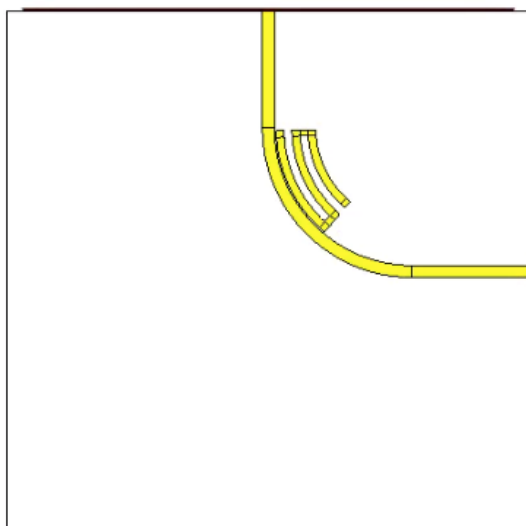
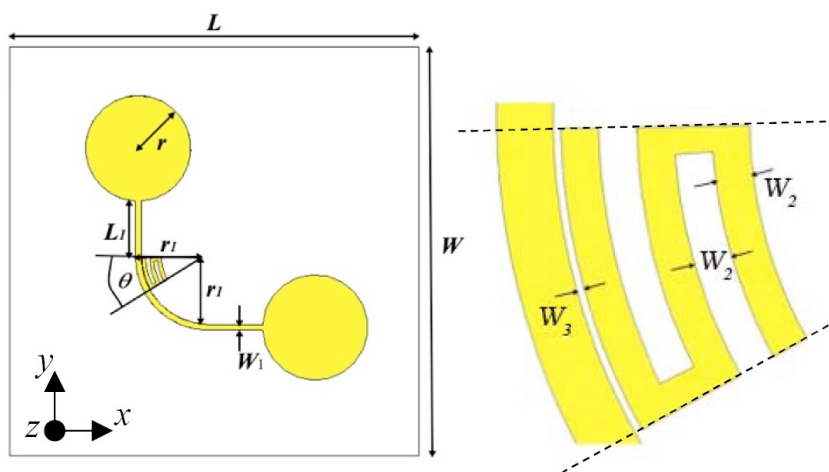




รูปที่ 3.60 โครงสร้างรีโซเนเตอร์แบบโค้ง



รูปที่ 3.61 เซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมที่มีตัวรีโซเนเตอร์แบบโค้ง

รูปที่ 3.61 แสดงโครงสร้างของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมที่ประกอบไปด้วยตัวแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลมจำนวน 2 ตัว สำหรับการส่งและรับสัญญาณ โดยที่รีโซเนเตอร์ออกแบบบนวัสดุฐานรองที่มีระนาบกราวด์เพื่อลดผลกระทบของวัสดุภายใต้การทดสอบ วัสดุฐานรองที่ใช้ คือ FR4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 4.3 และ $\tan\delta = 0.0025$ จากผลการจำลองและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และค่าคุณลักษณะของสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.22 และตารางที่ 3.23 ตามลำดับ

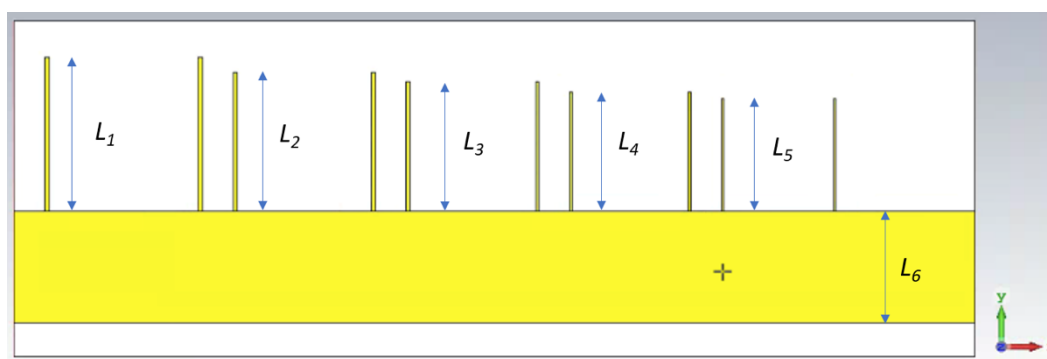
ตารางที่ 3.22 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม

Parameter	Dimension (mm)	Parameter	Dimension (mm)
L	104	W_2	1
L_1	14.3	W_3	0.2
W	104	r	13.5
W_1	1.5	r_1	13.5

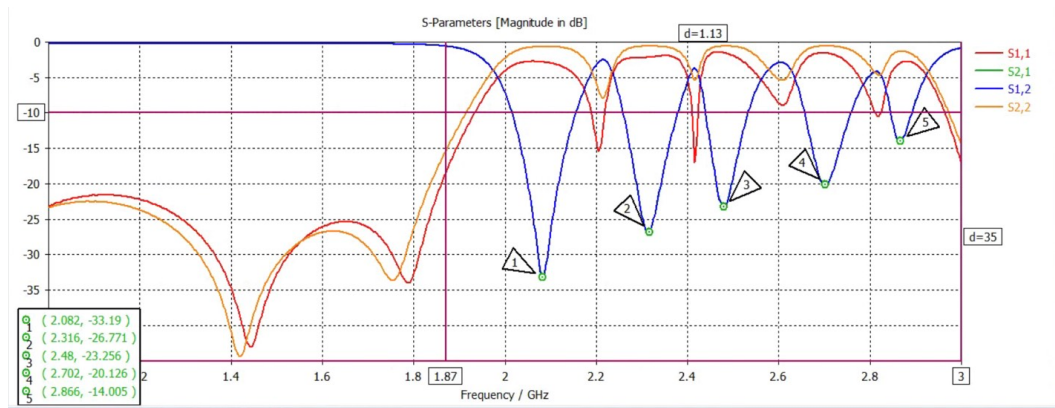
ตารางที่ 3.23 คุณลักษณะของสายอากาศแบบวงกลม

Radiation Characteristic	Description
Radiation Pattern	Omnidirectional
Gain	2.14 dBi
Polarization	Linear

อย่างไรก็ตามตัวรีโซเนเตอร์แบบขดจะมีข้อจำกัดเรื่องของการกวนกันระหว่างบิตของข้อมูลในกรณีที่ออกแบบให้เซ็นเซอร์มีบิตข้อมูลมากกว่า 1 บิต ซึ่งทำให้การตรวจสอบได้ยาก [21] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงให้มีดีขึ้นโดยการออกแบบเป็นลักษณะของตัวกรองความถี่ (Filter) ซึ่งอาศัยหลักการ คือ ออกแบบโดยใช้สแตปแบบปลายเปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.62(ก)

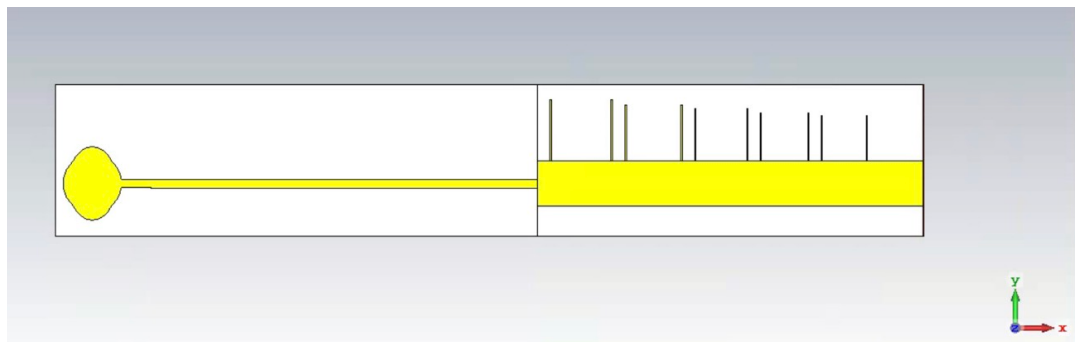


(ก) โครงสร้าง

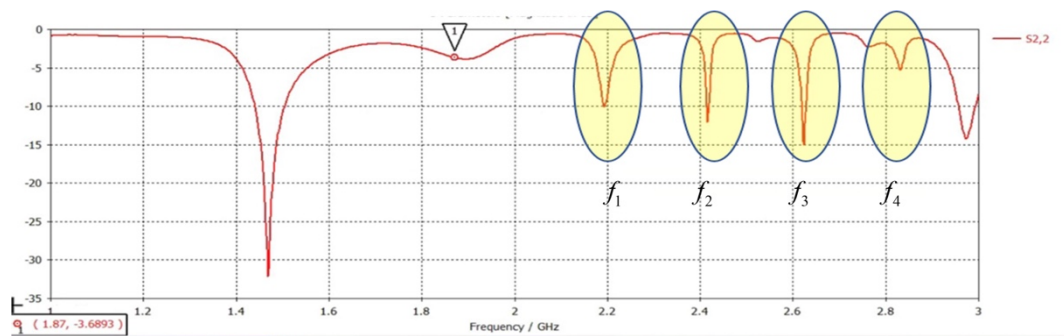


(ข) ผลการจำลอง

รูปที่ 3.62 โครงสร้างของตัวกรองความถี่และผลจำลอง

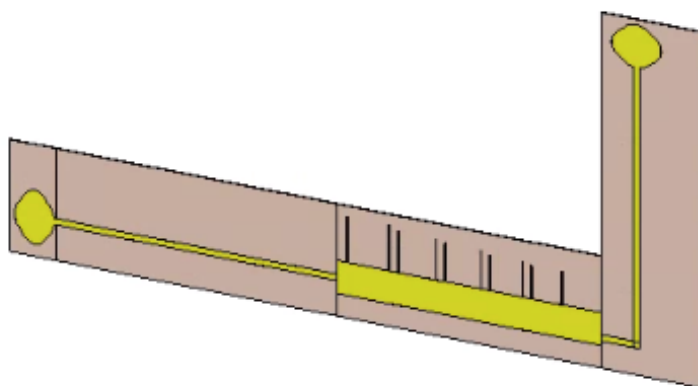


(ก) โครงสร้าง

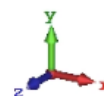
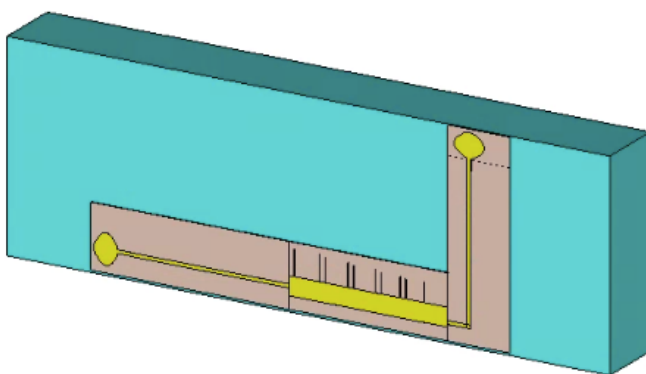


(ข) ผลการจำลอง

รูปที่ 3.63 โครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่อกับสายอากาศแบบวงกลม

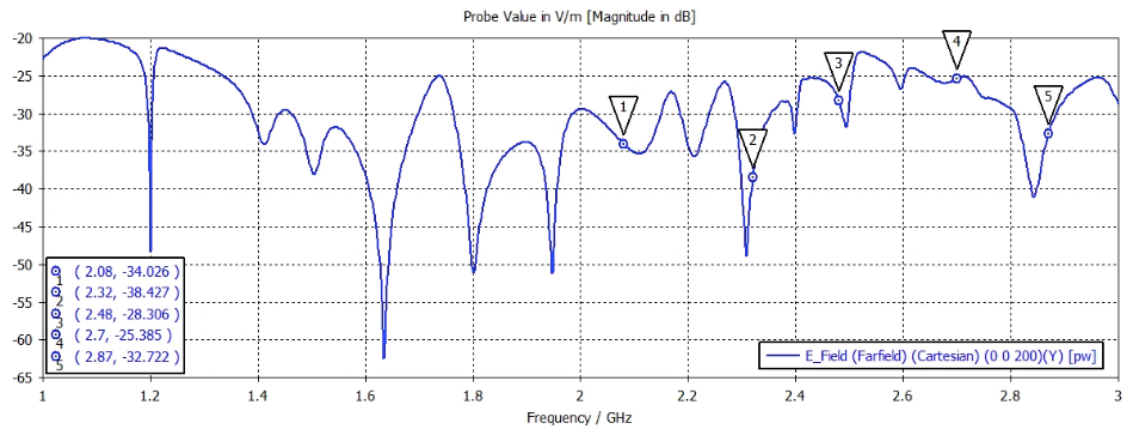


รูปที่ 3.64 โครงสร้างเส้นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมที่มีตัวกรองความถี่

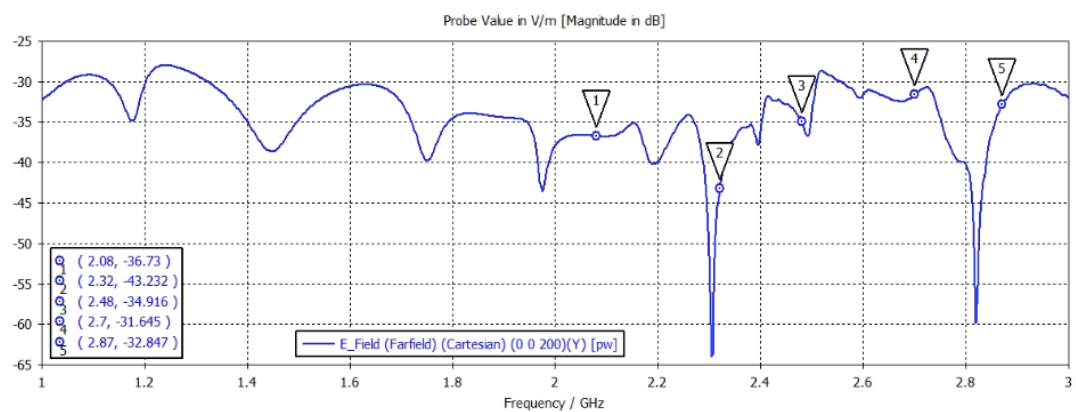


รูปที่ 3.65 โครงสร้างเส้นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมที่มีตัวกรองความถี่ที่ติดบนผิวของอิฐมวลเบา

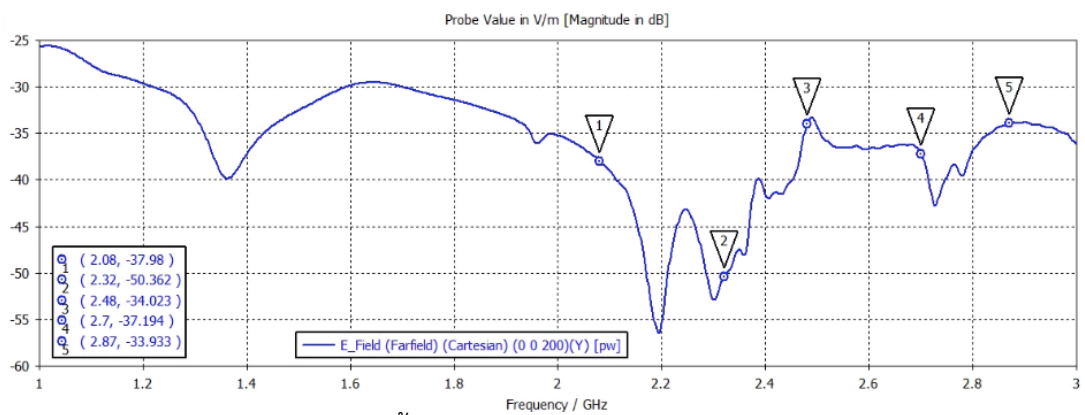
จากผลการจำลองดังรูปที่ 3.63(ก) พบว่า ความยาวของสตัปปลายเปิดส่งผลต่อความถี่รีโซแนนต์ของตัวกรองความถี่ และเมื่อนำตัวกรองมาต่อเข้ากับสายอากาศของแท็กอาร์เอฟไอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.63(ข) พบว่า ได้ความถี่ใช้งานของตัวกรองความถี่ จำนวน 4 ความถี่ คือ $f_1=2.2$ กะกิเฮิร์ตซ์ $f_2=2.4$ กะกิเฮิร์ตซ์ $f_3=2.6$ กะกิเฮิร์ตซ์ และ $f_4=2.8$ กะกิเฮิร์ตซ์ และจากรูปที่ 3.65 แสดงโครงสร้างของเส้นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม โดยมีขนาดโดยรวม เท่ากับ 41.7 เซนติเมตร x 19.7 เซนติเมตร x 0.8 เซนติเมตร และใช้วัสดุฐานรองเป็น RT5880 ($\epsilon_r=2.2$, $\tan \delta = 0.0009$) ในรูปที่ 3.66 แสดงการติดตั้งเส้นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมบนผิวของอิฐมวลเบาโดยติดตั้งบริเวณตรงกลางของอิฐมวลเบาที่มีขนาด เท่ากับ 600 เซนติเมตร x 200 เซนติเมตร x 75 เซนติเมตร สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของเส้นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมในกรณีอากาศว่างและกรณีติดตั้งบนผิวของอิฐมวลเบาสถานะแห้งและสถานะเปียก แสดงได้ดังรูปที่ 3.66



(ก) ในอากาศว่าง



(ข) ติดตั้งบนผิวของอิฐมวลเบาสถานะแห้ง



(ค) ติดตั้งบนผิวของอิฐมวลเบาสถานะเปียก

รูปที่ 3.66 ผลการตอบสนองทางความถี่ของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอทีแบบไม่มีชิพวงจรรวม

จากผลการจำลองในรูปที่ 3.66 พบว่า ผลการตอบสนองทางความถี่ของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอทีแบบไม่มีชิพวงจรรวมในกรณีอากาศว่างและติดตั้งบนผิวของอิฐมวลเบาสถานะแห้งมีแนวโน้มเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ตอบสนองของตัวกรองความถี่ทั้ง 5 ความถี่ อันเป็นผลมาจากการออกแบบให้ตัวกรองความถี่มีระนาบกราวด์ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบของวัสดุที่นำมาติดตั้ง สำหรับในกรณีติดตั้งบนผิวของอิฐมวลเบาสถานะเปียกจะพบว่ามีความต่างกับในกรณีสถานะแห้ง อันเนื่องมาจากผลของขนาดกราวด์ของตัวกรอง

ความถี่มีขนาดเล็กเกินไปในกรณีที่ใช้กับอิฐมวลเบาสถานะเปียก อย่างไรก็ตามสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ด้วยการเพิ่มขนาดของระนาบกราวด์ให้มีขนาดที่เหมาะสมได้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 สายอากาศส่งและรับสัญญาณ

4.1.1 ผลการทดสอบสายอากาศส่งและรับสัญญาณ

จากการออกแบบและจำลองผลสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมโดยใช้โปรแกรมจำลองผลทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Parameter) และมีโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่สร้างบนแผ่นปริ้น (PCB) ชนิดสองหน้า โดยด้านหน้าเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลมและด้านหลังเป็นระนาบกราวด์สี่เหลี่ยม ป้อนสัญญาณให้สายอากาศด้วยคอนเนคเตอร์ชนิด SMA ดังแสดงในรูปที่ 4.1



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ผลกระทบต่อค่าคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ออกแบบ และป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $P_x = 15$ มิลลิเมตร และ $P_y = 18$ มิลลิเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของระนาบกราวด์ สรุปได้ดังตารางที่ 4.1 – 4.4

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม เมื่อระนาบกราวด์มีขนาดเท่ากับ 100 มิลลิเมตร $\times$ 100 มิลลิเมตร และป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $P_x = 15$ มิลลิเมตร และ $P_y = 18$ มิลลิเมตร

a_e (mm)	S ₁₁ (dB)			Gain (dB)
	920 MHz	922.5 MHz	925 MHz	
44.19	-8.65	-12.32	-13.71	2.06
44.40	-3.98	-11.52	-8.02	2.06
45.90	-0.68	-0.59	-0.51	1.94

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม เมื่อระนาบกราวด์มีขนาดเท่ากับ 120 มิลลิเมตร $\times$ 120 มิลลิเมตร และป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $P_x = 15$ มิลลิเมตร และ $P_y = 18$ มิลลิเมตร

a_e (mm)	S ₁₁ (dB)			Gain (dB)
	920 MHz	922.5 MHz	925 MHz	
44.36	-12.73	-18.02	-13.95	3.40
44.38	-13.96	-20.13	-14.09	3.62
44.40	-15.00	-19.86	-13.14	3.62
44.42	-12.38	-16.98	-13.32	3.62

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม เมื่อระนาบกราวด์มีขนาดเท่ากับ 150 มิลลิเมตร $\times$ 150 มิลลิเมตร และป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $P_x = 15$ มิลลิเมตร และ $P_y = 18$ มิลลิเมตร

a_e (mm)	S ₁₁ (dB)			Gain (dB)
	920 MHz	922.5 MHz	925 MHz	
44.42	-13.26	-17.17	-12.58	3.86
44.43	-12.72	-17.05	-12.98	3.84
44.39	-13.86	-16.95	-12.01	3.86

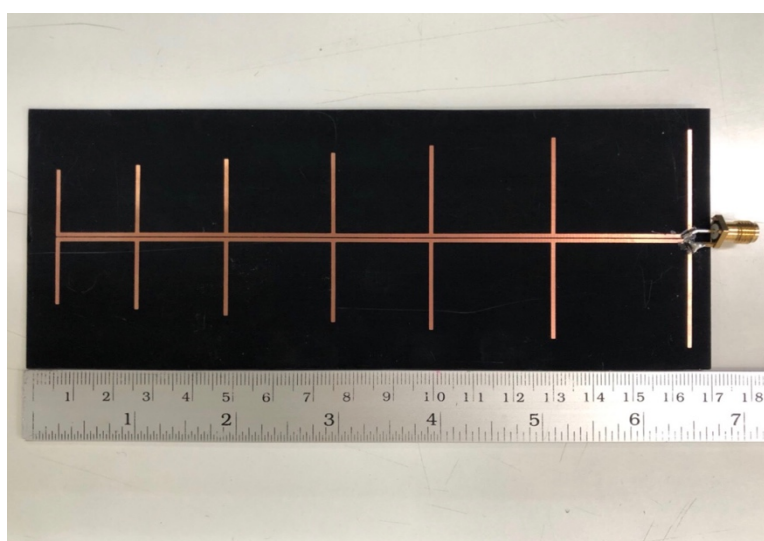
a_e (mm)	$ S_{11} $ (dB)			Gain (dB)
	920 MHz	922.5 MHz	925 MHz	
44.29	-17.03	-13.18	-8.84	3.86

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม เมื่อระนาบกราวด์มีขนาดเท่ากับ 250 มิลลิเมตร $\times$ 250 มิลลิเมตร และป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง $P_x = 15$ มิลลิเมตร และ $P_y = 18$ มิลลิเมตร

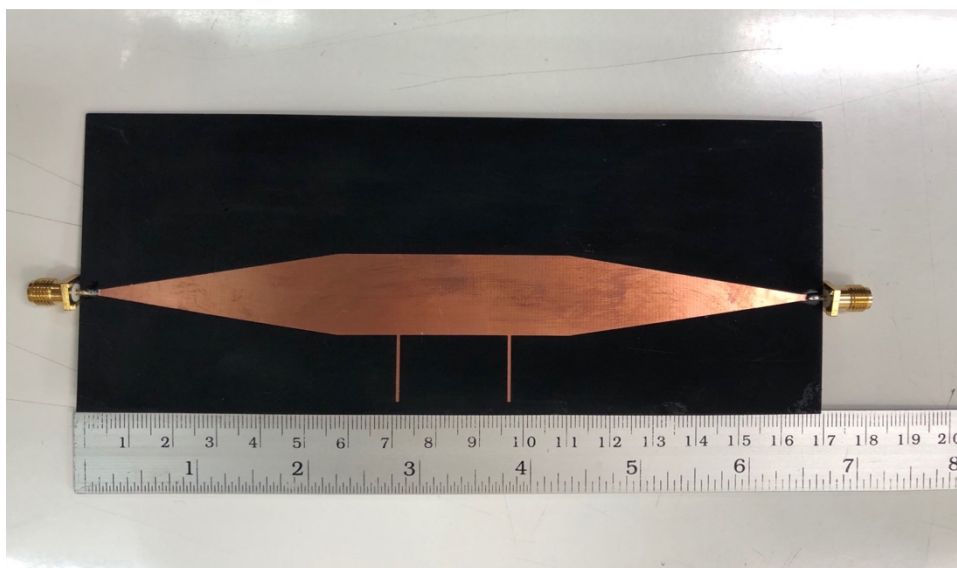
a_e (mm)	$ S_{11} $ (dB)			Gain (dB)
	920 MHz	922.5 MHz	925 MHz	
44.40	-11.34	-11.52	-10.40	3.99

4.2 การทดสอบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดี

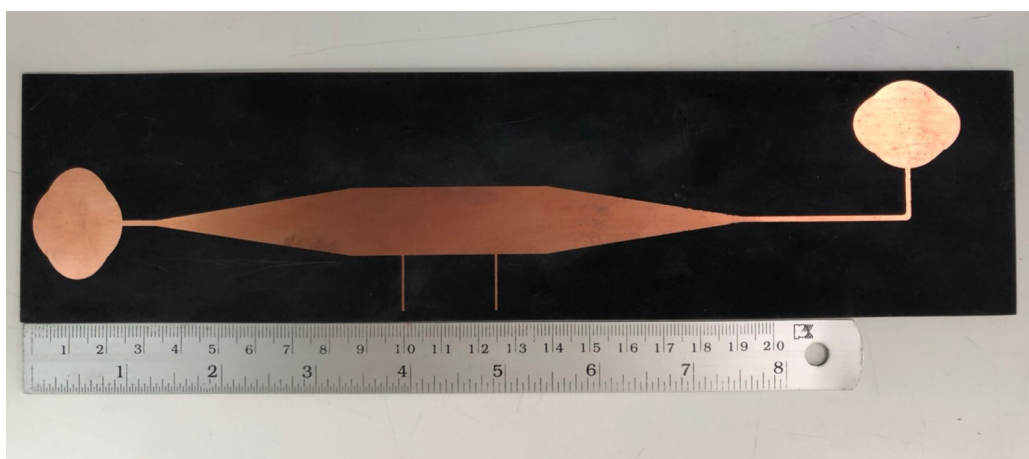
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายต้นแบบของโครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ตัวกรองความถี่ และเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดี จากผลการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.3 – 4.5 พบว่า สามารถกรองความถี่ได้ที่ความถี่กลาง เท่ากับ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อติดตั้งเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีซีพวงจรรวมห่างจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลเป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร พบว่า พารามิเตอร์ S_{21} ของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะไม่มีสัญญาณที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่ในกรณีที่วางห่างออกมาที่ระยะทาง เท่ากับ 20 เซนติเมตร พบว่าความถี่ที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้เปลี่ยนไป ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานต้องเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับเซ็นเซอร์ให้เหมาะสม



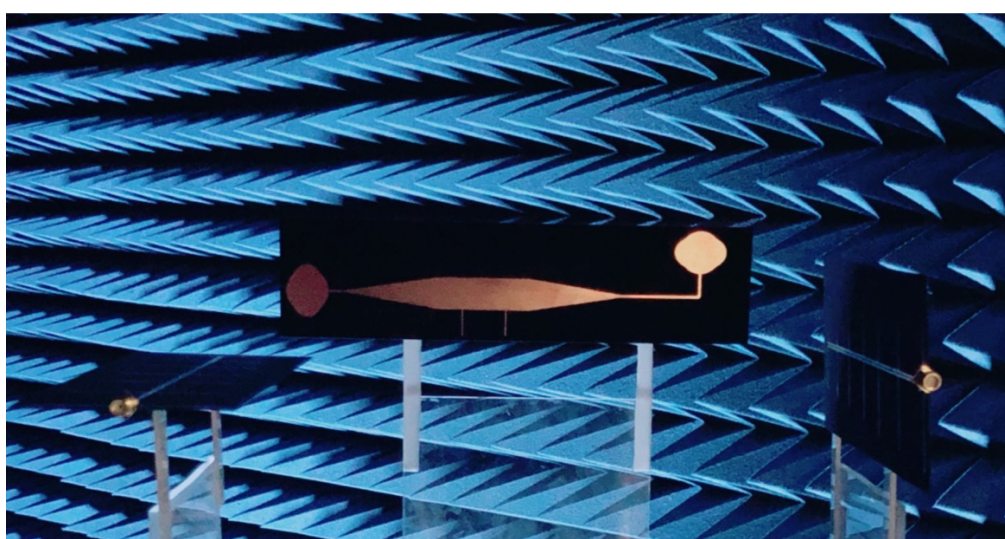
(ก)



(ข)

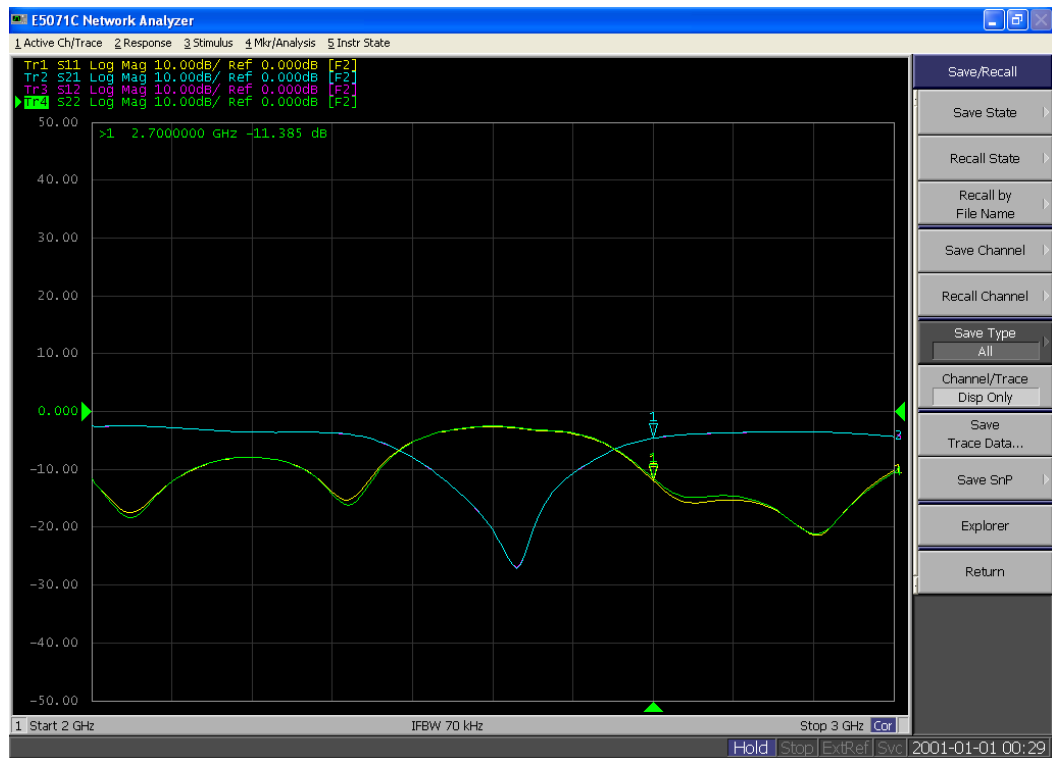


(ค)



(ง)

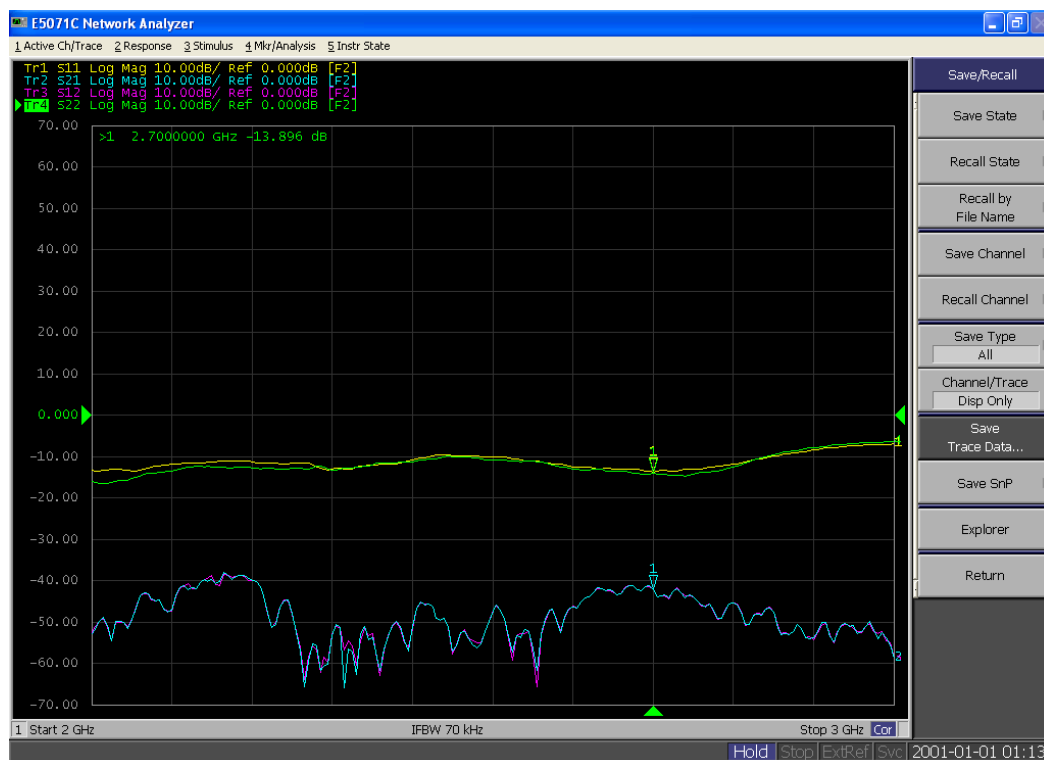
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ตัวกรองความถี่ และเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดี



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ S ของตัวกรองความถี่



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ S ของเซ็นเซอร์เมื่อวางห่างจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ระยะทาง เท่ากับ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ S ของเซ็นเซอร์เมื่อวางห่างจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ระยะทาง เท่ากับ 20 เซนติเมตร

4.3 การทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดิน

4.3.1 ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดิน

การทดสอบวัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน มีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1. ทดสอบด้วยมิเตอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ระบบดิจิทัล 4 ใน 1 โดยทำการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของดินในแต่ละตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.13 ซึ่งมีเตอร์นี้สามารถแสดงผลได้ทั้งหมด 5 ค่า ดังนี้

DRY+	คือ ความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 5 %
DRY	คือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงระหว่าง 5 – 10 %
NOR	คือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงระหว่าง 10 – 20 %
WET	คือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงระหว่าง 20 – 30 %
WET+	คือ ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 30 %



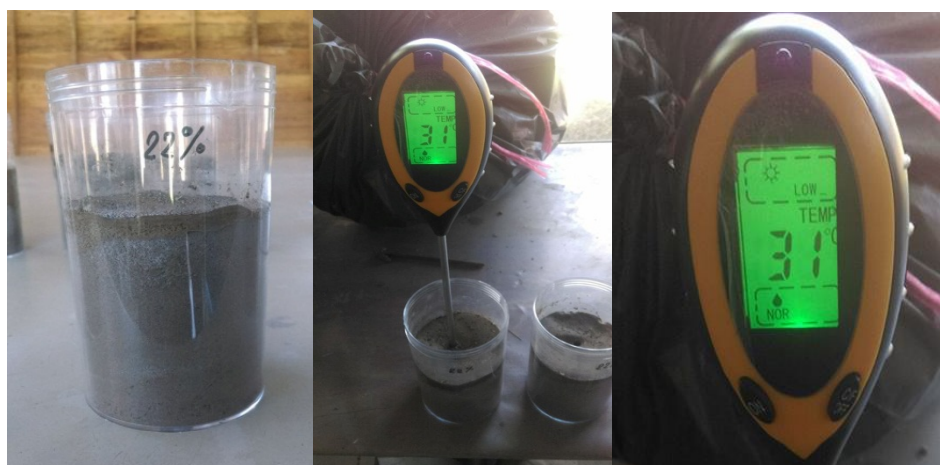
รูปที่ 4.6 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 0 %



รูปที่ 4.7 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 20 % (มีปริมาณน้ำเท่ากับ 100 กรัม)



รูปที่ 4.8 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 21 % (มีปริมาณน้ำเท่ากับ 105 กรัม)



รูปที่ 4.9 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 22 % (มีปริมาณน้ำเท่ากับ 110 กรัม)



รูปที่ 4.10 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 23 % (มีปริมาณน้ำเท่ากับ 115 กรัม)



รูปที่ 4.11 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 24 %
(มีปริมาณน้ำเท่ากับ 120 กรัม)



รูปที่ 4.12 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 25 %
(มีปริมาณน้ำเท่ากับ 125 กรัม)



รูปที่ 4.13 วัดความชื้นสัมพัทธ์ของดิน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของดินเท่ากับ 30 %
(มีปริมาณน้ำเท่ากับ 150 กรัม)

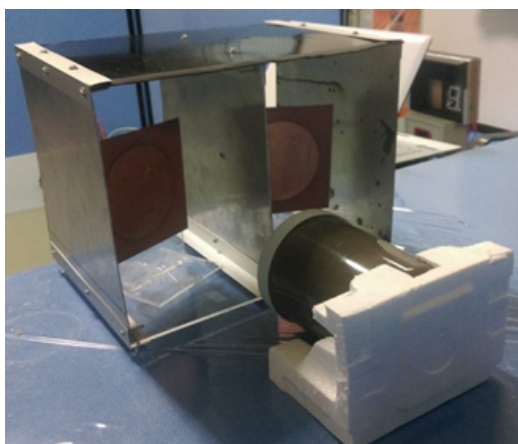
จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.13 เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยการเติมน้ำลงไปในภาชนะที่บรรจุดินที่มีน้ำหนัก 500 g โดยเติมน้ำที่ปริมาณ 0, 100, 105, 110, 115, 120, 125 และ 150 g เพื่อให้ดินมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0 %, 20 %, 21 %, 22 %, 23 %, 24 %, 25 % และ 30 % ตามลำดับ พบว่า ดินที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0 % คือ DRY+ ดินที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 20 % คือ DRY ดินที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 21 – 22 % คือ NOR ดินที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 23 – 24 % คือ WET และดินที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 25 % คือ WET+ ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของดินที่วัดด้วยมิเตอร์วัดดินระบบดิจิตอล 4 ใน 1

ครั้งที่	% ความชื้นสัมพัทธ์ของดิน				
	0 %	< 20 %	21 - 22 %	23 - 24 %	> 25 %
1	DRY+	DRY	NOR	WET	WET+
2	DRY+	DRY	NOR	WET	WET+
3	DRY+	DRY	NOR	WET	WET+

2. ทดสอบด้วยเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม

การทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูงยิ่ง มีส่วนประกอบ คือ เครื่องส่งและรับสัญญาณย่านความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำหน้าที่ส่งสัญญาณและรับกำลังงานที่สะท้อนกลับมาจากเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม เซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม จำนวน 4 แบบ เพื่อทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์แบบไร้สายสำหรับตรวจสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินที่ทำการทดสอบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arduino UNO R3 สำหรับการประมวลผล จอแสดงผล และกล่องทดสอบซึ่งด้านในกล่องทดสอบติดตั้งสายอากาศส่งและรับสัญญาณ



รูปที่ 4.14 การทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยเซ็นเซอร์ 4 แบบ โดยใช้กระป๋องบรรจุดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 7.5 cm บรรจุด้วยดินแห้ง (DRY+) และดินเปียก (WET+)

ชนิดของเซ็นเซอร์		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	%ความถูกต้อง
1	ดินแห้ง (DRY+)	DRY+	DRY+	WET+	DRY+	DRY+	80
2		DRY+	WET+	DRY+	DRY+	DRY+	80
3		DRY+	DRY+	DRY+	WET+	DRY+	80
4		DRY+	DRY+	DRY+	DRY+	WET+	80
1	ดินเปียก (WET+)	WET+	WET+	WET+	WET+	WET+	100
2		DRY+	WET+	DRY+	DRY+	DRY+	20
3		DRY+	WET+	DRY+	DRY+	WET+	40
4		WET+	WET+	WET+	WET+	WET+	100

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยเซ็นเซอร์ 4 แบบ โดยใช้กระป๋องบรรจุดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10.3 cm บรรจุด้วยดินแห้ง (DRY+) และดินเปียก (WET+)

ชนิดของเซ็นเซอร์		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เปอร์เซ็นต์ความ ถูกต้อง
1	ดินแห้ง (DRY+)	DRY+	DRY+	DRY+	DRY+	DRY+	100
2		DRY+	WET+	WET+	DRY+	DRY+	60
3		WET+	WET+	DRY+	WET+	WET+	20
4		DRY+	DRY+	DRY+	DRY+	DRY+	100
1	ดินเปียก (WET+)	WET+	WET+	WET+	WET+	WET+	100
2		DRY+	WET+	DRY+	DRY+	DRY+	20
3		DRY+	WET+	DRY+	DRY+	WET+	40
4		WET+	WET+	WET+	WET+	WET+	100

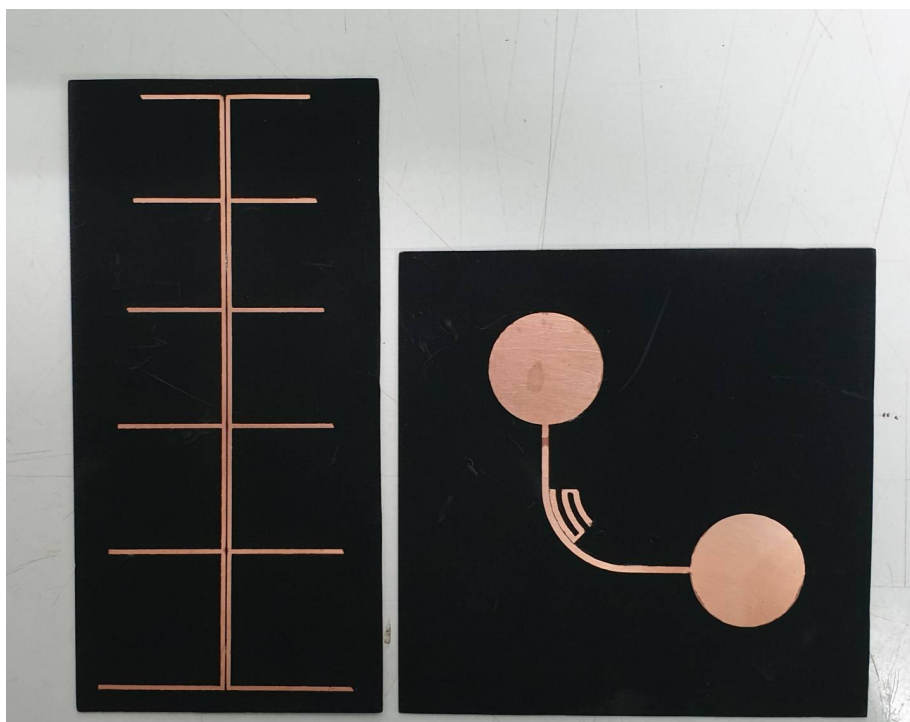
ผลการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ของดินด้วยเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่ใช้ชีวพวงจรรวม 4 รูปแบบ โดยใช้กระป๋องบรรจุดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และ 10.3 เซนติเมตร สรุปผลการทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ จากผลการทดสอบเมื่อใช้กระป๋องบรรจุดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร พบว่า เซ็นเซอร์ทั้ง 4 แบบไม่สามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินได้ถูกต้อง 100 % โดยมีความถูกต้องในการแยกแยะดินแห้งได้เท่ากับ 80 % โดยเซ็นเซอร์แบบที่ 2 สามารถแยกแยะดินเปียกมีความถูกต้องต่ำที่สุดเท่ากับ 20 % แต่อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์แบบที่ 1 และ 4 สามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินได้ถูกต้อง 100 % ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะว่า

กระป๋องบรรจุดินและเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กเกินไปทำให้คลื่นความถี่ที่ตกกระทบและสะท้อนกลับได้น้อย เมื่อทำการทดสอบกับกระป๋องบรรจุดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10.3 เซนติเมตร พบว่า เซ็นเซอร์แบบที่ 1 และ 4 สามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินได้ถูกต้อง 100 % แต่เซ็นเซอร์แบบที่ 2 สามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินแห้งและเปียกได้ถูกต้องเท่ากับ 60 % และ 20 % ตามลำดับ และเซ็นเซอร์แบบที่ 3 สามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินแห้งและเปียกได้ถูกต้องเท่ากับ 20 % และ 40 % ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เซ็นเซอร์แบบที่ 2 และ 3 มีเนื้อที่ของทองแดงน้อยเกินไปทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณได้น้อย

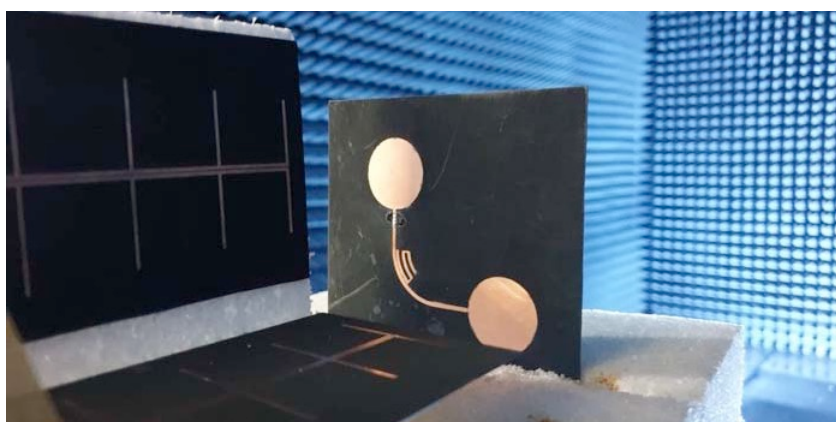
จากผลการทดสอบข้างต้น ซึ่งพบว่า เซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่ใช้ชิพวงจรรวมที่ออกแบบสามารถแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินที่นำมาทดสอบได้ แต่ยังคงมีความผิดพลาดในการแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดินในบางกรณี ดังนั้นจึงได้ปรับปรุง พัฒนาและออกแบบโครงสร้างของเซ็นเซอร์แบบใหม่ รวมถึงออกแบบลักษณะการติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการแยกแยะช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของดิน สำหรับโครงสร้างของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่ใช้ชิพวงจรรวมมีส่วนประกอบอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ สายอากาศ (Antenna) ที่ทำจากวัสดุที่เป็นตัวนำ และวัสดุฐานรอง (Substrate) ทำจากวัสดุที่เป็นสารไดอิเล็กตริกมีความหนาเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร เมื่อจำลองผลด้วยโปรแกรมคำนวณทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าพื้นที่ตัดขวางเรดาร์มากที่สุด

4.4 การทดสอบระบบอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟแบบไม่ใช้ชิพวงจรรวมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเซ็นเซอร์ไร้สาย

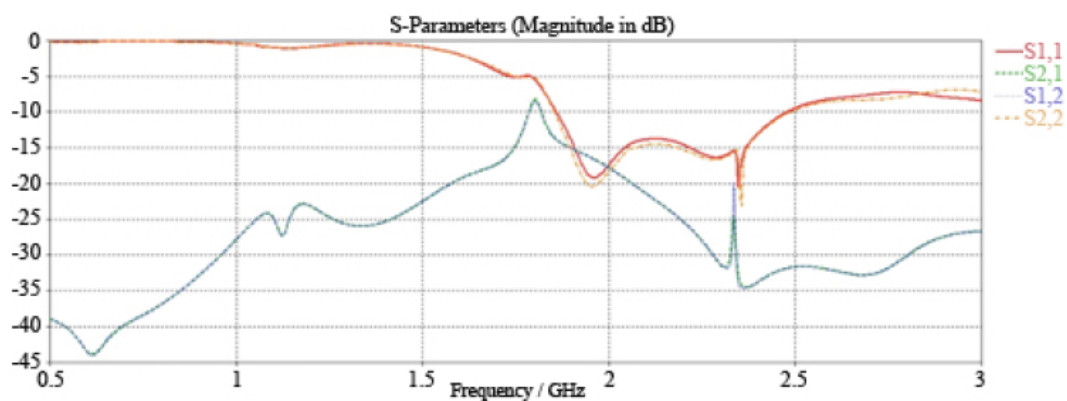
รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายต้นแบบของสายอากาศลูปฟิรียอดิกของเครื่องอ่านข้อมูล (ด้านซ้าย) และแท็กอาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมกับตัวรีโซเนเตอร์แบบโค้ง (ด้านขวา) และภาพถ่ายการติดตั้งการทดสอบของระบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยใช้สายอากาศลูปฟิรียอดิกเป็นสายอากาศส่งและรับสัญญาณของเครื่องอ่านข้อมูล สายอากาศส่งและรับสัญญาณจะติดตั้งโดยวางตั้งฉากซึ่งกันและกันเพื่อลดผลกระทบของการกวนกันของสัญญาณส่งและสัญญาณที่รับได้จากการสะท้อนกลับจากเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ค่าขนาดของพารามิเตอร์ S_{21} (การส่งผ่านกำลังงานจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ) มีค่าเท่ากับ -20 dB ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และความกว้างแถบความถี่ เท่ากับ 700 เมกะเฮิรตซ์ ตั้งแต่ความถี่ 1.8 กิกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งหมายความว่า การส่งผ่านกำลังงานจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของรีโซเนเตอร์ที่ออกแบบไว้ ดังนั้นสามารถใช้คุณสมบัตินี้ในการทำบิตของข้อมูลเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุภายใต้การทดสอบในลักษณะเดียวกันกับเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบมีชิพวงจรรวม [8] ได้



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของต้นแบบของสายอากาศล็อกฟิรูดิก (ด้านซ้าย) และแท็กอาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวมที่มีตัวรีโซเนเตอร์แบบโค้ง (ด้านขวา)



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายของระบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม



รูปที่ 4.17 ค่าขนาดของพารามิเตอร์ S ของระบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีชิพวงจรรวม

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอและออกแบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุด้วยวิธีไม่ทำลายโดยอาศัยหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งสัญญาณ ในการออกแบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีในงานวิจัยนี้เลือกใช้อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีขีพวงจรรวมเพื่อลดต้นทุนการผลิต และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน รวมถึงอายุการใช้งานที่นานกว่าอาร์เอฟไอดีแบบมีขีพวงจรรวม นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลหลายรูปแบบ เช่น สายอากาศแบบไมโครสตริปวงกลม และสายอากาศแบบลูปฟิรียอดิก เป็นต้น สำหรับใช้ในระบบเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีขีพวงจรรวมซึ่งต้องการสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง จากผลการจำลองและการทดสอบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีขีพวงจรรวม พบว่าสายอากาศ และเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบไม่มีขีพวงจรรวมสามารถตอบสนองย่านความถี่ที่สนใจได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุได้เช่นเดียวกันกับเซ็นเซอร์อาร์เอฟไอดีแบบมีขีพวงจรรวม อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์ที่ออกแบบมีความถูกต้องแม่นยำในระดับในระดับหนึ่งดังนั้นในงานวิจัยในอนาคตจะทำการเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications*. New York: Wiley, 1999.
- [2] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez and H. Heinrich, "Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2715 – 2721, Sep. 2005.
- [3] S. Laurens, J. P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, and G. Arliguie, "Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling," *RILEM Materials and Structures*, Vol. 38, 827-832, Jan. 2005.
- [4] O. Buyukozturk, "Electromagnetic properties of concrete and their significance in nondestructive testing," *Transport. Research Board*, Paper No. 970872, 1997.
- [5] U. C. Hasar, "Thickness-independent complex permittivity determination of partially filled thin dielectric materials into rectangular waveguides," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 93, 189-203, 2009.
- [6] U. C. Hasar, "Thickness-independent automated constitutive parameters extraction of thin solid and liquid materials from waveguide measurements," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 92, 17-32, 2009.
- [7] H. Zhang, S. Y. Tan, and H. S. Tan, "An improved method for microwave nondestructive dielectric measurement of layered media," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 10, 145-161, 2008.
- [8] L. Capineri, D. J. Daniels, P. Falorni, O. L. Lopez, and C. G. Windsor, "Estimation of relative permittivity of shallow soils by using the ground penetrating radar response from different buried targets," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 2, 63-71, 2008.

- [9] C. Occhiuzzi, S. Cippitelli, and G. Marrocco, "Modeling, design and experimentation of wearable RFID sensor tag," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 58, No. 8, 2490-2498, Aug. 2010.
- [10] P. F. Baude and S. D. Theiss, "RFID sensor," US 2007/0215709A1, Sep. 2007.
- [11] V. R. Marinov, Y. A. Atanasov, A. Khan, D. Vaselaar, A. Halvorsen, D. L. Schulz, and D. B. Chrisey, "Direct-write vapor sensors on FR4 plastic substrates," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 6, 937-944, Jun. 2007.
- [12] L. Reindl, G. Scholl, T. Ostertag, H. Scherr, U. Wolff, and F. Schmidt, "Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 45, No. 5, 1281-1292, Sep. 1998.
- [13] L. Reindl, C. C. W. Ruppel, S. Berek, U. Knauer, M. Vossiek, P. Heide, and L. Orians, "Design, fabrication, and application of precise SAW delay lines used in an FMCW radar system," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. 49, No. 4, 787-794, Apr. 2001.
- [14] P. R. Foster and R. A. Burberry, "Antenna problems in RFID systems," *IEE Colloq. RFID Technol.*, pp. 31-35, 1999.
- [15] P. Raemonen *et al.*, "Folded dipole antenna near metal plate," in *Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.*, vol. 1, 2003, pp. 848-851.
- [16] D. M. Dobkin and S. M. Weigand, "Environmental effects on RFID tag antennas," in *Proc. IEEE Int. Microw. Symp.*, Jun. 2005.
- [17] J. D. Griffin, G. D. Durgin, A. Haldi and B. Kippelen, "RF tag antenna performance on various materials using radio link budgets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 247 – 250, 2006.
- [18] J. D. Griffin, "A Radio Assay for the Study of Radio Frequency Tag Antenna Performance," Master's Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2005.
- [19] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng and M. Krairiksh, "Determination of dielectric property of construction material products using a novel RFID sensor," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 130, pp. 601- 617, 2012.

- [20] S. Preradovic and N.C. Karmakar, "Chipless RFID: Bar code of the future," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, pp. 87-97, 2010.
- [21] J. Siden, X. Zeng, T. Unander, A. Koptuyug and H. E. Nilsson, "Remote moisture sensing utilizing ordinary RFID tags," in *IEEE Sensors 2007 Conference*, Oct. 2007, pp. 308-311.
- [22] S. Genovesi, F. Costa, M. Borgese, A. F. Dicandia, G. Manara, S. Tedjini and E. Perret, "Enhanced chipless RFID tags for sensors design," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, pp. 1275-1276.
- [23] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng and P. Akkaraekthalin, "A radar-cross section of a passive tag on dielectric material in an RFID sensor application," *Proceedings of the 2015 ECTI International Conference*, Hua Hin, Thailand, June 24-27, 2015.
- [24] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng and P. Akkaraekthalin, "Dielectric material determination using the radar equation in RFID sensor applications," *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Antenna Measurements & Applications*, Chiang Mai, Thailand, November 30- December 2, 2015.
- [25] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich and D. Torrungrueng, "Chipped and chipless RFID sensors for quality monitoring of light weight concrete using the radar equation," *Proceedings of the 2016 ECTI International Conference*, Chiang Mai, Thailand, June 28 – July 1, 2016.
- [26] R. Suwalak, K. Lertsakwimarn, C. Phongcharoenpanich and D. Torrungrueng, "Dual-band chipless RFID sensor for a material quality monitoring application," *Proceeding of the 2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, Okinawa, Japan, October 24-28, 2016, pp. 1004-1005.
- [27] Light weight concrete, [Online] Available:<http://www.ebrindia.com/cellular-light-weight-concrete-blocks.htm>.
- [28] S. Preradovic, I. Balbin, N.C. Karmakar and G.F. Swiegers, "Multiresonator-Based Chipless RFID System for Low-Cost Item Tracking," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, No. 5, pp. 1411-1419, May 2009.

ภาคผนวก

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng and P. Akkaraekthalin, "Dielectric Material Determination Using the Radar Equation in RFID Sensor Applications," Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA2015), 2015.
2. R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich and D. Torrungrueng, "Chipped and Chipless RFID Sensors for Quality Monitoring of Light Weight Concrete Using the Radar Equation," Proceeding of the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016, 2016.
3. R. Suwalak, K. Lertsakwimarn, C. Phongcharoenpanich and D. Torrungrueng, "Dual-band Chipless RFID Sensor for A Material Quality Monitoring Application," 2016 International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP2016), 2016.
4. R. Suwalak, K. Lertsakwimarn, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin and D. Torrungrueng, "Recent Advances in RFID Sensors for Construction Material Monitoring Applications (Invited Paper)," Proceeding of the 2018 International Symposium on Antennas and Propagation, Busan, Korea, October 23-26, 2018.
5. R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin and D. Torrungrueng, "Curved Meander Line Resonators for Chipless RFID Sensors," Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on RFID - Technology and Applications (IEEE RFID-TA 2019), Pisa, Italy, September 25-27, 2019, pp. 26-28.

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการอาร์เอฟไอดีชนิดพาสซีฟแบบไม่ใช้พลังงานรวม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเซ็นเซอร์ไร้สาย

คณะผู้วิจัย สังกัด

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. ผศ.ดร.รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ |
| 2. รศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Dielectric Material Determination Using the Radar Equation in RFID Sensor Applications

Rattapong Suwalak

School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prince of Chumphon Campus,
Chumphon, Thailand
ksrattap@kmitl.ac.th

Danai Torrungrueng

Faculty of Engineering and Technology,
Asian University,
Chonburi, Thailand
danait@asianu.ac.th

Chuwong Phongcharoenpanich

Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kpchuwon@kmitl.ac.th

Prayoot Akkaraekthalin

Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
Bangkok, Thailand
prayoot@kmutnb.ac.th

Abstract— A radar-cross section (RCS) of passive printed tags in a radio frequency identification (RFID) is presented to determine a dielectric constant of a material under test (MUT). In this paper, a printed loop tag with a meander-line is employed as an RFID sensor. The optimum parameters of the proposed RFID sensor are obtained using the CST Microwave Studio program. This paper employs two RFID sensors with different RCS to improve the accuracy of dielectric material determination. The relation between the read range (R_{max}) and the real part of dielectric constant (ϵ'_r) can be used to determine the dielectric constant of MUT.

Keywords—dielectric material; nondestructive testing; printed tag; radar-cross section; RFID sensor.

I. INTRODUCTION

Nondestructive testing (NDT) applications have been growth in several years, such as the radar, the capacitance, the electrical resistance and the ultrasonic waves [1]-[5]. In addition, the passive radio frequency identification (RFID) employed as an NDT wireless sensor that has been increasing in demand. In [1], a family of polymer-doped tags and fully characterized for the detection of ambient humidity is presented. The authors use a sensitive chemical species based on PEDOT: PSS to dope a properly shaped slot carved into a folded-like patch tag. Furthermore, a hybrid RFID strain sensor utilizing both chipped and chipless approaches was presented in [6] to detect an embroidered RFID-enabled sensor. Both read-range extraction technique, relying upon the detection of the threshold power required to activate an RFID IC and the radar-cross section (RCS)-based technique are reported. The

RCS variation of the strain sensors, however, has been measured using a two-port vector network analyzer (VNA).

In traceability to identify and inspect qualities of material products, especially for construction material products (CMPs), such as light weight concrete (LWC), mortar specimens and concrete, a reliable NDT technique is required to evaluate their properties whether they are suitable for construction usage. Therefore, the improvement of a reliable sensor technique for determining CMP qualities is necessary.

This paper proposes printed passive meander-line tags to determine the dielectric constant of lossy LWCs using the radar equation. Note that the RFID tag performances are affected by many factors such as tag locations, size, especially, environment or properties of the material on or near an RFID tag. The traditional RFID sensors require additional specific sensors, such as humidity, temperature, motion, light and sound sensors, to be integrated with RFID tags [7]-[12]. On the contrary, the proposed RFID sensor does not require additional specific sensors to determine dielectric properties of MUTs and only specifically designed tags are required [13].

This paper is organized as follows. Section II presents a configuration and design equations of RFID sensors. Numerical results and discussions are shown in Section III. Finally, Section IV discusses conclusions.

II. CONFIGURATION AND DESIGN EQUATIONS OF RFID SENSORS

To determine the dielectric constant of MUTs, a passive RFID tag is employed as a wireless sensor, called an RFID-sensor. The printed loop tag with a meander-line is placed on

the surface of an MUT is shown in Fig. 1. The tag antenna is designed such that its input impedance is conjugately matched with the IC chip impedance of NXP UCODE to achieve a good matching between the IC chip and antenna for a maximum power transfer. In this paper, the MUT of interest is a lossy LWC used in construction. In addition, the received power (P_r) and the read range (R_{mat}) of RFID sensor in the presence of an MUT are calculated by using the radar equation instead of the modified Friis transmission formula in [13] due to using the low-sensitivity receiver of the RFID reader to reduce the cost.



Fig. 1. An MUT with an attached tag.

Using the radar equation, the received power can be expressed as

$$P_r = \sigma \cdot P_{reader-tx} \cdot \frac{(G_{reader-tx})^2}{4\pi} \left[\frac{\lambda}{4\pi R_{mat}^2} \right]^2, \quad (1)$$

where σ is the RCS of the MUT with an attached tag, $P_{reader-tx}$ is the input power of the reader antenna, $G_{reader-tx}$ is the gain of the reader antenna, λ is the free space wavelength, and the R_{mat} is the distance between the RFID reader antenna and the tag antenna in the presence of the MUT. By manipulation of (1), we can express the read range $R_{max,mat}$ as

$$R_{max,mat} = \sqrt[4]{\sigma \cdot \left(\frac{P_{reader-tx}}{P_{r,min}} \right) \cdot \frac{(G_{reader-tx})^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2}, \quad (2)$$

where $P_{r,min}$ is the minimum received power of the RFID reader. Using the same RFID reader, the read ranges of two RFID sensors #1 and #2 (denoted as $R_{max,1}$ and $R_{max,2}$, respectively) are related as follows:

$$\frac{R_{max,1}}{R_{max,2}} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

where σ_1 and σ_2 are the RCSs of two RFID sensors #1 and #2 in the presence of MUT, respectively. It should be pointed out that the ratio of R_{max} in (3) does not depend on the parameters of RFID reader ($P_{reader-tx}$, $G_{reader-tx}$, and $P_{r,min}$), and it solely depends on the ratio of σ .

III. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS

To study characteristics of the RFID sensor placed on lossy LWCs, a printed loop tag with a meander-line is designed

using the CST Microwave Studio program [14] based on the Finite Integral Technique (FIT). Note that the RFID sensors in Figs. 2 and 3 are obtained by optimizing their dimensions to almost conjugately match with the IC chip impedance of $16.5-j148.7 \Omega$ at 922.5 MHz in the presence of a lossy LWC, where each RFID sensor is placed at the center location of the LWC as shown in Fig. 1. The LWC has the dimension of $600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ with the dielectric constant ($\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) of $2.5-j0.2$ at 922.5 MHz for the dry state and $8-j1.08$ for the saturated state. This paper presents two printed loop tags with a meander-line as RFID sensors to improve the accuracy of the dielectric constant determination, where RFID sensors are designed on the FR-4 substrate with the dielectric constant of 4.3 and the loss tangent of 0.025. Only the dry-state LWC is of interest in this paper for illustration purpose.

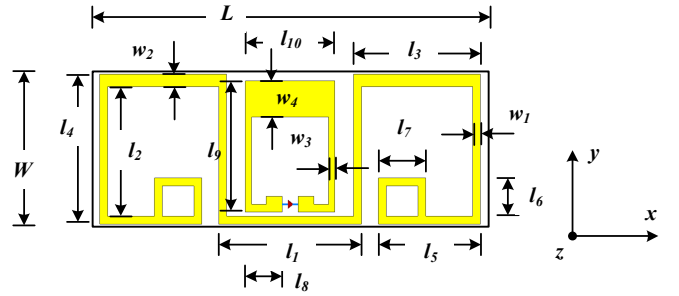


Fig. 2. The RFID sensor#1 (S_1) structure.

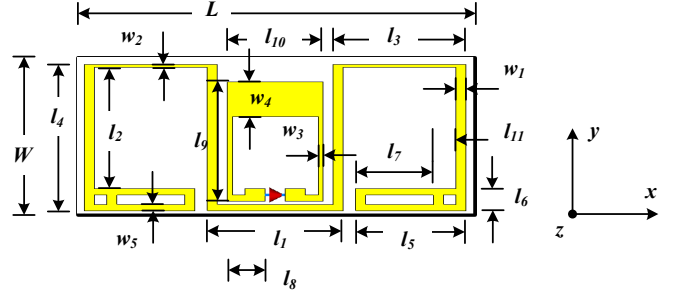


Fig. 3. The RFID sensor#2 (S_2) structure.

From simulations, the optimum parameters and the characteristics of the RFID sensors mounted on the lossy LWC for the dry state are illustrated in Table I and Table II, respectively. In Table II, $G_{tag,mat}$ and τ_{mat} are the gain of the tag antenna and the power transmission coefficient of the RFID sensor in the presence of the lossy LWC, respectively [13]. Note that the overall dimensions of two RFID sensors are $39.5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$.

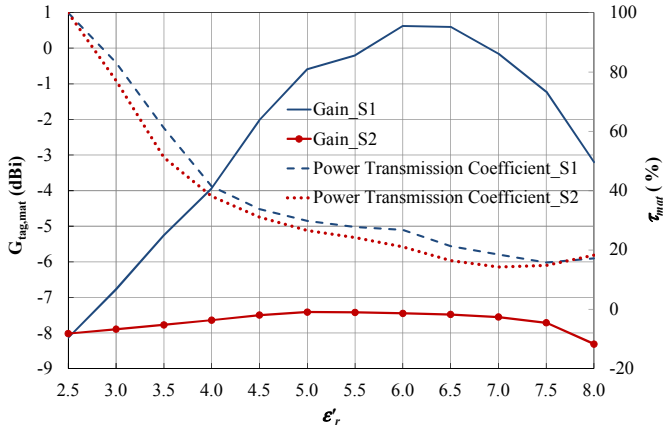
Figure 4 shows the gain and the power transmission coefficient of two RFID sensors in the presence of the lossy LWC. It is obvious that the gain of both RFID sensors are totally different, except at $\epsilon'_r = 2.5$. However, their power transmission coefficients are similar. Note that the RCS of RFID sensor #2 is significantly greater than that of RFID sensor #1 as displayed in Fig. 5. Therefore, $R_{max,2}$ is greater than $R_{max,1}$ as shown in Fig. 5 as expected (see (3)).

TABLE I. OPTIMUM PARAMETERS OF THE RFID SENSORS.

Parameter (mm)	RFID Sensor#1	RFID Sensor#2	Parameter (mm)	RFID Sensor#1	RFID Sensor#2
L	39.5		l_8	3.75	3.75
W	25		l_9	21	19
l_1	15	13.5	l_{10}	9.5	9.5
l_2	21.5	19.3	l_{11}	-	2.25
l_3	12	13.25	w_1	1	1
l_4	24	23.3	w_2	2	0.5
l_5	9	11	w_3	1	0.5
l_6	6	3.5	w_4	6	5.5
l_7	7.5	7.75	w_5	-	1

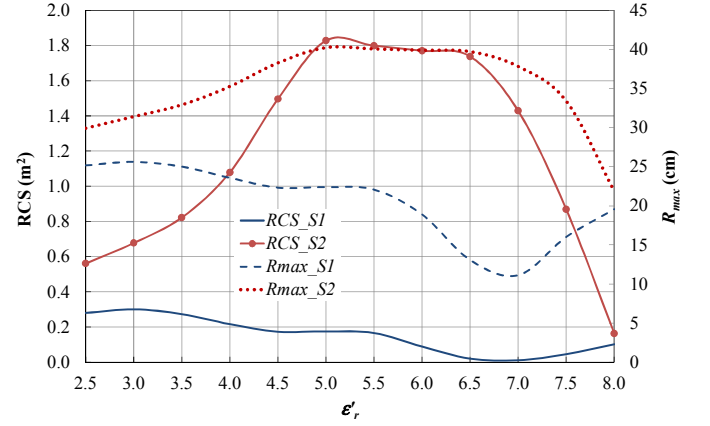
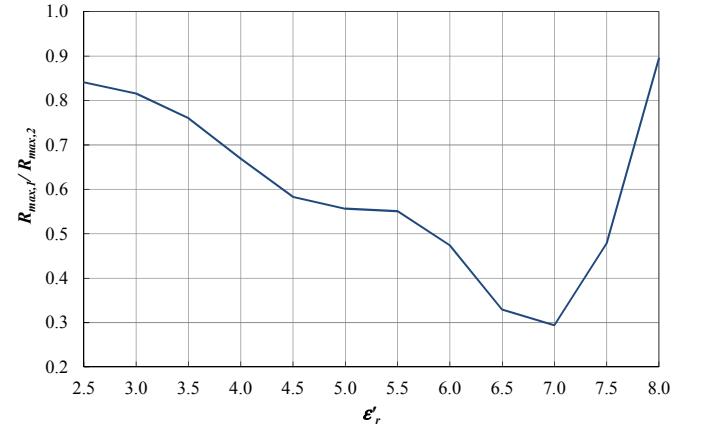
TABLE II. RFID SENSOR CHARACTERISTICS FOR THE LOSSY LWC WITH THE DRY STATE.

Characteristic	RFID Sensor#1	RFID Sensor#2
Input Impedance (Ω)	16.5+j148.3	15.7+j148.6
$G_{tag,mat}$ (dBi)	-8.1	-8.2
τ_{mat} (%)	99.98	99.94
Polarization	Linear	

Fig. 4. The gain and power transmission coefficient of RFID sensors #1 and #2 ($S1$ and $S2$) as a function of ϵ'_r with $\epsilon''_r=0.2$ at 922.5 MHz.

To determine the dielectric constant of the lossy LWC under test, the relation between $R_{max,1}/R_{max,2}$ and ϵ'_r of two RFID sensors designed for the dry-state LWC is plotted in Fig. 6. It is found that the ratio of R_{max} tends to decrease as increasing ϵ'_r until ϵ'_r is equal to 7, and is dramatically increased to 0.89 at $\epsilon'_r=8$. Similarly, the plot of the ratio of R_{max} versus ϵ'_r of two RFID sensors designed for the saturated-state LWC can be obtained as well. After obtaining both plots of dry-state and saturated-state LWCs, a straightforward procedure of the dielectric-constant determination of the lossy

LWC under test can be readily followed as discussed in detail in [13].

Fig. 5. The RCS and R_{max} of RFID sensors #1 and #2 ($S1$ and $S2$) on the lossy LWC as a function of ϵ'_r with $\epsilon''_r=0.2$ at 922.5 MHz.Fig. 6. The plot of $R_{max,1}/R_{max,2}$ versus ϵ'_r of two RFID sensors with $\epsilon''_r=0.2$ at 922.5 MHz.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by the Thailand Research Fund through the TRF Senior Research Scholar Program under Grant No. RTA5780010 and the TRF Grant for New Researcher Program under Grant No. TRG5880015.

IV. CONCLUSIONS

The determination of the dielectric constant based on the radar equation is proposed. The characteristics of two RFID sensors #1 and #2 in the presence of the lossy LWC under test are studied. It is found that the read range in the presence of the lossy LWC depends on the value of ϵ'_r . Therefore, it can be employed as the wireless sensor to determine the dielectric constant of LWCs. Future works include a study on the chipless RFID sensor based on the radar equation. In addition, relevant measurements will be performed as well.

REFERENCES

- [1] S. Manzari, C. Occhiuzzi, S. Nawale, A. Catini, C. Di Natale, G. Marrocco, "Polymer-doped UHF RFID tag for wireless-sensing of humidity," in Proc. IEEE International Conference on RFID, Orlando, pp. 124-129, April 2012.
- [2] S. Laurens, J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz and G. Arliguie, "Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling," RILEM Materials and Structures, vol. 38, pp. 827-832, Jan. 2005.
- [3] O. Buyukozturk, "Electromagnetic properties of concrete and their significance in nondestructive testing," Transport. Research Board Paper no: 970872 (1997).
- [4] J. Hugenschmidt and R. Loser, "Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar," RILEM Materials and Structures, vol. 41, pp. 785-792, June 2007.
- [5] U. C. Hasar, "Thickness-independent complex permittivity determination of partially filled thin dielectric materials into rectangular waveguides," Progress In Electromagnetics Research, vol. 93, pp. 189-203, 2009.
- [6] M. Hasani, A.Vena, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, and M. M. Tentzeris, "Implementation of a dual-interrogation-mode embroidered RFID-enabled strain sensor," in Proc. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 12, Oct. 2013.
- [7] C. Calabrese and G. Marrocco, "Meandered-slot antennas for sensor-RFID tags," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 7, pp. 5-8, 2008.
- [8] C. Occhiuzzi, S. Cippitelli, and G. Marrocco, "Modeling, design and experimentation of wearable RFID sensor tag," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 58, no. 8, pp. 2490-2498, Aug. 2010.
- [9] M. Brandl, J. Grabner, K. Kellner, F. Seifert, J. Nicolics, S. Grabner, and G. Grabner, "A low-cost wireless sensor system and its application in dental retainers," IEEE Sensors Journal, vol. 9, no. 3, pp. 255-262, Mar. 2009.
- [10] N. Gay and W.-J. Fischer, "Ultra-low-power RFID-based sensor mote," 2010 IEEE Sensors Conference, pp. 1293-1298, Nov. 2010.
- [11] Z. Xiao, X. Tan, X. Chen, S. Chen, Z. Zhang, H. Zhang, J. Wang, Y. Huang, P. Zhang, L. Zheng, and H. Min, "An Implantable RFID Sensor Tag toward Continuous Glucose Monitoring," IEEE Trans. Biomedical and Health Informatics, vol. 19, no. 3, pp. 910-919, May 2015.
- [12] D. P. Rose, M. E. Ratterman, D. K. Griffin, L. Hou, N. K.-Loughnane, R. R. Naik, J. A. Hagen, I. Papautsky, and J. C. Heikenfeld, "Adhesive RFID Sensor Patch for Monitoring of Sweat Electrolytes," IEEE Trans. Biomedical Engineering, vol. 62, no. 6, June 2015.
- [13] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng, and M. Krairiksh, "Determination of dielectric property of construction material products using a novel RFID sensor," Progress In Electromagnetics Research, vol. 130, pp. 601-617, September 2012.
- [14] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2006.

Dual-band Chipless RFID Sensor for A Material Quality Monitoring Application

Rattapong Suwalak¹, Kittima Lertsakwimarn², Chuwong Phongcharoenpanich³, and Danai Torrungrueng⁴

¹School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prince of Chumphon Campus, Chumphon, Thailand

²Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi, Thailand

³Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

⁴Faculty of Engineering and Technology, Asian University, Chonburi, Thailand

Abstract – The dual-band chipless RFID sensor is proposed to employ as a wireless material quality monitoring application. A printed perpendicular rectangular loop tag and a printed concentric rectangular loop tag are designed and optimized using the CST Microwave Studio program. The chipless RFID sensors are located on a material surface to determine qualities of a material under test. From numerical results, it is found that the proposed dual-band chipless RFID-sensor has a significant different radar cross section (RCS) compared with the single-band one. Therefore, both RFID sensors can be used together in the material quality monitoring system to improve the accuracy.

Index Terms — Chipless RFID sensor, dielectric material, dual-band frequency, light weight concrete, radar cross section.

1. Introduction

The traditional radio frequency identification (RFID) is widely used in many applications. However, it is employed as an RFID sensor, which can be categorized into two types, i.e., the chipped and chipless RFID sensors. In order to minimize cost, the chipless RFID sensor is employed instead of the chipped one. In [1]-[2], a chipless tag based on multiresonators was presented. It is possible to decode the information by measuring the magnitude and phase of the backscattered tag signal and also the radar cross section (RCS). In addition, the polarization diversity technique to encode information was presented [3]. This technique is based on the versatility of the rotation angle of split ring resonators. Furthermore, a hybrid RFID strain sensor utilizing both chipped and chipless approaches was presented in [4] to detect an embroidered RFID-enabled sensor. However, these techniques of the chipless RFID sensors require a two-port vector network analyzer (VNA).

To improve the accuracy of the material quality monitoring, the dual-band chipless RFID tag without a VNA is proposed in this paper to minimize the system cost.

2. Analysis and Design of Chipless RFID sensors

A passive RFID tag without any IC chip, called a chipless RFID sensor, is employed as a wireless sensor to determine the dielectric constant of the material under test (MUT) and finally its quality as shown in Fig. 1. The chipless tag can sense MUTs through their RCS characteristic. Therefore, the

chipless RFID sensors are designed and optimized to maximize associated RCS by using an EM simulation program. Note that the received power (P_r) and the read range (R_{mat}) of chipless RFID sensors in the presence of an MUT are calculated by using the radar equation instead of the modified Friis transmission formula employed in [5] due to using the low-sensitivity receiver of the RFID reader to reduce the system cost.

Using the radar equation, the received power can be expressed as

$$P_r = \sigma \cdot P_{reader-tx} \cdot \frac{(G_{reader-tx})^2}{4\pi} \left[\frac{\lambda}{4\pi R_{mat}^2} \right]^2, \quad (1)$$

where σ is the RCS of an MUT with an attached chipless RFID tag, $P_{reader-tx}$ is the input power of the reader antenna, $G_{reader-tx}$ is the gain of the reader antenna, λ is the free space wavelength, and the R_{mat} is the distance between the RFID reader antenna and the tag antenna in the presence of the MUT. Rearranging (1), we can express the read range $R_{max,mat}$ as

$$R_{max,mat} = \sqrt[4]{\sigma \cdot \left(\frac{P_{reader-tx}}{P_{r,min}} \right) \cdot \frac{(G_{reader-tx})^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2}, \quad (2)$$

where $P_{r,min}$ is the minimum received power of the RFID reader.

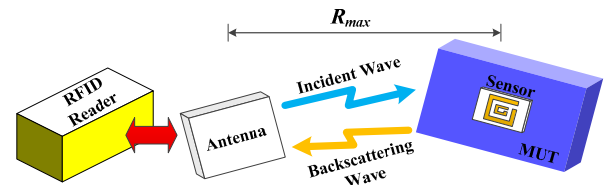


Fig. 1. A chipless RFID-sensor system.

3. Results

This paper presents two structures of tag antennas based on the printed loop configuration, where they are designed and optimized using the CST Microwave Studio program [6] to maximize associated RCS. The optimum tag antenna

parameters are tabulated in Table I and Table II below. The light weight concrete (LWC) with the dielectric constant $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ is employed as an MUT in this study.

The printed perpendicular rectangular loop tag is proposed to use as a chipless RFID sensor, called Sensor#1, is shown in Fig. 2. It is a single-band chipless RFID tag operating at the frequency of 922.5 MHz.

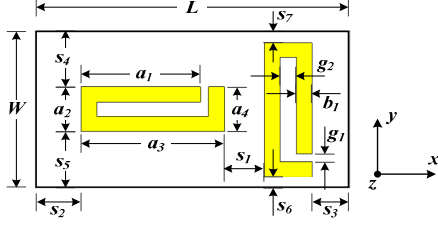


Fig. 2. A perpendicular rectangular loop tag structure.

TABLE I

Optimum Parameters of Chipless RFID Sensor#1

Parameter (mm)	Dimension	Parameter (mm)	Dimension
L	39.5	g_2	2
W	25	s_1	5
a_1	15	s_2	5.75
a_2, a_4	6	s_3	4.75
a_3	18	s_4, s_5	7.5
b_1	2	s_6, s_7	1.5
g_1	1		

Figure 3 illustrates the printed dual-band chipless RFID tag structure, called Sensor#2, designed based on a concentric rectangular loop operating at 922.5 MHz and 2.45 GHz.

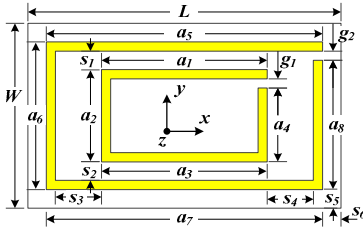


Fig. 3. A concentric rectangular loop tag structure.

TABLE II

Optimum Parameters of Chipless RFID Sensor#2

Parameter (mm)	Dimension	Parameter (mm)	Dimension
L	100	a_8	39
W	50	s_1, s_2	4.5
a_1, a_3	60	s_3, s_4	14
a_2	30	s_5, s_6	3
a_4	26	g_1	2
a_5, a_7	94	g_2	2.5
a_6	44		

The RCSs of Sensor#1 and Sensor#2 are shown in Fig. 4. It is obvious that the averaged RCS of Sensor#2 at 2.45 GHz is more than that of chipless RFID sensors at 922.5 MHz. The maximum read ranges R_{max} are calculated by using (2) and displayed in Fig. 5, which have similar trend as the corresponding RCS in Fig. 4.

4. Conclusions

This paper presents the dual-band chipless RFID tag designed based on the multiresonators operating at 922.5

MHz and 2.45 GHz. It is found that its RCS and R_{max} in the presence of the lossy LWC depends on ϵ'_r . In addition, the RCS of Sensor#2 at frequency of 2.45 GHz is noticeably greater than that of Sensor#1. Therefore, the proposed dual-band chipless RFID tag can be a good candidate as a material quality monitoring sensor. Future works include relevant measurements and performance analysis.

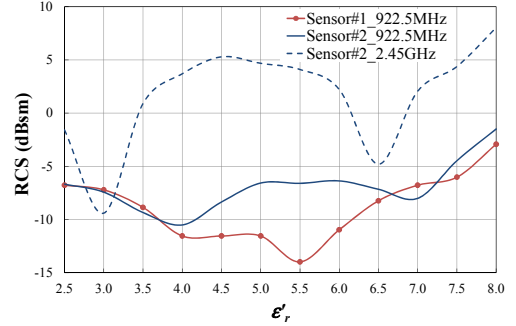


Fig. 4. The RCS of Sensor#1 and Sensor#2 on the lossy LWC as a function of ϵ'_r with $\epsilon''_r = 0.2$.

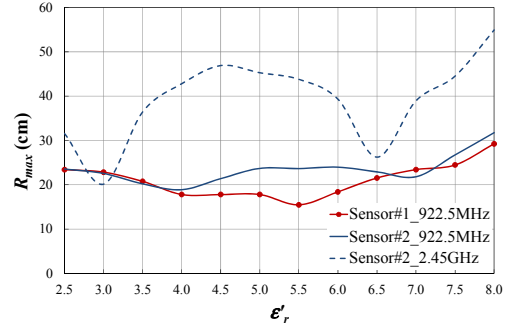


Fig. 5. R_{max} of Sensor#1 and Sensor#2 on the lossy LWC as a function of ϵ'_r with $\epsilon''_r = 0.2$.

Acknowledgment

This work has been supported by the National Research Council of Thailand through the NRCT no. A118-59-077 and the Thailand Research Fund through the TRF Grant for New Researcher Program under Grant No. TRG5880015.

References

- [1] S. Genovesi, F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, "Chipless RFID tag exploiting multifrequency delta-phase quantization encoding," in *Proc. IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 15, pp. 738-741, Mar. 2016.
- [2] S. Preradovic and N. Karmakar, "Chipless RFID tag with integrated sensor," in *Proc. IEEE Sensors Conference*, pp. 1277-1281, Nov. 2010.
- [3] A. Vena, E. Perret, and S. Tedjini, "A compact chipless RFID tag using polarization diversity for encoding and sensing," in *Proc. IEEE International Conference on RFID*, pp. 191-197, April 2012.
- [4] M. Hasani, A. Vena, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, and M. M. Tentzeris, "Implementation of a dual-interrogation-mode embroidered RFID-enabled strain sensor," in *Proc. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, Oct. 2013.
- [5] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng, and M. Krairiksh, "Determination of dielectric property of construction material products using a novel RFID sensor," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 130, pp. 601-617, Sep. 2012.
- [6] CST-Microwave Studio, User's Manual, 2006.