

การประยุกต์ใช้สายอากาศระนาบแบบ 2 คลื่นความถี่ในการวิเคราะห์ ระดับความชื้นของข้าวเปลือก

Application of dual band planar antenna to analyze the paddy moisture level

ปรามินทร์ วงษ์เจริญ* และ ประพนธ์ ลีกุล

Poramintra Wongcharoen* and Prapan Leekul

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

*Email: poramintra.w@rbru.ac.th

Received: December 27, 2022; Revised: March 21, 2023; Accepted: April 07, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการแยกระดับความชื้นของข้าวเปลือกด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศระนาบ 2 ความถี่ ที่ติดตั้งตัวสะท้อนแบบมุมเพื่อเพิ่มอัตราการขยายและควบคุมทิศทางคลื่น ณ ความถี่ 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในการทดสอบวัดความชื้น สายอากาศตัวที่ 1 ต่อเข้ากับช่องเอาต์พุตของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อส่งกำลังงานไปที่ข้าวเปลือกและสายอากาศตัวที่ 2 เชื่อมต่อกับช่องอินพุตทำหน้าที่รับกำลังงานที่ส่งผ่านจากข้าวเปลือกตัวอย่าง ระดับความชื้นที่พิจารณาอยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึง 22 แบ่งเป็น 6 ระดับ โดยแต่ละระดับความชื้นทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง จากการทดสอบพบว่าที่ความถี่ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ ความชื้นร้อยละ 12, 16 และ 22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเฉลี่ยอยู่ที่ -30.87 -30.73 และ -30.53 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ขณะที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเฉลี่ยอยู่ที่ -38.87 -37.25 และ -35.47 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของทั้ง 2 ความถี่ อยู่ที่ 0.02 และ 0.2 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการส่งผ่านกำลังงานในคาบเวลาเดียวกันที่ความถี่ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีพิสัยในการจำแนกระดับความชื้นที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีพิสัยการจำแนกระดับความชื้นข้าวเปลือกที่แตกต่างอย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้การจำแนกมีความแม่นยำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ 2 ความถี่ จึงได้รับการประยุกต์ใช้ในการแยกระดับความชื้นข้าวเปลือก

คำสำคัญ : ความชื้นข้าวเปลือก, ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน, สายอากาศระนาบแบบ 2 ความถี่

Abstract

This article offers a moisture content classification of paddy by using the transmission coefficient (S_{21}) obtained from dual band planar antennas installed on corner reflectors to increase gain and control the direction of antenna beam at the frequencies of 0.915 and 2.45 GHz. In the experiments, the first antenna was set as transmitting antenna connected to output channel of Vector Network Analyzer (VNA) while the second was set as receiving antenna connected to input channel to receive the power through

to the paddy. The paddy sample used in the experiments was varied the moisture content for 6 level in the range 12-22%. The measurements were repeatedly done for 10 times at each moisture content level. The results showed that the average of measured transmission coefficients at the frequency of 0.915 GHz were -30.87, -30.73, and -30.53 dBm at the moisture content level of 12%, 16%, and 22%, respectively while they were -38.87, -37.25, and -35.47 dBm at the frequency of 2.45 GHz. Moreover, the averaged standard deviation of measured results at both frequencies were 0.02 and 0.2, respectively. It can be concluded that transmission coefficients have distinguished narrow range at the frequency 0.915 GHz, but they have wider and obvious classification range at the 2.45 GHz frequency. Consequently, the dual band of transmission coefficients investigation are considered to apply for the moisture content classification of paddy.

Keywords : Paddy moisture level, Transmission coefficient, Dual band planar antenna

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญเพราะเป็นอาหารหลักของประชากรส่วนใหญ่กว่าหนึ่งร้อยประเทศทั่วโลกคิดเป็นปริมาณการเพาะปลูก 700 ล้านตันปี หรือ 470 ล้านตันข้าวสาร ซึ่งไทยเป็น 1 ใน 3 ประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่เนื่องจากประชากรไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกี่ยวกับภาคการเกษตร มีการเพาะปลูกข้าวคิดเป็นร้อยละ 50 ของพื้นที่สำหรับการเกษตรกรรมทั้งหมด มีผลผลิตแบ่งเป็นปริมาณการบริโภคภายในประเทศร้อยละ 55 และปริมาณการส่งออกร้อยละ 45 คิดเป็นรายได้ของประเทศไทยร้อยละ 20 [1,2] โดยปกติข้าวเปลือกมีระดับความชื้นฐานเปียก (wet basis) เมื่อเก็บเกี่ยวอยู่ที่ร้อยละ 18-24 หลังจากนั้นจึงนำไปลดความชื้นให้อยู่ในระดับความชื้นฐานเปียกที่ร้อยละ 14-15 เพื่อการบริโภคภายในประเทศ และการส่งออกไปขายต่างประเทศหรือการเก็บรักษามะลัดพันธ์ สำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเกินร้อยละ 15 ในส่วนของน้ำหนักและราคาจะถูกปรับลดลงตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายใน [3] รูปแบบการลดความชื้นในข้าวเปลือกของชาวนาคือการตากข้าวบนลานกว้างเพื่อให้อุณหภูมิจากดวงอาทิตย์ และการเคลื่อนที่ของอากาศนำความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกให้ได้มากที่สุด ซึ่งการประมาณระดับความชื้นข้าวเปลือกอาศัยประสบการณ์ของชาวนา และไม่มีการสอบเทียบด้วยเครื่องมือวัดความชื้นก่อนนำไปขาย ส่งผลให้ชาวนาประสบปัญหาการถูกตัดราคาเมื่อข้าวเปลือกมีระดับความชื้นเกิน

ร้อยละ 15 [3-4] ดังนั้นการสร้างเครื่องมือวัดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความน่าเชื่อถือจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งเสริมในด้านการแปรรูปผลผลิตให้เป็นไปตามกลไกตลาดเพื่อช่วยแก้ปัญหาด้านราคาผลผลิตของเกษตรกร

การวัดความชื้นข้าวมีวิธีตรวจวัดทั้งแบบทางตรง (direct method) และแบบทางอ้อม (indirect method) การวัดทางตรงเกี่ยวข้องกับการคำนวณผลต่างน้ำหนักข้าวเปลือกทั้งก่อนและหลังการอบลดความชื้น แม้ว่าเป็นวิธีวัดความชื้นที่มีความแม่นยำแต่ใช้เวลานาน การวัดแบบทางอ้อมเกี่ยวข้องกับการวัดความชื้นซึ่งสัมพันธ์กับความต้านกระแสไฟฟ้า หรือความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือก คลื่นอินฟราเรดระยะใกล้ คลื่นไมโครเวฟ [5] ในปี 2018 โร และคณะนำเสนอเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยสอบเทียบค่าความชื้นกับเมล็ดข้าวเปลือก ถั่วเหลือง และข้าวสาลีสามารถวัดความชื้นได้ในช่วงร้อยละ 8-25 ความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ ± 1 [7] แต่ข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำของวิธีนี้คือต้องเตรียมปริมาณข้าวเปลือกให้เหมาะสมกับภาชนะต่อมาในปี 2019 ลิน และคณะนำเสนอเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นเมล็ดข้าวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์คลื่นในย่านใกล้อินฟราเรด (NIR) แสดงผลประเมินค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ความชื้นข้าวเปลือกในช่วงความชื้นร้อยละ 13-30 มีความแม่นยำอยู่ที่ 0.936 [8] เช่นเดียวกับการศึกษาความชื้นข้าวเปลือก ราวิ และคณะในปี 2014 ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบด้วยคลื่นแสงในย่านใกล้

อินฟราเรด แสดงผลประเมินค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใจ (R^2) มีความแม่นยำอยู่ที่ 0.97 [9] แต่งานวิจัยดังกล่าวมีข้อจำกัดในด้านสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการทดสอบและเครื่องมือวิเคราะห์ผลมีราคาสูง ต่อมาในปี พ.ศ. 2561 ประพันธ์ ลีกุล และพรพิมล ฉายแสง นำเสนอการประยุกต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแบ่งระดับความชื้นข้าวเปลือกระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่งที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ [6] ผลการวิจัยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกที่มีผลต่อพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญตามคุณสมบัติค่าไดอิเล็กตริกของข้าวเปลือกที่ระดับความชื้น 56 – 64 % ซึ่งยังไม่อยู่ในระดับความชื้นที่ยังคงคุณภาพของข้าวเปลือก แต่มีความน่าสนใจในการศึกษาปัจจัยแปรผันของความชื้นข้าวเปลือกตามคุณสมบัติค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งบทความบทวนของสถิติกับตา ได้อธิบายถึงข้อข้อดีอย่างชัดเจนในการใช้สายอากาศที่แพร่กระจายแบบมีทิศทางสำหรับการวัดความชื้นวัสดุขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติค่าไดอิเล็กตริกด้วยเทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟเนื่องจากการสอบเทียบ (calibration) สามารถชดเชยค่าการลดทอนของวัสดุที่เกิดจากอุณหภูมิและช่องว่างระหว่างวัสดุได้ง่าย [10] คุณสมบัติค่าไดอิเล็กตริกที่แปรผันตรงกับความชื้นในผลิตภัณฑ์เกษตรเป็นประเด็นที่มีการศึกษาแพร่หลาย [11-15] และมีความเป็นไปได้ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับนำไปช่วยเหลือเกษตรกรแก้ไขปัญหาด้านราคาผลผลิตจากการตัดราคาเนื่องจากความชื้นของผลิตภัณฑ์เกษตรเกินมาตรฐาน

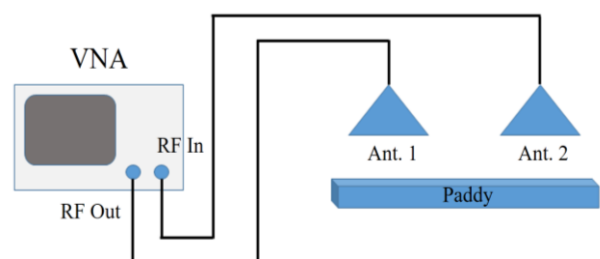
บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ระดับความชื้นข้าวเปลือกด้วยการส่งผ่านกำลังงานคลื่นความถี่โดยประยุกต์ใช้สายอากาศระนาบแบบ 2 คลื่นความถี่ คือ 0.915 เพื่อใช้อ้างอิงผลความชื้นข้าวเปลือกตามที่มีงานวิจัยนำเสนอก่อนหน้านี้ และ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงข้อจำกัดด้านการจำแนกระดับความชื้นข้าวเปลือกและการประยุกต์ใช้งานสำหรับการทดสอบวัดระดับความชื้นข้าวเปลือกแบ่งเป็น 6 ระดับ ในช่วงร้อยละ 12 ถึง 22 มีเนื้อหาประกอบด้วย บทความส่วนแรกเสนอการวิเคราะห์ความสามารถและข้อจำกัดในงานก่อนหน้านี้เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาระบบตรวจวัด ส่วนที่ 2 อธิบายวิธีวิจัยการจำลองโครงสร้าง ประสิทธิภาพ และแบบรูปการ

แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนที่ 3 แสดงการจำลองการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นข้าวเปลือกด้วยสายอากาศระนาบ 2 ความถี่ โดยการปรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกให้สอดคล้องกับความชื้นร้อยละ 12 ถึง 22 ส่วนที่ 4 การทดสอบการวัดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกทั้งหมด 6 ระดับ โดยทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละระดับความชื้น สุดท้ายเป็นการสรุปผล

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบการวัดที่นำเสนอ

วิธีวัดความชื้นข้าวเปลือกที่นำเสนอในบทความนี้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เครือข่ายจากกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ซึ่งเกิดจากการสะท้อนผ่านวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับสายอากาศส่งและรับ อุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายทำหน้าที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่อง RF Out ผ่านสายโคแอกเซียลส่งออกไปสายอากาศตัวที่ 1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกไปในทิศทางตั้งฉากกับข้าวเปลือก เมื่อกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสะท้อนผ่านข้าวเปลือกมาที่สายอากาศตัวที่ 2 ผ่านสายโคแอกเซียลไปที่ช่อง RF In และวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งมีขนาดที่แปรผันกับค่าไดอิเล็กตริก ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า และขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของข้าวเปลือก สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

2.2 จำลองการพัฒนาสายอากาศ

พื้นฐานของสายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยพัฒนามาจากสายอากาศแบบไมโครสตริป (microstrip) เนื่องจาก

ลักษณะองค์ประกอบของสายอากาศมีความซับซ้อนต่ำ (low-profile) และสามารถปรับแต่งการทำงานได้ดีที่ความถี่ 2 ย่าน [16] องค์ประกอบของสายอากาศถูกพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR-4 และโครงสร้างได้รับการจำลองเพื่อหาขนาดที่เหมาะสม โดยใช้การปรับระยะกราวด์สตริป gl และ gh รวมถึงการปรับค่าตัวเก็บประจุและค่าตัวเหนี่ยวนำเพื่อให้สายอากาศทำงานได้ดีที่ความถี่ 2.45 และ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Microwave Studio 2019) ลักษณะโครงสร้างตัวนำสัญญาณของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2 (ก) และระนาบกราวด์แสดงในรูปที่ 2 (ข) ขนาดของโครงสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในสายอากาศแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งการกำหนดจากโครงสร้างและองค์ประกอบเป็นตัวแปรตั้งต้นตามสมการที่ (1) และ (2) [17] และกำหนดขนาดอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขอิมพีแดนซ์แมตช์ (impedance matched condition) ตามสมการที่ (3) [19]

$$w = \frac{v}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{v}{2f - \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2)$$

$$Z_0 = jX + \frac{1}{jB + 1/(R_L + jX_L)} \quad (3)$$

จากนั้นสายอากาศได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยการทำงานร่วมกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° (corner reflector) ซึ่งมีหน้าที่ปรับแบบรูปการแผ่พลังงานให้สามารถระบุทิศทาง (directional pattern) เพื่อให้ส่งกำลังงานไปที่ขั้วเปลือกตัวอย่าง รวมถึงการเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศต้นแบบมีโครงสร้างลักษณะตามรูปที่ 3 ประกอบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์แบบหนึ่งหน้าขนาดความกว้าง h ยาว l ประกอบกันทำมุม 90° เมื่อแผ่นวงจรพิมพ์ประกบกันมีขนาดตัวสะท้อนเท่ากับ D และมีระยะสายอากาศคือ sa ซึ่งตัวแปรต่างๆ มีขนาดที่สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (4) – (7) ดังนี้ [18]

$$\lambda < D < 2\lambda \quad (4)$$

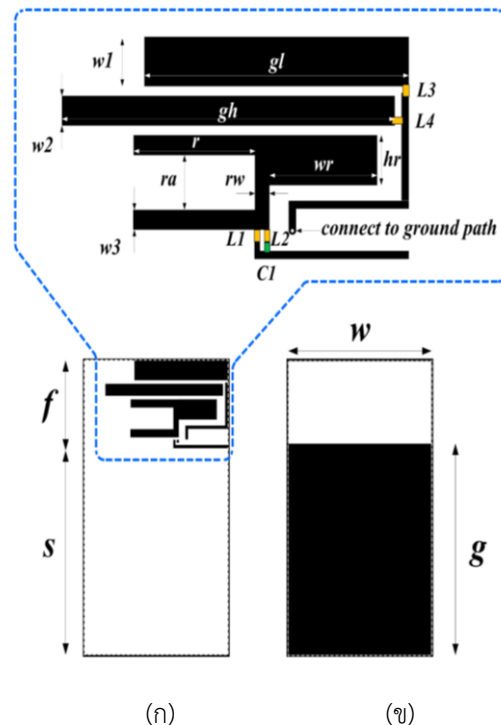
$$l \approx 2s \quad (5)$$

$$\lambda/3 < s < 2\lambda/3 \quad (6)$$

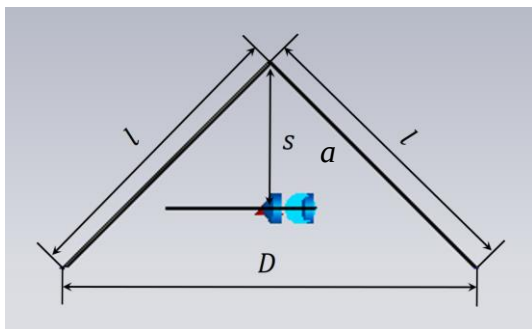
$$h > (1.2 - 1.5) \text{ เท่าของสายอากาศหลัก} \quad (7)$$

ตารางที่ 1 ข้อมูลตัวแปรและขนาดตัวแปรสายอากาศ

ตัวแปร	ขนาดตัวแปร	ตัวแปร	ขนาดตัวแปร
f	23 mm	rw	1.6 mm
s	52 mm	wr	11.9 mm
w	45 mm	hr	5 mm
g	54 mm	h	112 mm
line	0.8 mm	l	146 mm
gl	29.3 mm	sa	73 mm
w1	5 mm	D	206 mm
w2	3 mm	C1	2.4 pF
w3	2 mm	L1	2.4 nH
gh	36.9 mm	L2	5.6 nH
r	13.5 mm	L3	6.8 nH
ra	5.5 mm	L4	19 nH

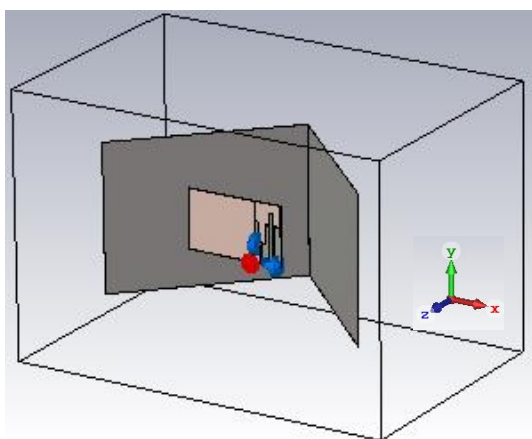


รูปที่ 2 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

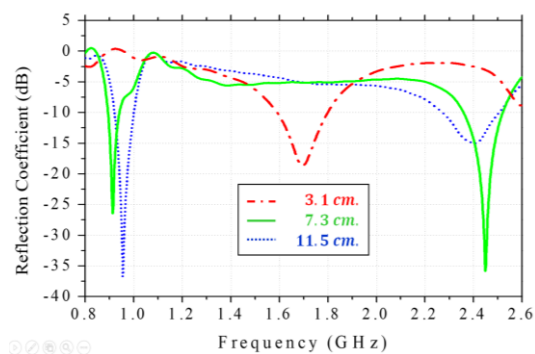


รูปที่ 3 โครงสร้างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

การวิเคราะห์ค่าอัตราขยายและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ที่เกิดจากระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมมีลักษณะการติดตั้งตามรูปที่ 4 รวมถึงทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งระยะการติดตั้งตัวสะท้อนดังกล่าวพิจารณาจากสมการที่ (6) แสดงการจำลองและผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการกำหนดระยะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นทั้งหมด 3 ระยะ คือ 3.1 7.3 และ 11.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่าระยะที่เหมาะสม คือ 7.3 เซนติเมตร โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ทำงาน 0.915 และ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ มีขนาดอยู่ที่ -25.47 และ -35.26 เดซิเบล ดังแสดงในรูปที่ 5



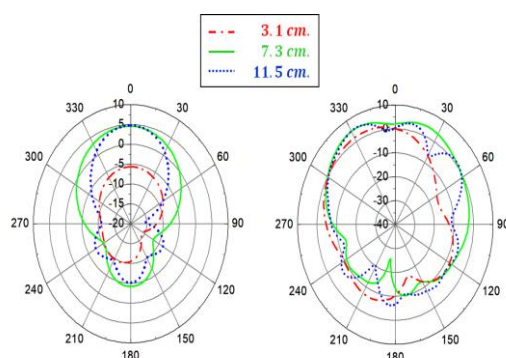
รูปที่ 4 โครงสร้างสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม



รูปที่ 5 ผลจำลองการปรับระยะตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

สำหรับการติดตั้งสายอากาศต้นแบบกับตัวสะท้อนคลื่นถูกจัดวางในลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานร่วมขั้ว (co-polarized) ซึ่งมีลำคลื่นหลักเมื่อพิจารณาตำแหน่งสายอากาศตามระยะการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่มีความถี่ 0.915 กิโลเฮิร์ตซ์ มีลักษณะระนาบทิศทาง (directional) มีอัตราขยาย 3.59 เดซิเบลไอโซโทรปิก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และที่ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้ามีทิศทางแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าของสายอากาศและให้อัตราขยายที่ 4.05 เดซิเบลไอโซโทรปิก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข)

เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาค่าอัตราขยายและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลำคลื่นหลักของสายอากาศทั้งสองความถี่จากระยะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่เหมาะสมอยู่ที่ 7.3 เซนติเมตร และสามารถติดตั้งเข้ากับระบบการตรวจวัดได้สะดวก



(ก) ความถี่ 0.915 กิโลเฮิร์ตซ์ (ข) ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์

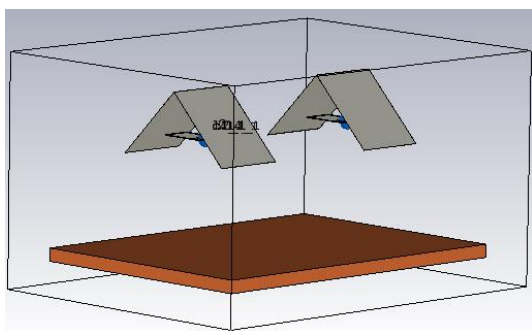
รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายลำคลื่นหลักของสายอากาศ

3. จำลองระบบและพัฒนาสายอากาศต้นแบบ

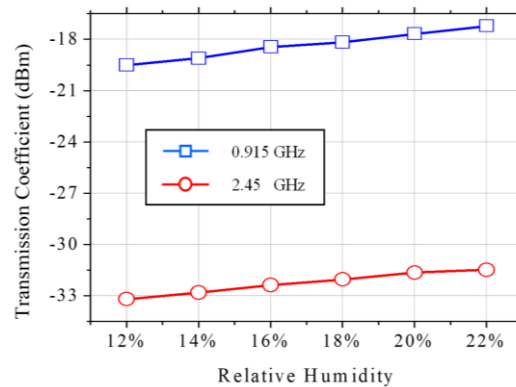
3.1 จำลองระบบตรวจวัด

เมื่อกำหนดโครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศการจำลองระบบการตรวจวัดปริมาณความชื้นภายใต้การกำหนดเงื่อนไขการเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโมเดลข้าวเปลือกตามข้อมูลอ้างอิงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ระดับความชื้นร้อยละ 12 14 16 18 20 และ 22 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 2.45, 2.66, 2.87, 3.11, 3.37 และ 3.63 ตามลำดับ [13] สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของความถี่ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ มีขนาดประมาณ 2.89, 3.18, 3.47, 3.78, 4.09 และ 4.41 ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลเชิงตัวเลขที่ระดับความชื้นในช่วงเดียวกันระหว่างความถี่ 0.3 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ [14] ในการจำลองระบบกำหนดปริมาตรตัวอย่างขนาด 32x63x2 เซนติเมตร สำหรับจำลองคุณสมบัติข้าวเปลือกตามระดับความชื้น ระบบการทดสอบความชื้นข้าวเปลือกประกอบด้วยสายอากาศต้นแบบตัวที่ 1 ทำหน้าที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสายอากาศตัวที่ 2 ทำหน้าที่รับพลังงานที่สะท้อนผ่านข้าวเปลือก

ในรูปที่ 7 การจำลองระบบกำหนดกำลังส่งที่ 0 เดซิเบล แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระดับความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งจำลองเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเอกพันธ์ (homogeneous material) ที่ความถี่ทำงาน 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วง -19.5 ถึง -17.25 เดซิเบล และ -33.4 ถึง -31.5 เดซิเบล ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการจำลองระดับความชื้นข้าวเปลือกตามรูปที่ 8 จึงอธิบายได้ว่ากำลังงานส่งผ่านที่สะท้อนออกมาจากข้าวเปลือกค่อนข้างสูงที่ความถี่ทำงาน 0.915 กิกะเฮิรตซ์ และลักษณะการแปรผันของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในแต่ละระดับความชื้นที่ความถี่ทำงานทั้งสองย่าน



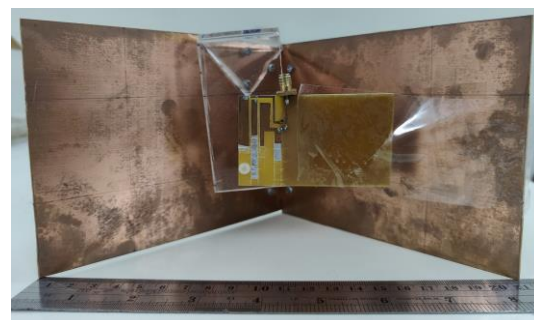
รูปที่ 7 การจัดองค์ประกอบจำลองการทดสอบ



รูปที่ 8 ผลจำลองค่าการสะท้อนผ่านกำลังงานตามระดับความชื้นข้าวเปลือก

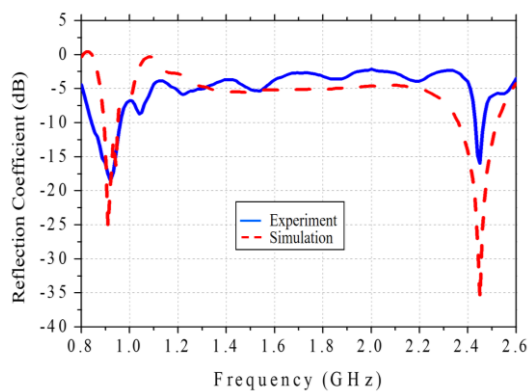
3.2 การพัฒนาสายอากาศต้นแบบ

จากการจำลองระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกระดับความชื้นจากการส่งผ่านกำลังงานของ 2 คลื่นความถี่ที่สะท้อนมาจากข้าวเปลือก โดยสายอากาศต้นแบบที่ได้รับการพัฒนามีขนาดขององค์ประกอบสายอากาศและตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมตามข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งในรูปที่ 9 แสดงลักษณะการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นอยู่ทางด้านหลังของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 9 สายอากาศต้นแบบและตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

สำหรับสายอากาศต้นแบบทั้งสองมีแนวโน้มคุณสมบัติสอดคล้องผลการจำลอง เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 10



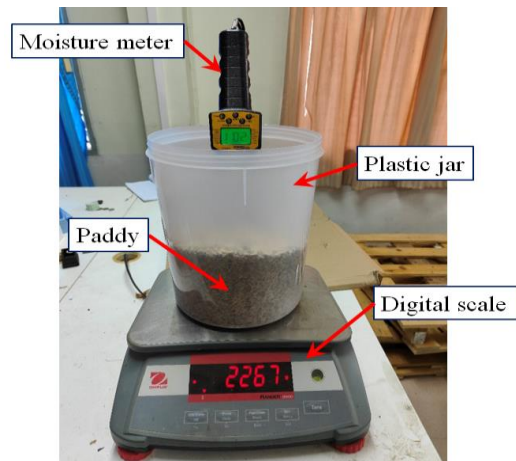
รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ระหว่างผลการจำลองกับสายอากาศจริง

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} แสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบมีผลการทดสอบที่ความถี่ทำงาน 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ -17.90 และ -16.54 เดซิเบล เมื่อพิจารณาที่ความถี่ทำงานของการจำลอง คุณสมบัติสายอากาศมีขนาดอยู่ที่ -25.47 และ -35.26 เดซิเบล แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีความแตกต่างกัน เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกวัสดุของชิ้นงานจริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดของการจำลอง รวมถึงการปรับแต่งขนาดองค์ประกอบของสายอากาศต้นแบบและการบัดกรี แต่แนวโน้มความถี่ทำงานทั้งผลการจำลองคุณสมบัติและชิ้นงานสายอากาศต้นแบบยังเป็นไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน ในทำนองเดียวกันตัวแปรอื่นของสายอากาศต้นแบบ เช่น แบบรูปการแผ่พลังงานมีลักษณะที่สอดคล้องกับผลการจำลองคุณสมบัติสายอากาศตามที่แสดงในรูปที่ 6 เพียงแต่กำลังการแผ่กระจายของความถี่ทำงานมีขนาดต่างกันเนื่องจากปัจจัยแวดล้อมของการทดสอบ

4. การทดสอบความชื้นข้าวเปลือก

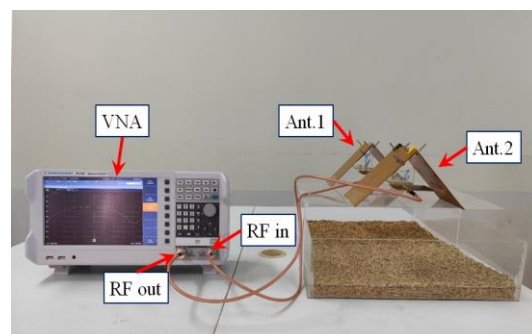
ขั้นตอนการทดสอบความชื้นข้าวเปลือกเริ่มจากการเตรียมภาชนะบรรจุจำนวน 6 ใบ สำหรับบรรจุข้าวเปลือกตัวอย่างที่แบ่งเป็น 6 ระดับ จากนั้นตวงข้าวเปลือกตัวอย่างโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลซึ่งข้าวเปลือกน้ำหนัก 2,200 กรัม ใส่ภาชนะและวัดระดับความชื้นข้าวเปลือกตัวอย่างด้วยเครื่องมือมาตรฐานตามระดับความชื้นที่กำหนด คือ ร้อยละ 12, 14, 16, 18, 20 และ 22 เพื่อนำไปตรวจวัดค่า

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สะท้อนจากข้าวเปลือกตามระดับความชื้นที่กำหนดจำนวน 10 รอบการทดสอบ โดยเริ่มที่ร้อยละ 12 และเปลี่ยนสูตรรอบการทดสอบที่ความชื้นร้อยละ 22 ในรูปที่ 11 แสดงการวัดระดับความชื้นของข้าวเปลือกทุกครั้งก่อนนำไปใส่กระบะอะคริลิกเพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สะท้อนจากข้าวเปลือก



รูปที่ 11 การวัดความชื้นและน้ำหนักของข้าวเปลือกตัวอย่าง

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแสดงในรูปที่ 12 ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายไฟฟ้ายี่ห้อ Rohde & Schwarz รุ่น FPC1500 เชื่อมต่อด้วยสายโคแอกเซียลชนิดสูญเสียต่ำ (low loss coaxial cable) อิมพีแดนซ์ 50 โอห์มกับสายอากาศตัวที่ 1 ที่ช่องเอาต์พุต และสายอากาศตัวที่ 2 ที่ช่องอินพุต ทำหน้าที่ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีระยะติดตั้งสายอากาศบนฐานอะคริลิกวางห่างกัน 18 เซนติเมตร และกระบะอะคริลิกสำหรับบรรจุข้าวเปลือกเพื่อทดสอบความชื้นข้าวเปลือกตัวอย่างขนาด 32x63x12 เซนติเมตร มีระยะของสายอากาศห่างจากข้าวเปลือก 15 เซนติเมตร

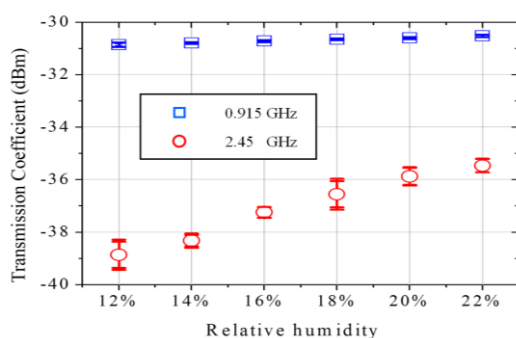


รูปที่ 12 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นความถี่ในข้าวเปลือก

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแถบผิดพลาดที่ความถี่ 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

Moisture Content (%)	0.915		2.45	
	SD.	(±)	SD.	(±)
12	0.04	0.065	0.29	0.54
14	0.02	0.030	0.15	0.25
16	0.02	0.040	0.10	0.21
18	0.02	0.030	0.30	0.55
20	0.02	0.035	0.25	0.34
22	0.02	0.040	0.13	0.26

ข้าวเปลือกเมื่อได้รับการบรรจุลงในกระเบอะคริลิกและปรับผิวหน้าของข้าวเปลือกให้เรียบมีระยะความสูงจากพื้นกระเบ 2.5 เซนติเมตร เมื่อเริ่มการทดสอบกำหนดกำลังการส่งที่ 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เพื่อตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สะท้อนจากข้าวเปลือกในช่วงระดับความชื้นร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 22 พบว่าที่ความถี่ทำงาน 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่สะท้อนจากข้าวเปลือกเฉลี่ยอยู่ที่ -30.87 ถึง -30.53 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และ -38.87 ถึง -35.47 เดซิเบลมิลลิวัตต์ พบว่าที่แนวโน้มความคลาดเคลื่อนข้อมูลของคลื่นความถี่ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ จากตารางที่ 2 มีค่าเบี่ยงเบนข้อมูลเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 และมีแถบความผิดพลาดของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเฉลี่ยอยู่ในช่วง +0.04 ถึง -0.04 ขณะเดียวกันข้อมูลวัดที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นแนวโน้มความคลาดเคลื่อนของข้อมูลและพิสัยของการจำแนกระดับความชื้นในข้าวเปลือก มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 และมีแถบความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง +0.37 ถึง -0.34



รูปที่ 13 แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านตามระดับความชื้นข้าวเปลือก

ดังนั้น จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านข้าวเปลือกระดับความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 22 ที่นำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ทำงาน 0.915 กิกะเฮิรตซ์ ความเบี่ยงเบนของกำลังงานส่งผ่านในแต่ละระดับเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ แต่มีข้อจำกัดในด้านพิสัยที่ใช้พิจารณากระดับความชื้น ในขณะที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าค่าเบี่ยงเบนของกำลังงานที่ส่งผ่านข้าวเปลือกมีระดับที่ค่อนข้างสูง แต่มีพิสัยในการพิจารณากระดับความชื้นที่ชัดเจน เมื่อพิจารณาในคาบเวลาเดียวกัน สำหรับข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมที่ทดลองในพื้นที่เปิดมีการชดเชยความผิดพลาด โดยอาศัยการพิจารณาค่าเฉลี่ยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในแต่ละระดับความชื้นจำนวน 10 ครั้งเพื่อให้ผลทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด ซึ่งในรูปที่ 13 แสดงแนวโน้ม และความแตกต่างของพิสัยสำหรับการจำแนกระดับความชื้นข้าวเปลือก แถบความผิดพลาดของข้อมูล รวมถึงค่าความเบี่ยงเบนที่สรุปในตารางที่ 2

5. สรุปผล

การประยุกต์ใช้สายอากาศระนาบแบบ 2 คลื่นความถี่ พัฒนาจากสายอากาศแบบไมโครสตริปที่มีองค์ประกอบของสายอากาศที่มีความซับซ้อนต่ำและติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อปรับแบบรูปการแผ่พลังงานให้มีทิศทางไปที่ข้าวเปลือกสำหรับพิจารณากระดับความชื้นซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความถี่ทำงาน 0.915 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันตามระดับความชื้นที่กำหนดไว้ 6 ระดับ ในช่วงร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 22 แม้ว่าการตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ความถี่ 0.915 กิกะเฮิรตซ์ ในงานที่ผ่านมา [5] และที่นำเสนอในบทความนี้จะพบว่าค่าความเบี่ยงเบนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีแนวโน้มที่ค่อนข้างต่ำเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 แต่มีข้อจำกัดในด้านพิสัยสำหรับการพิจารณากระดับความชื้นข้าวเปลือกในช่วงที่นำเสนอ ซึ่งเฉลี่ยอยู่ที่ -30.87 -30.80 -30.73 -30.66 -30.61 และ -30.53 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เมื่อพิจารณาความระดับชื้นในข้าวเปลือก หรือดิน [20] ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ แม้ว่าค่าความเบี่ยงเบนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างสูงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 แต่ในด้านของพิสัยสำหรับการ

พิจารณาระดับความชื้นข้าวเปลือกในช่วงที่นำเสนอในบทความนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ -38.87 -38.33 -37.25 - 36.56 - 35.88 และ -35.47 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ซึ่งมีพิสัยการจำแนก ระดับความชื้นของแต่ละระดับได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานควรเลือกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับการศึกษานี้แนวโน้มการลดทอนอย่างเป็นเชิงเส้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า

6. กิตติกรรมประกาศ

เนื้อหาในบทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่องระบบวัดระดับความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้การวิเคราะห์การส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างสายอากาศระนาบแบบ 2 คลื่น ความถี่(The Paddy Moisture Level System using analyzed practical power transmission between plane antenna dual frequency.) และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2566 เลขที่สัญญา 2231/2566

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Kummanee, A. Aungsuratana, C. Rojanaridpiched, S. Chanprame, K. Vijitsrikamol and S. Sakurai, "Input Factor Affecting Rice Seed Production in Thamai Sub-district, NakhonSawan Province, Lower Northern, Thailand," *Thai Journal of Agricultural Science*, vol. 51 no.1, pp.10-17, January–March 2018.
- [2] E. Yusiana, D. B Hakim, Y. Syaikat and T. Novianti, 2022 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 951 012039.
- [3] S. Hemhirun and P. Bunyawanichakul, "Effect of the initial moisture content of the paddy drying operation for the small community," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 51, no.3, pp. 176-183. Sep. 2020
- [4] P. Chaisaeng, P. Leekul, P. Wongcharoen and P. Wongsiritorn, "Paddy moisture detection by using reflection coefficient of electromagnetic waves," in *Proceeding of 10th Phuket Rajabhat University National Academic Conference 2017, Phuket Thailand*, December. 14, 2017, pp.387-394 (in Thai).
- [5] Q. Song, X. Wei, W. Sun, Z. Lu and T. Tao, "Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance Spectroscopy Analysis," *Applied Sciences*, Volume 10 Issue 11, 3968, 2020.
- [6] P. Chaisaeng and P. Leekul, "Transmission Coefficient of Electromagnetic Waves Application for Classifying Moisture Content Levels of Paddy," in *Proceeding of 5th PhetchabunRajabhat University National Academic Conference 2018, Phetchabun Thailand*, March. 8-9, 2018, pp. 366-375 (in Thai).
- [7] A.K. Rai, Bharati Dass and V.K. Tiwari, "Design of a probe type in situ electronic grain moisture measurement system," *Biosci. Biotech. Res. Comm.* Vol.11, No.2, pp. 246-250, 2018.
- [8] L. Lin, Yong He, Zhitao Xiao, Ke Zhao, Tao Dong and Pengcheng Nie, "Rapid-Detection Sensor for Rice Grain Moisture Based on NIR Spectroscopy," *Applied Sciences*, Volume 9 Issue 11, 1654, 2019
- [9] P. Ravi, ThirupathiVenkatachalam and Vennila Palanisamy, "Fourier Transform Near-Infrared Spectroscopy for Nondestructive and Rapid Measurement of Moisture Content of Paddy," *Agricultural Engineering*, Vol.39, No.3, pp.31-40, 2014.
- [10] L. Gupta, "Microwave Based Moisture Measurement System for Granular Materials: A Review," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Volume-6 Issue-6, pp.65-67, August 2017

- [11] S. H. Noh and S. O. Nelson, " Dielectric Properties of Rice at Frequencies from 50 Hz to 12 GHz, " *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 32 No.3, pp. 991-998, May 1989
- [12] S. O. Nelson and A. W. Kraszewski, "Grain moisture content determination by microwave measurements," *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, Vol.33 No.4, pp.1303-1305, July 1990.
- [13] S. O. Nelson, "Dielectric Properties of Agricultural Products: Measurements and Applications," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.26 No.5, pp.845 - 869, November 1991.
- [14] S. O. Nelson, S. Trabelsi and A. W. Kraszewski, "RF Sensing of Grain and Seed Moisture Content," *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 1, NO. 2, August 2001.
- [15] S.O. Nelson, "Dielectric properties of agricultural products and some applications," *Research in Agricultural Engineering.*, Vol.54, No.2, pp.104-112, 2008.
- [16] S. Zahid, A. Quddious, F.A. Tahir, P. Vryonides, M. Antoniadis and S. Nikolaou, " Dual-Band Compact Antenna for UHF and ISM Systems," *European Conference on Antennas and Propagation 13th*, Krakow Poland, March. 31 – April. 5, 2019, page 1-5
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design (4th edition)*, Wiley, 2016, pp. 788-797.
- [18] J. D. Kraus, "The corner-reflector antenna," in *Proceeding of Institute of Radio Engineers*, vol. 28, no. 11, pp. 513-519, November 1940.
- [19] D. M. Pozar, *Microwave Engineering (4th edition)*, Wiley, 2012, pp. 228-234.
- [20] P. Thanasetwatthana, P. Chaisaeng and P. Leekul, "Non-contact Soil Moisture Content Determination System Using High Frequency Signal," *Thai Science and Technology Journal*, Vol.30, No.5, September 2022, pp. 37-49 (in Thai).