

การออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ สำหรับใช้งานกับของเหลวในบรรจุภัณฑ์

Design of UHF RFID Tag Antenna for Packaging Liquid Applications

พรนิวัฒน์ กุมารากาส¹ สันชัย เอียดปราบ² รัชชัย พุ่มพวง³ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี

³สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

Pornniwat Kumarakas¹ Sanchai Eardprab² Tajchai Pumpoung³ Chuwong Phongcharoenpanich⁴

¹Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

³Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima.

*Corresponding author E-mail: chuwong.ph@kmitl.ac.th

Received: July 5, 2020 Revised: August 20, 2020 Accepted: August 21, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟของประเทศไทย 920-925 MHz แบบพาสซีฟสำหรับประยุกต์ใช้งานตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ โดยสายอากาศแท็กที่ได้ทำการออกแบบนำไปใช้งานร่วมกับชิปวงจรรวม NXP G2XL โครงสร้างของสายอากาศแท็กมีลักษณะเป็นแบบขดวงวน เพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็กและวิธีแมตช์แบบทีเพื่อปรับปรุงการแมตช์อิมพีแดนซ์ สายอากาศแท็กที่นำเสนอมีขนาดกะทัดรัดโดยมีขนาดกว้างและยาวเพียง 21.5 mm × 48.5 mm มีความหนา 0.8 mm ระยะการอ่านไกลที่สุด 4 m ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางและมีโพลาไรซ์เชิงเส้น สายอากาศแท็กที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับการตรวจจับของเหลวได้เป็นอย่างดี โดยอัตราขยายของสายอากาศแท็กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนและมีความสัมพันธ์กับระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็ก

คำสำคัญ: แท็กพาสซีฟ โพลาไรซ์เชิงเส้น ยูเอชเอฟ รอบทิศทาง อาร์เอฟไอดี

Abstract

This article presents the design of the RFID tag antenna for national standard at 920-925 MHz. The passive tag is designed for detection liquid in packaging. The tag antenna has been designed with NXP G2XL integrated circuit chip. The structure of meander line is applied to reduce the physical size of the antenna and T-match method is introduced to improve impedance matching. The presented tag antenna is compact with 21.5 mm × 48.5 mm and a thickness of 0.8 mm. The maximum reading range is 4 m. The radiation pattern of tag antenna is omni-directional with linear polarization. The proposed tag antenna can be efficiently applied for liquid detection. The gain of the tag antenna has clearly changed and related to the reading distance between the reader and the tag antenna.

Keywords: Passive tag, Linear polarization, Ultra High Frequency (UHF), Omni-directional, Radio Frequency Identification (RFID)

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาและความต้องการของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี กลายเป็นหัวข้อการวิจัยที่ได้รับความนิยมสำหรับทั้งโลกธุรกิจและชีวิตประจำวัน โดยทั่วไปแล้วระบบอาร์เอฟไอดีถูกนำไปประยุกต์ใช้หลายด้าน เช่น ร้านค้าปลีก การขนส่ง โลจิสติกส์ การระบุตัวตนของสัตว์ ผลิตภัณฑ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย [1] องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนพื้นฐาน ได้แก่ ระบบควบคุม เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีและแท็ก ซึ่งประกอบด้วยชิปวงจรรวมและสายอากาศ โดยแท็กมีหลักการออกแบบที่แตกต่างจากสายอากาศทั่วไป เนื่องจากต้องทำการแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวมและต้องทำการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ยิ่งไปกว่านั้นความถี่ในการใช้งานย่านเอชเอฟในแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน เช่น ย่านความถี่ที่ใช้งานในประเทศไทย คือ 920-925 MHz [2] อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติยังคงมีปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดี ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างออกไป เช่น การนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์ที่มีของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศแท็กนั้น ควรออกแบบให้มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการระบุของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุด อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน เช่น ความแตกต่างของปริมาณของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบรรจุภัณฑ์ที่นำสายอากาศแท็กไปตรวจจับ รวมถึงค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างสายอากาศแท็กแบบพาสซีฟ โดยใช้เทคนิคการแมตช์แบบที เพื่อให้ได้ค่าสังยุคที่ตรงกับสภาพความต้านทานของชิปวงจรรวม โดยมีอิมพีแดนซ์ $15.87 + j148.73 \Omega$ ที่ความถี่ 922.5 MHz ใช้โครงสร้างการขดลวดเพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็ก ซึ่งข้อกำหนดที่สำคัญในการออกแบบ คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กต้องแมตช์สังยุคกับอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม

สำหรับการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจากสายอากาศแท็กไปยังชิปวงจรรวม จากนั้นศึกษาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบสายอากาศแท็กและงานวิจัยที่มีมาก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการแมตช์แบบที เพื่อใช้ในการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กและวิธีการขดลวดเพื่อใช้ในการลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท็ก โดยวิธีการดังกล่าวถูกใช้เป็นวิธีการในการออกแบบสายอากาศแท็กที่น่าเสนอ แล้วนำวิธีการดังกล่าวมาศึกษาวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแท็กด้วยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยมุ่งเน้นให้พารามิเตอร์ $|S_{11}|(\text{dB})$ ของสายอากาศต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดีของประเทศไทย จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็กที่ดีที่สุดจากการออกแบบมาประยุกต์ใช้งานโดยการวางบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลวบรรจุไว้อยู่ ซึ่งของเหลวที่ใช้ในกรณีศึกษา คือ น้ำที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 78 และทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็กกับของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์

2. การออกแบบสายอากาศแท็ก

จากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เริ่มต้นจากการออกแบบโดยใช้วิธีการแมตช์แบบที หลังจากนั้นทำให้สายอากาศแท็กมีขนาดกะทัดรัดด้วยการใช้วิธีขดลวดและในขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบสายอากาศแท็ก ในการออกแบบสายอากาศแท็กอาร์เอฟไอดีนั้นจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศเพื่อให้แมตช์สังยุคกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของชิปวงจรรวม โดยเลือกใช้ชิปวงจรรวมของบริษัท NXP รุ่น G2XL เป็นตัวถัง TSSOP8 [3] โดยคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของชิปวงจรรวม

คุณลักษณะ	รุ่น NXP G2XL
ความถี่ใช้งาน	860 MHz – 960 MHz
ความจุไฟฟ้าด้านเข้า	1.16 pF
ตัวประกอบคุณภาพ	9.37

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของชิปวงจรรวมที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแท็ก (Z) สามารถแทนได้ดังนี้

$$Z = R + jX \quad (1)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานที่อยู่ในรูปของจำนวนจริง และ X คือ ความต้านทานอยู่ในรูปจำนวนจินตภาพ หรือรีแอคแตนซ์ สำหรับการหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม สามารถหาได้จากตัวประกอบเชิงคุณภาพของชิปวงจรรวมดังนี้

$$R = \frac{1}{\omega QC} \quad (2)$$

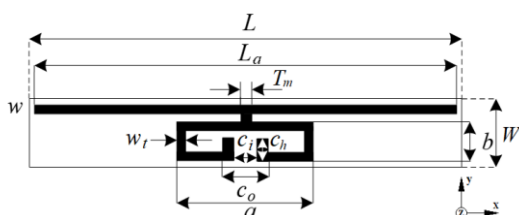
เมื่อ Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ และ C คือ ความจุไฟฟ้า จากสมการคุณสมบัติอิมพีแดนซ์ด้านเข้า สามารถหาค่ารีแอคแตนซ์ (X) ดังนี้

$$X = -j \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

ดังนั้นการคำนวณจากสมการข้างต้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเท่ากับ $15.87-j148.73 \Omega$ เพราะฉะนั้นการแมตช์สัญญาณจะได้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กที่ต้องการออกแบบ คือ $15.87+j148.73 \Omega$

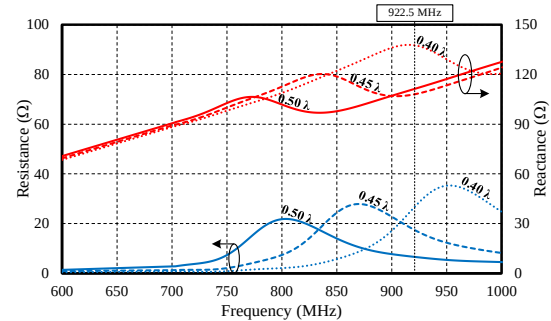
2.1 การออกแบบด้วยการแมตช์แบบที

สายอากาศไดโพลกับโครงสร้างแมตช์แบบที (Tag#1) แสดงดังรูปที่ 1 เมื่อ a และ b คือ ความกว้างและความยาวของโครงสร้างแมตช์แบบที โดยโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแท็กกำหนดให้ $a = 0.04\lambda$ และ $b = 7.5 \text{ mm}$ ขณะที่ c_i , c_o และ c_w คือ พารามิเตอร์ขนาดของชิปวงจรรวมมีขนาด 3 mm , 7 mm และ 4 mm ตามลำดับ พารามิเตอร์ w และ L_a คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศไดโพล ส่วนพารามิเตอร์ W และ $L = L_a + 1$ คือ ความกว้างและความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ ขณะที่ T_m คือ ความกว้างของจุดเชื่อมต่อโครงสร้างแมตช์แบบทีและไดโพล [4]



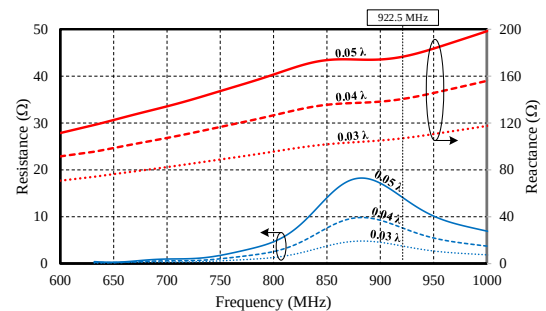
รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไดโพลกับวิธีการแมตช์แบบที (Tag#1)

เบื้องต้นปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ L_a เป็นอันดับแรกเพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแท็ก จากรูปที่ 2 สังเกตได้ว่าถ้าลดความยาว L_a ทั้งความต้านทานและรีแอคแตนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อ $L_a = 0.45\lambda$ มีอิมพีแดนซ์เป็น $16.95+j108.30 \Omega$ ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กมากที่สุด



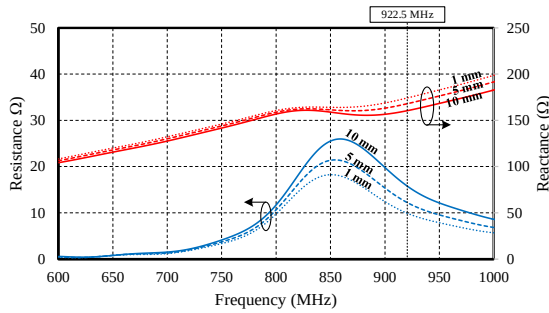
รูปที่ 2 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กกับวิธีการแมตช์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ L_a

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ a จากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่าการเพิ่มพารามิเตอร์ $a = 0.03\lambda$ ถึง $a = 0.05\lambda$ ทำให้ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นพารามิเตอร์ $a = 0.04\lambda$ มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ คือ $7.43+j140.74 \Omega$ ที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 3 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับการแมตช์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ a

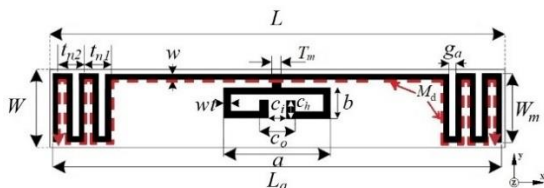
การปรับเปลี่ยนระยะความยาวของพารามิเตอร์ T_m คือ 1 mm , 5 mm และ 10 mm (รักษานขนาดทางกายภาพไว้ให้ใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ a สำหรับการชดเชยเพื่อลดขนาดทางกายภาพในลำดับถัดไป) และจากรูปที่ 4 สังเกตว่าพารามิเตอร์ T_m มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์สายอากาศ โดยพบว่าเมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นแต่ค่ารีแอคแตนซ์ลดลง ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่สุด คือ $17.28+j158.74 \Omega$ เมื่อ $T_m = 10 \text{ mm}$



รูปที่ 4 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล กับวิธีการแมตซ์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ T_m

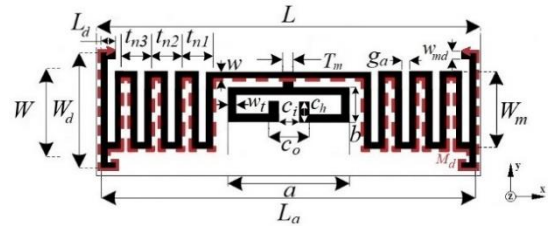
2.2 การออกแบบด้วยวิธีขดวงวน

วิธีการขดวงวน คือ การลดขนาดของสายอากาศแท่ง เพื่อให้มีขนาดกะทัดรัดและเป็นการลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศโดยที่ยังคงความยาวทางไฟฟ้าไว้เท่าเดิม โดยเริ่มต้นระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวมที่มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับที่ต้องการ มีค่า $L_d = 0.45\lambda$ ที่ความถี่ 922.5 MHz ตามที่ได้มีการศึกษาจากหัวข้อก่อนหน้า โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างรอบการขดวงวน $g_d = 1$ mm และความกว้างของขดรอบที่ 1 และ 2 คือ t_{n1} และ t_{n2} เท่ากับ 4 mm เมื่อทำการขดวงวนระยะความยาวโดยรวมของสายอากาศไดโพล จากพารามิเตอร์ L_d เปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์ M_d ซึ่งต้องการทำการขดวงวนสายอากาศไดโพล จำนวน 2 รอบครึ่ง ให้ได้ระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวม $M_d = 0.45\lambda$ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศไดโพลขดวงวนเริ่มต้น กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#2)

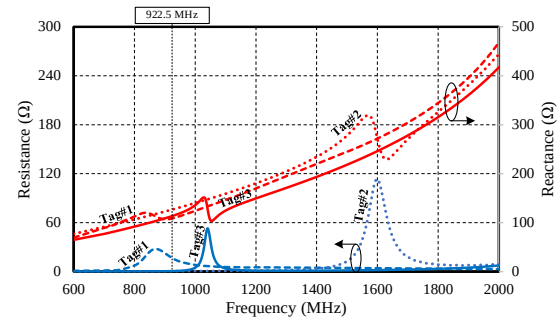
ลำดับต่อมา ทำการปรับพารามิเตอร์ M_d ให้มีความยาวมากขึ้น เพื่อใช้ปรับความถี่เรโซแนนซ์ให้กลับมาด้านความถี่ที่ต่ำกว่าให้ตรงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ โดยทำการขดวงวนสายอากาศไดโพลเพิ่มเป็น 3 รอบครึ่ง และเพิ่มระยะความยาวสุดท้ายของสายอากาศไดโพล คือ พารามิเตอร์ $W_d = 20.5$ mm และ $L_d = 2$ mm โดยมีความกว้าง $w_{md} = 1$ mm จะได้ระยะความยาวทางไฟฟ้าโดยรวม $M_d = 0.8\lambda$ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างสายอากาศไดโพลขดวงวน

กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#3)

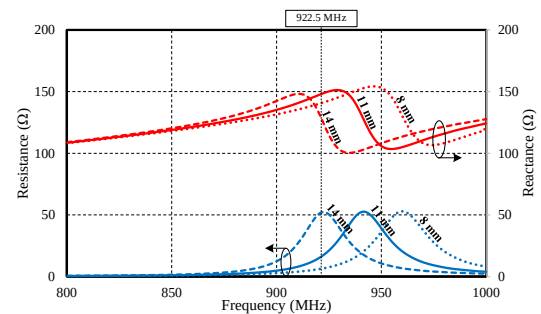
จากการจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Tag#2) สังเกตว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่สูง และเมื่อทำการจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Tag#3) สังเกตว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงกลับมายังความถี่ต่ำ แต่ยังไม่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการจำลองการขดวงวนของสายอากาศไดโพล

กับวิธีการแมตซ์แบบที (Tag#1, Tag#2 และ Tag#3)

จากผลการจำลองของโครงสร้างสายอากาศไดโพล ด้วยวิธีการขดวงวนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการเพิ่มความกว้าง $w_{md} = 2$ mm และปรับพารามิเตอร์ L_d คือ 8 mm 11 mm และ 14 mm ดังแสดงในรูปที่ 8 สังเกตได้ว่าที่ $L_d = 11$ mm มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับที่ต้องการ คือ $19.06 + j147.18 \Omega$ ที่ความถี่ 922.5 MHz

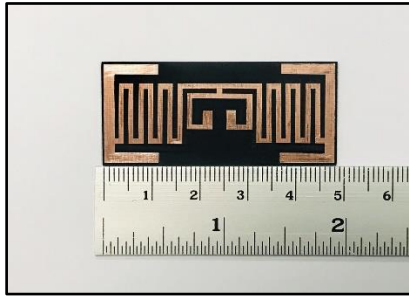


รูปที่ 8 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล

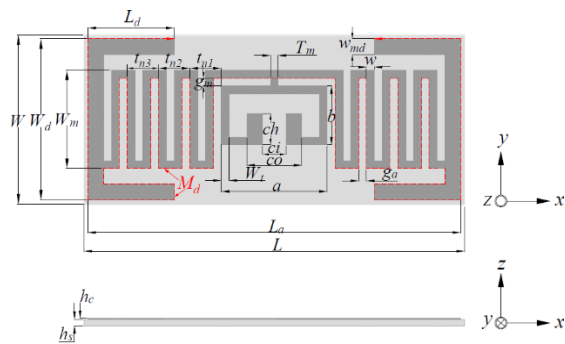
กับวิธีการแมตซ์แบบที โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ L_d

3. การสร้างและทดสอบสายอากาศแท็ก

สายอากาศแท็กสร้างขึ้นจากแผ่นวงจรพิมพ์ มีวัสดุฐานรองเป็นชนิด FR4 ความหนาวัสดุฐานรอง 0.8 mm ความหนาทองแดง 0.035 mm และค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 4.3 ซึ่งขนาดโดยรวมของสายอากาศแท็กคือ $21.5 \text{ mm} \times 48.5 \text{ mm}$ ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 สำหรับขนาดทั้งหมด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 9 สายอากาศแท็กย่านความถี่ยูเอชเอฟ สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี



รูปที่ 10 โครงสร้างของสายอากาศแท็กที่ออกแบบ

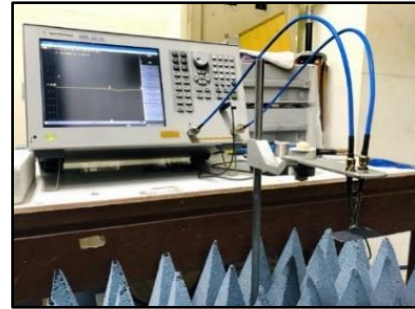
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสายอากาศแท็ก

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
a	13.5	M_d	315.5
b	7.5	T_m	1.0
g_a	1.0	$t_{n1} - t_{n3}$	4.0
H_s	0.8	W_d	20.5
L_a	47.5	W	21.5
L	48.5	W_t	1.0
L_d	11.0	W_m	12.5
g_m	1.0	W_{md}	2.0
h_s	0.8	h_c	0.035

3.1 การทดสอบสายอากาศแท็ก

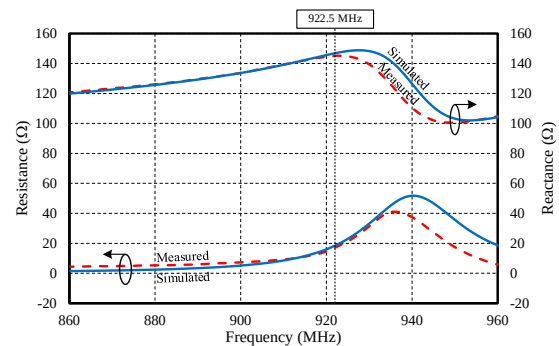
การทดสอบพารามิเตอร์ของสายอากาศแท็ก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B กับโปรแกรมคิฟเฟอเรนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งผล

การจำลองและการทดสอบอิมพีแดนซ์และ $|S_{11}|(\text{dB})$ ของสายอากาศแท็ก ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



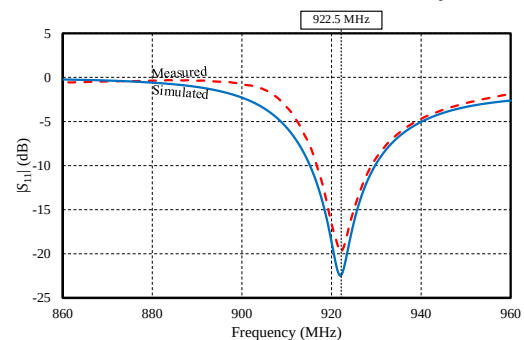
รูปที่ 11 รูปสภาวะการทดสอบอิมพีแดนซ์สายอากาศแท็ก

จากผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็ก สังเกตได้ว่าอิมพีแดนซ์จากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยอิมพีแดนซ์จากการจำลองและการทดสอบ คือ $19.06 + j147.18 \Omega$ และ $17.84 + j145.19 \Omega$ ที่ความถี่ 922.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 12



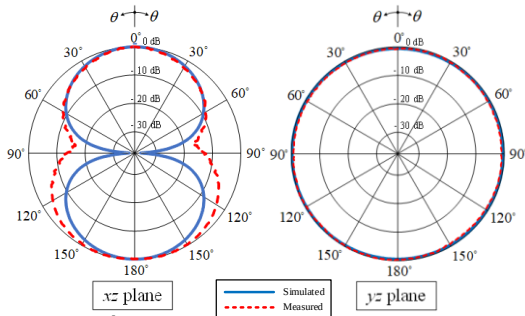
รูปที่ 12 ผลการจำลองและทดสอบอิมพีแดนซ์

ผลการจำลอง $|S_{11}|(\text{dB})$ ของสายอากาศแท็กสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|(\text{dB})$ จากการจำลองและการทดสอบโดยพิจารณา $|S_{11}|(\text{dB})$ ต่ำสุด คือ -22.08 dB และ -19.31 dB ที่ความถี่ 922.5 MHz ตามลำดับ และ $|S_{11}|(\text{dB})$ ต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB คือ ความถี่ 916-929 MHz และความถี่ 918-927 MHz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการจำลองและทดสอบ $|S_{11}|(\text{dB})$

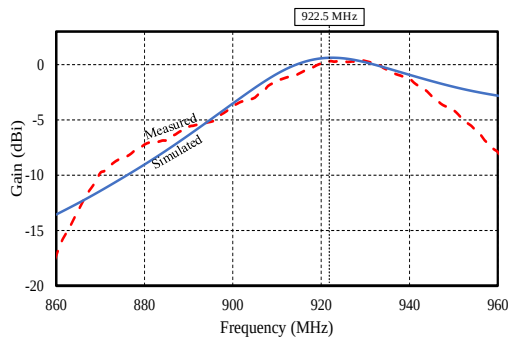
ในขณะที่ผลจากการจำลองและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XZ และ YZ ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการจำลองและทดสอบแบบรูป

การแพร่กระจายคลื่น พิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz

ทดสอบระยะการอ่านในห้องไร้การสะท้อนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ด้วยเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศอาร์เอฟไอดี รุ่น ALR-9780 และ รุ่น ARL-9610-AL ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราขยายของสายอากาศส่งเท่ากับ 5.90 dBi จากการทดสอบระยะการอ่านได้มากที่สุดประมาณ 4 m และอัตราขยายของสายอากาศแท็กจากการจำลองและการทดสอบที่ความถี่ 922.5 MHz คือ 0.63 dBi และ 0.29 dBi ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15

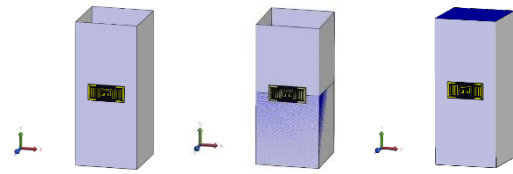


รูปที่ 15 ผลการจำลองและทดสอบอัตราขยาย

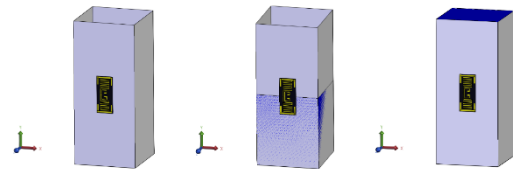
4. การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแท็ก

การจำลองสายอากาศแท็กในการตรวจจับของเหลวเบื้องต้น โดยจำลองตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์แบบขวดพลาสติกที่มีขนาดโดยรวม 85 mm × 190 mm โดยของเหลวที่ทำการทดสอบ คือ น้ำที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 78 [5]–[6] ในการจำลองตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์มีการตรวจจับอยู่ 3 สถานะ คือ ไม่มีน้ำ น้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์ และน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์ ใน

ลักษณะการวาง คือ แนวตั้งและแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 16



(ก) วางสายอากาศแท็กแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์

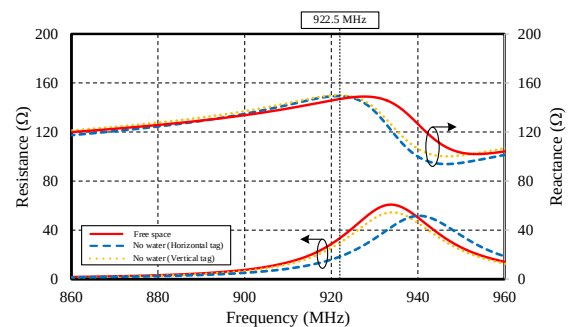


(ข) วางสายอากาศแท็กแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

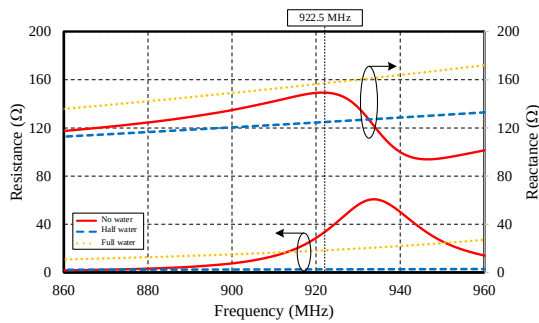
รูปที่ 16 ลักษณะการวางสายอากาศแท็กบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว เพื่อจำลองประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงาน

4.1 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

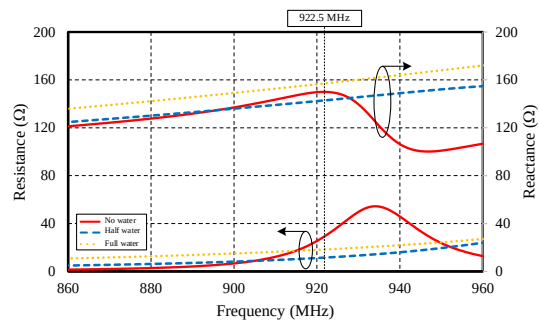
จากผลการจำลองอิมพีแดนซ์ แล้วนำมาเปรียบเทียบเมื่อสายอากาศแท็กอยู่ในอากาศและอยู่บนบรรจุภัณฑ์ ทั้งการวางแนวนอนและแนวตั้ง ในขณะที่ไม่มีของเหลวภายในขวดบรรจุภัณฑ์ อิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของขวดบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนไป แสดงในรูปที่ 17 และในขณะที่มีของเหลวภายในขวดบรรจุภัณฑ์ครึ่งขวดและเต็มขวดนั้น ทำให้ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ยิ่งมากขึ้นตามปริมาณของเหลว ทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงห่างจากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กบนอากาศมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กจากการจำลองในอากาศและบนบรรจุภัณฑ์



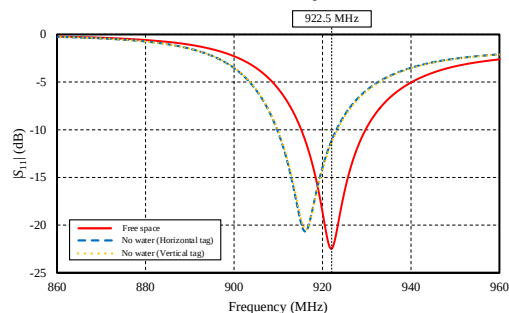
รูปที่ 18 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรจกัณฑ์



รูปที่ 19 ผลการจำลองอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรจกัณฑ์

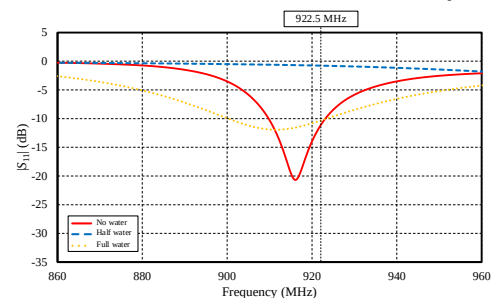
4.2 พารามิเตอร์ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรจกัณฑ์ที่มีของเหลว

การจำลองหาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ (dB) แล้วนำผลมาเปรียบเทียบ เมื่อสายอากาศแท่งอยู่ในอากาศและอยู่บนขวดบรจกัณฑ์ในขณะที่ไม่มีของเหลวภายในขวด สังเกตได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า เนื่องจากค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของขวดบรจกัณฑ์ที่เปลี่ยนไป ซึ่งค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อสายอากาศแท่งอยู่บนอากาศ และวางแนวอนและแนวตั้งบนบรจกัณฑ์ เท่ากับ -22.08 dB -10.99 dB และ -11.20 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 20



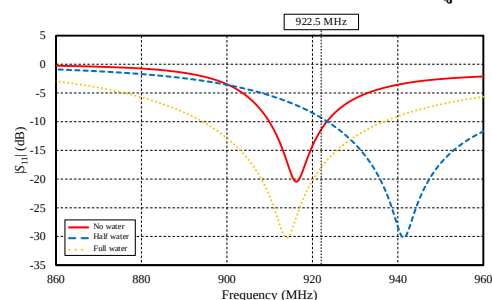
รูปที่ 20 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่งในอากาศและบนบรจกัณฑ์

ทำการจำลองหาค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรจกัณฑ์ 3 สถานะ โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรจกัณฑ์ สังเกตเห็นว่าที่สถานะน้ำครึ่งขวด ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ (dB) สูงกว่า -10 dB เนื่องจากระดับผิวน้ำมีความสูงเท่ากับครึ่งสายอากาศไดโพลพอดี ทำให้สนามไฟฟ้าไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ต่อเนื่องและแทรกสอดไปในผิวน้ำได้ ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งบนอากาศกับบนขวดบรจกัณฑ์ที่มีของเหลวครึ่งขวดต่างกันมาก และที่สถานะน้ำเต็มขวดความถี่เรโซแนนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ที่สถานะไม่มีน้ำ น้ำครึ่งขวด น้ำเต็มขวด เท่ากับ -10.99 dB -0.72 dB และ -10.31 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวอนบนบรจกัณฑ์

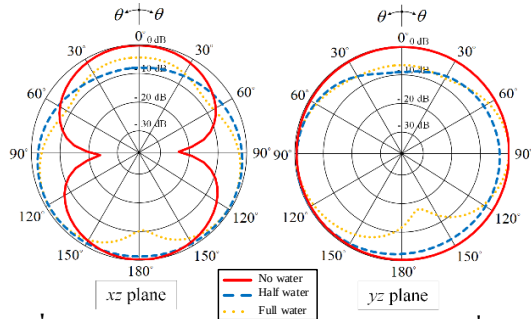
ทำการจำลองหาค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่งบนบรจกัณฑ์ 3 สถานะ โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรจกัณฑ์ สังเกตเห็นว่าที่สถานะน้ำครึ่งขวด ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปทางความถี่ที่สูงกว่า เนื่องจากระดับผิวน้ำมีความสูงเท่ากับครึ่งความยาวทางไฟฟ้าโดยรวมของสายอากาศไดโพล และที่สถานะน้ำเต็มขวดความถี่เรโซแนนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ (dB) ที่สถานะไม่มีน้ำ น้ำครึ่งขวด น้ำเต็มขวด เท่ากับ -11.20 dB -9.39 dB และ -17.79 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 22



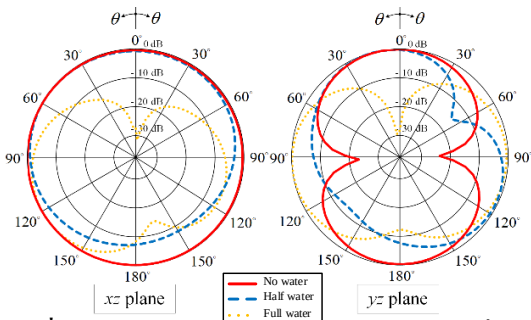
รูปที่ 22 ผลการจำลอง $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศแท่ง โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรจกัณฑ์

4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่งสำหรับตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ระนาบ xz และ yz ที่ความถี่ 922.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 23 และ 24



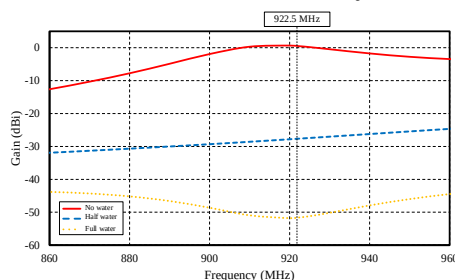
รูปที่ 23 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง เมื่อวางแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์



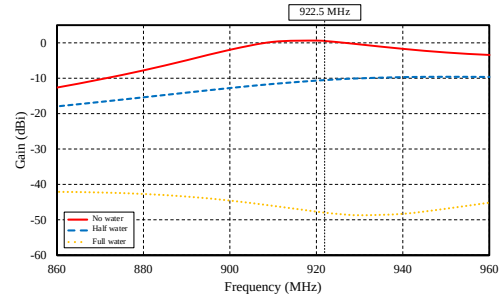
รูปที่ 24 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท่ง เมื่อวางแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

4.4 อัตราขยายของสายอากาศแท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

จากการจำลองจะเห็นว่า การตรวจจับแบบไม่มีน้ำในบรรจุภัณฑ์ ทั้งการวางสายอากาศแท่งรูปแบบแนวนอนและแนวตั้งมีอัตราขยายที่ใกล้เคียงกัน นอกเหนือจากนั้นจะมีอัตราขยายที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 25 และ 26



รูปที่ 25 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งโดยวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 26 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแท่งโดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

4.5 ระยะการอ่านข้อมูลของสายอากาศแท่งบนบรรจุภัณฑ์ที่มีของเหลว

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเชิงซ้อน (Γ) เขียนได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c} \quad (4)$$

เมื่อ Z_a คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่ง Z_c คือ อิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม [6] โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (τ) สามารถหาได้ดังนี้

$$\tau = 1 - |\Gamma|^2 \quad (5)$$

ระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งนั้นถูกจำกัดด้วยความถี่ในการใช้งานและอัตราขยายของสายอากาศ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งโดยสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะแพร่กระจายคลื่นไปยังสายอากาศแท่งและในช่วงเวลาหนึ่งสายอากาศแท่งจะแพร่กระจายคลื่นกลับมายังสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งระยะการอ่านมากที่สุดของสายอากาศแท่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\text{EIRP} \times G_{\text{tag}} \times \tau \times \text{PLF}}{P_{\text{tag}}}} \quad (6)$$

ระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งในอากาศ ทดสอบได้มากที่สุด 4 m แล้วนำค่าระยะการอ่านมาคำนวณหาค่ากำลังงานของสายอากาศแท่งที่ส่งกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้เท่ากับ 0.192 W โดยเครื่องอ่านข้อมูลพิจารณากำลังงานที่ 4 W EIRP ตามมาตรฐานของประเทศไทย โดยปราศจากการสูญเสียโพลาไรซ์ (ตามการจำลองสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่งมีโพลาไรซ์ตรงกัน) จากนั้นใช้

ค่ากำลังงานของสายอากาศแท่งในอากาศที่คำนวณได้เป็นค่าอ้างอิง เพื่อหาระยะการอ่านของสายอากาศแท่งตามสถานะต่าง ๆ โดยใช้สมการที่ 6 ได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ระยะการอ่านที่คำนวณได้ โดยวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์

สถานะ	τ	G_{tag} (dBm)	R (m)
ไม่มีน้ำ	0.87	0.46	3.67
มีน้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์	0.18	-27.62	0.07
มีน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์	0.94	-51.57	0.00

ตารางที่ 4 ระยะการอ่านที่คำนวณได้ โดยวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์

สถานะ	τ	G_{tag} (dBm)	R (m)
ไม่มีน้ำ	0.90	0.45	3.74
มีน้ำครึ่งบรรจุภัณฑ์	0.94	-10.47	1.08
มีน้ำเต็มบรรจุภัณฑ์	0.94	-48.03	0.00

จากตารางที่ 3 และ 4 สังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งในการตรวจจับของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ที่สถานะต่าง ๆ แตกต่างกัน ไม่มาก แต่จะมีเพียงการวางสายอากาศแท่งแนวนอนบนบรรจุภัณฑ์ที่สถานะน้ำครึ่งขวดที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับนั้นมีค่าน้อยมาก อาจเป็นเพราะการวางแท่งในแนวนอนมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่เหมาะสมกับปริมาณน้ำที่มีครึ่งขวดบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้เมื่อดูพารามิเตอร์อัตราขยายของสายอากาศก็มีความสอดคล้องกับสถานะที่มีการตรวจจับของเหลวทั้ง 3 สถานะ

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท่งย่านความถี่เอชเอฟสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบใช้การแมตช์แบบทีเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท่งเพื่อให้เหมาะสมกับชิปวงจรรวมและการขดขวนเพื่อลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศแท่ง โดยสายอากาศแท่งครอบคลุมการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีช่วงความถี่ 918-927 MHz พิจารณาที่ $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่าหรือเท่ากับ

-10 dB แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางอัตราขยายเท่ากับ 0.29 dBi และระยะการอ่านมากที่สุด 4 m เมื่อนำสายอากาศแท่งมาประยุกต์ใช้งานตรวจจับของเหลวในบรรจุภัณฑ์ ปรากฏว่าสายอากาศแท่งสามารถตอบสนองต่อของเหลวได้ดี สังเกตได้จากอัตราขยายของสายอากาศแท่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำค่าอัตราขยายของสายอากาศแท่งมาคำนวณหาค่าระยะการอ่านระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท่ง สังเกตว่าระยะการอ่านมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายของสายอากาศแท่ง ทั้ง 3 สถานะ ในรูปแบบการวางสายอากาศแท่งแนวนอนและแนวตั้งบนบรรจุภัณฑ์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์และ $|S_{11}|$ (dB) สังเกตว่าการวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนขวดบรรจุภัณฑ์สามารถแยกสถานะของเหลวในขวดบรรจุภัณฑ์ได้ชัดเจนกว่าการวางสายอากาศแท่งแนวตั้งบนขวดบรรจุภัณฑ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenzeller, RFID Handbook, John Wiley and Sons, 2003.
- [2] D. Dobkin, The RF in RFID Passive UHF in Practice, Elsevier, 2008.
- [3] NXP Semiconductors, July 2020. [Online]. Available: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SL3ICS1002_1202.pdf.
- [4] T. Pumpoung, "Design of UHF Tag Antenna for Wideband RFID System," Ph.D. dissertation, Dept. Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2015.
- [5] Y. Zhang, L. Li, Y. Lu, Y. Zhang and H. Liu, "High Performance UHF RFID Tag Antennas on Liquid Filled Bottles," Progress In Electromagnetics Research, vol. 165, pp. 83-92, 2019.
- [6] A. Rida, L. Yang, and M. Tentzeris, RFID-Enabled Sensor Design and Applications, Artech House, 2010.