

การเพิ่มระยะการอ่านสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งโดยการ
เพิ่มโครงสร้างอภิวัดดู

นางสาวกรภัทร เปรมฤดีชัยศักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

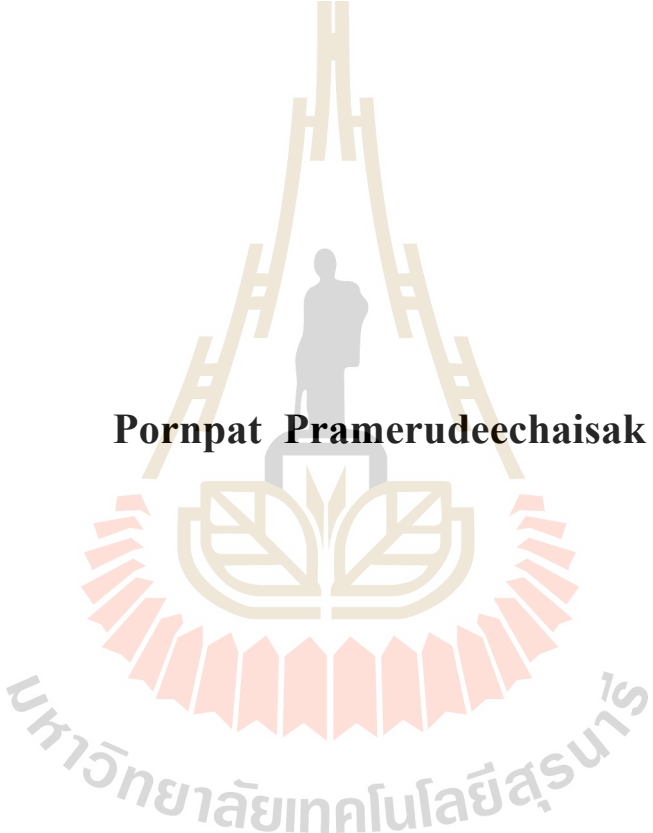
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**READING RANGE ENHANCEMENT FOR UHF RFID
READER BY ADDING METAMATERIALS STRUCTURE**

The logo of Suranaree University of Technology is a large, faint watermark in the center of the page. It features a stylized figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular arrangement of red and gold elements. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the logo.

Pornpat Pramerudeechaisak

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การเพิ่มระยะการอ่านสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งโดยการเพิ่ม
โครงสร้างอภิวัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



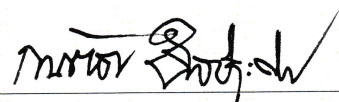
(รศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภรภัทร เปรมฤติชัยศักดิ์ : การเพิ่มระยะการอ่านสำหรับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งโดยการเพิ่มโครงสร้างอภิวัด (READING RANGE ENHANCEMENT FOR UHF RFID READER BY ADDING THE STRUCTURE OF METAMATERIALS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์, 96 หน้า.

ในปัจจุบัน เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID) มีการใช้งานแพร่หลาย แต่ราคาของอุปกรณ์ย่านความถี่นี้มีราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศของเครื่องอ่านระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งที่ความถี่ 910 MHz เพื่อเพิ่มระยะการอ่านแท็ก (Tag) ให้ไกลกว่าเดิมโดยการออกแบบโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (SRR Array) และนำมาวางด้านหน้าเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี โดยไม่มีการเชื่อมต่อหรือดัดแปลงเครื่องอ่านดั้งเดิม พร้อมทั้งวางแผ่นที่เป็นโลหะตัวนำไว้ด้านหลัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอ่านต้นฉบับ และพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราขยาย ณ ความถี่ 910 MHz ให้กับสายอากาศต้นฉบับประมาณ 9.70 dB ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $S_{11} = -18.26$ dB และมีความกว้างแถบ 875.99 – 952.96 MHz จากนั้นนำผลเฉลยจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST เปรียบเทียบกับผลการวัดทดสอบของอุปกรณ์ต้นแบบ พบว่าผลผลิตจากการวิจัยสามารถเพิ่มระยะการอ่านแท็กได้อีก 370 % เมื่อเทียบกับระยะการอ่านของเครื่องอ่านต้นฉบับ

PORNPAT PRAMERUDEECHAISAK : READING RANGE
ENHANCEMENT FOR UHF RFID READER BY ADDING THE
STRUCTURE OF METAMATERIALS. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. RANGSAN WONGSAN, D.Eng., 96 PP.

READING RANGE ENHANCEMENT/UHF RFID READER/METAMATERIALS

Nowadays, the UHF RFID reader is more widely used and rapidly growth but its cost in the markets still be high. This work presents the method for improving the performance of UHF RFID reader's antenna to increase the reading range more than the conventional RFID reader at center frequency 910 MHz. The proposed structure is designed as the array of split-ring resonators (SRRs), which located at the front of the conventional RFID reader without any modifying or adding RF amplifier into the circuit of the UHF RFID reader, whereas the metallic sheet has been placed at the backside of UHF RFID reader as the reflector. The proposed structure of metamaterials can improve the gain around 9.7 dB at the operating frequency of 910 MHz when compared to the original one with the reflection coefficient (S_{11}) is around -18.26 dB and cover the desired bandwidth of UHF RFID (860 – 960 MHz). After that, the prototype of the SRR structure is fabricated and tested, then compared to the calculated results simulated by using CST software. Finally, we found that the prototype structure can increase the reading range up to 370 % compared to the conventional UHF RFID reader.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature Pornpat

Academic Year 2018

Advisor's Signature W. Rangsan

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยในการตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณพิรสันต์ คำสาลี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระพีพันธ์ ชัดปัด คุณอวยชัย ยาชงไชย และคุณปัญญา หันตุลา ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิตการศึกษา

ภรภัทร เปรมฤดีชัยศักดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีอภิวัดดู	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2.1 เครื่องอ่าน (Reader or Interrogator)	4
2.2.2 แท็ก (Tag or Transponder)	5
2.2.3 ข่านความถี่ใช้งานของระบบ RFID	6
2.2.4 หลังการทำงานเบื้องต้นของระบบ RFID	8
2.3 ทฤษฎีอภิวัดดู	9
2.3.1 อภิวัดดู	9
2.3.2 โครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยก (Split ring resonator: SRR)	10
2.3.3 สรุป	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การออกแบบสายอากาศ	13
3.1	บทนำ	13
3.2	จำลองผลของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016	13
3.2.1	ปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อน	16
3.2.2	ปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อน	16
3.3	ออกแบบและจำลองผลของโครงสร้างอภิวัดคุณิวดวงแหวนกำทอนแบบแยกด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016	19
3.3.1	การทดสอบโครงสร้างของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปแบบต่าง ๆ	20
1.	วงแหวนกำทอนแบบแยกพื้นฐาน (Basic split ring resonator)	20
2.	วงแหวนกำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม (Square ring resonator)	21
3.	วงแหวนกำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป (2 square ring resonator)	22
4.	วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ (A-shaped SRR)	23
5.	วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช (H-shaped SRR)	24
3.3.2	วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอชและการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ ..	25
1.	ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ b	25
2.	ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ a	26
3.	ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ g	27
4.	ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ w	28
3.3.3	วงจรมุมของวงแหวนกำทอนแบบแยก	30
1.	วงจรมุมของ SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square-shaped SRR)	30
2.	วงจรมุมของ SRR รูปตัวเอช (H-shaped SRR)	32
3.	วงจรมุมของ SRR วงจรเดี่ยวที่สร้างจาก SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและ SRR รูปตัวเอช	33
4.	วงจรมุมของต้นแบบโครงสร้างอภิวัดคุณิวดวงแหวนกำทอนแบบแยก	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การออกแบบและจำลองผลโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016	35
3.4.1	ปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ ...	39
3.5	ออกแบบและจำลองผลโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับแบบที่สองด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016	42
3.5.1	การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	42
3.5.2	เพิ่มปีกของแผ่นสะท้อนทั้งสี่ด้านทำมุม 45 องศา	45
3.5.3	การปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดต้นแบบ	47
3.6	สรุป	51
4	ผลการวัดทดสอบ	52
4.1	บทนำ	52
4.2	ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ	52
4.3	ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับและแผ่นสะท้อน ...	57
4.4	ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ	60
4.5	ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับแบบที่สอง	65
4.6	สรุป	72
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัย	73
	รายการอ้างอิง	74
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา	75
	ประวัติผู้เขียน	81

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบ RFID ที่ใช้งานในย่านความถี่ต่าง ๆ	8
3.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ unit cell ที่เหมาะสมตามที่ต้องการ	30
3.2	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มแผ่นสะท้อน และสายอากาศ เครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มโครงสร้างอภิวัดดู แบบแถวลำดับจากการจำลองผล	41
3.3	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มแผ่นสะท้อน และสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มโครงสร้างอภิวัดดู แบบแถวลำดับจากการจำลองผล	50
3.4	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มโครงสร้างอภิวัดดู แบบแถวลำดับทั้งสองแบบ จากการจำลองผล	51
4.1	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ	56
4.2	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน	60
4.3	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับ	63
4.4	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบ ...	64
4.5	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน	67
4.6	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับ	70
4.7	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบ ...	71
4.8	ผลการวัดทดสอบระยะการอ่านแท็กของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ เครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและเครื่องอ่านต้นแบบจากการวัดทดสอบ	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างภายในเครื่องอ่าน 4
2.2	แสดงโครงสร้างการออกแบบสายอากาศทวนกำลังไฟฟ้า 5
2.3	แสดงแท่งในรูปแบบต่าง ๆ 6
2.4	แสดงส่วนประกอบของสายอากาศแท่งที่สามารถติดตั้งกับวัตถุโลหะได้ 7
2.5	แสดงโครงสร้างอภิวัดดูแบบระบายกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 10
2.6	แสดงโครงสร้างตัวกำหนดชนิดวงแหวนแยก 11
2.7	แสดงโครงสร้างวงแหวนกำหนดแบบแยก 11
3.1	แสดงโครงสร้างภายในเครื่องอ่าน UHF RFID 14
3.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ 14
3.3	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ 15
3.4	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน 15
3.5	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ และแผ่นสะท้อนที่ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร 17
3.6	แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน กับแผ่นสะท้อน 17
3.7	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน เท่ากับ 100 มิลลิเมตร 18
3.8	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของวงแหวนกำหนดแบบแยก 19
3.9	แสดงรูปแบบของวงแหวนกำหนดแบบแยกพื้นฐาน 20
3.10	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำหนดแบบแยกพื้นฐาน 20
3.11	แสดงรูปแบบของวงแหวนกำหนดแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม 20
3.12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำหนดแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม 21
3.13	แสดงรูปแบบของวงแหวนกำหนดแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป 22
3.14	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำหนดแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป .. 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15	แสดงรูปแบบของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ 23
3.16	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ 23
3.17	แสดงรูปแบบของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช 24
3.18	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช 24
3.19	แสดงโครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช 25
3.20	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ b 26
3.21	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตร 26
3.22	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ a 27
3.23	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3 มิลลิเมตร 27
3.24	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ g 28
3.25	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ g เท่ากับ 12 มิลลิเมตร 28
3.26	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ w 29
3.27	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ w เท่ากับ 3 มิลลิเมตร 29
3.28	แสดงภาพวาดและวงจรสมมูลของเซลล์หนึ่งหน่วยของ SRR ที่ได้นำเสนอ 30
3.29	แสดงภาพวาดและวงจรสมมูลของ SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส 31
3.30	แสดงภาพวาดและวงจรสมมูลของ SRR รูปตัวเอช 32
3.31	แสดงภาพวาดและวงจรสมมูลของดัดแบบอิกวิสตูดเพียงด้านเดียว 34
3.32	แสดงโครงสร้างอิกวิสตูดแบบแถวลำดับ 36
3.33	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของโครงสร้างอิกวิสตูด แบบแถวลำดับ 36
3.34	แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอิกวิสตูดแบบแถวลำดับ 37
3.35	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของโครงสร้างอิกวิสตูดแบบแถวลำดับ จำนวน 12 อิลิเมนต์ 37
3.36	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอิกวิสตูดแบบแถวลำดับจำนวน 12 อิลิเมนต์ 38
3.37	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอิกวิสตูดแบบแถวลำดับ 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.38 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน และโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ	39
3.39 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน และโครงสร้างอภิวัด เท่ากับ 115 มิลลิเมตร	40
3.40 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับเมื่อระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัด เท่ากับ 115 มิลลิเมตร	40
3.41 แสดงการจำลองผล โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับแบบที่สอง	42
3.42 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	43
3.43 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับขนาดของแผ่นสะท้อน	43
3.44 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อขนาดของแผ่นสะท้อน เท่ากับ 350x200 มิลลิเมตร	44
3.45 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อขนาดของแผ่นสะท้อน เท่ากับ 350x200 มิลลิเมตร	44
3.46 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นสะท้อน	45
3.47 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน และแผ่นสะท้อน	45
3.48 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและ แผ่นสะท้อนที่ระยะห่าง เท่ากับ 90 มิลลิเมตร	46
3.49 แสดงแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นสะท้อน เท่ากับ 90 มิลลิเมตร	47
3.50 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ	48
3.51 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและ โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ	48
3.52 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและ โครงสร้างอภิวัด เท่ากับ 115 มิลลิเมตร	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.53	แสดงแบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอภิวัดศุแถวลำดับเมื่อระยะห่างระหว่าง เครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัดศุ เท่ากับ 115 มิลลิเมตร 50
4.1	แสดงสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ 52
4.2	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลอง และการวัดทดสอบ 53
4.3	แสดงการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับใน Anechoic Chamber 54
4.4	แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ ระหว่างผลจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ 54
4.5	แสดงสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับและแผ่นสะท้อน 57
4.6	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลอง และการวัดทดสอบ 57
4.7	แสดงการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน ในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น 58
4.8	แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและ แผ่นสะท้อนระหว่างผลจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ 59
4.9	แสดงสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดศุ 60
4.10	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและ การวัดทดสอบ 61
4.11	แสดงการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน ในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น 62
4.12	แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดศุจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ 62
4.13	แสดงสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับและแผ่นสะท้อนแบบที่สอง 65
4.14	แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและ การวัดทดสอบ 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.15 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ
กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ 66
- 4.16 แสดงสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัด 68
- 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและ
การวัดทดสอบ 68
- 4.18 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID
กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ 69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัตินี้ (Auto-ID : automatic identification procedures) เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันมากขึ้น เห็นได้จากการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การบริการด้านอุตสาหกรรม ร้านค้าปลีก โลจิสติกส์และกระบวนการผลิตในโรงงาน เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการแสดงตัวตนของมนุษย์ สัตว์ สินค้าและวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ซึ่งเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัตินี้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการดำเนินธุรกิจ โดยเฉพาะในการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติอย่างรวดเร็วแทนการจดบันทึกด้วยมนุษย์ ตัวอย่างเทคโนโลยีระบุตัวตนที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น บาร์โค้ด (Barcode labels) แต่เมื่อไม่นานมานี้กลับพบว่าบาร์โค้ดนั้นเริ่มไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเพิ่มจำนวน ถึงแม้ว่าบาร์โค้ดจะมีราคาถูก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเรื่องจำนวนและไม่สามารถนำกลับมาใช้หรือเขียนข้อมูลใหม่ได้ จึงได้มีการมองหาเทคโนโลยีใหม่มาทดแทน [1]

เทคโนโลยีที่นำมาทดแทนบาร์โค้ด คือ เทคโนโลยี RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นเทคโนโลยีที่มีการเก็บข้อมูลแบบชิป (Chip) ที่สามารถอ่านและเขียนได้โดยไร้สัมผัส (Contact-less) ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการระบุลักษณะของวัตถุ ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 มีจุดเด่นอยู่ที่การอ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลายแท็กแบบไร้สัมผัสและสามารถอ่านค่าได้ในสภาพทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แร่งสั่นสะเทือน สามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก [2] เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากทั่วโลกในขณะนี้ เห็นได้จากที่มีงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเพิ่มจำนวนมากขึ้นภายในไม่กี่ปี ด้วยเชื่อว่าเป็นเทคโนโลยีที่จะส่งผลต่อการดำเนินชีวิตประจำวันและการดำเนินธุรกิจ

RFID ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก (Transponder/Tag) สำหรับบรรจุข้อมูลเพื่อใช้ในการระบุลักษณะวัตถุที่ต้องการและเครื่องอ่าน (Reader/Interrogator) สำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ในปัจจุบันความถี่คลื่นวิทยุที่ใช้กันอยู่จะอยู่ในย่านความถี่ ISM Band (Industrial – Scientific – Medicine) แบ่งออกเป็น 4 ย่านการใช้งานหลัก ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency : LF) ความถี่ต่ำกว่า 150 kHz เป็นลักษณะของ Proximity Card ระยะการใช้งานใกล้ ถูกนำมาใช้งานกับบัตรเข้า-ออกอาคารสำนักงานหรืออาคารที่จอดรถ ย่านความถี่สูง (High Frequency : HF) ความถี่ 13.56 MHz เป็น Vicinity Card ย่านความถี่สูง

ยิ่ง (Ultra-High Frequency : UHF) ความถี่ในช่วง 900 MHz และย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Frequency) ความถี่ในช่วง 2.45 - 5 GHz

UHF RFID เป็นย่านความถี่ที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากเป็นย่านที่สามารถใช้งานที่ระยะการอ่านแท็กไกล โดยมีแท็กทั้งในแบบพาสซีฟ (Passive) และแบบแอคทีฟ (Active) แต่ก็มีข้อเสียตรงที่อุปกรณ์มีราคาค่อนข้างแพง จึงมีนักวิจัยและพัฒนาจำนวนมากที่พยายามหาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อลดต้นทุนของระบบ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้อาจยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ เนื่องจากในปัจจุบันการใช้งาน RFID นั้นแพร่หลายในธุรกิจต่าง ๆ หลากหลายรูปแบบ เช่น ด้านการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย โดยใช้ตรวจสอบเวลาและการทำงานของพนักงาน ด้านอุตสาหกรรมการผลิตในกระบวนการติดตามผลิตภัณฑ์ Access Control/ Personal Identification หรือการเข้าออกอาคารแทนการใช้บัตร ระบบโลจิสติกส์ที่ใช้แท็กติดไว้กับชิ้นงานเพื่อติดตามตั้งแต่กระบวนการผลิตและขนส่ง รวมทั้งข้อมูลของสินค้า ระบบติดตามสัตว์ (Animal Tracking) ระบบตั๋วอิเล็กทรอนิกส์ (e-ticket) เป็นต้น จึงทำให้นักวิจัยและพัฒนา ยังคงหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเพื่อให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าการลงทุนมากขึ้น โดยใช้ฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์ที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายและนิยมนำมาใช้ในงานวิจัย คือ วงแหวนกำเนิดแบบแยก (Split Ring Resonator, SRR) เนื่องจากง่ายต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ จึงนำเสนอวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศเครื่องอ่าน โดยใช้เทคนิคการเพิ่มโครงสร้างของฮาร์ดแวร์แบบ SRR ที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มระยะการอ่านของเครื่องอ่านโดยไม่ดัดแปลงหรือเชื่อมต่อกับสายอากาศของเครื่องอ่านดั้งเดิมและแท็กในท้องตลาด เพื่อที่จะพัฒนา Low cost RFID reader ให้สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับ High cost RFID reader และเหตุผลที่เลือกพัฒนาที่เครื่องอ่าน เนื่องจากการพัฒนาที่แท็กจะทำให้มีต้นทุนสูง หากมีการใช้งานแท็กจำนวนมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างและการทำงานของระบบการระบุด้วยคลื่นวิทยุหรือ RFID (Radio Frequency Identification) ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) ความถี่ 910 MHz
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างและออกแบบสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานและเพิ่มพื้นที่การอ่านแท็กของสายอากาศของเครื่องอ่าน RFID Reader แบบดั้งเดิม
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและจำลองผลของสายอากาศต้นแบบสำหรับขยายพื้นที่การใช้งานระบบ RFID โดยใช้ฮาร์ดแวร์ด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave studio
- 1.2.4 เพื่อสร้างสายอากาศต้นแบบ ทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ปัจจัยในการเพิ่มระยะการอ่านแท็ก คือ สายอากาศของทั้งเครื่องอ่านและแท็ก
- 1.3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการอ่านระยะสายอากาศเครื่องอ่านโดยใช้ SRR สามารถนำมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ไม่มีการดัดแปลงหรือเชื่อมต่อกับสายอากาศของเครื่องอ่านดั้งเดิม
- 1.4.2 ใช้ความถี่ในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) 910 MHz
- 1.4.3 ใช้โปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016 ในการจำลองผลของสายอากาศ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารด้วยระบบ RFID ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) 910 MHz
- 1.5.2 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของอภิวัด (Metamaterials) ประเภท SRR
- 1.5.3 นำอภิวัดมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการอ่านของเครื่องอ่าน RFID
- 1.5.4 สร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave studio 2016

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยกที่ความถี่ใช้งาน 910 MHz ซึ่งสามารถวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ และนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านระบบ RFID เพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศ
- 1.6.2 สามารถเพิ่มระยะการอ่านแท็กของเครื่องอ่านระบบ RFID ได้
- 1.6.3 ได้สายอากาศต้นแบบที่สามารถเพิ่มระยะการอ่านแท็กของเครื่องอ่านระบบ RFID

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีอภิวัดศุ

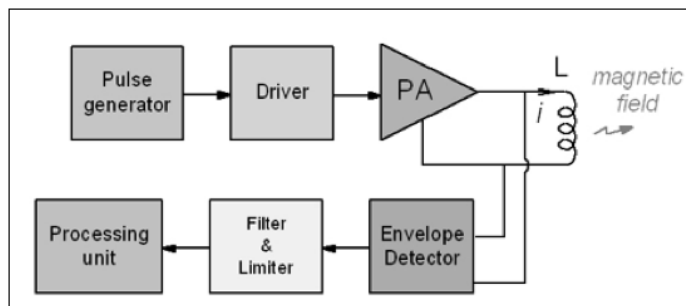
2.1 บทนำ

เทคโนโลยี UHF RFID ที่สามารถอ่านแท็กได้หลายแท็กและมีระยะการอ่านไกลกำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายหลายด้าน ทำให้อุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีระบบระบุตัวตัวแบบราคาต่ำ (Low cost RFID) ที่มีการอ่านแท็กในระยะสั้นมาเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับระบบระบุตัวตัวแบบราคาสูง (High cost RFID) จึงมีความจำเป็นต้องมีการดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งวิธีการที่เคยถูกนำมาใช้ ผลของการวิจัยที่ได้ ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรัทัศนัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเกี่ยวกับเทคโนโลยี RFID เครื่องอ่าน แท็ก หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบ RFID และทฤษฎีอภิวัดศุ

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

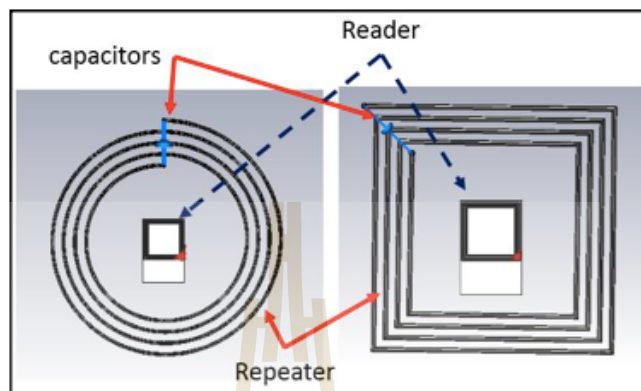
2.2.1 เครื่องอ่าน (Reader or Interrogator)

ทำหน้าที่เชื่อมต่อเพื่อเขียนข้อมูลลงหรืออ่านข้อมูลในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุภายในเครื่องอ่านประกอบด้วยสายอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดงเพื่อใช้รับส่งสัญญาณระหว่างภากรับและภากร่ง และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูลจำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ตัวอ่านข้อมูลที่ดีต้องมีความสามารถในการป้องกันการอ่านข้อมูลซ้ำได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในเครื่องอ่าน

ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศของเครื่องอ่านจึงมีการออกแบบสายอากาศทวนกำลัง (พินิจนัย สิริไทย, จูติพงษ์ เลิศวิริยะประภา และ กิตติศักดิ์ แพรบัว, 2016) โดยติดตั้งสายอากาศทวนกำลังเหนือสายอากาศของเครื่องอ่านและวงจรส่งดั้งเดิมที่ย่านความถี่ 13.56 MHz ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการออกแบบสายอากาศทวนกำลังไฟฟ้า

ผลที่ได้พบว่าพื้นที่การอ่าน HF RFID tag เพิ่มขึ้น หากแต่ไม่มีผลการวิจัยในเรื่องการเพิ่มระยะทางการอ่านแท็ก

2.2.2 แท็ก (Tag or Transponder)

มาจากคำว่า Transmitter ผสมกับคำว่า Responder ทำหน้าที่ส่งสัญญาณหรือข้อมูลที่บันทึกอยู่ในแท็กตอบสนองไปที่เครื่องอ่าน การสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านจะเป็นแบบไร้สาย โครงสร้างภายในแท็กประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานให้ส่วนของไมโครชิปที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ แท็กอาจมีรูปร่างได้หลากหลายขึ้นกับการใช้งาน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ก) แบบพาสซีฟ (Passive Tag) แท็กชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอก เพราะภายในจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลขึ้นกับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้

ข) แบบแอคทีฟ (Active Tag) แท็กชนิดนี้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอกเพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน แท็กชนิดนี้มีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่และสามารถอ่านได้ในระยะไกล แม้ว่าจะมีข้อดีอยู่หลายข้อ แต่ก็มีข้อเสียด้วย เช่น มีราคาค่อนข้างแพง มีขนาดใหญ่และระยะเวลาในการทำงานมาก

ค) แบบเซมิแอคทีฟ (Semi-Active) เป็นแท็กที่มีแหล่งพลังงาน และอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ในการทำงานเป็นของตนเอง แหล่งพลังงานดังกล่าวจะทำหน้าที่ให้พลังงานแก่แท็ก ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับแบบแอคทีฟ

ในการส่งข้อมูลนั้น แท็กประเภทนี้จะอาศัยพลังงานจากเครื่องอ่าน มีการนำแท็กประเภทนี้มาแทนแบบพาสซีฟ เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลได้ไกลกว่า เพราะการส่งข้อมูลไม่ต้องรอให้เกิดการกระตุ้นการทำงานของขดลวดทองแดงเหมือนแบบพาสซีฟ



รูปที่ 2.3 แท็กในรูปแบบต่างๆ

2.2.3 ย่านความถี่ใช้งานของระบบ RFID

ระบบ RFID เป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านที่ใช้คลื่นความถี่เดียวกัน เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ใช้งาน (Operating Frequency) ความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า สเปกตรัมความถี่วิทยุ (Radio frequency spectrum) เนื่องจากระบบ RFID สร้างและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในสเปกตรัมความถี่วิทยุ

ในปัจจุบันย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ RFID จะอยู่ในย่านความถี่ ISM ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงการแพทย์ วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสารโดยทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 4 ย่านความถี่ใหญ่ๆ ได้แก่

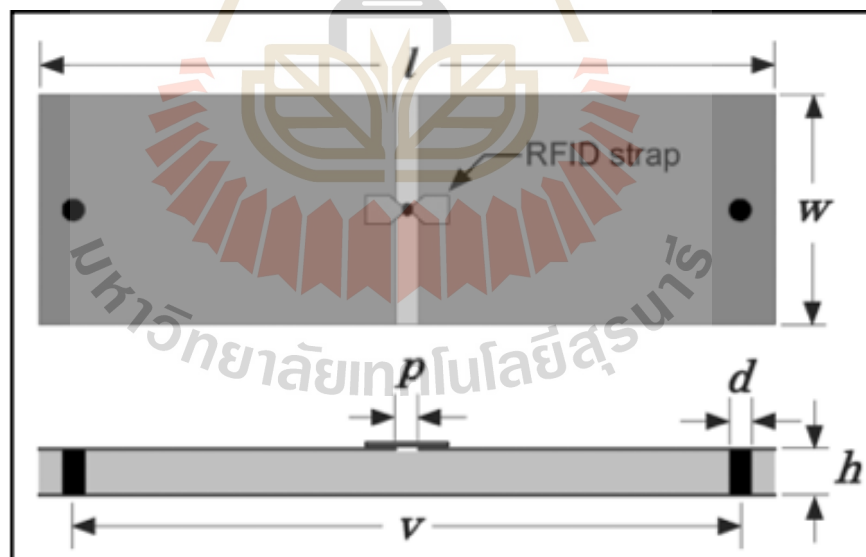
ก) ย่านความถี่ต่ำ อยู่ในช่วงความถี่ 30 – 300 kHz เป็นความถี่ที่มีการใช้งานทั่วไปในระบบของ RFID มีระยะในการรับส่งข้อมูลใกล้ ความเร็วในการอ่านค่อนข้างช้า ความเร็วในการรับส่งข้อมูลช้าและถูกคุกคณน้อย จึงนิยมนำไปใช้งานด้านการควบคุมการเข้าถึง (Access

Control), การติดตามมนุษย์และสัตว์ (Personal and animal tracking) และ ระบบป้องกันการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (Vehicle immobilizer) เป็นต้น

ข) ย่านความถี่สูง ใช้งานที่ความถี่ 13.56 MHz เป็นความถี่ที่ใช้กันโดยทั่วไปในระบบ RFID เนื่องจากความถี่สูงมีความยาวคลื่นสั้น จึงทำให้ไม่สามารถแพร่กระจายผ่านโลหะได้ เหมาะกับการใช้งานด้านการควบคุมการเข้าออกอาคาร (Building access control) การติดตามสินค้า (Item-level tracking) และห้องสมุด เป็นต้น

ค) ย่านความถี่สูงยิ่ง ใช้งานความถี่ 344 MHz และ 860 – 960 MHz ซึ่งถือว่าเป็นความถี่ที่มีความเร็วในการอ่านข้อมูลที่สูง มีความยาวคลื่นสั้น แต่ถูกดูดกลืนได้ง่าย สามารถอ่านเขียนข้อมูลได้รวดเร็ว ทำให้มีโอกาสเกิดความผิดพลาดมากขึ้น นิยมนำไปใช้งานด้านการเก็บเงินอัตโนมัติ (Automated toll collection) การจัดการคลังสินค้า (Warehouse management) และการติดตามรายการสินค้า เป็นต้น

ในระบบ UHF RFID จะมีข้อจำกัดการอ่านแท็กที่สำคัญ คือ หากแท็กอยู่ใกล้หรือติดกับวัตถุที่เป็นโลหะ จะมีการรบกวนการอ่านแท็ก จึงมีการออกแบบแท็กเพื่อให้สามารถติดตั้งกับวัตถุที่เป็นโลหะได้ (Sung-Lin Chen and Ken-Huang Lin, 2008)



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของสายอากาศแท็กที่สามารถติดตั้งกับวัตถุโลหะได้

ง) ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.80 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีความเร็วในการอ่านข้อมูลที่สูงมาก สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว อ่านข้อมูลระยะไกล แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ

เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการควบคุมการเข้าถึงระยะไกลของ พาหนะหรือห่วงโซ่อุปทาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบ RFID ที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ

ย่านความถี่	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างการใช้งาน
LF	ใช้งานได้ทั่วไปและคิในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	ระยะการอ่านต่ำและความเร็วในการอ่านข้อมูลช้า	ระบบบ่งชี้สัตว์/สิ่งของ
HF	ความแน่นอนและความเร็วในการอ่านและเก็บข้อมูลได้มากขึ้น	ต้องการพลังงานมากขึ้น	ระบบเข้าออกอาคาร การยืมหนังสือในห้องสมุด
UHF	ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง ระยะการอ่านไกลและสามารถเก็บข้อมูลได้มาก	ทำงานได้ไม่ดีในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	การเข้าออกที่จอดรถ ห่วงโซ่อุปทาน
Microwave	อ่านข้อมูลที่รวดเร็วมากและระยะการอ่านไกล	ทำงานได้ไม่ดีในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและโลหะ	การระบุตัวตนของพาหนะ ห่วงโซ่อุปทาน

2.2.4 หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบ RFID

ก) เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณวิทยุอย่างต่อเนื่องและรอคอยสัญญาณตอบกลับจากแท็ก

ข) เมื่อแท็กได้รับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากเครื่องอ่านในระดับที่เพียงพอ ก็จะเหนี่ยวนำเพื่อสร้างพลังงานป้อนให้แท็กทำงาน โดยแท็กจะสร้างสัญญาณเพื่อกระตุ้นวงจรภายในให้ทำงาน

ค) วงจรดิจิทัลอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำภายในและเข้ารหัสข้อมูล

ง) ข้อมูลถูกส่งไปที่ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศเพื่อส่งไปยังเครื่องอ่าน

จ) เครื่องอ่านจะตรวจจับสัญญาณจากแท็ก

ฉ) เครื่องอ่านถอดรหัสและส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ RFID สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศของเครื่องอ่านและการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศของแท็กงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศเครื่องอ่านโดยไม่เปลี่ยนแปลง

หรือเชื่อมต่อกับสายอากาศของเครื่องอ่านดั้งเดิม โดยใช้เทคนิคการเพิ่มโครงสร้างของอภิวัดแบบวงแหวนกำทอนแบบแยก (Split Ring Resonator) ที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มระยะการอ่านของเครื่องอ่านโดยไม่ดัดแปลงเครื่องอ่านและแท็กดั้งเดิมในท้องตลาด เพื่อที่จะพัฒนาระบบระบุตัวด้วยแบบราคาต่ำ (Low cost RFID Reader) ให้สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับระบบระบุตัวแบบราคาสูง (High Cost RFID Reader) และเหตุผลหลักที่เลือกพัฒนาและวิจัยที่ตัวเครื่องอ่าน เนื่องจากการพัฒนาที่แท็กจะทำให้มีต้นทุนสูงหากการใช้งานมีการใช้แท็กจำนวนมาก

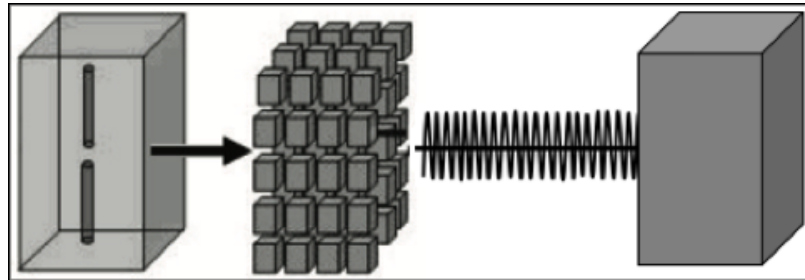
2.3 ทฤษฎีอภิวัด

2.3.1 อภิวัด

อภิวัด (Metamaterials) คือ วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสังเคราะห์หรือออกแบบขึ้นอย่างเหมาะสมเพื่อให้สนามไฟฟ้า (Electric fields) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic fields) กระทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (Artificial atoms) และเกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการได้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวนี้ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Electric permittivity, ϵ) ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability, μ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index, n) โดยทั่วไปวัสดุในธรรมชาติจะมีค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กและค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นบวก ซึ่งเกิดจากอะตอมของเนื้อวัสดุนั้นๆ ทำปฏิกิริยาร่วมทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อทำการออกแบบอะตอมเทียมสำหรับอภิวัดให้มีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ทำให้สามารถออกแบบคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่างออกไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบและค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ เป็นต้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่สามารถหาได้ในวัสดุธรรมชาติ ด้วยเหตุผลนี้ วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า “วัสดุเหนือธรรมชาติ”

โครงสร้างของอะตอมเทียมที่ประกอบขึ้นเป็นอภิวัดจะถูกจัดเรียงเป็นลักษณะโครงสร้างคาบ (periodic structure) และขนาดของโครงสร้างของอะตอมเทียมจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงทำงาน (operating wavelength) เพื่อที่จะทำให้อภิวัดนี้แสดงคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous property) และโครงสร้างคาบของอะตอมเทียมนี้นี้จะประพฤติตัวเป็นเหมือนอะตอมที่จะมีปฏิกิริยากระทำร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูป



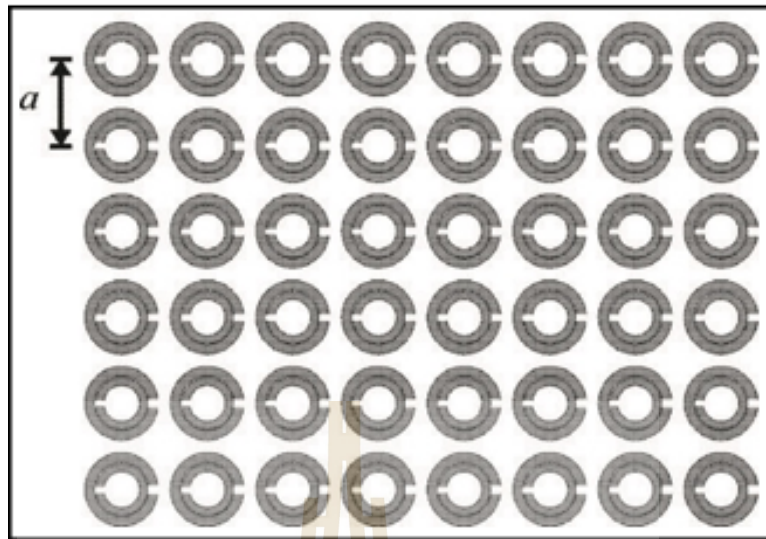
รูปที่ 2.5 โครงสร้างอภิวัดแบบระบายคาบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากคุณสมบัติพิเศษของอภิวัดทำให้นักวิจัยนำคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในแต่ละสาขา ถึงแม้ว่าอภิวัดจะเริ่มต้นจากศาสตร์ของแม่เหล็กไฟฟ้าและแสง แต่ปัจจุบันก็มีหลายศาสตร์วิชาที่ทำวิจัยเกี่ยวกับอภิวัด สาขาอากาศก็เป็นสาขาหนึ่งในกลุ่มของการนำอภิวัดมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย สามารถแบ่งกลุ่มตามการประยุกต์ใช้งานของอภิวัดสำหรับสาขาอากาศได้ ดังนี้

- ก) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก
- ข) เพื่อใช้ในการออกแบบตัวนำประจุ (Artificial Conductors)
- ค) เพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง (Substrate Material)
- ง) เพื่อใช้ในการออกแบบชั้นวางซ้อน (Superstrate) หรือฝากรอบ (Radome)
- จ) เพื่อลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและระบบ MIMO
- ฉ) เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นรั่วและเรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์
- ช) เพื่อควบคุมทิศทางลำคลื่น

2.3.2 โครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยก (Split Ring Resonator: SRR)

โครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยก หรือ Split Ring Resonator เป็นอภิวัดชนิดหนึ่งถูกเสนอโครงสร้างจาก J.B. Pendry และคณะในปี ค.ศ.1999 นำเสนอโครงสร้างอภิวัดที่มีความซับซ้อนทางแม่เหล็กเป็นลบจากโครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยก ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวกำทอนชนิดวงแหวนแยก

โครงสร้างพื้นฐานของวงแหวนกำทอนแบบแยก ประกอบด้วยวงแหวนทองแดงแบบแยก 2 วง โดยตำแหน่งของรอยแยกของวงแหวนจะอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกัน 180 องศา มีจุดศูนย์กลางเดียวกันและวางอยู่บนไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.7 โครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยก

วงแหวนกำทอนแบบแยกนั้นง่ายต่อการออกแบบและมีหลากหลายรูปแบบ เช่น Rod split ring, Nested split ring, Spiral split ring [3-5] เป็นต้น และโครงสร้างของวงแหวนกำทอนแบบแยกยังส่งผลต่อความถี่ใช้งานด้วย

2.4 สรุป

เทคโนโลยี RFID เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมมาก และย่านความถี่ที่มีการใช้งานมากคือ UHF RFID เนื่องจากมีระยะการอ่านแท็กไกล แต่เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูงและมีข้อจำกัดบางประการในการใช้งาน จึงทำให้มีการพัฒนาเพื่อให้การใช้งานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งการพยายามออกแบบแท็ก เพื่อการใช้งานในหลากหลายวัตถุประสงค์และการพยายามหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแท็กและเครื่องอ่านในวิธีต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศของเครื่องอ่านให้มีระยะการอ่านแท็กเพิ่มขึ้นโดยไม่เชื่อมต่อหรือดัดแปลงเครื่องอ่านดั้งเดิม



3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเครื่องอ่าน RFID การออกแบบและ วิเคราะห์โครงสร้างอภิวัดคุณิควงแหวนกำหนดแบบแยกด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของโครงสร้างอภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่าน RFID ที่ความถี่ใช้งาน 910 MHz (Bandwidth: 860 -960 MHz) โดยมีเป้าหมายหลัก คือ ต้องไม่มีการดัดแปลงหรือเชื่อมต่อกับสายอากาศของเครื่องอ่านต้นฉบับ ในขั้นตอนแรกได้ทำการทดสอบเครื่องอ่าน RFID ต้นฉบับและจำลองผลของสายอากาศเครื่องอ่าน RFID จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างอภิวัดจากโครงสร้างวงแหวนกำหนดแบบแยก แล้วนำมาทำการจัดวางเป็นแถวลำดับ

เพื่อให้ได้อัตรายขายที่มากขึ้นและได้นำโครงสร้างอภิวัดคุมาวางด้านหน้าเครื่องอ่าน RFID ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอ่าน RFID ต้นฉบับ

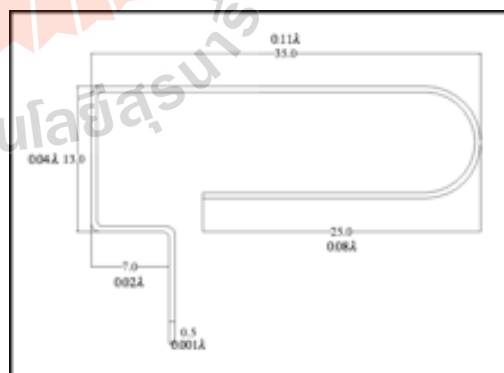
3.2 จำลองผลของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

Microwave studio 2016

เครื่องอ่าน UHF RFID ที่เลือกมา ภายในประกอบด้วยสายอากาศเส้นลวดประเภท Folded monopole กับแผงวงจรไฟฟ้าขนาด 60x85 มิลลิเมตร สายอากาศทำจากลวดอลูมิเนียมรัศมีขนาด 0.5 มิลลิเมตร ทำงานในช่วงความถี่ 860 – 960 MHz ซึ่งเป็นความถี่ใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งของประเทศไทย ดังแสดงรูปที่ 3.1



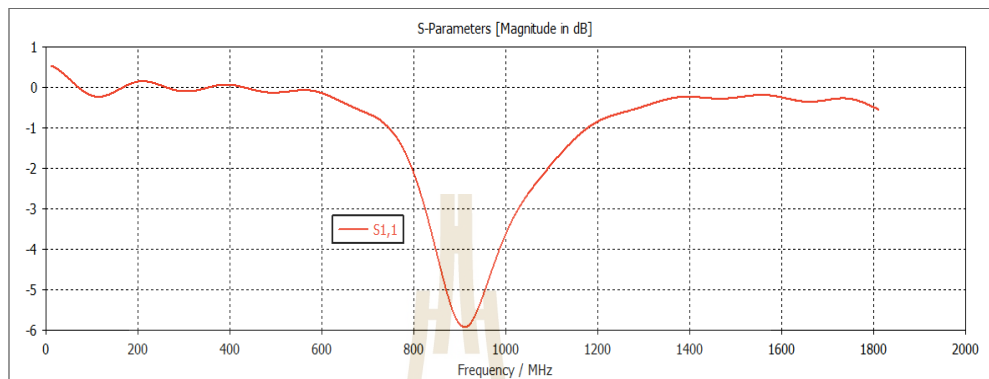
(a) โครงสร้างโดยรวมภายในเครื่องอ่าน



(b) สายอากาศของเครื่องอ่าน

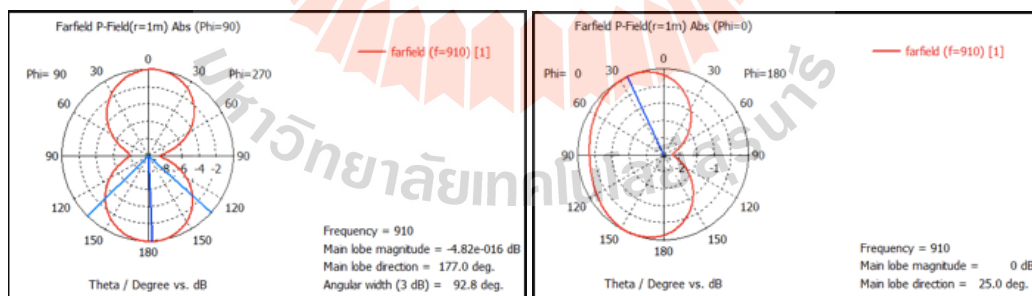
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภายในของเครื่องอ่าน UHF RFID

ทำการจำลองสายอากาศเครื่องอ่าน โดยใช้โปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศต้นฉบับ โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้จากการจำลองผล



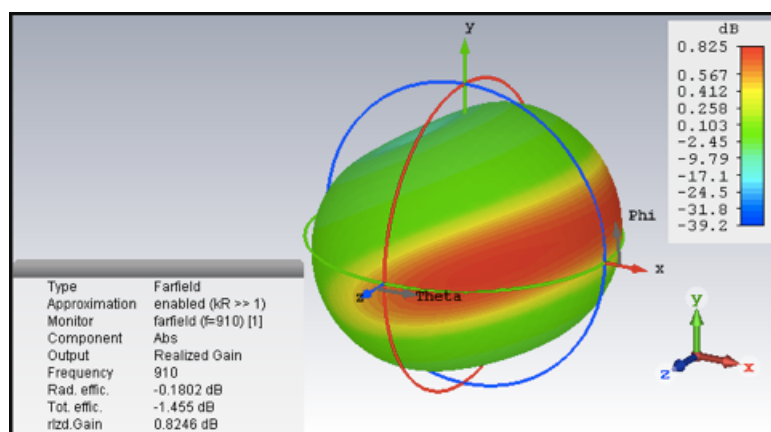
รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ

จากรูปที่ 3.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้มีค่า -5.945 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 910 MHz ตรงตามคุณสมบัติความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องอ่าน UHF RFID



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



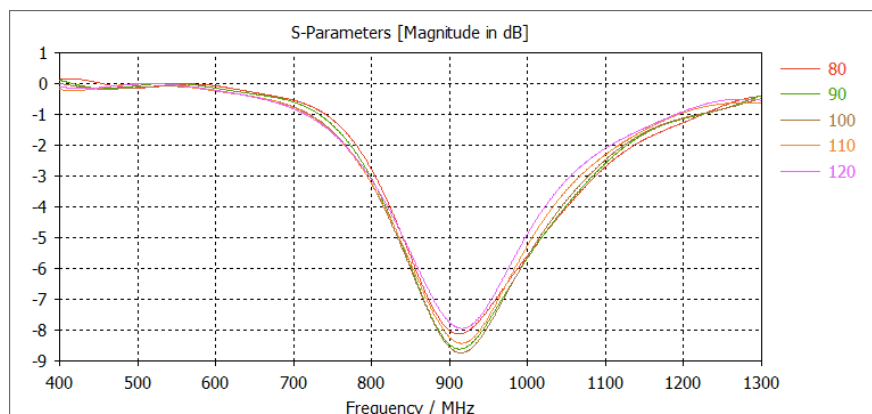
(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

รูปที่ 3.3 แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ

จากรูปที่ 3.3 พบว่าแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้มีแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบเดียวและมีอัตราขยายอยู่ที่ 0.825 dB จากนั้นจึงทำการเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลังเครื่องอ่านเพื่อปรับทิศทางการแผ่กำลังให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการอ่านแท็กจากด้านหน้าเพียงด้านเดียวและเป็นการปรับขนาดของลำคลื่นหลัก (main beam) ให้แคบลงเพื่อลดขนาดของแฉกลำดับ SRR ไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไป โดยแผ่นสะท้อนดังกล่าวเป็นแผ่นอลูมิเนียมขนาด 250x200 มิลลิเมตร

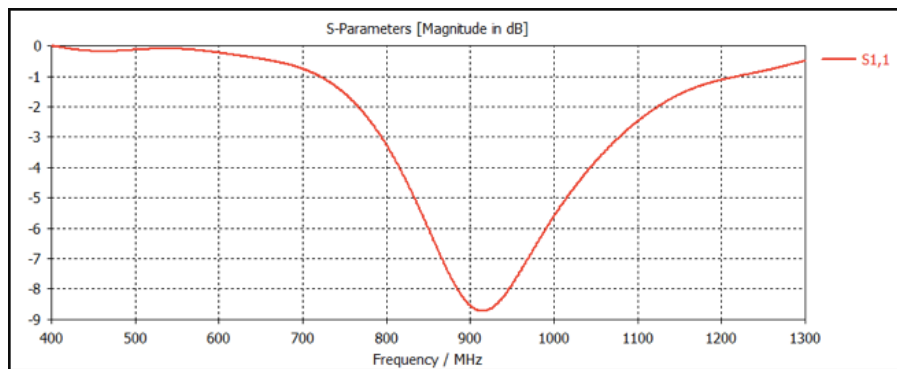
3.2.1 ปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อน

ทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อน แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อหาระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนให้เหมาะสมสำหรับความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังให้ใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด



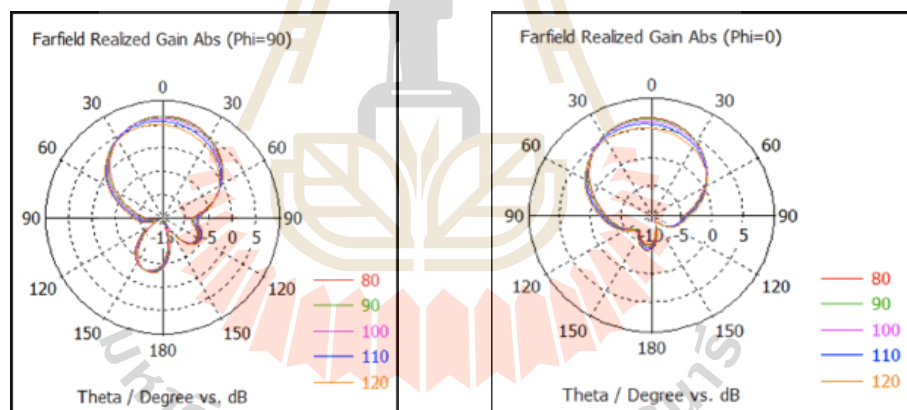
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 3.4 เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID และแผ่นสะท้อน ห่างกันครั้งละ 10 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์นั้นสูงขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับลดลง แต่เมื่อถึงระยะหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความถี่เรโซแนนซ์ จะเห็นว่าที่ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 100 มิลลิเมตรจะมีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเหมาะสมกับความต้องการมากที่สุด จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 100 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 913.9 MHz เท่ากับ -8.7293 dB ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากที่สุดในการเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องอ่านคั่นฉบับและแผ่นสะท้อนที่ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร

จากนั้นทำการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.6



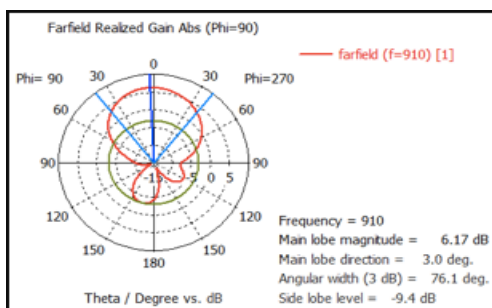
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

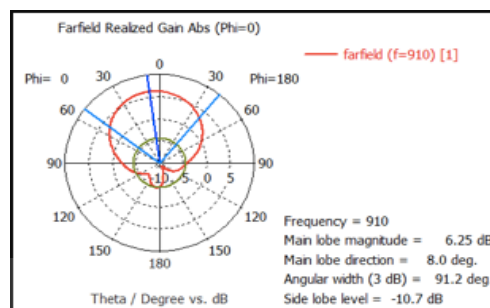
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนแล้ว แบบรูปการแผ่กำลังของทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีรูปร่างที่ค่อนข้างสมมาตรกันและมีขนาดของความกว้างครึ่งกำลัง (half-power beamwidth:HPBW) ที่ใกล้เคียงกัน (76.1 และ 91.2 องศา) เมื่อเลือกใช้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 100 มิลลิเมตร จะได้อัตราขยายเท่ากับ

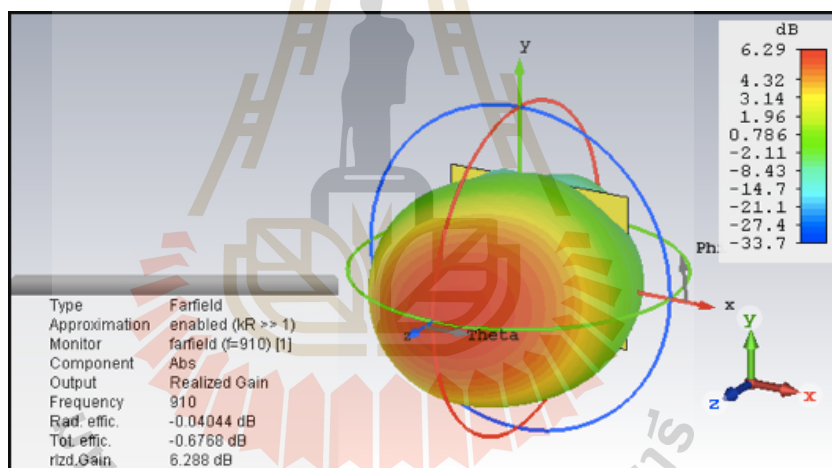
6.29 dB และมีอัตราส่วนของอัตราขยายสูงสุดในทิศทางด้านหน้าเทียบกับอัตราขยายในทิศทางด้านหลังสายอากาศ (Front to back ratio: F/B Ratio) เท่ากับ 9.388 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.7



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก



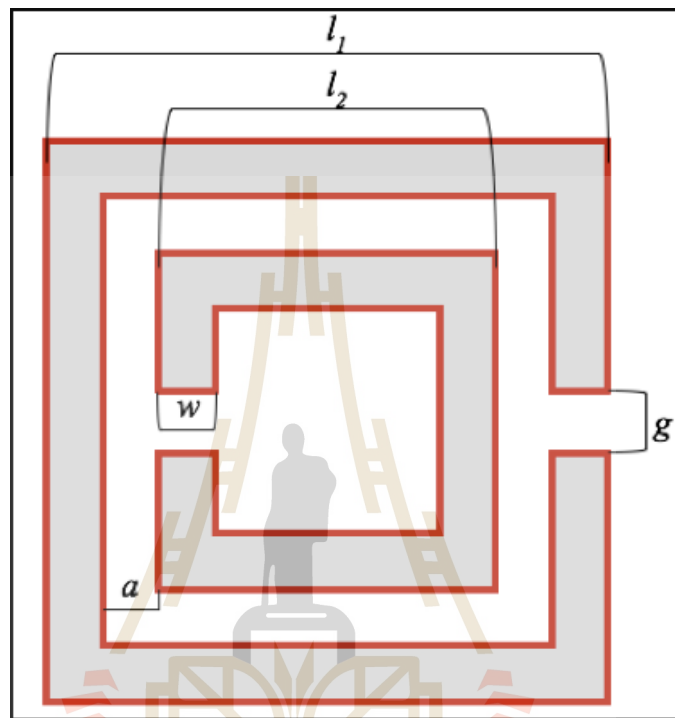
(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กำลังเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน เท่ากับ 100 มิลลิเมตร

3.3 ออกแบบและจำลองผลของโครงสร้างอภิวัดคุณิวดวงแหวนกำทอนแบบแยกด้วย

โปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2016

โครงสร้างพื้นฐานของวงแหวนกำทอนแบบแยกและพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างพื้นฐานของวงแหวนกำทอนแบบแยก

โดยที่	l_1	คือ	ความยาววงนอก หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
	l_2	คือ	ความยาววงใน หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
	g	คือ	ความกว้างช่องเปิด หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
	w	คือ	ความกว้างวงแหวน หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
	a	คือ	ระยะห่างระหว่างวงนอกกับวงใน หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-1) ถึง (3-2)

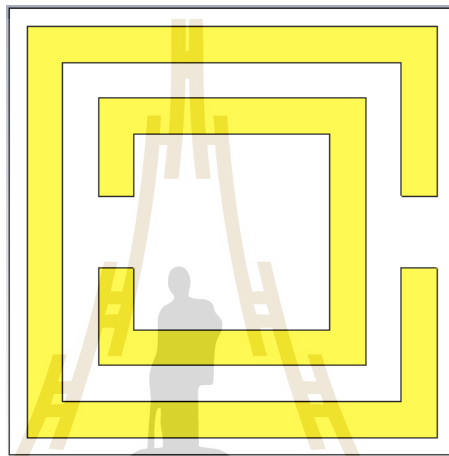
$$L = \lambda / 2 \quad (3-1)$$

$$L = 4l_1 - g - 4w \quad (3-2)$$

เมื่อค่าความยาวคลื่น คือ 164.84 มิลลิเมตร และกำหนดค่า $g = 1$, $w = 2$ แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (3-2) ทำให้ได้ค่า l มีค่าประมาณ 44 มิลลิเมตร และพิมพ์โครงสร้างวงแหวนกำทอนทั้งสองด้านของแผ่นไดอิเล็กทริก เนื่องจากช่วงว่างภายในวงแหวนจะช่วยให้ได้โครงสร้างเรโซแนนซ์ที่มีขนาดเล็กกว่าหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นสำหรับวงแหวนที่ไม่ได้แยก

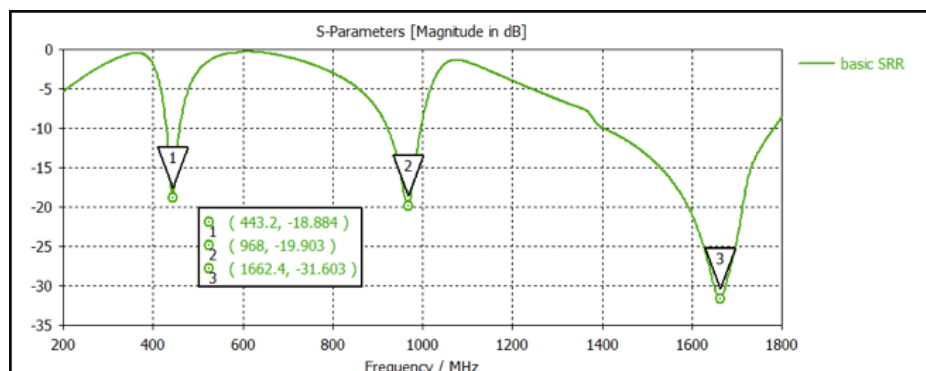
3.3.1 การปรับรูปแบบโครงสร้างของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปแบบต่างๆ

1) วงแหวนกำทอนแบบแยกพื้นฐาน (Basic split ring resonator)



รูปที่ 3.9 แสดงรูปแบบของวงแหวนกำทอนแบบแยกพื้นฐาน

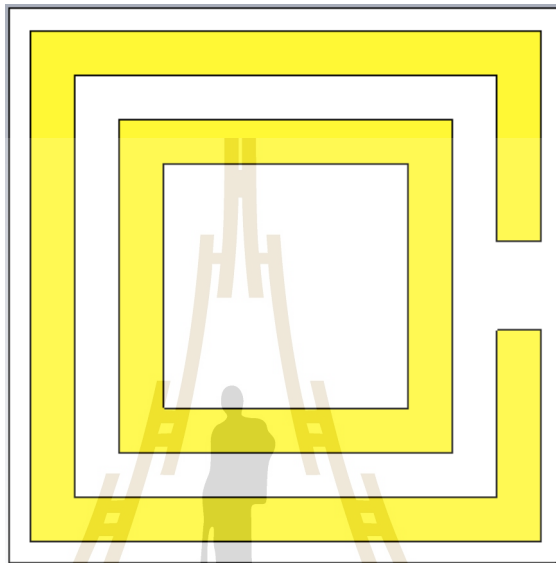
จากวงแหวนกำทอนแบบแยกพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมาทำการจำลองแล้ววิเคราะห์ผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำทอนแบบแยกพื้นฐาน

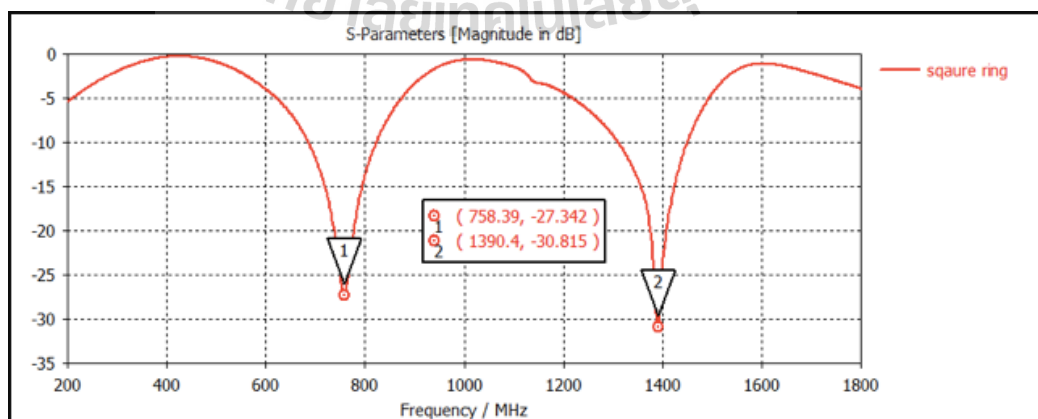
จากการจำลองพบว่าโครงสร้างวงแหวนำทอนแบบแยกพื้นฐาน มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ - 18.884 dB, - 19.903 dB และ - 31.603 dB ที่ความถี่ 443.2 MHz, 968 MHz และ 1662.4 MHz ตามลำดับ ซึ่งผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ยังไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

2) วงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม (Square ring resonator)



รูปที่ 3.11 แสดงรูปแบบของวงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม

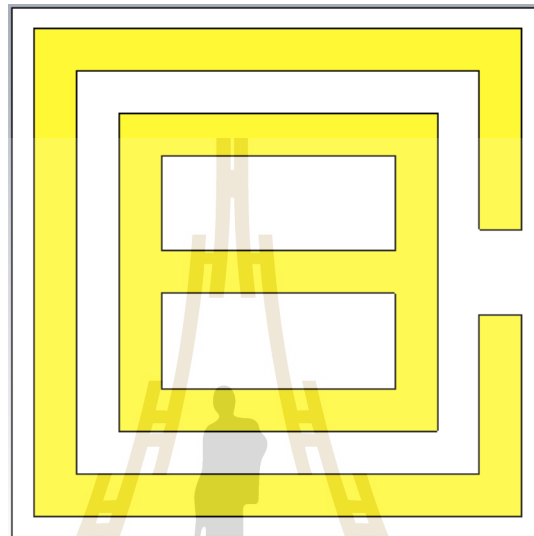
ปรับให้วงเป็นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมเต็มวงและขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่าเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.11 แล้วทำการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม

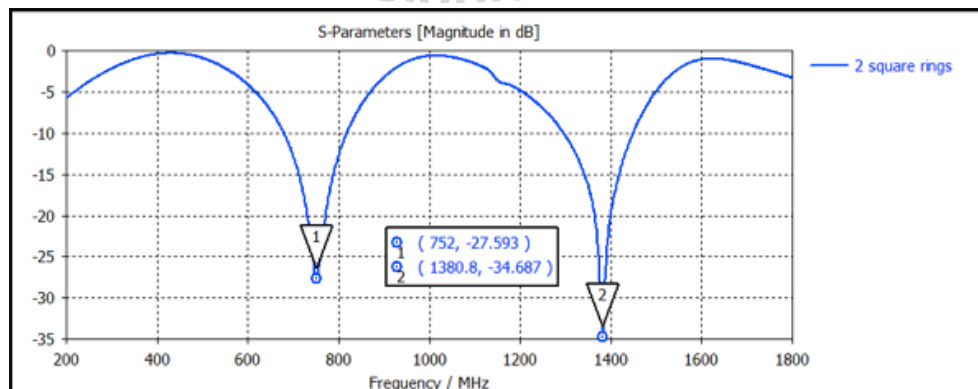
จากการจำลองพบว่าโครงสร้างวงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยม มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -27.342 dB และ -30.815 dB ที่ความถี่ 758.29 MHz และ 1390.40 MHz ตามลำดับ ซึ่งผลของความถี่เรโซแนนท์ที่ได้ยังไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

3) วงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป)2 square ring resonator(



รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบของวงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป

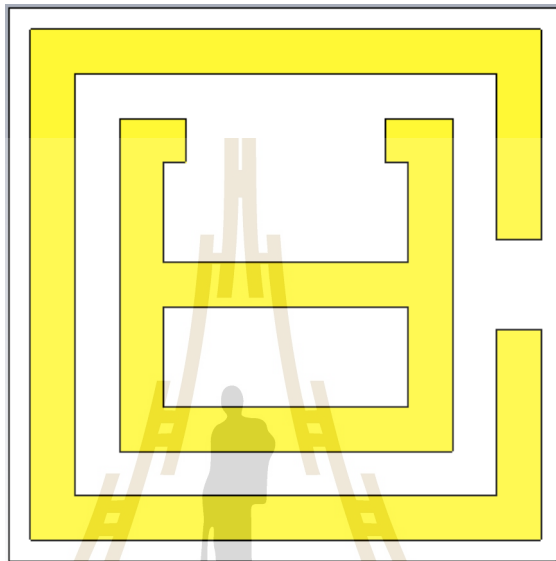
ปรับให้วงในเป็นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมเต็มวง 2 วงและขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่าเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.13 แล้วทำการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป

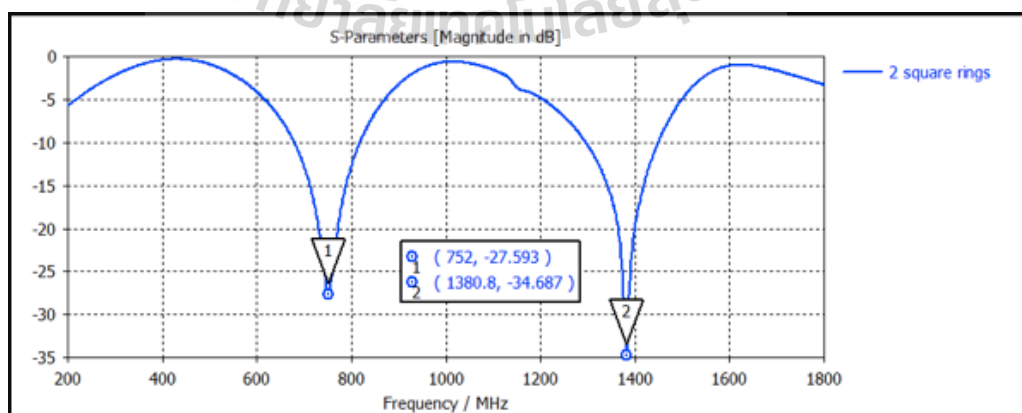
จากการจำลองพบว่าโครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยกแบบสี่เหลี่ยมสองรูป มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -27.593 dB และ -34.687 dB ที่ความถี่ 752 MHz และ 1380.80 MHz ตามลำดับ ซึ่งผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ยังไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

4) วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ)A-shaped SRR(



รูปที่ 3.15 แสดงรูปแบบของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ

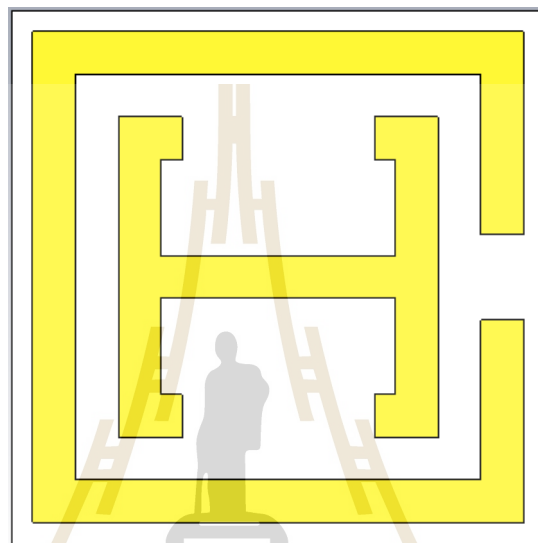
ปรับให้วงในเป็นรูปตัว A คว่ำและขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่าเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.15 แล้วทำการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ

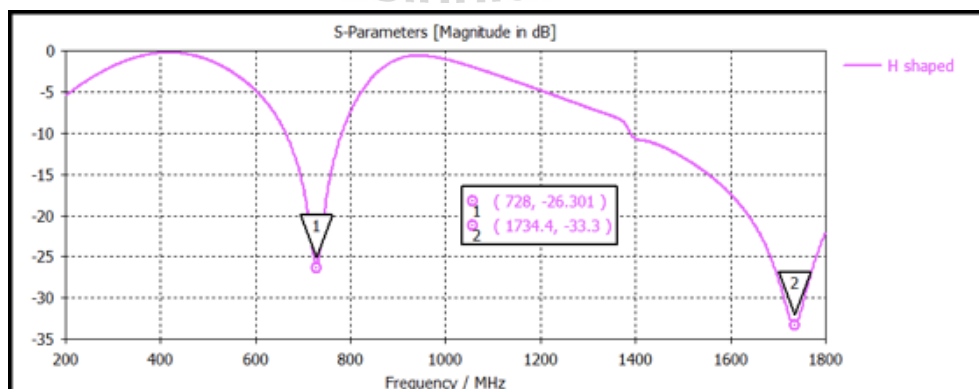
จากผลการจำลองพบว่าโครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -22.968 dB, -20.894 dB และ -28.206 dB ที่ความถี่ 651.2 MHz, 910.4 MHz และ 1520 MHz ตามลำดับ ซึ่งผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ยังไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ เนื่องจากมีความถี่อื่นนอกจากความถี่ที่ต้องการเกิดขึ้นด้วย

5) วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช H-shaped SRR(



รูปที่ 3.17 แสดงรูปแบบของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช

ปรับให้วงในเป็นรูปตัว H และขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เท่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.17 แล้วทำการจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.18

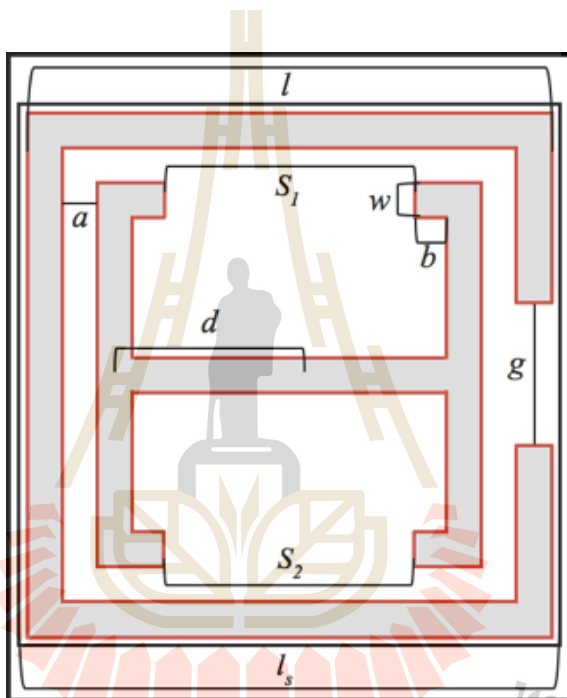


รูปที่ 3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช

จากผลการจำลองพบว่าโครงสร้างวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -26.301 dB และ -33.3 dB ที่ความถี่ 728 MHz และ 1734.4 MHz ตามลำดับ ซึ่งผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ยังไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

3.3.2 วงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอชและการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์

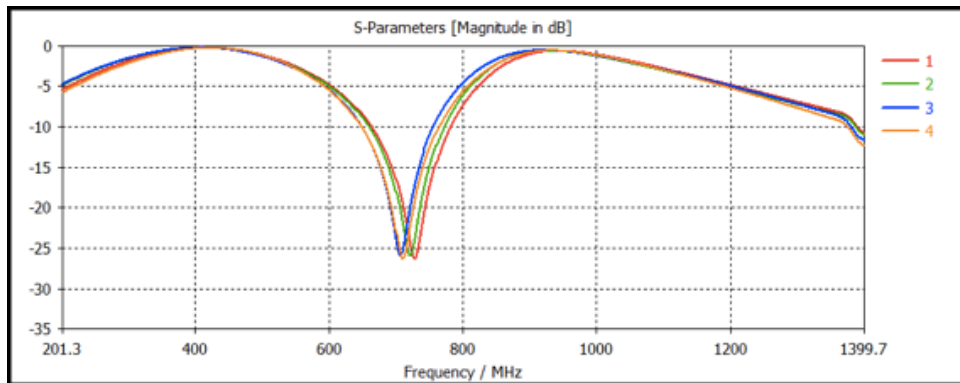
เลือกพิจารณาและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงตามความต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.19 โครงสร้างของวงแหวนกำทอนแบบแยกรูปตัวเอช

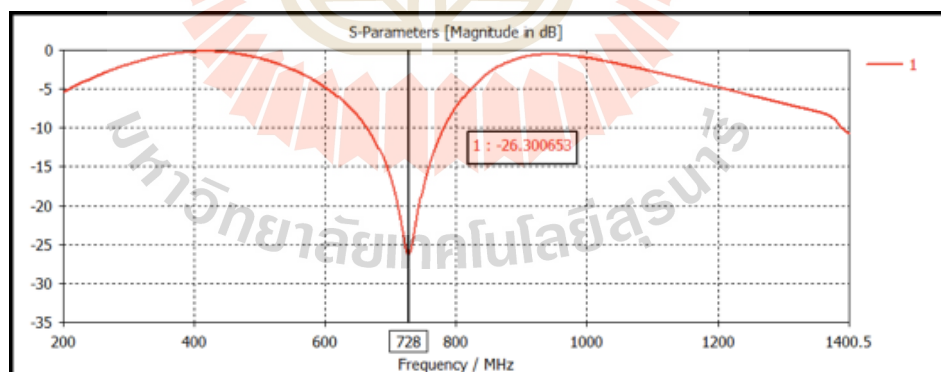
1) ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ b

ทำการปรับความยาวแขนของตัวเอช (b) แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ให้ใกล้เคียงตามความต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ b

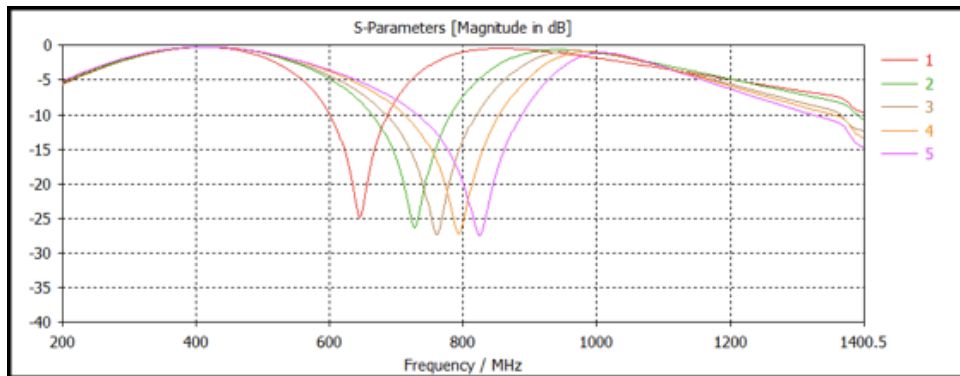
จากรูปที่ 3.20 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ b แต่ละช่วงห่างกัน 1 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะของค่าพารามิเตอร์ b ให้มากขึ้น ความถี่เรโซแนนซ์และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะน้อยลง จะเห็นได้ว่าที่ระยะของค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตร จะมีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความต้องการมากกว่าค่าอื่นและเมื่อเลือกใช้ระยะของค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตร จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -26.301 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 728 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตร

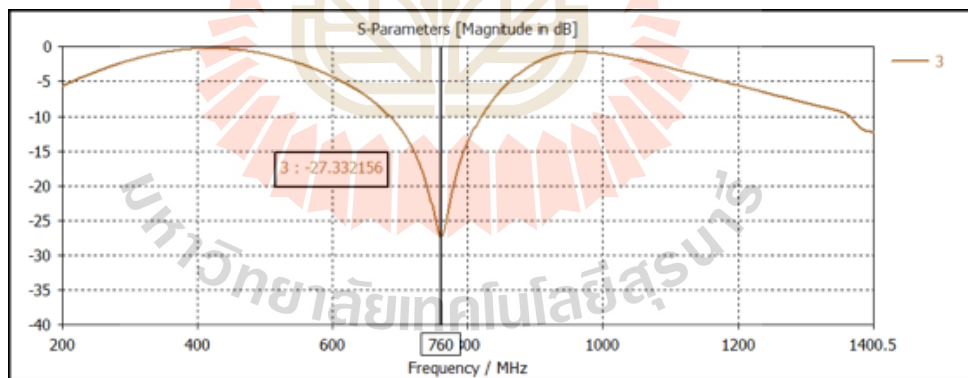
2) ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ a

ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตรแล้ว ทำการปรับระยะห่างระหว่างวงนอกกับวงใน (a) แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงตามความต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.22 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ a

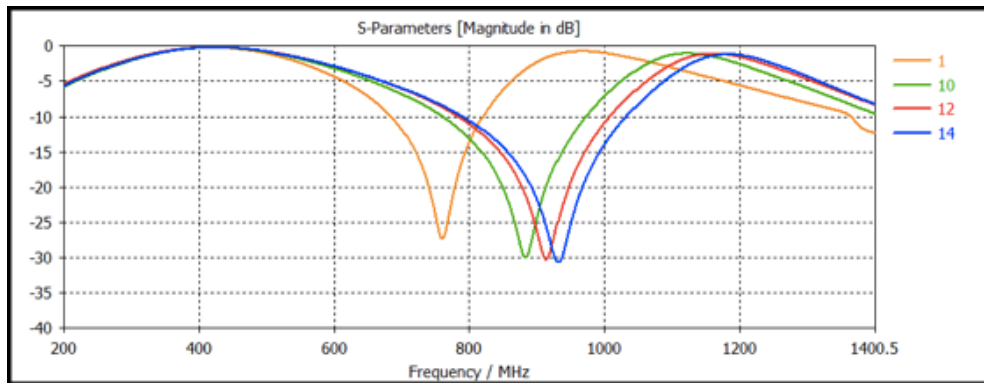
จากรูปที่ 3.22 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ a แต่ละช่วงครึ่งละ 1 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะของค่าพารามิเตอร์ a ให้มากขึ้น ความถี่เรโซแนนท์สูงขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะน้อยลง เมื่อเลือกใช้ระยะของค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3 มิลลิเมตร จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -27.332 dB ที่ความถี่เรโซแนนท์ 760 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

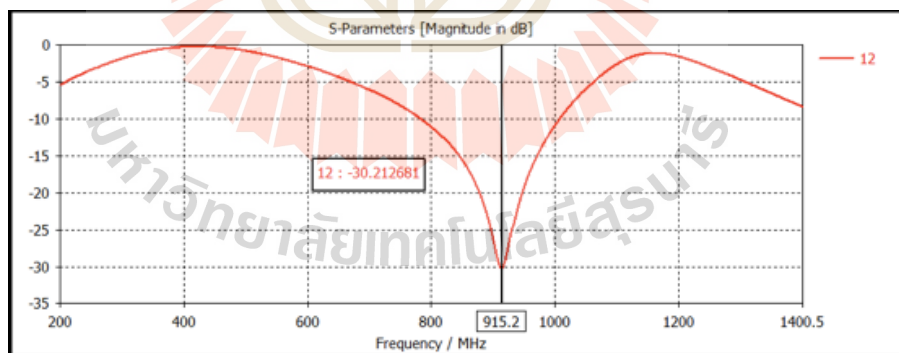
3) ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ g

ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตรและ a เท่ากับ 3 มิลลิเมตรแล้วทำการปรับระยะช่องว่างวงนอก (g) แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ความถี่เรโซแนนท์ให้ใกล้เคียงตามความต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ g

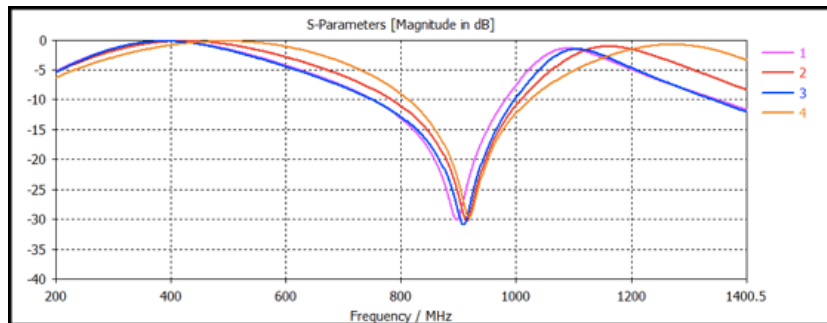
จากรูปที่ 3.24 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ g แต่ละช่วงครึ่งละ 2 มิลลิเมตร โดยเริ่มจาก 10 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะของค่าพารามิเตอร์ a ให้มากขึ้น ความถี่เรโซแนนท์สูงขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะน้อยลง จะเห็นได้ว่าที่ระยะของค่าพารามิเตอร์ g เท่ากับ 12 มิลลิเมตร จะมีความถี่เรโซแนนท์ใกล้เคียงกับความต้องการมากกว่าค่าอื่นและเมื่อเลือกใช้ระยะของค่าพารามิเตอร์ g เท่ากับ 12 มิลลิเมตรจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -30.213 dB ที่ความถี่เรโซแนนท์ 915.2 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ g เท่ากับ 12 มิลลิเมตร

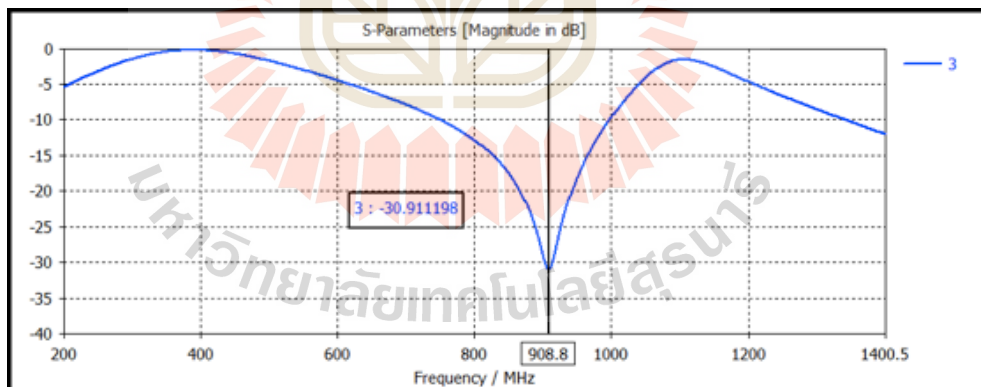
4) ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ w

ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ b เท่ากับ 1 มิลลิเมตร, a เท่ากับ 3 มิลลิเมตรและ g เท่ากับ 12 มิลลิเมตรแล้ว ทำการปรับขนาดความกว้างของเส้นทองแดง (w) แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ความถี่เรโซแนนท์ใกล้เคียงตามที่ต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ w

จากรูปที่ 3.26 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ w แต่ละช่วงห่างกัน 1 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะของค่าพารามิเตอร์ w ให้มากขึ้น ความถี่เรโซแนนท์สูงขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะน้อยลง จะเห็นได้ว่าที่ระยะของค่าพารามิเตอร์ w เท่ากับ 3 มิลลิเมตร จะมีความถี่เรโซแนนท์ใกล้เคียงกับความต้องการมากกว่าค่าอื่นและเมื่อเลือกใช้ระยะของค่าพารามิเตอร์ w เท่ากับ 12 มิลลิเมตร จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -30.911 dB ที่ความถี่เรโซแนนท์ 908.8 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อค่าพารามิเตอร์ w เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

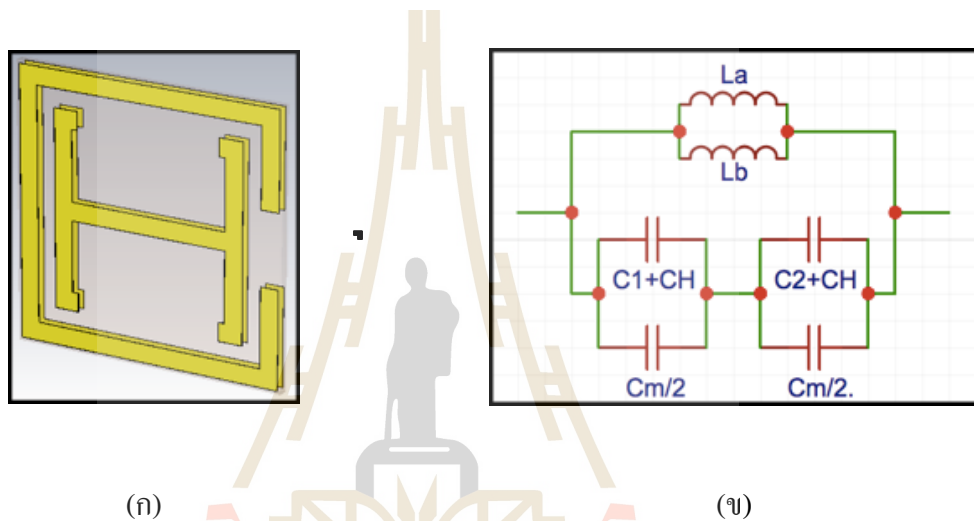
จากรูปที่ 3.27 จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ unit cell ที่มีความถี่เรโซแนนท์ตรงตามที่มีความถี่เรโซแนนท์ตรงตามความต้องการดังแสดงในตารางที่ 3.1 เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปเรียงเป็นแถวลำดับ วิเคราะห์และสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลัง เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ unit cell ที่เหมาะสมตามต้องการ (หน่วย : มิลลิเมตร)

l_s	l	S_1	S_2	a	b	d	g	w
45	44	30	30	3	1	16.5	12	3

3.3.3 วงจรสมมูลของวงแหวนกำทอนแบบแยก

หลังจากได้โครงสร้างอภิวัดต้นแบบแล้ว จะใช้พื้นฐานวงจรสมมูลเพื่อยืนยันโครงสร้างอภิวัดที่ได้จากการจำลองว่ามีความถี่ใช้งานใกล้เคียงกันหรือไม่ดังแสดงในรูปที่ 3.28

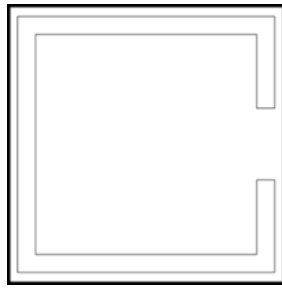


รูปที่ 3.28 ภาพวาดและวงจรสมมูลของเซลล์หนึ่งหน่วยของ SRR ที่ได้นำเสนอ

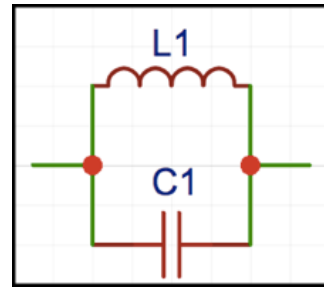
1) วงจรสมมูลของ SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square-shaped SRR)

เริ่มพิจารณาจาก SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square-shaped SRR) ดังแสดงใน

รูปที่ 3.24



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.29 ภาพวาดและวงจรสมมูลของ SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3-3) ถึง (3-4)

$$L_1 = L_2 = 0.2\mu_0 \left(-\frac{w}{2} \sinh^{-1} 1 + \frac{w}{2} \sqrt{2} + \left(l - \frac{w}{2} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{l - \frac{w}{2}}{\frac{w}{2}} \right) - \sqrt{\left(l - \frac{w}{2} \right)^2 + \left(\frac{w}{2} \right)^2} \right) \quad (3-3)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{g} \quad (3-4)$$

โดยที่

μ_0	คือ	ค่าความซึมทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
w	คือ	ขนาดความกว้างของเส้นทองแดง หน่วยเป็น เมตร (m)
l	คือ	ความกว้างของโครงสร้าง SRR unit cell
ϵ_0	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ
ϵ_r	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์
g	คือ	ช่องว่างของวงนอก หน่วยเป็น เมตร (m)

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการจำลองแทนลงในสมการที่ (3-3) – (3-4) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของ Square-shaped SRRs จะได้ว่า

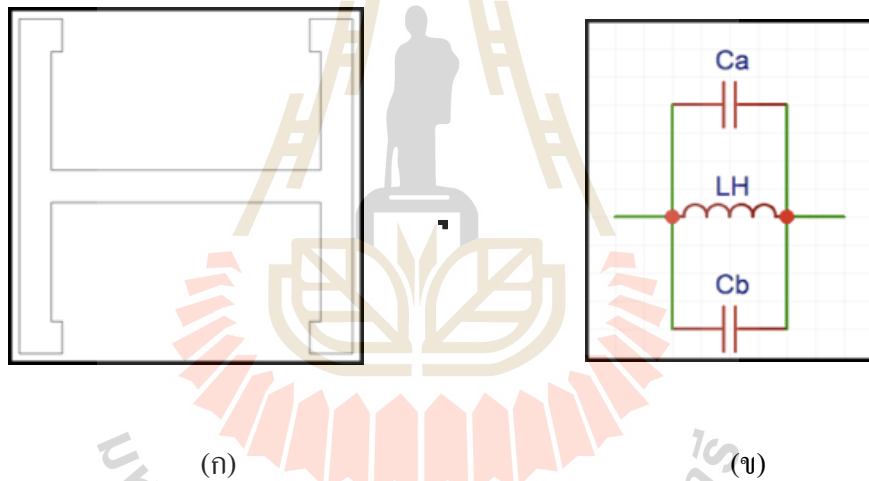
$$L_1 = L_2 = 0.2 \left(1.256 \times 10^{-6} \right) \left(-\frac{3 \times 10^{-3}}{2} \sinh^{-1} + \frac{3 \times 10^{-3}}{2} \sqrt{2} + \left((44 \times 10^{-3}) - \frac{3 \times 10^{-3}}{2} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{(44 \times 10^{-3}) - \frac{3 \times 10^{-3}}{2}}{\frac{3 \times 10^{-3}}{2}} \right) - \sqrt{\left((44 \times 10^{-3}) - \frac{3 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 + \left(\frac{3 \times 10^{-3}}{2} \right)^2} \right)$$

$$= 3.2624 \times 10^{-8} H.$$

$$C_1 = C_2 = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 4.4 \times 3 \times 10^{-3} \times 44 \times 10^{-3}}{12 \times 10^{-3}} = 4.2853 \times 10^{-3} F.$$

2) วงจรสมมูลของ SRR รูปตัวเอช (H-shaped SRR)

พิจารณาจาก SRR รูปตัวเอช (H-shaped SRR) ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ภาพวาดและวงจรสมมูลของ SRR รูปตัวเอช

จากรูปที่ 3.30 สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3-5) ถึง (3-7)

$$L_H = \mu_0 d \left[\log \left(\frac{2d}{w} \right) + 0.9 + 0.2 \left(\frac{w}{2d} \right)^2 \right] \quad (3-5)$$

$$C_a = C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w l}{s} \quad (3-6)$$

$$C_H = C_a + C_b \quad (3-7)$$

โดยที่

- d คือ ระยะจุดกึ่งกลางถึงแขนของ H-shaped
 s คือ ช่องว่างระหว่างแขนทั้งสองของ H-shaped

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการจำลองแทนลงในสมการที่ (3-5) – (3-7) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของ H-shaped SRRs จะได้ว่า

$$L_H = (1.256 \times 10^{-6} \times 16.5 \times 10^{-3}) \left[\log \left(\frac{2 \times 16.5 \times 10^{-3}}{3 \times 10^{-3}} \right) + 0.9 + 0.2 \left(\frac{3 \times 10^{-3}}{2 \times 16.5 \times 10^{-3}} \right)^2 \right]$$

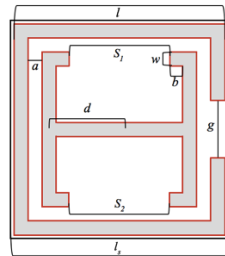
$$= 9.01128 \times 10^{-3} H.$$

$$C_a = C_b = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 4.4 \times 3 \times 10^{-3} \times 44 \times 10^{-3}}{30 \times 10^{-3}} = 1.7141 \times 10^{-13} F.$$

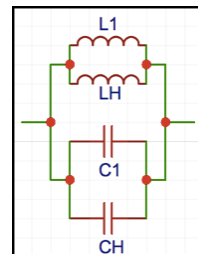
$$C_H = 2 \times 1.7141 \times 10^{-13} = 3.4282 \times 10^{-13} F.$$

- 3) วงจรสมมูลของ SRR วงจรเดี่ยวที่สร้างจาก SRR รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและ SRR รูปตัวเอช

พิจารณาจากต้นแบบอภิวัดเพียงด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.31



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.31 ภาพวาดและวงจรสมมูลของต้นแบบอภิวัดเพียงด้านเดียว

จากรูปที่ 3.31 สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3-8) ถึง (3-9)

$$L_a = L_b = L_I L_H / (L_I + L_H) \quad (3-8)$$

$$C_i = C_I + C_H \quad (3-9)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ (3-8) – (3-9) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของต้นแบบอวัยวะเพียงด้านเดียว จะได้ว่า

$$L_a = L_b = \frac{3.2624 \times 10^{-8} \times 9.01128 \times 10^{-9}}{(3.2624 \times 10^{-8}) + (9.01128 \times 10^{-9})} = 9.3905 \times 10^{-9} \text{ H}.$$

$$C_i = (4.2853 \times 10^{-13}) + (3.4282 \times 10^{-13}) = 7.7135 \times 10^{-13} \text{ F}.$$

4) วงจรสมมูลของต้นแบบโครงสร้างอวัยวะ

พิจารณาจากต้นแบบอวัยวะ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จะสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำรวม ค่าตัวเก็บประจุรวมและค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรได้จากสมการที่ (3-10) ถึง (3-15)

$$C_m / 2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (4l - g)}{2h} \quad (3-10)$$

$$L_T = L_a L_b / (L_a + L_b) \quad (3-11)$$

$$C_c = C_I + C_H + C_m / 2 \quad (3-12)$$

$$C_d = C_2 + C_H + C_m / 2 \quad (3-13)$$

$$C_T = C_c C_d / (C_c + C_d) \quad (3-14)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}} \quad (3-15)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ (3-10) – (3-15) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและค่าความถี่เรโซแนนซ์ของต้นแบบโครงสร้างอภิวัดดู จะได้ว่า

$$C_m/2 = \frac{(8.854 \times 10^{-12} \times 4.4 \times 3 \times 10^{-3})((4 \times 44 \times 10^{-3}) - (12 \times 10^{-3}))}{2 \times 1.6 \times 10^{-3}} = 5.9898 \times 10^{-12} F.$$

$$C_c = C_d = 6.7612 \times 10^{-12} F.$$

$$L_T = L_A L_B / (L_A + L_B) = 4.6953 \times 10^{-9} H.$$

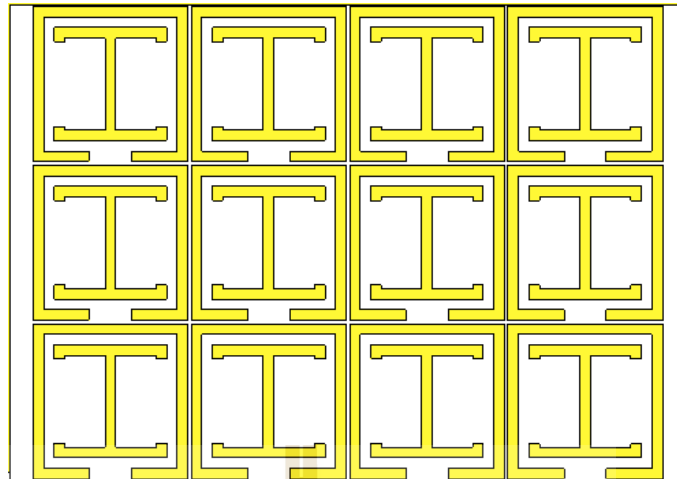
$$C_T = C_C C_D / (C_C + C_D) = 3.3806 \times 10^{-12} F.$$

$$f_0 = (2\pi\sqrt{L_T C_T})^{-1} = 911.863 \text{ MHz}.$$

จากสมการการคำนวณที่กล่าวมาจะเห็นว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างอภิวัดดูที่ได้จากการคำนวณคือ 911.863 MHz และจากการจำลองคือ 910 MHz จะมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 0.204%

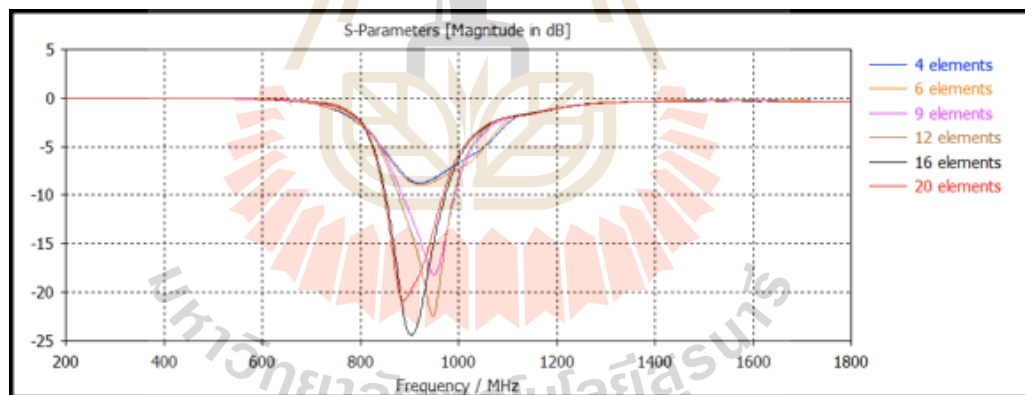
3.4 การออกแบบและจำลองผลโครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave studio 2016

เมื่อได้ต้นแบบของโครงสร้างอภิวัดดูชนิดวงแหวนกำหนดแบบแยกดังแสดงในรูปที่ 3.32 แล้วนำมาวางหน้าเครื่องอ่าน UHF RFID เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอ่าน จึงใช้โครงสร้างแบบแถวลำดับในการเพิ่มระยะการอ่านแท็กและประสิทธิภาพอื่น ๆ ของเครื่องอ่าน โดยไม่มีการเชื่อมต่อหรือเพิ่มวงจรใดให้กับสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ที่ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร

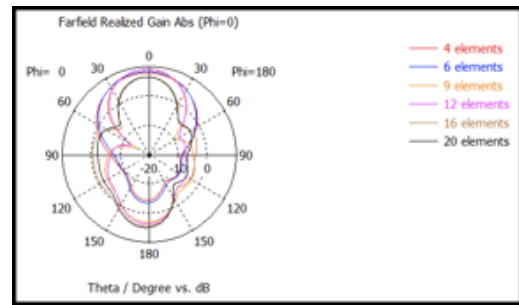
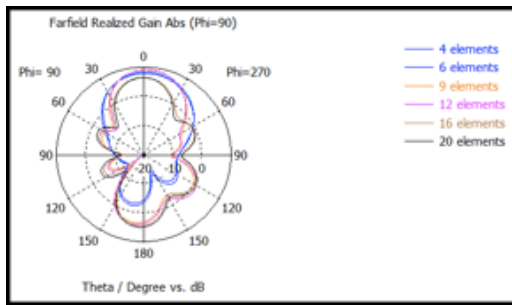


รูปที่ 3.32 โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

จากนั้นทำการจำลองแล้ววิเคราะห์ผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

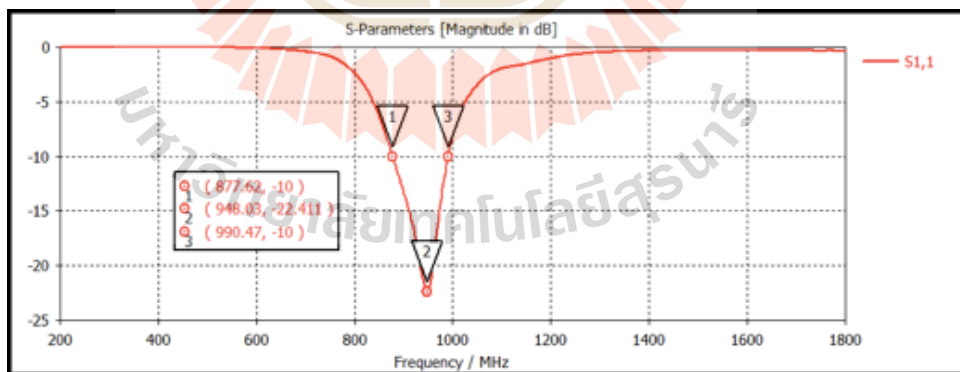


(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

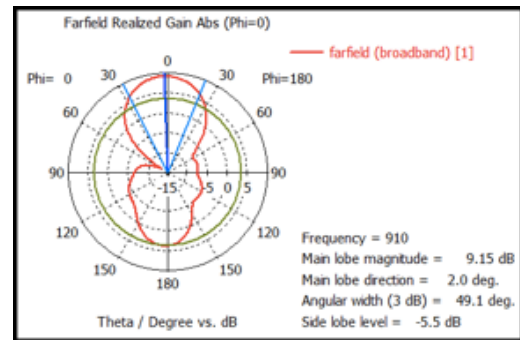
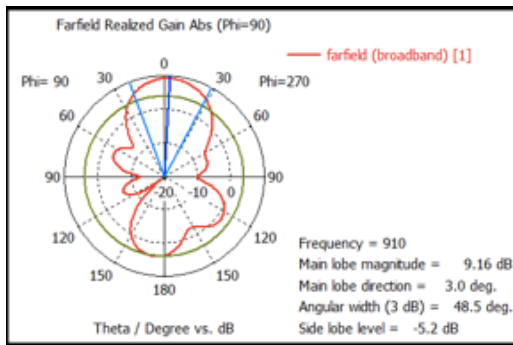
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลัง โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

จากรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 จะพบว่าเมื่อเพิ่มโครงสร้างแถวลำดับมากขึ้นจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและค่าความถี่เรโซแนนซ์มีค่าน้อยลง แบบรูปการแผ่กำลังในระบายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังลดลง โดยที่มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งแล้วจะลดลง จึงเลือกใช้จำนวนแถวลำดับของโครงสร้างอภิวัดเท่ากับ $m \times n = 3 \times 4$ อิเล็กเมนต์ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -22.411 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 948.03 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 9.18 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36

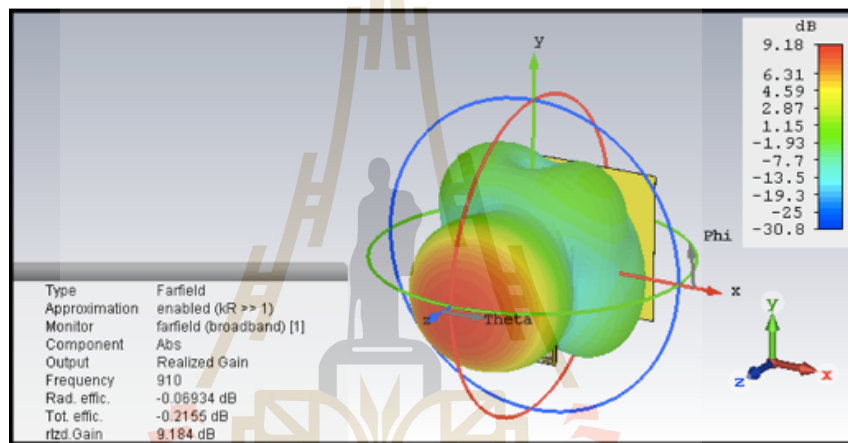


รูปที่ 3.35 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของโครงสร้างอภิวัดแถวลำดับจำนวน 12 อิเล็กเมนต์



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



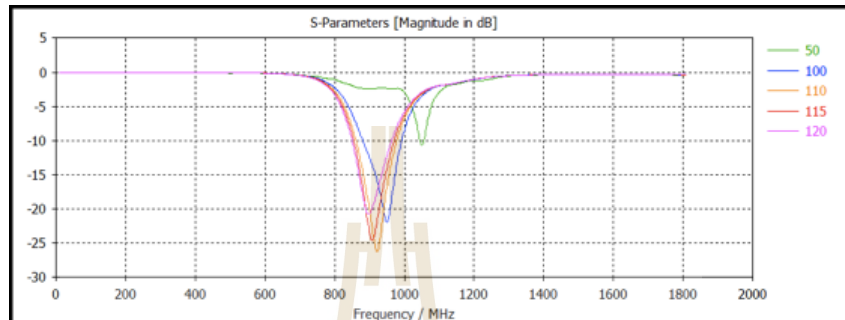
(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

รูปที่ 3.36 แบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอภิวัดดูแถวลำดับจำนวน 12 อิลิเมนต์

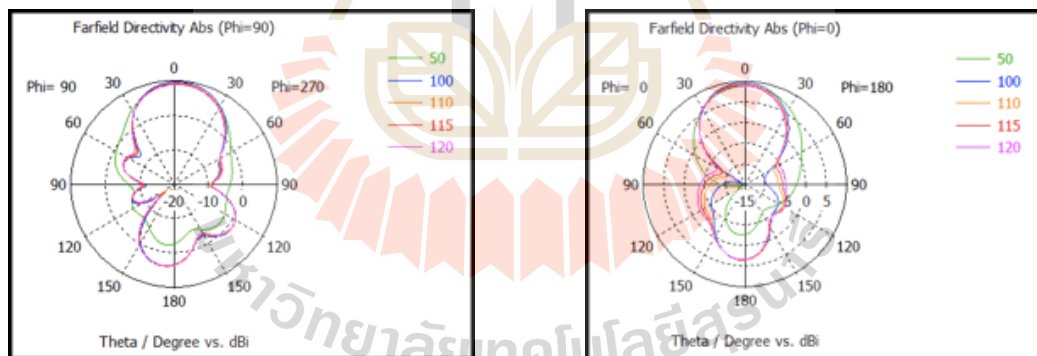
จากรูปที่ 3.35 จะพบว่าที่ความถี่ 948.03 GHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ 22.411 dB ซึ่งผลจากการจำลองนั้นยังไม่ตรงกับความต้องการ จึงทำการปรับระยะห่างระหว่างโครงสร้างอภิวัดดูกับเครื่องอ่าน UHF RFID เพื่อวิเคราะห์และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและแบบรูปการแผ่กำลังต่อไป

3.4.1 ปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

ทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับจำนวน 3x4 อิลิเมนต์ แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อหาระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.37 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ



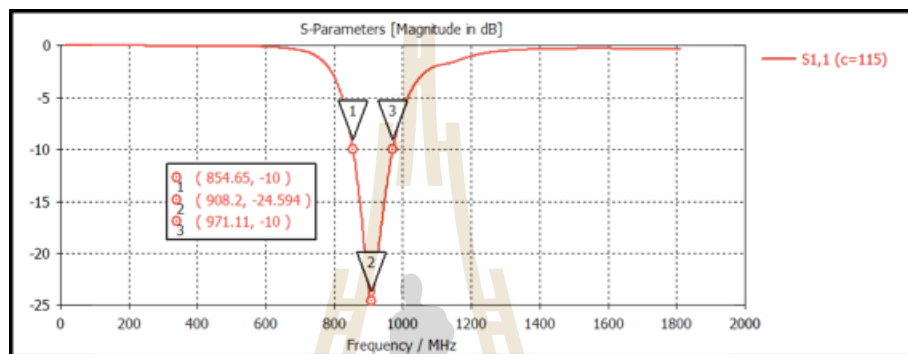
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

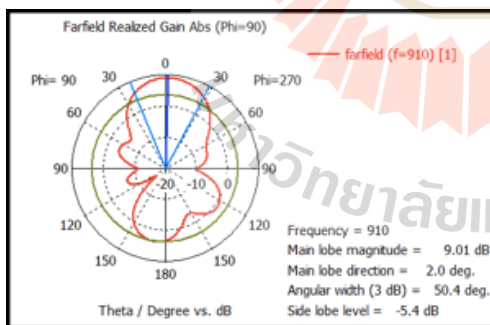
รูปที่ 3.38 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

จากรูปที่ 3.37 และ 3.38 จะพบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับเพิ่มขึ้นจะทำให้แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังลดลง และความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ลดลงด้วย โดยที่อัตราขยายที่ได้ลดลง

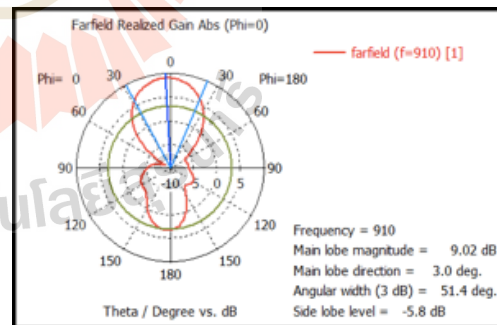
เล็กน้อย ซึ่งระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับที่เลือกใช้งานคือ 115 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 908.2 MHz เท่ากับ -24.594 dB และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 50.4 และ 51.4 องศาในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และอัตราขยายอยู่ที่ 9.03 dB และมีค่า F/B Ratio เท่ากับ 5.38 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40 เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์และค่าพารามิเตอร์อื่นตรงตามความต้องการ โดยสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการจำลองผลที่ได้ในตารางที่ 3.2



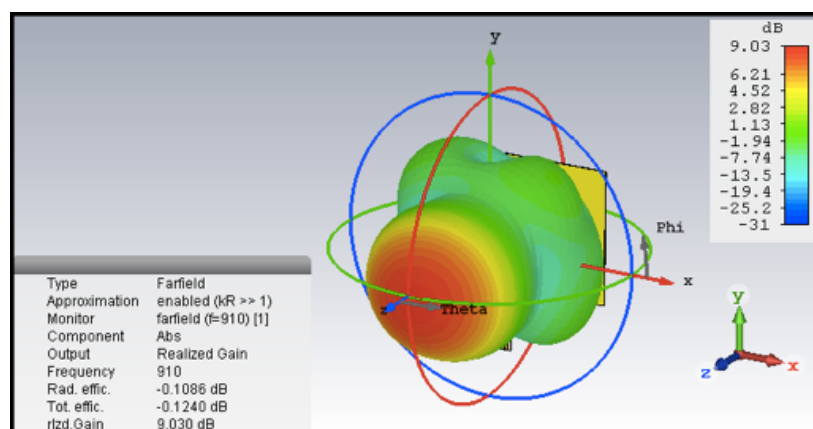
รูปที่ 3.39 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน กับโครงสร้างอภิวัด เท่ากับ 115 มิลลิเมตร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

รูปที่ 3.40 แบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอภิวัดดูแถวลำดับเมื่อระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่าน กับโครงสร้างอภิวัดดูเท่ากับ 115 มิลลิเมตร

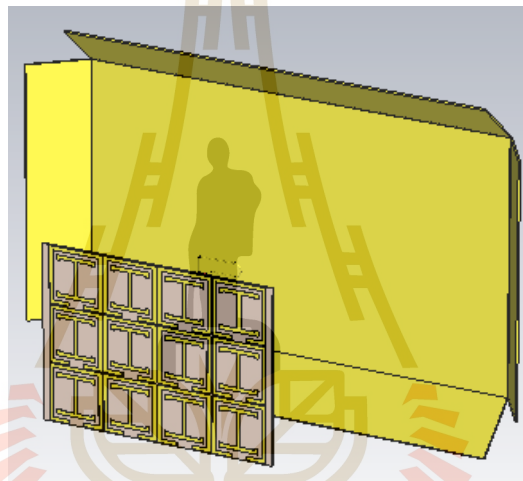
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มแผ่นสะท้อน และสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่ม โครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับ จากการจำลองผล

	Reader antenna	Reader + Reflector	Prototype
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	- 5.944 dB	- 8.713 dB	- 24.499 dB
ความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	-	-	854.65 – 971.11 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	-	-	63.46 MHz
อัตราขยาย	0.825 dB	6.29 dB	9.03 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	92.8 degree	76.1 degree	50.4 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	-	91.2 degree	51.4 degree
F/B Ratio	-	9.388 dB	5.38 dB
Total Efficiency	- 1.455 dB	- 0.6768 dB	- 0.1240 dB

3.5 ออกแบบและจำลองผลโครงสร้างอภิวัดดูแถวลำดับแบบที่สองด้วยโปรแกรม

จำลองสำเร็จรูป CST Microwave studio 2016

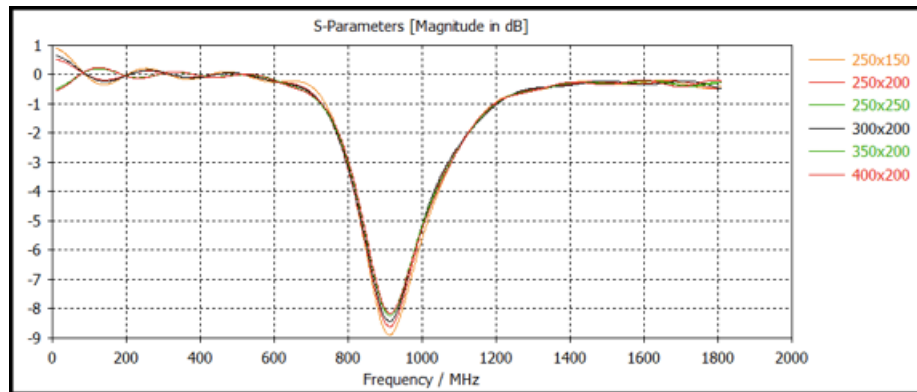
จากผลการจำลองข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40 จะเห็นว่าอัตราขยายเพิ่มมากขึ้น จากเครื่องอ่านต้นฉบับ แต่ก็ยังมีพู่หลัง (Back lobe) ของโครงสร้างอภิวัดดูต้นแบบอยู่ค่อนข้างมาก จึงได้ทำการออกแบบแผ่นสะท้อนแบบใหม่เพื่อลดความเข้มของพู่หลังของโครงสร้างอภิวัดดูต้นฉบับ โดยมีสมมุติฐานว่าจะสามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับโครงสร้างอภิวัดดูต้นแบบได้เพิ่มมากขึ้นอีก เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มมากขึ้น โดยแผ่นสะท้อนดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นอลูมิเนียมพับปิกสี่ด้านเพื่อบังคับทิศทางการแผ่คลื่นอีกทางหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.41



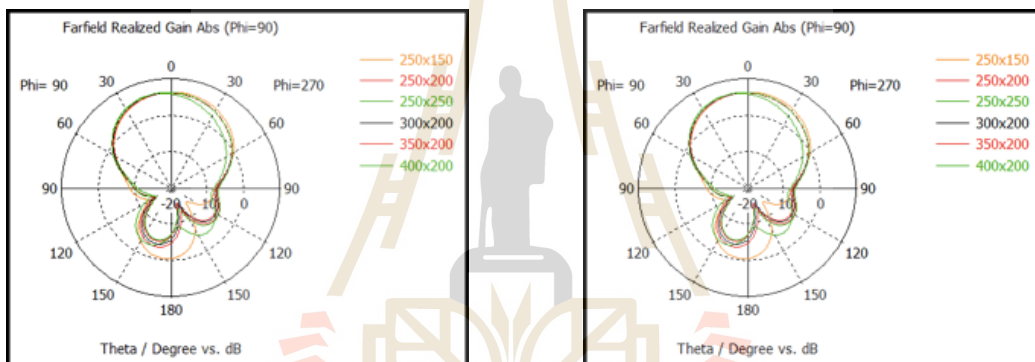
รูปที่ 3.41 การจำลองผลโครงสร้างอภิวัดดูแถวลำดับแบบที่สอง

3.5.1 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

ทำการปรับขนาดของแผ่นสะท้อน แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมสำหรับความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังให้ใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด



รูปที่ 3.42 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

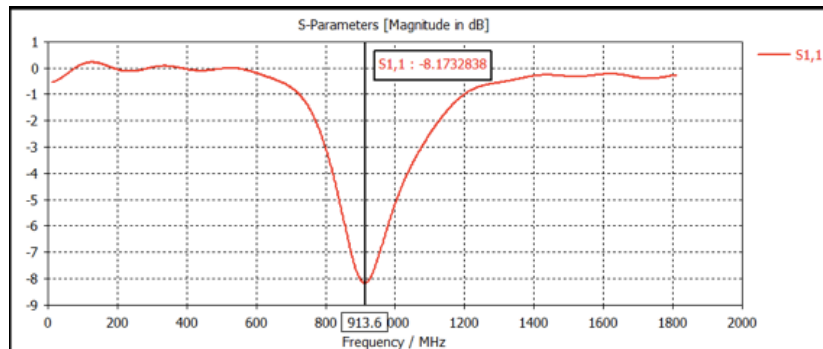


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

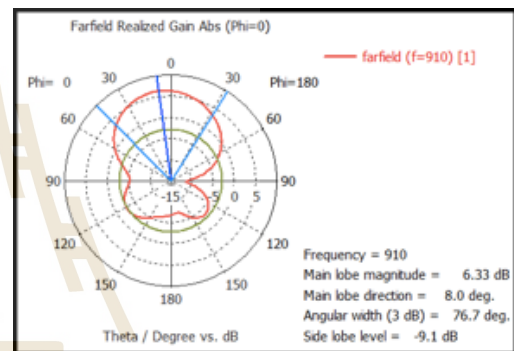
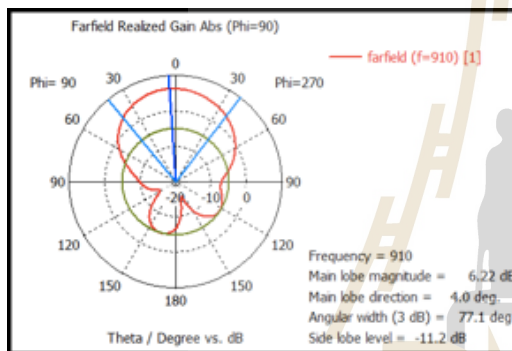
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.43 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 3.42 และรูปที่ 3.43 จะพบว่าเมื่อปรับขนาดของแผ่นสะท้อน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและค่าความถี่เรโซแนนซ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ามากนัก แต่แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงของพูหลังและทิศทางการแผ่คลื่น จึงเลือกใช้ขนาดของแผ่นสะท้อน เท่ากับ 350x200 มิลลิเมตร เนื่องจากการแผ่คลื่นในทิศทาง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -8.173 dB ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 913.6 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 6.40 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.44 และรูปที่ 3.45

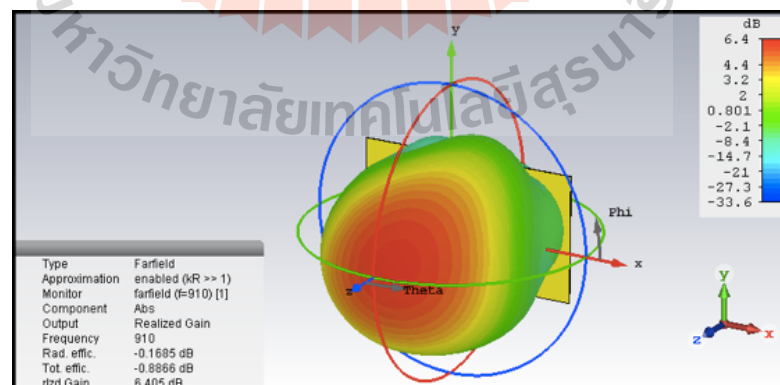


รูปที่ 3.44 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อขนาดของแผ่นสะท้อนเท่ากับ 350x200 มิลลิเมตร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

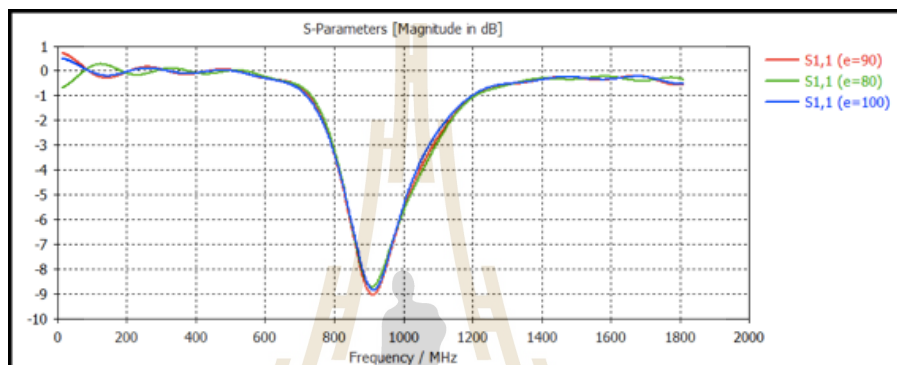


(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

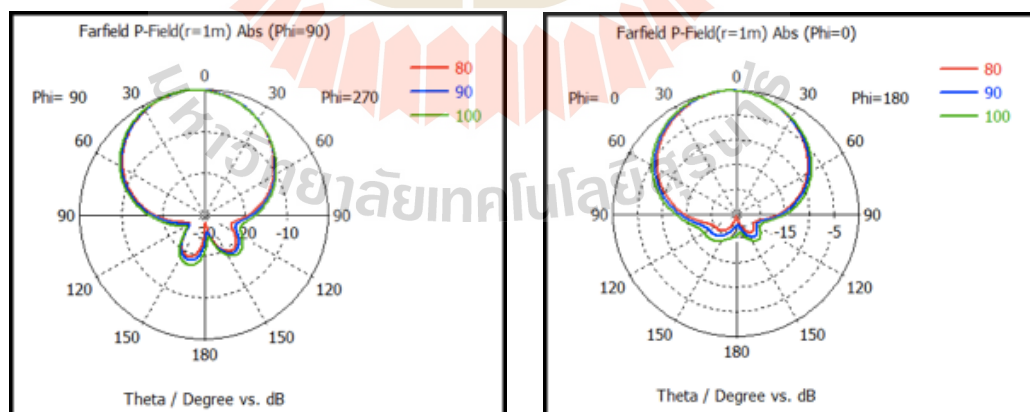
รูปที่ 3.45 แบบรูปการแผ่กำลังเมื่อขนาดของแผ่นสะท้อน เท่ากับ 350x200 มิลลิเมตร

3.5.2 ผลจากการเพิ่มปีกของแผ่นสะท้อนทั้งสี่ด้านทำมุม 45° และปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน

เมื่อได้ขนาดของแผ่นสะท้อนที่เหมาะสมแล้ว ทำการเพิ่มปีกของแผ่นสะท้อนทั้งสี่ด้านทำมุม 45° เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอ่าน ทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อหาระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นสะท้อน

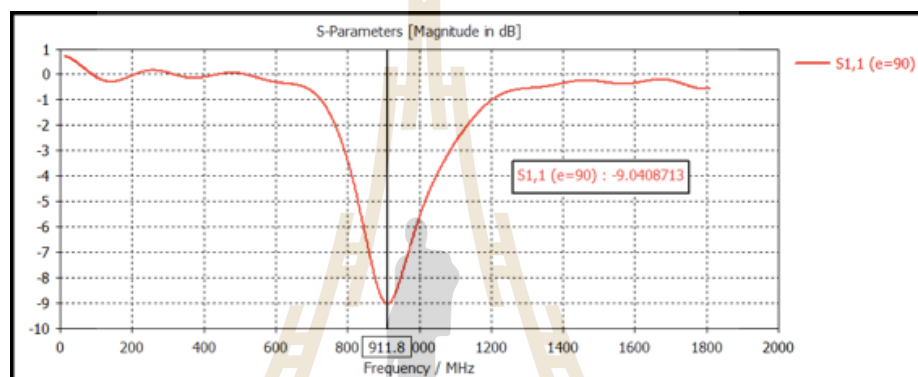


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

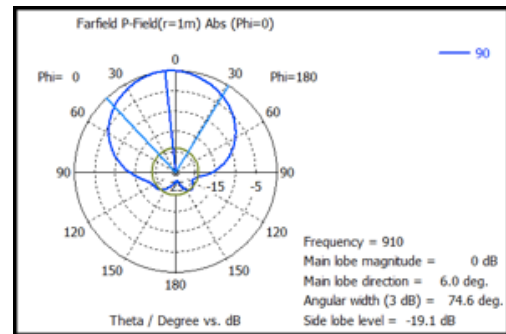
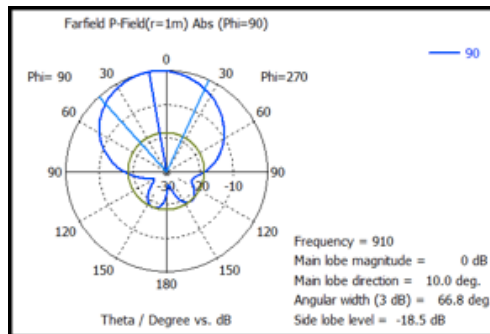
รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน และแผ่นสะท้อน

จากรูปที่ 3.46 เมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน UHF RFID และแผ่นสะท้อน แต่ละช่วงห่างกัน 10 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์นั้นสูงขึ้น และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับลดลง จะเห็นว่าที่ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 90 มิลลิเมตร จะมีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเหมาะสมกับความต้องการมากที่สุด จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 90 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 911.8 MHz เท่ากับ -9.041 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.478



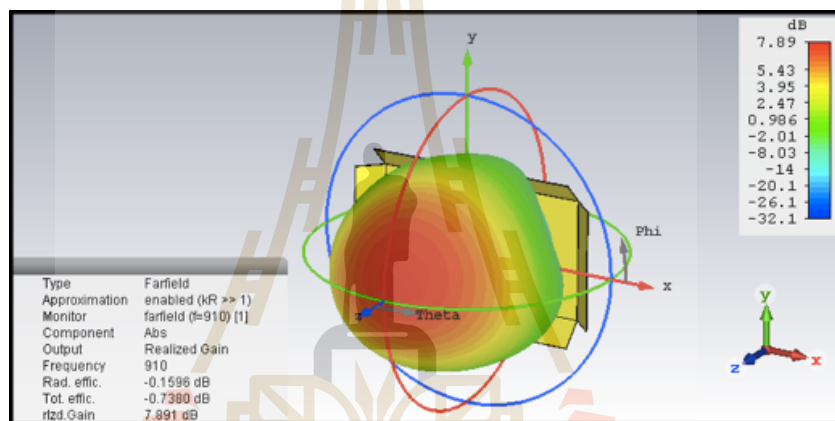
รูปที่ 3.48 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องและ แผ่นสะท้อนที่ระยะห่างเท่ากับ 90 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.48 จะพบว่าแบบรูปการแผ่กำลังของทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและแผ่นสะท้อนมากขึ้น จะทำให้พหุหลังมีค่าลดลง และเมื่อเลือกใช้ระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อนเท่ากับ 90 มิลลิเมตร จะได้อัตราขยายเท่ากับ 7.89 dBและมีอัตราส่วนของอัตราขยายสูงสุดในทิศทางด้านหน้าเทียบกับอัตราขยายในทิศทางด้านหลังสายอากาศ (Front to back ratio: F/B Ratio) เท่ากับ 18.542 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.49



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

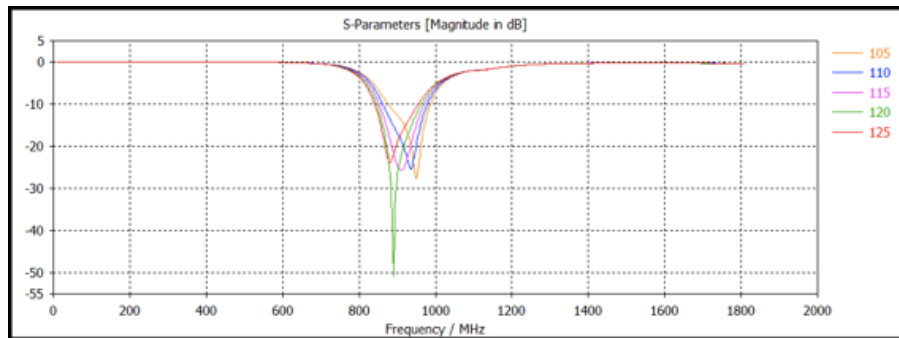


(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

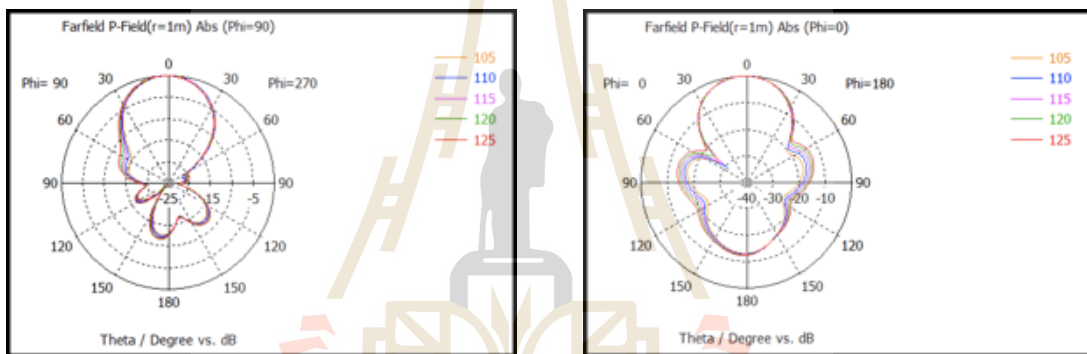
รูปที่ 3.49 แบบรูปการแผ่กำลังเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับแผ่นสะท้อน เท่ากับ 90 มิลลิเมตร

3.5.3 การปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอิวส์ตูดแบบ

ทำการปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอิวส์ตูดแบบแถวลำดับ แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อหาระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอิวส์ตูดแบบแถวลำดับที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่กำลังที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.50 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ



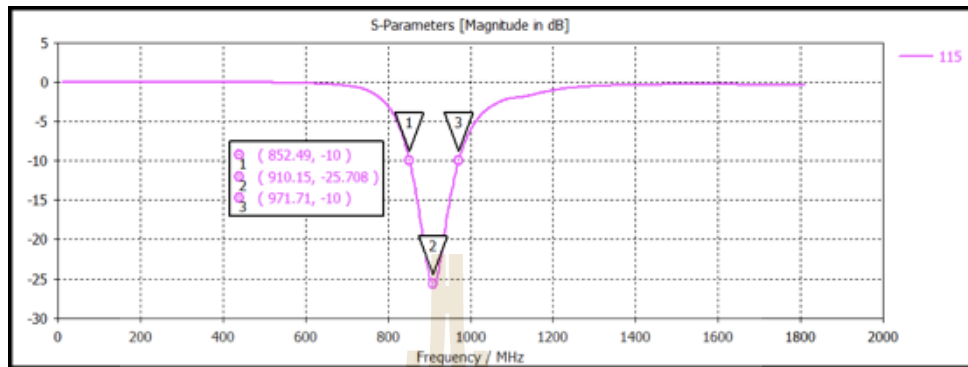
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

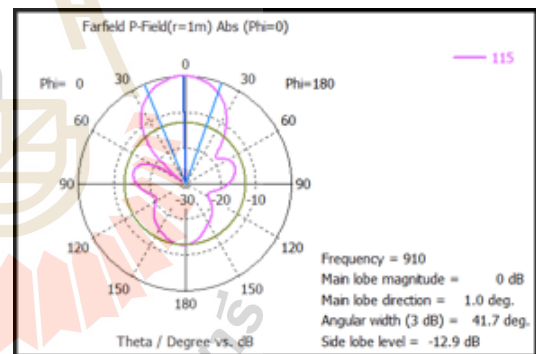
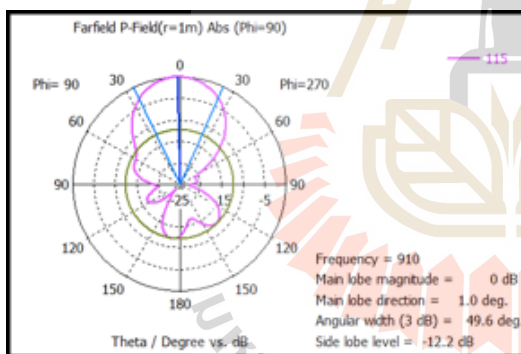
รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่าน และโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

จากรูปที่ 3.50 และ 3.51 จะพบว่าเมื่อปรับระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับเพิ่มขึ้นจะทำให้แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มของพหุหลังลดลง และความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ลดลงด้วย ซึ่งระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับที่เลือกใช้งานคือ 115 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910.15 MHz เท่ากับ -25.708 dB และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 49.6 และ 41.7 องศาในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และอัตราขยายอยู่ที่ 11.2 dB และมีค่า F/B Ratio เท่ากับ 12.24 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.52 และรูปที่ 3.53 เนื่องจากความถี่เร

โซแนนท์และค่าพารามิเตอร์อื่นตรงตามความต้องการ โดยสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการจำลองผลที่ได้ในตารางที่ 3.3

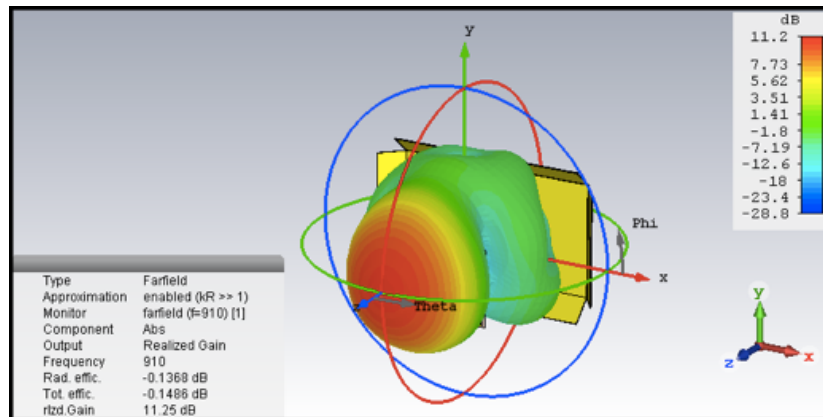


รูปที่ 3.52 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านกับ โครงสร้างอภิวัดคู่ เท่ากับ 115 มิลลิเมตร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



(ค) แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติ

รูปที่ 3.53 แบบรูปการแผ่กำลังของโครงสร้างอภิวัดดูแถวลำดับเมื่อระยะห่าง ระหว่างเครื่องอ่าน กับโครงสร้างอภิวัดดูเท่ากับ 115 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มแผ่นสะท้อน และสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่ม โครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับ จากการจำลองผล

	Antenna' reader	Reader + Reflector	Prototype
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	- 5.944 dB	- 9.041 dB	- 25.708 dB
ความกว้างแถบความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	-	-	852.49 – 971.71 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	-	-	119.22 MHz
อัตราขยาย	0.825 dB	7.89 dB	11.2 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	92.8 degree	66.8 degree	49.6 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	-	74.6 degree	41.7 degree
F/B Ratio	-	18.542 dB	12.24 dB
Total Efficiency	- 1.455 dB	- 0.7380 dB	- 0.1486 dB

จากผลการจำลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าจากโครงสร้างอภิวัดต้นแบบทั้งสองแบบแล้ว สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการจำลองผลที่ได้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID เมื่อเพิ่มโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับทั้งสองแบบ จากการจำลองผล

	Prototype#1	Prototype#2
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	- 24.499 dB	- 25.708 dB
ความกว้างแถบความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB (MHz)	854.65 – 971.11	852.49 – 971.71
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	63.46 MHz	119.22 MHz
อัตราขยาย	9.03 dB	11.2 dB
ความกว้างลำคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า	50.4 degree	49.6 degree
ความกว้างลำคลื่นระนาบสนามแม่เหล็ก	51.4 degree	41.7 degree
F/B Ratio	5.38 dB	12.24 dB
Total Efficiency	- 0.124 dB	- 0.124 dB

หมายเหตุ: Prototype#1 หมายถึง โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับที่มีแผ่นสะท้อนเป็นแผ่นอลูมิเนียมสี่เหลี่ยม

Prototype#2 หมายถึง โครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับที่มีแผ่นสะท้อนเป็นแผ่นอลูมิเนียมพับปีกสี่ด้าน

3.5 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับสำหรับใช้งานกับเครื่องอ่าน UHF RFID ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษา จำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเบื้องต้นของเครื่องอ่าน UHF RFID จากนั้นออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างอภิวัดที่ทำงานกับเครื่องอ่าน UHF RFID เพียงหนึ่งหน่วยเซลล์ แล้วนำโครงสร้างอภิวัดมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ นำมาวางหน้าเครื่องอ่าน UHF RFID โดยไม่มีการเชื่อมต่อหรือดัดแปลงเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ เพื่อให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงขึ้นสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ RFID โดยได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป CST Microwave Studio ก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำงานของส่วนต่าง ๆ สำหรับการนำไปสู่การสร้างต้นแบบสายอากาศและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับต่อไป

บทที่ 4

ผลการวัดทดสอบ

4.1 บทนำ

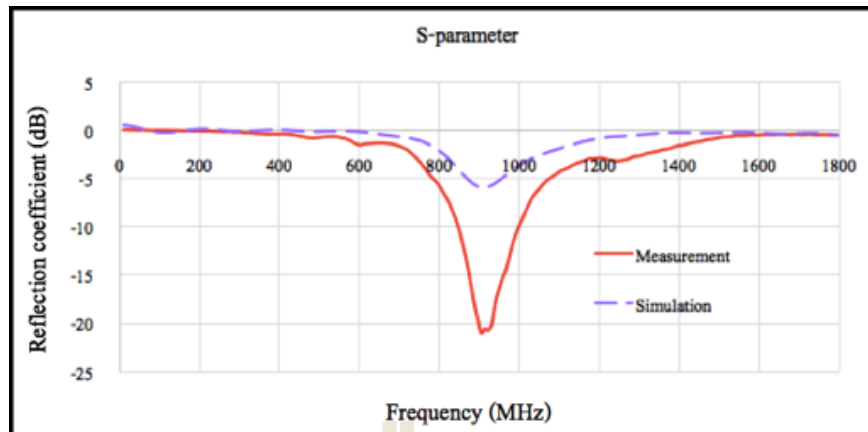
ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา เพื่อช่วยในการพิสูจน์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โดยการสร้างสายอากาศต้นแบบซึ่งประกอบด้วยเครื่องอ่าน UHF RFID แผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับมาวัดทดสอบคุณลักษณะ ได้แก่ แบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อัตราขยายของสายอากาศ และความกว้างแถบความถี่ เป็นต้น

4.2 ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ

เมื่อนำเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับมาทำการวัดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำการต่อสายนำสัญญาณต่อจากเครื่องอ่าน เพื่อต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ จากนั้นค่าแรกที่ทำการวัดคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งเราจะนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการวัดทดสอบและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากผลการจำลองมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการจำลองและจากการวัดทดสอบ เท่ากับ 910 MHz และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากการวัดทดสอบสายอากาศ เครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับทำงานได้ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ คือ 910 MHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การ สะท้อนกลับ เท่ากับ -20.68 dB จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง โดยทำการทดสอบในระยะ สนามไกล ซึ่งในการหาสนามระยะไกลที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้จากสมการ

$$Far\ field = R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4-1)$$

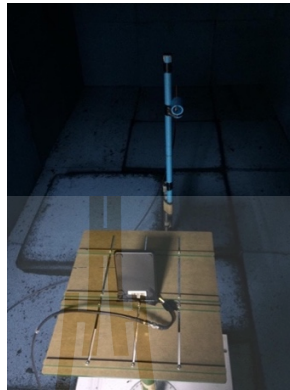
โดยที่

D	คือ	ความกว้างของสายอากาศ หน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)
R	คือ	ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ ระยะ far field หน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)
λ	คือ	ความยาวคลื่น หน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

เมื่อ λ เท่ากับ 32.96 เซนติเมตร และ D เท่ากับ 9.3 เซนติเมตร จากนั้นแทนค่าลงในสมการ (4-1) เพื่อหาระยะสนามระยะไกล จะได้ว่า

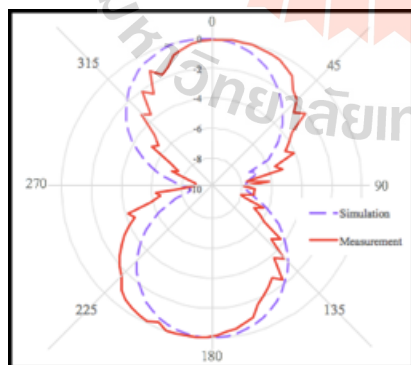
$$Far\ field = R = \frac{2 \times (9.3)^2}{32.96} = 5.248 \text{ เซนติเมตร}$$

ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับทั้งใน ระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กใน Anechoic chamber ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่ง ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่งที่ใช้ คือ 55 เซนติเมตร

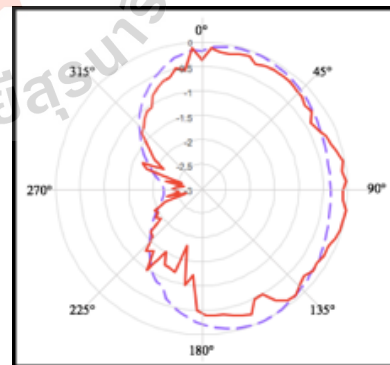


รูปที่ 4.3 การวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับใน Anechoic chamber

เมื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก นำ แบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองมา เปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากการวัด ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับระหว่างผลจากการ จำลอง และจากการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า แบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองและจากการวัดทดสอบนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยจะหาอัตราขยายของเครื่องอ่าน UHF RFID ดันจบบั๊ โดยการหาอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการวัดทดสอบสามารถหาได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis Transmission Equation)

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L} \quad (4-2)$$

โดยที่

G_r	คือ	อัตราขยายของสายอากาศภาครับ ไม่มีหน่วย
G_t	คือ	อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง ไม่มีหน่วย
P_r	คือ	กำลังที่ภาครับรับได้ หน่วยเป็น วัตต์ (Watt; W)
P_t	คือ	กำลังที่ภาคส่ง หน่วยเป็น วัตต์ (Watt; W)
L	คือ	การสูญเสียในอากาศว่าง ไม่มีหน่วย

จากสมการที่ (4-2) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$10 \log P_r = 10 \log \left(\frac{P_t G_t G_r}{L} \right)$$

$$P_r \text{ (dB)} = P_t \text{ (dB)} + G_t \text{ (dB)} + G_r \text{ (dB)} - L \text{ (dB)} \quad (4-3)$$

โดยที่ พารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในหน่วย dB

การหาการสูญเสียในอากาศว่างของสายอากาศที่ใช้ในการวัดทดสอบ สามารถหาได้จากสมการ

$$L = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (4-4)$$

$$L \text{ (dB)} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4-5)$$

โดยที่

R คือ ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่ง หน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)
แทนค่าในสมการที่ (4-5)

$$L(dB) = 20\log\left(\frac{4\pi(55)}{3296}\right) = 26.43 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น

$$Gr(dB) = Pr(dB) - Pt(dB) - Gt(dB) + L(dB)$$

$$Pt(dB) = 0 \text{ dB}, Pr(dB) = -23.45 \text{ dB}$$

ในกรณีสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับ จะมีค่าของ $L(dB) = 26.43 \text{ dB}$ และ
สายอากาศภาคส่ง คือ สายอากาศไดโพลมาตรฐาน ซึ่งมีอัตราขยายที่ความถี่ 910 MHz เท่ากับ
 $Gt(dB) = 2 \text{ dB}$ จะได้อัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับ

$$Gr(dB) = -23.45 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 26.43 \text{ dB}$$

$$Gr(dB) = 0.98 \text{ dB}$$

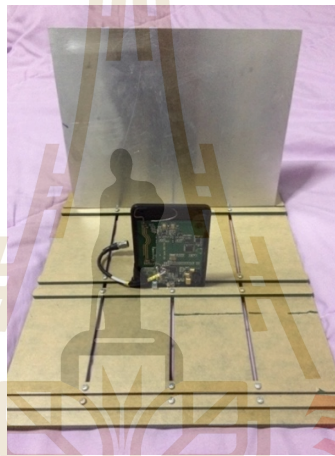
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับ

	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัดทดสอบ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	-5.945 dB	-20.68 dB
อัตราขยาย	0.825 dB	0.98 dB
ความกว้างลำคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า	92.80 degree	87.80 degree

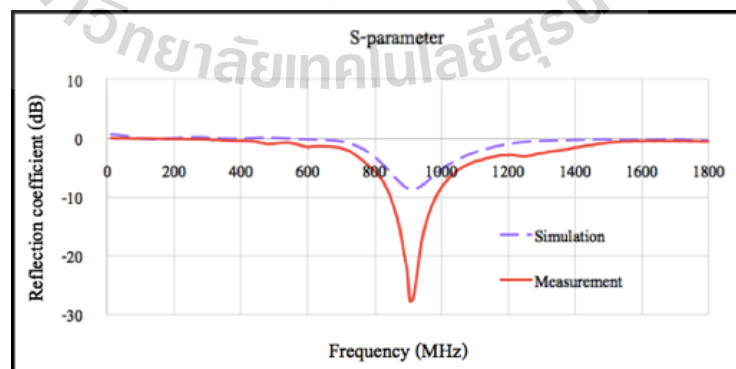
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า อัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับสูงกว่า
อัตราขยายของสายอากาศจากการจำลอง 0.155 dB และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ
สนามไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับนั้นกว้างกว่าสายอากาศจากแบบจำลอง
เท่ากับ 5 องศา แต่ผลจากการวัดทดสอบก็ยังเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการทุกประการ

4.3 ผลการวัดทดสอบสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อน

เมื่อนำเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับมาเพิ่มแผ่นอลูมิเนียมด้านหลัง เพื่อทำหน้าที่เป็นแผ่นสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อปรับรูปแบบการแผ่กำลังของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับที่มีแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัวในระนาบเดียวให้เป็นแบบมีทิศทาง แล้วทำการวัดทดสอบ โดยค่าแรกที่ทำกรวัดทดสอบ คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ซึ่งจะนำค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



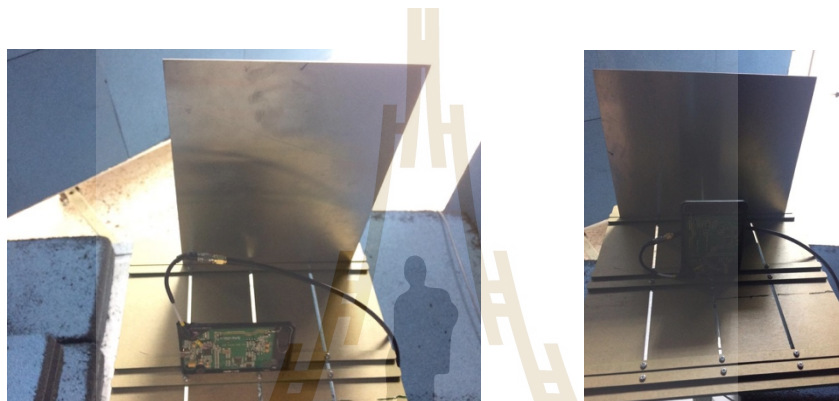
รูปที่ 4.5 สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับและแผ่นสะท้อน



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า ความถี่เรโซแนนซ์จากการจำลองและการวัดทดสอบเกิดที่ความถี่ 910 MHz และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับและแผ่นสะท้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เท่ากับ -27.38 dB

จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านดันฉบับและแผ่นสะท้อนทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น (Anechoic chamber) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่งที่ใช้ คือ 55 เซนติเมตร

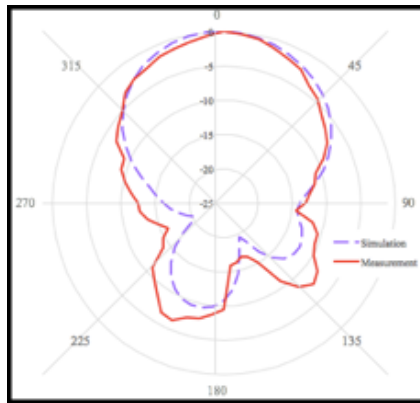


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

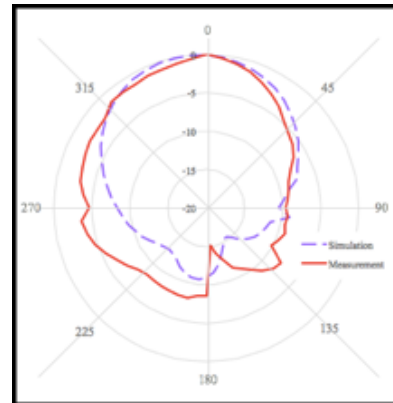
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.7 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของเครื่องอ่านดันฉบับและแผ่นสะท้อนในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น

เมื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแล้ว จึงนำแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านคันฉับและแผ่นสะท้อน
ระหว่างผลจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบ
สนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยจะหาอัตราขยาย
ของสายอากาศเครื่องอ่านคันฉับและแผ่นสะท้อน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (4-3)

$$Pr (dB) = Pt (dB) + Gt (dB) + Gr (dB) - L (dB)$$

โดยที่ พารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในหน่วย dB

$$Gr (dB) = Pr (dB) - Pt (dB) - Gt (dB) + L (dB)$$

$$Pt (dB) = 0 \text{ dB}, Pr (dB) = -19.38 \text{ dB}, L (dB) = 26.43 \text{ dB}, Gt (dB) = 2 \text{ Db}$$

$$Gr (dB) = -19.38 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 26.43 \text{ Db}$$

$$Gr (dB) = 5.05 \text{ Db}$$

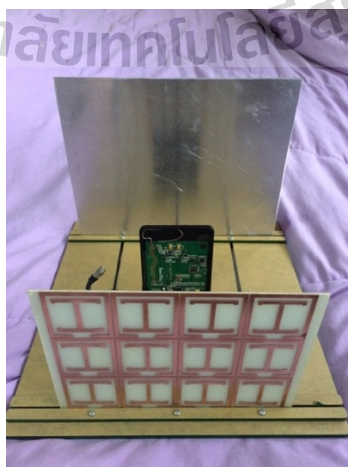
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน

	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัดทดสอบ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	-8.729 dB	-27.64 dB
อัตราขยาย	6.29 dB	5.05 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	76.10 degree	70.78 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	91.20 degree	85.45 degree
F/B Ratio	9.388 dB	6.68 dB

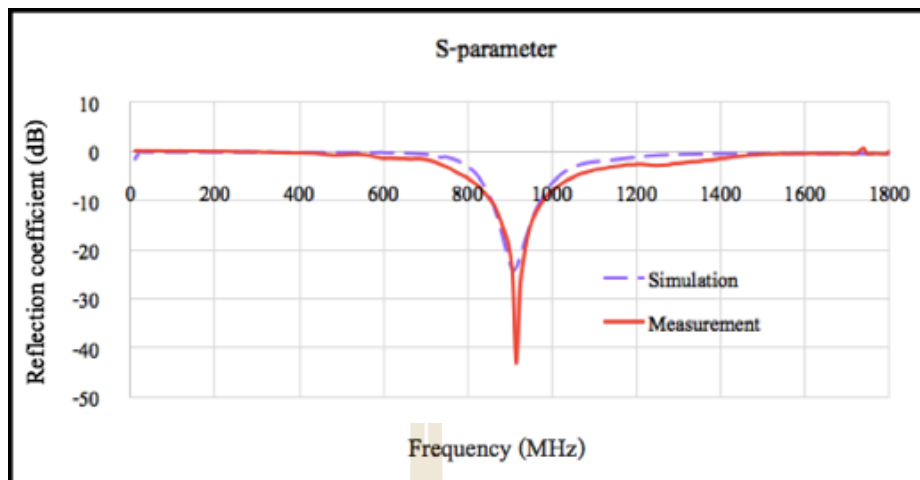
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศจากการจำลองสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน เท่ากับ 1.11 dB แต่ผลจากการวัดทดสอบก็ยังเป็นไปตามที่ต้องการ

4.4 ผลการวัดทดสอบเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

นำโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับมาติดตั้งเพิ่ม โดยวางด้านหน้าโครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID และแผ่นสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอ่านแท็กให้กับเครื่องอ่าน แล้วนำมาวัดค่า โดยค่าแรกที่วัด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งจะนำค่าการสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10



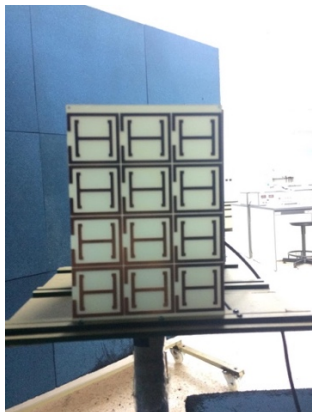
รูปที่ 4.9 สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัด



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากแบบจำลองและการวัดทดสอบ เท่ากับ 910 MHz และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จากการวัดทดสอบ สายอากาศทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 851.30 MHz ถึง 976.60 MHz ซึ่งมีความกว้างแถบความถี่ เท่ากับ 125.30 MHz และความถี่เรโซแนนซ์ คือ 913.95 MHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เท่ากับ -43.22 dB

จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง โดยทำการวัดทดสอบในระยะสนามไกล ซึ่งในการหาระยะสนามไกลที่ใช้ในการวัดทดสอบสามารถหาได้จากสมการที่ (4-1) โดยการทดสอบนี้จะทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดทั้งในระยะสนามไฟฟ้าและระยะสนามแม่เหล็กในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น (Anechoic chamber) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาควัดที่ใช้ คือ 55 เซนติเมตร



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



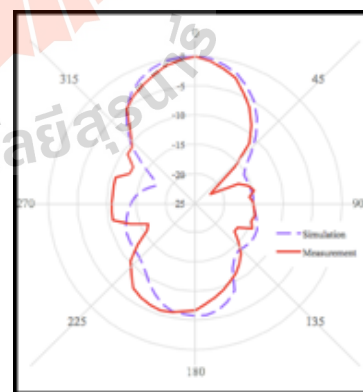
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.11 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดในหึ่งดูดซับการสะท้อนคลื่น

เมื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแล้ว จึงนำแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้จากการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.12



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดจากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ สามารถหาได้จากสมการที่ (4-3)

$$Pr (dB) = Pt (dB) + Gt (dB) + Gr (dB) - L (dB)$$

โดยที่พารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในหน่วย dB

$$Gr (dB) = Pr (dB) - Pt (dB) - Gt (dB) + L (dB)$$

$$Pt (dB) = 0 \text{ dB}, Pr (dB) = -16.08 \text{ dB}, L (dB) = 26.43 \text{ dB}, Gt (dB) = 2 \text{ Db}$$

$$Gr (dB) = -16.08 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 26.43 \text{ Db}$$

$$Gr (dB) = 8.35 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัดทดสอบ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	-24.594 dB	-42.07 dB
ความกว้างแถบความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	854.65 - 971.11 MHz	851.30 - 976.60 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	116.46 MHz	125.30 MHz
อัตราขยาย	9.03 dB	8.35 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	50.5 degree	42.4 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	51.5 degree	44.4 degree
F/B Ratio	5.38 dB	5.22 dB

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ พบว่าผลที่ได้จากการวัดทดสอบมีสถานะแมตซ์ที่ดีกว่าผลจากการจำลอง แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราขยาย พบว่าอัตราขยายของสายอากาศจากแบบจำลองสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ เท่ากับ 0.23 dB มีสมมติฐานว่าเกิดจากค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่แตกต่างกัน เนื่องจากการวัดทดสอบไม่ได้มีเพียงสายอากาศเพียงอย่างเดียว แต่มีกล่องของเครื่องอ่านและแผ่นอะกลิตที่ใช้วางเครื่องอ่านเพื่อทำการต่อสายวัดจากเครื่องวัดสัญญาณ (Network Analyzer) ด้วย ค่าที่สูญเสียไปจึงเกิดจากค่า Antenna radiation efficiency ของสายอากาศนั่นเอง แต่ผลจากการวัดทดสอบก็ยังเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จากนั้นนำผลการวัดทดสอบทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกัน สามารถสรุปค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.4

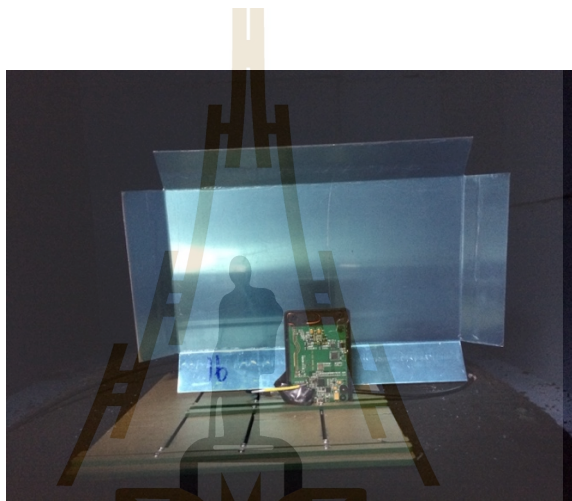
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบ

	Reader	Reader + Reflector	Prototype structure
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	- 20.68 dB	- 27.64 dB	- 42.07 dB
ความกว้างแถบความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	847.27 – 994.50 MHz	842.35 – 982.28 MHz	851.30 – 971.11 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	147.23 MHz	139.93 MHz	119.81 MHz
อัตราขยาย	0.98 dB	5.05 dB	8.35 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	87.80 degree	70.78 degree	42.40 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก		85.45 degree	44.4 degree
F/B Ratio		6.68 dB	5.22 dB

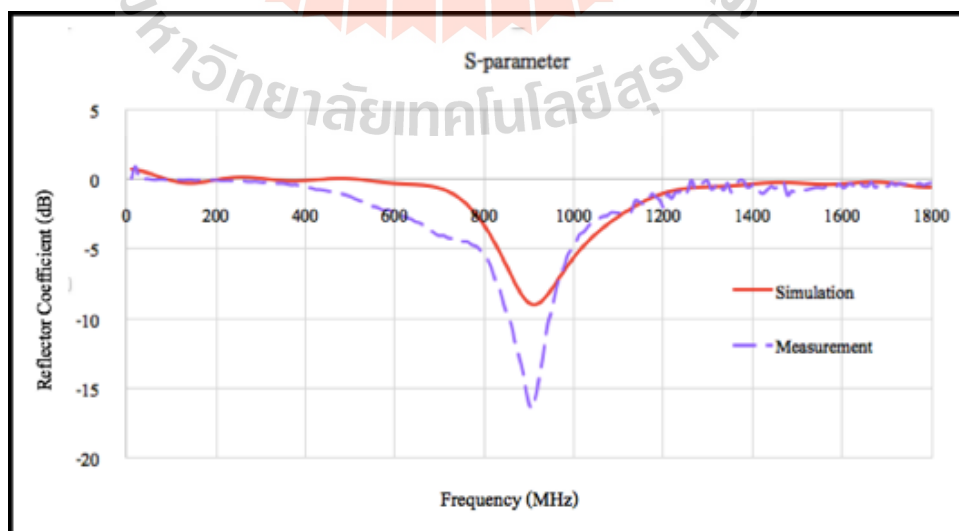
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า อัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ที่เพิ่มโครงสร้างแผ่นสะท้อน มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ เท่ากับ 4.07 dB และสายอากาศต้นแบบที่มีโครงสร้างของแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากสายอากาศต้นแบบ เท่ากับ 7.37 dB

4.5 ผลการวัดทดสอบเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้าง อภิวัดแบบแถวลำดับแบบที่สอง

ปรับเปลี่ยนโครงสร้างแผ่นสะท้อนใหม่เพื่อลดความเข้มของพหุหลังของโครงสร้างอภิวัดต้นฉบับ โดยนำแผ่นอลูมิเนียมพับเป็นปีกสี่ด้านเพื่อบังคับทิศทางการแผ่คลื่นแล้วนำมาวางด้านหลังสายอากาศต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แล้วนำมาวัดค่า ค่าแรกที่วัด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งจะนำค่าการสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14



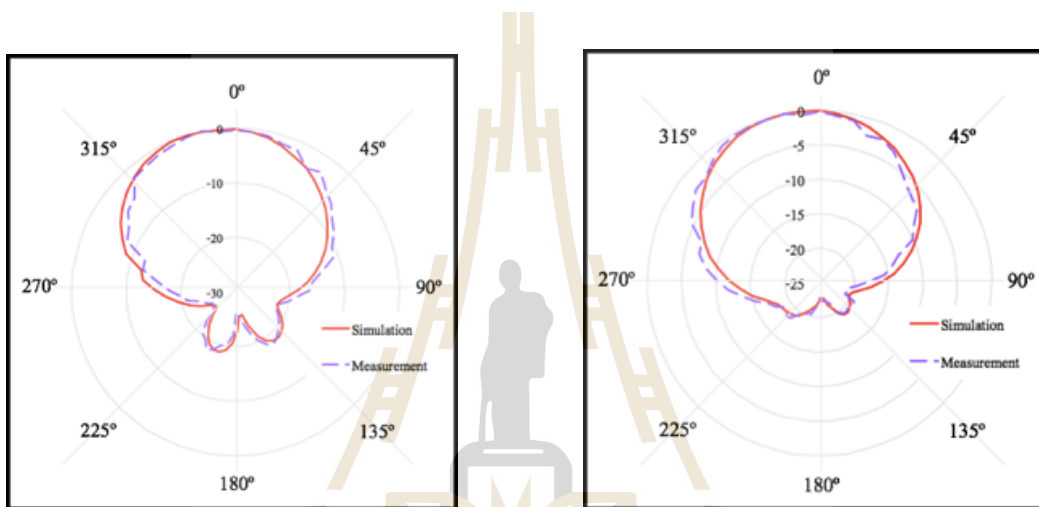
รูปที่ 4.13 สายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับและแผ่นสะท้อนแบบที่สอง



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ความถี่เรโซแนนซ์จากการจำลองและการวัดทดสอบเกิดที่ความถี่ 910 MHz และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ดันฉบับและแผ่นสะท้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เท่ากับ -16.43 dB

จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านดันฉบับและแผ่นสะท้อนทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กใน Anechoic chamber ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและสายอากาศภาคส่งที่ใช้ คือ 55 เซนติเมตร



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่านดันฉบับและแผ่นสะท้อน ระหว่างผลจากการจำลองและจากการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยจะหาอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านดันฉบับและแผ่นสะท้อน สามารถหาได้จากสมการ (4-3)

$$Pr (dB) = Pt (dB) + Gt (dB) + Gr (dB) - L (dB)$$

โดยที่ พารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในหน่วย dB

$$Gr (dB) = Pr (dB) - Pt (dB) - Gt (dB) + L (dB)$$

$$Pt \text{ (dB)} = 0 \text{ dB}, Pr \text{ (dB)} = -17.82 \text{ dB}, L \text{ (dB)} = 26.43 \text{ dB}, Gt \text{ (dB)} = 2 \text{ dB}$$

$$Gr \text{ (dB)} = -17.82 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 26.43 \text{ dB}$$

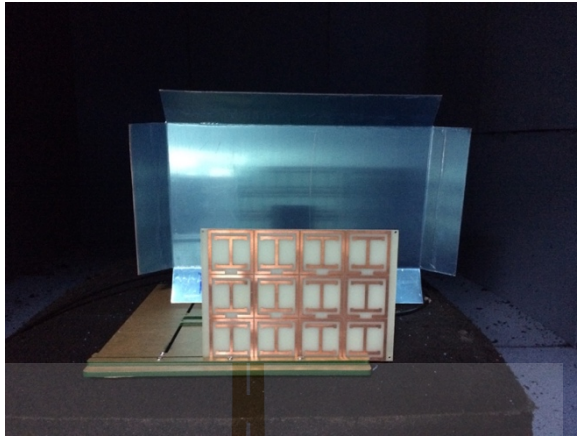
$$Gr \text{ (dB)} = 6.61 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน

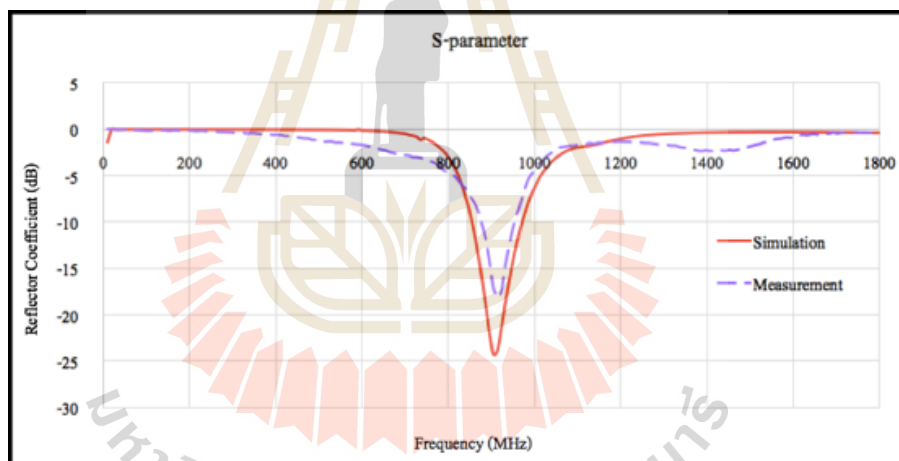
	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัดทดสอบ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	-9.041 dB	-16.43 dB
อัตราขยาย	7.89 dB	6.61 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	66.8 degree	66.0 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	74.60 degree	74.52 degree
F/B Ratio	18.542 dB	18.21 dB

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศจากการจำลองสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับและแผ่นสะท้อน เท่ากับ 1.28 dB แต่ผลจากการวัดทดสอบก็ยังเป็นไปตามที่ต้องการ

จากนั้นทำการเพิ่มโครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับมาติดตั้งเพิ่ม โดยวางด้านหน้าโครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID และแผ่นสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งมีขนาดรวมทั้งหมด กว้างxยาวxลึก เท่ากับ 300x400x270 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอ่านแท็กให้กับเครื่องอ่าน แล้วนำมาวัดค่า โดยค่าแรกที่วัด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งจะนำค่าการสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัด



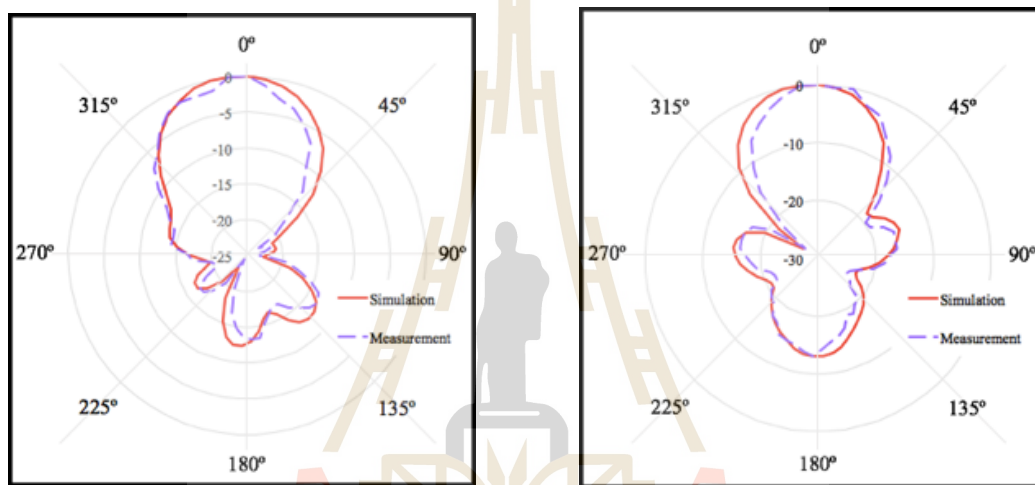
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากแบบจำลองและการวัดทดสอบ เท่ากับ 910 MHz และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB จากการวัดทดสอบ สายอากาศทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 875.99 MHz ถึง 952.96 MHz ซึ่งมีความกว้างแถบความถี่ เท่ากับ 76.96 MHz และความถี่เรโซแนนซ์ คือ 913.95 MHz จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เท่ากับ -18.26 dB

จากนั้นทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลัง โดยทำการวัดทดสอบในระยะสนามไกล ซึ่งในการหาระยะสนามไกลที่ใช้ในการวัดทดสอบสามารถหาได้จากสมการที่ (4-1) โดยการทดสอบนี้จะทำ

การวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กในห้องดูดซับการสะท้อนคลื่น (Anechoic chamber) ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่ใช้ คือ 55 เซนติเมตร

เมื่อทำการวัดแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแล้ว จึงนำแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่กำลังที่ได้จากการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดจากการจำลองและการวัดทดสอบ

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่กำลังทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองและการวัดทดสอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ สามารถหาได้จากสมการที่ (4-3)

$$Pr \text{ (dB)} = Pt \text{ (dB)} + Gt \text{ (dB)} + Gr \text{ (dB)} - L \text{ (dB)}$$

โดยที่พารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในหน่วย dB

$$Gr (dB) = Pr (dB) - Pt (dB) - Gt (dB) + L (dB)$$

$$Pt (dB) = 0 \text{ dB}, Pr (dB) = -13.75 \text{ dB}, L (dB) = 26.43 \text{ dB}, Gt (dB) = 2 \text{ dB}$$

$$Gr (dB) = -13.75 \text{ dB} - 0 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 26.43 \text{ dB}$$

$$Gr (dB) = 10.68 \text{ dB}$$

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID กับแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ

	ผลจากการจำลอง	ผลจากการวัดทดสอบ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	-25.709 dB	-18.26 dB
ความกว้างแถบความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	852.49-971.71 MHz	875.99-952.96 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	119.22 MHz	76.97 MHz
อัตราขยาย	11.2 dB	10.68 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	49.6 degree	48.0 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก	41.7 degree	41.3 degree
F/B Ratio	12.24 dB	12.29 dB

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ พบว่าผลที่ได้จากการวัดทดสอบมีสถานะแมตซ์ที่ดีกว่าผลจากการจำลอง แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราขยาย พบว่าอัตราขยายของสายอากาศจากแบบจำลองสูงกว่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ เท่ากับ 0.62 dB มีสมมติฐานว่าเกิดจากค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่แตกต่างกัน เนื่องจากในการวัดทดสอบไม่ได้มีเพียงสายอากาศเพียงอย่างเดียว แต่มีกล่องของเครื่องอ่านและแผ่นอะคิลิกที่ใช้วางเครื่องอ่านเพื่อทำการต่อสายวัดจากเครื่องวัดสัญญาณ (Network Analyzer) ด้วย ค่าที่สูญเสียไปจึงเกิดจากค่า Antenna radiation efficiency ของสายอากาศนั่นเอง แต่ผลจากการวัดทดสอบก็ยังเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จากนั้นนำผลการวัดทดสอบทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกัน สามารถสรุปค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ สายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบ

	Reader	Reader + Reflector	Prototype structure
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 910 MHz	- 20.68 dB	- 16.43 dB	- 18.26 dB
ความถี่เริ่มต้น-สิ้นสุด ที่ -10 dB	847.27 – 994.50 MHz	851.30 – 949.75 MHz	875.99 – 952.96 MHz
ความกว้างแถบ ที่ -10 dB	147.23 MHz	98.45 MHz	76.97 MHz
อัตราขยาย	0.98 dB	6.61 dB	10.68 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามไฟฟ้า	87.8 degree	66.0 degree	48.0 degree
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังระนาบสนามแม่เหล็ก		74.52 degree	41.30 degree
F/B Ratio		18.21 dB	12.29 dB

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า อัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID ที่เพิ่มโครงสร้างแผ่นสะท้อน มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ เท่ากับ 5.63 dB และสายอากาศต้นแบบที่มีโครงสร้างของแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากสายอากาศต้นแบบ เท่ากับ 9.70 dB

จากนั้นทำการทดสอบระยะการอ่านของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับเปรียบเทียบกับระยะการอ่านที่ได้จากสายอากาศต้นแบบ จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดระยะการอ่านทั้งหมดมาแสดงผลในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดทดสอบระยะการอ่านแท็กของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ เครื่องอ่าน ต้นฉบับกับแผ่นสะท้อนและสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบ

Degree	Distance (mm)		
	Reader	Reader + Reflector	Prototype structure
0	150	315	540
45	100	170	360
90	110	200	160
270	150	140	140
315	90	330	430

จากตารางที่ 4.8 พิจารณาค่าที่ได้จากการวัดทดสอบระยะการอ่านแท็ก พบว่าการอ่านแท็กในระยะทางที่มากที่สุดคือที่ 0 องศาหรือทางด้านหน้าของเครื่องอ่านเท่านั้น ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ในการเพิ่มแผ่นสะท้อนให้กับสายอากาศเครื่องอ่านต้นฉบับ

เมื่อพิจารณาค่าระยะการอ่านแท็กที่เพิ่มขึ้นในทิศทาง 0 องศา พบว่าระยะการอ่านแท็กของโครงสร้างต้นแบบที่มีการเพิ่มโครงสร้างแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดดูแบบแถวลำดับให้กับสายอากาศเครื่องอ่านเพิ่มขึ้นจากระยะการอ่านแท็กของเครื่องอ่านต้นฉบับ 390 มิลลิเมตรหรือประมาณ 370 % ซึ่งเมื่อเทียบระยะการอ่านแท็กกับราคาในท้องตลาดในปัจจุบันพบว่าระยะการอ่านแท็กกันสามารถลดต้นทุนได้มากกว่า 40%

4.6 สรุป

ค่าที่ได้จากการวัดทดสอบในทางปฏิบัติและค่าที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อัตราขยายที่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ สามารถใช้งานได้ตรงตามความถี่ที่ต้องการ อาจเกิดการคลาดเคลื่อนไปบ้างเนื่องจากหลากหลายปัจจัย อาทิเช่น การต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศเครื่องอ่านเพื่อต่อเข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณ การสร้างโครงสร้างอภิวัดดูอาจทำให้แบบรูปการแผ่กำลังที่ได้คลาดเคลื่อน เป็นต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบของสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID โดยใช้โครงสร้างแผ่นสะท้อนและโครงสร้างอภิวัดแบบแถวลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอ่านแท็กของเครื่องอ่าน UHF RFID ต้นฉบับ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศของเครื่องอ่าน โดยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นสายอากาศเครื่องอ่าน UHF RFID จากนั้นวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศพบว่า มีแบบรูปการแผ่กำลังใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่กำลังแบบรอบตัวในระนาบเดียว จึงทำการศึกษาวิธีปรับปรุงแบบรูปการแผ่กำลังเพื่อปรับแบบรูปการแผ่กำลังให้เป็นแบบมีทิศทาง ซึ่งเลือกวิธีการเพิ่มโครงสร้างแผ่นสะท้อนวางด้านหลังเครื่องอ่านเพื่อทำการปรับทิศทางแบบรูปการแผ่กำลังสายอากาศของเครื่องอ่าน จากนั้นวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังพบว่าสายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการศึกษาวิธีปรับปรุงและเพิ่มอัตราขยายให้เพิ่มขึ้นอีก ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศโดยใช้โครงสร้างอภิวัด ซึ่งพบว่าโครงสร้างอภิวัดชนิดต่าง ๆ สามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศได้ จึงได้ทำการออกแบบและติดตั้งโครงสร้างอภิวัด เพื่อเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศของเครื่องอ่าน ซึ่งผลที่ได้ทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นและสามารถอ่านแท็กได้ระยะทางไกลมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากการนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโดยใช้โครงสร้างอภิวัด ผู้วิจัยหวังว่าแนวคิด วิธีการศึกษาออกแบบ รวมถึงผลจากการจำลองและผลจากการวัดทดสอบจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับเทคนิคที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศของเครื่องอ่านในระบบ RFID หรือสายอากาศประเภทอื่น ๆ ต่อไป

รายการอ้างอิง

- F. J. Herraiz-Martínez, E. Ugarte-Muñoz, V. González- Posadas, L. E. García-Muñoz and D. Segovia Vargas, “Self - Diplexed Patch Antennas Based on Metamaterials for Active RFID Systems,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, pp. 1330-1340.
- วัชรกร หนูทอง, อนุกุล น้อยไม้ และ ปรีนัท วรรณสว่าง. RFID เทคโนโลยีสารพัดประโยชน์. 15-22. กรุงเทพมหานคร : 2547.
- H. O. Moser, B. D. F. Casse, O. Wilhelmi and B. T. Saw, “Terahertz Response of a Microfabricated Rod-Split-Ring-Resonator Electromagnetic Metamaterial,” Phys. Rev. Lett. 94, 2005.
- B. Ozbey, H. V. Demir and V. B. Ertürk, “An Equivalent Circuit Model for Nested Split-Ring Resonators,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, pp. 3733-3734.
- F. Bilotti, A. Toscano and L. Vegni, “Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, pp. 2258-2267.
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์ (2555).วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3), ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

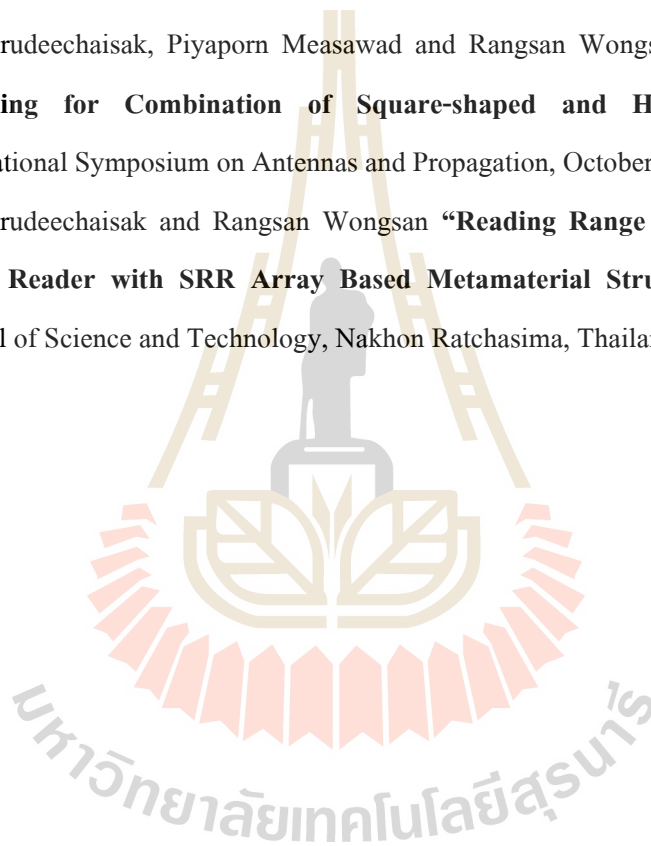
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Pornpat Pramerudeechaisak, Piyaporn Measawad and Rangsan Wongsan **“Reading Distance Extension of Original RFID Reader With Technique of Metamaterial Structure”**, 2017 International Symposium on Antennas and Propagation, November 2017, Phuket, Thailand.

Pornpat Pramerudeechaisak, Piyaporn Measawad and Rangsan Wongsan **“Equivalent Circuit Modeling for Combination of Square-shaped and H-shaped SRRs”**, 2018 International Symposium on Antennas and Propagation, October 2018, Busan, Korea.

Pornpat Pramerudeechaisak and Rangsan Wongsan **“Reading Range Improvement for UHF RFID Reader with SRR Array Based Metamaterial Structure”**, 2019 Suranaree Journal of Science and Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



Reading Distance Extension of Original RFID Reader With Technique of Metamaterial Structure

Pornpat Pramerudeechaisak
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
M5840786@g.sut.ac.th

Piyaporn Mesawad
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
priam@sut.ac.th

Rangsan Wongsan
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
rangsan@sut.ac.th

Abstract—This paper presents the application of metamaterial structure for improving the gain of antenna to extend the reading distance of UHF RFID reader without any modifying of the original reader. The proposed structure of metamaterial is designed on the theory of Split Ring Resonator (SRR), which located in front of such the RFID reader, while the back side of reader is blocked with a metallic sheet as reflector. At last, we found that the proposed structure of metamaterial can provide the gain around 9.16 dB when compared to the original one (around 1.84 dB).

Keywords—RFID Reader; Metamaterial; Split Ring Resonator; RFID Tag.

I. INTRODUCTION

Radio Frequency Identification (RFID) is automatic identification technology, which has become popular in many industrial service, such as identifying object in logistics and vehicular technology. It's very useful to track object and even people with RFID tag. The RFID system consist of two parts; a reader, reading or writing data to the tag that use radio frequency signal to transfer data and tag, tracks the target object [1-2].

The UHF RFID are very interested because of it is more suitable for long coverage range, but has some disadvantage of interference and expensive cost. Therefore, more researches were proposed the methods to overcome such the disadvantage and obtain the high performance of operation by using metamaterials [3-5].

In this paper, the simple method to improve the gain of antenna of UHF RFID Reader by adding metamaterial structures without modifying the original RFID reader will be presented. The artificial material has been designed to provide unusual properties in nature based on split ring resonators (SRRs) that are the most popular at present. However, such SRRs which were used for gain enhancements have different methods and shapes [6]. While our proposed method has the easy shaped and design.

II. ANTENNA STRUCTURE AND DESIGN METHOD

A. UHF RFID Reader Antenna

The antenna inside the selected original UHF RFID reader is a folded monopole operated at 860-960 MHz of frequency band, as shown in Fig.1(a). The antenna structure made from an aluminum wire, placing over the 60x85 mm of printed circuit board. The dimensions of monopole are shown in Table I. In Fig.1(b), the structure of folded monopole antenna is made from aluminum wire, which has the radius equals 0.5 mm. Such the structure and its dimension of antenna is simulated by CST Microwave Studio Software. From the results of the simulation as shown in Fig.2, we found that the original monopole provided the return loss (S_{11}) equals -6.295 dB at 908 MHz of center frequency, while its radiation pattern is nearly omnidirectional with half power beam width HPBW equals 93.0° and provided the gain around 1.84 dB.

TABLE I. DIMENSION OF CONVENTIONAL ANTENNA (Unit: mm)

a	b	c	d	R
8	13	35	25	0.5

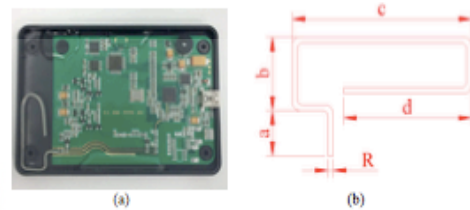


Fig. 1. Original UHF RFID Reader: (a) antenna in package and (b) structure of antenna.

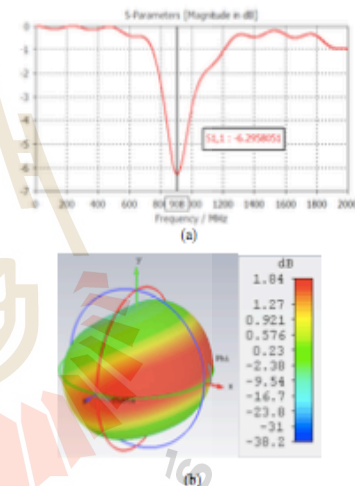


Fig. 2. The simulation results of original monopole without reflector: (a) S_{11} and (b) Gain.

In order to modify the HPBW of radiation pattern of the original RFID reader to narrower, then a metallic reflector has been added behind the folded monopole with 100 mm of spacing and 175x150 mm of dimension.

In Fig.3, the simulated result of S_{11} and radiation pattern are obtained. We found that the original monopole with metallic reflector provided $S_{11} = -8.496$ dB at 906 MHz, HPBW = 78.6° and gain = 6.38 dB at the center frequency.

B. Metamaterial Structure

After we obtained the directional pattern and higher gain from the previous section. The metamaterial structure of our SRR has been located at the front of antenna with spacing around 100 mm. The 4x4 unit cells of SRRs with dimensions of each SRR as shown in Table II and shown in Fig.4-5 is

simulated by CST Microwave Studio Software with a dielectric substrate RO5880 ($\epsilon_r = 2.2$), loss tangent = 0.009 and thickness = 1.82 mm.

TABLE II. DIMENSION OF SRR UNIT CELL (Unit: mm) AT 910 MHz

L1	L2	W	S	a	b
45.0	38.0	2.0	1.0	4.30	2.30

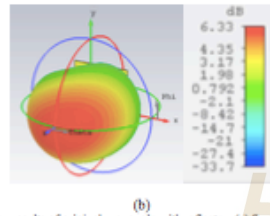
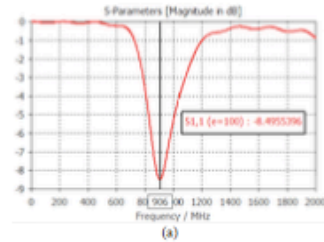


Fig. 3. The simulation results of original monopole with reflector: (a) S_{11} and (b) Gain.

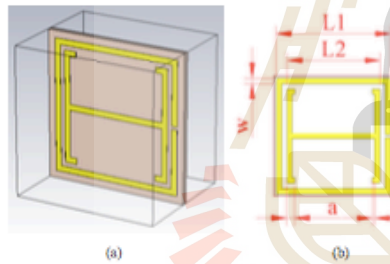


Fig. 4. SRR unit cell. (a) 3D view, (b) Front view of SRR.

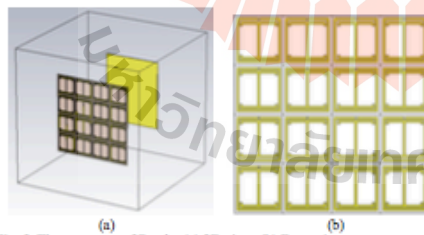


Fig. 5. The prototype of Reader (a) 3D view, (b) Front view.

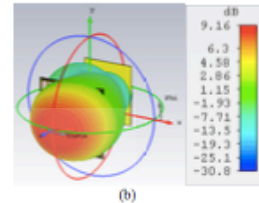
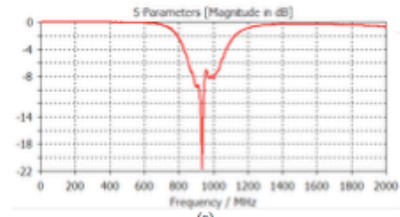


Fig. 6. The simulation results of original monopole with SRRs and reflector: (a) S_{11} and (b) Gain.

From the simulation results as shown in Fig.6, it is observed that SRRs can improve the matching condition ($S_{11} = -21.892$ dB) and reduce the HPBW ($\sim 56.6^\circ$), thus its gain is raised up to 9.16 dB that is enough for the longer reading distance.

III. CONCLUSION

The gain of the original UHF RFID reader has been improved for extending the reading distance of the reader by locating the proper design SRRs and reflector at front and behind of such reader, respectively. After the optimized results were calculated with CST software. It is found that this method can provide the higher gain (~ 9.16 dB) without modifying the original RFID reader or adding any RF amplify circuit into the system.

REFERENCES

- [1] E. Ugarte-Munoz, F.J. Herraiz-Martinez, V. Gonzalez-Posadas and D. Secovia-Vargas, "Self-diplexed Antenna based on Metamaterials for RFID Application," Applied Electromagnetics and Communications, 2007. ICECom 2007. 19th International Conference on, September 2007.
- [2] A. Toccafondi, C.D. Giovampaola, F. Mariottini and A. Cucini, "UHF-HF RFID integrated tag for moving vehicle identification," 2009 IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, June 2009, pp. 1-4.
- [3] P. Dangkhom and C. Phongcharoenpanich, "A Compact Split Ring Resonator Antenna on Paper-Based for UHF RFID Passive Tag," 2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2015, pp. 1-4.
- [4] D. Hamzaoui, T.P. Vuong, F. Djahli and G.I. Kiani, "Metamaterial RFID Tag Designs For Long Read Range," Antenna and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on, July 2015, pp. 1764-1765.
- [5] S. Naoui, L. Latrach and A. Gharsallah, "RFID Antenna by Using Metamaterials With Negative Permeability," 2015 2nd World Symposium on Web Application and Networking (WSWAN), March 2015, pp. 1-4.
- [6] M.M. Baskry, A.B. Abdel-Rahman and H.F.A. Hamed, "Gain and Bandwidth Improvement of Microstrip Patch Antenna using Complementary G-shaped Split Ring Resonator," 31st National Radio Science Conference (NRSC2014), April 2014, pp. 35-40.

Equivalent Circuit Modeling for Combination of Square-shaped and H-shaped SRRs

Pornpat Pramrudeechaisak
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
M5840786@gsut.ac.th

Piyaporn Mesawad
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
priam@gsut.ac.th

Rangsan Wongsan
School of Telecommunication Engineering,
Nakhon Ratchasima, Thailand
rangsan@gsut.ac.th

Abstract – A new split ring resonator (SRR) structure is proposed for the use be a unit cell of metamaterial for wireless communication antenna. It is design to operate at frequency around 910 MHz for increasing the gain of RFID reader in the future. In this paper, we have focused on the analysis of equivalent circuit model of the proposed SRR. The structure was organized on two square surfaces of the FR-4 dielectric substrate with 1.6 mm of the thickness. Each surface of substrate was placed with an H-shaped SRR surrounded with a square-shaped one, which made from copper strips. To confirm the resonant frequency that calculated from equivalent circuit model, we used CST software to simulate and optimize such the structure by considering the resonant point from the frequency response of return loss. It is found that the results of resonant frequency by equivalent circuit model are agree with the simulated results.

Index Terms – Split ring resonator, metamaterial, antennas

1. Introduction

Metamaterials were first introduced by Veselago in 1967 [1]. They are a new class of composite materials that exhibit unusual electromagnetic properties that are not found in natural materials. One of the metamaterials that great interested in recent year is the split ring resonator (SRR), because of its structure can be designed from various geometrical shapes. One of the metamaterials that great interested in recent year is the split ring resonator (SRR), because of its structure can be designed from various geometrical shapes. Therefore, researchers were interested to investigate their structures by equivalent circuit model methods. [2,3]

At present, the splitting resonators (SRRs) have been used for wireless communication antennas, especially, in order to improve the antenna performance. Therefore, this proposed SRR is designed to be a unit cell element of metamaterial for increasing the antenna gain of UHF RFID reader operating at 910 MHz of frequency. However, in this paper, the content will be focused only the equivalent circuit model of the proposed split ring resonator, which its structure is organized on two square surfaces of the FR-4 dielectric substrate. While each side of the substrate surface is placed with an H-shaped SRR and a square-shaped one inside, which both of them was made from copper strips by using etching process.

2. The SRR structure and its equivalent circuit model

The proposed structure that is designed at 910 MHz of the operating frequency, consists of a square slotted SRR placed on each surface of the FR-4 substrate, which has dimension of 45x45 mm, dielectric constant (ϵ_r) of 4.3, and the substrate thickness is 1.6 mm. While the open space inside the square shaped SRR is laminated with new H-shaped SRR that made from copper strip as same as the outer ring, as shown in Fig. 1. However, Table I shows all optimized dimension of the both SRR on each surface, which is calculated by using CST simulation software.

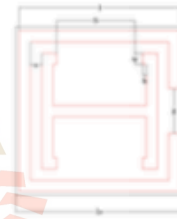


Fig. 1. Geometrical structure of the proposed SRR.

TABLE I
Optimized dimension of the proposed SRR (mm).

ls	l	w	a	g	b	s
45	44	3	3	12	1	30

Theoretically, the SRR structure can be represented by simple LC resonant circuit, while its inductance L and capacitance C depend on the shape and size of SRR structure including the property of dielectric material that used to be substrate [4]. The resonant frequency of such the LC circuit is given by $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_T C_T}$, where L_T is the total inductance formed by the combination of self inductance of a square-shaped SRR structure (L_1) and the self inductance of a H-shaped SRR structure (L_H). Whereas C_T is the total capacitance formed by the total capacitance of the SRR structure.

The expression for self inductance of a square-shaped SRR structure on two square surfaces can be calculated by [5]

$$L_1 = 0.2\mu_0 \left[-\frac{w}{2} \sinh^{-1} 1 + \frac{w}{2} \sqrt{2} \times \sinh^{-1} \left(\frac{l - \frac{w}{2}}{\frac{w}{2}} \right) - \sqrt{\left(l - \frac{w}{2} \right)^2 + \left(\frac{w}{2} \right)^2} \right] = L_2 \quad (1)$$

While the capacitance from the standard equation is given by

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{wl}{g} = C_2, \quad (2)$$

where, ϵ_0 and μ_0 are the permittivity and permeability of vacuum, respectively.

For the self-inductance of a H-shaped SRR, it can be calculated by [6]

$$L_H = \mu_0 d \left[\log \left(\frac{2d}{w} \right) + 0.9 + 0.2 \left(\frac{w}{2d} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

The expression for calculation the capacitance of an H-shaped SRR is given by using the standard equation as follow:

$$C_A = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{wl}{s}, \quad (4)$$

$$C_H = 2C_A \quad (5)$$

Then, the equivalent circuits in the previous step are assembled by using the methods from the previous literatures in [2, 7]. Thus, the inductance of the SRR element can be calculated by (6)

$$L_A = \frac{L_1 L_H}{L_1 + L_H}; L_B = L_B \quad (6)$$

Next, we assembly the equivalent circuit of SRR on each surface together, because of the proposed structure is organized on both surfaces of the square FR-4 dielectric substrate by using the method from [8]. Hereby, the final equivalent circuit is modeled as shown in Fig. 2, where C_m is the mutual capacitance by the parallel plate.

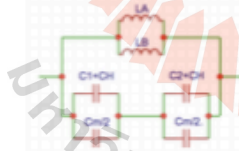


Fig. 2. Equivalent circuit model of the proposed SRR.

Lastly, substituting the optimized dimension from Table I into (1) - (6) that according to the equivalent circuit model as shown in Fig. 2. The obtained solution of resonant frequency is equal to 911.86 MHz.

3. Calculated Results

In order to verify the theoretical solution of resonant frequency, which obtained from (1) - (6), the given dimension of SRR is substituted into those equations. We

found that the result of the resonant frequency for our equivalent circuit model is at 911.86 MHz. After that we used CST software to calculate its resonant frequency again by considering from the simulated results of the reflection coefficient (S_{11}). It is found that the resonant frequency still be at 910 MHz, at $S_{11} = -29.952$ dB, which close to 911.86 MHz, as shown in Fig. 3. Obviously, the proposed equivalent circuit model achieved to good agreement with only 0.204% of the error.

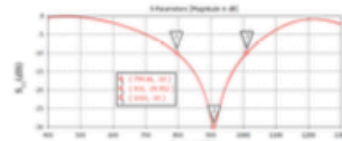


Fig. 3. Simulated S_{11} of the proposed SRR structure.

4. Conclusions

In summary, the proposed equivalent circuit model of our hybrid metamaterial made from SRR was verified with theoretically calculated result and simulated result from CST software. We found that the both results are similar (911.86 MHz and 910 MHz). Therefore, it is obviously shown that they are in very good agreement according to our requirement.

References

- [1] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative value ϵ and μ ," *Sov Phys Uspekhi*, Vol 10 (4), 1968, pp 509-514.
- [2] S. Can, A.E. Yilmaz and K.Y. Kapusuz, "An Equivalent-Circuit Model of Miniaturized Split-Ring Resonator," in *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017 IEEE International Symposium on*, 2017, pp 263-264.
- [3] J.D. Baena, J. Bonache, R.M. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegui, M. Laso, J. Garcia, I. Gil, M.F. Portillo and M. Sorolla, "Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonator and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol 53, 2005, pp 1451-1461.
- [4] T. Okamoto, T. Otsuka, S. Sato, T. Fukuta and M. Haraguchi, "Dependence of LC resonance wavelength on size of silver split ring resonator fabricated by nanosphere lithography," *Optics Express*, 2012.
- [5] N.P. Johnson, A.Z. Khokhar, H.M.H. Chong, R.M. De La Rue and S. McMeekin, "Characterisation at infrared wavelengths of metamaterials formed by thin film metallic split ring resonator arrays on silicon," in *Electronics Letters*, Vol 42, 2006.
- [6] R. Singh, N. Kumar and S.C. Gupta, "Investigation of resonance characteristics and effective parameters of a metamaterial structure with split rings," in *Scientific Research and Essays*, Vol. 10(4), pp 156-163.
- [7] P.Y. Orien, "Numerical analysis, design and two port equivalent circuit models for split ring resonator arrays," unpublished.
- [8] J. Wang, S. Qu, J. Zhang, H. Ma, Y. Yang, C. Gu and X. Wu, "A Tunable Left-Handed Metamaterial Based on Modified Broadside-Coupled Split Ring Resonator," in *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Vol 6, 2009, pp 35-45.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกรภัทร เปรมฤดีชัยศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดสระแก้ว สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ด้วยเกรดเฉลี่ย 3.27 (เกียรตินิยมอันดับสอง) ในปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ด้วยทุนกิตติบัตินิตของมหาวิทยาลัย

