

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับการรับสัญญาณโทรศัพท์ระบบดิจิทัล ซึ่งใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 จากนั้นจะทำการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [13] เพื่อศึกษาผลกระทบที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย ซึ่งสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้น จะกำหนดให้มีคุณลักษณะของสายอากาศตามที่ต้องการ คือ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง มีโพลาริซ์แนวนอน และมีความต้านทาน 75Ω การออกแบบสายอากาศจะนำโครงสร้างสายอากาศ [10] ตามรูปที่ 2.21 ของบทที่ 2 เป็นโครงสร้างเริ่มต้น โดยใช้แผ่นวงแหวนจำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกัน จากนั้นทำการเพิ่มขนาดของแผ่นวงแหวนและพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศ แล้วทำการป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวน จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศ โดยผลของการศึกษาผลกระทบจะเป็นแนวทางในการออกแบบและการพัฒนาสายอากาศ ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่โทรศัพท์ระบบดิจิทัล คือ 470 MHz ถึง 862 MHz

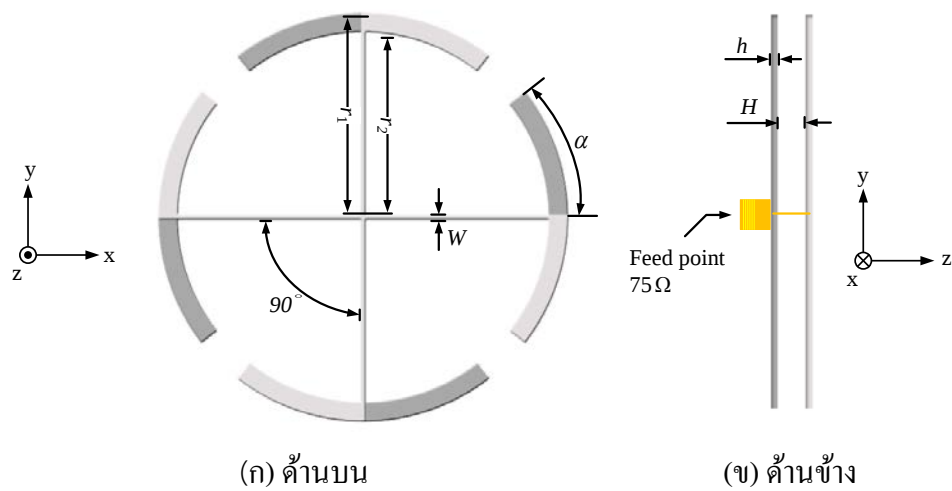
3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศจะใช้โครงสร้างของ [10] และทำการปรับขนาดความยาวของสายอากาศ โดยใช้ทฤษฎีของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น จะได้โครงสร้างดังรูปที่ 3.1 ในการคำนวณหาความยาวของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศนั้น เป็นแผ่นวงแหวนที่ถูกสร้างบนแผ่นทองเหลือง โดยการออกแบบสายอากาศจะใช้โปรแกรมในการจำลอง และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยจะพิจารณาค่า $|S_{11}| \leq -10$ dB การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® [13]

ความถี่ที่ใช้งานสำหรับโทรศัพท์ระบบดิจิทัลมีย่านความถี่ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz ซึ่งจะออกแบบโดยใช้ค่าความถี่กลางของย่านความถี่ใช้งาน ซึ่งเท่ากับ 666 MHz เพื่อหาขนาดความยาวคลื่นตามสมการที่ 3.1

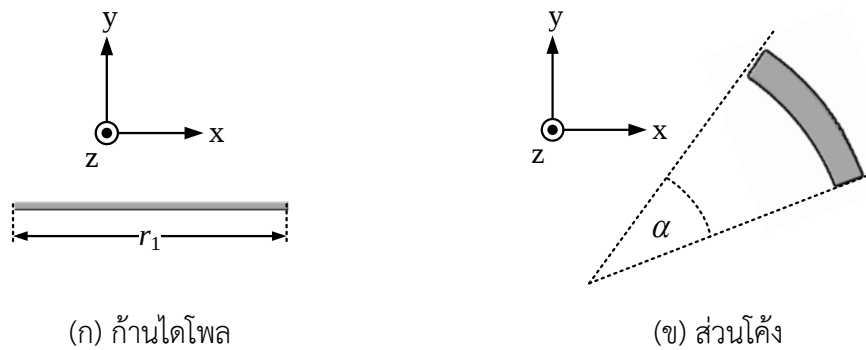
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 เมื่อ c คือความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ ซึ่งเท่ากับ 3×10^8 m/s และ f คือความถี่กลางของย่านความถี่โทรศัพท์ดิจิทัล ซึ่งเท่ากับ 666 MHz ส่วน λ คือความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ เมื่อทำการคำนวณแล้วจะได้ λ เท่ากับ 45 cm

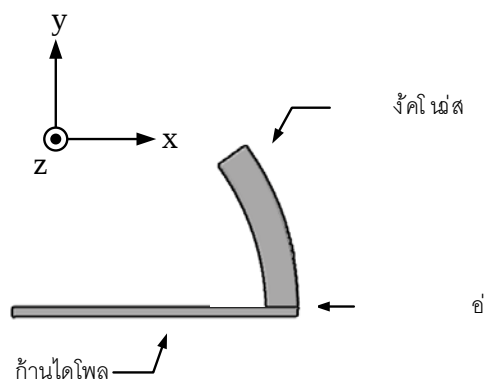


รูปที่ 3.1 สายอากาศที่ทำการออกแบบเริ่มต้น แบบสี่ก้าน

การเริ่มต้นออกแบบได้ใช้โครงสร้างสายอากาศไดโพลมาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดความยาวของก้านไดโพล โดยเริ่มจากสายอากาศไดโพลที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว r_1 ดังรูปที่ 3.2(ก) ที่มีขนาดความยาวของก้านไดโพลเท่ากับ $\lambda/2$ จะได้ r_1 เท่ากับ 22.5 cm และส่วนโค้งที่มีรัศมี α ตามรูปที่ 3.2(ข)

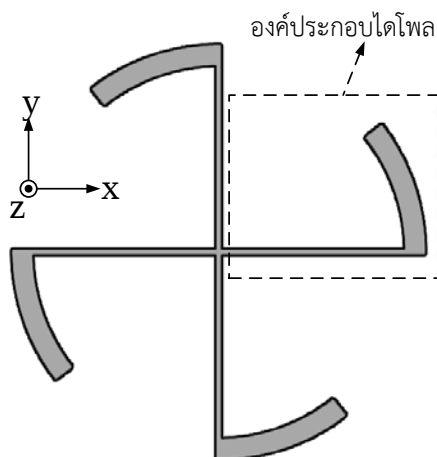


รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของก้านไดโพล และส่วนโค้ง



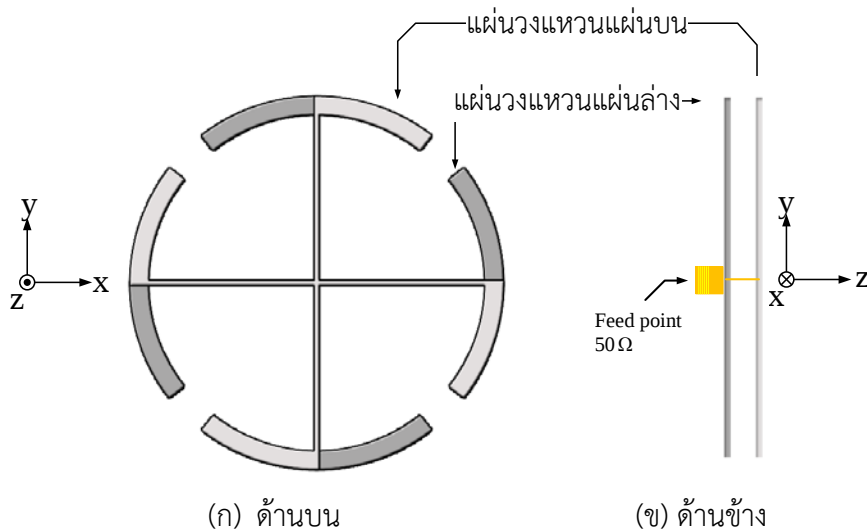
รูปที่ 3.3 องค์ประกอบไดโพล

จากนั้นทำการเชื่อมต่อก้านไดโพลเข้ากับส่วนโค้ง ตามรูปที่ 3.3 จะเรียกว่า “องค์ประกอบไดโพล” หลังจากนั้นทำการเชื่อมต่อองค์ประกอบไดโพลจำนวนสี่องค์ประกอบเข้าด้วยกัน และทำมุม 90° ซึ่งจะเรียกว่าองค์ประกอบไดโพลทั้งสี่ที่เชื่อมต่อกันว่า “แผ่นวงแหวน” ซึ่งแผ่นวงแหวนดังกล่าววางอยู่บนระนาบ xy หรือขนานกับพื้นโลก ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นวงแหวน

จากนั้นนำแผ่นวงแหวนจำนวนสองแผ่นมาวางซ้อนกันในแนวแกน z ดังรูปที่ 3.5(ก) และทำการป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวนทั้งสอง โดยมีไดโพลเล็กที่อากาศอยู่ระหว่างแผ่นวงแหวน ดังรูปที่ 3.5(ข)

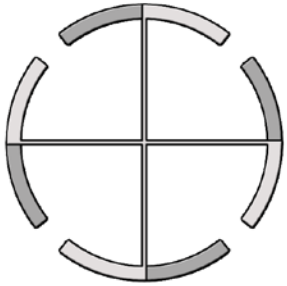
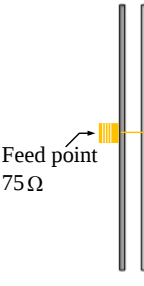
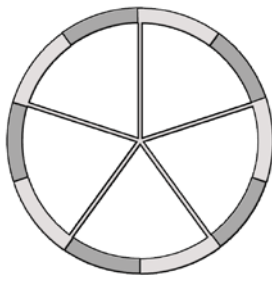
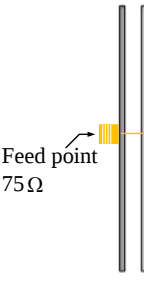
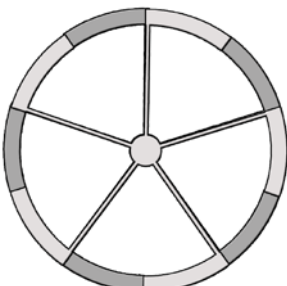
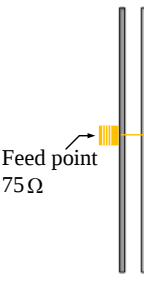


รูปที่ 3.5 สายอากาศเริ่มต้น

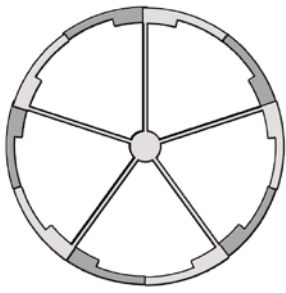
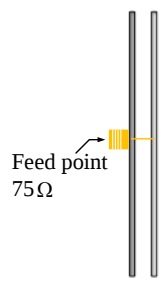
จากโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 3.5 นำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานเพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล โดยทำการปรับพารามิเตอร์

และปรับแต่งโครงสร้างเพิ่มเติม ซึ่งจะแสดงวิวัฒนาการของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน

ลำดับ	โครงสร้างสายอากาศ		อธิบายลักษณะโครงสร้าง
	ด้านบน	ด้านข้าง	
1			1) โครงสร้างมีลักษณะเป็นไดโพล 2) ไดโพลมีการเชื่อมต่อกับส่วนโค้ง เรียกว่า “องค์ประกอบไดโพล” 3) ทำการรวมองค์ประกอบไดโพลจำนวนสี่องค์ประกอบไดโพลเข้าด้วยกันเรียกว่า “แผ่นวงแหวน” 4) จากนั้นนำแผ่นวงแหวนจำนวนสองแผ่นวางซ้อนกันในแนวนอนกับพื้นโลก และป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวน 5) เรียกสายอากาศดังกล่าวว่า “สายอากาศแบบสี่ก้าน”
2			1) โครงสร้างคล้ายกับสายอากาศแบบสี่ก้าน แต่ได้เพิ่มลักษณะโครงสร้างของแผ่นวงแหวนด้วยองค์ประกอบไดโพล จำนวนห้าองค์ประกอบไดโพล 2) จากนั้นนำแผ่นวงแหวนจำนวนสองแผ่นวางซ้อนกันในแนวนอนกับพื้นโลก และป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวน (3) เรียกสายอากาศดังกล่าวว่า “สายอากาศแบบห้าก้าน”
3			1) จากโครงสร้างสายอากาศแบบห้าก้าน ได้เพิ่มลักษณะของแผ่นวงแหวน ให้มีพื้นที่จุดป้อนสัญญาณที่เป็นแผ่นวงกลมเล็ก 2) จากนั้นนำแผ่นวงแหวนจำนวนสองแผ่นวางซ้อนกันในแนวนอนกับพื้นโลก และป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวน 3) เรียกสายอากาศดังกล่าวว่า “สายอากาศแบบห้าก้านที่มีแผ่นป้อนสัญญาณ”

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงกลมซ้อนกัน (ต่อ)

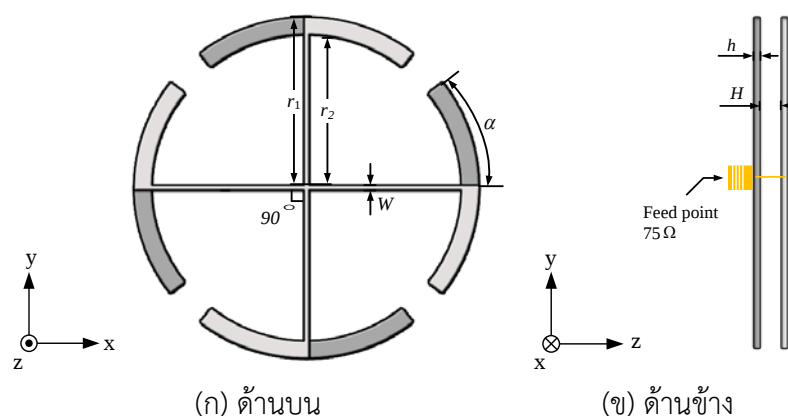
4			1) จากโครงสร้างสายอากาศแบบห้าก้าน ที่มีแผ่นป้อนสัญญาณ ได้เพิ่มส่วนประกอบขององค์ประกอบไดโพลที่บริเวณส่วนโค้ง ด้วยการใส่กิ่งโค้ง 2) จากนั้นนำแผ่นวงแหวนจำนวนสองแผ่นวางซ้อนกันในแนวขนานกับพื้นโลก และป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวน 3) เรียกสายอากาศดังกล่าวว่า “สายอากาศแบบห้าก้านที่มีกิ่งโค้ง”
---	---	---	---

แต่ละโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอในตารางที่ 3.1 นั้นมีผลต่อการตอบสนองความถี่สำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอล โดยจะแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 3.2.2 3.2.3 และ 3.2.4 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ และโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งจะมีผลกับค่าความต้านทาน ค่ารีแอคแตนซ์ ค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศ

3.2.1 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบสี่ก้าน

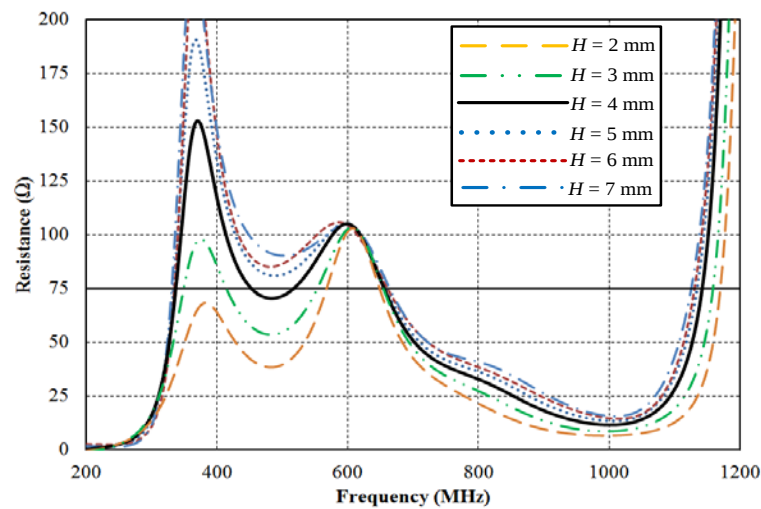
สายอากาศที่นำเสนอเป็นโครงสร้างเริ่มต้น เริ่มจากการจัดวางองค์ประกอบไดโพลจำนวนสี่องค์ประกอบ จากนั้นเชื่อมต่อองค์ประกอบไดโพลเข้าด้วยกัน รวมเป็นแผ่นวงแหวน หลังจากนั้นนำแผ่นวงแหวนมาวางซ้อนกันในแนวแกน z โดยมีไดอิเล็กทริกเป็นอากาศอยู่ระหว่างกลาง และมีการป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวนซึ่งแสดงได้ดังรูป 3.6 โดยสายอากาศที่ทำการออกแบบจะตอบสนองย่านความถี่เอชเอฟ ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และมีโพลาริซ์แนวนอน

โครงสร้างสายอากาศแบบสี่ก้าน ออกแบบโดยใช้วัสดุทองเหลืองชนิดแผ่น ที่มีขนาดความหนา (h) เท่ากับ 1 mm และป้อนสัญญาณเข้าที่ตรงกลางของแผ่นวงแหวนทั้งสอง จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม [13]

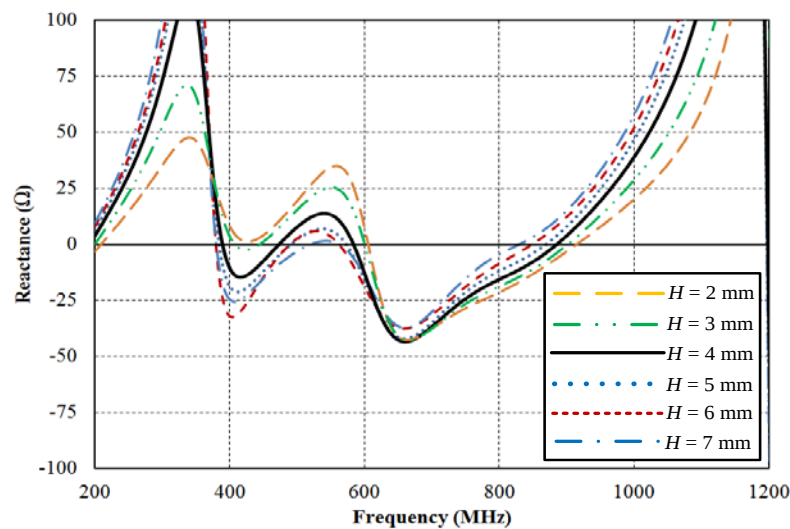


รูปที่ 3.6 สายอากาศที่ทำการออกแบบเริ่มต้น แบบสี่ก้าน

กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังนี้ ความยาวไดโพลหรือรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) เท่ากับ $\lambda/2$ จะได้เท่ากับ 22.5 cm รัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) เท่ากับ $\lambda/2.25$ จะได้เท่ากับ 20 cm ความกว้างของก้านไดโพล (W) เท่ากับ 2 mm ความหนาของแผ่นทองเหลือง หรือความหนาของแผ่นวงแหวน (h) เท่ากับ 1 mm มุมของส่วนโค้ง (α) ทำมุม 40° จากนั้นทำการปรับพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H) และทำการปรับหามุมส่วนโค้ง (α) หลังจากนั้นทำการปรับความกว้างของก้านไดโพล (W) โดยจะพิจารณาจากค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ จากนั้นทำการพิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของค่า $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ที่ครอบคลุมย่านความถี่ยูเอชเอฟ ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz และทำการจำลองผลการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศ สุดท้ายทำการจำลองผลและพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



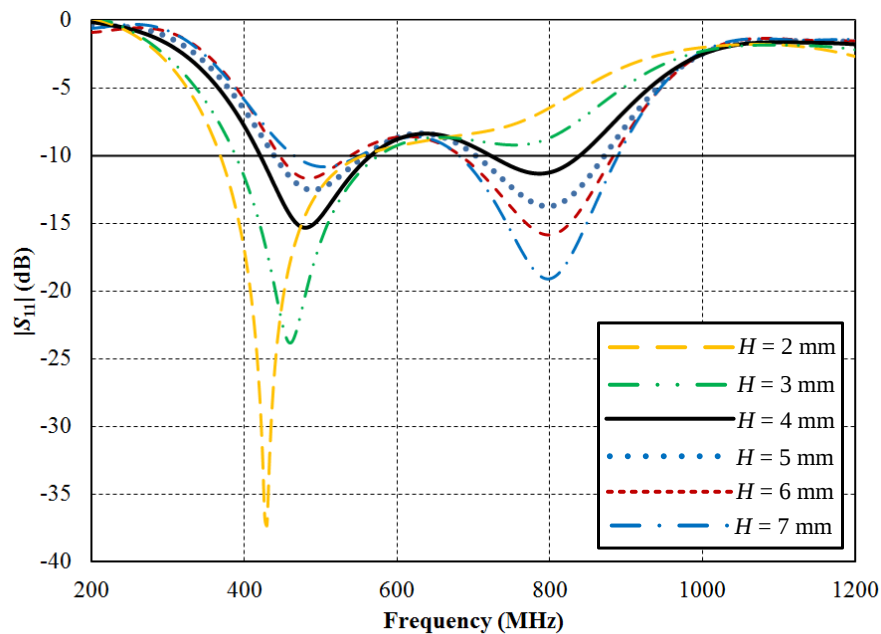
(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

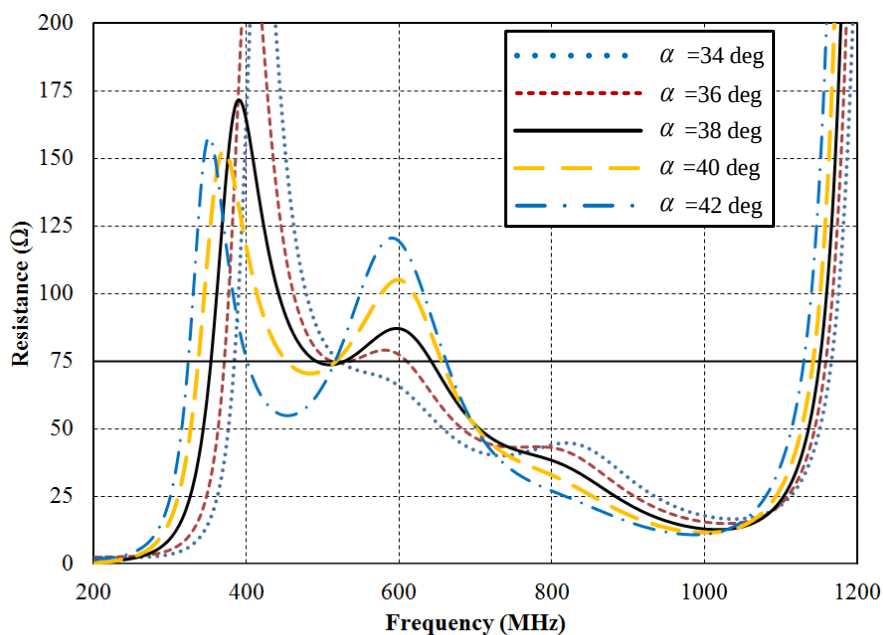
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H)

จากรูปที่ 3.7 พบว่าเมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนของสายอากาศ (H) และพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ พบว่าสายอากาศ มีค่าความต้านทานเข้าใกล้ 75Ω และมีค่ารีแอ็กแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 446 MHz ถึง 510 MHz ส่งผลให้ในช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่า $|S_{11}| \leq -10$ dB และช่วงความถี่ตั้งแต่ 501 MHz มีค่าความต้านทานไม่อยู่ในช่วง 75Ω และมีค่ารีแอ็กแตนซ์ไม่เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงมีผลต่อค่า $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 510 MHz ขึ้นไป คือ ค่า $|S_{11}|$ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8

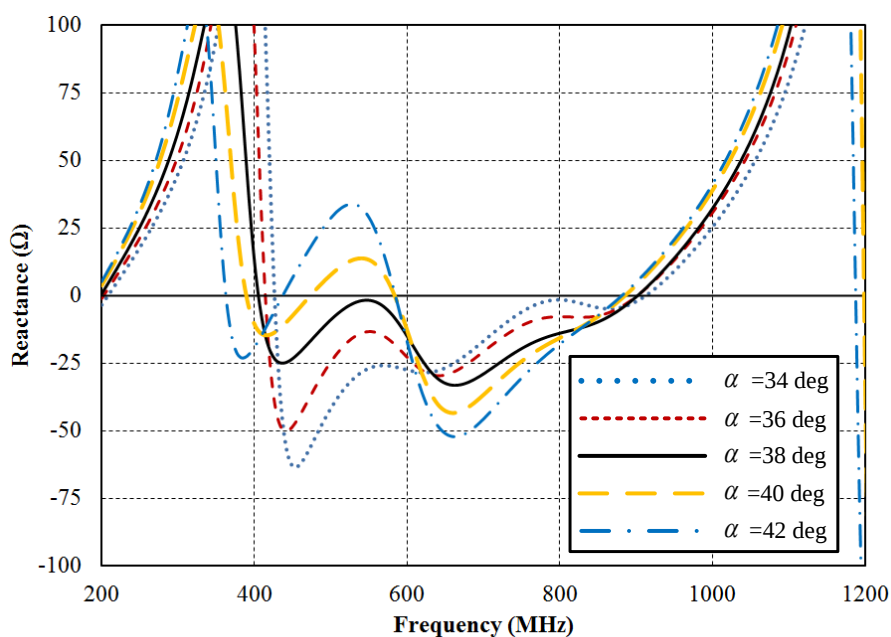


รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H)

จากรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนของสายอากาศ (H) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถี่ด้านต่ำมีค่า $|S_{11}|$ สูงขึ้น ส่วนความถี่ด้านสูงมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำลง จากผลการจำลอง จึงทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H) มีค่าเท่ากับ 4 mm เนื่องจากมีค่าความต้านทานเข้าใกล้ 75Ω และมีค่ารีแอ็กแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 446 MHz ถึง 510 MHz แต่เนื่องจากผลตอบแทนความถี่ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ยูเอชเอฟ 470 MHz ถึง 862 MHz จึงได้ทำการจำลองปรับมุมพารามิเตอร์ส่วนโค้ง (α) โดยพิจารณาผลค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ดังรูปที่ 3.9 และผลตอบแทนทางความถี่ของค่า $|S_{11}|$ ดังรูปที่ 3.10



(ก) ค่าความต้านทาน

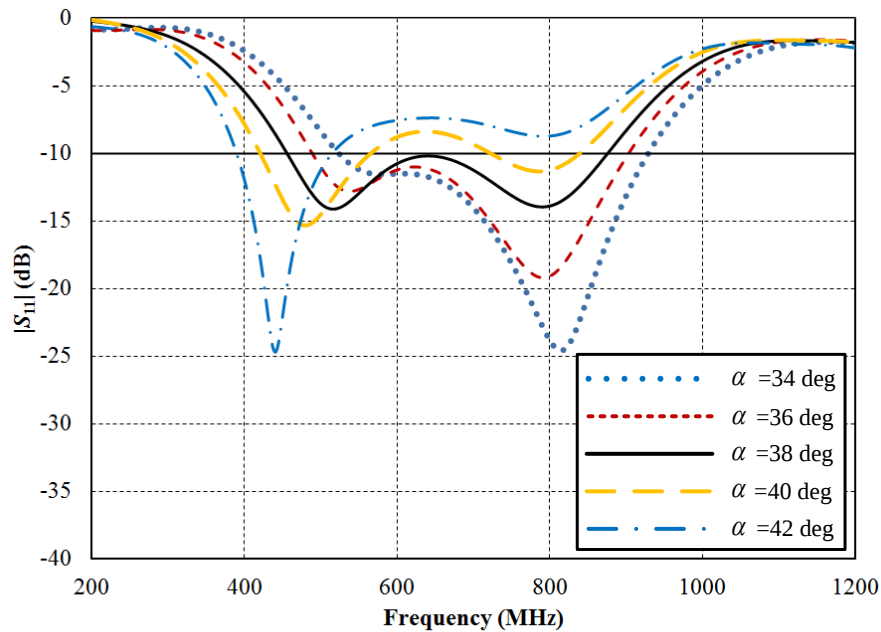


(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.9 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ
เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm
และทำการปรับมุมของส่วนโค้ง (α)

จากรูปที่ 3.9 พบว่าเมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm และทำการปรับมุมของพารามิเตอร์ส่วนโค้ง (α) จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ พบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 510 MHz มีค่าความต้านทาน

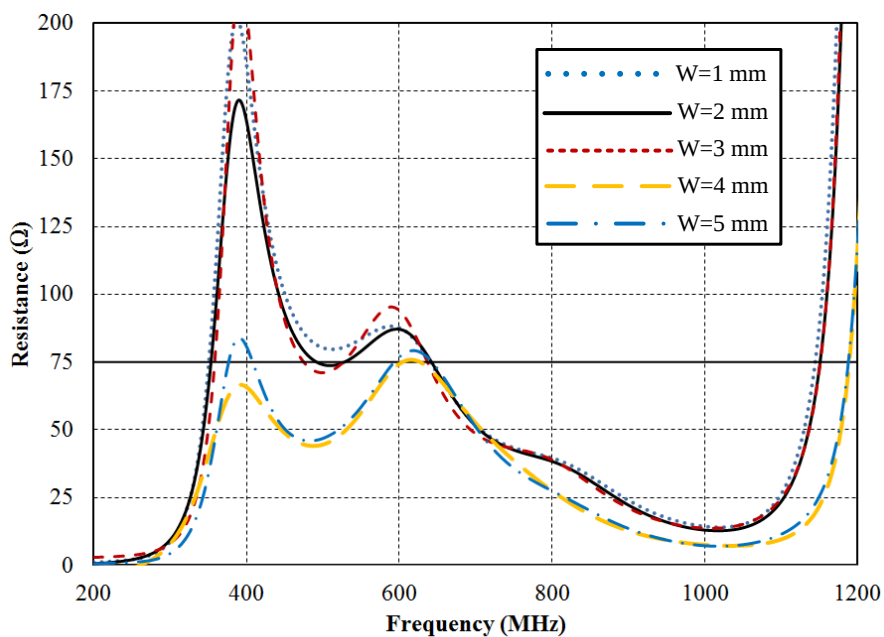
ลดลงถึง 80Ω ซึ่งก่อนหน้านี้ค่าความต้านทานสูงถึง 120Ω และมีค่ารีแอ็กแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ในช่วงความถี่ 457 MHz ถึง 611 MHz และช่วง 660 MHz ถึง 871 MHz มีค่า $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$



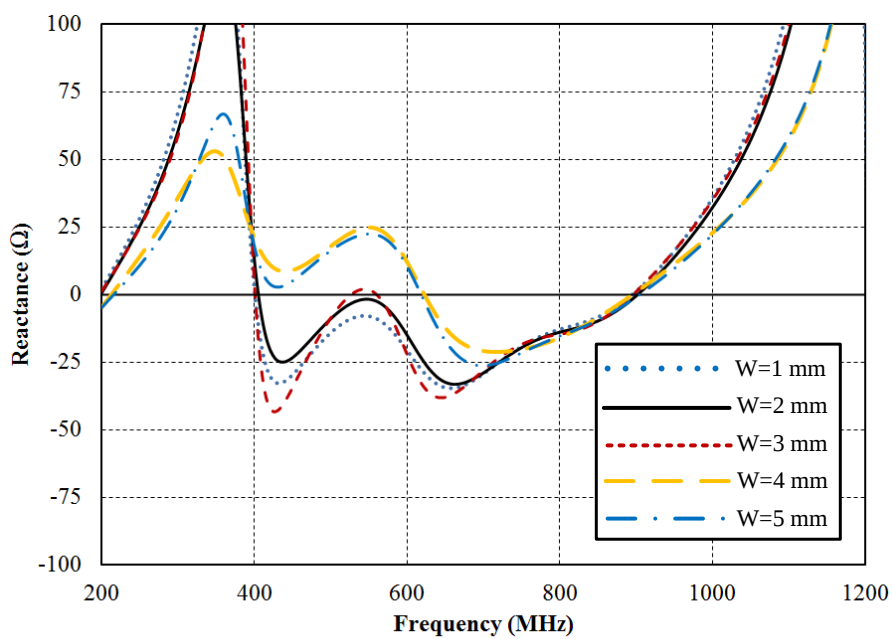
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm และทำการปรับมุมของส่วนโค้ง (α)

จากรูปที่ 3.10 พบว่าเมื่อปรับขนาดส่วนโค้ง (α) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขอบความถี่ด้านต่ำเลื่อนลงไปตามความถี่ต่ำ โดยมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำลง ส่วนขอบความถี่ด้านสูงเลื่อนต่ำลงไปตามความถี่ต่ำ โดยมีค่า $|S_{11}|$ เพิ่มสูงขึ้น จากผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ พบว่ามุมของส่วนโค้ง (α) เท่ากับ 38° ส่งผลให้ในช่วงความถี่ 457 MHz ถึง 611 MHz และช่วงความถี่ 660 MHz ถึง 871 MHz มีค่า $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$

จากการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ ค่อนข้างสูง ในช่วงความถี่ 612 MHz ถึง 669 MHz จึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ความกว้างของก้านไดโพล (W) โดยพิจารณาร่วมกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ดังรูปที่ 3.11 ส่วนผลตอบสนองทางความถี่ของค่า $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



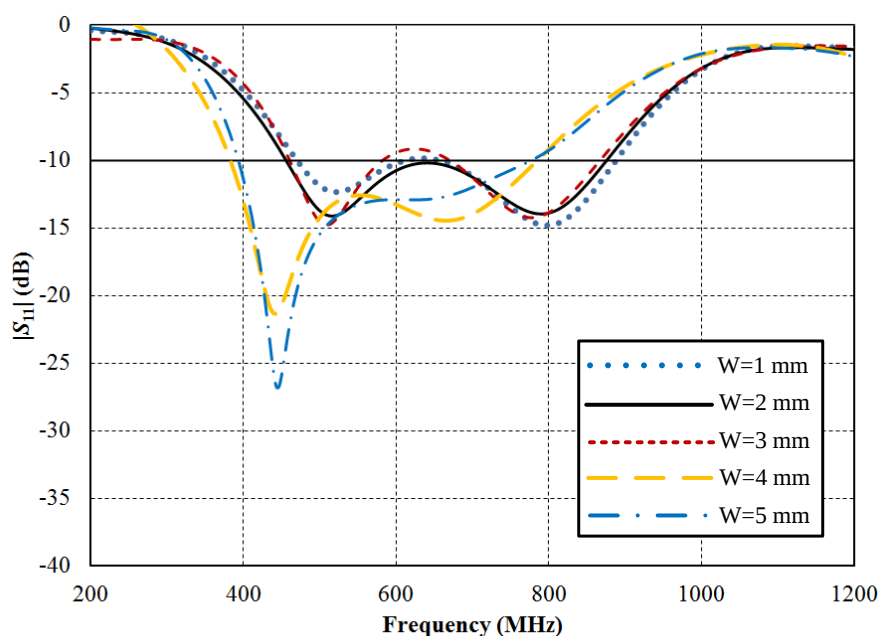
(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.11 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ
เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm
ส่วนโค้ง (α) เท่ากับ 38° และทำการปรับความกว้างก้านไดโพล (W)

จากรูปที่ 3.11 พบว่า เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm มุมของส่วนโค้ง (α) เท่ากับ 38° และทำการปรับความกว้างก้านไดโพล (W) จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศที่ได้ทำการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวพบว่า เมื่อทำการปรับความกว้างก้านไดโพล (W) ส่งผลให้ค่าความต้านทานของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้นลดลง และให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลจากการจำลองพบว่า พารามิเตอร์ความกว้างก้านไดโพล (W) ที่มีค่าเท่ากับ 2 mm เป็นค่าที่เหมาะสม ส่วนค่า $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งพบว่าเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ เลื่อนลงไปทางด้านความถี่ต่ำ



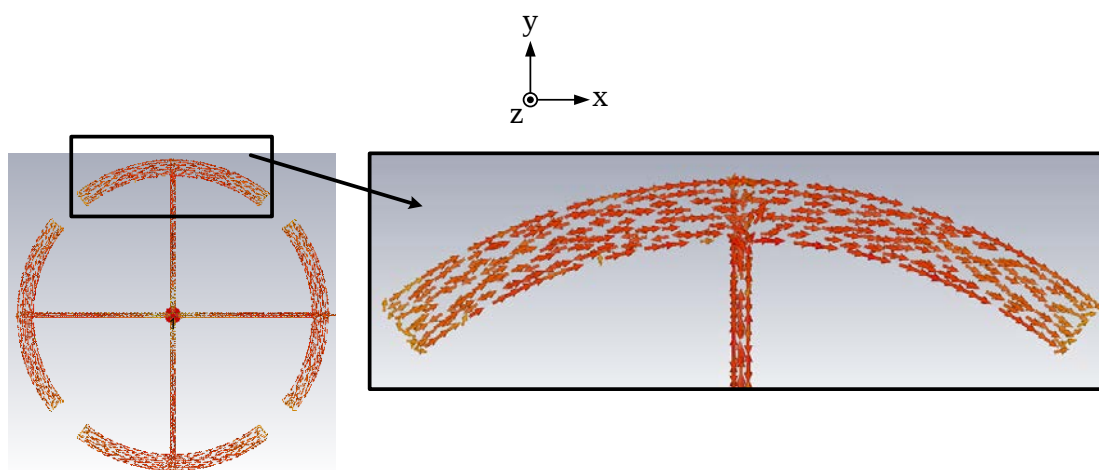
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อกำหนดระยะระหว่างแผ่นวงแหวนสายอากาศ (H) เท่ากับ 4 mm มุมของส่วนโค้ง (α) เท่ากับ 38° และทำการปรับความกว้างก้านไดโพล (W)

จากการปรับของความกว้างก้านไดโพล (W) พบว่าค่าความกว้างเท่ากับ 2 mm เป็นค่าที่เหมาะสมมากที่สุด และพบว่าครอบคลุมความถี่ใช้งาน คือ 470 MHz ถึง 862 MHz แต่พบว่าช่วงความถี่กลางของย่านความถี่ใช้งานมีค่า $|S_{11}|$ ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับโครงสร้างและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อไป ซึ่งได้ทำการกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2

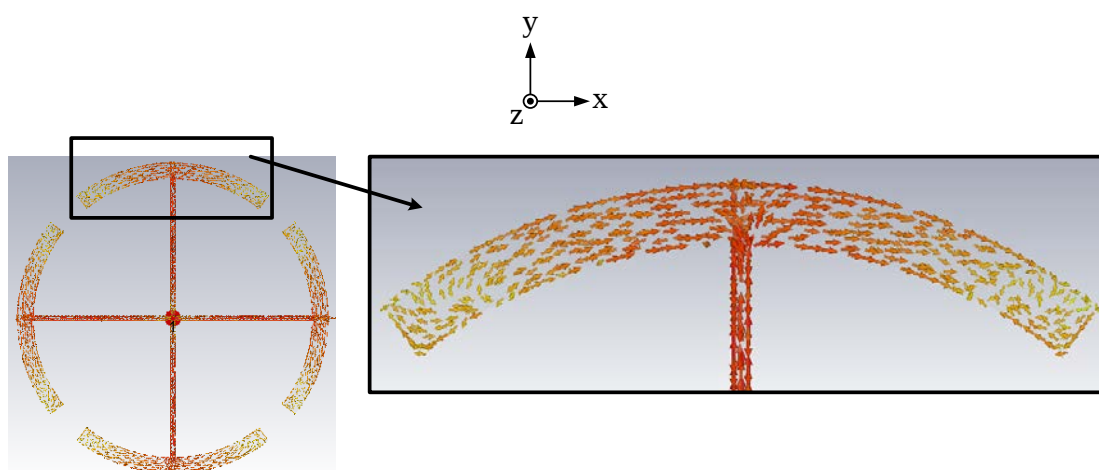
ต่อไปจะเป็นการจำลองผลการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่ก้าน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ จากการปรับค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปโครงสร้างสายอากาศและแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบสี่ก้าน

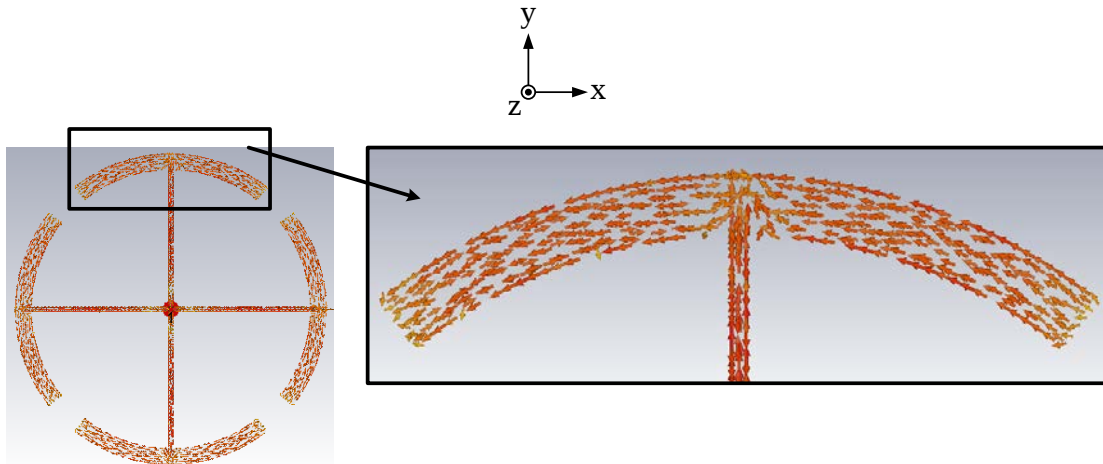
พารามิเตอร์	คำจำกัดความ	ขนาด
r_1	รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ	225 mm
r_2	รัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ	200 mm
W	ความกว้างก้านไดโพล	2 mm
H	ระยะห่างระหว่างวงแหวน	4 mm
h	ความหนาแผ่นวงแหวน	1 mm
α	มุมส่วนโค้ง	38 deg



(ก) ความถี่ 470 MHz



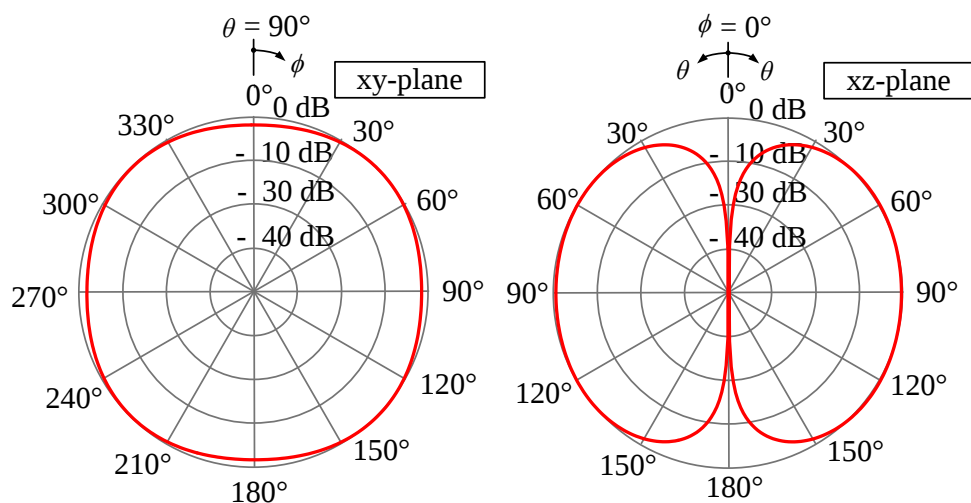
(ข) ความถี่ 666 MHz



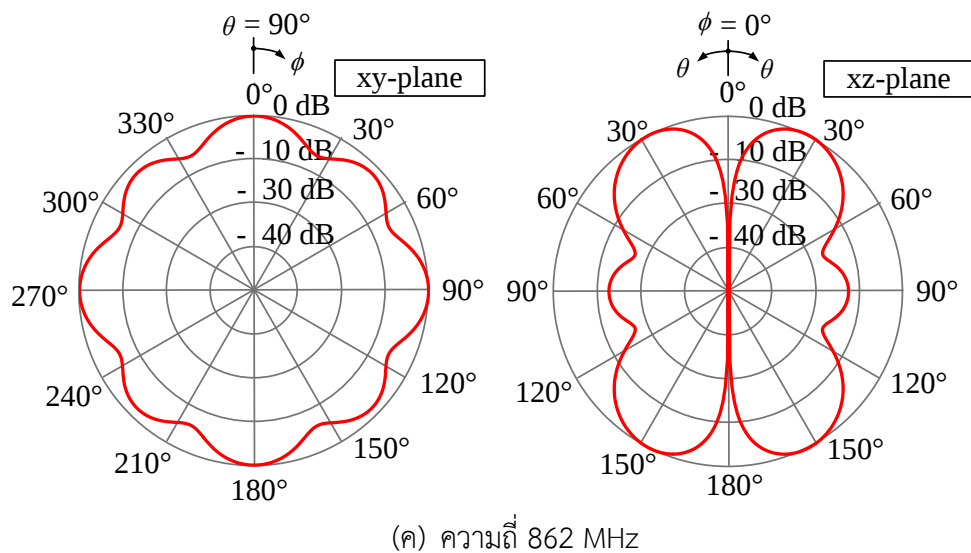
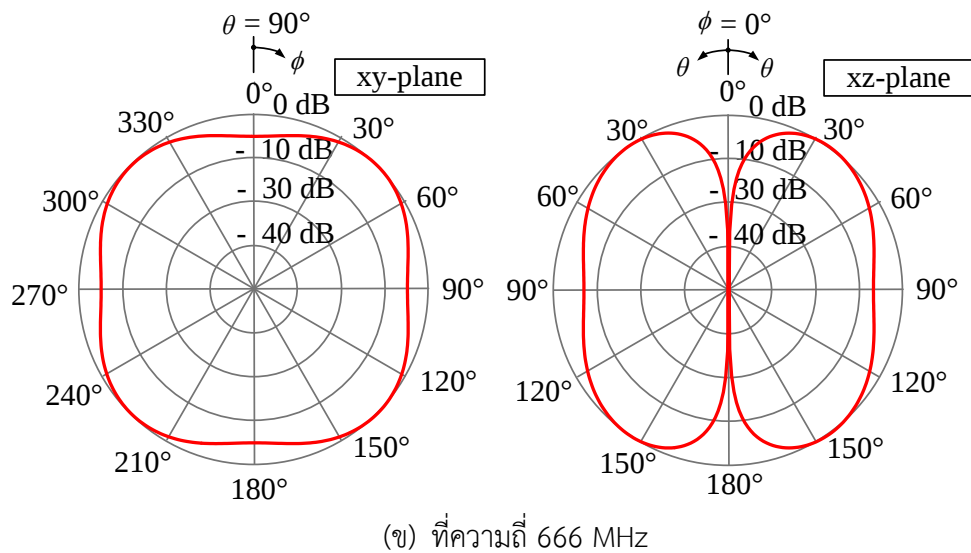
(ค) ความถี่ 862 MHz

รูปที่ 3.13 ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศของสายอากาศเริ่มต้นแบบสี่ก้าน

จากรูปที่ 3.13 เป็นผลการจำลองการกระจายของกระแสของสายอากาศแบบสี่ก้าน พบว่ามีการกระจายตัวของกระแสที่ผิวของสายอากาศหนาแน่นที่บริเวณตลอดก้านไดโพล และกระจายตัวของกระแสมีความหนาแน่นน้อยในบริเวณผิวของส่วนโค้งที่เชื่อมต่อกับไดโพล การกระจายกระแสมีทิศทางการไหลที่ผิวในแนวแกน $-x$ ถึง $+x$ และแนวแกน $-y$ ถึง $+y$ หรือในแนวขนานกับพื้นโลก อันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวมีรากฐานมาจากสายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด



(ก) ความถี่ 470 MHz



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่ก้าน

จากรูปที่ 3.14 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสี่ก้าน ซึ่งผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศ ที่ความถี่เริ่มต้น คือ 470 MHz จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง มีค่าการกระเพื่อมสูงสุดอยู่ที่ 1.69 dB ส่วนที่ความถี่กลาง 666 MHz จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นแบบรอบทิศทาง มีค่าการกระเพื่อมสูงสุดอยู่ที่ 4.95 dB และที่ความถี่สูง 862 MHz จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เป็นวงกลม มีค่าการกระเพื่อมสูงสุดอยู่ที่ 5.96 dB จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 666 และ 862 MHz นั้น มีค่าการกระเพื่อมสูงเกินกว่า 3 dB ทำให้ไม่มีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง โดยจะสรุปไว้ในตารางที่ 3.2 ส่วนในระนาบ xz ของสายอากาศแบบสี่ก้าน มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของความถี่เริ่มต้น 470 MHz เท่ากับ 132.4 deg ที่ความถี่กลาง 666 MHz เท่ากับ 44 deg และที่ความถี่สูงสุดที่ 862 MHz เท่ากับ 30.3 deg ซึ่งจะสรุปไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าการกระเพื่อมสูงสุดและความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

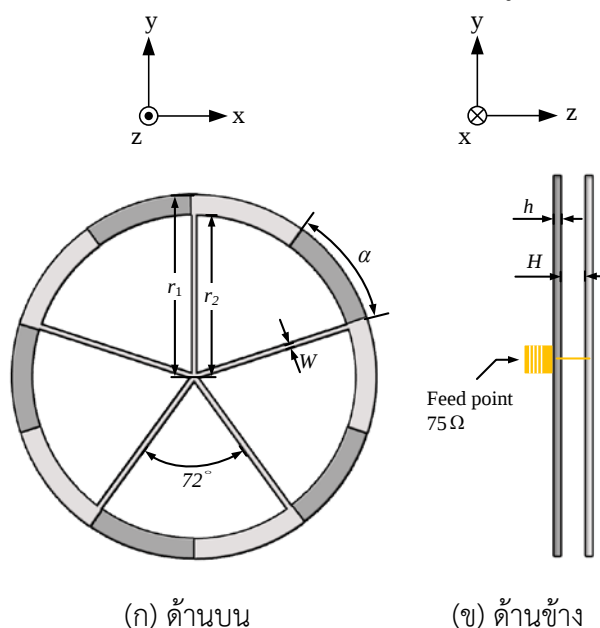
ความถี่	การกระเพื่อมสูงสุด (dB) ในระนาบ xy (Ripple)	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (deg) ในระนาบ xz (HPBW)
470 MHz	1.69	132.4
666 MHz	4.95	44.0
862 MHz	5.96	30.3

สายอากาศแบบสี่ก้านนั้นครอบคลุมในย่านความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz แต่ค่า $|S_{11}|$ มีค่าที่ค่อนข้างสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่เริ่มต้นเป็นแบบรอบทิศทาง ในย่านความถี่กลางและความถี่สูงนั้นยังไม่รอบทิศทาง จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศ และหาทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งได้ทำการกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 ต่อไป

3.2.2 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้าก้าน

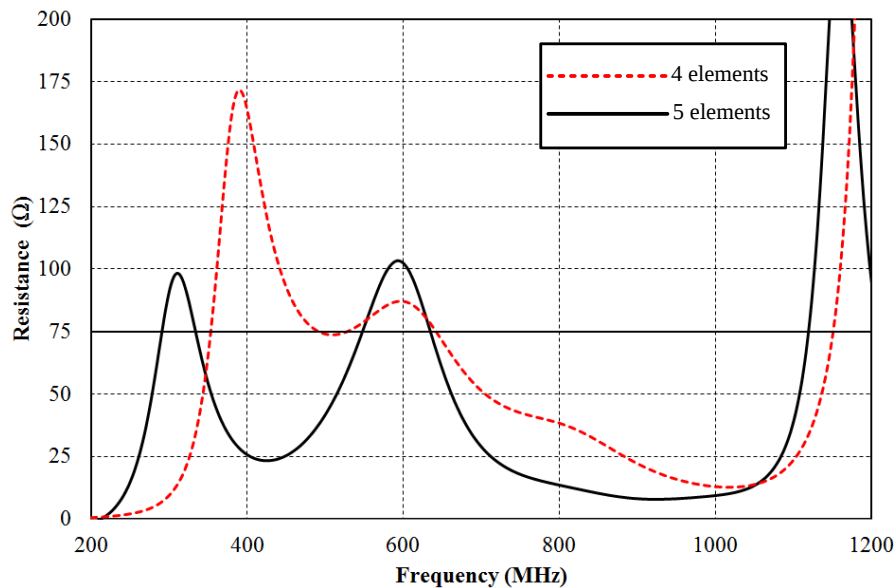
สายอากาศที่นำเสนอเริ่มต้น เป็นแผ่นวงแหวนที่มีองค์ประกอบไดโพลจำนวนสี่องค์ประกอบ และในหัวข้อนี้ได้ทำการพัฒนาแผ่นวงแหวนของสายอากาศที่มีองค์ประกอบไดโพลจำนวนห้าองค์ประกอบ จากนั้นนำแผ่นวงแหวนมาซ้อนทับกันในแนวแกน z และทำการป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวนซึ่งวางซ้อนในระนาบ xy โดยมีไดโพลเล็กตรึงเป็นอากาศ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 3.15

โครงสร้างสายอากาศจะใช้แผ่นวงแหวนออกแบบโดยใช้วัสดุทองเหลืองชนิดแผ่น ขนาดความหนา $h=1$ mm โดยป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นทองเหลืองทั้งสองแผ่น และป้อนสัญญาณเข้าที่ตรงกลางของแผ่นวงแหวนของสายอากาศด้วยสายนำสัญญาณ 75Ω และใช้พารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับสายอากาศเริ่มต้นแบบสี่ก้าน และทำการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม [13] ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17

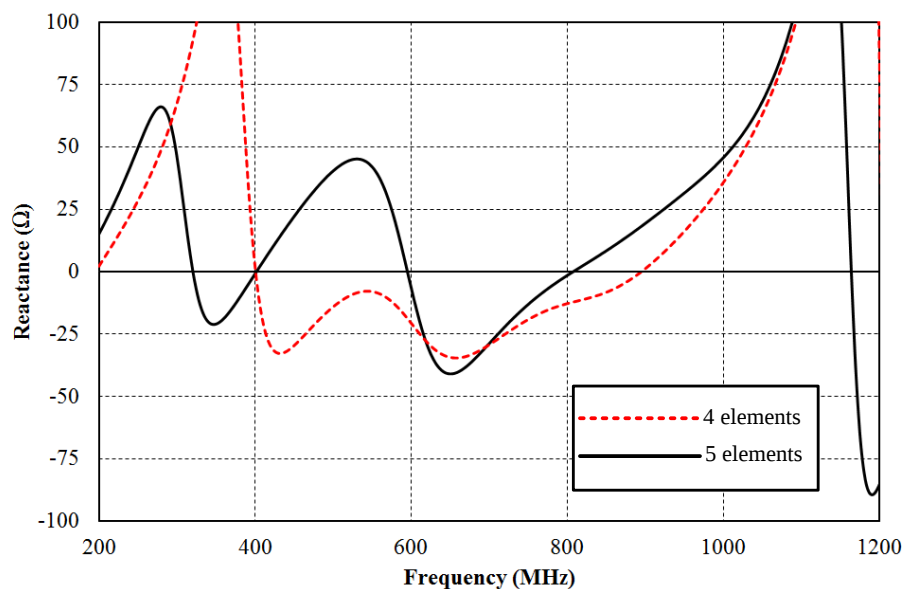


รูปที่ 3.15 สายอากาศที่ออกแบบห้าก้าน

จากรูปที่ 3.15 พบว่าเมื่อใช้พารามิเตอร์เดียวกับสายอากาศเริ่มต้นดังตารางที่ 3.1 และพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ เมื่อมีการปรับโครงสร้างของแผ่นวงแหวนให้เป็นแบบห้าก้าน พบว่าในช่วงความถี่ 400 MHz มีค่าความต้านทานต่ำลงถึง 25Ω จากเดิมนั้น 170Ω และค่าความต้านทานในช่วงความถี่ 600 MHz มีค่าสูงขึ้นถึง 100Ω จากเดิมนั้น 80Ω และค่ารีแอคแตนซ์ไม่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ดังนั้นผลของค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบห้าก้านของโครงสร้างเริ่มต้นไม่ครอบคลุมย่านความถี่โทรทัศน์ดิจิทัล และมีค่า $|S_{11}|$ ที่สูงกว่าสายอากาศแบบสี่ก้าน

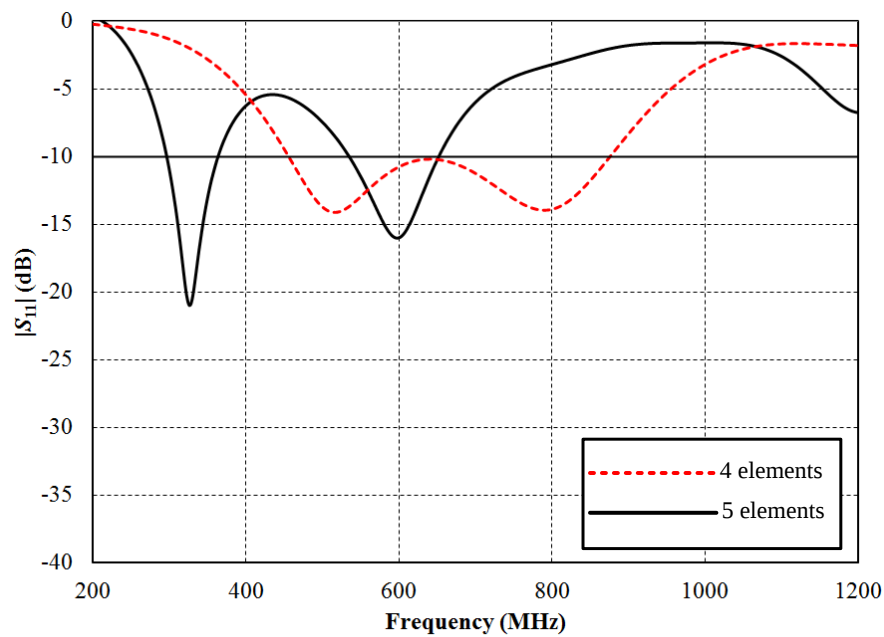


(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.16 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศแบบห้าก้าน โดยใช้พารามิเตอร์เหมือนกับสายอากาศเริ่มต้นที่มีสี่ก้าน

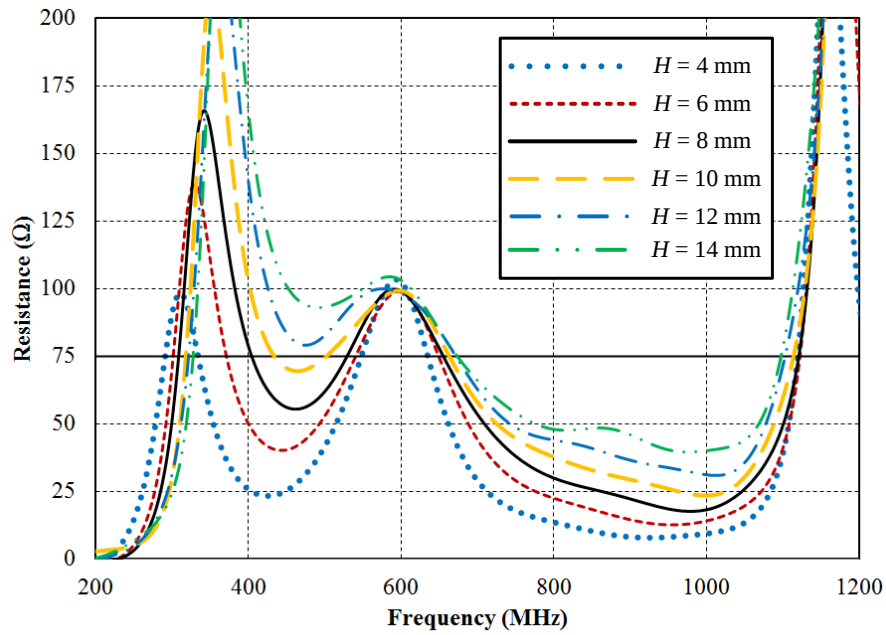


รูปที่ 3.17 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบสี่ก้านและแบบห้าก้าน โดยใช้พารามิเตอร์เหมือนกับสายอากาศแบบสี่ก้าน

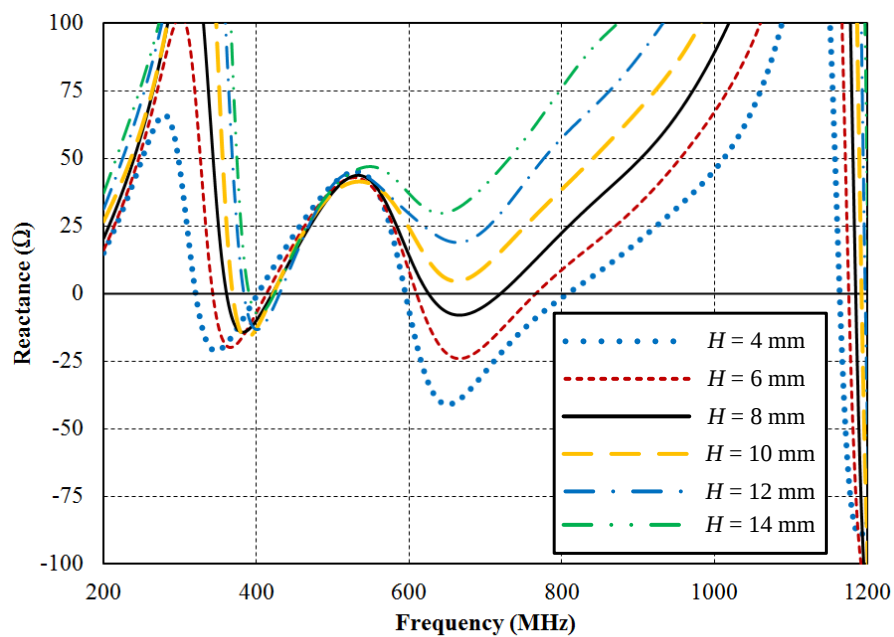
จากรูปที่ 3.17 พบว่าเมื่อองค์ประกอบไดโพลเป็นแบบห้าก้าน จะส่งผลให้ขอบความถี่เลื่อนลงไปทางด้านความถี่ต่ำ และช่วงความถี่กลาง ค่า $|S_{11}|$ สูงกว่า -10dB เนื่องจากมีค่าความต้านทานสูงกว่า 75Ω และมีค่ารีแอ็กแตนซ์มากกว่าศูนย์มาก

การปรับโครงสร้างของสายอากาศจากสี่ก้านเป็นห้าก้าน พบว่ายังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน จึงทำการปรับพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) โดยพิจารณาร่วมกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และผลตอบสนองทางความถี่ของค่า $|S_{11}|$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19

พบว่าเมื่อปรับพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) จะส่งผลให้ค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าที่พารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H) มีค่าเท่ากับ 8 mm จะส่งผลให้มีค่าความต้านทานเข้าใกล้ 75Ω และค่ารีแอ็กแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 400 MHz ถึง 650 MHz



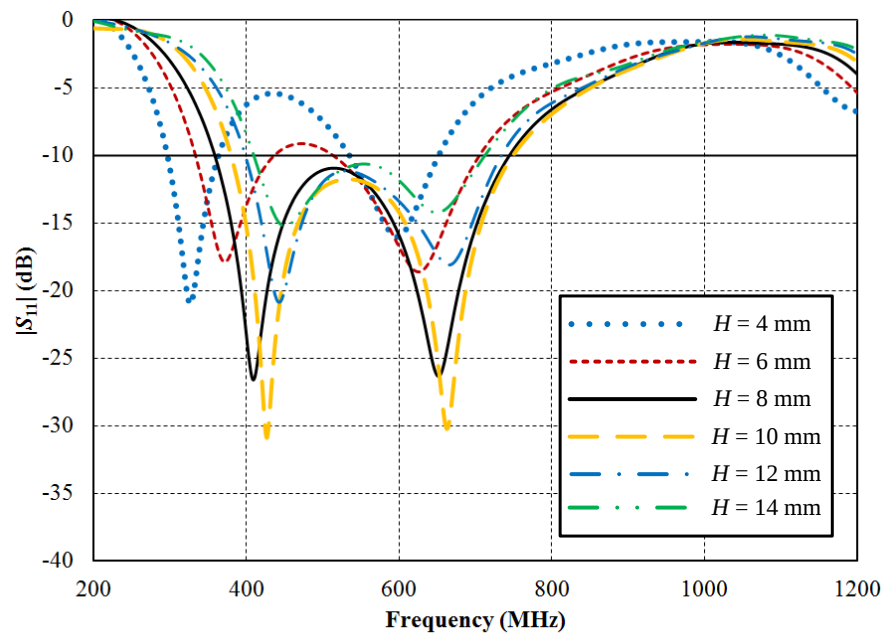
(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.18 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศแบบห้ำก้าน เมื่อปรับระยะห่างระหว่างวงแหวน (H)

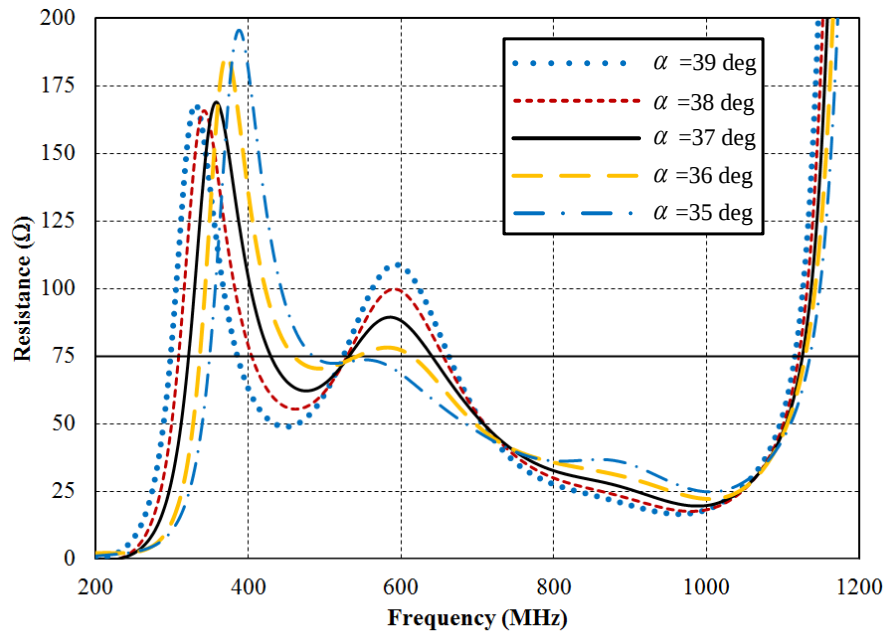
จากผลการจำลองค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ในข้างต้น ทำให้ทราบได้ว่า ในช่วงความถี่ 360 MHz ถึง 734 MHz จะมีค่า $|S_{11}| \leq -10$ dB ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



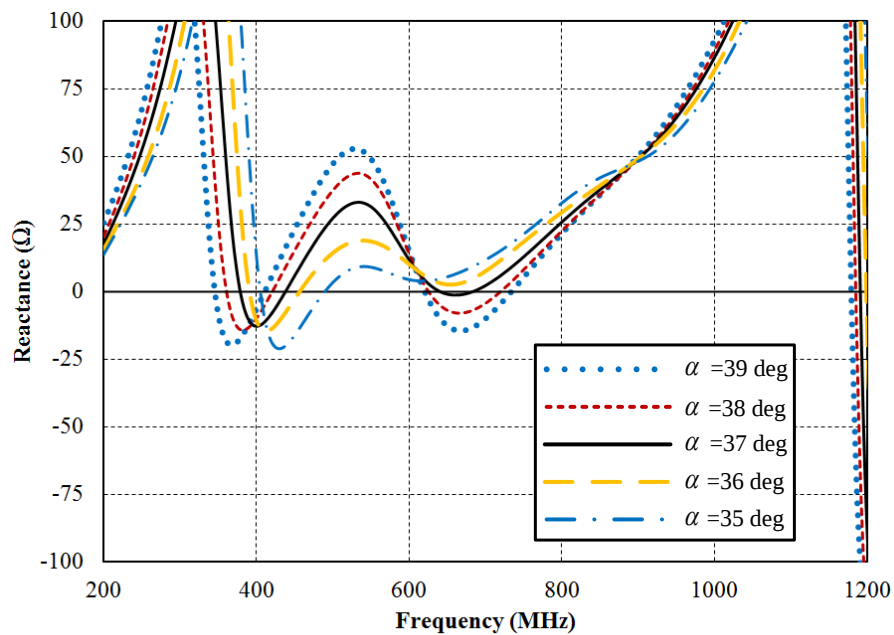
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบห้ก้าน
เมื่อปรับระยะห่างระหว่างวงแหวน (H)

จากรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ขอบความถี่ต่ำเลื่อนไปด้านความถี่สูง และได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) เท่ากับ 8 mm เนื่องจากค่า $|S_{11}|$ มีผลตอบสนองความถี่ 360 MHz ถึง 734 MHz อีกทั้งค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์มีค่าที่เหมาะสม

และเนื่องจากผลตอบสนองความถี่ยังไม่ครอบคลุมย่านความถี่ยูเอชเอฟ 470 MHz ถึง 862 MHz จึงได้ทำการปรับพารามิเตอร์ส่วนโค้ง (α) โดยทำการพิจารณาร่วมกับค่าต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 พบว่า เมื่อปรับมุมของพารามิเตอร์ส่วนโค้ง (α) ให้มีค่าเท่ากับ 37 deg แล้วทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ พบว่าค่าความต้านทานช่วง 420 MHz ถึง 680 MHz เข้าใกล้ 75 Ω และมีค่ารีแอคแตนซ์ในช่วงความถี่ดังกล่าวเข้าใกล้ศูนย์

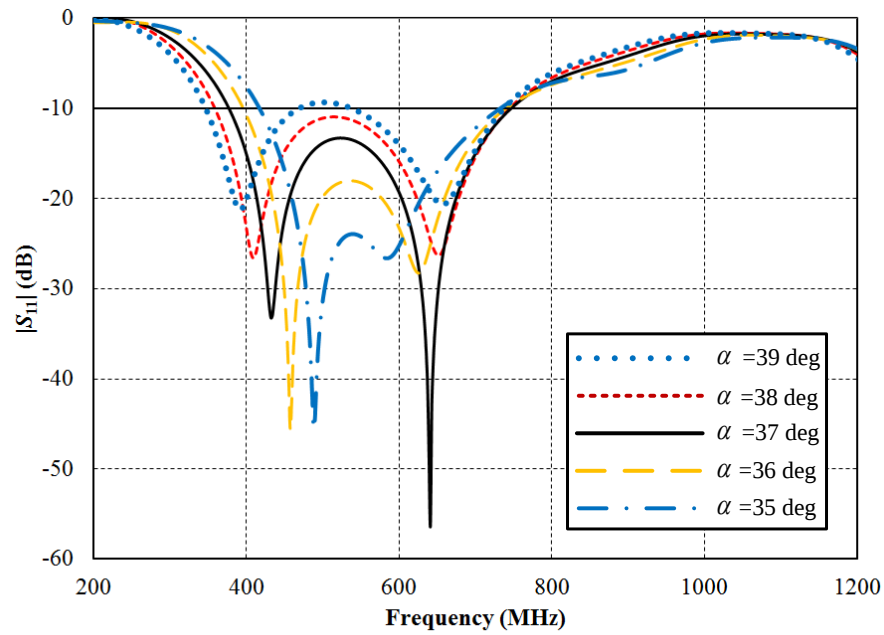


(ก) ค่าความต้านทาน



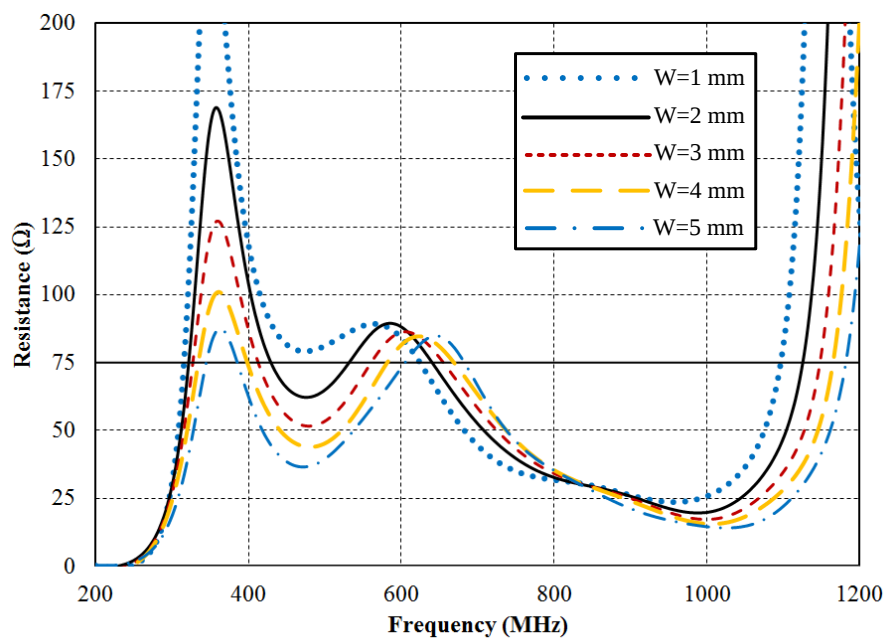
(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.20 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศแบบห้ำก้น เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) และทำการปรับมุมของส่วนโค้ง (α)

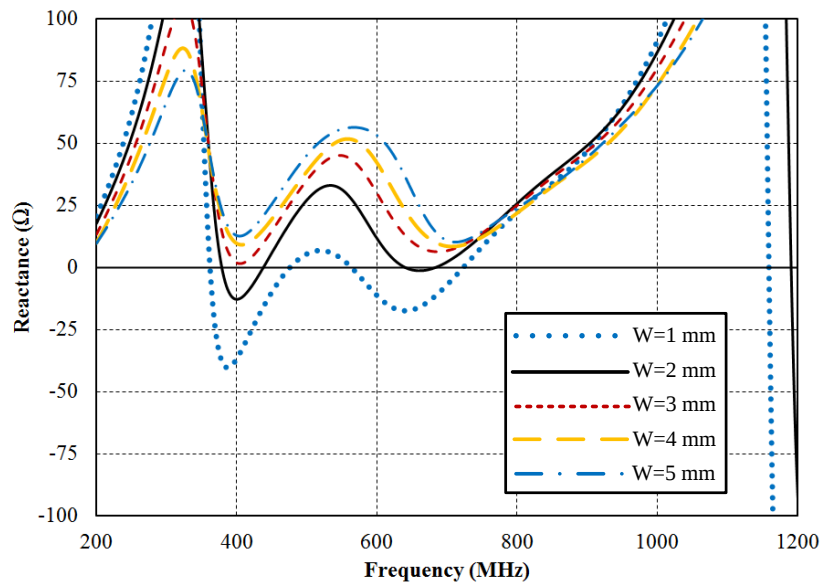


รูปที่ 3.21 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) และการปรับมุมของส่วนโค้ง (α)

จากรูปที่ 3.21 พบว่าเมื่อมุมของส่วนโค้ง (α) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ ลดลง โดยส่งผลให้ช่วงความถี่ 380 MHz ถึง 740 MHz มีค่า $|S_{11}| \leq -10$ dB แต่ไม่ครอบคลุมความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัล จึงทำการทดลองปรับพารามิเตอร์ความกว้างก้านไดโพล (w)

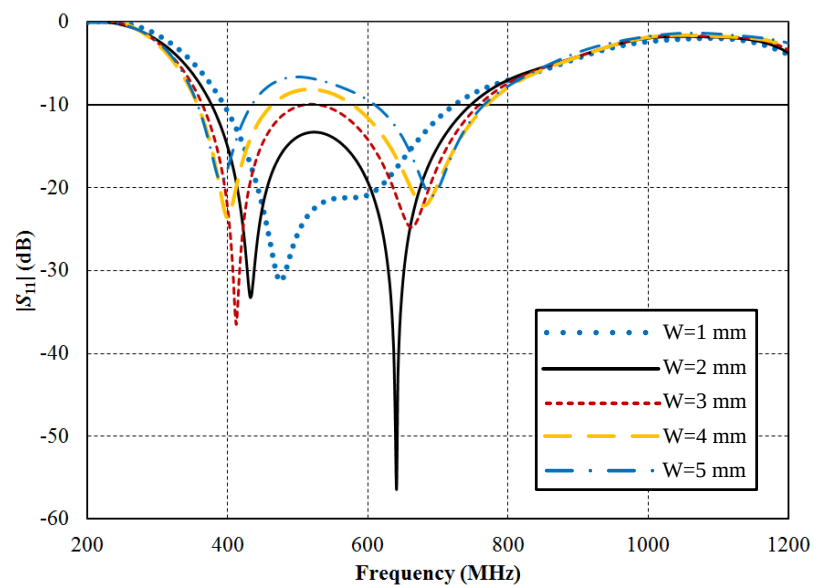


(ก) ค่าความต้านทาน



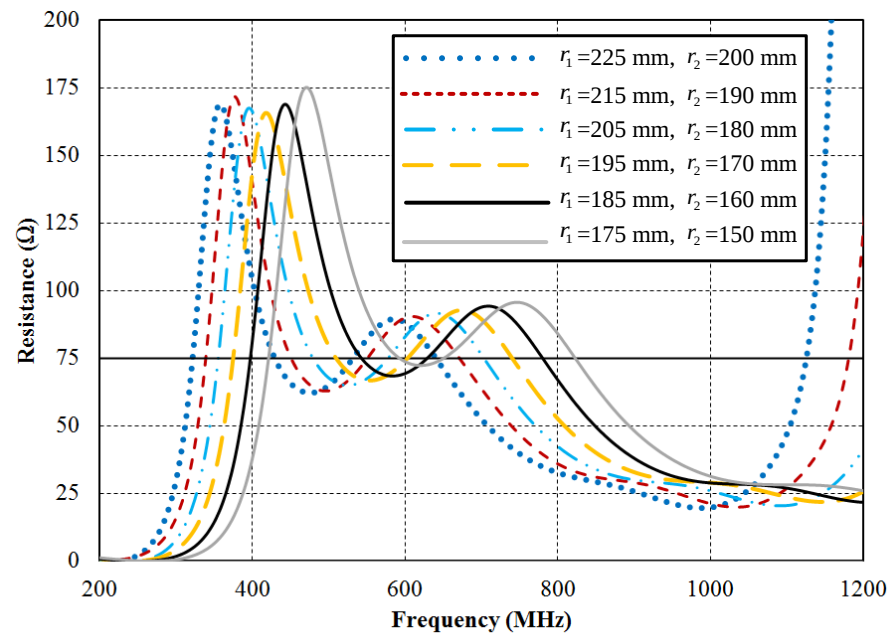
(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.22 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ เมื่อทำการปรับความกว้างก้านของสายอากาศ (w)

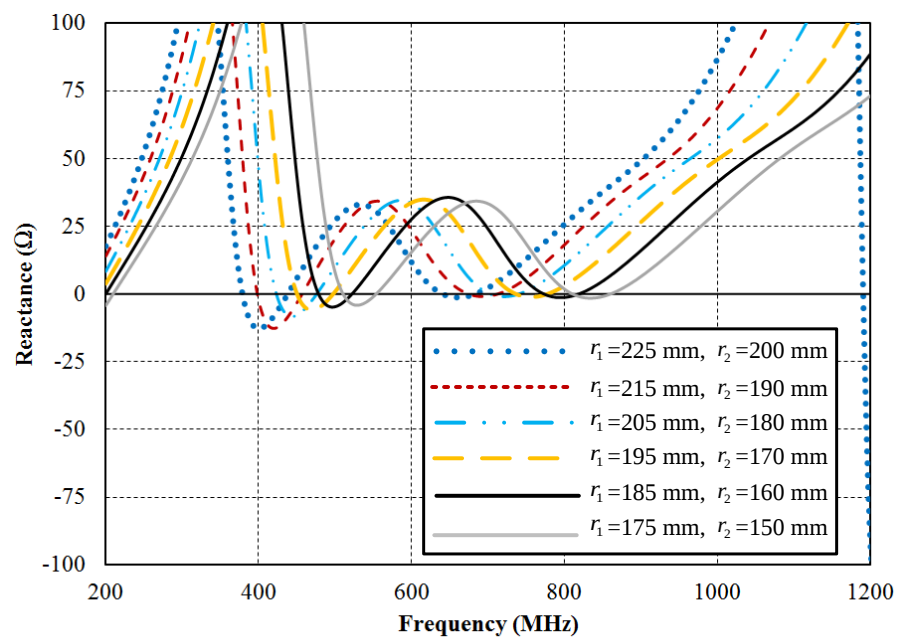


รูปที่ 3.23 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับความกว้างก้านของสายอากาศ (w)

จากรูปที่ 3.22 และ 3.23 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้างก้านของสายอากาศพบว่า ค่าพารามิเตอร์ ที่มีค่าเท่ากับ 2 mm เป็นพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น เนื่องจากการปรับความกว้างก้านของสายอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ สูงขึ้น และยังส่งผลต่อ ค่าความต้านทานให้มีค่าที่ลดต่ำลง และค่ารีแอคแตนซ์ที่เพิ่มสูงขึ้น จากนั้นทำการปรับรัศมีวงแหวน ด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ

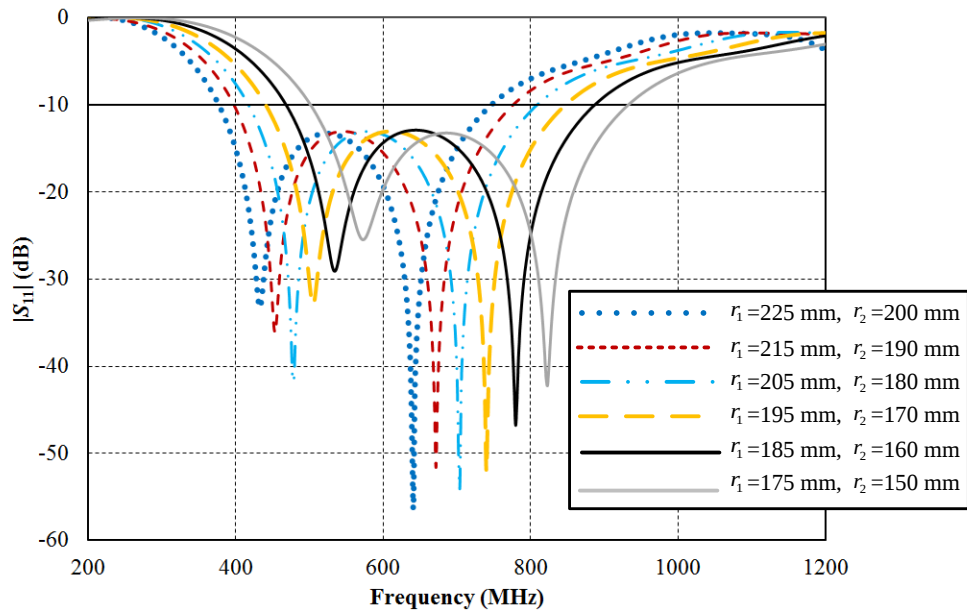


(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.24 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ
เมื่อทำการปรับรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1)
และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2)



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2)

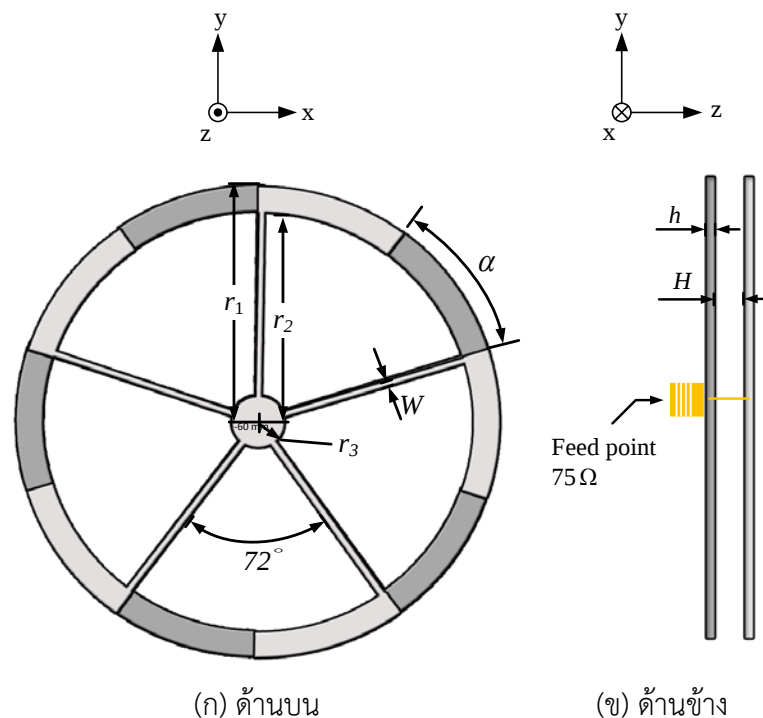
จากรูปที่ 3.24 และ 3.25 พบว่าเมื่อทำการปรับรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) พบว่าช่วงความถี่เลื่อนขึ้นไปทางด้านความถี่สูง เนื่องจากการปรับลดพารามิเตอร์ดังกล่าว จะส่งผลให้ค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลจากการจำลองพบว่าค่าพารามิเตอร์รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) ที่มีค่าเท่ากับ 185 mm และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) ที่มีค่าเท่ากับ 160 mm สามารถครอบคลุมย่านความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัลได้ คือ 460 MHz ถึง 880 MHz ซึ่งพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้านสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สายอากาศแบบห้ำก้าน

พารามิเตอร์	คำจำกัดความ	ขนาด
r_1	รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ	185 mm
r_2	รัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ	160 mm
W	ความกว้างก้านของไดโพล	2 mm
H	ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน	8 mm
h	ความหนาแผ่นทองเหลือง	1 mm
α	มุมส่วนโค้ง	37 deg

จากโครงสร้างของสายอากาศแบบห้ำก้าน พบว่าจุดป้อนสัญญาณนั้นมีขนาดเล็กมาก ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้โครงสร้างของสายอากาศไม่แข็งแรง อีกทั้งยังส่งผลต่อการรับสัญญาณโทรทัศน์ ระบบดิจิตอล เมื่อทำการติดตั้งภายในอาคาร ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มจุดป้อนสัญญาณให้มีขนาดที่กว้างขึ้น อีกทั้งแบนด์วิดธ์ของสายอากาศแบบห้ำก้านค่อนข้างพอดีกับช่วงความถี่ที่ใช้งาน จึงอาจจะส่งผลทำให้การสร้างสายอากาศต้นแบบมีแบนด์วิดธ์ที่แคบลง จึงได้ทำการปรับแต่งโครงสร้างโดยการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ เพื่อปรับปรุงข้อเสียดังกล่าว

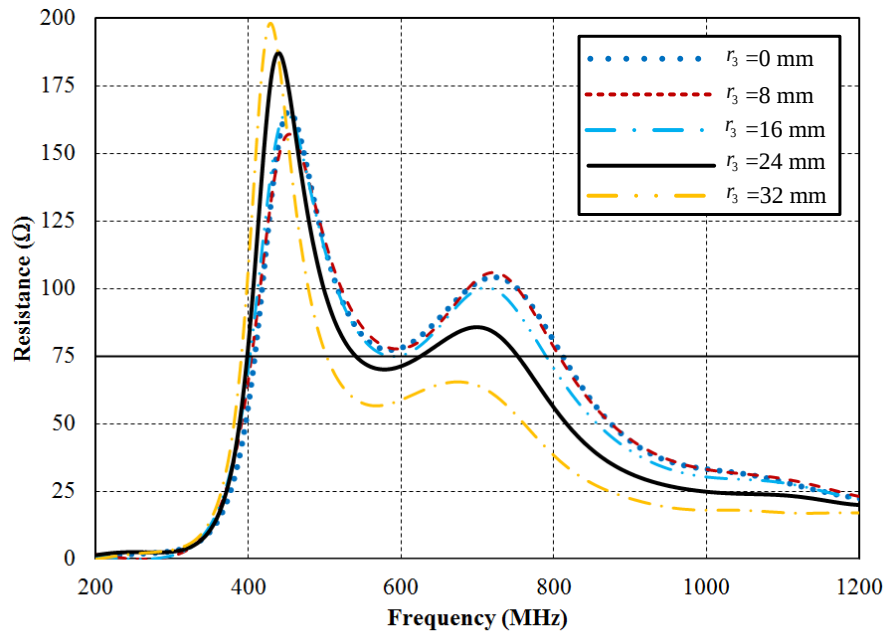
3.2.3 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้านโดยเพิ่มพื้นที่จุดป้อนสัญญาณขนาด r_3



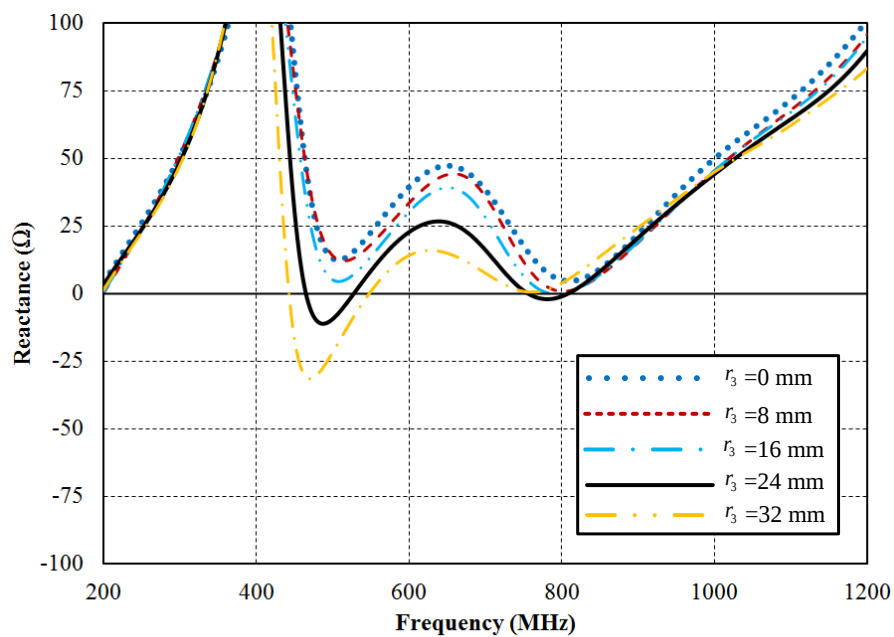
รูปที่ 3.26 สายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มพื้นที่ป้อนสัญญาณ

จากรูปที่ 3.26 ได้ทำการพัฒนาสายอากาศแบบห้ำก้านโดยได้ทำการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณที่มีรัศมี r_3 เพื่อให้โครงสร้างของสายอากาศแข็งแรงขึ้น และทำการป้อนสัญญาณระหว่างแผ่นวงแหวนซึ่งวางซ้อนในแนวแกน z โดยมีไดอิเล็กทริกอากาศอยู่ระหว่างแผ่นวงแหวน

โครงสร้างสายอากาศจะใช้แผ่นวงแหวนที่มีองค์ประกอบไดโพลแบบห้ำก้านและเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ จากนั้นจึงทำการจำลองผลเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม [13] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 และ 3.28 ตามลำดับ

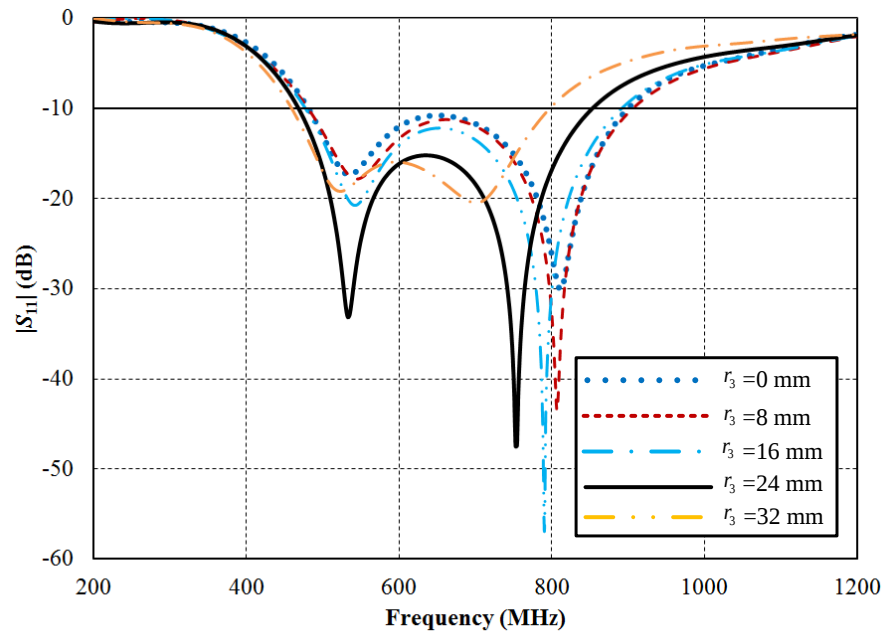


(ข) ค่าความต้านทาน



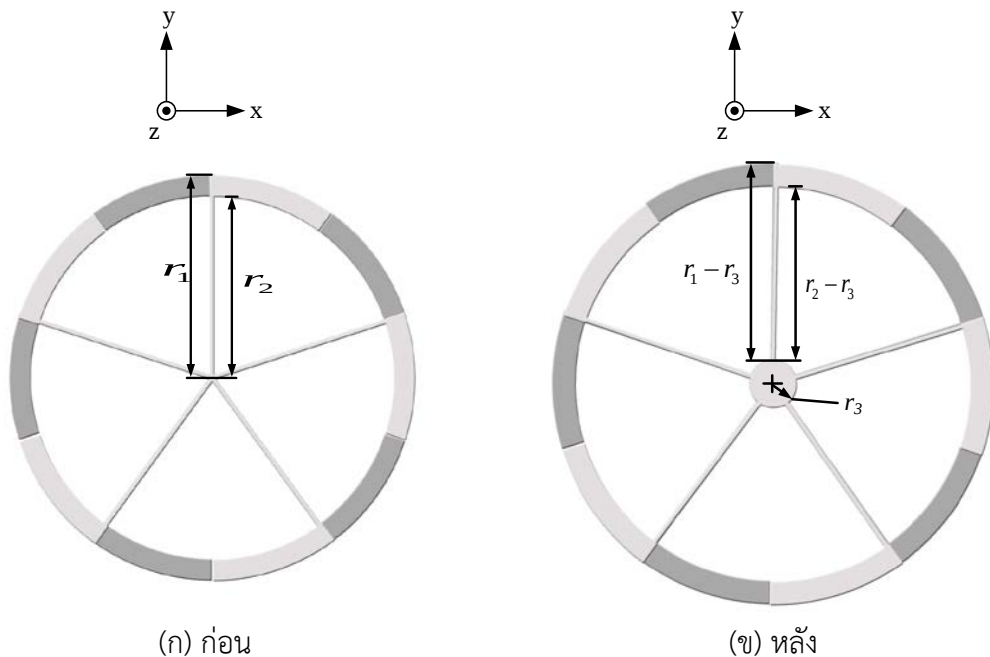
(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.27 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศแบบห้ำก้าน ที่มีการเพิ่มพื้นที่ป้อนสัญญาณ เมื่อทำการปรับรัศมีวงกลมบริเวณจุดป้อนสัญญาณ (r_3)



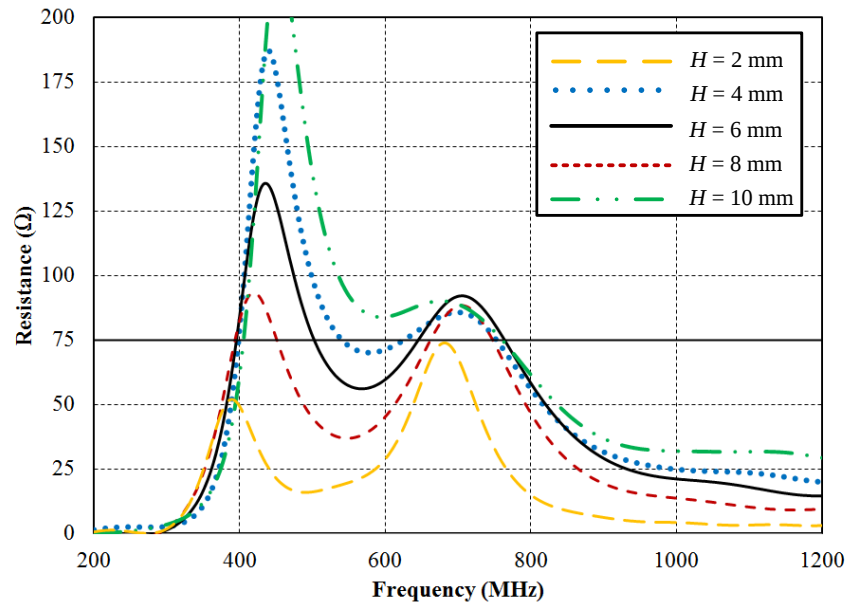
รูปที่ 2.28 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบห้ก้าน ที่มีการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ เมื่อทำการปรับรัศมีวงกลมบริเวณจุดป้อนสัญญาณ (r_3)

จากการเพิ่มปรับรัศมีวงกลมบริเวณจุดป้อนสัญญาณ (r_3) พบว่าพารามิเตอร์บริเวณจุดป้อนสัญญาณเท่ากับ 24 mm เป็นพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม เนื่องจากค่าของความต้านทานเข้าใกล้ 75Ω และมีค่ารีแอกแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ แต่การปรับพารามิเตอร์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้แบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้นลดลง เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์บริเวณจุดป้อนสัญญาณส่งผลให้ขนาดความยาวของก้านไดโพลลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.29

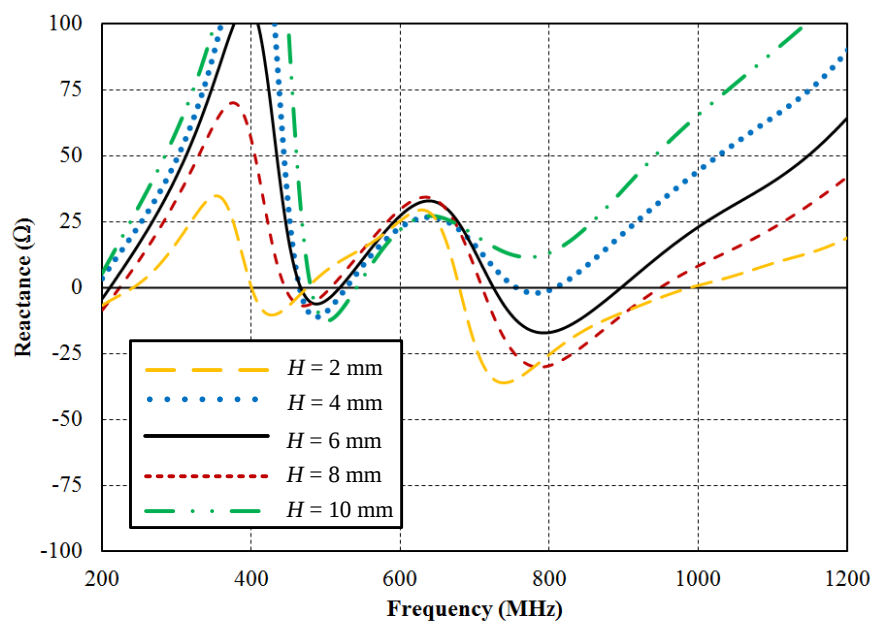


รูปที่ 3.29 โครงสร้างของสายอากาศก่อน และหลังเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ

จากรูปที่ 3.29 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศที่ส่งผลกระทบโดยตรงกับแบนด์วิดท์ของสายอากาศคือมีแบนด์วิดท์ที่แคบลง ซึ่งพบว่าการเพิ่มพื้นที่ของจุดป้อนสัญญาณ อาจจะมีผลกับพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H) ด้วย จึงได้ทำการปรับระยะห่างระหว่างวงแหวน (H) ดังรูปที่ 3.30 และ 3.31 ตามลำดับ

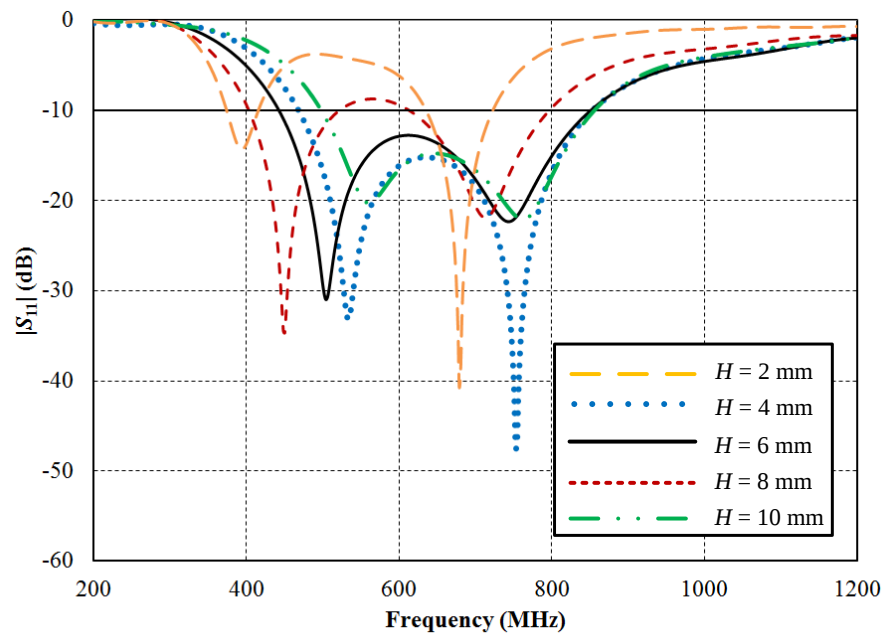


(ข) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.30 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศแบบห้าก้าน ที่มีการเพิ่มพื้นที่จุดป้อนสัญญาณ เมื่อทำการปรับลดระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H)

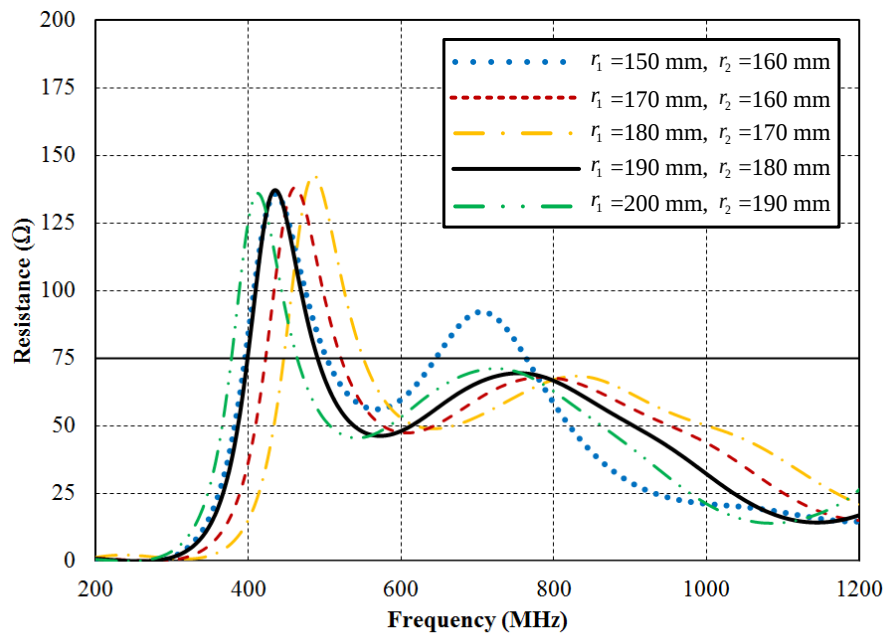


รูปที่ 3.31 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบหักก้าน ที่มีการเพิ่มพื้นที่จุดบ่อนสัญญาณ เมื่อปรับลดระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H)

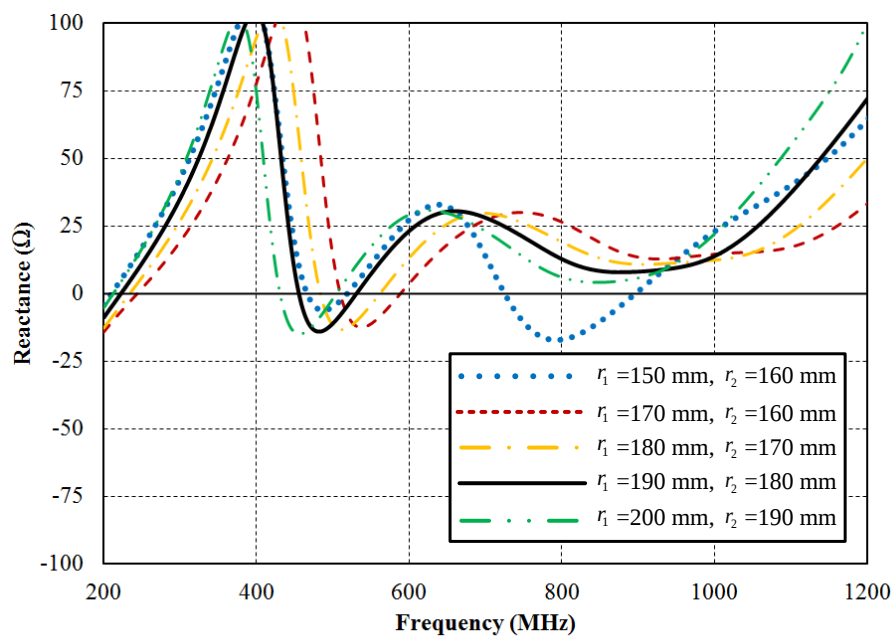
เมื่อกำหนดให้รัศมีของจุดบ่อนสัญญาณ (r_3) เท่ากับ 24 mm และทำการปรับลดระยะห่างระหว่างแผ่นวงแหวน (H) พบว่าที่รัศมีของจุดบ่อนสัญญาณ (r_3) เท่ากับ 6 mm จากเดิมเท่ากับ 8 mm ทำให้แบนด์วิดธ์ของสายอากาศเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz

การปรับพื้นที่บริเวณจุดบ่อนสัญญาณยังส่งผลต่อความยาวไดโพลหรือรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) ที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดคือ ขนาดความยาวของก้านไดโพลที่ลดลง ทำให้ก้านไดโพลยาวเท่ากับ r_1 ลบกับ r_3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 จากการที่ก้านไดโพลมีขนาดที่ลดลงจึงทำการทดลองปรับเพิ่มพารามิเตอร์ดังกล่าวอีกครั้ง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.32 และ 3.33 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.32 การปรับพารามิเตอร์รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) เท่ากับ 190 mm และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2) เท่ากับ 180 mm คือค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากผลการจำลองของค่าความต้านทานสายอากาศเข้าใกล้ 75Ω และค่ารีแอ็กแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ ตั้งแต่ความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz และยังส่งผลให้พารามิเตอร์ $|S_{11}| \leq -10$ dB ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.33

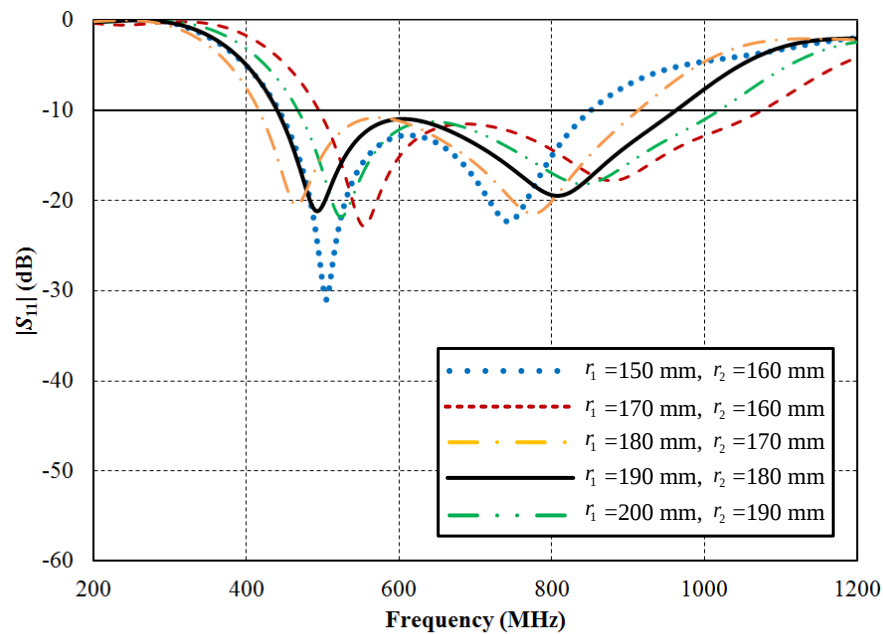


(ข) ค่าความต้านทาน



(ค) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.32 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ เมื่อทำการปรับรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2)



รูปที่ 3.33 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับรัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ (r_1) และรัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ (r_2)

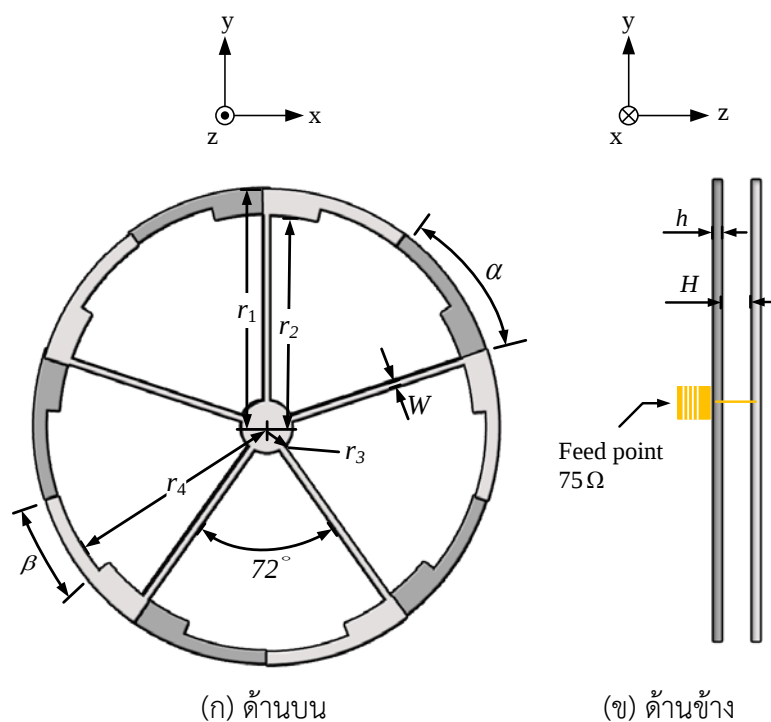
จากผลการจำลองสายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มพื้นที่จุดป้อนสัญญาณ พบว่า พารามิเตอร์ $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน แต่พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ค่อนข้างสูง โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์สายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณ

พารามิเตอร์	คำจำกัดความ	ขนาด
r_1	รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ	190 mm
r_2	รัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ	180 mm
W	ความกว้างก้านของสายอากาศ	2 mm
H	ระยะห่างระหว่างวงแหวน	6 mm
h	ความหนาแผ่นทองเหลือง	1 mm
α	มุมของส่วนโค้ง	37 deg
r_3	รัศมีวงกลมบริเวณจุดป้อนสัญญาณ	24 mm

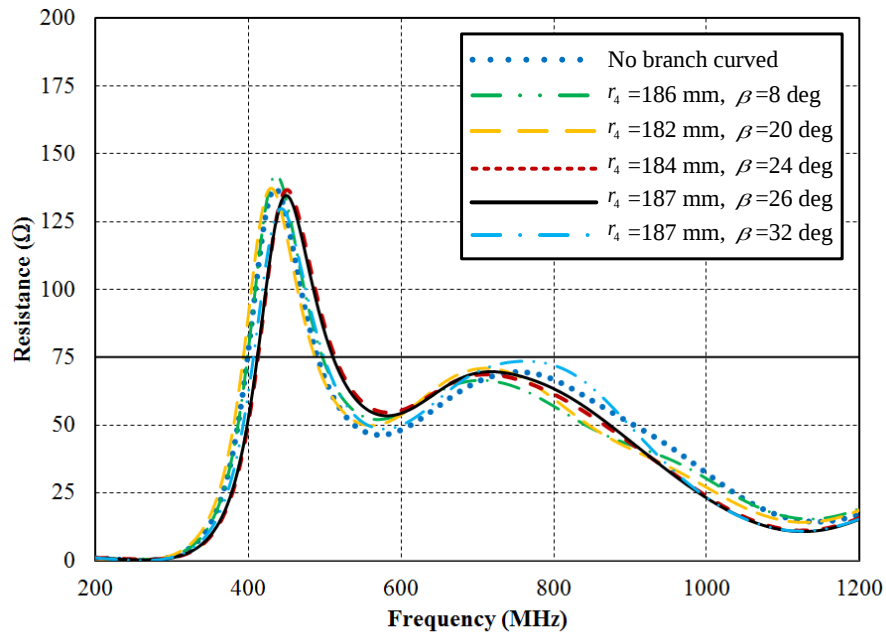
3.2.4 การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้านโดยเพิ่มกิ่งโค้ง

จากรูปที่ 3.34 ได้ทำการพัฒนาสายอากาศแบบห้ำก้านโดยทำการเพิ่มกิ่งโค้ง เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณจะส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ มีค่าที่ค่อนข้างสูง จึงได้ทำการทดลองเพิ่มกิ่งโค้งเข้าไปบริเวณส่วนโค้งขององค์ประกอบไดโพล ซึ่งจะทำให้มีพารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศเพิ่มขึ้นจำนวน 2 พารามิเตอร์ คือ พารามิเตอร์ของรัศมีส่วนโค้งของกิ่งโค้ง (r_4) และมุมของส่วนโค้งกิ่งโค้ง (β) จากนั้นทำการจำลองผลและศึกษาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม [13] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.35 และ 3.36 ตามลำดับ

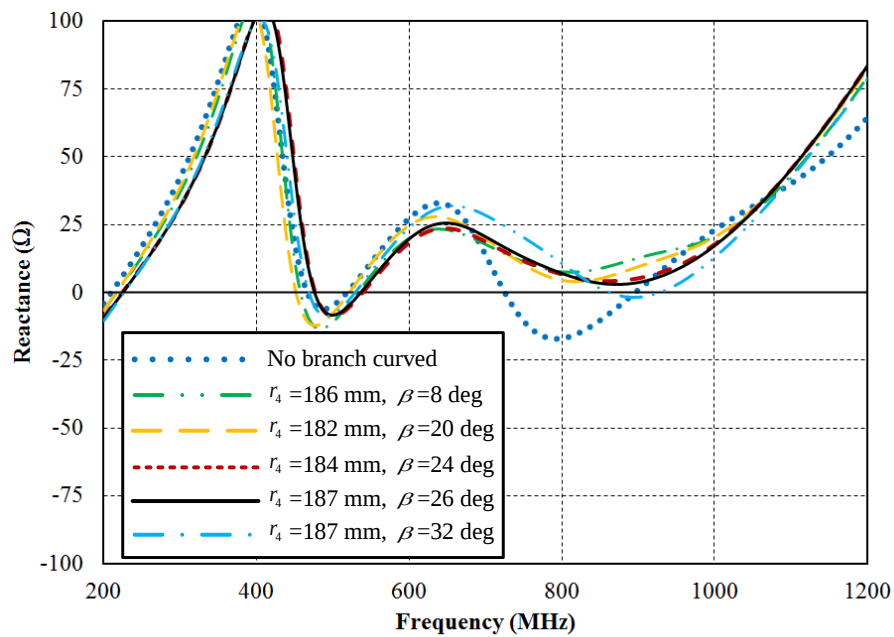


รูปที่ 3.34 สายอากาศแบบห้ำก้านที่มีกิ่งโค้ง

จากการปรับค่ารัศมีส่วนโค้งของกิ่งโค้ง (r_4) และมุมของส่วนโค้งกิ่งโค้ง (β) เพิ่มขึ้น พบว่าส่งผลให้มีความต้านทานเข้าใกล้ 75Ω และค่ารีแอกแตนซ์เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.35 และยังส่งผลให้ค่า $|S_{11}|$ มีค่าที่ลดต่ำลง รวมทั้งครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานของโทรทัศน์ระบบดิจิตอลตามรูปที่ 3.36

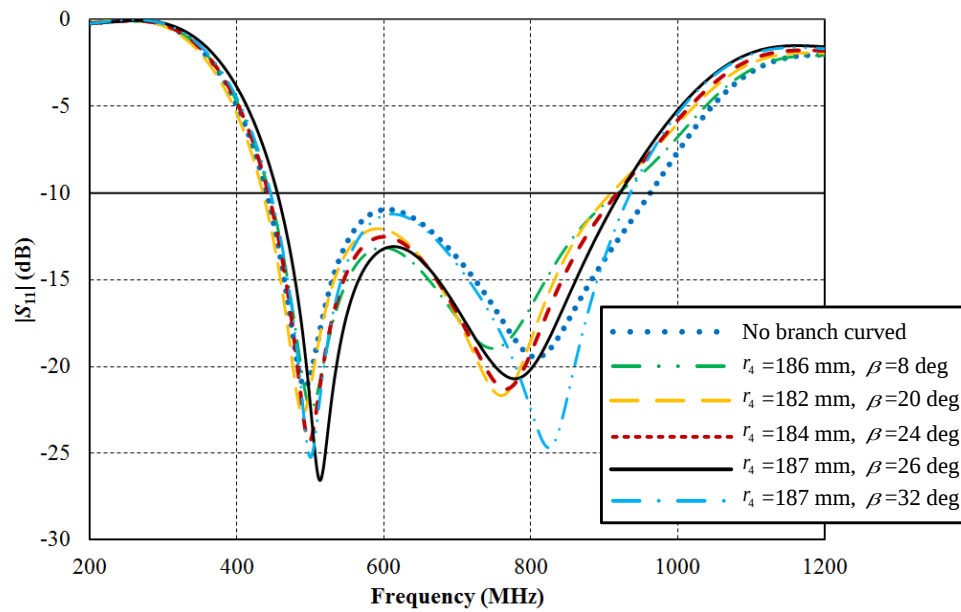


(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอคแตนซ์

รูปที่ 3.35 ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความต้านทาน และค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศ
เมื่อทำการปรับรัศมีส่วนโค้งของกิ่งโค้ง (r_4) มุมของส่วนโค้งกิ่งโค้ง (β)

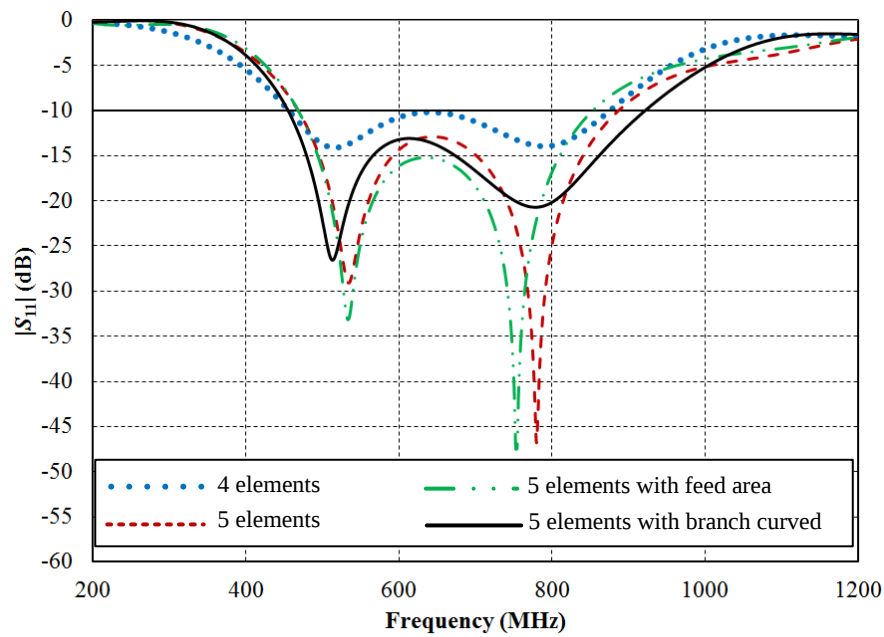


รูปที่ 3.36 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับรัศมีส่วนโค้งของกิ่งโค้ง (r_4) และมุมของส่วนโค้งกิ่งโค้ง (β)

จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้าน และโครงสร้างของกิ่งโค้ง พบว่าสามารถทำให้ค่า $|S_{11}|$ มีค่าที่ลดต่ำลงและสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานของโทรทัศน์ระบบดิจิทัล และพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มกิ่งโค้งได้แสดงดังตารางที่ 3.6

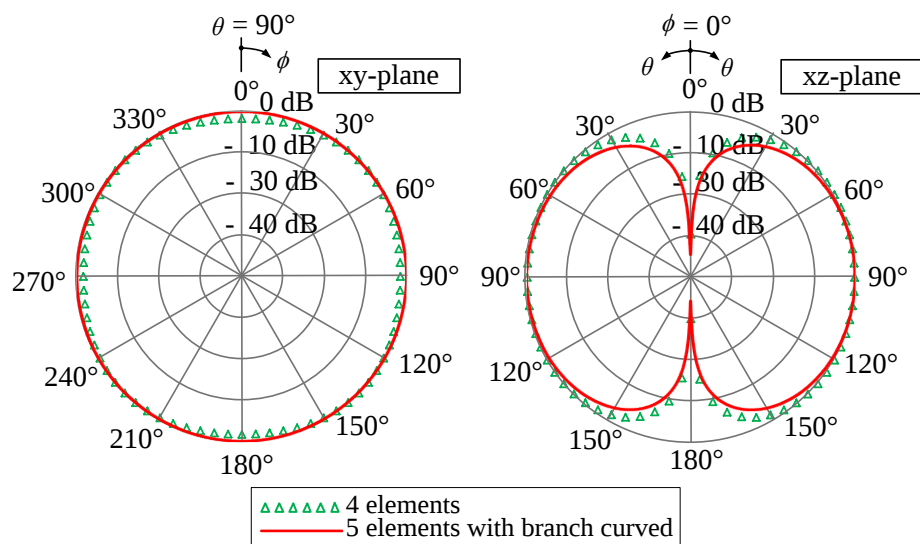
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สายอากาศแบบห้ำก้านที่มีการเพิ่มกิ่งโค้ง

พารามิเตอร์	คำจำกัดความ	ขนาด
r_1	รัศมีวงแหวนด้านนอกของสายอากาศ	190 mm
r_2	รัศมีวงแหวนด้านในของสายอากาศ	180 mm
W	ความกว้างก้านไดโพล	2 mm
H	ระยะห่างระหว่างวงแหวน	6 mm
h	ความหนาแผ่นวงแหวน	1 mm
α	มุมส่วนโค้ง	37 deg
r_3	รัศมีวงกลมบริเวณจุดป้อนสัญญาณ	24 mm
r_4	รัศมีส่วนโค้งของกิ่งโค้ง	186 mm
β	มุมส่วนโค้งกิ่งโค้ง	24 deg

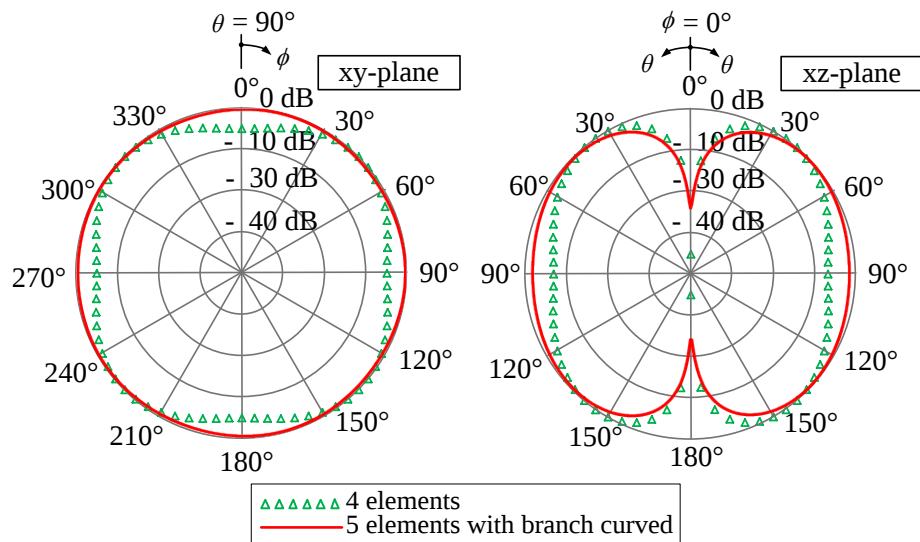


รูปที่ 3.37 เปรียบเทียบผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศทั้ง 4 แบบ ที่ได้ทำการออกแบบ

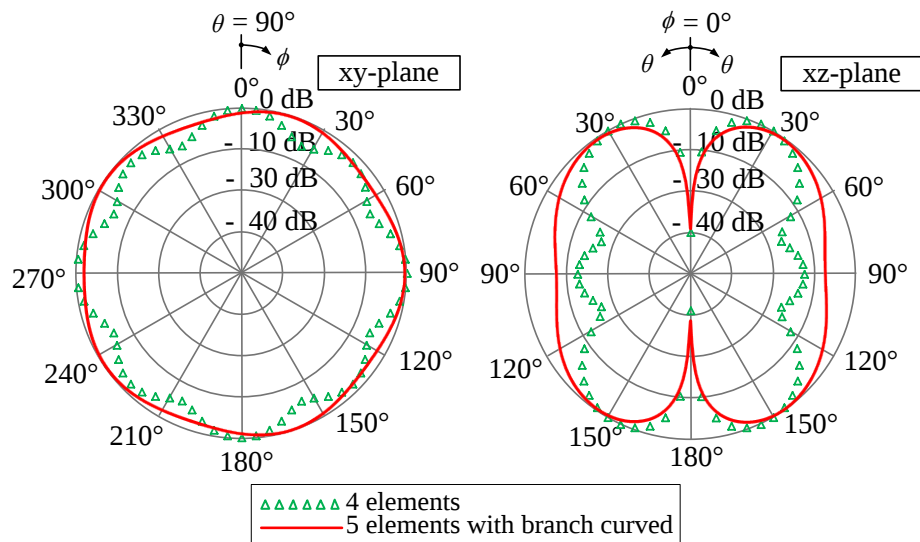
จากรูปที่ 3.37 เป็นผลการเปรียบเทียบสายอากาศตั้งแต่เริ่มต้น คือสายอากาศแบบสี่ก้าน สายอากาศแบบห้าก้าน สายอากาศห้าก้านที่ทำการเพิ่มบริเวณจุดป้อนสัญญาณ และสายอากาศแบบห้าก้านที่ทำการเพิ่มกิ่งโค้ง ซึ่งการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ ส่งผลให้แบนด์วิธของสายอากาศเพิ่มขึ้น



(ก) ความถี่ 470 MHz



(ข) ความถี่ 666 MHz



(ค) ความถี่ 862 MHz

รูปที่ 3.38 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยการเปรียบเทียบสายอากาศแบบสี่ก้านที่เป็นโครงสร้างเริ่มต้น และสายอากาศห้าก้านที่มีกิ่งโค้ง

จากรูปที่ 3.38 เป็นผลการเปรียบเทียบจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นที่มี 4 ก้าน กับสายอากาศแบบห้าก้านที่มีกิ่งโค้ง พบว่าสายอากาศแบบห้าก้านที่มีการเพิ่มกิ่งโค้งมีผลที่ดีขึ้น คือในระนาบ xy สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวทั้ง 3 ความถี่ คือ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ส่วนความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และผลเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบการกระเพื่อมสูงสุดและความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

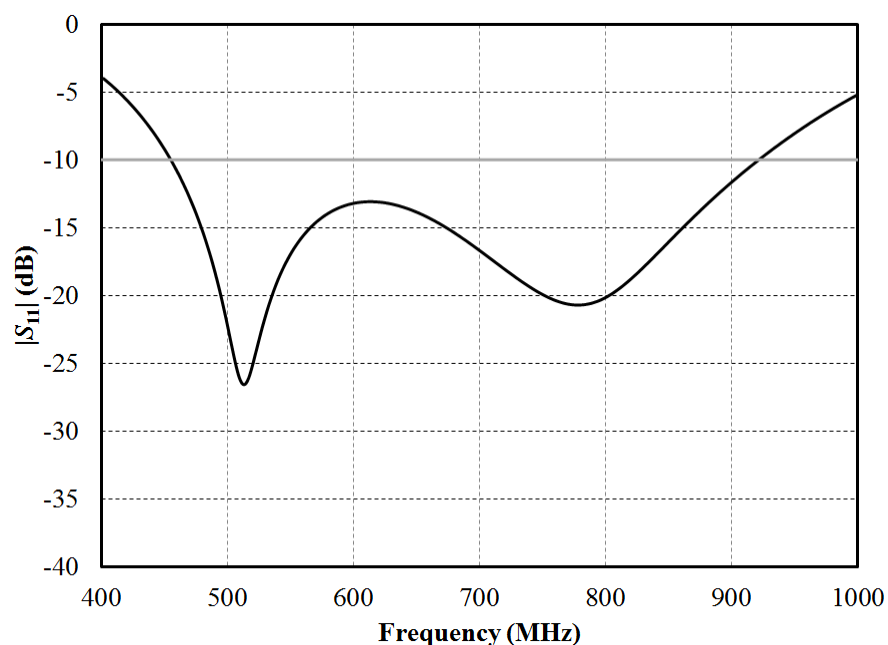
ความถี่	การกระเพื่อมสูงสุด (dB) ในระนาบ xy (Ripple)		ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (deg) ในระนาบ xz (HPBW)	
	แบบสี่ก้าน	แบบห้าก้านที่มีกึ่งโค้ง	แบบสี่ก้าน	แบบห้าก้านที่มีกึ่งโค้ง
470 MHz	1.69	0.16	132.4	121.8
666 MHz	4.95	0.66	44.0	140.0
862 MHz	5.96	2.38	30.3	38.9

3.3 ผลการจำลองของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันที่ใช้สายอากาศแบบห้าก้านที่มีกึ่งโค้ง สำหรับการประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัล โดยนำค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.6 มาทำการจำลองเป็นโครงสร้างของสายอากาศเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การกระจายของกระแส และอัตราขยายของสายอากาศ

3.3.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$

สำหรับการพิจารณา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ จะพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน โดยผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศโพลาริซ์แนวนอนรอบตัวที่มีโครงสร้างแบบห้าก้านและมีกึ่งโค้ง แสดงดังรูปที่ 3.39

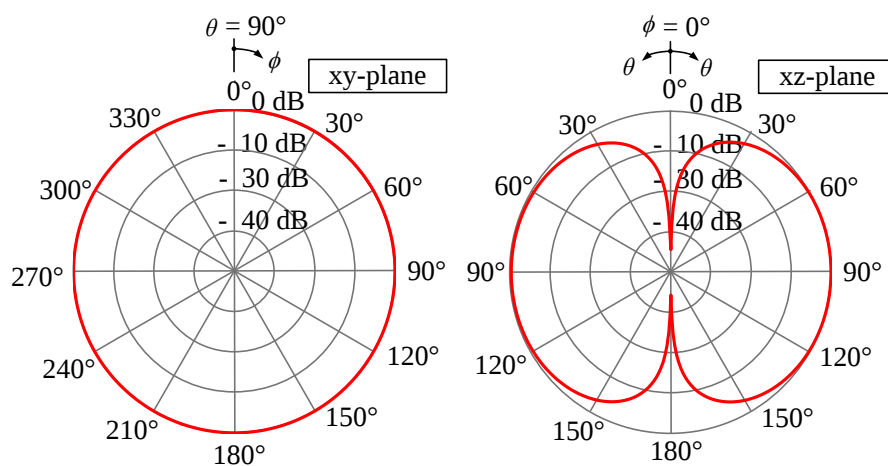


รูปที่ 3.39 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ สายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน

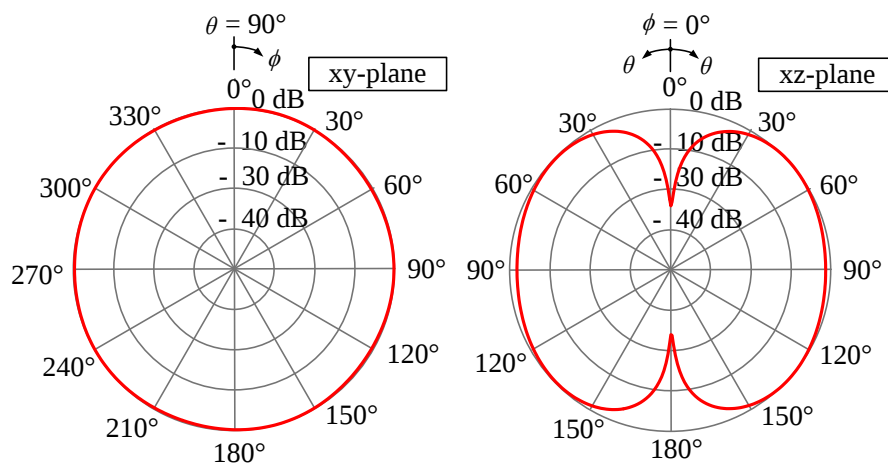
จากรูปที่ 3.38 แสดงผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศโพลาริซ์แนวนอนรอบตัวโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน ที่มีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 455 MHz ถึง 920 MHz โดยมีแบนด์วิดท์ 465 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัล ตามที่ กสทช. กำหนด คือ 470 MHz ถึง 862 MHz

3.3.2 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

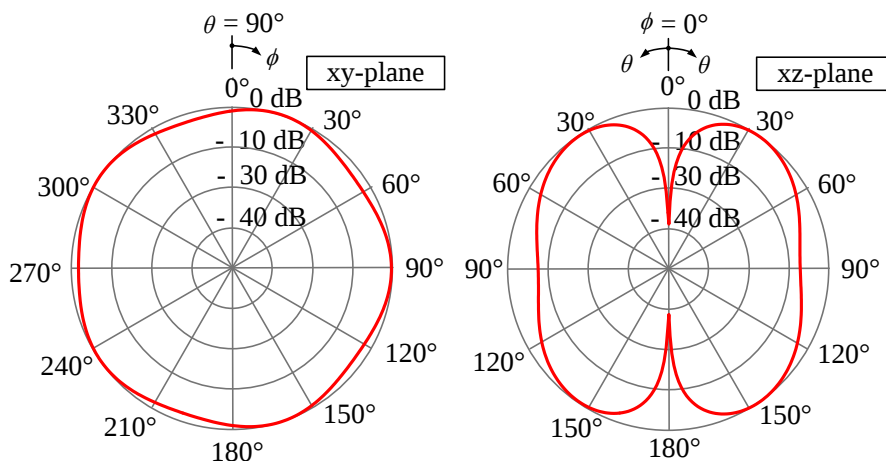
การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ จะพิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงจากรูปที่ 3.40



(ก) ความถี่ 470 MHz



(ข) ความถี่ 666 MHz



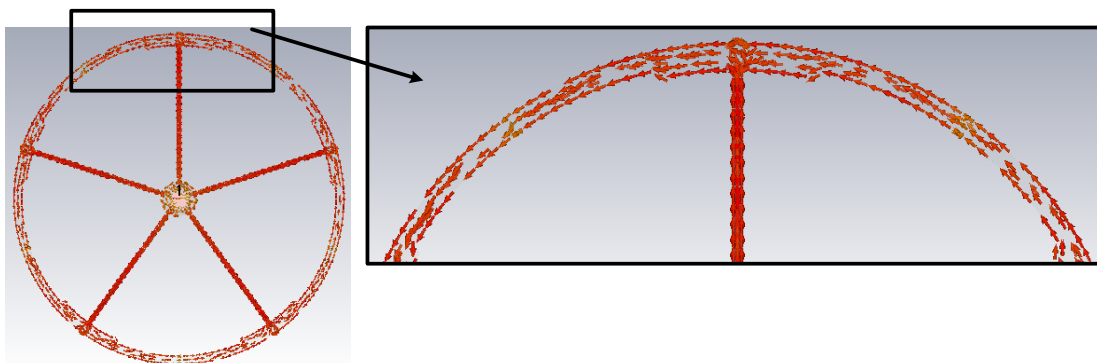
(ค) ความถี่ 862 MHz

รูปที่ 3.40 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบตัวโพลาริซแนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน

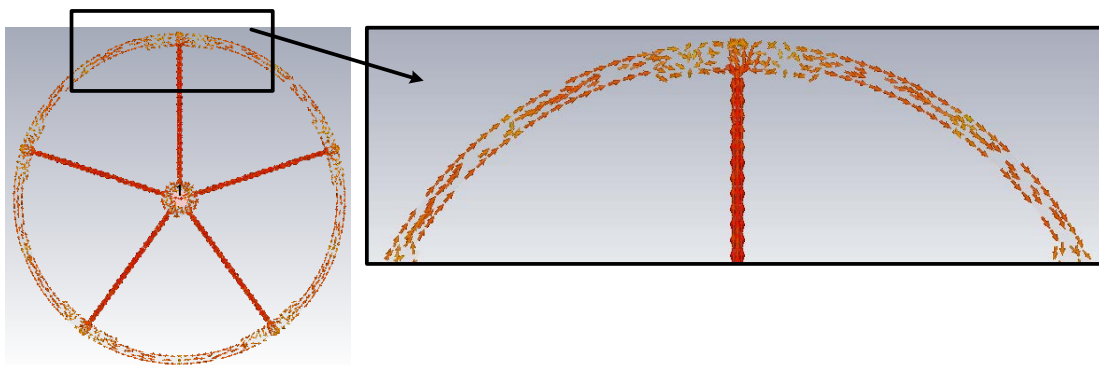
ในรูปที่ 3.40 ซึ่งพิจารณาที่ระนาบ xz และ yz ตามลำดับ สายอากาศที่น่าเสนอจะอยู่ในระนาบ xy และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอยู่ในระนาบ xy โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้ง 3 ความถี่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน สายอากาศรอบตัวโพลาริซแนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันเป็นสายอากาศที่มีโพลาริซเป็นเชิงเส้นแนวนอน และพบว่าผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz มีการกระเพื่อมสูงสุด 0.16 0.66 และ 2.38 ตามลำดับ ส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางของการแพร่กระจายแบบรอบทิศทางในระนาบ xy เพราะมีค่าการกระเพื่อมไม่เกิน 3 dB ส่วนความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เป็น 121.8 deg 140.0 deg และ 38.9 deg ตามลำดับ

3.3.3 ผลการจำลองการกระจายของกระแส (Current distribution)

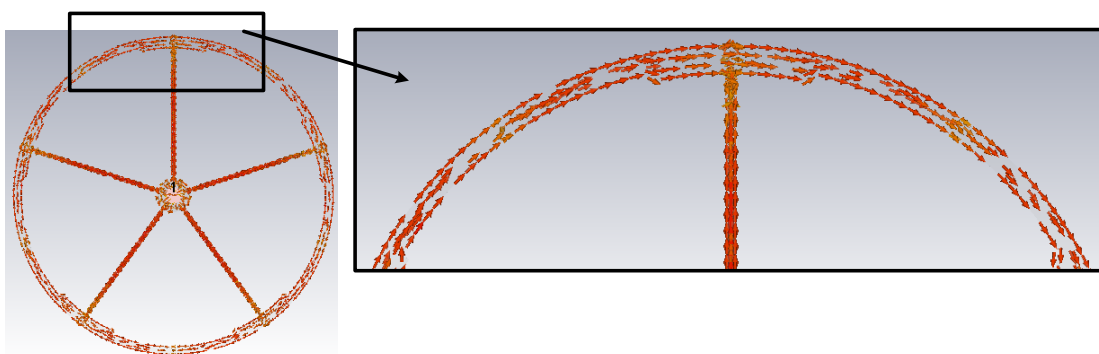
การแสดงผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวของสายอากาศรอบตัวโพลาริซแนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน โดยพิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.41



(ก) ความถี่ 470 MHz



(ข) ความถี่ 666 MHz



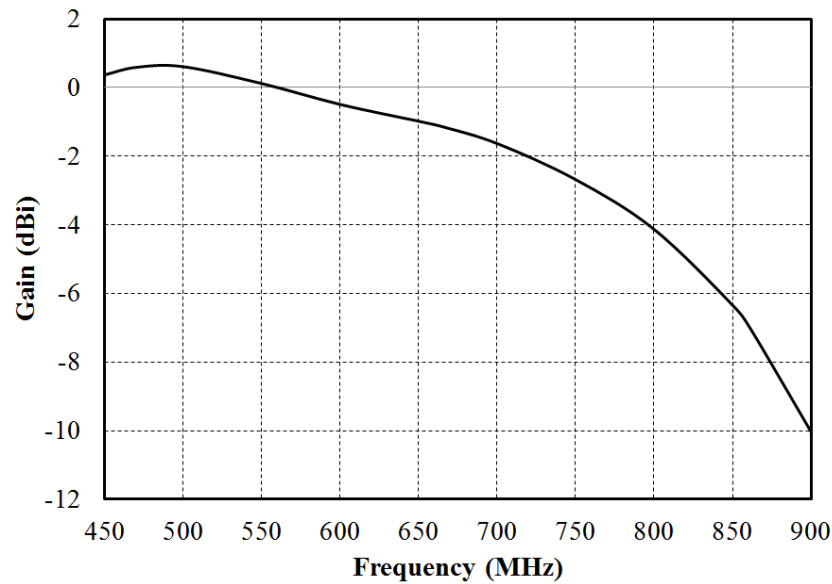
(ค) ความถี่ 862 MHz

รูปที่ 3.41 ผลการจำลองการกระจายของกระแสบนผิวของสายอากาศรอบตัวโพลาริซแนวนอน โดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน

จากรูปที่ 3.41 จะสังเกตได้ว่าการกระจายตัวของกระแสที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz จะมีความหนาแน่นของกระแสทั่วทั้งโครงสร้างของสายอากาศเหมือนกันทั้งหมด การกระจายตัวของกระแสทั้งหมดมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันกับสายอากาศทั้งสองแผ่นวงแหวน จึงส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.40 แต่ช่วงความถี่ 862 MHz มีการกระจายตัวของกระแสบริเวณส่วนโค้งของวงแหวนเบาบางกว่าบริเวณก้านไดโพล ส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ดังกล่าวมีความเพี้ยนเล็กน้อย แต่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าวยังคงเป็นแบบรอบทิศทาง โดยการกระจายของกระแสทั้ง 3 ความถี่ มีทิศทางของการกระจายของกระแสในแนวแกน $-x$ ถึง $+x$ และแนวแกน $-y$ ถึง $+y$ ตามลำดับ อันเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบจากสายอากาศไดโพล

3.3.4 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลจำลองอัตราขยายของสายอากาศแบบห้าก้านที่มีกิ่งโค้ง ซึ่งทำการพิจารณาตั้งแต่ช่วงความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ผลการจำลองอัตรายายของสายอากาศแบบหำก้านที่มีกึ่งโค้ง

จากรูปที่ 3.42 แสดงผลการจำลองอัตรายายของสายอากาศหำก้านที่มีกึ่งโค้ง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อความถี่สูงขึ้น แนวโน้มของอัตรายายของสายอากาศก็จะลดลง โดยมีอัตรายายของสายอากาศอยู่ที่ 0.67 dBi -1.14 dBi และ -6.52 dBi ที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแบบหำก้านที่มีกึ่งโค้ง

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการจำลอง		
ความถี่ที่ออกแบบ	470 MHz	666 MHz	862 MHz
$ S_{11} $	-12.79 dB	-14.59 dB	-13.13 dB
แบนด์วิดท์	455 MHz ถึง 920 MHz		
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	รอบทิศทางในระนาบ xy	รอบทิศทางในระนาบ xy	รอบทิศทางในระนาบ xy
โพลาริซ	เชิงเส้นแนวนอน	เชิงเส้นแนวนอน	เชิงเส้นแนวนอน
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz	121.8 deg	140.0 deg	38.9 deg
อัตรายายของสายอากาศ	0.59 dBi	-1.15 dBi	-7.07 dBi

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศ โดยเริ่มต้นจากการคำนวณตามทฤษฎี เพื่อหาค่าขนาดของสายอากาศเริ่มต้น และทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานของโทรทัศน์ระบบดิจิตอล ตามข้อกำหนดของ กสทช. ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการจำลองผลจะประกอบด้วย

ค่า $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz เพื่อที่จะรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล โดยมีสัญญาณสะท้อนกลับมามีค่า หรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 455 MHz ถึง 920 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัล ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบ xy ส่วนความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz มีค่าเท่ากับ 121.8 deg, 140.0 deg และ 38.9 deg ตามลำดับ อัตราขยายของสายอากาศอยู่ที่ 0.59 dBi -1.15 dBi และ -7.07 dBi ที่ความถี่ 470 MHz, 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ