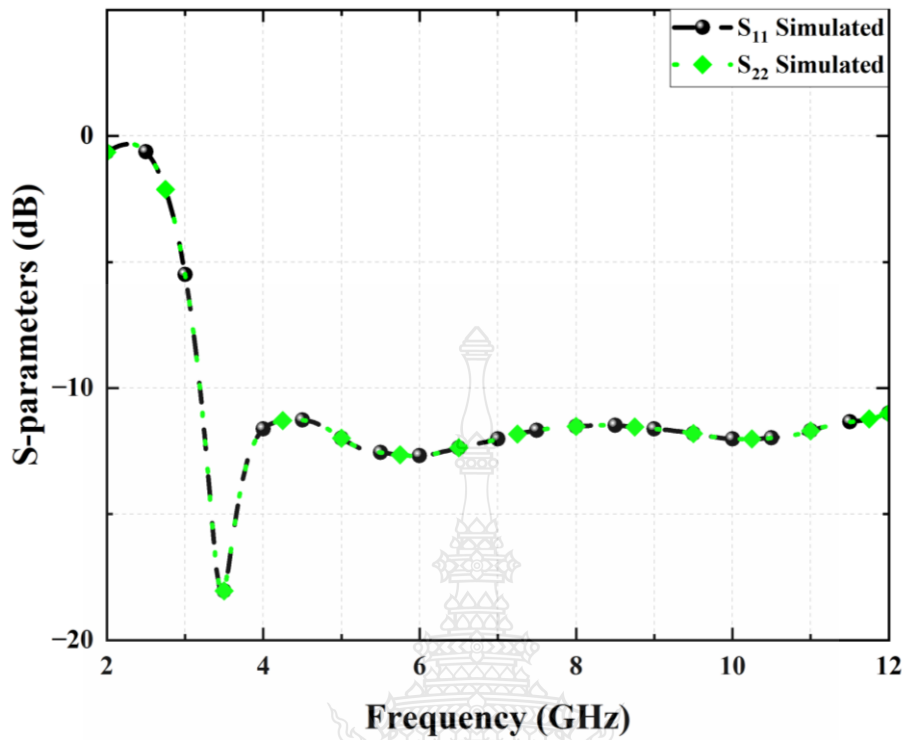
จากรูปที่ 3.6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ผลจากการจำลองสายอากาศที่ทำการออกแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่าน ซึ่งมีความสอดคล้องกับช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศ

3.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

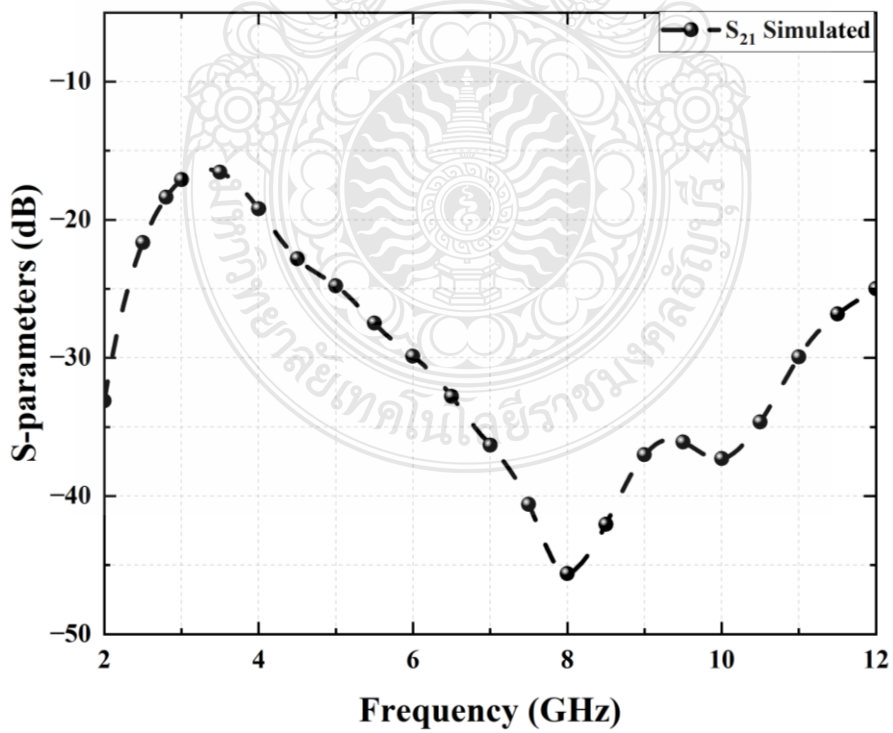
จากรูปที่ 3.7 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต โดยค่าที่ยอมรับได้นั้นจะต้องต่ำกว่า 0.5 สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้สายอากาศทั้งสองพอร์ตนั้น สามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกันและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน

3.4.4 ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

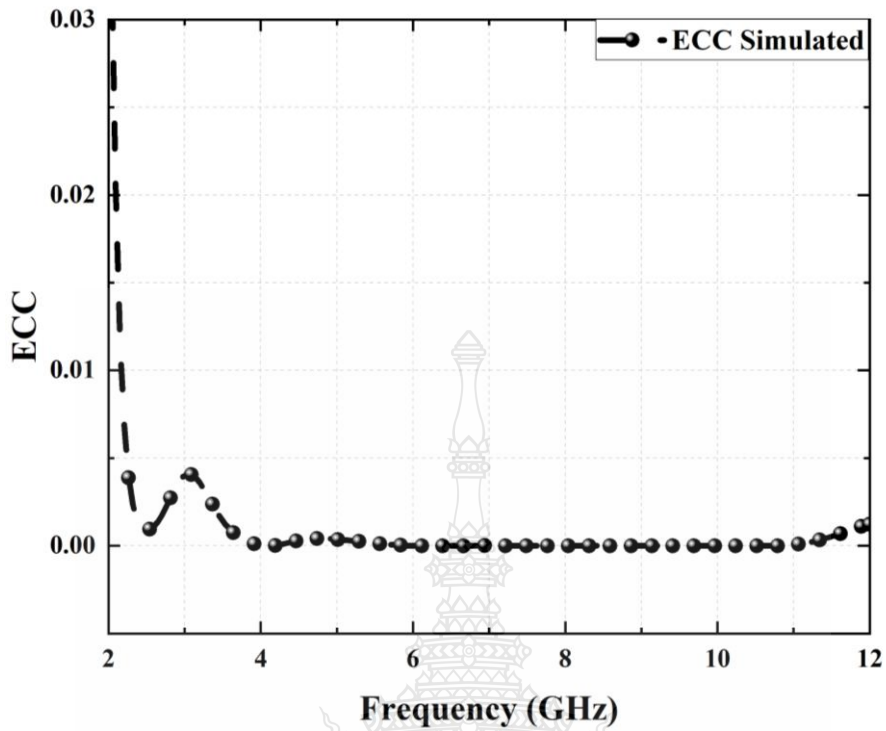
จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า 1 ns. หรือน้อยกว่าค่ามาตรฐาน 2 ns. ซึ่งทำให้การรับ-ส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด



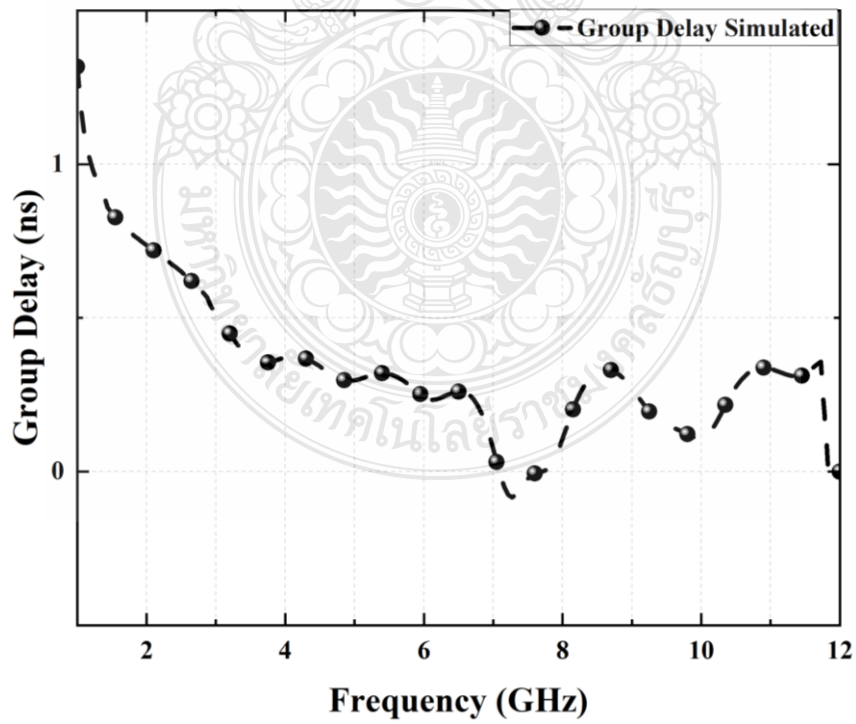
รูปที่ 3.5 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



รูปที่ 3.6 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

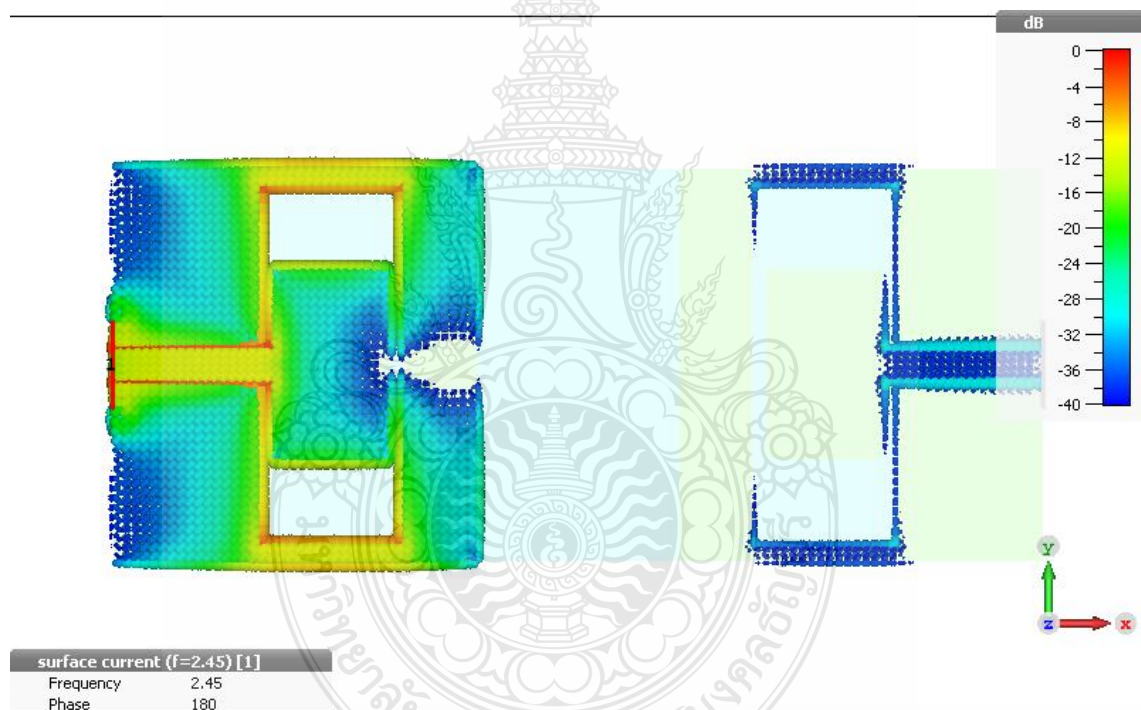


รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

3.4.5 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

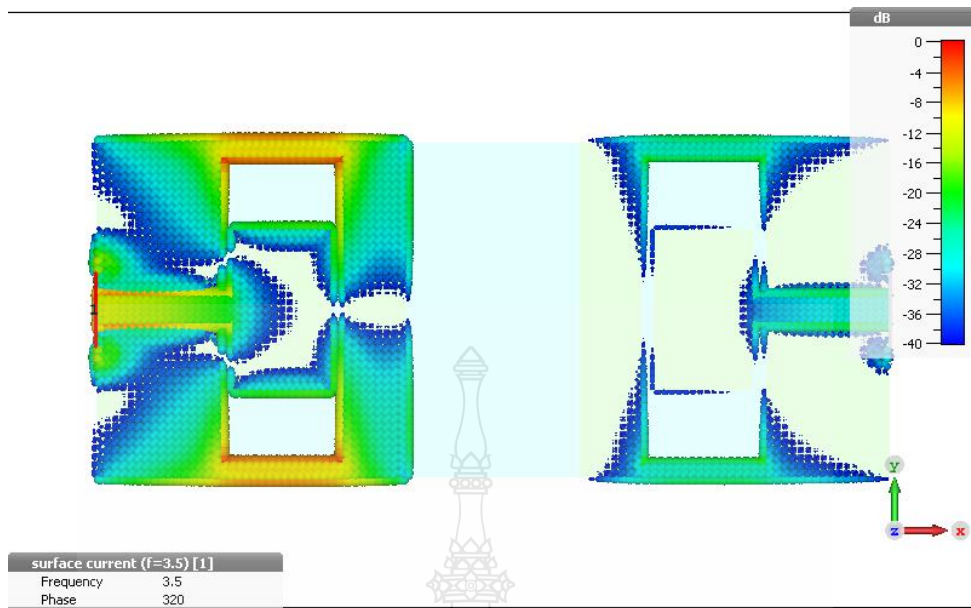
รูปที่ 3.9 ถึง 3.13 จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz, 5.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 โดยจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีปริมาณการแผ่กระจายออกไปที่ ตัวของสายอากาศช่องรูปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมพอร์ตที่ 2 น้อยมาก สายอากาศแต่ละพอร์ตจึงสามารถที่จะทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้

รูปที่ 3.14 ถึง 3.18 จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz, 5.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 โดยจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีปริมาณการแผ่กระจายออกไปที่ ตัวของสายอากาศช่องรูปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมพอร์ตที่ 1 น้อยมาก สายอากาศแต่ละพอร์ตจึงสามารถที่จะทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้

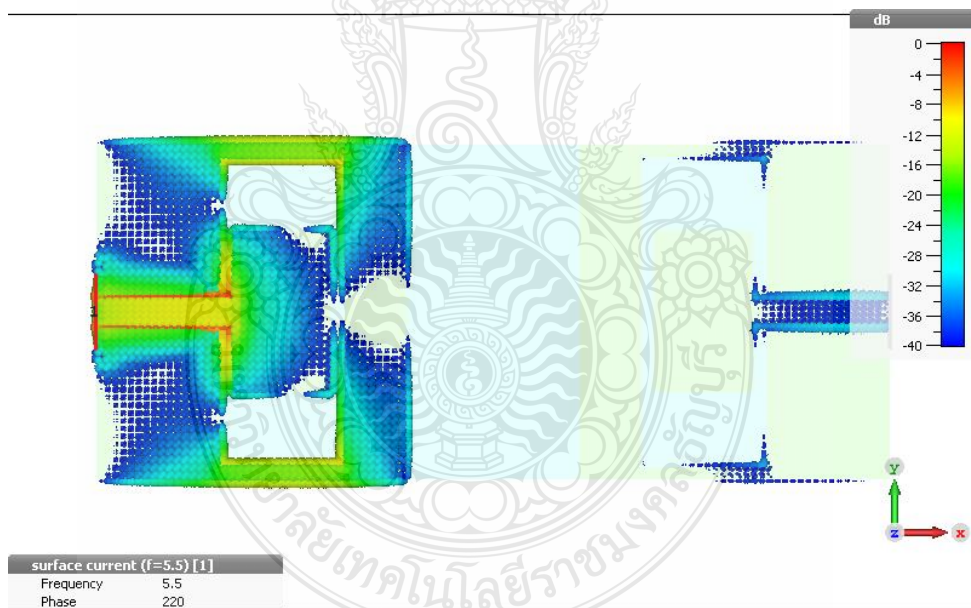


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 180°

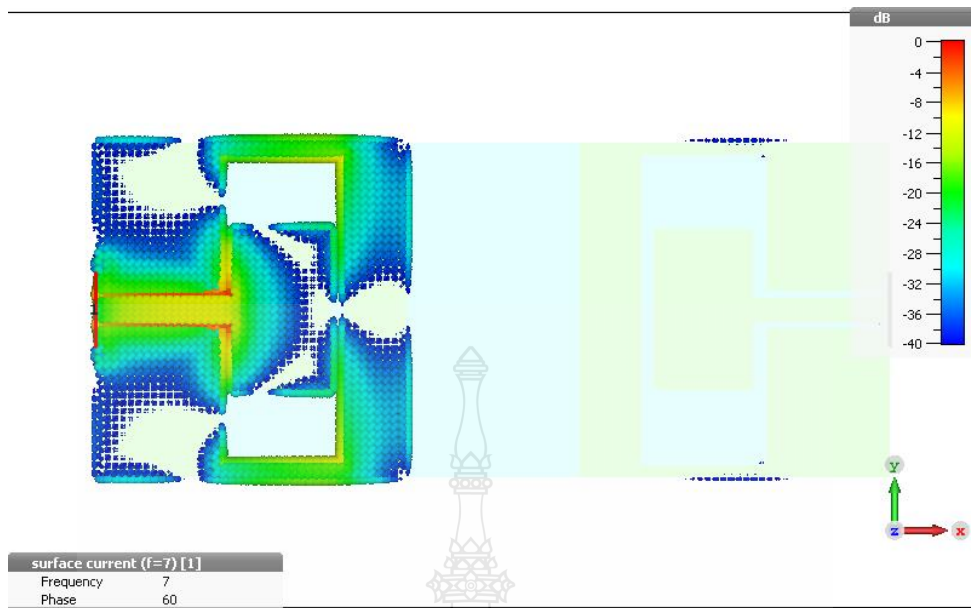


รูปที่ 3.10 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

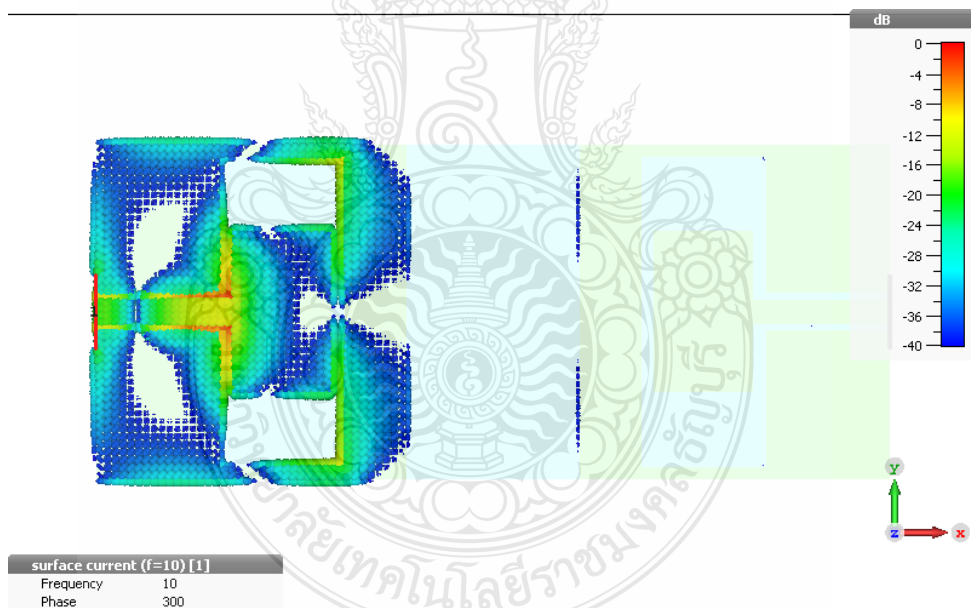


รูปที่ 3.11 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 320° และ 220° ตามลำดับ

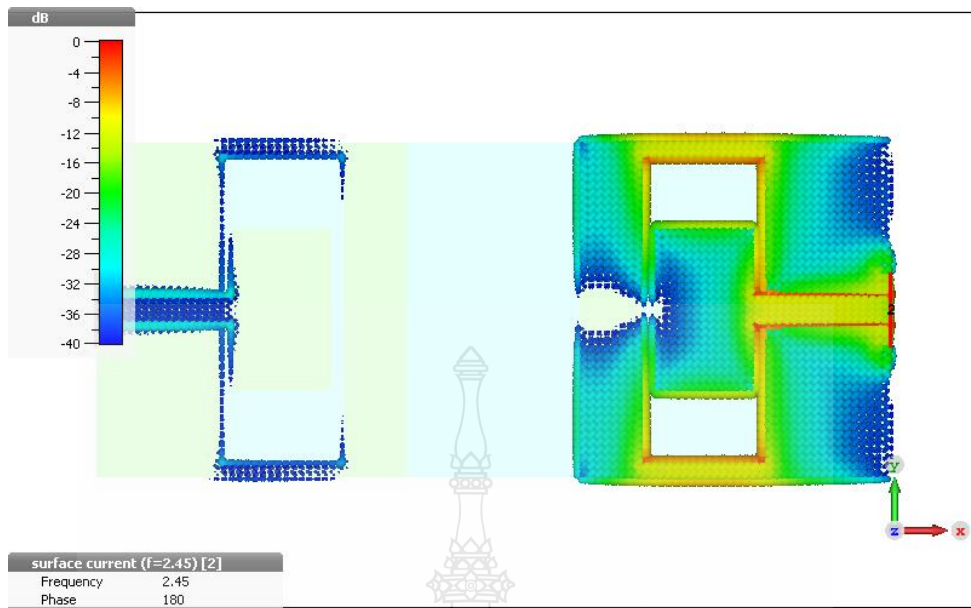


รูปที่ 3.12 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 60° และ 300° ตามลำดับ

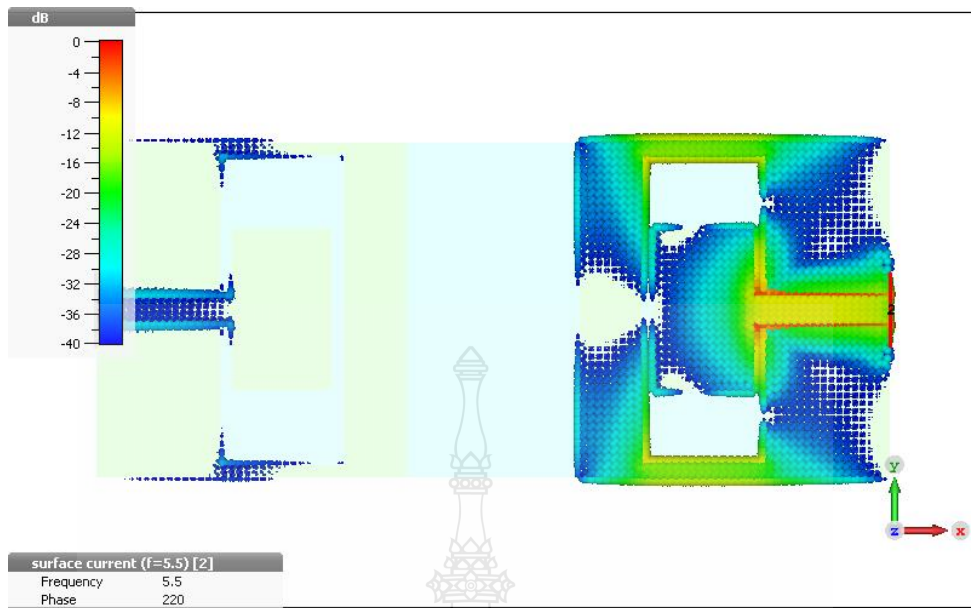


รูปที่ 3.14 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

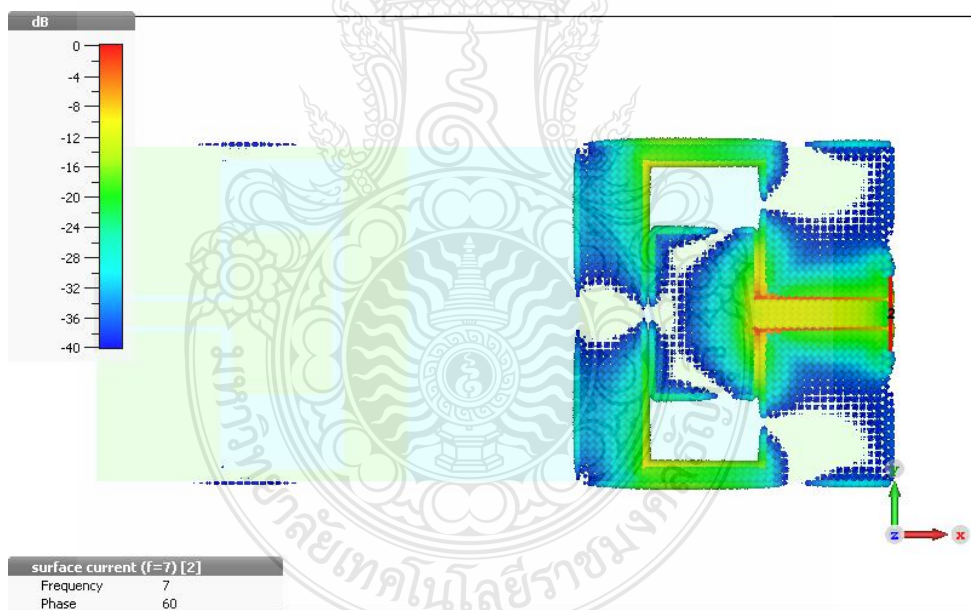


รูปที่ 3.15 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 180° และ 320° ตามลำดับ

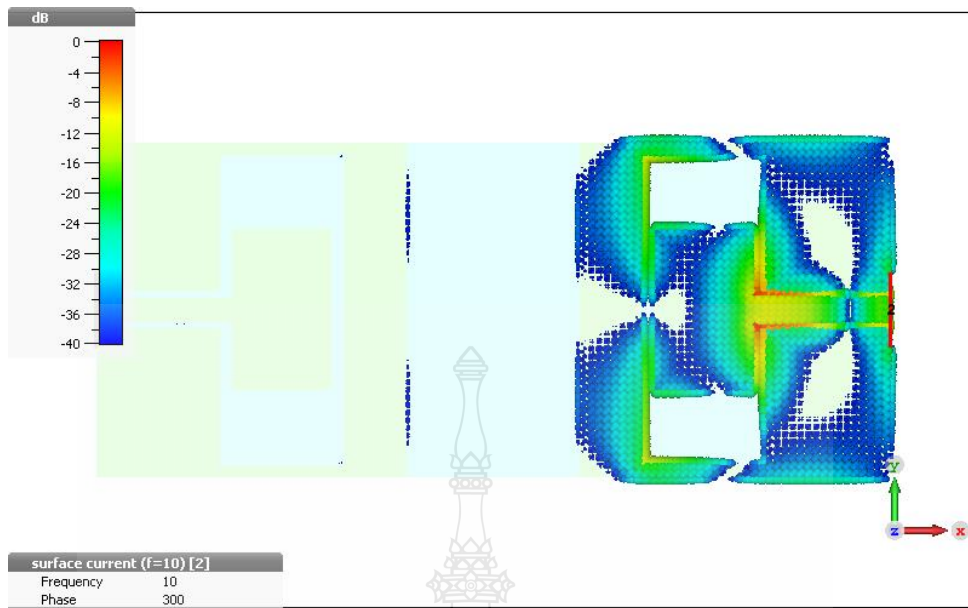


รูปที่ 3.16 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

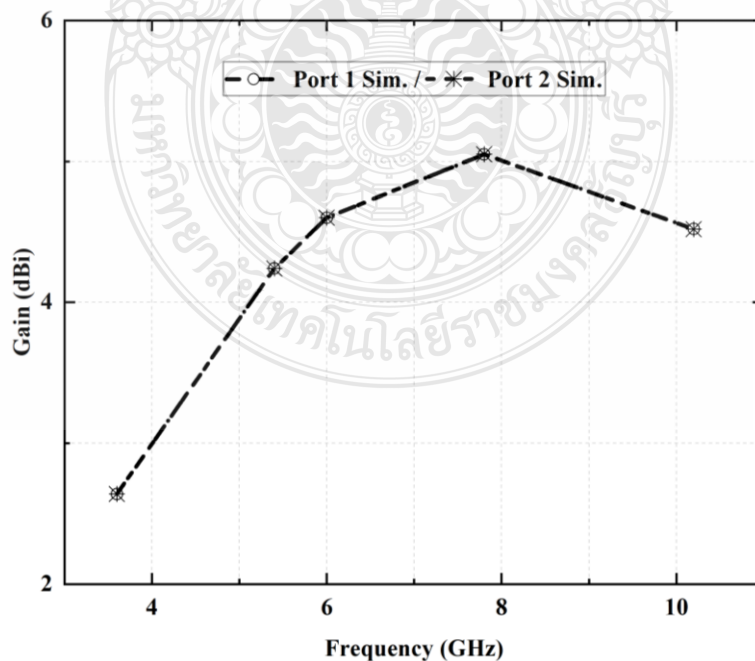
จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz และ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 220° และ 60° ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 300°

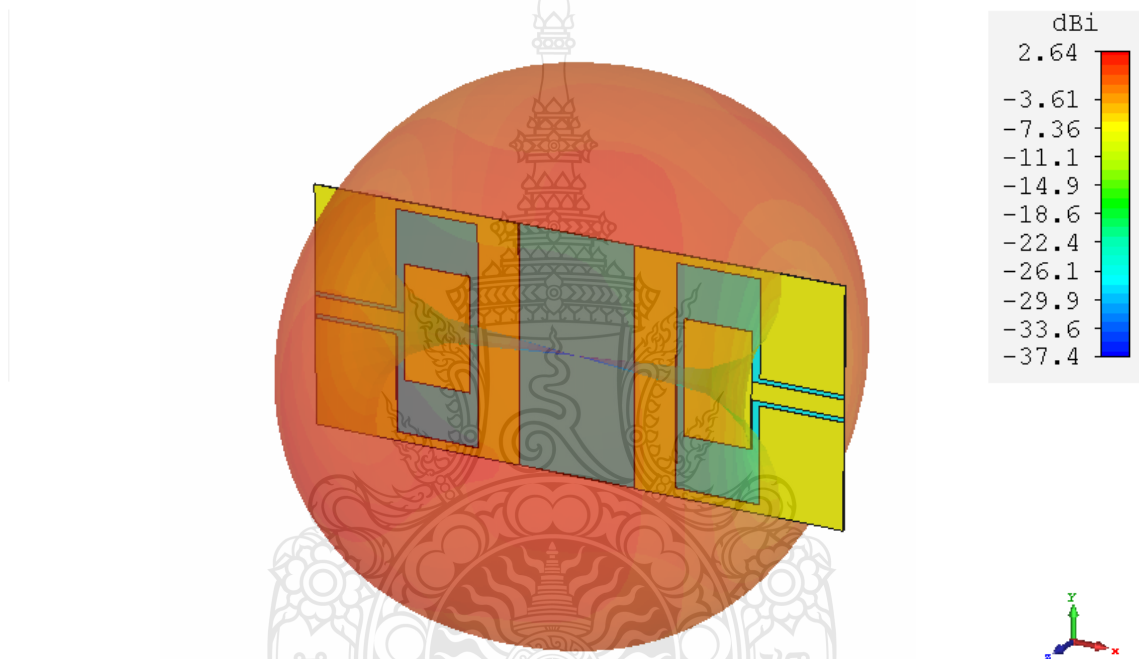
3.4.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)



รูปที่ 3.19 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

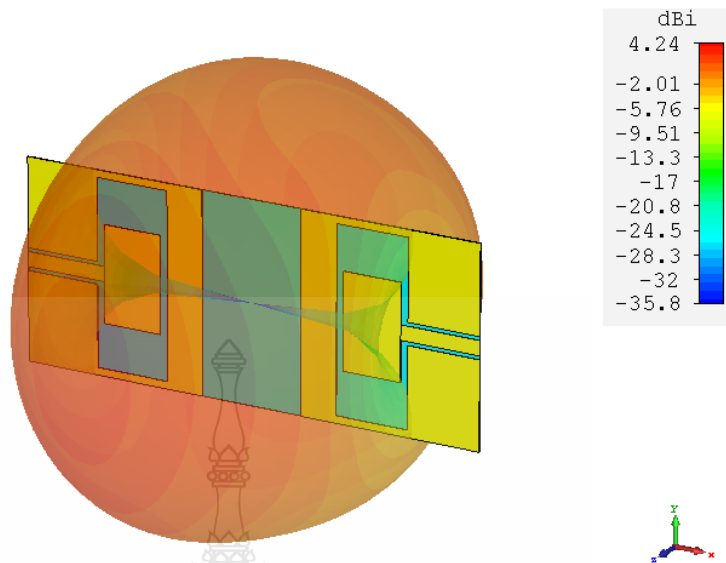
ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต โดยทำการจำลองผลพอร์ตที่ 1 และ 2 ที่ความถี่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6.0 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ค่าอัตราขยายมีค่าอยู่ในช่วง 2.64 – 5.05 dBi ดังรูปที่ 3.19 โดยอัตราขยายของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นที่ย่านความถี่สูง

3.4.7 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จากรูปที่ 3.20 ถึง 3.29 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) แบบ 3 มิติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 และ 2 ที่ความถี่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

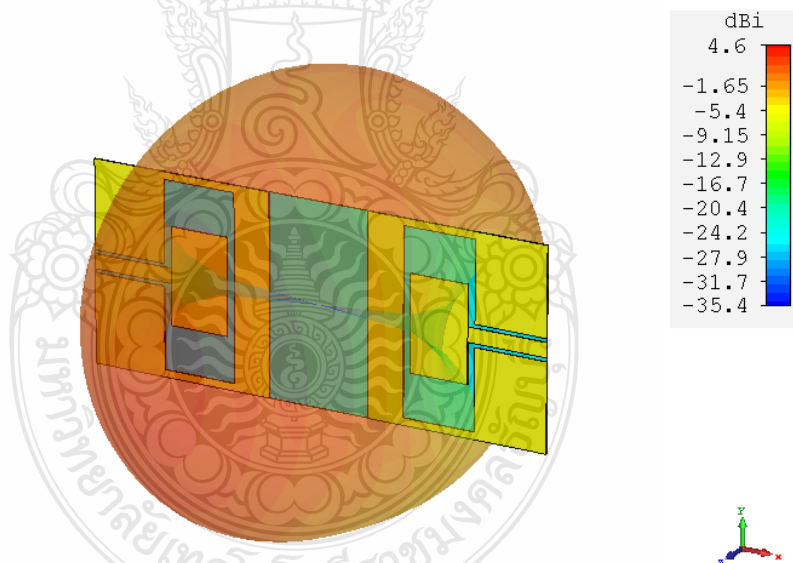


รูปที่ 3.20 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.20 ที่ช่วงความถี่ 3.6 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.64 dBi

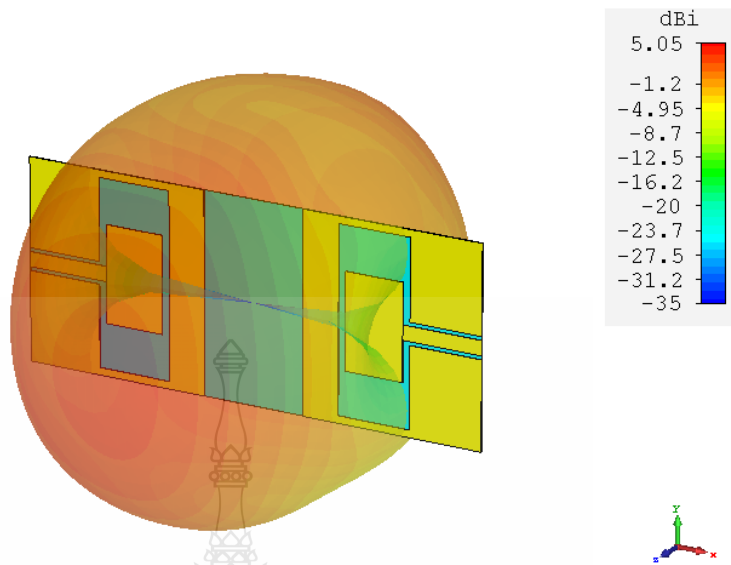


รูปที่ 3.21 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

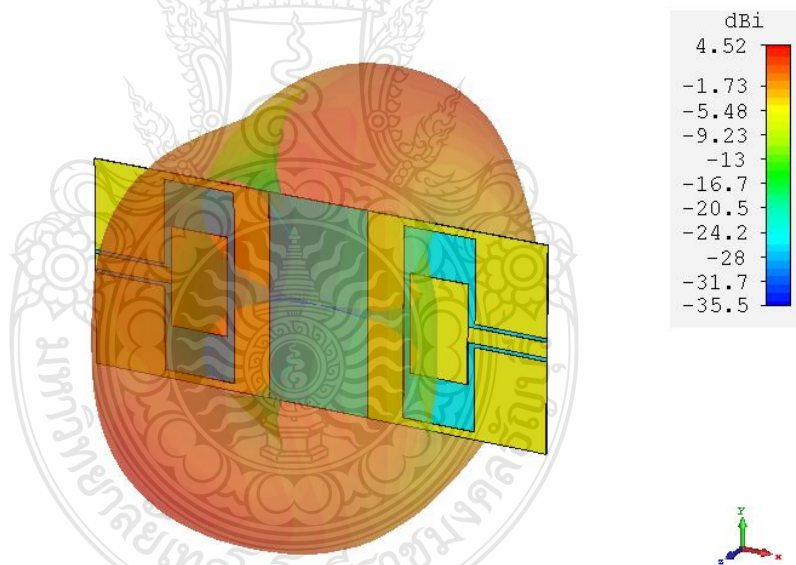


รูปที่ 3.22 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.21 และ 3.22 ที่ช่วงความถี่ 5.4 GHz และ 6 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.24 dBi และ 4.6 dBi ตามลำดับ

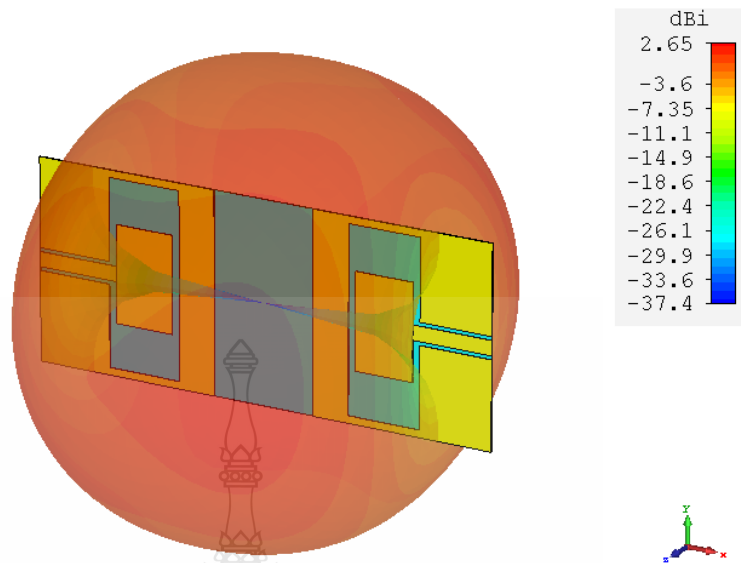


รูปที่ 3.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

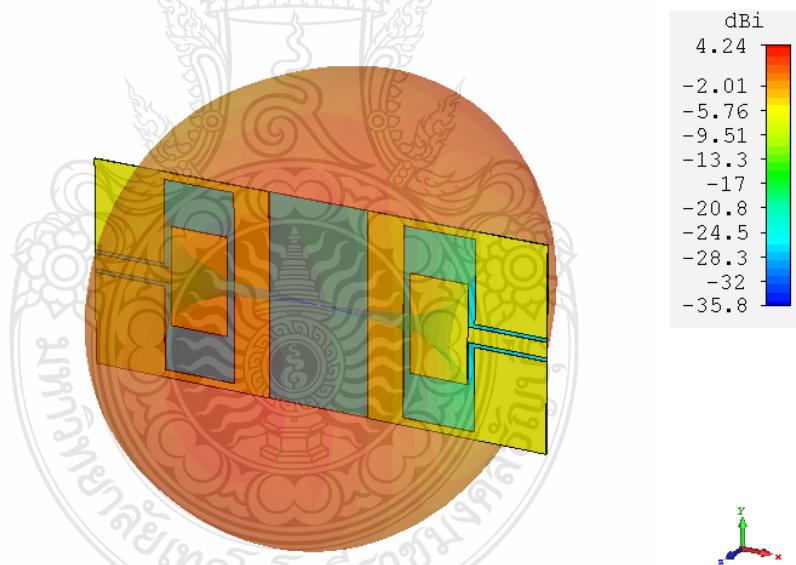


รูปที่ 3.24 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.23 และ 3.16 ที่ช่วงความถี่ 7.8 GHz และ 10.2 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 dBi, 5.05 dBi และ 4.52 dBi ตามลำดับ

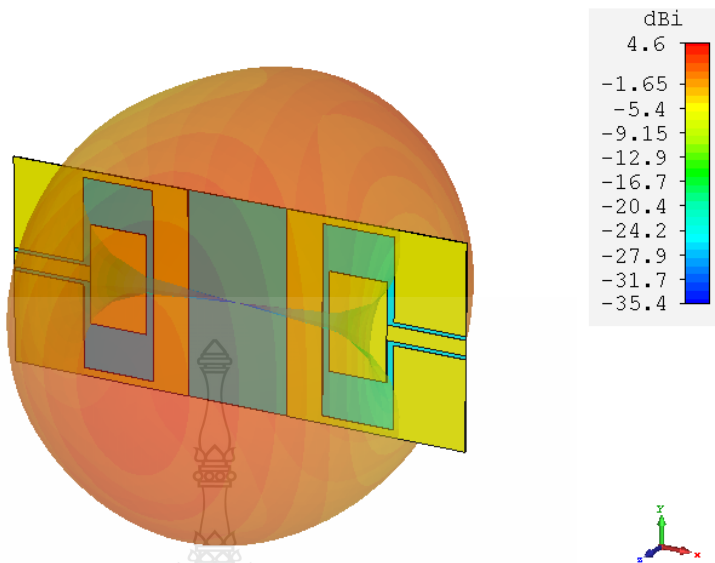


รูปที่ 3.25 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

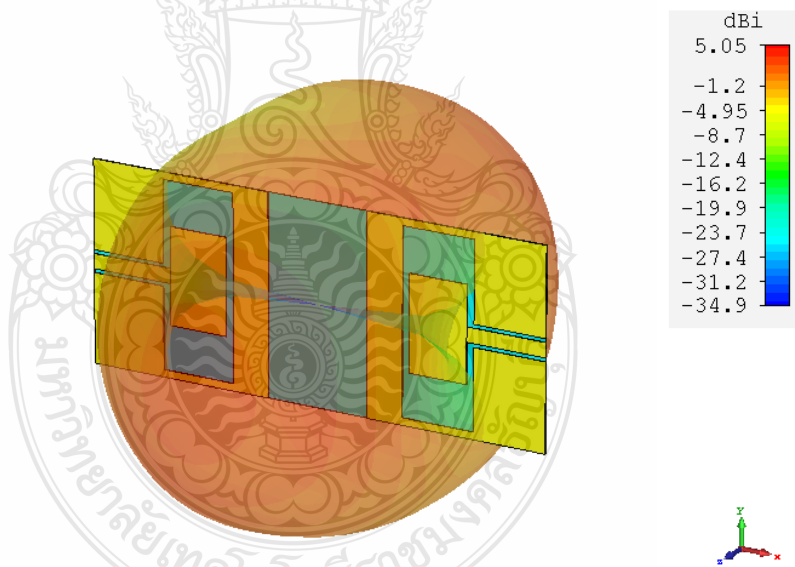


รูปที่ 3.26 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.25 ถึง 3.26 ที่ช่วงความถี่ 3.6 GHz และ 5.4 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.65 dBi และ 4.24 dBi ตามลำดับ

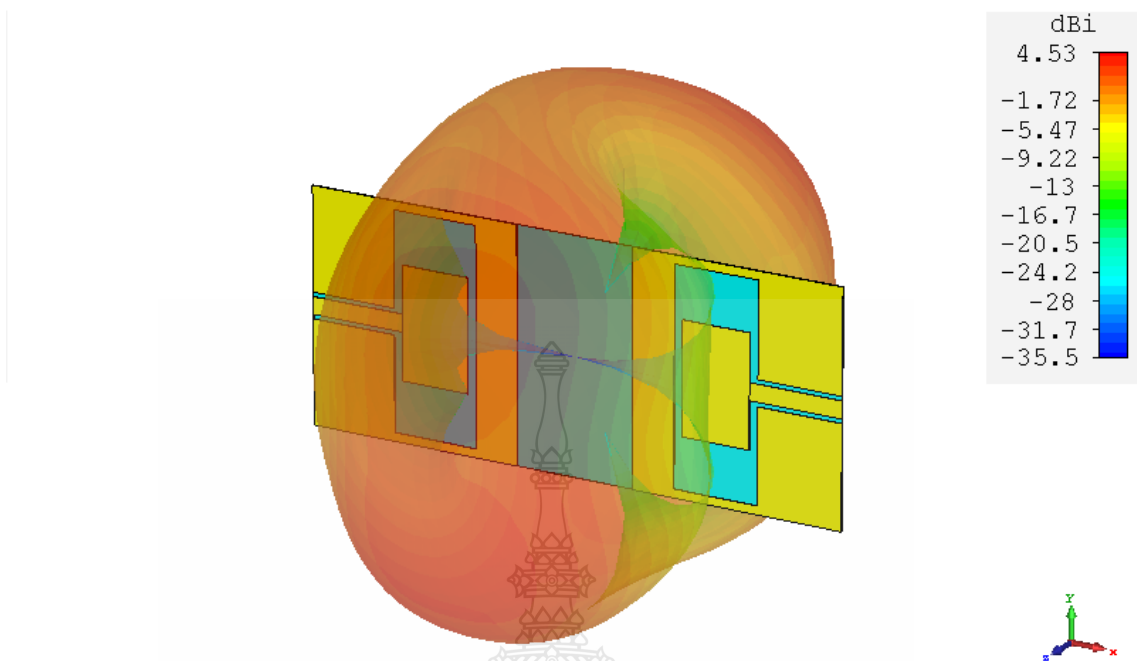


รูปที่ 3.27 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.28 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.27 ถึง 3.28 ที่ช่วงความถี่ 6 GHz และ 7.8 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 dBi และ 5.05 dBi ตามลำดับ

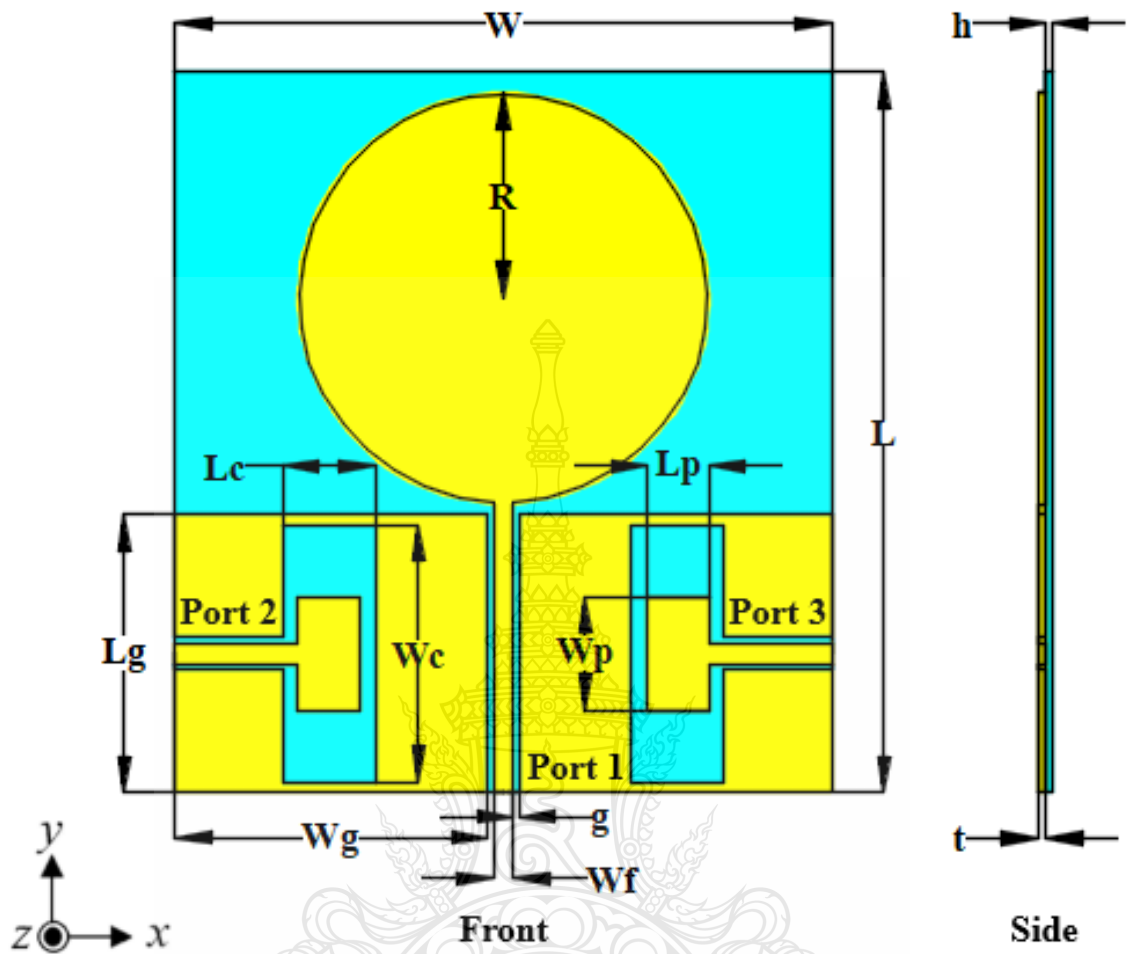


รูปที่ 3.29 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.29 ที่ช่วงความถี่ 10.2 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.53 dBi

3.5 การออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

จากการออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ตสำหรับการสื่อสารไร้สายในขั้นต้นนั้น ประสิทธิภาพของสายอากาศยังไม่เป็นที่พึงพอใจนัก ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาสายอากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น หนึ่งในวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งคือ การเพิ่มสายอากาศออกเป็น 3 พอร์ต ซึ่งจะทำให้สายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น ในการออกแบบจะทำได้โดยการจัดวางสายอากาศโมโนโพลรูปร่างแพทช์วงกลม อยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต โดยโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ที่นำเสนอจะปรากฏดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

การออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่มีรูปแบบเป็นวงกลม สิ่งที่ต้องการหาในเบื้องต้นคือ การหาขนาดของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมที่มีค่าความต้านทานใกล้เคียง 50Ω ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในระบบสื่อสาร โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.10) และ สมการ (2.13) ตามลำดับดังนี้

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

$$Z_0 = \frac{1}{Cv_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{eff}}c^a}$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r (\sqrt{\epsilon_{eff}})}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.10) และ (2.13) จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{3.2+1}{2} + \left[\frac{3.2-1}{\sqrt{1+12\left(\frac{0.056}{2}\right)}} \right]$$

$$\epsilon_{eff} = 4.003$$

$$Z_o = 56.2 \Omega$$

เมื่อได้ขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมแล้วซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 2 มม. ขั้นตอนต่อมาจะทำการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณ นำค่าที่ได้จากสมการที่ (2.10) แทนค่าในสมการที่ (2.12) เพื่อหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ในขั้นตอนเริ่มต้นของการออกแบบ นั้น จะทำการออกแบบให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานได้ตั้งแต่ที่ช่วงความถี่ 1.8 GHz โดยจะใช้ช่วงความถี่ดังกล่าวในการออกแบบความยาวของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งของสายอากาศ

$$\lambda_g = \frac{(3 \times 10^8)}{(1.8 \times 10^9)(\sqrt{4.003})} = 83.30 \text{ มม.}$$

สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จะใช้ค่าความยาวของสายนำสัญญาณประมาณ $\lambda_g/4$ หรือมีความยาวโดยประมาณ 20.83 มม. เช่นเดียวกันกับค่าความยาวรัศมีของตัวแพทช์สายอากาศที่มีรูปร่างกลมตามทฤษฎีของสายอากาศโมนโพล โดยช่วงความถี่ต่ำที่สายอากาศรูปร่างกลมสามารถตอบสนองได้ที่ช่วงความถี่ประมาณ 1.8 GHz ซึ่งจะใช้งานในขั้นตอนการจำลองค่าเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป

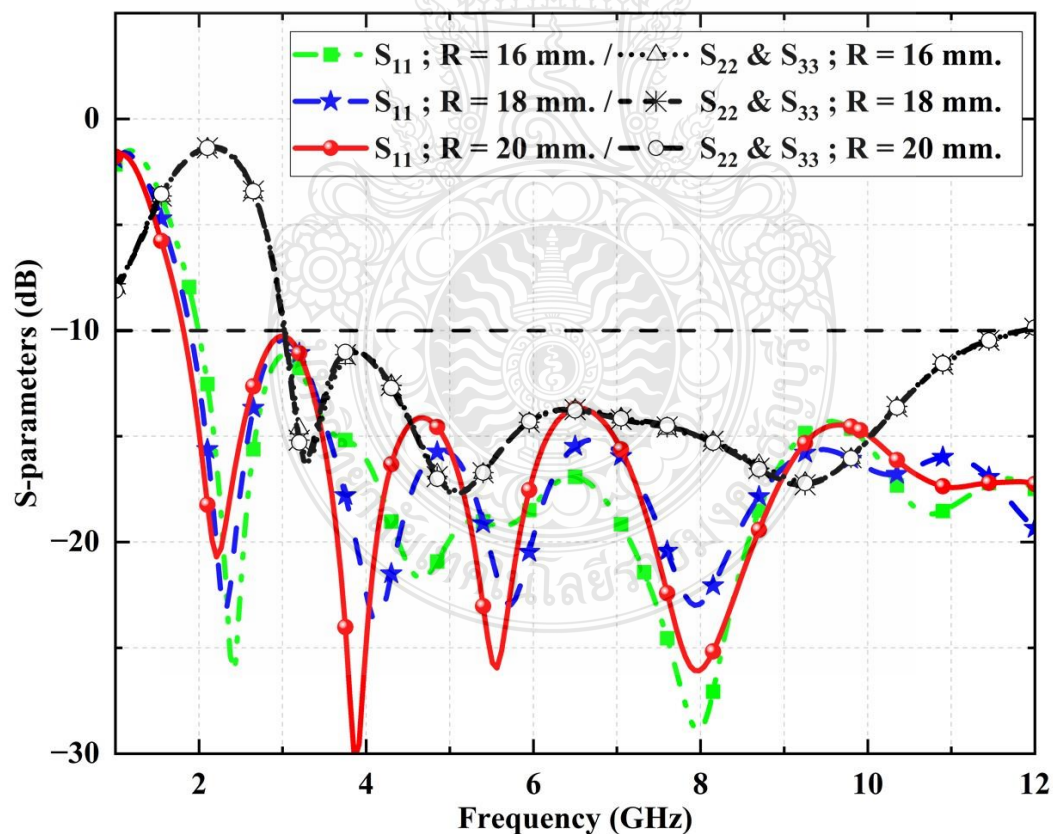
3.6 การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

3.6.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R ของสายอากาศโมโนโพลที่มีรูปแบบเป็นวงกลม

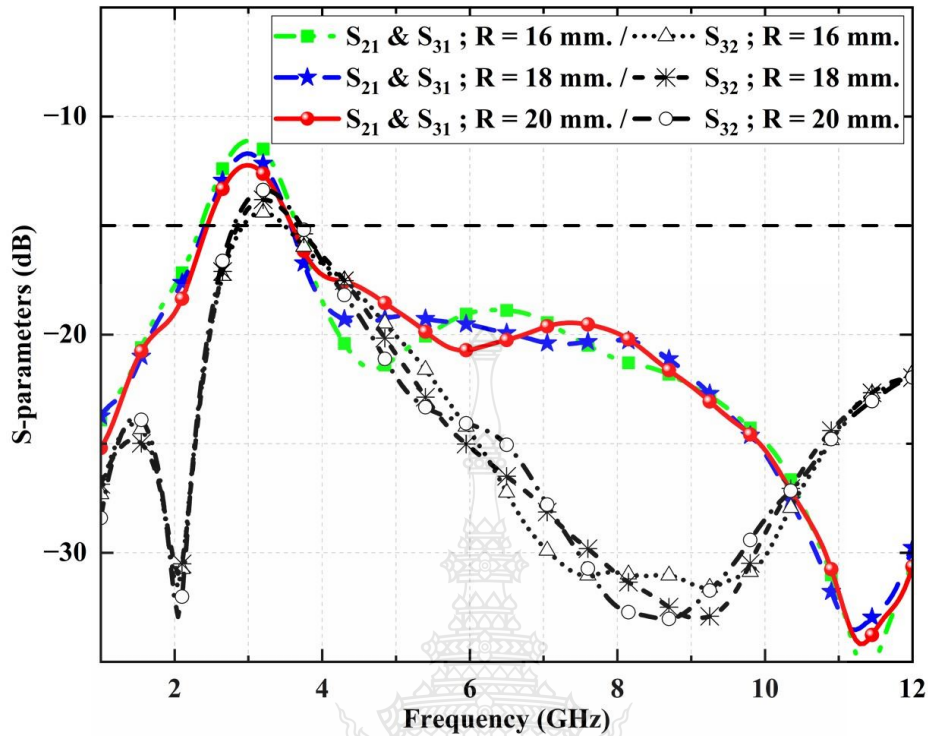
การศึกษาค่าพารามิเตอร์ R รัศมีของสายอากาศโมโนโพลรูปแบบวงกลม เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ง่ายต่อการปรับเพิ่มหรือลดค่าได้ง่ายที่สุด โดยจะทำการปรับเพิ่มและลดค่าของพารามิเตอร์ R ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ดังรูปที่ 3.31 และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ดังรูปที่ 3.32

หลังจากการทำการศึกษาค้นคว้าผลกระทบจากการปรับเพิ่มและลดค่าพารามิเตอร์ R พบว่าพารามิเตอร์นี้มีความเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดท์และค่าอิมพีแดนซ์แมชชิงของ S_{11} , S_{21} , S_{31} และ S_{32} โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ S_{22} และ S_{33} แต่อย่างใด

เมื่อรัศมีมีขนาดใหญ่ขึ้น สายอากาศจะตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ดีขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ R = 20 มม. คือค่าเหมาะสม S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2 – 29.5 GHz โดยที่ S_{22} และ S_{33} ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 11 GHz ในส่วนของ S_{21} , S_{31} และ S_{32} ที่ต่ำกว่า -12 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป



รูปที่ 3.31 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R



รูปที่ 3.32 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R

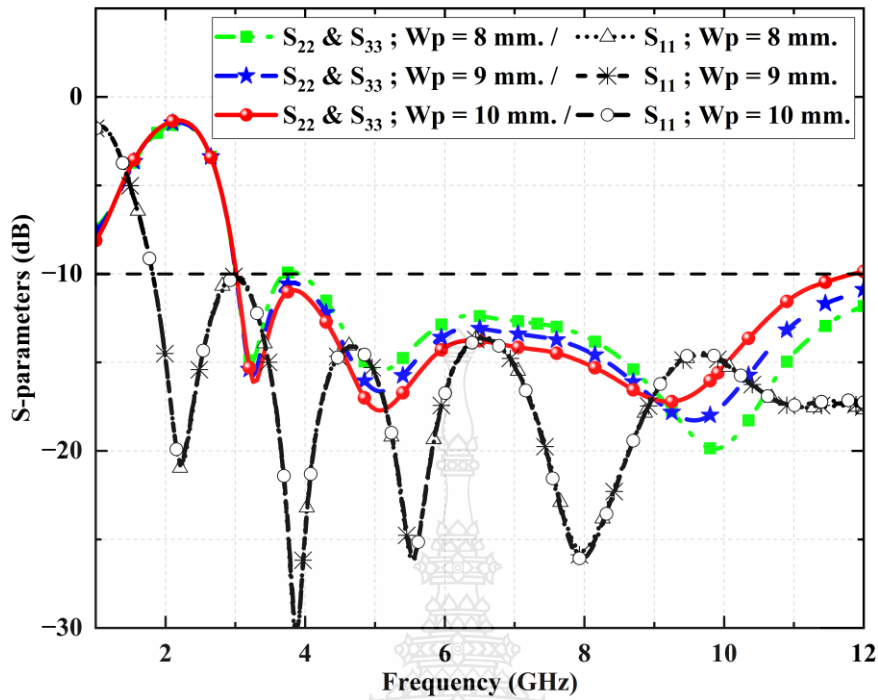
3.6.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_p ของสายอากาศช่องที่มีรูปแบบเป็นแพทช์สี่เหลี่ยม

สืบเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ R ไม่ส่งผลกระทบต่อ S_{22} และ S_{33} ด้วยเหตุแห่งความจำเป็นนี้ ผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อ S_{22} และ S_{33} โดยได้ทำการเลือกประเมินว่าจะเลือกค่าพารามิเตอร์ใดจากโครงสร้างของสายอากาศ จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ W_p เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ช่องว่างมากพอสำหรับการทดสอบและศึกษา

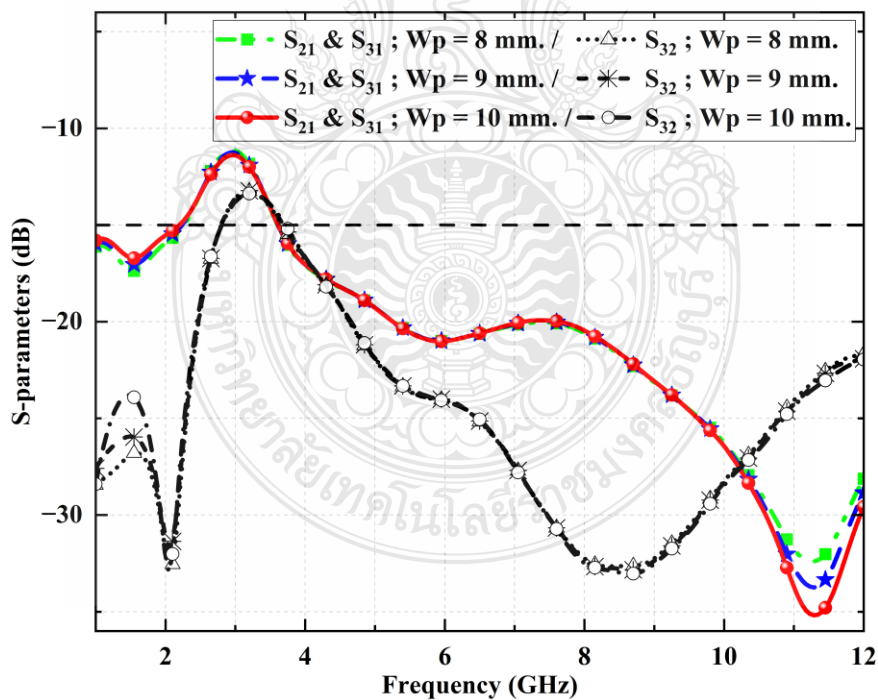
การศึกษาค่าพารามิเตอร์ W_p ความกว้างของสายอากาศช่องที่มีรูปแบบเป็นแพทช์สี่เหลี่ยม โดยจะทำการปรับเพิ่มและลดค่าของพารามิเตอร์ W_p ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ดังรูปที่ 3.33 และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ดังรูปที่ 3.34

หลังจากการทำการศึกษาผลกระทบจากการปรับเพิ่มและลดค่าพารามิเตอร์ W_p พบว่า พารามิเตอร์นี้มีความเกี่ยวข้องกับแบนด์วิดท์และค่าอิมพีแดนซ์แมชชิงของ S_{22} และ S_{33} ส่งผลกระทบต่อค่าอิมพีแดนซ์แมชชิงของ S_{21} และ S_{31} ที่ย่านความถี่สูงเพียงเล็กน้อย และส่งผลกระทบต่อค่าอิมพีแดนซ์แมชชิงของ S_{32} ที่ย่านความถี่ต่ำเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อ S_{11} แต่อย่างใด

เมื่อ W_p มีขนาดความกว้างที่ใหญ่ขึ้น สายอากาศจะตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ดีขึ้น ในขณะที่ความถี่สูงเช่นกัน คือทำให้มีแบนด์วิดท์ที่แคบลงนั่นเอง โดยค่าพารามิเตอร์ $W_p = 10$ มม. คือค่าเหมาะสม S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2 – 29.5 GHz โดยที่ S_{22} และ S_{33} ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 11 GHz ในส่วนของ S_{21} , S_{31} และ S_{32} ที่ต่ำกว่า -12 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป



รูปที่ 3.33 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_p



รูปที่ 3.34 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ W_p

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกับสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด จะถูกนำมาแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ตที่นำเสนอ

| ชื่อพารามิเตอร์ | ขนาด (มม.) | ชื่อพารามิเตอร์ | ขนาด (มม.) |
|-----------------|------------|-----------------|------------|
| W | 64 | L | 70 |
| Wp | 11 | Lp | 6 |
| Wc | 25 | Lc | 9 |
| Wg | 30.5 | Lg | 27 |
| Wf | 2 | R | 20 |
| g | 0.5 | h | 0.056 |
| t | 0.07 | | |

การคำนวณหาแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สามารถหาได้จากสมการ (2.4) ซึ่งจะคำนวณจากกราฟค่าความสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ได้จากการจำลองผล ดังตัวอย่าง

พอร์ตที่ 1

$$BW = f_H - f_L$$

$$= 29.5 - 2 = 27.5 \text{ GHz}$$

คำนวณค่าความถี่กลางดังสมการที่ (2.5)

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{2} + f_L$$

$$= \frac{29.5 - 2}{2} + 2 = 15.75 \text{ GHz}$$

คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ดังสมการที่ (2.6)

$$BW(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\%$$

$$= \left(\frac{29.5 - 2}{15.75} \right) \times 100\% = 174.60\%$$

พอร์ตที่ 2 และ 3

$$\begin{aligned} BW &= f_H - f_L \\ &= 11 - 3 = 8 \text{ GHz} \end{aligned}$$

คำนวณค่าความถี่กลางดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{f_H - f_L}{2} + f_L \\ &= \frac{11 - 3}{2} + 3 = 7 \text{ GHz} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ดังสมการที่ (2.6)

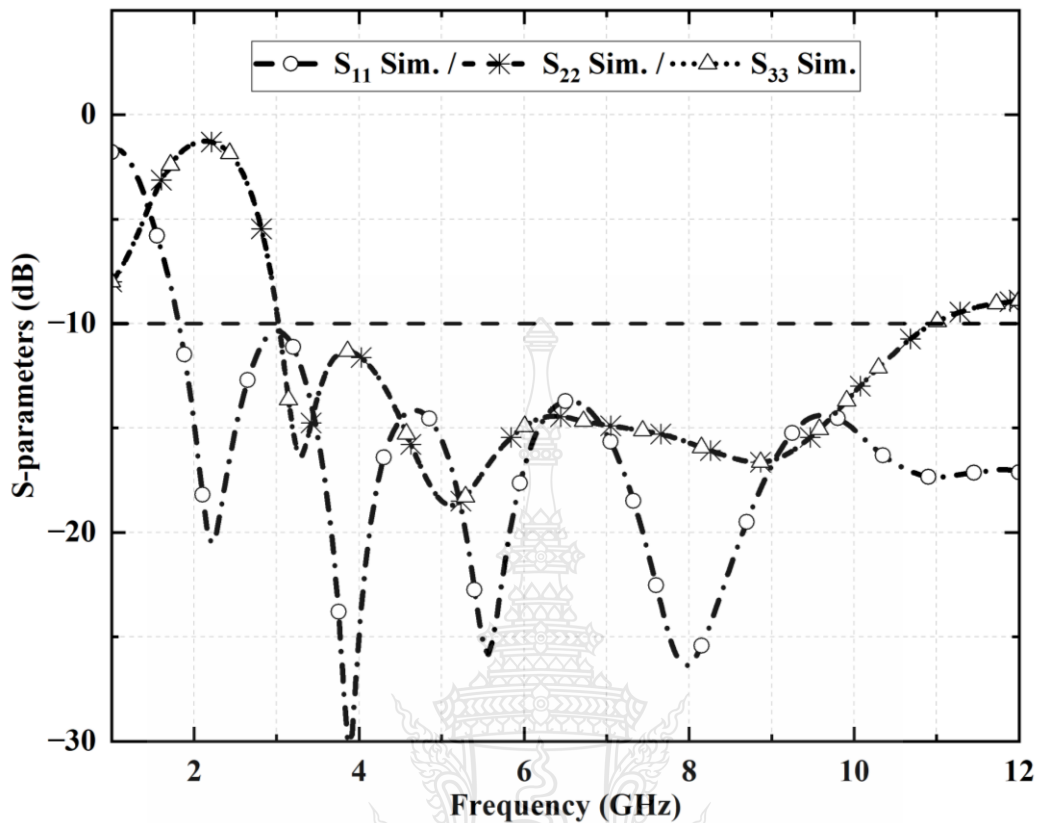
$$\begin{aligned} BW(\%) &= \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \\ &= \left(\frac{11 - 3}{7} \right) \times 100\% = 114.29\% \end{aligned}$$

3.7 ผลการจำลองสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

เมื่อทำการจำลองแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ตด้วยโปรแกรม CST จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}), ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}), ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient), ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay), ความหนาแน่นกระแส (Current density), อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.7.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33})

ในรูปที่ 3.35 แสดงผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ซึ่งในการหาแบนด์วิดท์ของสายอากาศจะคิดจากช่วงที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ มีค่าต่ำกว่า -10 dB โดย S_{11} ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2 – 29.5 GHz หรือความกว้างแถบ 174.60% ในส่วนของ S_{22} และ S_{33} ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 11 GHz หรือความกว้างแถบ 114.29% ทำให้สายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของระบบอัลตราไวด์แบนด์

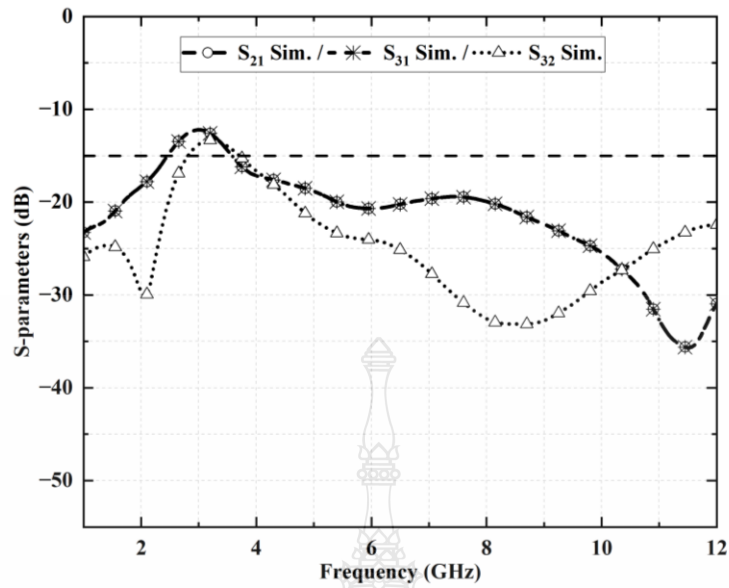


รูปที่ 3.35 ผลการจำลองค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

3.7.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32})

ในรูปที่ 3.36 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ซึ่งจะพบว่ามีค่าต่ำกว่า -12 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป

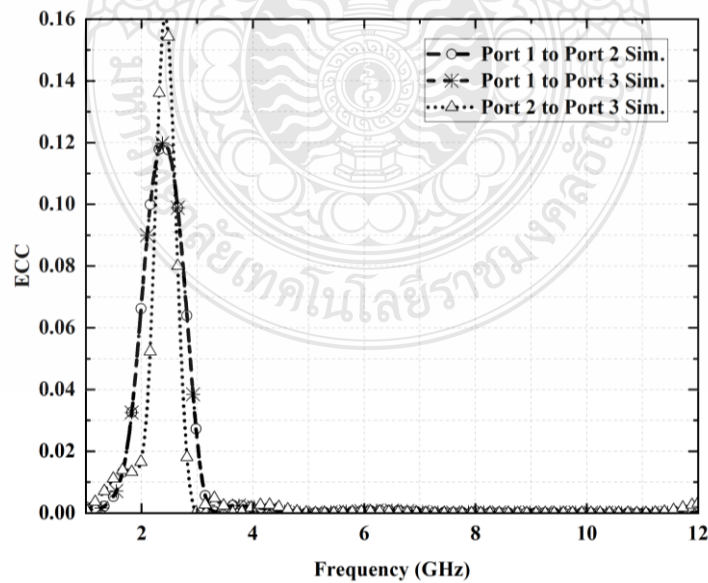
ในทางทฤษฎีนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่ยอมรับได้และบ่งบอกว่าสายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันนั้น ต้องมีค่าต่ำกว่า -15 dB ด้วยขีดจำกัดทางโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ ทำให้ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพอร์ตที่ 1 จึงไม่มีทางที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้



รูปที่ 3.36 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

3.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

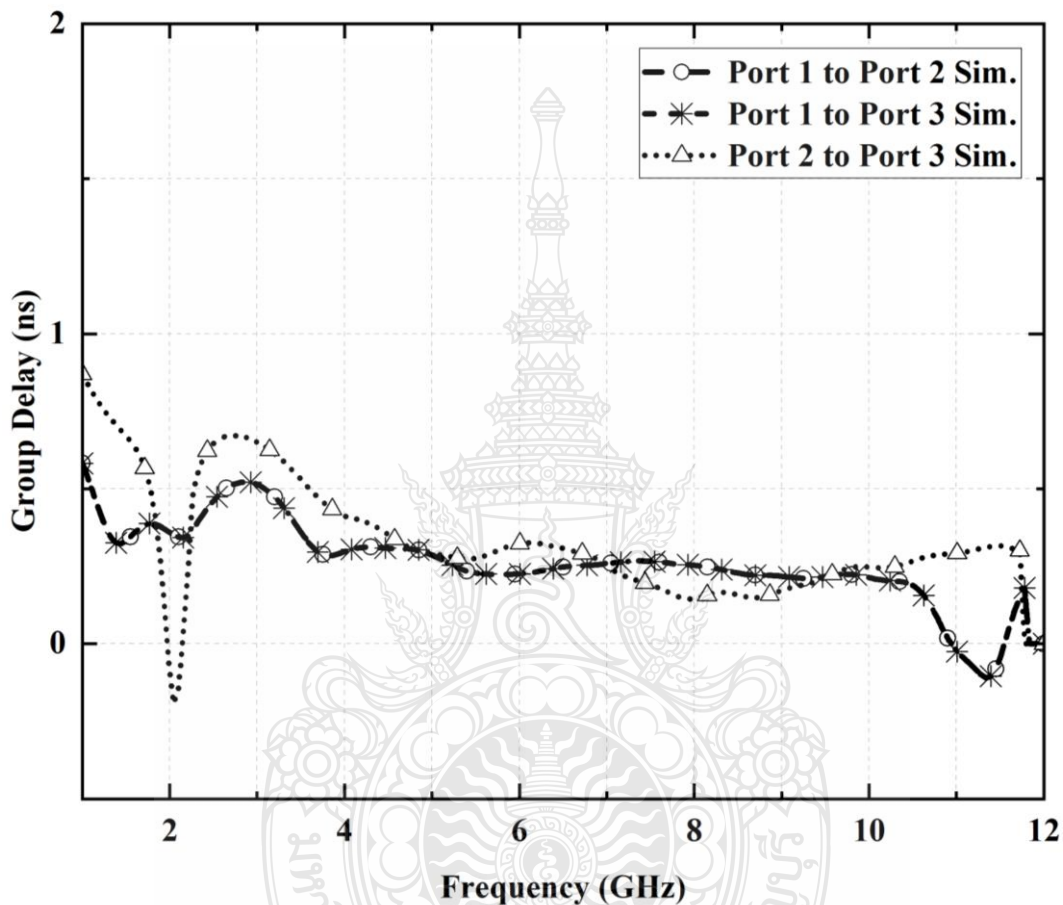
จากรูปที่ 3.37 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต โดยค่าที่ยอมรับได้นั้นจะต้องต่ำกว่า 0.5 สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้สายอากาศทั้งสามพอร์ตนั้น สามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกันและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน



รูปที่ 3.37 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

3.7.4 ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

จากรูปที่ 3.38 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า 1 ns. หรือน้อยกว่าค่ามาตรฐาน 2 ns. ซึ่งทำให้การรับ-ส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยที่สุด



รูปที่ 3.38 ผลการจำลองค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

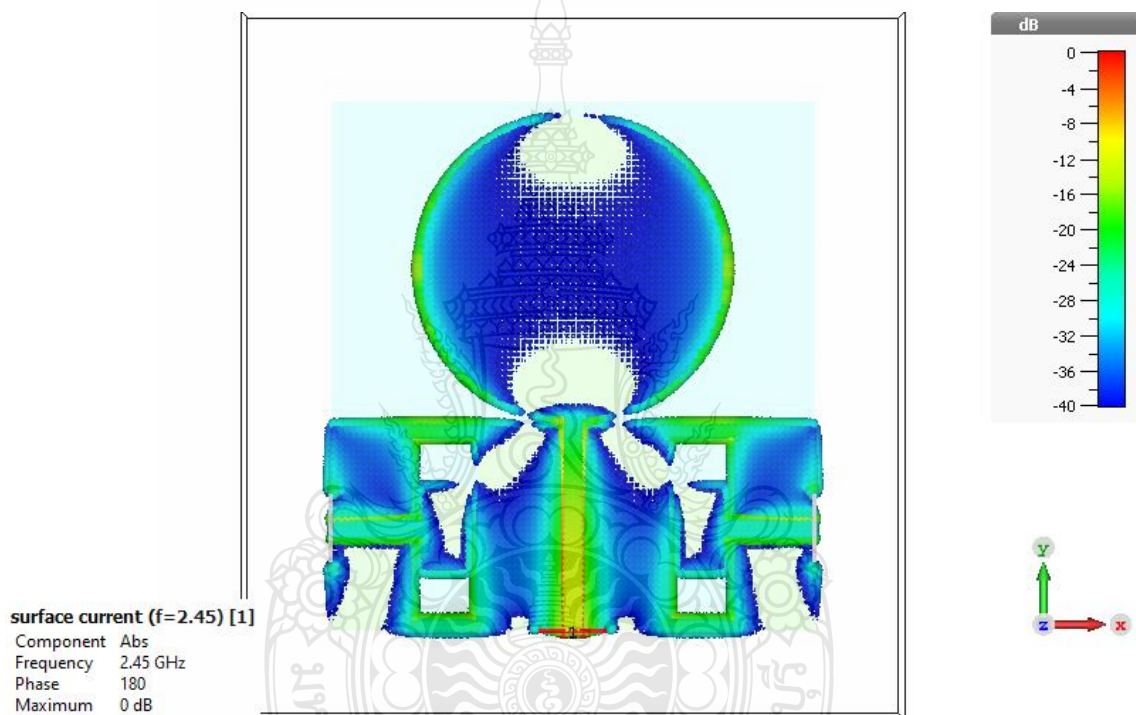
3.7.5 ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

สืบเนื่องจากข้อ 3.7.2 ที่ได้กล่าวไว้ว่า “ขีดจำกัดทางโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ ทำให้ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพอร์ตที่ 1 จึงไม่มีทางที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้” นั้น เป็นที่มาของการนำเสนอที่แสดงให้เห็นถึงค่าความหนาแน่นของกระแส (Current density)

รูปที่ 3.39 ถึง 3.43 จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz, 5.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 โดยจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 ได้แผ่กระจายออกไปที่ตัวของ

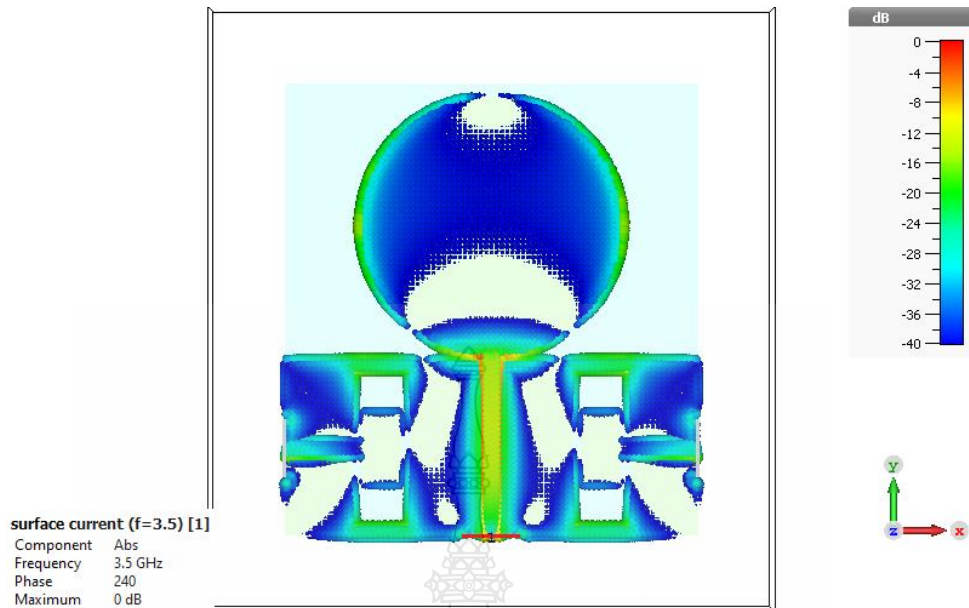
สายอากาศช่องรูปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมพอร์ตที่ 2 และ 3 ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นไม่สามารถที่จะทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้

รูปที่ 3.44 ถึง 3.53 จะแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz, 5.5 GHz, 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 และ 3 โดยจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตสองเป็นอิสระต่อกันและกัน แต่ไม่เป็นอิสระต่อพอร์ตที่ 1 เนื่องจากพอร์ตที่ 2 และ 3 มองว่าสายนำสัญญาณของพอร์ตที่ 1 เป็นสัดับ โดยสังเกตได้ปริมาณความหนาแน่นของกระแสบริเวณดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นไม่สามารถที่จะทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้

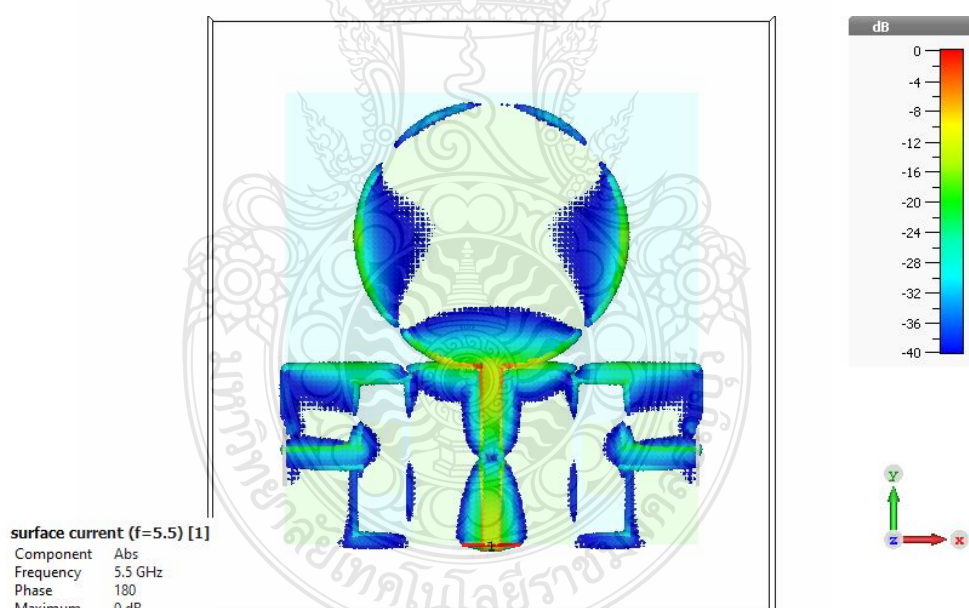


รูปที่ 3.39 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.39 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 180°

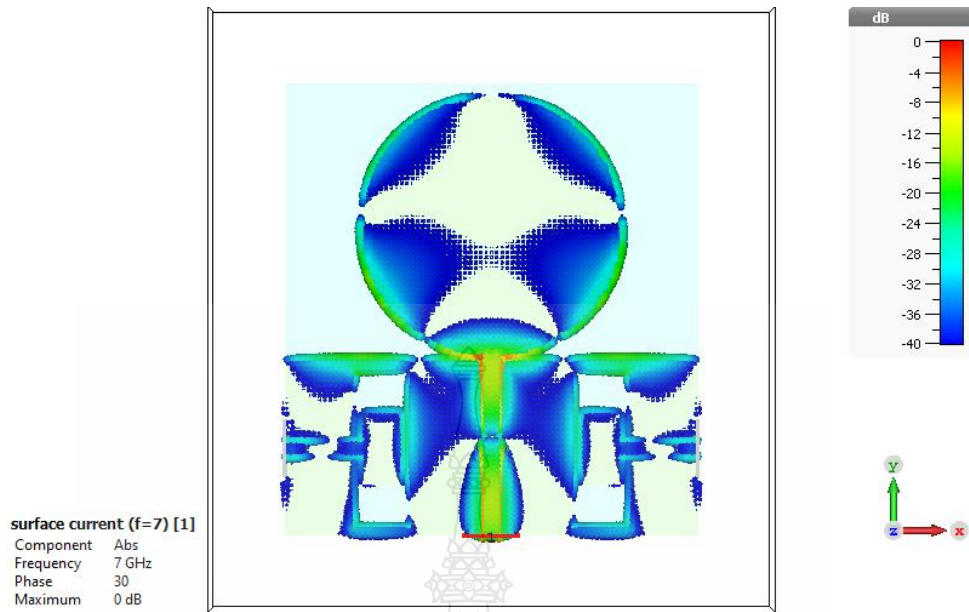


รูปที่ 3.40 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

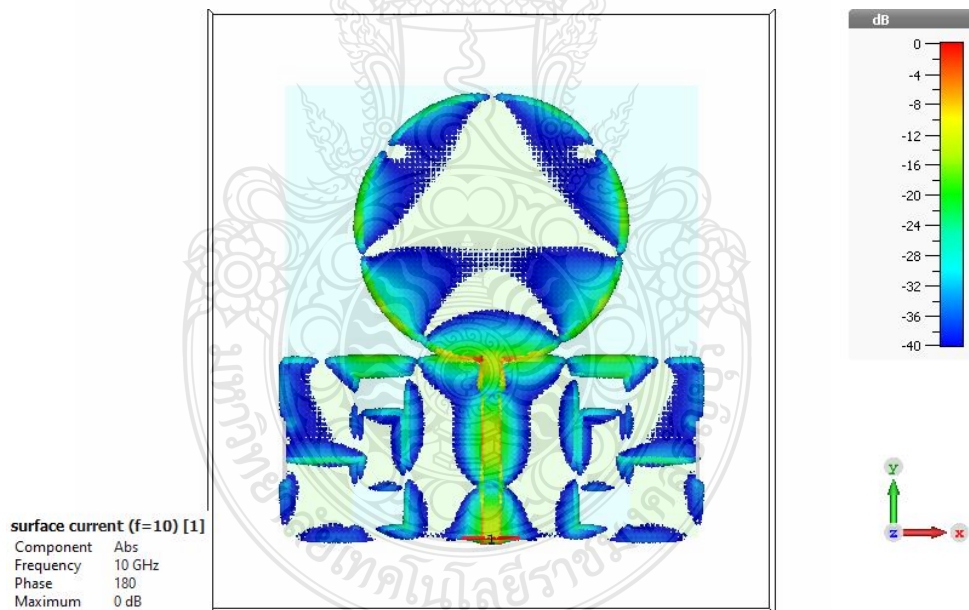


รูปที่ 3.41 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.40 และ 3.41 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 240° และ 180° ตามลำดับ

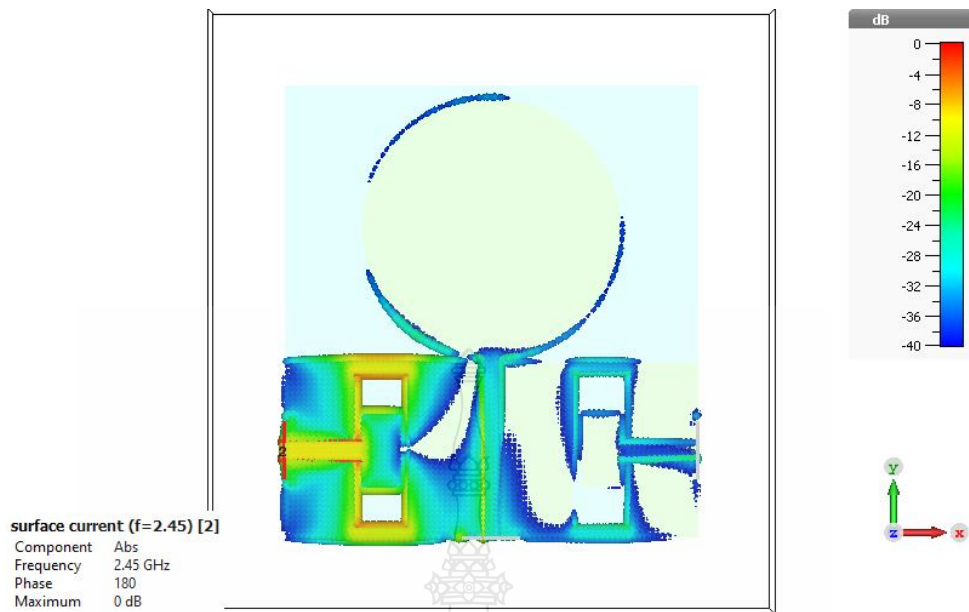


รูปที่ 3.42 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1



รูปที่ 3.43 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.42 และ 3.43 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 1 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 30° และ 180° ตามลำดับ

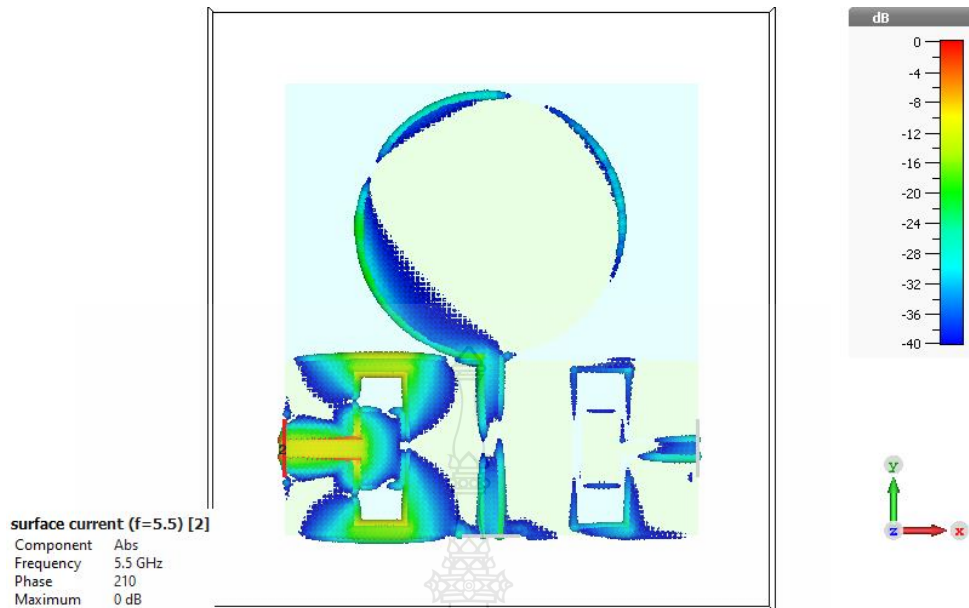


รูปที่ 3.44 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.45 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.44 และ 3.45 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 180° และ 60° ตามลำดับ

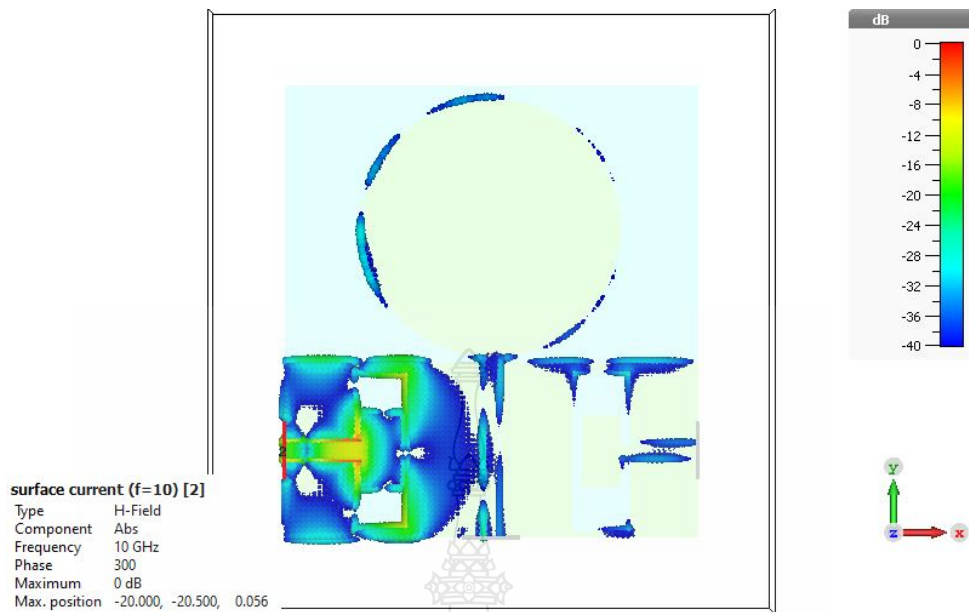


รูปที่ 3.46 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

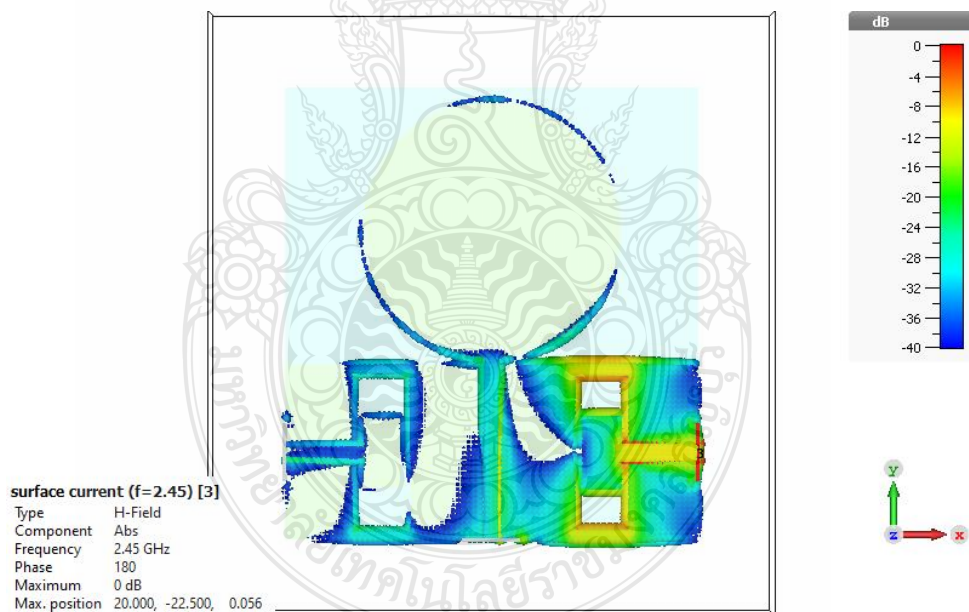


รูปที่ 3.47 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.46 และ 3.47 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz และ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 2 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 2 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 210° และ 240° ตามลำดับ

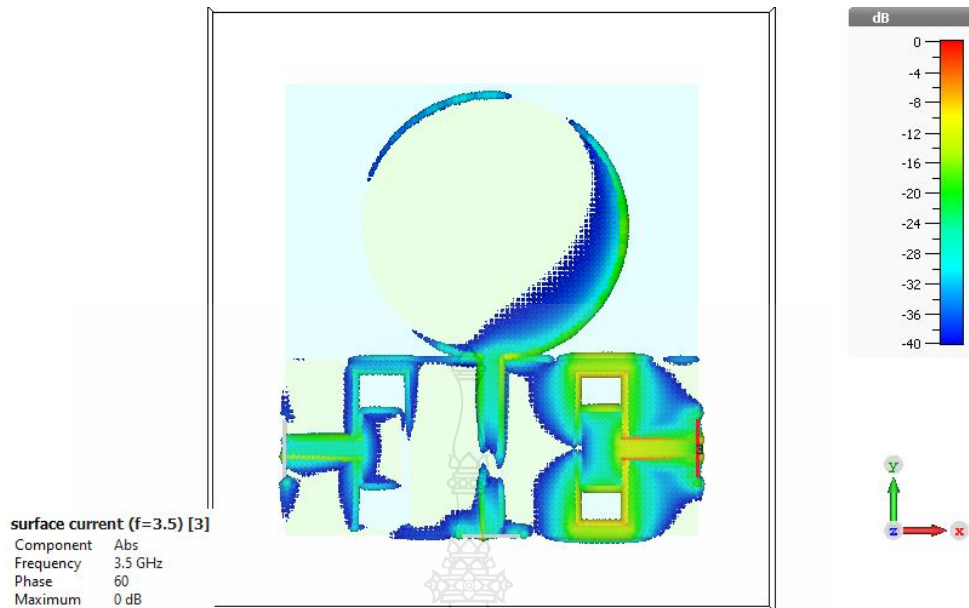


รูปที่ 3.48 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.49 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 2.45 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 3.48 ถึง 3.49 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของพอร์ตที่ 2 และที่ความถี่ 2.45 GHz ของพอร์ตที่ 3 ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จะพบว่ามีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 300° และ 180° ตามลำดับ

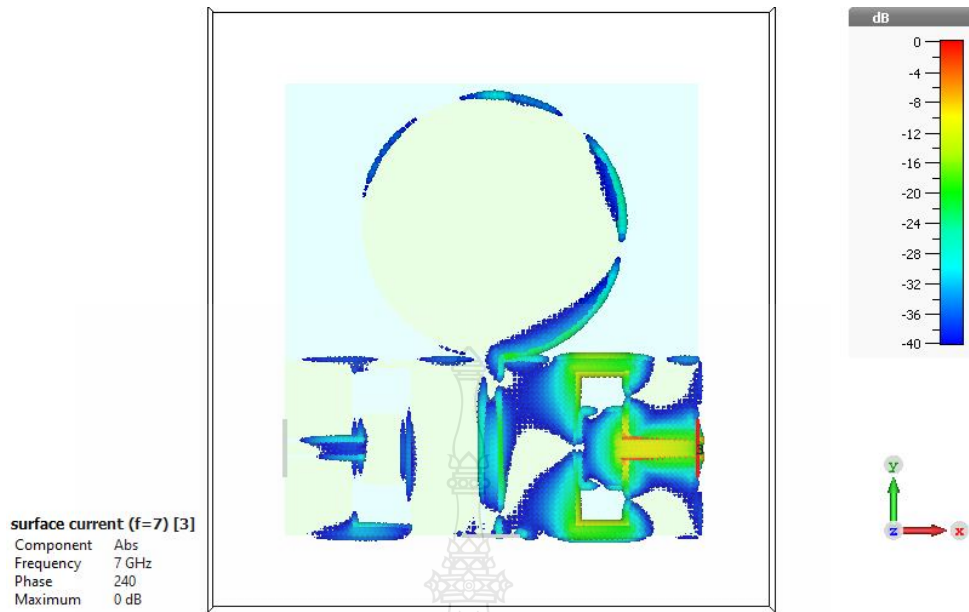


รูปที่ 3.50 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

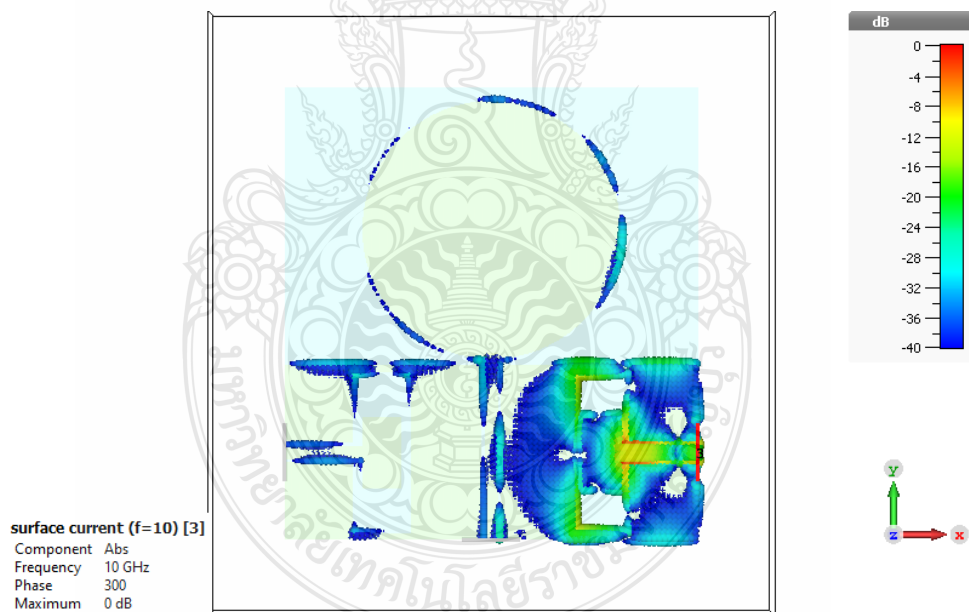


รูปที่ 3.51 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 3.50 และ 3.51 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 3 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 3 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 60° และ 210° ตามลำดับ



รูปที่ 3.52 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3



รูปที่ 3.53 ผลการจำลองความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

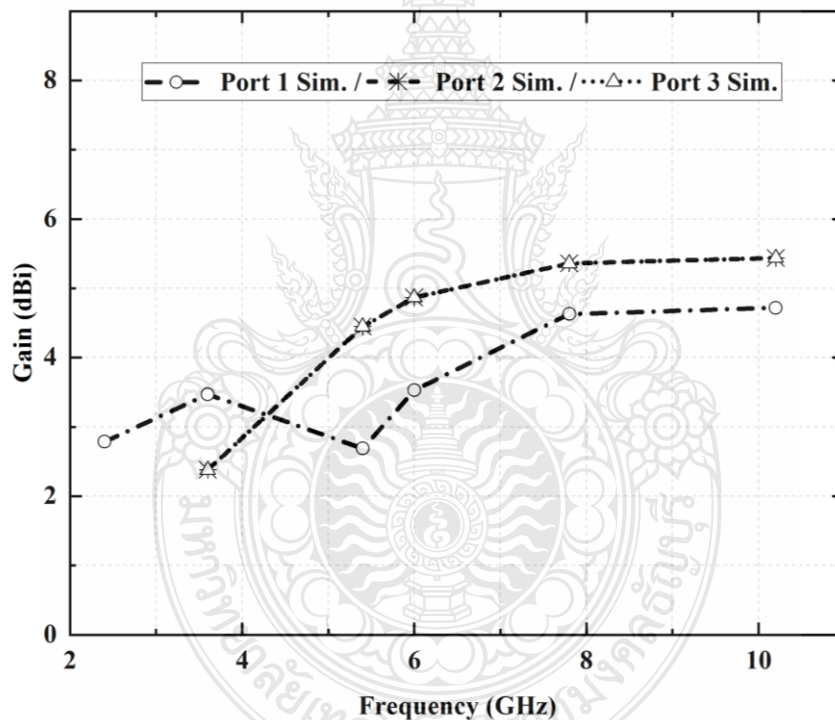
จากรูปที่ 3.52 และ 3.53 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแส (Current density) ที่ความถี่ 7 GHz และ 10 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ของพอร์ตที่ 3 จะพบว่าความหนาแน่นของกระแสของพอร์ตที่ 3 มีความหนาแน่นสูงสุดที่มุม 240° และ 300° ตามลำดับ

3.7.6 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

ผลการจำลองอัตราขยายสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต โดยทำการจำลองผลพอร์ตที่ 1 ที่ความถี่ 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6.0 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ค่าอัตราขยายมีค่าอยู่ในช่วง 2.787 – 4.72 dBi ในส่วนของการจำลองผลพอร์ตที่ 2 และ 3 ที่ความถี่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6.0 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ค่าอัตราขยายมีค่าอยู่ในช่วง 2.38 – 5.44 dBi ดังรูปที่ 3.54

อัตราขยายของพอร์ตที่ 1 จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นที่ย่านความถี่สูง โดยมีอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ 4.72 dBi ที่ความถี่ 10.2 GHz เว้นเสียแต่ว่าในช่วงความถี่ 5.4 GHz ค่าอัตราขยายจะมีค่าที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแผ่พลังงานจากแบบรอบทิศทางเป็นแบบหลายทิศทางซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

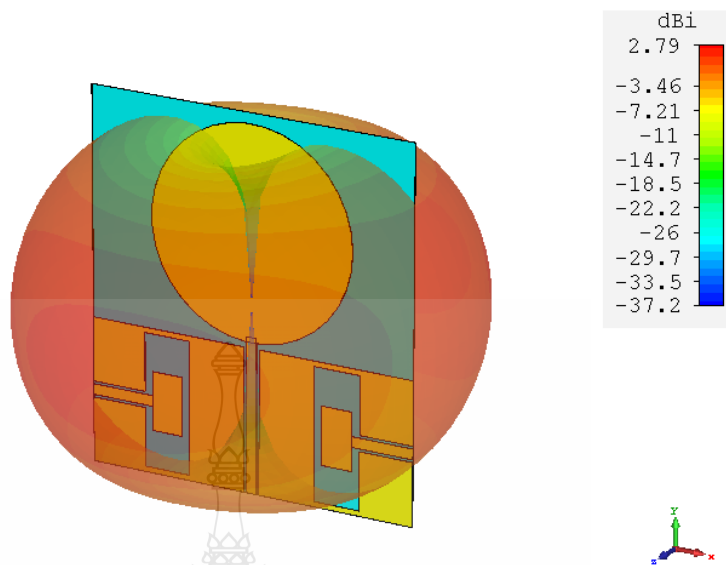
อัตราขยายของพอร์ตที่ 2 และ 3 จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นที่ย่านความถี่สูง โดยมีอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ 5.44 dBi ที่ความถี่ 10.2 GHz



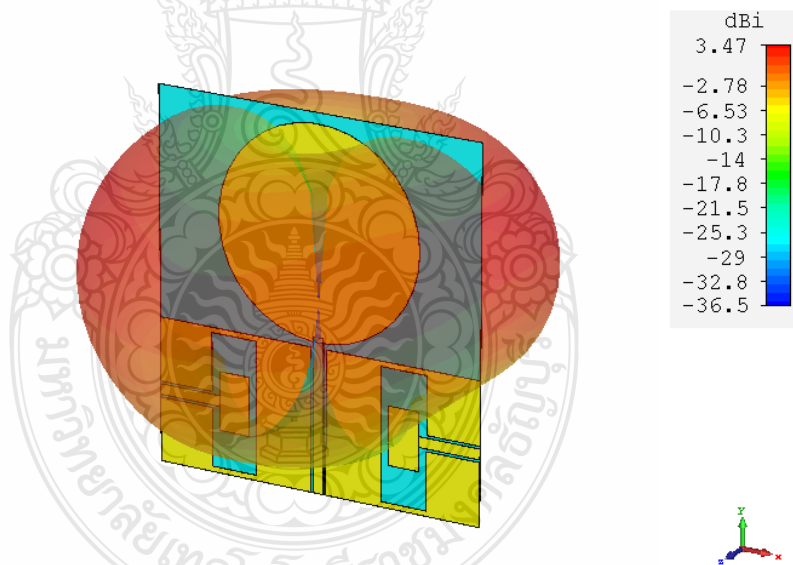
รูปที่ 3.54 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

3.7.7 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.55 ถึง 3.60 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) แบบ 3 มิติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ที่ความถี่ 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5.4 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละช่วงความถี่

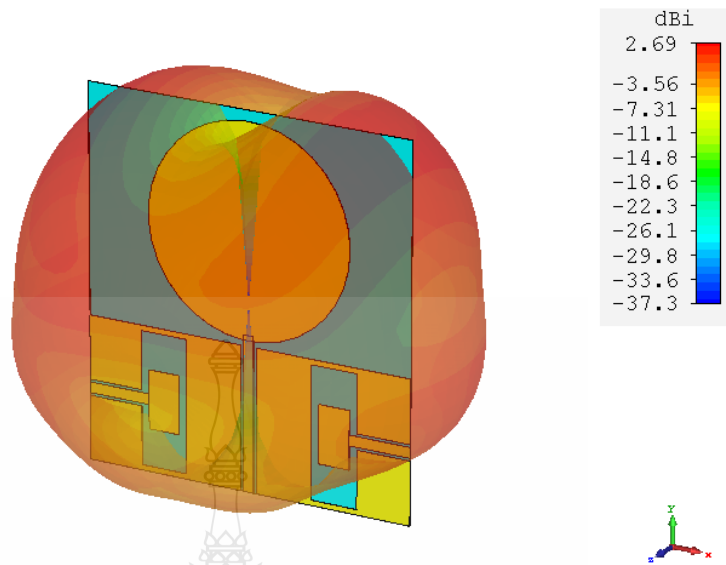


รูปที่ 3.55 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

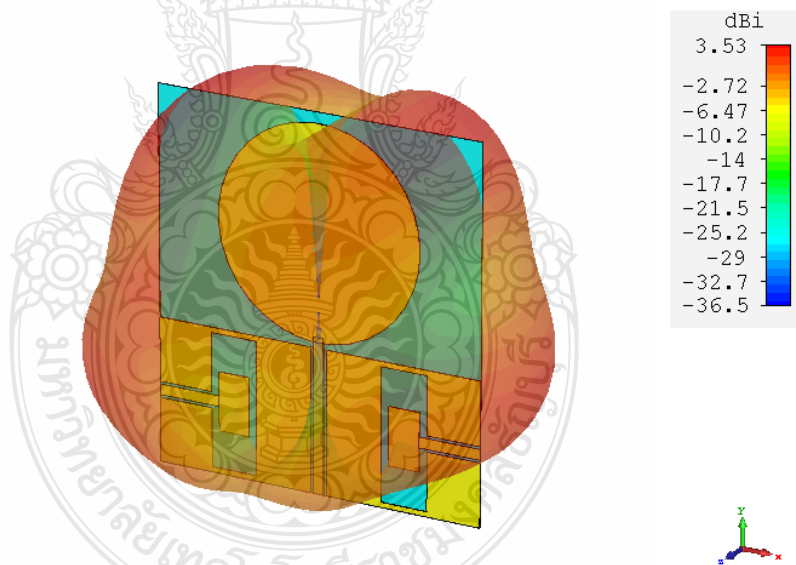


รูปที่ 3.56 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.55 และ 3.56 ที่ช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 3.6 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบรอบทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.79 dBi และ 3.47 dBi ตามลำดับ

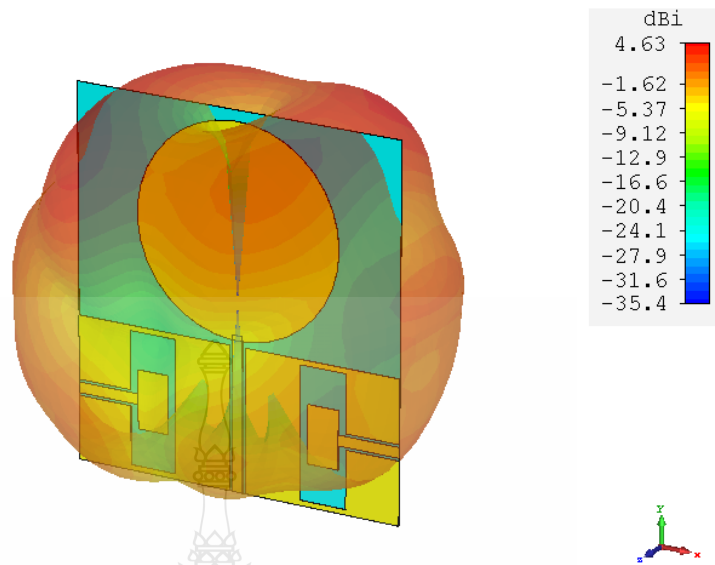


รูปที่ 3.57 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

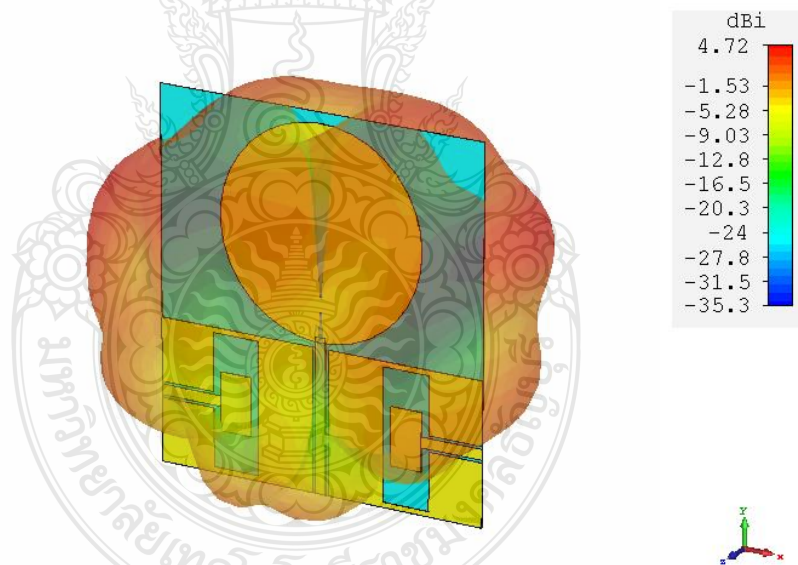


รูปที่ 3.58 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.57 และ 3.50 ที่ช่วงความถี่ 5.4 GHz และ 6 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.69 dBi และ 3.53 dBi ตามลำดับ



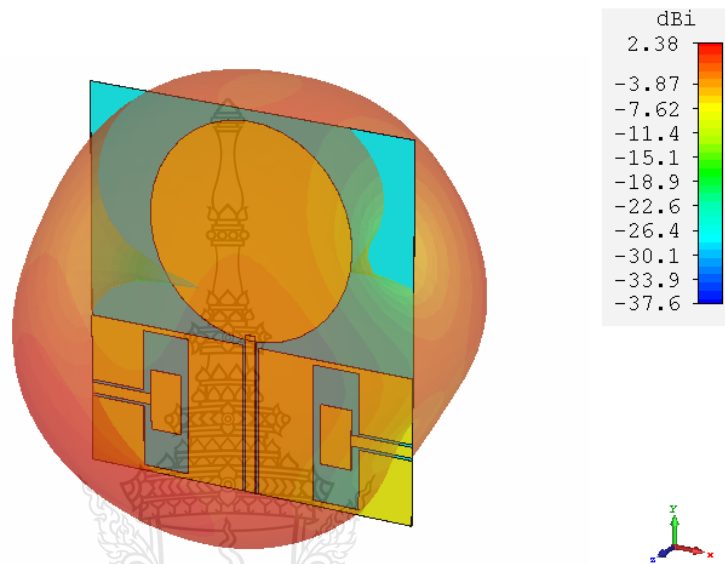
รูปที่ 3.59 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1



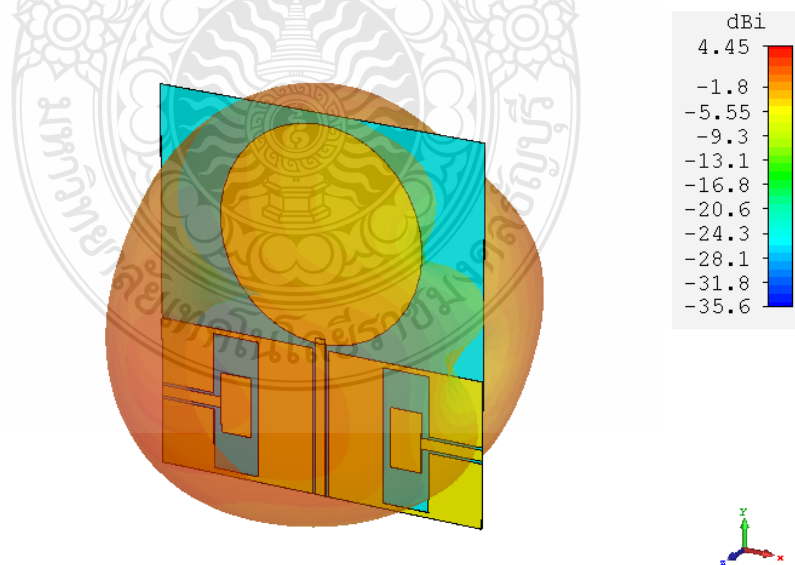
รูปที่ 3.60 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 3.59 ถึง 3.60 ที่ช่วงความถี่ 7.8 GHz และ 10.2 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบรอบทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.63 dBi และ 4.72 dBi ตามลำดับ

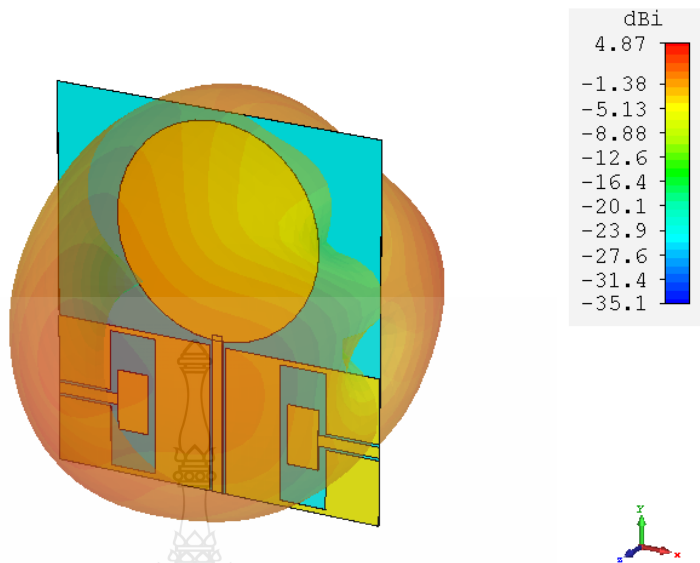
3.7.8 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ของสายอากาศพอร์ตที่ 2 และ 3
 จากรูปที่ 3.61 ถึง 3.70 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) แบบ 3 มิติ
 ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 และ 3 ที่ความถี่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 7.8 GHz และ
 10.2 GHz ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



รูปที่ 3.61 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz
 ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.62 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz
 ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

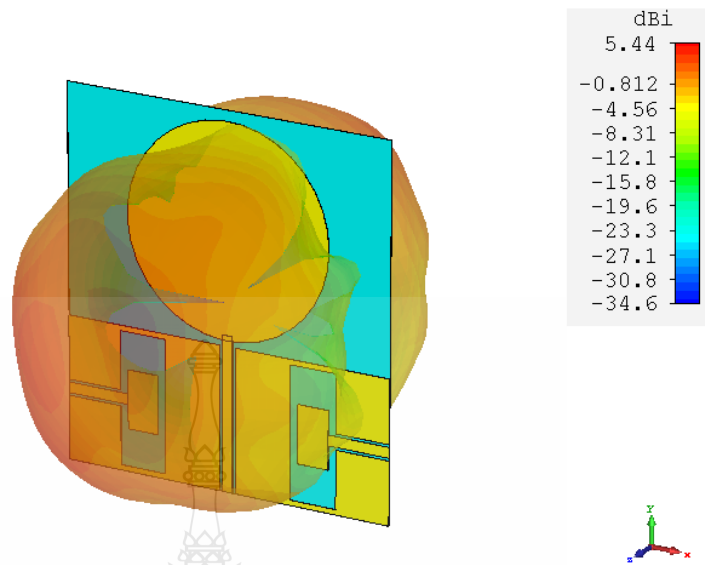


รูปที่ 3.63 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

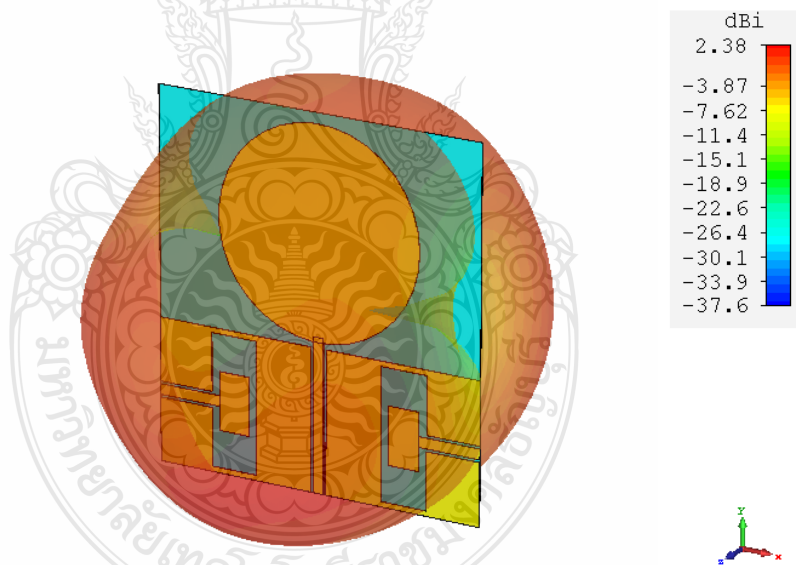


รูปที่ 3.64 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 3.61, 3.62, 3.63 และ 3.64 ที่ช่วงความถี่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6 GHz และ 7.8 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.38 dBi, 4.45 dBi, 4.87 dBi และ 5.36 dBi ตามลำดับ

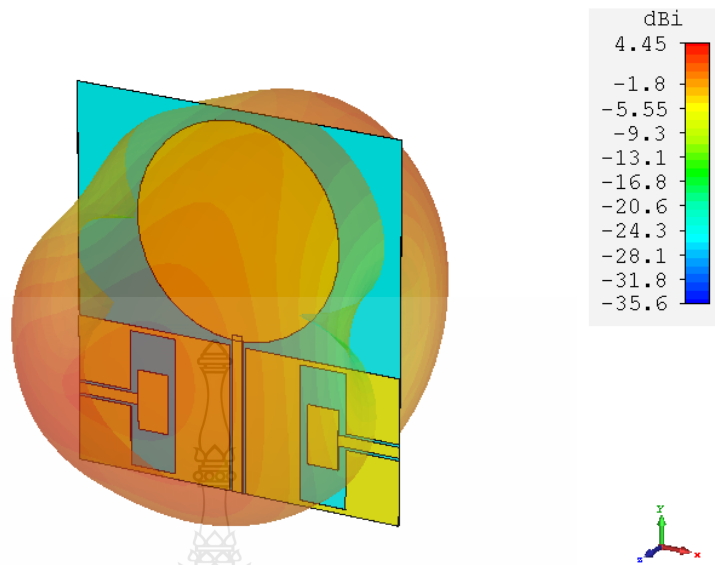


รูปที่ 3.65 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 3.66 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 3.66 และ 3.65 ที่ช่วงความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 และที่ช่วงความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.44 dBi และ 2.38 ตามลำดับ

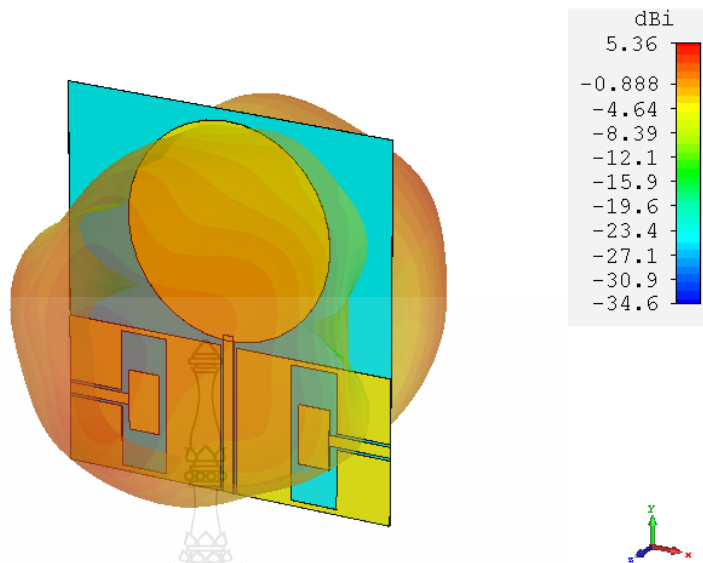


รูปที่ 3.67 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

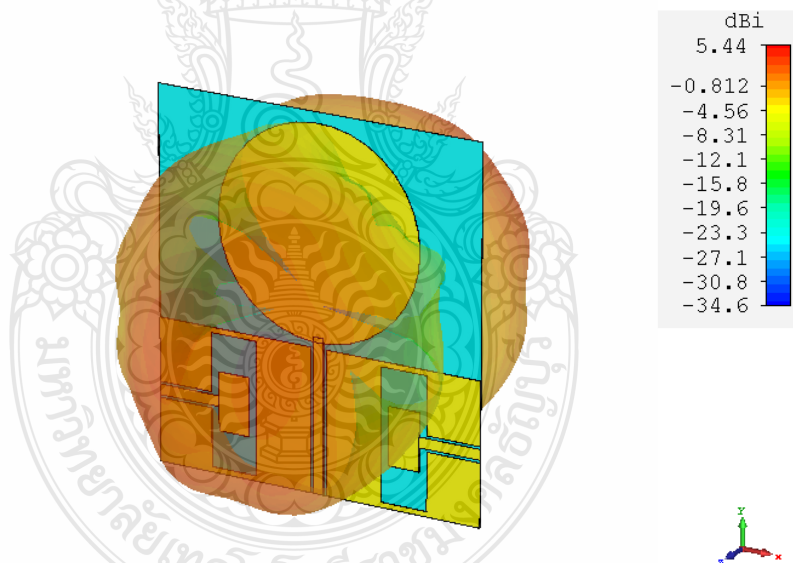


รูปที่ 3.68 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 3.67 และ 3.68 ที่ช่วงความถี่ 5.4 GHz และ 6 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 dBi และ 4.87 dBi ตามลำดับ



รูปที่ 3.69 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3



รูปที่ 3.70 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 3.69 และ 3.70 ที่ช่วงความถี่ 7.8 GHz และ 10.2 GHz สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 จะมีแบบรูปการแผ่พลังงานคล้ายแบบหลายทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นมาเป็นช่วงความถี่สูง มีค่าอัตราขยายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.36 dBi และ 5.44 dBi ตามลำดับ

3.8 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย

สายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย เริ่มต้นจากการนำฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ที่ถูกใช้เป็นวัสดุฐานร่อนนำมาวัดเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบ นำมาคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจะค่าเริ่มต้นในการออกแบบเท่านั้น เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างในจุดต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด (Optimize) จึงอาจจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างออกไปจากค่าที่ได้ในขั้นตอนการคำนวณ ร่วมกับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะได้โครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต โดยมีรูปร่างสายอากาศเป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม ที่มีการป้อนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม และมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 27×64 มม.² ขนาดความกว้างและความยาวของส่วนอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.1 จากนั้นจึงทำการออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ในการออกแบบจะทำได้โดยการจัดวางสายอากาศโมโนโพล รูปร่างแพทช์วงกลม อยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 64×70 มม.² ขนาดความกว้างและความยาวของส่วนอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.2

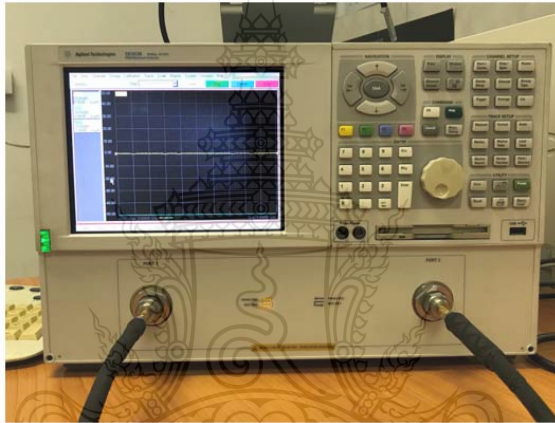


บทที่ 4

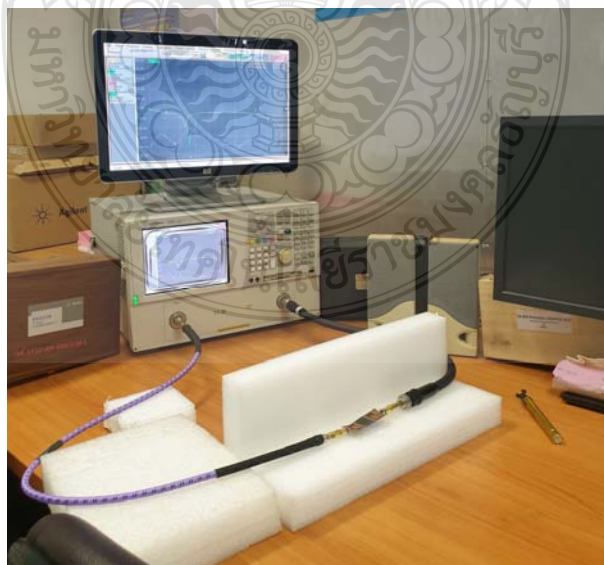
การทดสอบและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

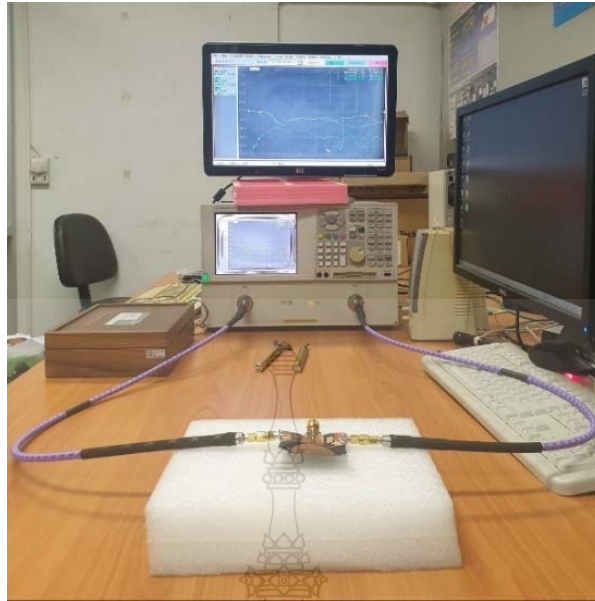
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา เช่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation pattern) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ดังที่แสดงในรูป 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B



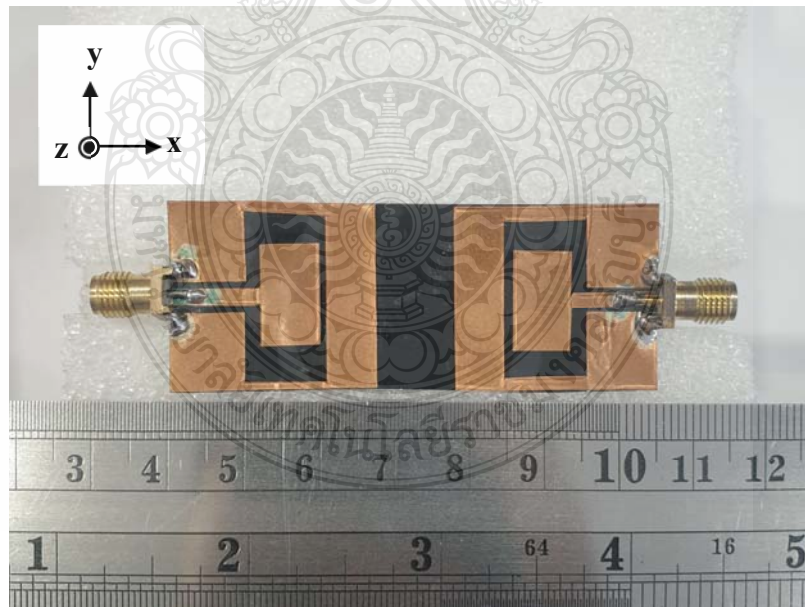
รูปที่ 4.2 การวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



รูปที่ 4.3 การวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

4.2 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

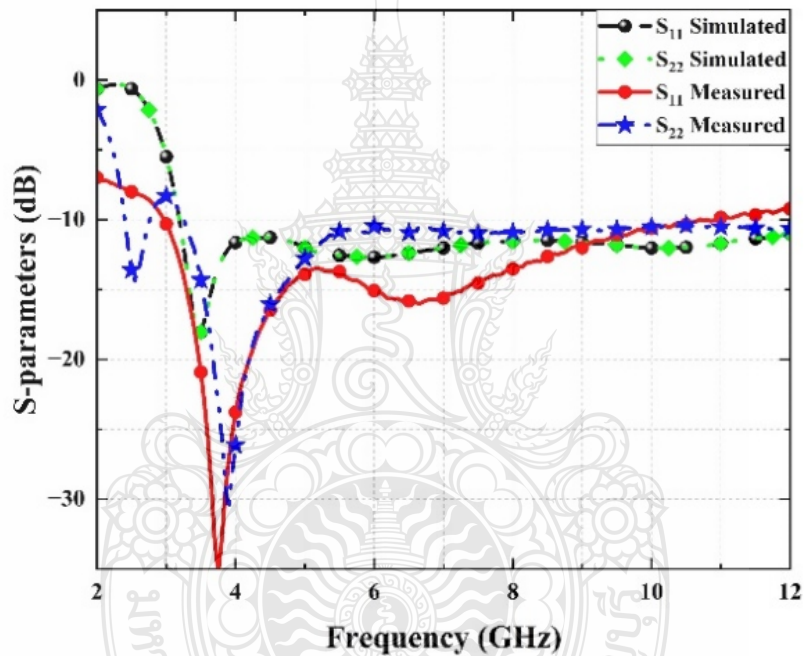
สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ $27 \times 64 \text{ มม.}^2$ ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นฟิล์มกรองแสงติตรอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

4.2.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22})

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 12 GHz หรือความกว้างแถบ 92.31% จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นนั้น มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.9 – 10.85 GHz หรือความกว้างแถบ 115.64% สำหรับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22}) มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 – 12 GHz หรือความกว้างแถบ 92.31% โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่มีความคล้ายคลึงกับค่าที่ทำการออกแบบ ยังคงมีช่วงความถี่ที่ครอบคลุมสำหรับการใช้งาน UWB

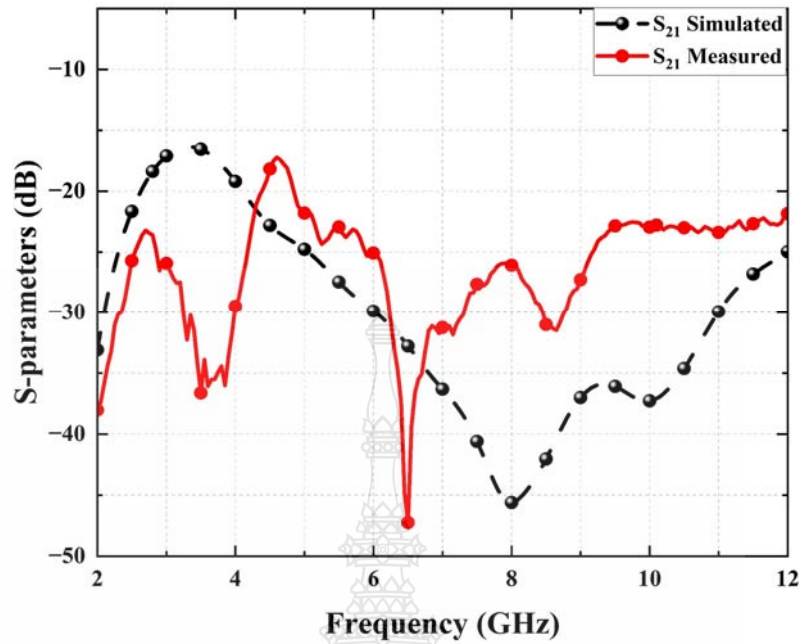


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} และ S_{22})

ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

4.2.2 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21})

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB ทุกช่วงความถี่ จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ต่ำกว่า -15 dB ตลอดช่วงความถี่เช่นกัน โดยรวมแล้วค่าที่วัดได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบไว้



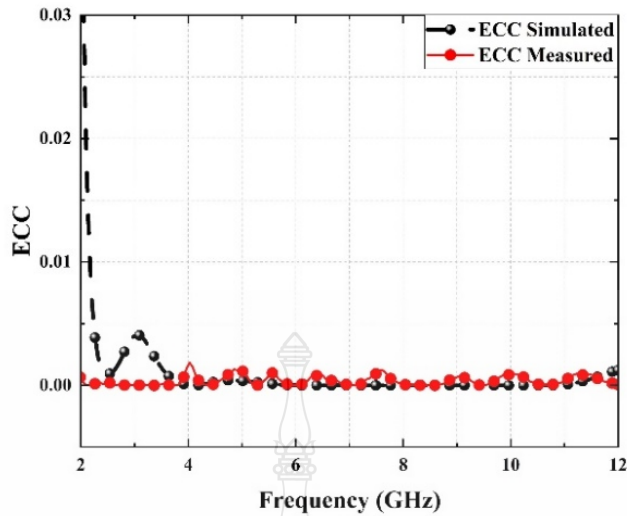
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

4.2.3 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้น จะสามารถคำนวณจากสมการ (2.9) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสายอากาศนี้จะมีค่าต่ำกว่า 1.0 ตลอดย่านการใช้งาน แต่ค่าที่ยอมรับนั้นจะต้องต่ำกว่า 0.5 ซึ่งจะทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)]}$$

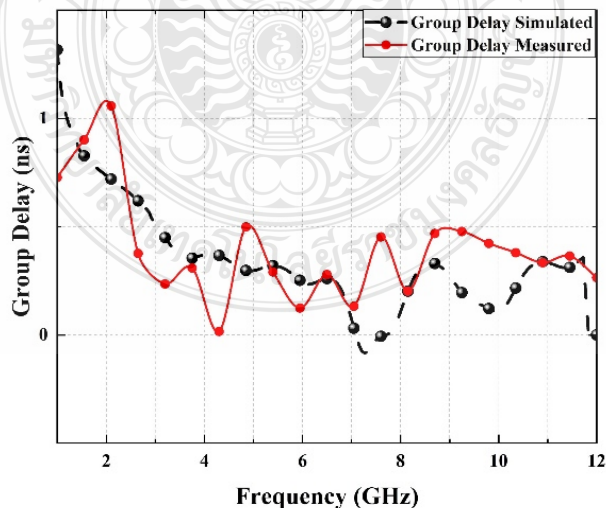
จากรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต มีค่าน้อยกว่า 0.5 ตลอดย่านการใช้งาน ทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลอง ผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

4.2.4 ผลของการวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

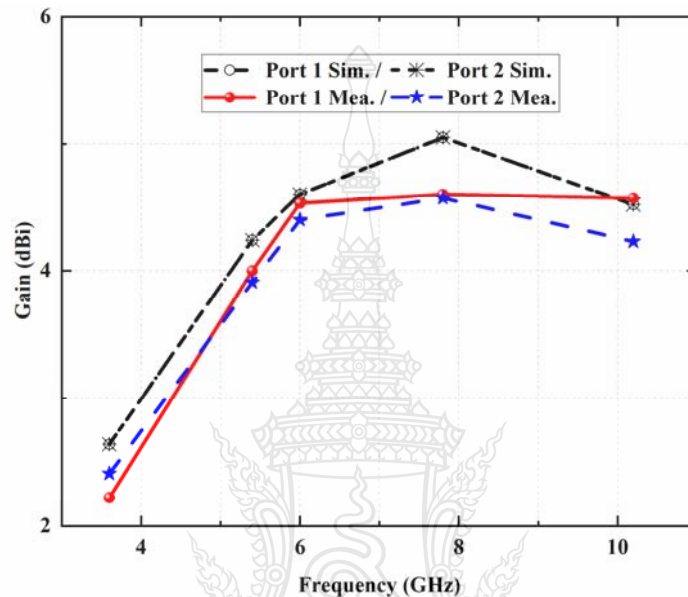
ในขั้นตอนการรับส่งข้อมูลในช่วงความถี่อัลตราไวด์แบนด์ อีกพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญคือ ค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 2 ns. จึงจะทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ในการวัดค่าจะใช้ฟังก์ชันของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B ในการวัดผล จากรูปที่ 4.8 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต นั้นมีค่าต่ำกว่า 2 ns. ทั้ง 2 ตัว ซึ่งจะทำให้การรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพัลส์น้อยที่สุด



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

4.2.5 ผลของการวัดทดสอบค่าอัตราขยาย (Gain)

ในการวัดทดสอบค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จะทำการติดตั้งสายอากาศเข้าต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) โดยจะทำการวัดทดสอบครั้งละหนึ่งพอร์ตและนำอีกหนึ่งพอร์ตที่เหลือต่อเข้ากับโหลด $50\ \Omega$ และจะทำการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการที่ (2.2) หรือ (2.3)



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต

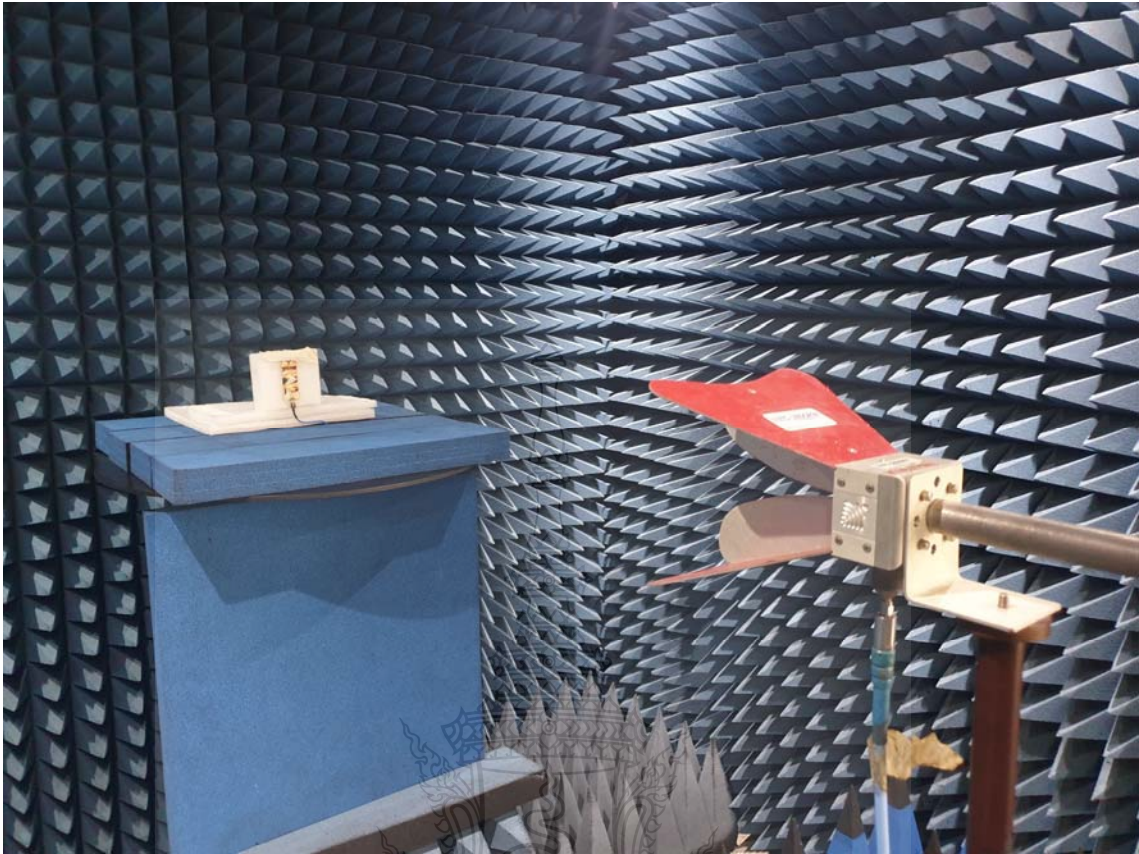
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองผลและการวัดค่าชิ้นงานจริงในช่วงความถี่ 3.6 – 10.2 GHz โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในช่วงความถี่สูง สายอากาศมีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 2.22 – 4.6 dBi

4.2.6 ผลของการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation Pattern)

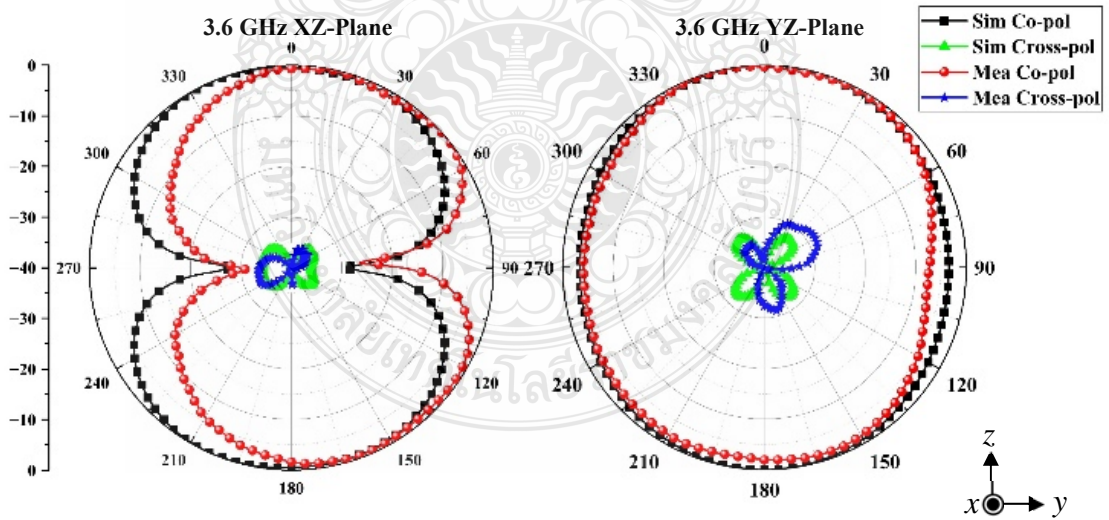
ในขั้นตอนการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น จะทำการติดตั้งสายอากาศและเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ดังรูปที่ 4.10 โดยจะทำการวัดสายอากาศครั้งละหนึ่งพอร์ตและต่อโหลด $50\ \Omega$ เข้ากับพอร์ตที่เหลือ จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)

ทำการเชื่อมต่อพอร์ตที่ 1 จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับสายอากาศที่จะทำการวัดผลและเชื่อมต่อพอร์ตที่ 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับสายอากาศรูปปากแตร (Horn Antenna)

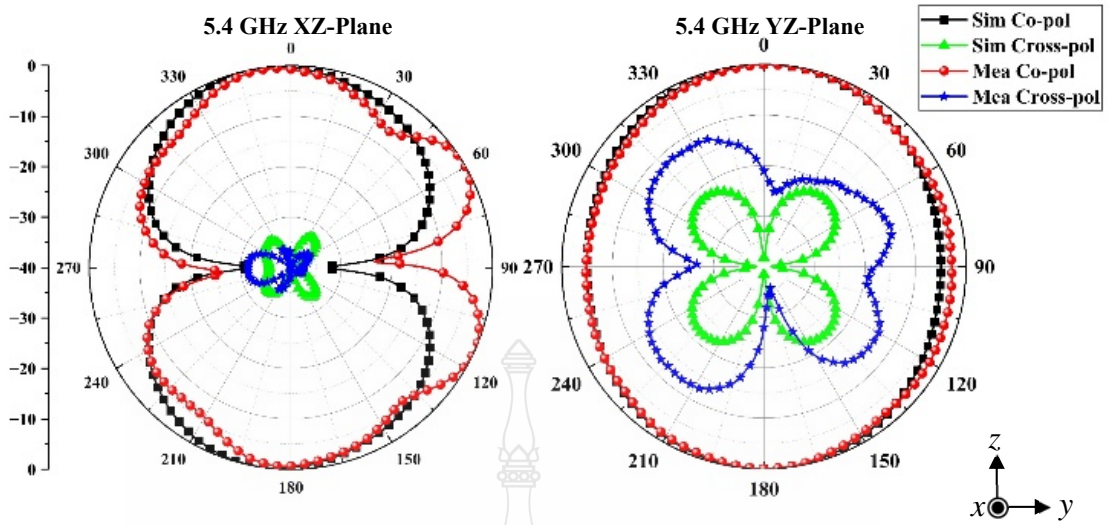
จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.20 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)



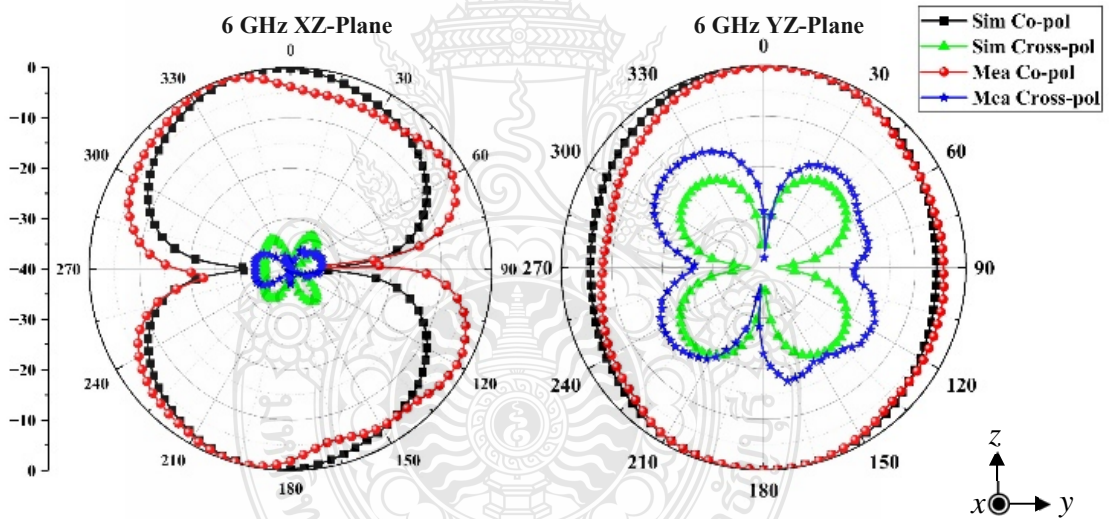
รูปที่ 4.10 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต



รูปที่ 4.11 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

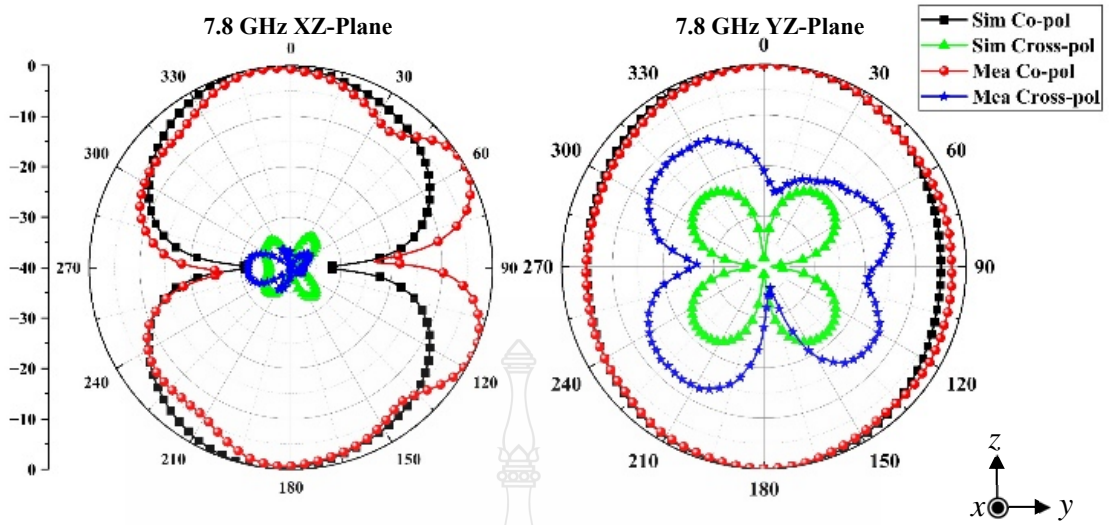


รูปที่ 4.12 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

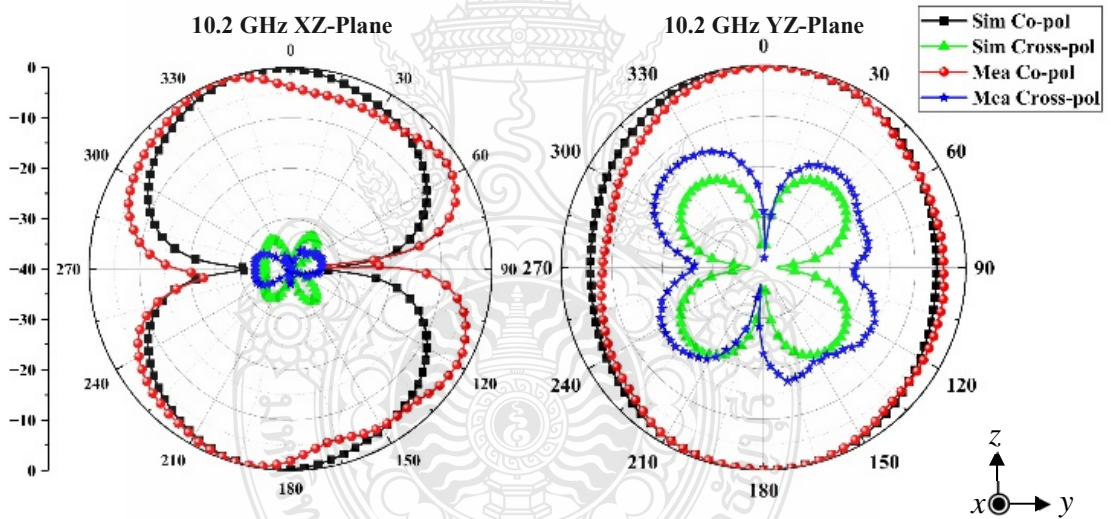


รูปที่ 4.13 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 3.6 GHz, 5.4 GHz และ 6.0 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

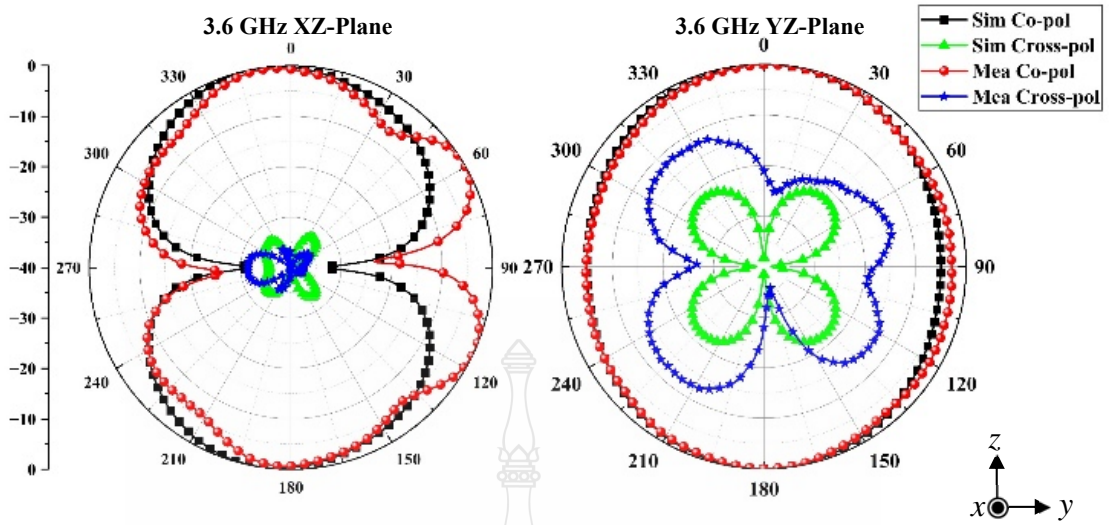


รูปที่ 4.14 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

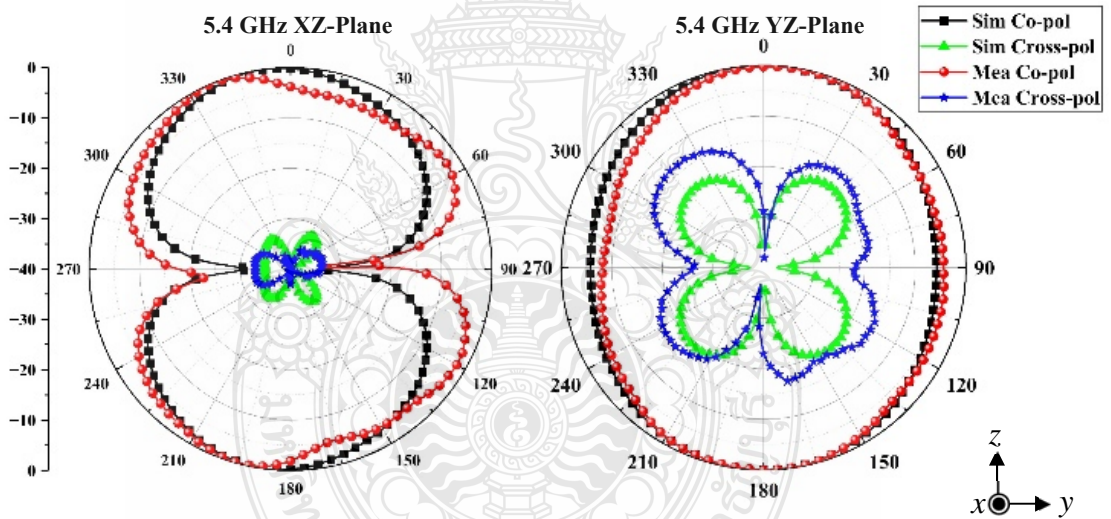


รูปที่ 4.15 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.15 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 7.8 GHz และ 10.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

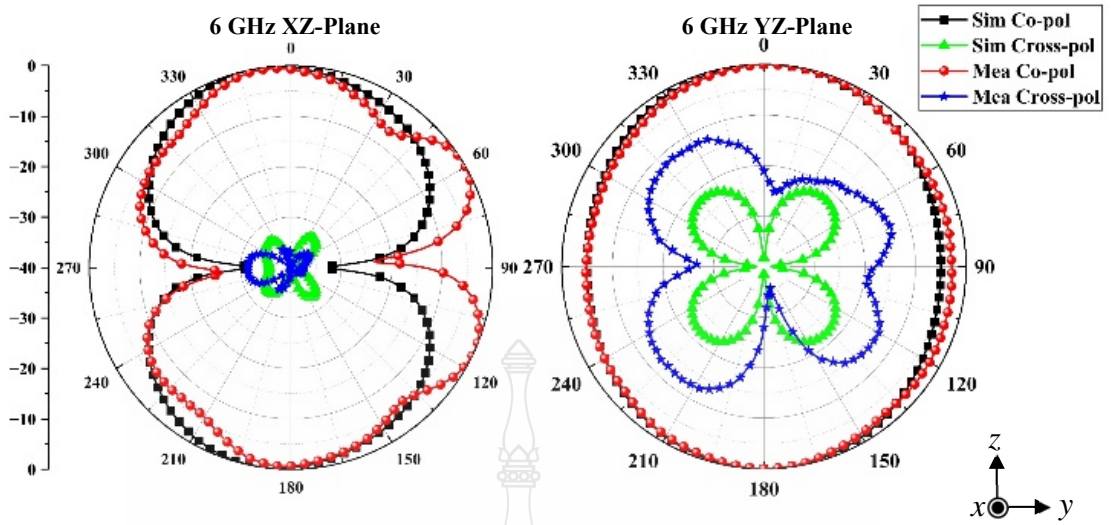


รูปที่ 4.16 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

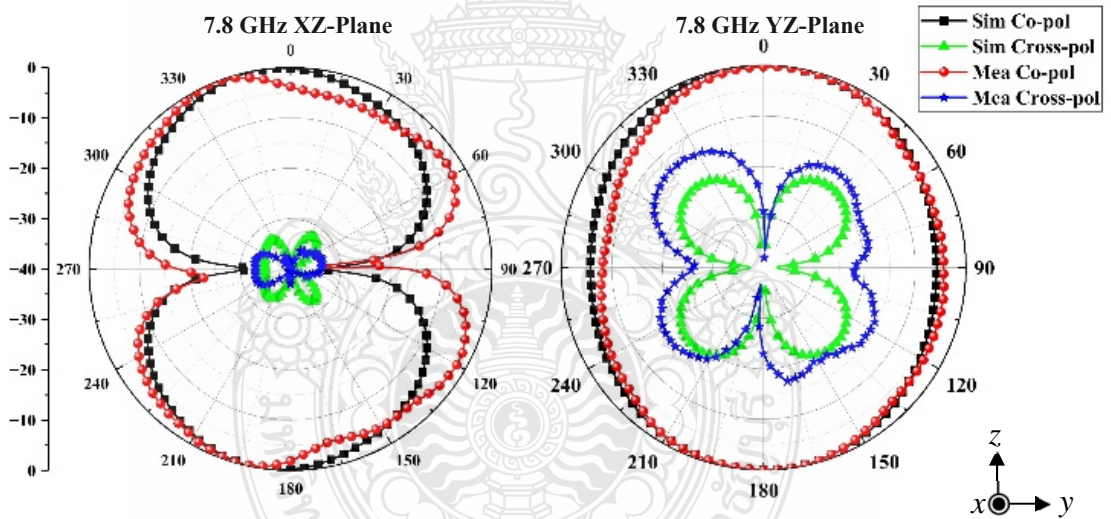


รูปที่ 4.17 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.16 ถึง 4.17 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 3.6 GHz และ 5.4 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

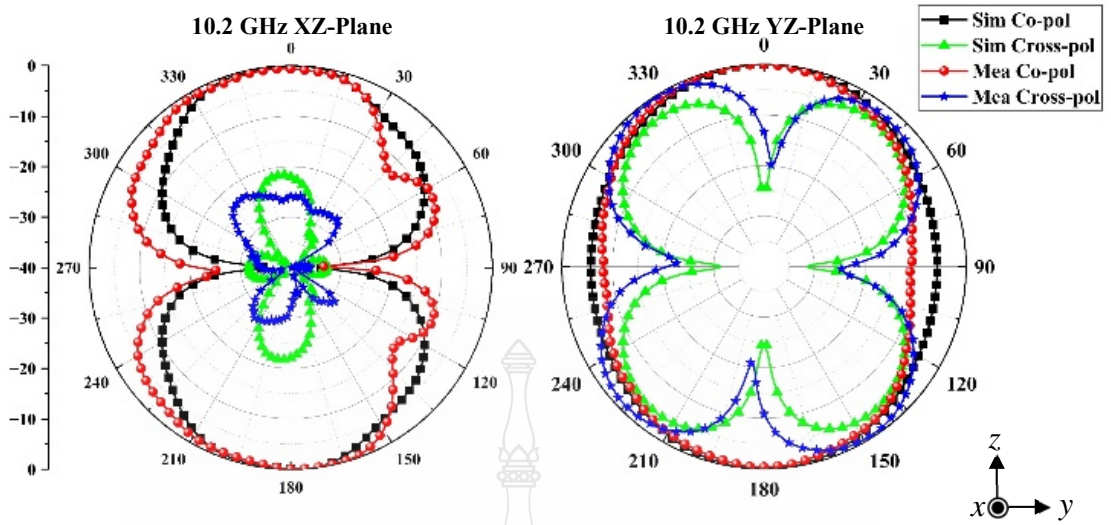


รูปที่ 4.18 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2



รูปที่ 4.19 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.19 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 6 GHz และ 7.8 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

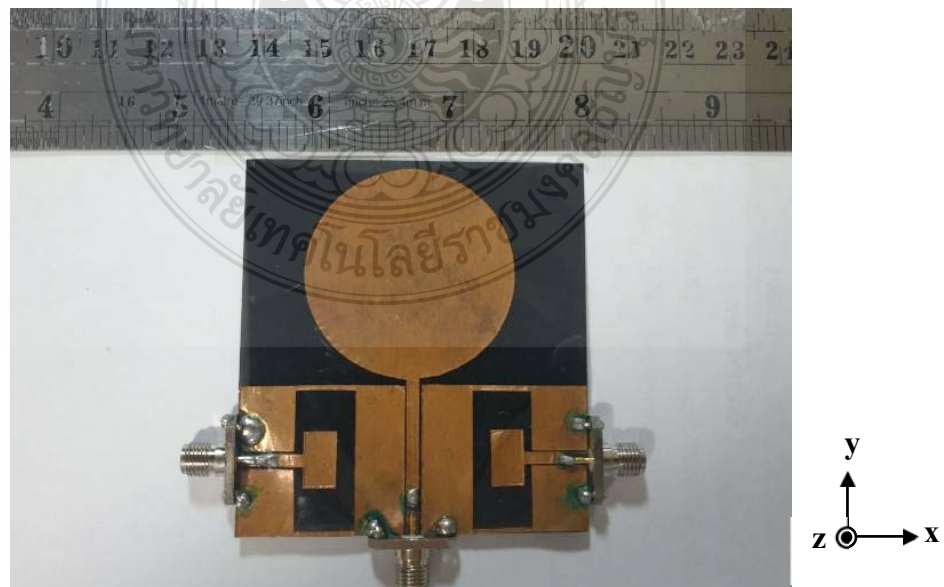


รูปที่ 4.20 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.20 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 10.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

4.3 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

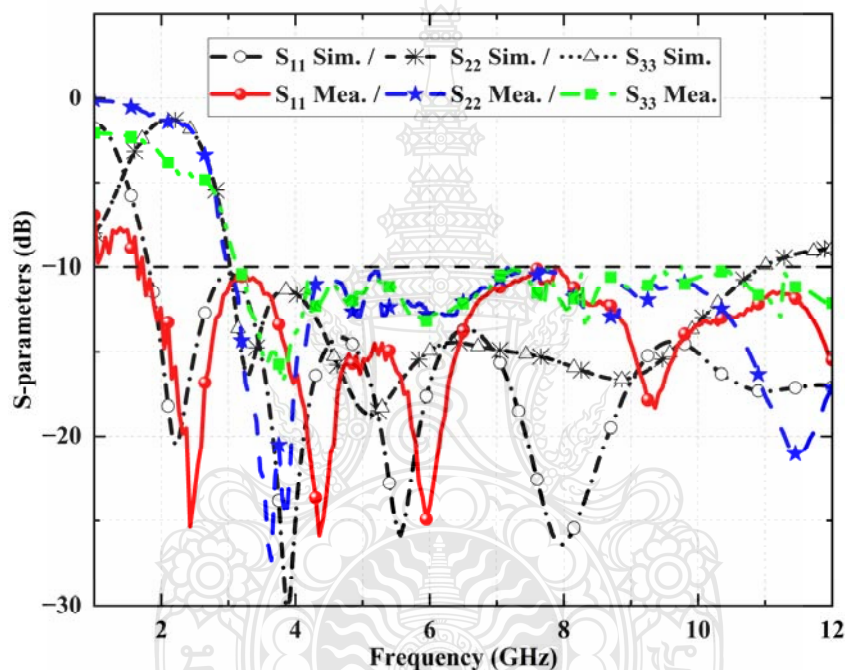
สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 64×70 มม.² ถูกสร้างบนวัสดุฐานรองที่เป็นฟิล์มกรองแสงติดยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

4.3.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33})

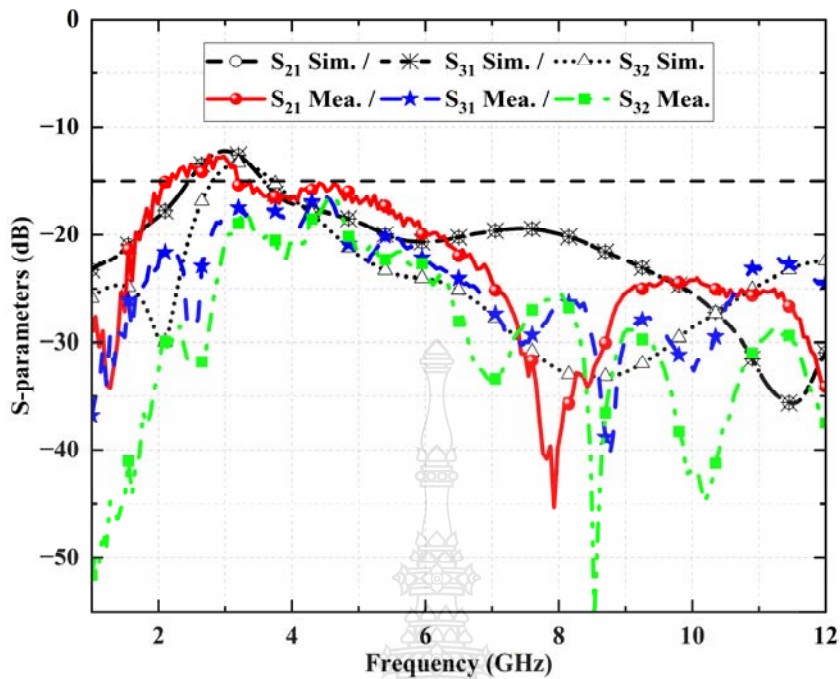
จากรูปที่ 4.22 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จากรูปจะพบว่า ผลจากการจำลองจะมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2 – 29.5 GHz และ S_{22} กับ S_{33} อยู่ในช่วง 3 – 11 GHz จากการวัดผลจะพบว่า สายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นนั้น มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.77 – 17.39 GHz สำหรับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22} และ S_{33}) มีค่าต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.63 – 17.22 GHz โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่ที่มีความคล้ายคลึงกับค่าที่ทำการออกแบบ ยังคงมีช่วงความถี่ที่ครอบคลุมสำหรับการสื่อสารไร้สาย



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

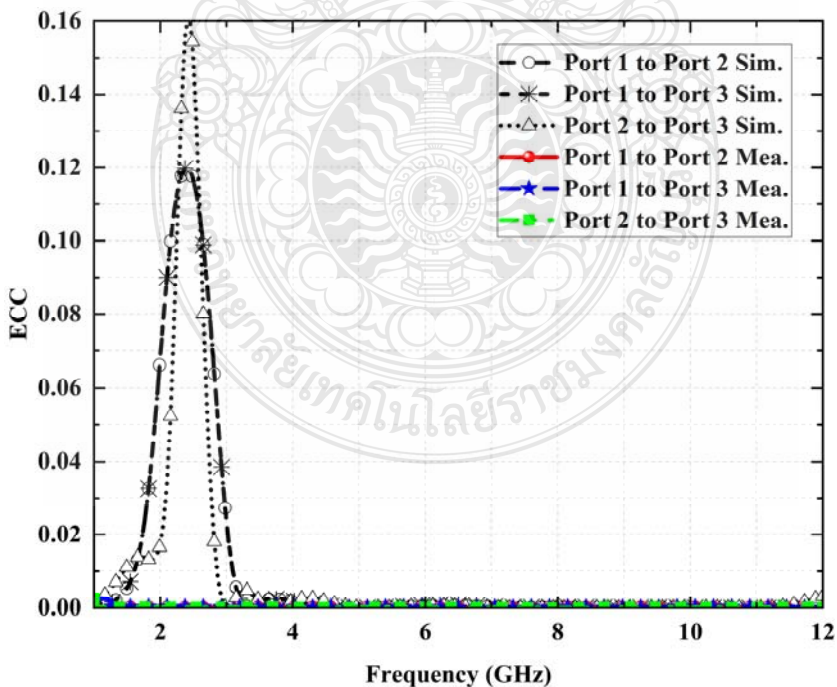
4.3.2 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32})

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลการจำลองค่าและผลจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต ซึ่งจะพบว่ามีค่าต่ำกว่า -12 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป ในทางทฤษฎีนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่ยอมรับได้และบ่งบอกว่าสายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันนั้น ต้องมีค่าต่ำกว่า -15 dB ด้วยขีดจำกัดทางโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ ทำให้ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพอร์ตที่ 1 จึงไม่มีทางที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้ อย่างไรก็ตามโดยรวมแล้วค่าที่วัดได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบไว้



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{32}) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

4.3.3 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

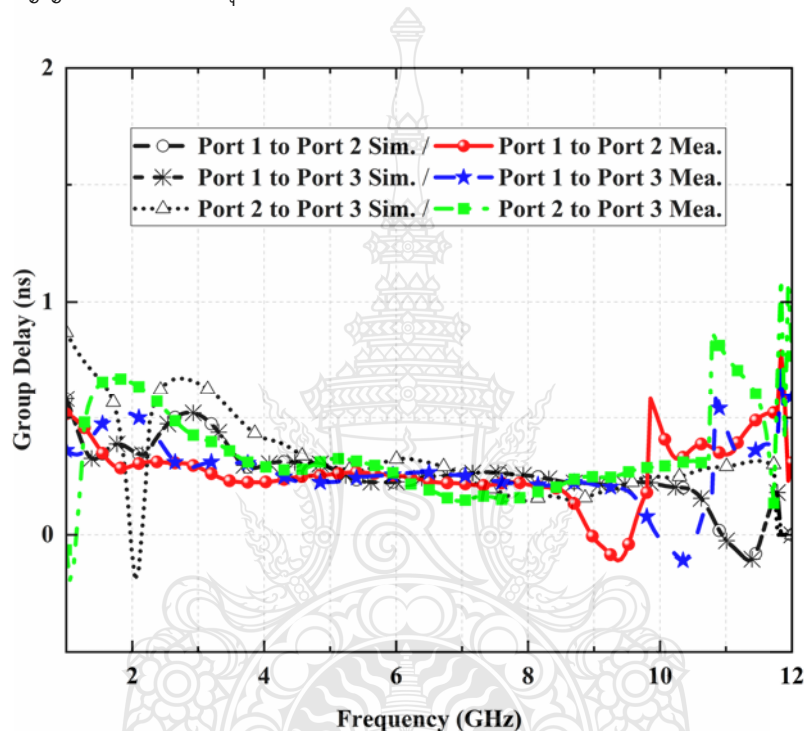


รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

จากรูปที่ 4.24 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดขึ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต มีค่าน้อยกว่า 0.5 ตลอดย่านการใช้งาน ทำให้สายอากาศทั้งสองตัวนั้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นอิสระและไม่ส่งผลกระทบต่อกัน

4.3.4 ผลของการวัดทดสอบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay)

จากรูปที่ 4.25 ผลการวัดค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต นั้นมีค่าต่ำกว่า 2 ns. ทั้ง 3 ตัว ซึ่งจะทำให้การรับส่งข้อมูลในระบบอัลตราไวด์แบนด์เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณพลัสน้อยที่สุด

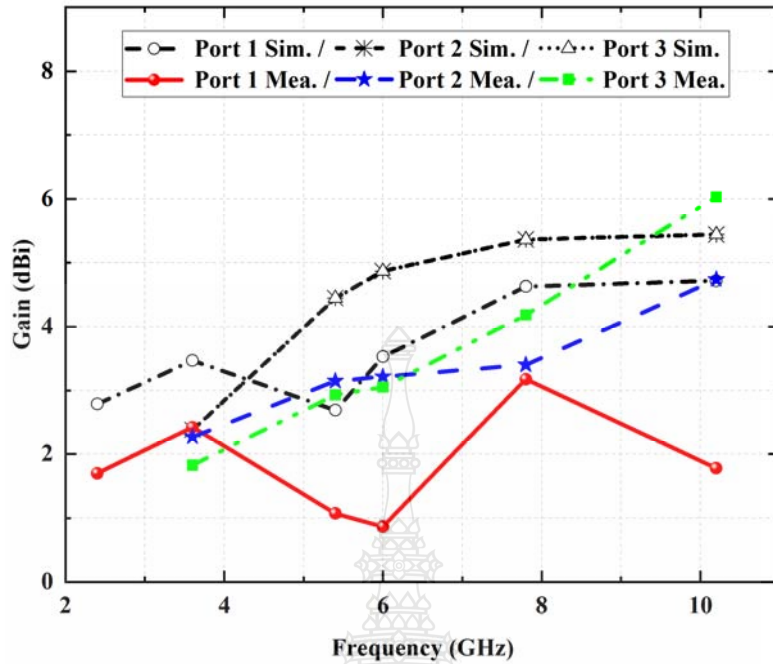


รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าประวิงกลุ่ม (Group delay) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดขึ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

4.3.5 ผลของการวัดทดสอบค่าอัตราขยาย (Gain)

ในการวัดทดสอบค่าอัตราการขยาย (Gain) ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต จะทำการติดตั้งสายอากาศเข้าต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย (Network Analyzer) โดยจะทำการวัดทดสอบครั้งละหนึ่งพอร์ตและนำอีกสองพอร์ตที่เหลือต่อเข้ากับโหลด $50\ \Omega$ และจะทำการคำนวณหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศจากสมการที่ (2.2) หรือ (2.3)

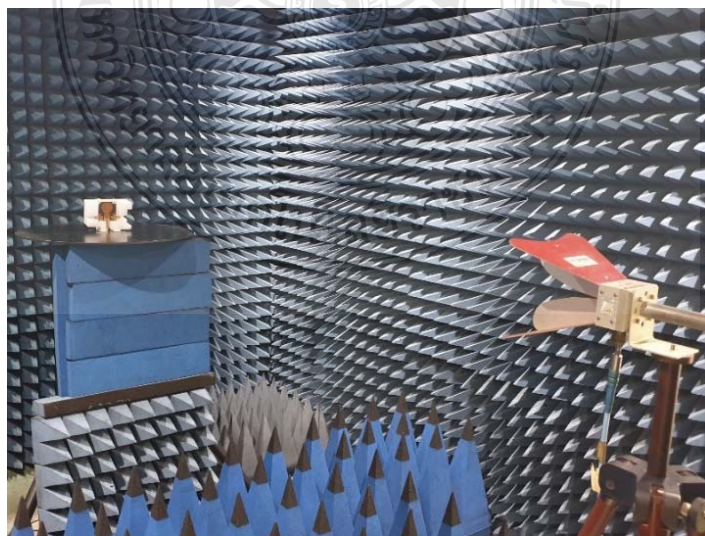
จากรูปที่ 4.26 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองผลและการวัดค่าขึ้นงานจริงในช่วงความถี่ 2.4 – 10.2 GHz โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในช่วงความถี่สูง สายอากาศมีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วง 0.87 – 6.03 dBi



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ได้จากการจำลองผลกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

4.3.6 ผลของการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (Radiation Pattern)

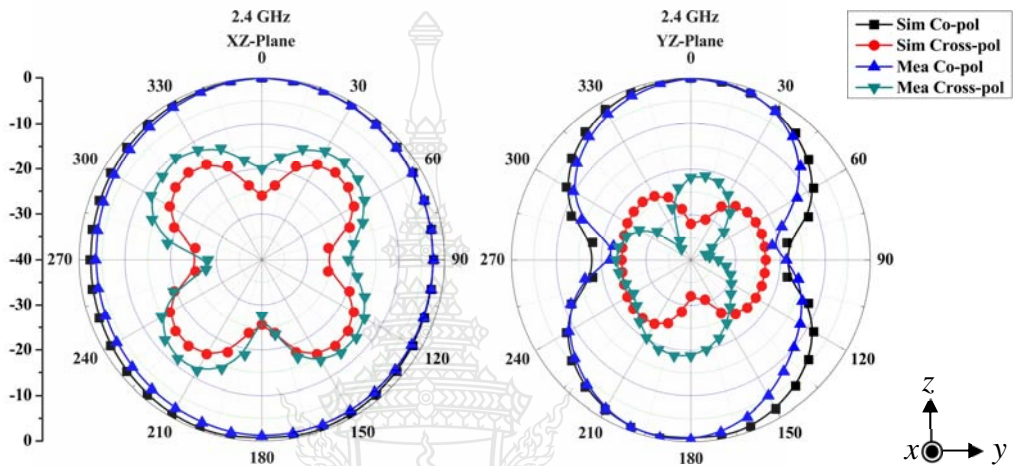
ในขั้นตอนการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น จะทำการติดตั้งสายอากาศและเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ดังรูปที่ 4.27 โดยจะทำการวัดสายอากาศครึ่งละหนึ่งพอร์ตและต่อโหลด 50Ω เข้ากับพอร์ตที่เหลือ จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)



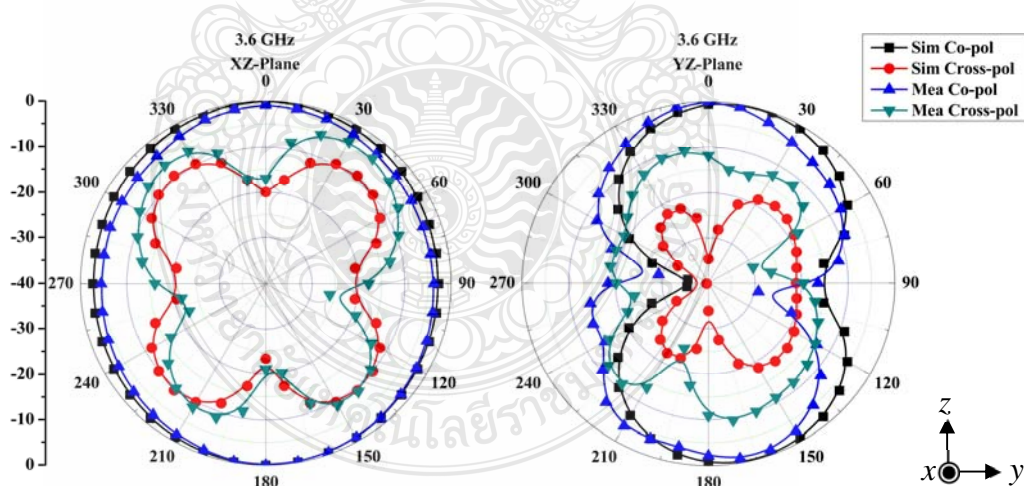
รูปที่ 4.27 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต

จากรูปที่ 4.28 ถึง 4.33 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในช่วงความถี่ที่ 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6.0 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)

จากรูปที่ 4.34 ถึง 4.43 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ในช่วงความถี่ที่ 3.6 GHz, 5.4 GHz, 6.0 GHz, 7.8 GHz และ 10.2 GHz ระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane)

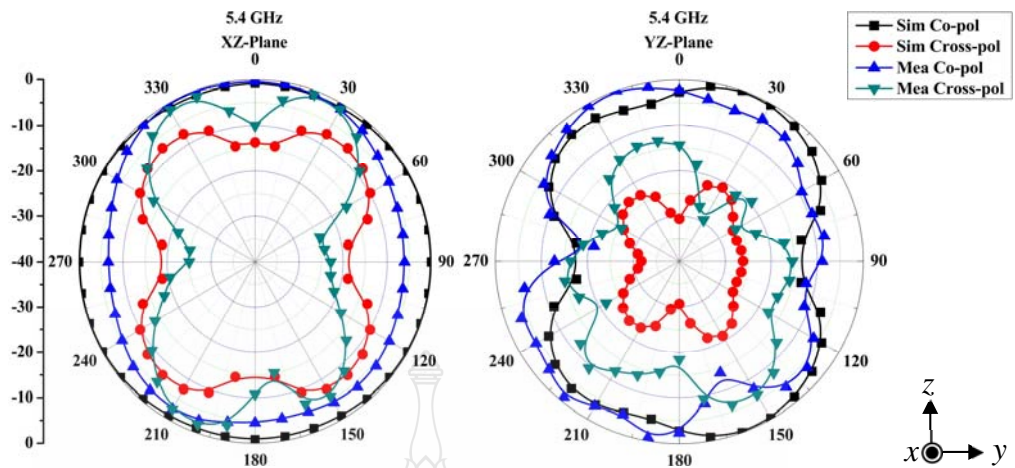


รูปที่ 4.28 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

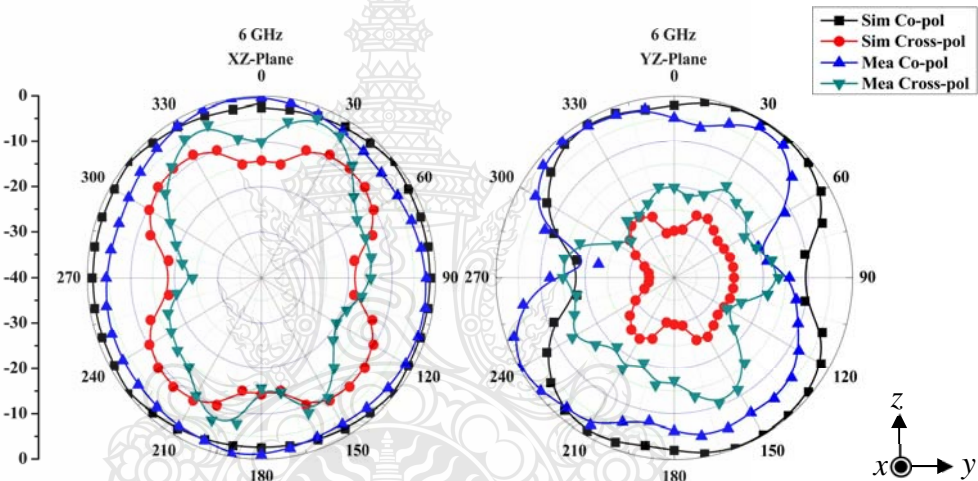


รูปที่ 4.29 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

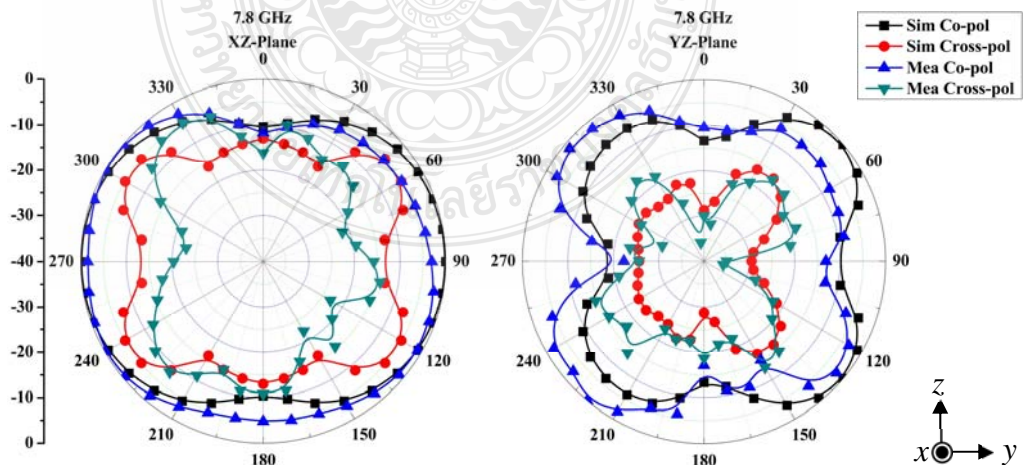
จากรูปที่ 4.28 ถึง 4.29 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 2.4 GHz และ 3.6 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง



รูปที่ 4.30 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

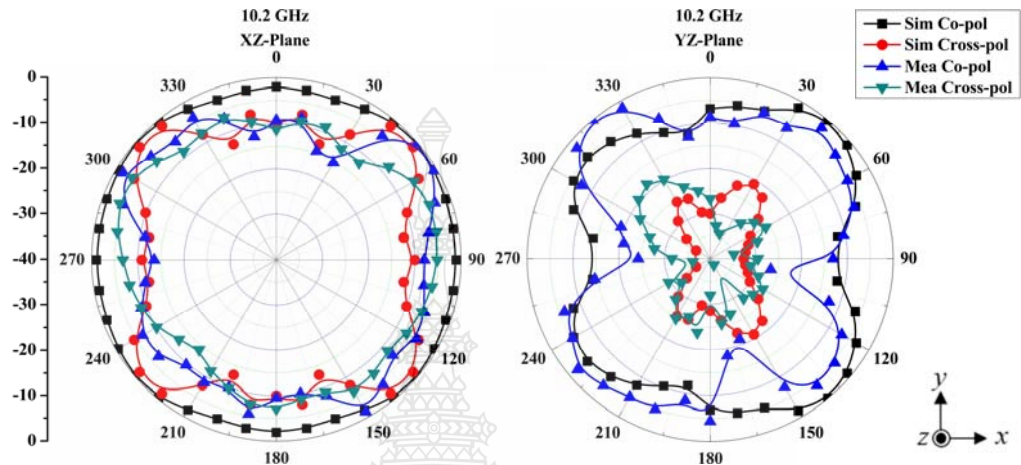


รูปที่ 4.31 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1



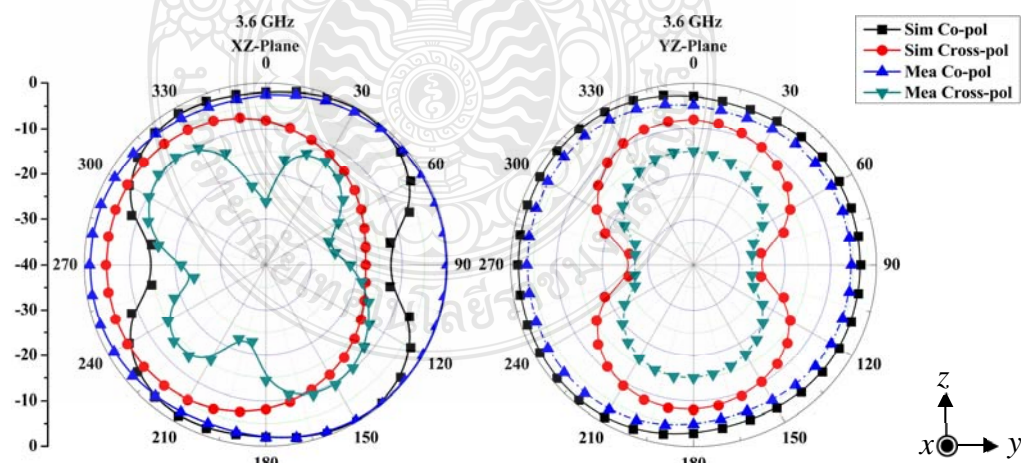
รูปที่ 4.32 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.32 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 5.4 GHz และ 6.0 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ในช่วงความถี่ที่ 7.8 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง



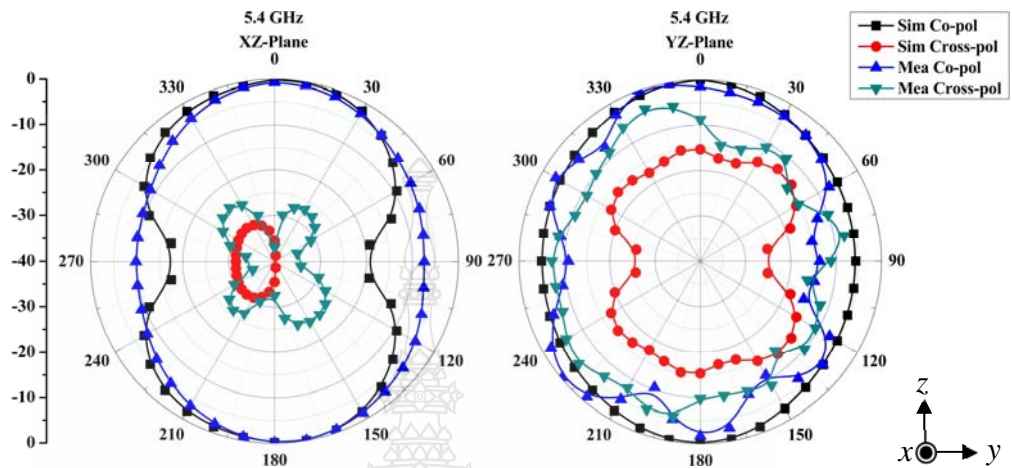
รูปที่ 4.33 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1

จากรูปที่ 4.33 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 1 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 10.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

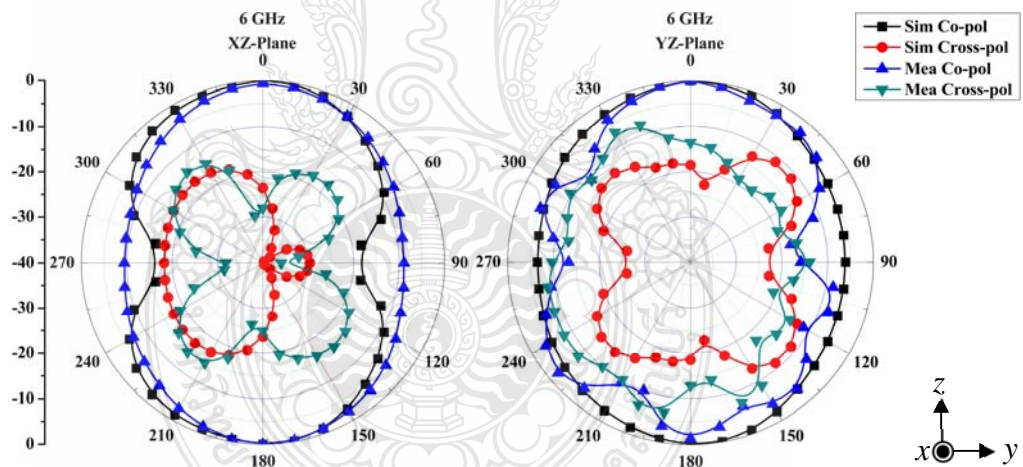


รูปที่ 4.34 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.34 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 3.6 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

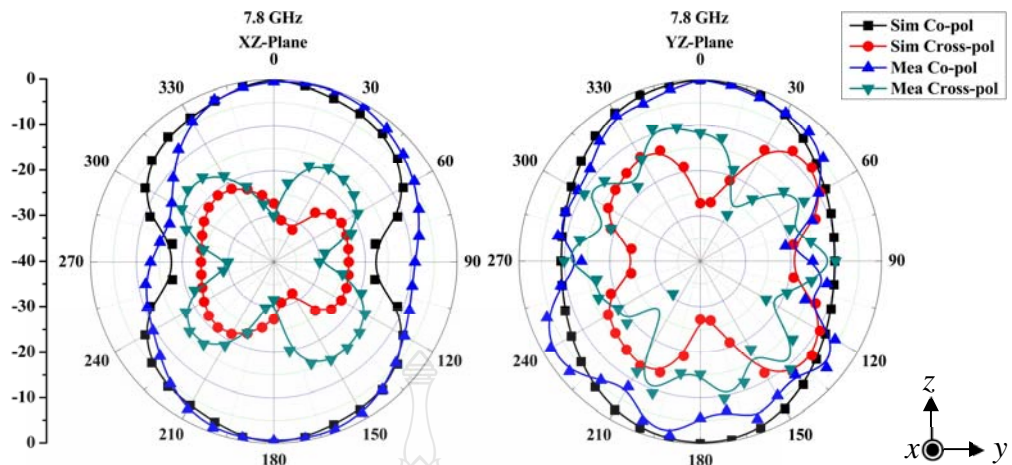


รูปที่ 4.35 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2



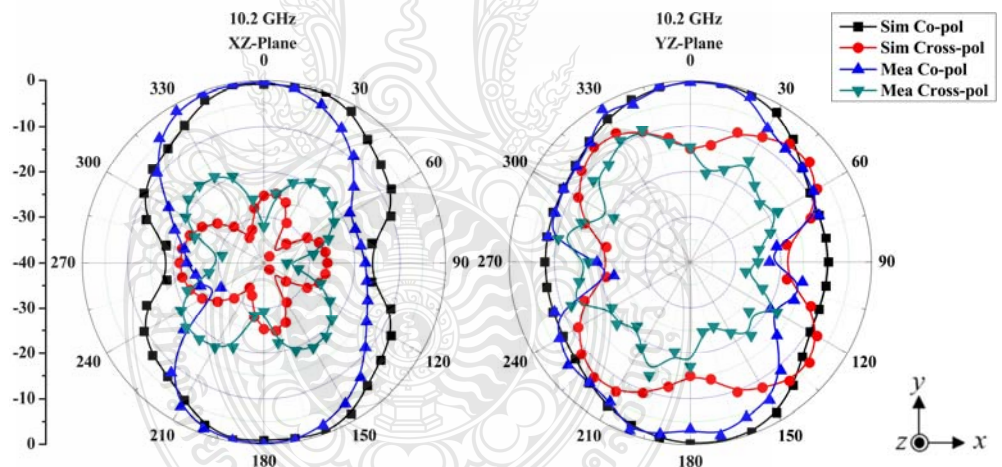
รูปที่ 4.36 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.35 ถึง 4.36 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 5.4 GHz และ 6 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง



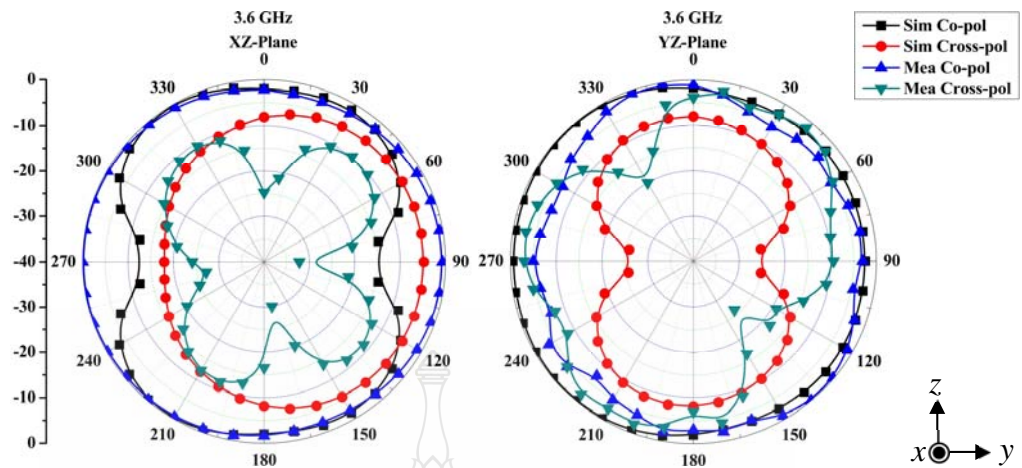
รูปที่ 4.37 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

จากรูปที่ 4.37 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 7.8 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

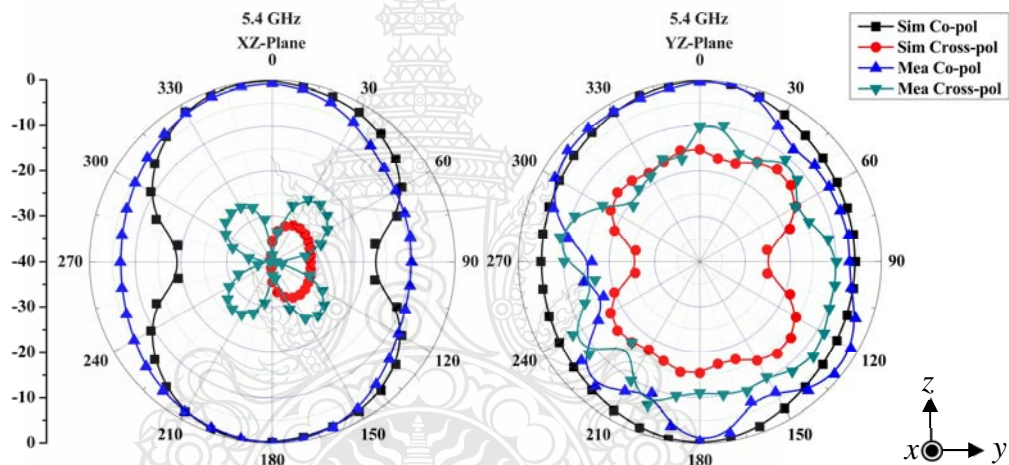


รูปที่ 4.38 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2

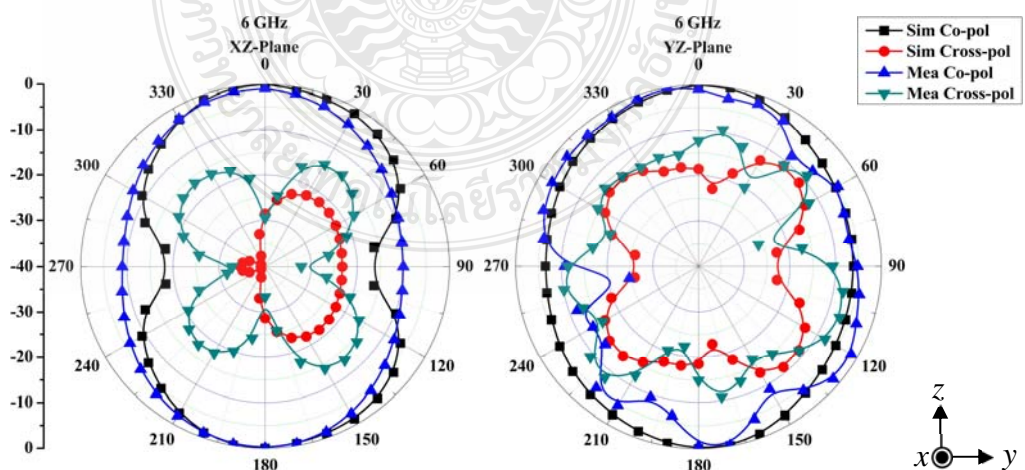
จากรูปที่ 4.38 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 2 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 10.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง



รูปที่ 4.39 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 3.6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

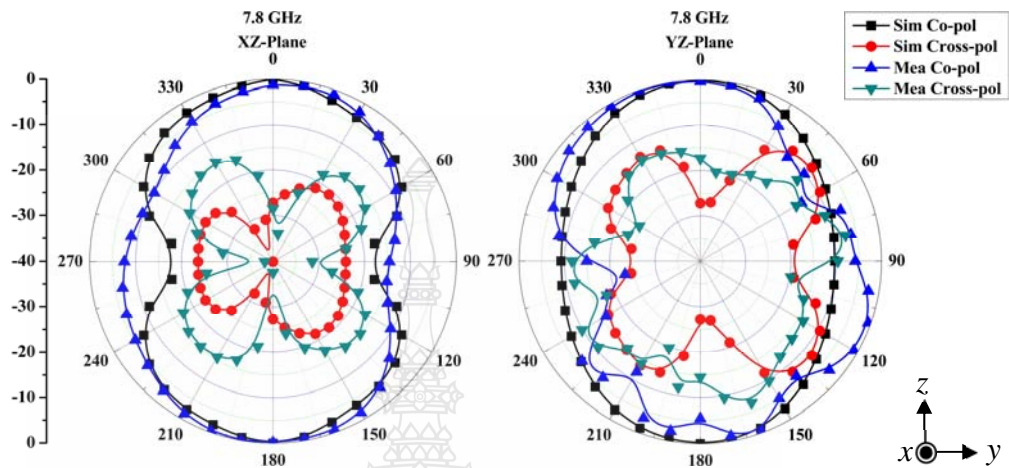


รูปที่ 4.40 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 5.4 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

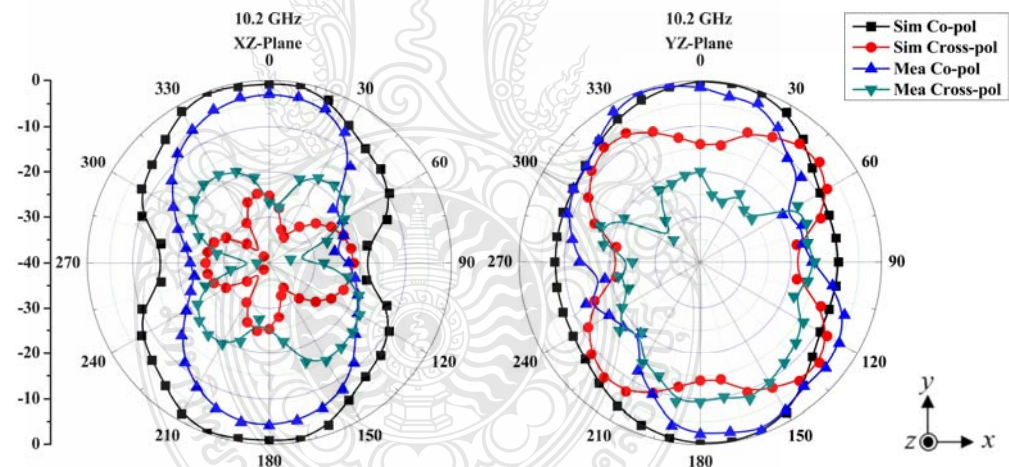


รูปที่ 4.41 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 6 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 4.39 ถึง 4.41 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 3.6, 5.4 GHz และ 6 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง



รูปที่ 4.42 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 7.8 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

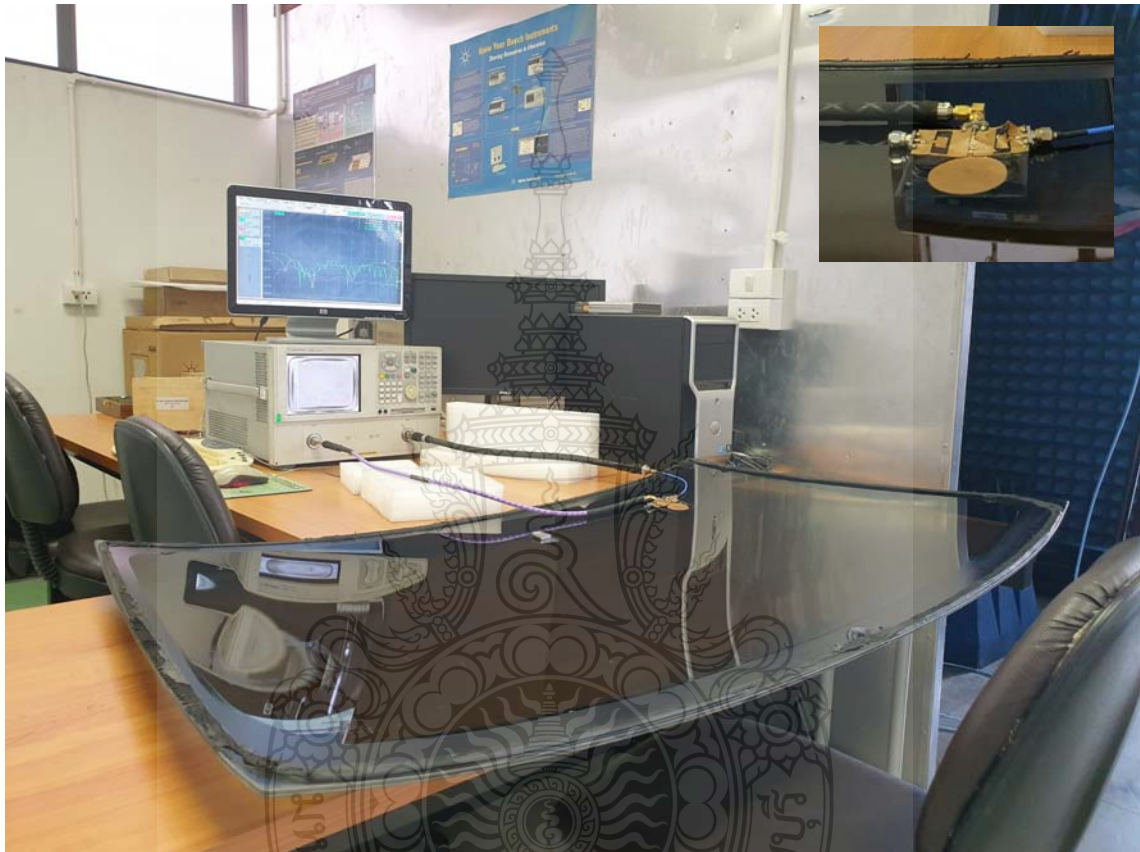


รูปที่ 4.43 ผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 10.2 GHz ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3

จากรูปที่ 4.42 ถึง 4.43 จะแสดงถึงการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พอร์ตที่ 3 ในระนาบ E-Plane (XZ-Plane) และ H-Plane (YZ-Plane) โดยในช่วงความถี่ที่ 7.8 GHz และ 10.2 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบหลายทิศทาง

4.4 การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศขณะประยุกต์ใช้งาน

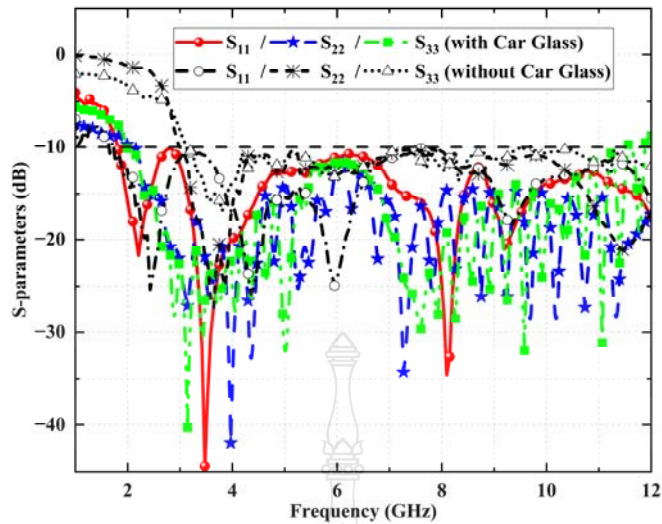
สายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จะถูกติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง ขณะทำการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.44 โดยจะทำการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) และ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ของสายอากาศเป็นหลัก



รูปที่ 4.44 การติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์

4.4.1 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33})

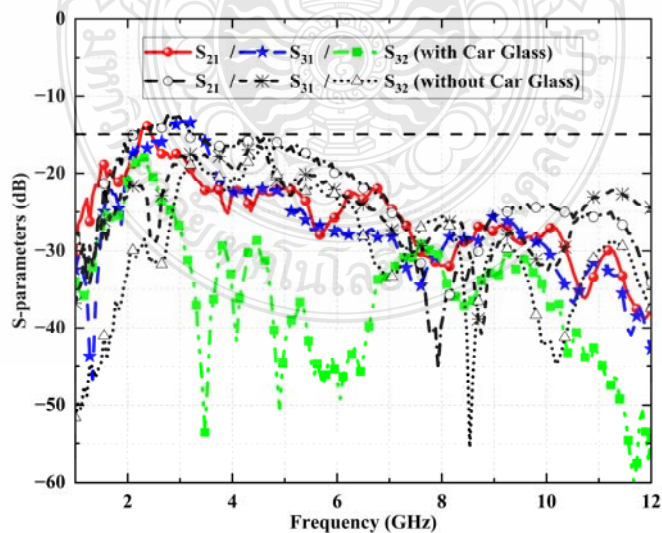
จากรูปที่ 4.45 แสดงผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จะพบว่าผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่มีความคล้ายคลึงกันกับค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.77 – 17.39 GHz และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{22} และ S_{33}) ตั้งแต่ช่วงความถี่ 1.63 – 17.22 GHz แต่ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันคือ ความโค้งงอของแต่จุดที่ทำการติดตั้ง



รูปที่ 4.45 ผลของการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์

4.4.2 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23})

จากรูปที่ 4.28 แสดงผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จะพบว่าผลจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเมื่อทำการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์ มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วค่าที่ได้ยังมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ที่ต่ำกว่า -12 dB เมื่อทำการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) จะเริ่มตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป



รูปที่ 4.46 ผลของการวัดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21} , S_{31} และ S_{23}) ที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกรถยนต์

บทที่ 5

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้าง การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio การสร้างชิ้นงานจริงและการวัดทดสอบสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย เช่น Wireless Local Area Network (WLAN) มาตรฐาน Wi-Fi 1 - 4 (2.4 – 2.4835 GHz and 5 – 5.990 GHz), ระบบ WiMax, ระบบ Ultra- Wideband (UWB), ระบบ Wireless Body Area Network (WBAN) และระบบ Wireless Personal Area Network (WPAN) ได้เป็นอย่างดี

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สาย สายอากาศถูกออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานรองเป็นฟิล์มกรองแสงดีทริยอนด์คาร์บอนสีดำ มีความหนาเท่ากับ 0.056 มม. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) เท่ากับ 0.016 ทำการจำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio จากนั้นจึงสร้างสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต และสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พร้อมกับวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศดังกล่าว ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น Agilent E8363B

สายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต ที่ออกแบบจะมีรูปร่างสายอากาศเป็นแบบแพทช์สี่เหลี่ยม และใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมทั้ง 2 พอร์ต มีขนาดเท่ากับ 64×27 มม.² จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต พบว่ามีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB S_{11} กับ S_{22} อยู่ในช่วง 3 – 12 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าต่ำกว่า -15 dB ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 1.5 ns. อัตราขยายของสายอากาศเฉลี่ย 4 dBi มีแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลแบบหลายทิศทาง

สำหรับสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต จะออกแบบด้วยวิธีการเพิ่มสายอากาศแพทช์วงกลมระหว่างสายอากาศแบบฟิล์มบาง 2 พอร์ต และใช้สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมเช่นกัน มีขนาดเท่ากับ 64×70 มม.² จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต พบว่ามีค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} อยู่ในช่วง 1.77 – 17.39 GHz และ S_{22} กับ S_{33} อยู่ในช่วง 1.63 – 17.22 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.5 ตลอดช่วงการใช้งาน ค่าประวิงกลุ่มน้อยกว่า 1.5 ns. มีอัตราการขยายสูงสุดอยู่ที่ 5 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของพอร์ตที่ 1 ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 3.6 GHz เป็นแบบรอบทิศทาง และเปลี่ยนเป็นแบบหลายทิศทางที่ตั้งแต่ความถี่ 5.4 GHz เป็นต้นไป ในส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงานระยะไกลของพอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นแบบหลายทิศทาง

ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} , S_{31} และ S_{32} ของสายอากาศแบบฟิล์มบาง 3 พอร์ต มีค่าต่ำกว่า -12 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3 GHz เป็นต้นไป โดยมีสาเหตุมาจากการที่พอร์ตที่ 2 และ 3 เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพอร์ตที่ 1 จึงไม่มีทางที่สายอากาศแต่ละพอร์ตนั้นทำงานได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน

ไม่รบกวนซึ่งกันและกันได้ แต่สายอากาศนี้ยังคงสามารถไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารไร้สายในระบบต่าง ๆ เช่น WLAN WPAN WBAN UWB และ WiMAX ได้อย่างดี

จากการวัดทดสอบค่าที่ได้จากการติดตั้งสายอากาศเข้ากับกระจกของรถยนต์ของสายอากาศแบบฟิล์มบางสำหรับการสื่อสารไร้สายพบว่า ผลจากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการวัดค่าในวิธีการปกติ (Free-space) แต่โดยรวมแล้วการตอบสนองต่อความถี่มีความคล้ายคลึงกัน ยังคงสามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่ 3.1 – 10.6 GHz ซึ่งปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมาจากความโค้งงอของพื้นผิวกระจก ค่าการสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

5.2.1 ในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ ควรใช้รูปแบบที่ใกล้เคียงกับงานจริงให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

5.2.2 พัฒนาให้สายอากาศมีขนาดที่เล็กลง กะทัดรัดมากยิ่งขึ้น

5.2.3 พัฒนาให้สายอากาศสามารถรองรับย่านความถี่ที่สูงขึ้นและมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากยิ่งขึ้น

5.2.4 พัฒนาให้สายอากาศมีจำนวนพอร์ตสำหรับรับ-ส่งสัญญาณมากขึ้น

5.2.5 พัฒนาให้สายอากาศมีการนอตซีในช่วงความถี่ที่อาจก่อให้เกิดการรบกวนในการรับ-ส่งสัญญาณหรือในช่วงความถี่ที่ไม่ได้ใช้งาน

บรรณานุกรม

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [2] ศราวุธ ชัยมูล, *วิศวกรรมสายอากาศ*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556.
- [3] อิศริยา ไทยเนียม, “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของอัลกอริทึมการค้นหาทิศทางมาถึงของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณอัลตราไวน์แบนด์แบบมีเส้นสายตา,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2552.
- [4] นิพนธ์ ทางทอง, “สายอากาศโมโนโพลแบบวงกลมที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2554.
- [5] กิตติศักดิ์ ทองดา, “การศึกษาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับรูปตัวแอลแบบฟิล์มบาง,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2555.
- [6] อีระชัย ระนาดแก้ว, “สายอากาศโมโนแบบฟิล์มบางขนาดกะทัดรัดรูปคล้ายพระจันทร์สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบอัลตราไวด์แบนด์และซูเปอร์ไวด์แบนด์,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2561.
- [7] พาโชค โสภา, “สายอากาศผ้ารูปทรงหกเหลี่ยมแบบอัลตราไวด์แบนด์สำหรับประยุกต์ใช้กับโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2563.
- [8] B. Yang, Y. Xu, J. Tong, Y. Zhang, Y. Feng and Y. Hu, “Tri-Port Antenna with Shared Radiator and Self-Decoupling Characteristic for 5G Smartphone Application,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 70, Issue 6, 2022, pp. 4836-4841.
- [9] N. Hussain and N. Kim, “Integrated Microwave and mm-Wave MIMO Antenna Module With 360° Pattern Diversity for 5G Internet of Things,” *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 9, Issue 24, 2022, pp. 24777-24789.
- [10] Y. Wang, B. Huang and S. Yan, “A Conformal Four-Antenna Module for Capsule Endoscope MIMO Operation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 70, Issue 11, 2022, pp. 10270-10285.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] B. Kumkhet, P. Rakluea, N. Wongsin, P. Sangmahamad, W. Thaiwirot, N. Chudpooti and Ch. Mahatthanajatuphat, "SAR reduction using dual band EBG method based on MIMO wearable antenna for WBAN applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 160, 2023, 154525.
- [12] S. Hongdumnuen, W. Chanwattanapong and B. Kumkhet, "Multiband Thin Film Antenna for WLAN and LTE MIMO Systems," in *2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C)*, Thailand, 2021, pp. 139–142.
- [13] G. Sh. Lin, Ch. H. Sung, J. L. Chen, L. Sh. Chen and M. Ph. Houng, "Isolation Improvement in UWB MIMO Antenna System Using Carbon Black Film," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, 2017, pp. 222-225.
- [14] D. Sipal, M. P. Abegaonkar and Sh. K. Koul, "Easily Extendable Compact Planar UWB MIMO Antenna Array," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, No. 1, 2017, pp. 2328-2331.
- [15] H. Sakli, C. Abdelhamid, C. Essid and N. Sakli, "Metamaterial-Based Antenna Performance Enhancement for MIMO System Applications," *IEEE Access*, Vol. 9, 2021, pp. 38546-38556.
- [16] D. Sipal, M. P. Abegaonkar and Sh. K. Koul, "A Reconfigurable Filtering Antenna With Integrated Bandpass Filters for UWB/WLAN Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 66, Issue 1, 2018, pp. 401-404.
- [17] A. Sowmiyadevi and S. Raman, "3-port MIMO Antenna for UWB Applications with Polarization Dependency Analysis," in *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, India, 2018.
- [18] P. Aroonmitr, Ch. Rakluea, W. Lawtammajak, P. Rakluea, M. Tangjitjetsada, Ch. Mahatthanajatuphat, P. Akkaraekthalin and T. Thianthong, "A Minimized Thickness of MIMO Antenna Based on Thin Film Substrates for UWB application," in *2023 The 2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON2023)*, Thailand, 2023.
- [19] N. Manshouri, A. Yazgan, and M. Maleki, "A Microstrip-fed Ultra-Wideband Antenna with Dual Band-Notch Characteristics," in *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2016, pp. 231–234.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] M. Akbari, N. Rojhani, M. Saberi, and R. Movahedinia, "Dual band-notched monopole antenna with enhanced bandwidth for ultra-wideband wireless communications," *The Journal of Engineering*, vol. 8, pp. 415-419, Aug 2014.
- [21] S. Tripathi, A. Mohan, and S. Yadav, "A compact dual band-notched fractal antenna for UWB application", in *2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2014, pp. 205-207.
- [22] M. G. N. Alsath, and M. Kanagasabai, "Compact UWB Monopole Antenna for Automotive Communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 4204-4208, Sep 2015.
- [23] M. Sharma, Y.K. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, and S. Kumari, "Compact printed high rejection triple band-notch UWB antenna with multiple wireless applications", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, pp. 1626-1634, Sep 2016.
- [24] M. Elhabchi, M. N. Srifi, and R. Touahni, "A Modified Hexagonal UWB Antenna Loaded with Multiple L-shaped Stubs for GPS Band Integration and Like Y-Shaped Slot for Single Band Rejection", in *2019 International Conference on Wireless Technologies Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2019, pp. 1-5.
- [25] T. Ranadkaew, and P. Rakluea, "A compact Moon Shaped Super-Wideband Thin-Film Antenna", in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.
- [26] N. Singh, A. K. Singh, and V. K. Singh, "Design & Performance of Wearable Ultra Wide Band Textile Antenna for Medical Applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, pp. 1553-1557, Feb 2015.
- [27] S. Yan, L. A. Y. Poffelie, P. J. Soh, X. Zheng, and G. A. E. Vandenbosch, "On-Body Performance of Wearable UWB Textile Antenna with Full Ground Plane", in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1-4.
- [28] S. Li, and J. Li, "Smart patch wearable antenna on Jeans textile for body wireless communication", in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018, pp. 1-4.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] K. Wang, and J. Li, "Jeans Textile Antenna for Smart Wearable Antenna", in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018, pp. 1-3.
- [30] K. Shikder and F. Arifin, "Extended UWB wearable logo textile antenna for body area network applications," in *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, 2016, pp. 484-489.
- [31] S. Yan, V. Volskiy and G. A. E. Vandenbosch, "Compact Dual-Band Textile PIFA for 433-MHz/2.4-GHz ISM Bands," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2436-2439, Jul 2017.
- [32] J. Roh, Y. Chi, J. Lee, Y. Tak, S. Nam and T. J. Kang, "Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 803-806, Aug 2010.
- [33] S. Yan and G. A. E. Vandenbosch, "Radiation Pattern-Reconfigurable Wearable Antenna Based on Metamaterial Structure," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1715-1718, Feb 2016.
- [34] I. Martinez, C. Mao, D. Vital, H. Shahariar, D. H. Werner, J. S. Jur, and S Bhardwaj, "Compact Low-Profile and Robust Textile Antennas With Improved Bandwidth for Easy Garment Integration", *Access IEEE*, vol. 8, pp. 77490-77500, Apr 2020.
- [35] D. Sibal, M. P. Abegaonkar, S. K. Koul, "UWB MIMO USB dongle antenna for personal area network application", in *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2016, pp. 1-4.
- [36] S. Yan, P. J. Soh and G. A. E. Vandenbosch, "Dual-Band Textile MIMO Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 4640-4647, Nov 2015.
- [37] J. Ren, W. Hu, Y. Yin and R. Fan, "Compact Printed MIMO Antenna for UWB Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1517-1520, Jul 2014.
- [38] Y. K. Choukiker, S. K. Sharma and S. K. Behera, "Hybrid Fractal Shape Planar Monopole Antenna Covering Multiband Wireless Communications With MIMO Implementation for Handheld Mobile Devices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, pp. 1483-1488, Mar 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

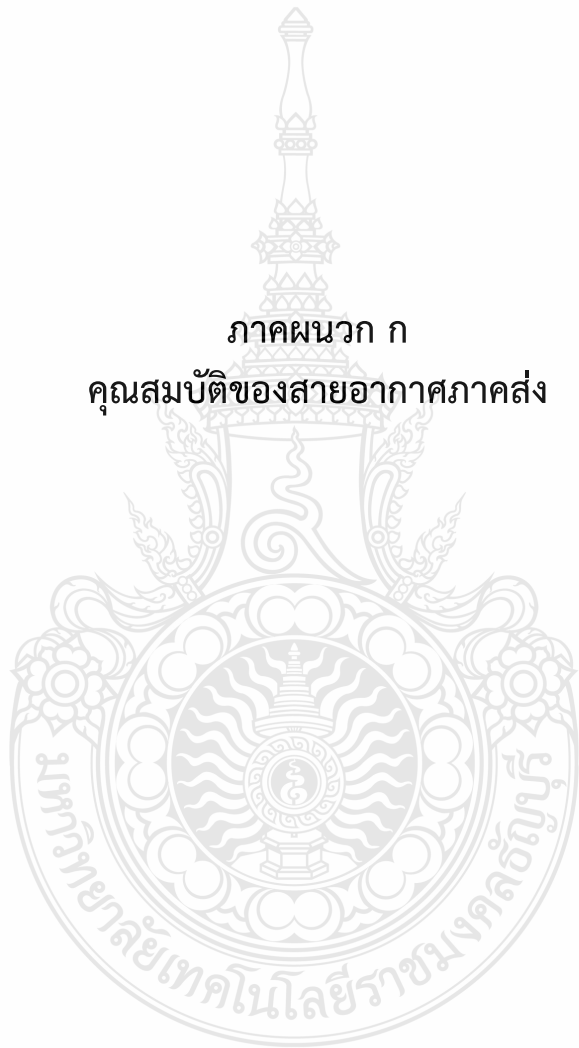
- [39] L. Kang, H. Li, X. Wang and X. Shi, "Compact Offset Microstrip-Fed MIMO Antenna for Band-Notched UWB Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1754-1757, Apr 2015.
- [40] L. Liu, S. W. Cheung and T. I. Yuk, "Compact MIMO Antenna for Portable UWB Applications With Band-Notched Characteristic," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 1917-1924, May 2015.
- [41] Z. Li, C. Yin and X. Zhu, "Compact UWB MIMO Vivaldi Antenna With Dual Band-Notched Characteristics," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38696-38701, Mar 2019.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
คุณสมบัติของสายอากาศภาคส่ง



3-D Patterns
Available at
www.ets-lindgren.com/3117

FEATURES:

- **Ultra Broadband: 1 GHz - 18 GHz**
- **Maintains Single Lobe Radiation Pattern Over Frequency**
- **300 W Power Input Capacity**
- **Optimized High Frequency Gain**
- **Low VSWR**
- **Flexible Mounting Systems**



ETS-Lindgren's Model 3117 Double-Ridged Waveguide Horn
PATENT # 6,995,728

The Model 3117 Double Ridged Waveguide is the latest addition to a family of double ridge waveguides for microwave and EMC measurement from ETS-Lindgren. This model corrects the lower gain at the upper end of the frequency range, commonly found in ridged waveguide antennas. Users of this antenna benefit from uniform illumination of target surfaces and accurate gain measurement. In addition, the Model 3117 exhibits high gain and low VSWR across its operational frequency band, accepting moderate power input of 300 watts.

The electrical characteristics of this antenna were designed and modeled using powerful workstations running electromagnetic simulation software. Equally important, experienced RF engineers worked with our manufacturing team to produce a practical and affordable realization of the modeling process. All production units are individually calibrated at our A2LA accredited lab.

FEATURES

Single Lobe Radiation Pattern

The Model 3117 maintains a single main lobe pattern in the direction of the horn axis over its frequency

range. This characteristic is essential for even distribution of electromagnetic energy on a target surface, and accurate measurement of gain and vector information. The Model 3117's unique design suppresses the propagation of high order modes. The result is an antenna with a well-defined single lobe radiation pattern that outperforms other antennas in its class.

Ultra Broadband

The Model 3117 sweeps from 1 GHz to 18 GHz without stopping for band breaks, making it ideal

for automated testing. It has the widest usable frequency range of any antenna in its class, with no performance degradation from high order modes.

Power Input

The Model 3117 uses a Type N connector and accepts up to 300 watts of continuing input power with up to 400 watts of peak power. The antenna's high gain and low VSWR over its operating frequency translates into efficient amplifier use and high field strengths.

Uniform Gain, Low VSWR

The Model 3117 has a more uniform gain and antenna factor because of the better behavior of its radiation pattern. Since the pattern is stable over frequency, the gain and the AF also remain stable. Similar antennas of this class exhibit large variations of the gain and the AF as the frequency increases.

Flexible Mounting System

The Model 3117 antenna includes both an EMCO classic mount and a rear "stinger" mount.

STANDARD CONFIGURATION

- Antenna Assembly
- Mounting bracket drilled to accept ETS-Lindgren or other tripod mounts with 1/4 in x 20 threads
- Rear "stinger" Mount
- Individually calibrated at 1 m per SAE ARP 958 at our A2LA accredited lab. 3 m calibration per ANSI C63.5 available at additional cost. Actual antenna factors and a signed Certificate of Calibration Conformance included with manual.

OPTIONS

- Antenna Mast
- Antenna Tripod

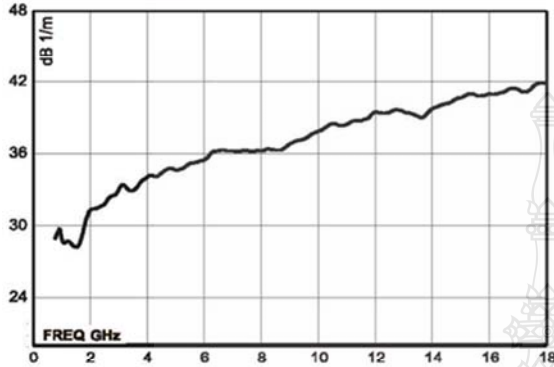
Electrical Specifications

| MODEL | FREQUENCY RANGE | VSWR RATIO (AVG) | MAXIMUM CONTINUOUS POWER | PEAK POWER | IMPEDANCE (NOMINAL) | CONNECTORS |
|-------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|------------|
| 3117 | 1 GHz - 18 GHz | 3.5:1 max <2:1 above 1.5 GHz | 300 W | 400 W | 50 Ω | Type N |

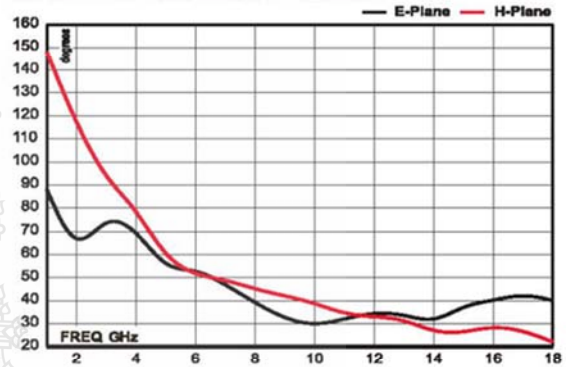
Physical Specifications

| MODEL | WIDTH | DEPTH | HEIGHT | WEIGHT |
|-------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| 3117 | 17.5 cm 6.9 in | 17.5 cm + 15.5 cm mount 6.9 in + 6.1 in mount | 15.5 cm 6.1 in | 1.13 kg 2.5 lb |

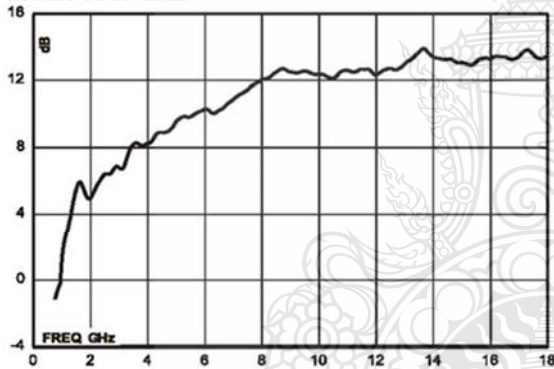
Model 3117 Antenna Factor



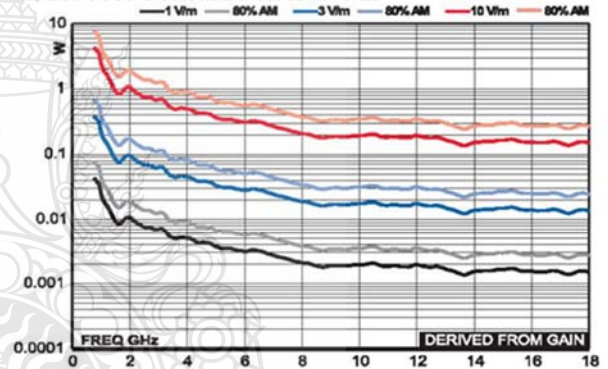
Model 3117 Half Power Beamwidth



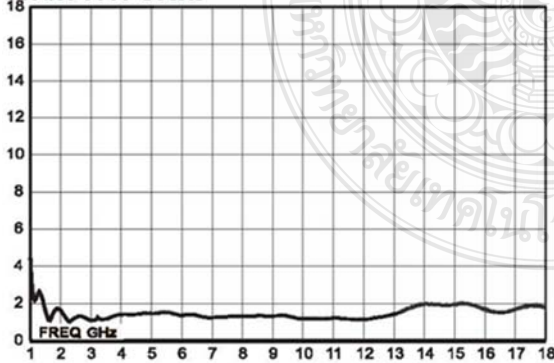
Model 3117 Gain



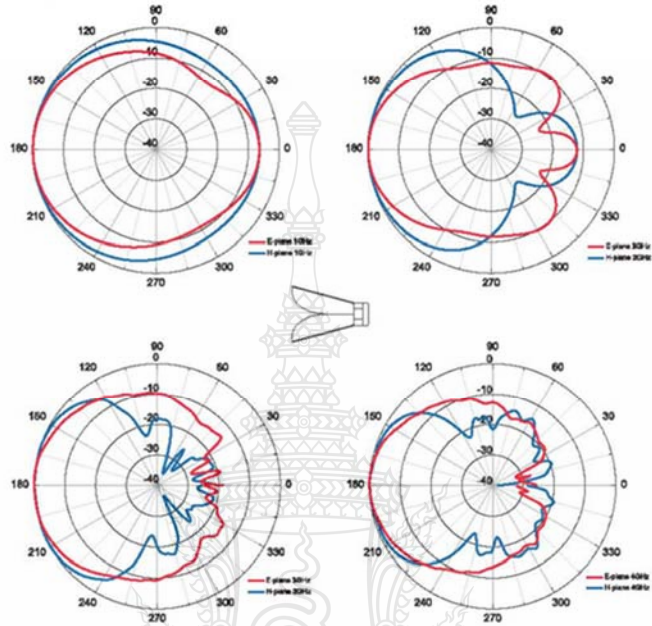
Model 3117 Forward Power @ 1 m



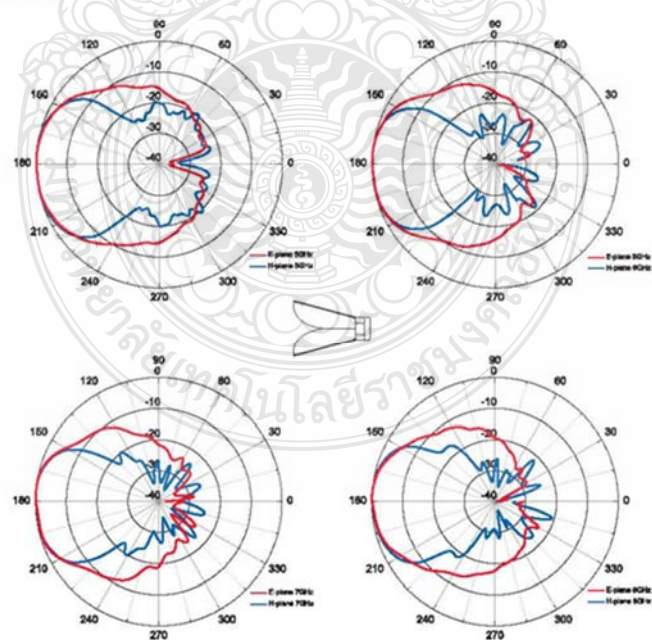
Model 3117 VSWR



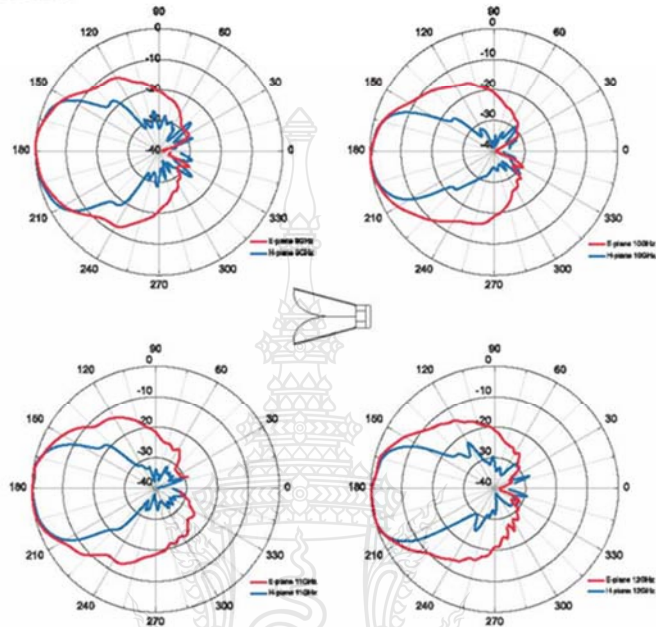
Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)



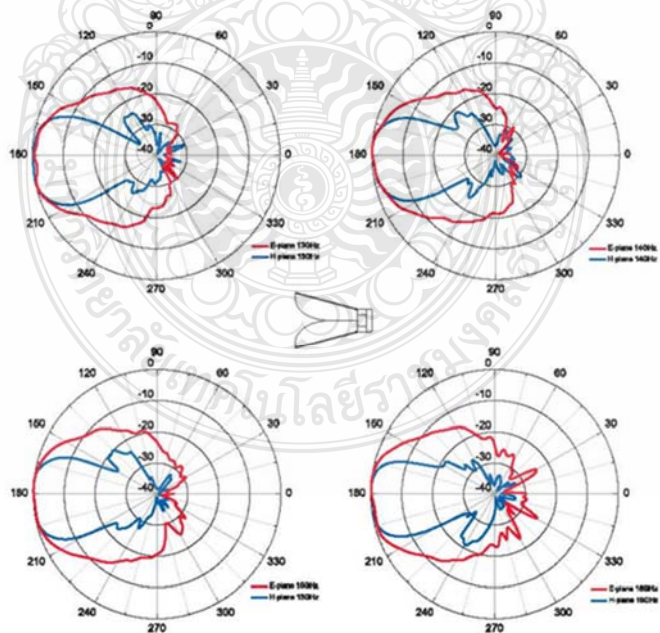
Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)



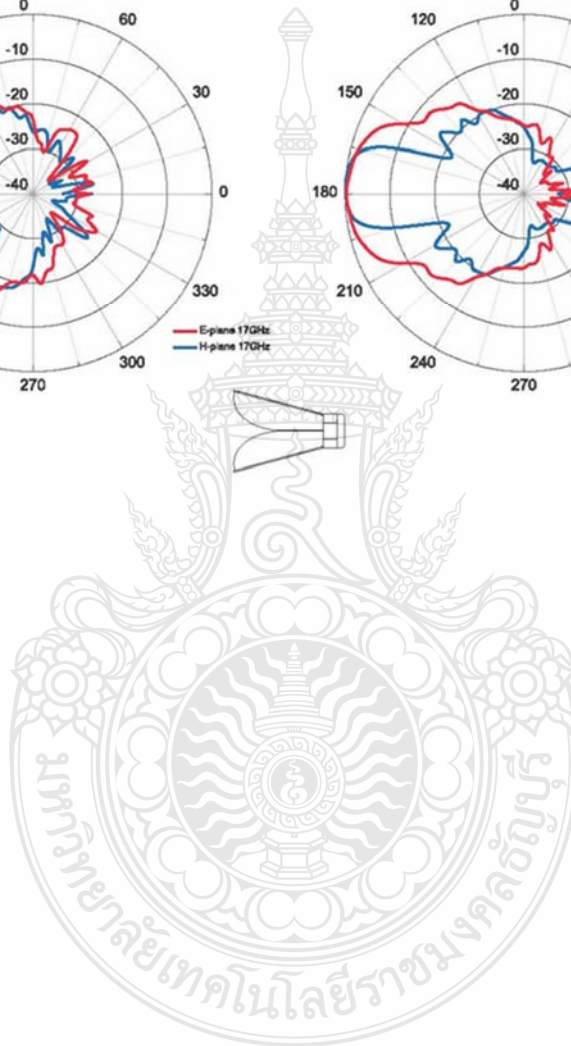
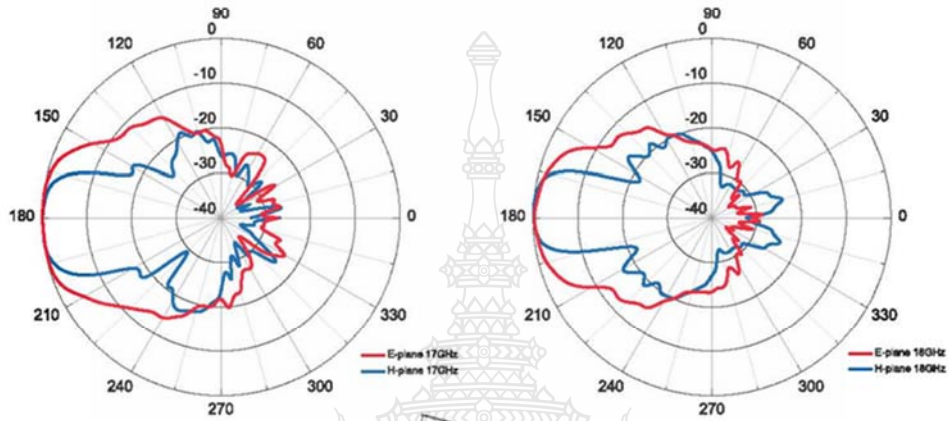
Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)



Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)



Model 3117 (17 GHz - 18 GHz)



ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของหัว SMA Connector



Data Sheet



Coaxial Panel Connector 23_SMA-50-0-12/111_N

Description

Straight panel receptacle jack, flange mount

Interface standards
IEC 60169-15_MIL-STD-348A/310_CECC 22110



Technical Data

Electrical Data

Impedance 50 Ω
Interface frequency max. 18 GHz

Mechanical Data

Number of matings 500
Weight 0.0021 kg

Environmental Data

Operating temperature -65 °C to 125 °C
2011/65/EU (RoHS) compliant

Material Data

| Piece Parts | Material | Surface Plating |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|
| Centre contact | Copper Beryllium Alloy | Gold Plating (Nickel underplated) |
| Outer contact | Copper Beryllium Alloy | Gold Plating (Nickel underplated) |
| Body | Copper Beryllium Alloy | Gold Plating (Nickel underplated) |
| Insulator | PFA / PTFE | |

Related Documents

Catalogue drawing DCA-00010325

Ordering Information

Single package 23_SMA-50-0-12/111_NE

HUBER+SUHNER is certified according to ISO 9001, ISO 14001, ISO/TS 16949 and IRIS

www.hubersuhner.com

Waiver: It is exclusively in written agreements that we provide our customers with warrants and representations as to the technical specifications and/or the fitness for any particular purpose. The facts and figures contained herein are carefully compiled to the best of our knowledge, but they are intended for general information purposes only.

Document: DOC-0000187659 K / PDO C / date of publication: 12/5/2014 12:11:23 PM / uncontrolled copy

Page 1/1

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของฟิล์มกรองแสงติดยนต์คาร์บอนสีดำ



คุณสมบัติของฟิล์มกรองแสงไฮคูลแบล็คคาร์บอน

- กันความร้อนจากแสงแดด สูงสุด 75%
- กันรังสี Infrared สูงสุด 80%
- ไม่รบกวนสัญญาณ Easy Pass และสัญญาณดิจิทัลทุกชนิด
- อัตราการสะท้อนแสงต่ำ ไม่รบกวนทัศนวิสัยในการขับขี่บนท้องถนน

| CHOICE OF PRODUCT | สี | % กันความร้อนจากแสงแดด | % แสงผ่าน | % สะท้อนแสง | % ป้องกัน UV | % ป้องกัน IR | GPS | EASY PASS |
|-------------------|---|------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|-----|-----------|
| BC 35 ดำเทา |  | 68 % | 36 % | 8 % | 99 % | 80 % | ✓ | ✓ |
| BC 25 ดำอ่อน |  | 70 % | 26 % | 7 % | 99 % | 80 % | ✓ | ✓ |
| BC 15 ดำกลาง |  | 72 % | 16 % | 7.5 % | 99 % | 80 % | ✓ | ✓ |
| BC 10 ดำเข้ม |  | 73 % | 10 % | 7 % | 99 % | 80 % | ✓ | ✓ |
| BC 05 ดำเข้ม |  | 75 % | 5 % | 8 % | 99 % | 80 % | ✓ | ✓ |



Hi-Kool[®]
NEW BLACK CARBON

INFRARED 80%

ULTRAVIOLET 99%

ป้องกันรังสีอินฟราเรด และรังสียูวี ได้สูง

Diagram showing protection levels: ULTRAVIOLET 99%, INFRARED 80%, UV 99%, VL 10%, IR 80%.

ภาคผนวก ง
ผลงานที่ได้ตีพิมพ์



ผลงานที่ได้ตีพิมพ์

- [1] P. Aroonmitr, Ch. Rakluea, W. Lawtammajak, P. Rakluea, M. Tangjitjetsada, Ch. Mahatthanajatuphat, P. Akkaraekthalin and T. Thianthong, “A Minimized Thickness of MIMO Antenna Based on Thin Film Substrates for UWB application,” in *2023 The 2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON2023)*, Krabi, Thailand, 2023, pp. 1-5.





Abstract Book & Conference Program

The 2023 International Electrical Engineering Congress

March 8-10, 2023

Krabi, THAILAND



Technical Sponsors:

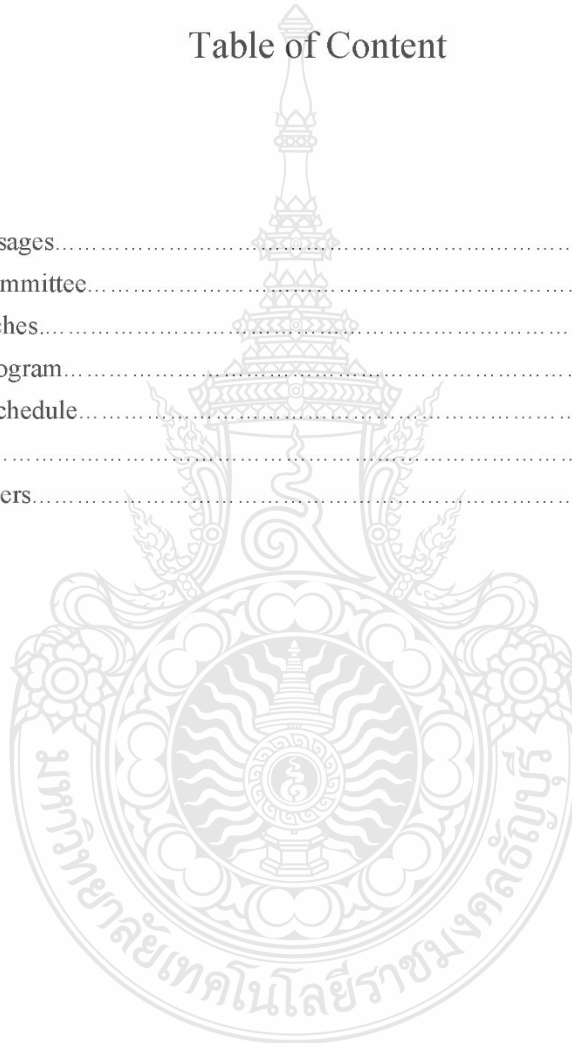


Co-Hosted by:



Table of Content

| | Page |
|----------------------------|------|
| Welcome Messages..... | 1 |
| Organizing Committee..... | 9 |
| Keynote Speeches..... | 13 |
| Conference Program..... | 15 |
| Presentation Schedule..... | 17 |
| Abstracts..... | 40 |
| List of Reviewers..... | 151 |





Organizing Committee

Honorary Advisory Chair

Prayook Srivilai (The President of Maharakham University, Thailand)

International Advisory Committees

Athikom Roeksbutr (Mahanakorn University, Thailand)

Keartisak Sriprateep (Maharakham University, Thailand)

Phaiboon Ungkanakornkul (Asefa Public Company Limited, Thailand)

Technical Advisory Committees

Ambrosio Cultura II (Uni. of Sci. and Tech. of Southern Philippines, Philippines)

Apirat Siritaratiwat (Khon Kaen University, Thailand)

Kosin Jammongthai (King Mongkut's University of Tech., Thonburi, Thailand)

Prayoot Akkarackthalin (King Mongkut's Uni. of Tech., North Bangkok, Thailand)

Sarawooth Boonkerdram (Sakon Nakhon Rajabhat University, Thailand)

Suparp Kanyacome (Kasetsart University, Sakon Nakhon Campus, Thailand)

Theerayuth Chatchanayeunyong (Maharakham University, Thailand)

Wekin Piyara (Srinakarintarawirote University, Thailand)



General Chair

Chonlatee Photong, IEEE Member, (Maharakham University, Thailand)

General Co-Chairs

Niwat Angkawisittpan (Maharakham University, Thailand)

Worawat Sa-ngiamvibool (Maharakham University, Thailand)

Technical Conference Committees

Adirek Jantakul (Rajamangala Uni. of Tech. Isan, Khonkaen, Thailand)
Apinan Aurasopon (Maharakham University, Thailand)
Aphisith Thephavongsa (National University of Laos, Lao People's Democratic Republic)
Boonyung Plangklang (Rajamangala Uni. of Tech. Thanyaburi, Thailand)
George Szrednicki (University of New South Wales, Australia)
Guenter Schroeder (Universitat Siegen, Germany)
Hideki Ueno (University of Hyogo, Japan)
Issa Batarsch (UCF, USA)
Jan Pieters (Universiteit Gent, Belgium)
John Black (University of New South Wales, Australia)
Jungrae Park (Applied Materials, Inc., California, USA)
Kaan Kerdchuen (Rajamangala Uni. of Tech. Isan, Thailand)
Kittipol Wiseang (Maharakham University, Thailand)
Lih-sheng Turng (University of Wisconsin-Madison, USA)
Mark Re (Seagate Technology, USA)
Mana Sopa, (Udon Thani Rajabhat University, Thailand)
Mario Attard (University of New South Wales, Australia)
Masahiro Otaki (Ochanomizu University, Japan)
Ming Dong (XJTU, China)
Nantakan Wongkasem (University of Texas, USA)
Nosrat Granpayeh (KNTU, Iran)



Technical Conference Committees (Cont.)

Osamu Watanabe (University of Tsukuba, Japan)
Pat Wheeler (University of Birmingham, UK)
Pei Cheng Ooi (The University of Nottingham, Malaysia Campus, Malaysia)
Philip N. Ji (NECLab, USA)
Pipat Durongdumrongchai, (North Eastern University, Thailand)
Pipat Somjai, (Buriram Rajabhat University, Thailand)
Sarayuth Pornjareon, (Ubon Ratchathani Rajabhat University, Thailand)
Sarah Thompson (University of York, UK)
Sivarit Sultornsanee (Northeastern University, USA)
Siwanatthakul Chaiyason (Asefa Public Company Limited, Thailand)
Somchat Sonasang, (Nakhon Phanom University, Thailand)
Songkod Phimpisan, (Kalasin University, Thailand)
Tanomsak Wongmeekeaw (Kasetsart University, Sakon Nakhon, Thailand)
Techat Buranaudsawakul (Asefa Public Company Limited, Thailand)
Thas A Nirmalathas (UNIMELB, Australia)
Vichate Ungvichian (Florida Atlantic University, USA)
Vo Ngoc Dieu (HCMUT, Vietnam)
Yulong Ding (University of Birmingham, UK)
Zuhaina Zakaria (UiTM, Malaysia)

Technical Program Chairs

Anan Kruesubthaworn (Khon Kaen University, Thailand)
Chaiyong Soemphol (Mahasarakham University, Thailand)
Pirat Khunkitti, IEEE Member, (Khon Kaen University, Thailand)
Puripong Suthisopapan (Khon Kaen University, Thailand)
Supannika Wattana (Mahasarakham University, Thailand)



Publicity and Website Chairs

Jagraphon Obma (Rajamangala Uni. of Tech. Isan, Khonkaen, Thailand)

Krittanon Prathepa (Maharakham University, Thailand)

Nattawoot Suwannata (Maharakham University, Thailand)

Registration Chairs

Narongkorn Uthathip (Maharakham University, Thailand)

Piyapat Panmuang (Rajamangala Uni. of Tech. Isan, Khonkaen, Thailand)

Taweesak Thongsan (Maharakham University, Thailand)

Financial Chairs

Buncha Wattana (Maharakham University, Thailand)

Cattareeya Suwanasri (King Mongkut's Uni. Of Tech. North Bangkok, Thailand)

Local Arrangement Chairs

Adisorn Nuan-on (Rajamangala Uni. of Tech. Isan, Surin, Thailand)

Nawarat Piladaeng (Maharakham University, Thailand)

Publication Chairs

Chonlatee Photong, IEEE Member, (Maharakham University, Thailand)

Pirat Khunkitti, IEEE Member, (Khon Kaen University, Thailand)

General Secretariate

Nuttapon Chaiduangstri, IEEE Member, (Maharakham University, Thailand)



The 2023 International Electrical Engineering Congress

March 8-10, 2023, Krabi, THAILAND



Conference Program

Thursday 9th March 2023

| Time | Session: Power & Energy 3 | Session: Electronics & Control 3 | Session: Computer & IT 2 | Session: Digital signal processing |
|-------------|---|---|--|---|
| | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: |
| | Prof. Aydogan Ozdemir Asst. Prof. Bongkoj Sookananta | Assoc. Prof. Lorant Andras Szolga Dr. Piyapat Panmuang | Asst. Prof. Somchat Sonasang Dr. Jagraphon Obma | Assoc. Prof. Rong Phoophuangpairoj Assoc. Prof. Chukiet Sodsri |
| 15.30-15.45 | PO2656 | PO2671 | PO2639 | PO2610 |
| 15.45-16.00 | PO2657 | PO2674 | PO2651 | PO2630 |
| 16.00-16.15 | PO2663 | PO2676 | PO2652 | PO2658 |
| 16.15-16.30 | PO2667 | PO2691 | PO2661 | PO2659 |
| 16.30-16.45 | PO2668 | PO2694 | | PO2708 |
| 16.45-17.00 | PO2669 | PO2709 | | PO2712 |
| 17.00-17.15 | PO2670 | PO2710 | | PO2725 |
| 17.15-17.30 | | PO2711 | | |
| 18.00-21.00 | Banquet | | | |

Friday 10th March 2023

| Time | Session: Power & Energy 4 | Session: Communications 3 | Session: Computer & IT 3 | Session: Other related areas |
|-------------|---|--|---|--|
| | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: |
| | Asst. Prof. Theerayuth Chatchaneyunong Dr. Matheepot Phattanasak | Assoc. Prof. Jessada Konpang Dr. Phatsakul Thitimahatthanakusol | Assoc. Prof. Vasaka Visoottiviseth Asst. Prof. Lamul Wiset | Asst. Prof. Somchat Sonasang Dr. Yongyut Kaewjumras |
| 9.00-9.15 | PO2682 | PO2680 | PO2687 | PO2602 |
| 9.15-9.30 | PO2686 | PO2681 | PO2696 | PO2704 |
| 9.30-9.45 | PO2690 | PO2683 | PO2701 | PO2716 |
| 9.45-10.00 | PO2692 | PO2684 | PO2707 | PO2726 |
| 10.00-10.15 | PO2693 | PO2685 | PO2714 | |
| 10.15-10.30 | PO2698 | PO2695 | | |

Session break

| Time | Session: Power & Energy 5 | Session: Communications 4 | Session: Power & Energy 6 |
|-------------|---|---|---|
| | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: | Chair/ Co chair: |
| | Dr. Arak Bunmat Dr. Promphak Boonraksa | Prof. Larbi Talbi Assoc. Prof. Jessada Konpang | Asst. Prof. Banyat Boribun Asst. Prof. Boonruang Marungsri |
| 10.45-11.00 | PO2700 | PO2697 | PO2721 |
| 11.00-11.15 | PO2702 | PO2706 | PO2722 |
| 11.15-11.30 | PO2705 | PO2715 | PO2723 |
| 11.30-11.45 | PO2717 | PO2719 | PO2727 |
| 11.45-12.00 | PO2720 | PO2724 | PO2728 |

Lunch

| | | | |
|-------------|--|--|--|
| 13.00-16.00 | Special Talk on ASEFA Technology by Dr. Siwanathakul Chaiyason | | |
| | Industrial Technology Exhibition & Demonstration Innovation & Technology Themes: Electrical Power Distribution, Switchboard, Trunking, Lighting, Automation and Energy Management | | |

End of Conference



Presentation Schedule

March 10, 2023

| | | |
|--|--|-------------|
| Session: Communications 3 | | Room 2 |
| Chair/Co-chair: Assoc.Prof. Jessada Konpang / Dr. Phatsakul Thitimahatthanakusol | | |
| PO2680 | Axial Ratio Enhancing in Perfect Circularly Polarized Microstrip Antenna <i>Kritthanit Malathong, Jessada Konpang and Nantakan Wongkasem</i> | 9.00-9.15 |
| PO2681 | FOREX trend detection using YOLO Method <i>Kritthanit Malathong, Adisorn Sirikham, Jessada Konpang, Suttee Tubtongdee, Kamon Tabaiya and Phatsakul Thitimahatthanakusol</i> | 9.15-9.30 |
| PO2683 | A Minimized Thickness of MIMO Antenna Based on Thin Film Substrate for UWB application <i>Pongsathorn Aroommit, Chawalit Rakhuea, Wisit Lavtammajak, Paitoon Rakhuea, Maleeya Tangjitjetsada, Chatree Mahatthanajatuphat, Prayoot Akkaraekithalin and Tawan Thianthong</i> | 9.30-9.45 |
| PO2684 | Design of Vivaldi Array Antenna for Hydrogen Line Observation and Weather Radar Application <i>Chawalit Rakhuea, Wisit Loedhammacakra, Nattapong Duangrit, Spiro George Sarris, Lalida Tantiparimongkol and Wilaiporn Lee</i> | 9.45-10.00 |
| PO2685 | A Dual Sided CPW fed MIMO Antenna for UWB Communications with WLAN Notching Capability <i>Aale Muhammad and Panuwat Janpugdee</i> | 10.00-10.15 |
| PO2695 | Waveguide Antenna with an Inverted 3-tiered Cake-shaped Probe for NB-IoT Applications <i>Sommart Promput, Watcharaphon Naktong, Suwat Sakulchat and Amnoiy Ruengwaree</i> | 10.15-10.30 |



List of Reviewers

A

Adisorn Nuan-on
Amornthep Sonsilphong
Anan Kruesubthaworn
Apichai Bhatranand
Arak Bunmat

B

Bongkoj Sookananta
Boonyang Plangklang
Buncha Wattana

C

Chainarong Kittiyanyunya
Chaiyong Soemphol
Chonlatee Photong

E

Ekkaphol Khansalce

J

Jagraphon Obma
Jirapat Sangthong
Jiraporn Pooksook

K

Khanit Matra
Kiattisin Kanjanawanishkul
Kidsanapong Punttri
Kittipol Wisaeng
Komchawal Chaipah
Krisada Prachumrasec
Krischonme Bhummkipich
Krit Somkantha
Kritphon Phanrattanachai
Kritthanit Malathong

M

Mana Sopa
Meechai Jamsai
N
Nararat Ruangchaijatupon
Nattawoot Suwannata
Nawarat Piladaeng
Niphat Jantharamin
Nipoteat Muangkote
Niwat Angkawisittpan
Nuchanart Fafiem
Nuttapon Chaiduangstri

P

Paiboon Yoiod
Paitoon Rakluca
Phatsakul Thitimahatthanakusol
Phichai Youplao
Phoemporn Lakkhanawannakun
Piyadanai Pachanapan
Piyapat Panmuang
Piyawad Kasabai
Prakasit Prabpal
Prapita Thanaruk
Puripong Suthisopapan

R

Rangsan Wongsan
Rungaroon Porncharoen

S

Sarawoot Boonkirdram
Sarawut Wattanawongpitak
Sittiporn Channumsin

Somchat Sonasang

Songgrod Phimpisan
Sudarat Khwan-on
Supakorn Harnsoongnoen
Supannika Wattana
Suparek Janjarasjitt
Suphachoke Sonsilphong
Suwan Janin
Suwicha Phuttarat

T

Tanit Malakorn
Taweesak Thongsan

V

Vorapoj Patanavijit

W

Wichian Ooppakaew
Worawat Sa-Ngiamvibool
Worrajak Muangjai

Y

Yuttapong Jiraksopakun

A Minimized Thickness of MIMO Antenna Based on Thin Film Substrates for UWB application

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 st Pongsathorn Aroonmitr Faculty of Engineering, Department of Electronics and Telecommunication Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi 39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Rd. (Klong6), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand pongsathorn_a@mail.rmutt.ac.th | 2 nd Chawalit Raklua Faculty of Engineering, Department of Electronics and Telecommunication Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi 39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Rd. (Klong6), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand chawalit@rmutt.ac.th | 3 rd Wisit Loedhammacakra Faculty of Engineering, Department of Electronics and Telecommunication Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi 39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Rd. (Klong6), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand wisit@rmutt.ac.th | 4 th Paitoon Raklua Faculty of Engineering, Department of Electronics and Telecommunication Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi 39 Moo 1, Rangsit- Nakhonnayok Rd. (Klong6), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand paitoon_r@rmutt.ac.th |
| 5 th Maleeya Tangjitjetsada Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electronics and Telecommunication Engineering Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 217 Nonthaburi Rd., Suanyai, Mueang, Nonthaburi, 11000, Thailand maleeya72@gmail.com | 6 th Chatree Mahatthanajaturaphat Faculty of Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok 1518 Pracharat 1 Rd., Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand chatree.m@eng.kmutnb.ac.th | 7 th Prayoot Akkarakethalin Faculty of Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok 1518 Pracharat 1 Rd., Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand prayoot@kmutnb.ac.th | 8 th Tawan Thianthong Siam Airport Ground Services Co.,Ltd. 431/57 Song Prapha Rd. Don Mueang, Bangkok 10210, Thailand tawan_absg@hotmail.com |

Abstract— This paper presents a compact MIMO antenna for ultra-wideband (UWB) applications. It is created based on a thin film for an antenna substrate to minimize the antenna thickness, resulting in the antenna being utilized well on a curved surface. The film thickness is about 0.056 mm was used to design and cooperate with the rectangular slot antenna and rectangular stub. In addition, the antenna cover frequency range from 3.1 GHz to 10.6 GHz with the S11 and S21 below -10 dB and -15 dB, respectively. The antenna will be fed by 50 Ω coplanar waveguide for a transmission line. Moreover, an Envelope Correlation Coefficient (ECC) isn't more than 0.05 throughout the frequency range. The antenna radiation pattern is bi-directional all bands and the maximum gain is 4.6 dBi. The proposed antenna can be applied to the WPAN and WLAN, UWB communication systems as well.

Keywords—MIMO, UWB, Car-Film, Slot Antenna, CPW

I. INTRODUCTION

Presently, wireless communication technology has evolved to a point where everything may communicate and work together through various types of connections, such as Wireless Local Area Network (WLAN), which is a connection within the area through an access point, Wireless Personal Area Network (WPAN), which links devices inside the personal area, and Wireless Body Area Network (WBAN), which is the connection between the

network device on the human body and the gadget. Therefore, the Federal Communications Commission (FCC) [1] defines the design of an antenna for Ultra-wideband (UWB) with a frequency range from 3.1 GHz to 10.6 GHz. Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) is a popular technique to support a variety of applications. Increasing the efficiency of applications that require high speed and a greater level of data transfer.

In literature, an antenna design for UWB utilizing either a monopole antenna with a circular patch in [2] or a slot antenna with a rectangular patch in [3] has been presented in a publication. Both [2] and [3] utilize CPW feeding, in which the bandwidth ranges from 3.1 and 10.6 GHz. The solid substrate may not, however, be suited for curved surface application. Numerous studies have attempted to implement alternative substrate types in antenna design. The use of wearable textiles as a substrate is proposed in [4]. The antenna consists of a monopole antenna with a hexagonal form and it was fed by a microstrip. The testing result revealed that the bandwidth of a prototype ranged from 1.76 GHz to 17.78 GHz. In [5] and [6] it is proposed to utilize thin films as substrates, whose thicknesses are thinner than those discussed in [4]. However, it maintains the same frequency range as UWB. Moon-shaped monopole antenna with a CPW feeding waveguide was suggested in [5]. The antenna operates over an impedance bandwidth of 171% (3 GHz to 40 GHz) and a 13:1 ratio bandwidth with a return loss of at least 10 dB. In [6], a

rectangular slot antenna with rounded corners and a feeding waveguide with CPW was proposed to provide UWB impedance matching from 2 GHz to 11.6 GHz with $|S_{11}| < -10$ dB. Therefore, these techniques are still utilized today to enhance antenna efficiency. As part of the MIMO design in [7], the antenna was designed with the same structure as another one, and another port was rotated by 90 degrees to reduce port interference.

This paper presents a compact MIMO antenna created from a thin film for UWB applications. The proposed antenna covers the frequency range of UWB operation. In particular, a thin film employed as a substrate for the proposed antenna is inexpensive and simple to acquire. In addition, the proposed antenna is thinner than the antennas reviewed in [1–7]. The antenna consists of a rectangular slot antenna fed by a CPW waveguide at both ports. In addition, the characteristics of the antenna, such as the S-parameter, gain, radiation patterns, ECC and group delay. It will be analyzed by the CST studio software and described in the next section.

II. ANTENNA DESIGN

This section describes the proposed antenna design. The black carbon film is utilized as a substrate. It has a dielectric constant of 3.2, a thickness of 0.056 mm, and a loss tangent ($\tan\delta$) of 0.016. These values, obtained from the output of the Agilent Split Cylinder Resonator 85072A, will be used to design the proposed antenna using the CST Microwave Studio program. The antenna structure depicted in Fig. 1 has dimensions of $64 \times 27 \times 0.126$ mm³. The antenna consists of a rectangular slot and a rectangular stub fed by a 50 Ω CPW waveguide. At a frequency of 3 GHz, the antenna slot is designed and optimized with an electrical length of λ_g . To study the properties of S-parameters, the significant parameters of L_p and S will be altered and evaluated by CST software.

Fig. 2 illustrated the results of the S_{11} and S_{21} parameters. As decreasing the parameter of W_c , the resonant frequency at 3.5 GHz shifts higher. At a higher frequency band, it is indicated that the S_{11} level decreases clearly, as decreasing the parameter of W_c but the resonant frequency of the S_{21} parameter fluctuates. Fig. 3 depicted the results of the S_{11} and S_{21} parameters as increasing the parameter of S . It is found that the S_{21} level decreases as the distance S between the antennas increases. According to the results, it was implied that the rectangular slot has an influence on the low-frequency band, while the distance between the antennas affects the antenna coupling, impacting the MIMO applications. Additionally, the suitable parameters, as shown in Table I, will be chosen to enable the antenna to operate in frequency ranges of the UWB with the $|S_{11}| < -10$ dB and $|S_{21}| < -15$ dB. Then, the antenna prototype is created and optimized as shown in Fig. 4.

III. RESULT AND DISCUSSIONS

This section discusses the characteristics and performance results of the proposed antennas as evaluated by Agilent PNA Network Analyzers. The proposed antenna was tested in the Anechoic chamber room.

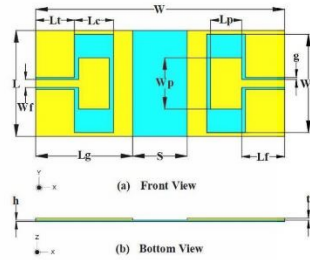


Fig. 1. The geometry of the proposed antenna.

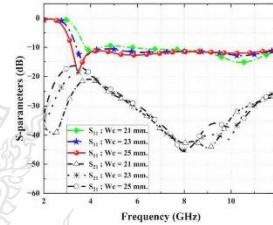


Fig. 2. Simulated S-parameters for variation value W_c .

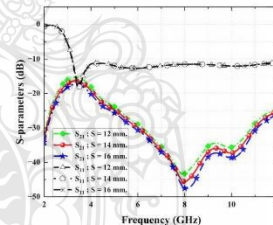


Fig. 3. Simulated S-parameters for variation value S .

Fig. 5 depicts the comparison of the reflection coefficient between simulated and measured results. It is indicated that the reflection coefficient of simulated and measured results can support the UWB operating frequency range from 3.1 to 10.6 GHz with $|S_{11}|$ and $|S_{22}| < -10$ dB. Even though this mismatch may occur due to the connection of the SMA connectors by soldering, copper cutting, etc. However, this antenna is still effective and supports the UWB frequency spectrum. Fig. 6 depicts the difference between the simulated and measured transmission coefficients. It has been found that the $|S_{21}|$ level of both results is below -15 dB and when using the antenna on curved surfaces, it still works close to the normal antenna as

shown in Fig. 7. In addition, an envelope correlation coefficient (ECC) is less than 0.5 throughout bands, as shown in Fig. 8. Then, it is acceptable and indicates that each port can operate independently and without interference.

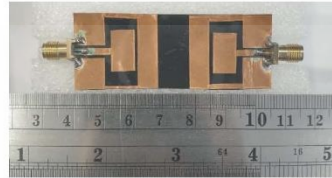


Fig. 4. The proposed antenna prototype.

TABLE I. PARAMETERS AND DIMENSIONS OF THE PROPOSED ANTENNA.

| Parameter | Value (mm.) | Parameter | Value (mm.) |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| W | 64 | L | 27 |
| W_p | 13 | l_p | 8 |
| W_c | 25 | L_c | 10 |
| W_f | 2 | l_f | 11 |
| S | 14 | l_g | 25 |
| g | 0.5 | L_t | 10 |
| h | 0.056 | t | 0.07 |

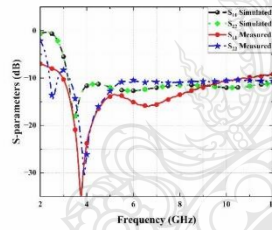


Fig. 5. The simulated and measured results of the reflection coefficient of the proposed antenna.

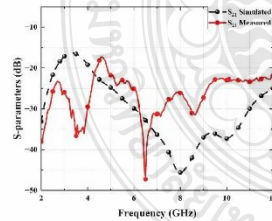


Fig. 6. The simulated and measured results of the transmission coefficient of the proposed antenna.

Fig. 9 and Fig. 10 show the radiation pattern of Port 1 and Port 2 with Co-polarization and Cross-polarization on XZ-Plane and YZ-Plane at 3.6 GHz, 5.4 GHz, 7.8 GHz, and 10.2 GHz. The radiation

patterns of the proposed antenna are bi-directional at all operating frequencies. However, the Cross-polarization of radiation patterns on the YZ plane extends as increasing the frequency. Furthermore, the peak gain of radiation patterns occurs at 0 degrees on XZ and YZ planes measured at the same frequency. Also, the maximum gain value of the proposed antenna is presented in Table II. It has been found that the maximum gain of the proposed antenna is 4.6 dBi.

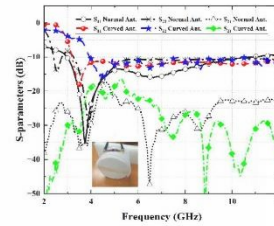


Fig. 7. The measurement results when used on curved surfaces.

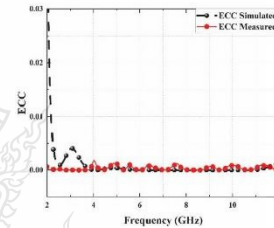
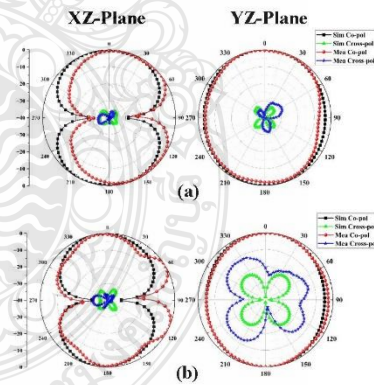


Fig. 8. The envelope correlation coefficient (ECC) of the proposed antenna.



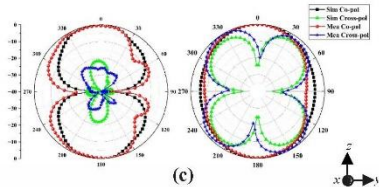


Fig. 9. The radiation pattern of proposed antenna Port 1 at (a) 3.6 GHz, (b) 5.4 GHz and (c) 10.2 GHz.

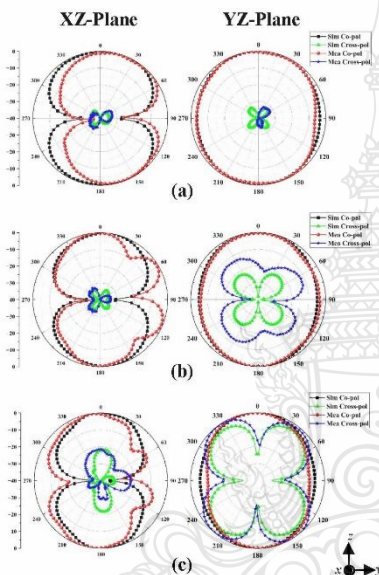


Fig. 10. The radiation pattern of proposed antenna Port 2 at (a) 3.6 GHz, (b) 5.4 GHz and (c) 10.2 GHz.

TABLE II. THE MAXIMUM GAIN OF THE PROPOSED ANTENNA.

| Antenna Gain (dBi) | Frequency (GHz) | | | |
|--------------------|-----------------|------|------|------|
| | 3.6 | 5.4 | 7.8 | 10.2 |
| Simulated | 2.64 | 4.24 | 5.05 | 4.52 |
| Measured (Port 1) | 2.22 | 4.00 | 4.60 | 3.98 |
| Measured (Port 2) | 2.41 | 3.91 | 4.57 | 4.23 |

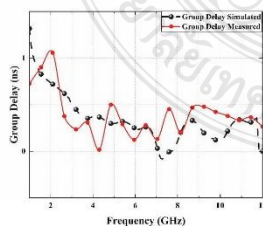


Fig. 11. The group delay of the proposed antenna.

Finally, the group delay will be investigated to verify the transmission process of UWB. Fig. 10 illustrated by the group delay variation through the UWB. It is indicated that the group delay variation is below 0.5 ns throughout the UWB frequency range. According to the result, the group delay isn't more than 2 ns indicating that the proposed antenna has minimal phase distortion.

IV. CONCLUSION

This paper presents a compact MIMO antenna created from a thin film for UWB applications. A rectangular slot antenna with a rectangular stub structure is designed on black carbon film to minimize the thickness of the antenna substrate. The proposed antenna is fed by a 50 Ω CPW transmission line at the port. Additionally, the measured results of the proposed antenna founded it can cover an operating UWB application at frequency range from 3.1 GHz to 10.6 GHz with the S11 and S22 \leq -10 dB while the S21 is less than or equal to -15 dB. Moreover, the envelope correlation coefficient with a value less than 0.5 in all bands indicates that data transmission between the two ports is well agreed upon and operates independently. The radiation pattern of the antenna is bi-directional and the maximum gain is 4.6 dBi. The group delay is less than 2 ns. According to the results, it can be concluded that the proposed antenna can be practically applied to WBAN, WPAN, and WLAN, UWB applications.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by National Science, Research and Innovation Fund (NSRF), and King Mongkut's University of Technology North Bangkok with Contact no. KMUTNB-FF-66-10.

V. References

- [1] Federal Communications Commission revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems," FCC, Washington, DC, First Report and Order FCC, 02.V48, 2002.
- [2] Irina B. Vendik, Alexander Rusakov, Komsan Kanjanasit, Jiasheng Hong and Dmitry Filonov, "Ultrawideband (UWB) Planar Antenna with Single-, Dual-, and Triple-Band Notched Characteristic Based on Electric Ring Resonator," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 16, No. 1, 2017, pp. 1597-1600.
- [3] Anjaneyulu Katuru and Sudhakar Alapati, "Design and Analysis of a Compact Co-Planar Waveguide Fed Ground Slotted Corner Truncated Ultra-Wideband Patch Antenna," 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN), Vellore, India, 2019.
- [4] Pachoke Sopa and Paitoon Raklua, "The Hexagonal Shaped UWB Wearable Textile Antenna with Band-Notched Characteristics," 2020 8th International Electrical Engineering Congress (IIECON), Chiang Mai, Thailand, 2020.
- [5] Teerachai Ranadkaew and Paitoon Raklua, "A Compact Moon Shaped Super-Wideband Thin-Film Antenna," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2016.

- [6] Pornthep Thongyoy, Paitoon Raklua and Tanapong Nopavong na Ayudhaya, "Compact thin-film UWB antenna with round corner rectangular slot and partial circular patch," 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Phetchaburi, Thailand, 2012.
- [7] Deepika Sipal, Mahesh P. Abegaonkar and Shibani Kishen Koul, "Easily Extendable Compact Planar UWB MIMO Antenna Array," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 16, No. 1, 2017, pp. 2328-2331.



ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|--|
| ชื่อ - นามสกุล | พงศธร อรุณมิตร |
| วัน เดือน ปีเกิด | 6 กันยายน 253ค |
| ที่อยู่ | 35/166 หมู่ 1 ตำบลท่าช้าง อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000 ประเทศไทย |
| การศึกษา | |
| พ.ศ. 2557 | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย สายวิทย์-สาธารณสุข โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี |
| พ.ศ. 2561 | สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม-โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ประสบการณ์ทำงาน | พ.ศ. 2562 - 2566 นักวิชาการตรวจสอบและปฏิบัติการปฏิบัติการระดับกลาง สำนักงาน กสทช. พ.ศ. 2562 - ปัจจุบัน |
| เบอร์โทรศัพท์ | 086-4398714 |
| อีเมล | pongsathorn.a@nbt.go.th |

