



ระบบตรวจวัดความชื้นดินแบบไร้การสัมผัสด้วยคลื่นความถี่สูง

Non-contact Soil Moisture Content Determination System Using High Frequency Signal

ปพนพัชญ์ ธนาเศรษฐ์วัฒน¹, พรพิมล ฉายแสง², ประพนธ์ ลีกุล^{2,*}

¹คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี 22000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี 22000

Paponpat Thanasetwatthana¹, Pornpimon Chaisaeng², Prapan Leekul^{2,*}

¹Faculty of Management Sciences, RambhaiBarni Rajabhat University, Chanthaburi 2200

²Faculty of Industrial Technology, RambhaiBarni Rajabhat University, Chanthaburi 2200

Received 20 April 2022; Received in revised 15 August 2022; Accepted 23 August 2022

บทคัดย่อ

ระบบตรวจวัดความชื้นดินนำเสนอการประยุกต์ใช้กำลังงานการสะท้อนของ 2 คลื่นความถี่ เพื่อตรวจวัดและแยกแยะระดับความชื้นดินแบบไร้การสัมผัส โดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันของดินแต่ละระดับความชื้นที่ส่งผลต่อกำลังงานการสะท้อนของคลื่นความถี่ เพื่อนำข้อมูลระดับกำลังงานการสะท้อนเทียบกับความชื้นมาวิเคราะห์และตัดสินใจ ระบบตรวจวัดประกอบด้วยภาคส่งและรับ ภาคส่งทำหน้าที่กำเนิดกำลังงานความถี่ที่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยสวิตช์การส่งออกครั้งละ 1 ความถี่ และส่งออกกำลังงานด้วยสายอากาศแพทช์ที่ได้รับการออกแบบตัวที่ 1 ในส่วนของภาครับทำหน้าที่รับกำลังงานการสะท้อนกลับจากดินตัวอย่าง โดยใช้สายอากาศแพทช์ตัวที่ 2 และกำลังงานความถี่ที่ได้รับถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรตรวจจับกำลังงาน จากนั้นเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 10 บิต และประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การทดสอบตรวจวัดดินทำทั้งหมด 8 ระดับ ที่ความชื้นร้อยละ 0, 5, 10 ถึง 35 ให้แรงดันการสะท้อนของสองความถี่เฉลี่ยอยู่ที่ 0.806, 0.868, 0.907 ถึง 1.194 โวลต์ ตามลำดับสังเกตได้ว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานการสะท้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมีความสัมพันธ์และให้ค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 3.18 ค่าความไว 0.065 โวลต์ต่อความชื้นร้อยละ 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 0.179 แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพและมีความสามารถในการตรวจวัดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบตรวจวัดความชื้นดิน; ความชื้นในดิน; การสะท้อนของคลื่นความถี่

Abstract

The non-contact measurement of soil moisture content is proposed by applying the reflected power of two signal frequencies based on the difference in electrical properties at each moisture content level. The strength of reflected signal is affected, and then data are collected, analyzed and decided the moisture content level. The measurement system consists of the transmitter and the receiver parts. The transmitter generates two signal frequencies at 2.40 and 2.45 GHz and switches one frequency at a time to transmit via the first designed patch antenna. The receiver receives the reflected signal from the soil sample under test via the second patch antenna. The received power is converted to DC voltage by the power detector circuit and then is converted to 10-bit digital data to process in a microcontroller board. In the experiments, the moisture content in soil was measured at eight levels from 0%, 5%, 10% to 35%, providing the average reflected powers of 8.06, 8.68, 9.07 to 11.94 mV, respectively. It can be noticed that the reflected power increases relatively with the increasing moisture content, with the maximum error at 3.18%. The sensitivity is not less than 0.065 V/5%, and the average SD is at 0.179. Consequently, the proposed system is stable and able to determine soil moisture content effectively.

Keywords: Soil moisture content determination system; Soil moisture content; Reflection of signal frequency

1. บทนำ

ปริมาณน้ำในดินเป็นข้อมูลสำคัญทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ธรณีวิทยา นิเวศวิทยา ชีววิทยา อุทกวิทยา และการเกษตร เพื่อแสดงคุณสมบัติทางชีวภาพและทางกายภาพของดิน [1] สำหรับด้านการเกษตรปริมาณน้ำในดินหรือความชื้นดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเติบโตของพืช พืชจะเจริญเติบโตได้อย่างเหมาะสมเมื่อได้รับน้ำอย่างต่อเนื่องและเพียงพอต่อความต้องการในแต่ละช่วงการเติบโต [2] รวมถึงเป็นข้อมูลสำคัญในการบริหารจัดการน้ำ และคาดการณ์ผลผลิตสำหรับการเกษตรแม่นยำสูง (Precision agriculture) [3] ดังนั้นการตรวจวัดความชื้นดินจึงเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง [4] วิธีวัดความชื้นดินที่ดีจึงต้องแม่นยำ และแสดงผลได้ทันที การวัดความชื้นดินโดยตรงเป็นการวัดปริมาณน้ำในดิน โดยการชั่งมวลของดินที่ต้องการวัด จากนั้นนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [2] ซึ่งมวลของดินอีกครั้งหลังอบแห้ง และนำมาคำนวณค่าความชื้นในดิน (Gravimetric moisture content) วิธีนี้ให้ความแม่นยำสูง แต่ใช้เวลานาน จึงไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานภาคสนาม โดยทั่วไปจึงใช้การวัดความชื้นดินด้วยวิธีทางอ้อม ซึ่งเป็นการวัดพารามิเตอร์อื่นของดินแล้วนำมาหาความสัมพันธ์กับความชื้นดิน การวัดทางอ้อมให้ความแม่นยำน้อยกว่า แต่สามารถแสดงผลได้ทันที จึงเหมาะกับการใช้งานภาคสนาม เช่น เซอร์วัดความชื้นดินเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไปใช้หลักการวัดทางอ้อม แต่ด้วยข้อจำกัด ได้แก่ ราคาสูง ความแม่นยำต่ำ [4] และต้องใช้งานแบบสัมผัส

เทคนิคการวัดความชื้นดินด้วยวิธีทางอ้อมได้รับความนิยมจากนักวิจัยพัฒนาไว้หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการกระเจิงนิวตรอน (Neutron Scattering) [5-6] เป็นเทคนิคสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างธาตุของวัสดุ โดยการใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนให้ตกกระทบกับดิน จาก

นั้นวัดปริมาณของนิวตรอนที่เลี้ยวเบนในลักษณะกระจายตามมุมกระเจิงเทียบกับมุมตกกระทบเริ่มต้น รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงถึงปริมาณน้ำในดิน [7] เทคนิคนี้มีข้อจำกัดด้านความไว ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อวัดใกล้กับผิวดิน และการเคลื่อนย้ายเครื่องมือวัดมีความยุ่งยาก [1] เทคนิคต่อมา คือ การใช้รังสีแสงและอินฟราเรด [4, 8] เป็นเทคนิคที่ให้ผลแม่นยำ แต่การใช้รังสีอินฟราเรดมีข้อจำกัดเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากอุปกรณ์ราคาสูง และทำงานได้ดีในห้องปฏิบัติการเท่านั้นเนื่องจากต้องควบคุมแสงภายนอก [1] เทคนิคการวิเคราะห์ความชื้นดินจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยม และมีรูปแบบการใช้งานหลากหลาย ได้แก่ เซนเซอร์ค่าความต้านทาน [9] และเซนเซอร์ค่าอิมพีแดนซ์ [10] ใช้หลักความแตกต่างของค่าความต้านทานของดินที่มีความชื้นต่ำสูงกว่าความต้านทานของดินที่มีความชื้นสูง ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ราคาไม่สูงและสามารถวัดที่บริเวณเดิมได้โดยไม่ต้องขุดดิน แต่ต้องทำการปรับเทียบเซนเซอร์เพื่อวัดดินแต่ละประเภท และความเค็มของดินมีผลต่อการวัด [1] คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ถูกนำมาวิเคราะห์ความชื้นดินในหลายงาน เนื่องจากเมื่อความชื้นดินสูงส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของดินสูงขึ้น [11-14] การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินเพื่อวิเคราะห์ความชื้นดินโดยตรง [15] ต้องใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ไม่เหมาะกับการนำไปใช้จริงภาคสนาม ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นหลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์วัดความชื้น ได้แก่ เซนเซอร์ความจุประจุ [16-17] ใช้การวัดความชื้นดินจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ทำงานของวงจรกำเนิดความถี่ เนื่องจากค่าความจุประจุในวงจรเปลี่ยนแปลง เมื่อความชื้นของดินเปลี่ยน [1] วิธีการนี้ราคาไม่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานภาคสนาม แต่การใช้งานเซนเซอร์ต้องฝังเซนเซอร์ลงในดินเพื่อวัด เทคนิคเฟโดอาร์ (Frequency domain reflectometry) [18] เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการเดียวกับเซนเซอร์ความจุประจุ แต่ให้ความแม่นยำมากกว่า [1] ทั้งนี้เทคนิค

เฟโดอาร์ทำงานได้ไม่ดีเมื่อใช้วัดความชื้นในดินเค็ม และจำเป็นต้องปรับเทียบใหม่เมื่อใช้วัดดินต่างชนิด เทคนิคการใช้โพรมิโนโล [19] วัดความชื้นโดยส่งคลื่นความถี่ 1.35 ถึง 1.95 กิกะเฮิรตซ์ ให้แพร่กระจายไปในดินที่ต้องการวัด และประมวลผลความชื้นดินจากระดับแรงดันคลื่นสะท้อนกลับ เทคนิคนี้สามารถวัดได้แม่นยำ แต่ยังคงต้องฝังโพรมิโนโลในดินที่ต้องการวัด เทคนิคการวัดด้วยทีดีอาร์ (Time domain reflectometry) [20-21] เป็นเทคนิคที่ใช้วัดค่าเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในดิน เนื่องจากความเร็วของคลื่นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดิน การวัดด้วยทีดีอาร์มีความแม่นยำลดความผิดพลาดเนื่องจากความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิได้ดีกว่าเทคนิคเฟโดอาร์แต่ข้อจำกัดของเทคนิคทีดีอาร์คือ ไม่สามารถวัดได้ลึก ความขรุขระของผิวดินและต้นไม้บนผิวดินมีผลต่อการวัด รวมถึงราคาสูง เห็นได้ว่าเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นแม้ให้ความแม่นยำสูง แต่รูปแบบการวัดต้องฝังเซนเซอร์ลงในดิน ซึ่งมีความซับซ้อนในขั้นตอนการใช้งาน ดังนั้นเทคนิคการวัดความชื้นแบบไม่ฝังลงในดินจึงได้รับการพัฒนา ได้แก่ เทคนิคการใช้น้ำเคลื่อน [22-23] โดยใช้ขนาดและเฟสของคลื่นสะท้อนกลับจากดินด้วยท่อนำคลื่นปลายเปิดสำหรับวิเคราะห์ความชื้นดิน ซึ่งเทคนิคท่อนำคลื่นแม้ไม่ต้องฝังเซนเซอร์ลงในดิน แต่ยังคงต้องสัมผัสกับผิวดินเพื่อทำการวัด เทคนิคการวัดความชื้นผิวดินด้วยระบบการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ใช้พื้นฐานจากความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินถูกนำเสนอไว้หลายระบบ ได้แก่ การใช้เซนเซอร์เรดาร์ [24-25] ระบบการสำรวจระยะไกลด้วยแสงที่มองเห็นได้และอินฟราเรด (Visible and near-infrared remote sensing) [1] ระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) [26] เทคนิคการวัดด้วยระบบสำรวจระยะไกลสามารถวัดความชื้นดินโดยไม่ต้องสัมผัสกับดิน อย่างไรก็ตามการวัดความชื้นดินด้วยระบบสำรวจระยะไกลค่อนข้างซับซ้อน ความละเอียดเชิงพื้นที่ค่อนข้างต่ำ เหมาะกับการวัดพื้นที่ขนาดใหญ่ ต่อมามีการประยุกต์ใช้กำลังงานการส่งผ่าน

ของคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ ในการตรวจวัดความชื้นดินภายในภาชนะบรรจุ [27] เทคนิคนี้ใช้การส่งผ่านคลื่นความถี่ผ่านดินตัวอย่างที่อยู่ภายในภาชนะบรรจุการแยกระดับความชื้นสามารถทำได้แม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการตรวจวัดยังคงมีความซับซ้อนเนื่องจากต้องบรรจุดินตัวอย่างลงในภาชนะที่กำหนดทุกครั้ง การใช้งานในพื้นที่การเกษตรจึงทำได้ยากและอาจไม่สะดวกสำหรับเกษตรกร ดังนั้นการตรวจวัดความชื้นดินแบบไร้การสัมผัสและสามารถใช้ในพื้นที่ทางการเกษตรได้อย่างสะดวกจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ

งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบตรวจสอบความชื้นดินแบบไร้การสัมผัส โดยใช้กำลังงานของคลื่นสะท้อนที่ความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในการตรวจวัดความชื้นดิน เนื่องจากเป็นช่วงความถี่เสรี (ISM band) รวมถึงมีอุปกรณ์รองรับการใช้งานจำนวนมาก การตรวจวัดทำครั้งละ 1 ความถี่ ในแต่ละครั้งใช้การสวิตช์เปลี่ยนความถี่เพื่อให้ข้อมูลมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ข้อมูลจากการวัดได้รับการประมวลผลและตัดสินใจด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนที่ 2 ของบทความเป็นทฤษฎีการสะท้อนของคลื่นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกัน ส่วนที่ 3 จำลองและพัฒนาสายอากาศแพทช์เพื่อใช้สำหรับรับส่งกำลังงานความถี่ วิเคราะห์ระดับกำลังงานสะท้อนจากดินในแต่ละระดับความชื้นด้วยเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย นำเสนอระบบตรวจวัดความชื้นดินและพัฒนาระบบต้นแบบ ในส่วนที่ 4 ผลการทดสอบการตรวจวัดความชื้นดินและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบต้นแบบ ส่วนที่ 5 สรุปผลการวิจัย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

คลื่นไมโครเวฟเมื่อเดินทางตกกระทบรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกัน 2 ชนิด จะเกิดการสะท้อนกลับ ณ รอยต่อของตัวกลาง ในกรณีที่คลื่นเดินทางจากอากาศซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η_0 ไปยังตกกระทบกับตัวกลางที่สองมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น η สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (Γ) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของคลื่น

สะท้อนกลับจากตัวกลางที่ 2 แสดงดังสมการที่ (1) [28]

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (1)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าประเภทหนึ่งของวัสดุหรือตัวกลางประกอบด้วย ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity: ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability: μ) ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและอิมพีแดนซ์ของตัวกลางแสดงดังสมการที่ (2)

$$\eta = \sqrt{\mu / \epsilon} \quad (2)$$

ระดับกำลังงานของคลื่นสะท้อนจึงแปรผันตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่ 2 สำหรับดินซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกับอากาศ ดังนั้นค่าสภาพยอมไฟฟ้าจึงส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงระดับกำลังงานมากกว่า โดยค่าสภาพยอมไฟฟ้าแบ่งย่อยเป็น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ') และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor: ϵ'') ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพันธ์ ϵ_r เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุที่ถูกนำมาเทียบกับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศ ซึ่งค่าในรูปเชิงซ้อนแสดงดังสมการที่ (3)

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + \epsilon_r'' \quad (3)$$

น้ำเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าดิน ดังนั้นดินที่มีความชื้นสูงจึงมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าดินที่มีความชื้นต่ำ [15] ทำให้สามารถตรวจสอบความชื้นในดินจากกำลังงานคลื่นสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 พัฒนาสายอากาศ

การส่งและรับคลื่นความถี่ในการตรวจสอบความชื้นดินจากสัมประสิทธิ์การสะท้อน ประยุกต์ใช้สายอากาศแพทช์ เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนต่ำ ขนาดกะทัดรัด ติดตั้งเข้ากับระบบได้ง่าย ขนาดและระยะจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศได้รับการคำนวณจากทฤษฎี และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า CST Studio Suite 2019 เพื่อหาขนาดและจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสม แผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ถูกใช้เพื่อพัฒนาสายอากาศ คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ถูกใช้เป็นข้อมูลในการจำลอง วัสดุฐานรอง (Substrate) ของแผ่นวงจรพิมพ์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') 4.1 มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร โครงสร้างของสายอากาศมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60x60 มิลลิเมตร และมีแผ่นสะท้อนคลื่นอยู่บนวัสดุฐานรองด้านเดียวกับตัวนำสัญญาณ ใช้การป้อนสัญญาณแบบโพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe feed) (Figure 1)

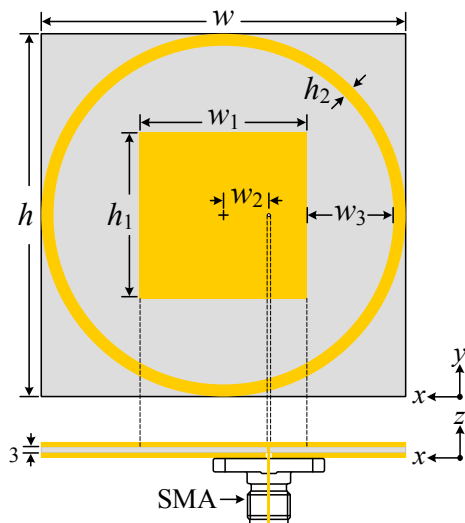


Figure 1 Schematic of patch antenna

ขนาดของตัวนำ (w_1) ได้รับการปรับเพื่อหาความถี่ทำงานของสายอากาศ โดยปรับตั้งแต่ 26.8, 27.2 ถึง 28 มิลลิเมตร และได้ขนาดที่เหมาะสม คือ 27.6 มิลลิเมตร ให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ครอบคลุมช่วงความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ต่ำสุดอยู่ที่ -27.4 เดซิเบล (Figure 2) เมื่อได้ขนาดตัวนำสัญญาณที่เหมาะสม จากนั้นจึงปรับระยะของจุดป้อนสัญญาณ (w_2) ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำตั้งแต่ 6.8 7.0 ถึง 7.4 มิลลิเมตร ให้ค่าพารามิเตอร์ S_{11} ต่ำสุดอยู่ที่ -25.79 -36.64 และ -25.26 เดซิเบล ตามลำดับ (Figure 3)

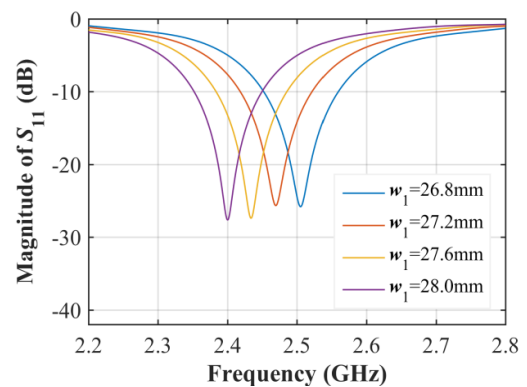


Figure 2 Variation of radiating patch width

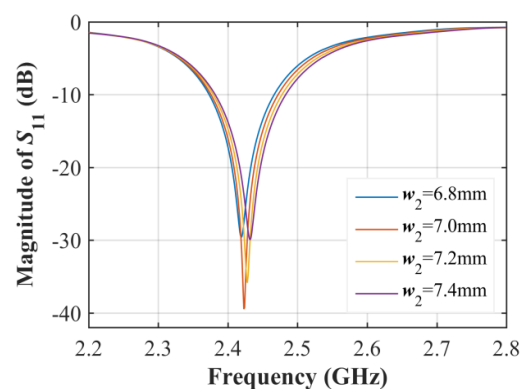


Figure 3 Variation of feed point

จากการปรับโครงสร้างของสายอากาศด้วยการจำลอง แสดงให้เห็นว่าขนาดที่เหมาะสมของตัวนำอยู่ที่ 27.6 มิลลิเมตร และระยะจุดป้อนสัญญาณอยู่ที่ 7.0 มิลลิเมตร ส่วนสะท้อนคลื่นรูปวงแหวน กว้าง 2 มิลลิเมตร

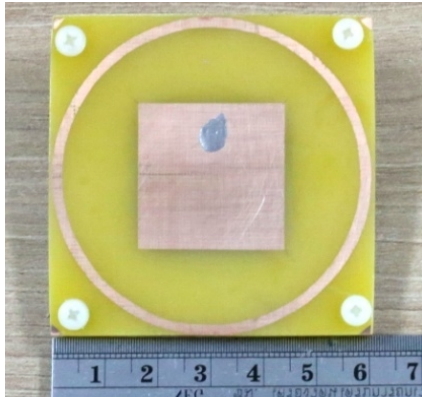
มีรัศมีที่ 30 มิลลิเมตร และให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ -15.96 และ -14.99 เดซิเบล ขนาดที่เหมาะสมดังตารางที่ 1

Table 1 Antenna dimension

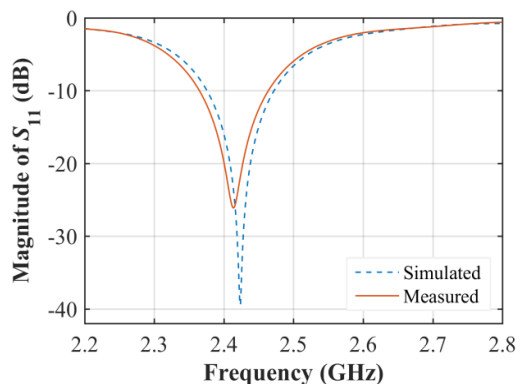
Parameter	h, w	h_1, w_1	h_2	h_3	w_2	w_3
Dimension (mm)	60.0	27.6	2.0	3.2	7.0	14.2

โครงสร้างจากการจำลองถูกใช้พัฒนาสายอากาศต้นแบบ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 วัสดุฐานรองหนา 3.2 มิลลิเมตร (Figure 4a) สายอากาศได้รับการพัฒนาทั้งหมด 2 ตัว โครงสร้างแบบเดียวกันใช้สำหรับภาคส่งและภาครับ ทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ด้วยเครื่องวิเคราะห์หิโครข่าย (Vector

network analyzer) ของบริษัท Rohde & Schwarz รุ่น FPC15000 ที่ความถี่ 2.2 ถึง 2.8 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 เดซิเบล อยู่ในช่วงความถี่ 2.37 ถึง 2.46 กิกะเฮิรตซ์ ผลการทดสอบ (Figure 4b)



(a)



(b)

Figure 4 (a) Fabricated prototype antenna (b) $|S_{11}|$ of prototype antenna

สายอากาศทำงานได้ดีในช่วงความถี่ใช้งาน สอดคล้องกับผลการจำลอง แต่อย่างไรก็ตาม สายอากาศที่สร้างขึ้นมีช่วงความถี่ทำงานกว้างและเลื่อนต่ำลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผลการจำลอง เนื่องจากความหนาและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองที่ต่างจากการจำลองเล็กน้อย ค่าการสูญเสียย้อนกลับของความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ -19.79 และ -12.59 เดซิเบล ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้เพื่อรับส่งกำลังงานความถี่สูง

3.2 วิเคราะห์ความชื้นดินด้วยสายอากาศแพทช์

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ความชื้น คือ ดินอาคาตามะ (Akadama soil) มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี การกระจายตัวของความชื้นจึงสม่ำเสมอ ระดับ



Figure 5 Soil sample preparation for experiment

ทดสอบความสามารถในการส่งออกและการตรวจจับกำลังงานการสะท้อนของสายอากาศที่เกิดจากการตรวจวัดดิน กำลังงานส่งออกจากพอร์ตที่ 1 คือ 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และตรวจวัดกำลังงานการสะท้อนกลับจากดินที่พอร์ต 2 คือ ค่าพารามิเตอร์ S_{21} และสังเกตที่ความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่ความชื้นดินร้อยละ 0 ให้ค่า S_{21}

ความชื้น (Gravimetric soil moisture content: MC) ในแต่ละระดับถูกวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน (Grain moisture meter) รุ่น AR991 เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง เทียบกับผลการทดลอง การปรับความชื้นทำทั้งหมด 8 ระดับ ตั้งแต่ร้อยละ 0, 5, 10 ถึง 35 จากนั้นบรรจุในภาชนะพลาสติกขนาด 30x15x5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความชื้น สายอากาศถูกใช้งานร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย สายอากาศตัวที่ 1 เข้ากับพอร์ตที่ 1 (Output port) และสายอากาศตัวที่ 2 เข้ากับพอร์ตที่ 2 (Input port) โดยใช้สายโคแอกเซียลชนิดสูญเสียต่ำ (Low loss coaxial cable) 50 โอห์ม สายอากาศวางห่างกันที่ระยะ 10 เซนติเมตร เพื่อลดการเชื่อมต่อ (Coupling) ของสัญญาณระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (Figure 6)

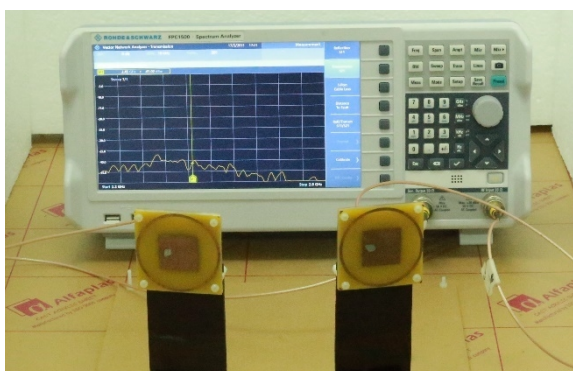


Figure 6 Soil moisture measurement with patch antenna

อยู่ที่ -36.81 และ -37.09 เดซิเบล เมื่อเพื่อความชื้นดินเป็นร้อยละ 5 กำลังงานที่สะท้อนกลับมาจากดินเพิ่มขึ้นอยู่ที่ -36.27 และ -36.33 เดซิเบล และที่ความชื้นดินร้อยละ 10, 15 ถึง 35 ให้กำลังงานการสะท้อนกลับเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน (Table 2)

Table 2 Magnitude of $|S_{21}|$ of soil at various moisture levels

Moisture content (%)		0	5	10	15	20	25	30	35
S_{21} (dBm)	$f = 2.40$ GHz	-36.81	-36.27	-35.39	-35.17	-34.07	-33.56	-32.71	-32.06
	$f = 2.45$ GHz	-37.09	-36.33	-35.42	-35.24	-35.20	-33.59	-32.81	-32.13

ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่ากำลังงานการสะท้อนของทั้ง 2 ความถี่ ตอบสนองได้ชัดเจนต่อเปลี่ยนแปลงของความชื้นดิน จึงมีความเป็นไปได้ในการตรวจวัดความชื้นจากกำลังงานการสะท้อนของคลื่นความถี่

3.3 ระบบตรวจวัดดินความชื้นที่นำเสนอ

ระบบตรวจวัดความชื้นดิน สายอากาศทั้งหมด 2 ตัว สายอากาศตัวที่ 1 ใช้เพื่อส่งคลื่นไปยังดินตัวอย่าง

และสายอากาศตัวที่ 2 ใช้เพื่อรับคลื่นที่สะท้อนกลับจากดินตัวอย่าง ภายในของระบบประยุกต์ใช้ แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่สูง อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าหรือรีเลย์ อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน (Power detector) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน (Arduino UNO) และจอแสดงผลโอแอลอีดี (Organic Light Emitting Diodes: OLED) โครงสร้างของระบบแสดงดังในรูปที่ 7

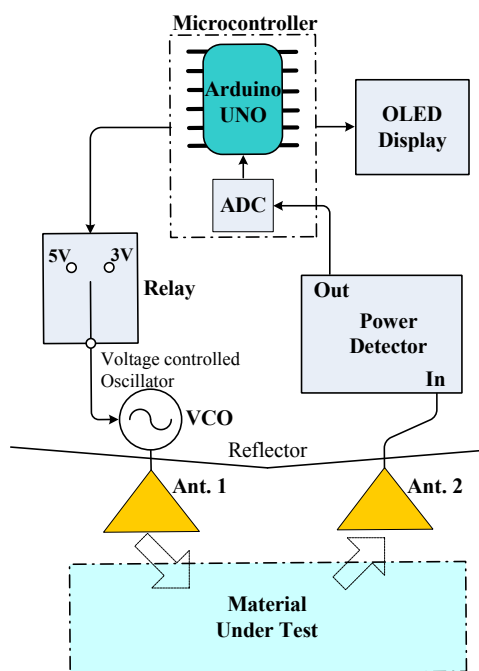


Figure 7 Architecture of the proposed soil moisture content determination system

3.4 การพัฒนาระบบตรวจวัดความชื้นดิน

ระบบที่ได้รับการพัฒนาแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับ ภาคส่งใช้อุปกรณ์รีเลย์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน ทำหน้าที่สวิตซ์การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรกำเนิดความถี่สูง (Voltage controlled oscillator: VCO) รุ่น NMRF 2400 เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ 2.40 กิกะเฮิรตซ์ หรือ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นคลื่นความถี่ถูกส่งออกด้วยสายอากาศแพทช์ตัวที่ 1 คลื่นความถี่แพร่กระจายไปยังดินตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบ เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับไปยังภาครับ ในส่วนของภาครับทำหน้าที่ตรวจวัดกำลังงานของคลื่นสะท้อนด้วยสายอากาศแพทช์ตัวที่ 2 และส่งต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานรุ่น AD8362 ของบริษัท Analog devices ที่สามารถตรวจจับกำลังงานได้ตั้งแต่ -52 ถึง 8 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ในช่วงความถี่ 0.05 ถึง 3.8 กิกะเฮิรตซ์ ที่ความต้านทาน 50 โอห์ม ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 0.4 ถึง 3.6 โวลต์ เอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานได้รับการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต โดยวงจรแปลงฝังตัวอยู่ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน จากนั้นข้อมูลได้รับการแสดงผลบนหน้าจอโอแอลอีดีขนาด 0.96 นิ้ว จำนวน 2 ข้อมูล คือ ค่ากำลังงานการสะท้อนกลับของความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ นอกจากนี้ระบบตรวจวัดได้ติดตั้งแผ่นสะท้อนเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนระหว่างส่วนประมวลผลและสายอากาศรับส่ง โครงสร้างของระบบแสดงดังในรูปที่ 8 ระบบตรวจวัดติดตั้งอยู่ด้านบนของดินตัวอย่าง ระยะห่างจากสายอากาศแพทช์ถึงดินตัวอย่างอยู่ที่ระยะ 10 เซนติเมตร การตรวจวัดดินในแต่ละตัวอย่างได้รับการควบคุมให้อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน อุณหภูมิภายในตัวเครื่องขณะตรวจวัดไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal noise) ดินตัวอย่างทั้งหมด

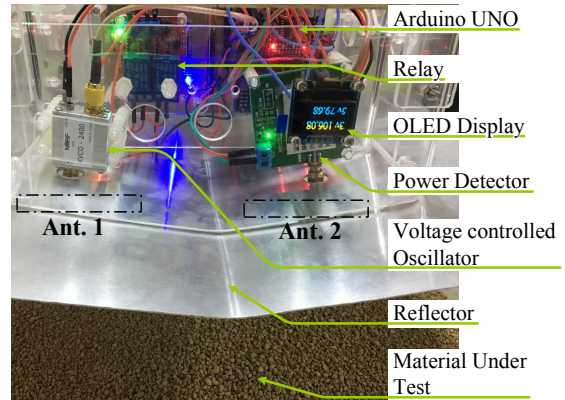


Figure 8 Fabricated prototype of soil moisture content determination system

ได้รับการอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นให้เหลือร้อยละ 0 จากนั้นจึงปรับความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5, 10 ถึง 35 ตามลำดับ ดินตัวอย่างในแต่ละระดับความชื้นถูกวัดซ้ำ 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความแม่นยำจากนั้นแสดงผลบนหน้าจอโอแอลอีดี

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

การตรวจวัดดินทำทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ที่ความชื้นร้อยละ 0 ถึง 35 ผลการตรวจวัดดินที่ความชื้นร้อยละ 0 ของความถี่ 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ 0.927 และ 0.690 โวลต์ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 กำลังงานที่ได้อยู่ที่ 0.976 และ 0.736 โวลต์ และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 15 ถึง 35 ค่าเฉลี่ยของกำลังงานที่รับได้อยู่ที่ 1.038 และ 0.765 โวลต์ 1.082 และ 0.862 โวลต์ และ 1.378 และ 1.011 โวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9

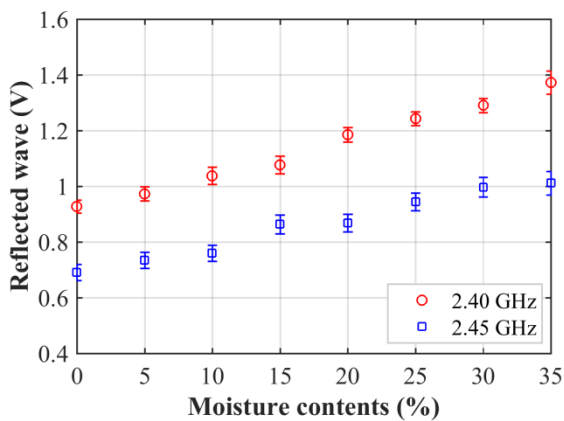


Figure 9 Magnitude of reflected wave at various moisture levels

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความชื้นมีผลต่อกำลังงานของคลื่นการสะท้อน เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r') แปรผันเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน [15] ข้อมูลการวัดของทั้ง 2 ความถี่ ได้รับการเฉลี่ยเพื่อใช้ตัดสินใจการแบ่งระดับความชื้น ที่ความชื้นร้อยละ 0 แรงดันเฉลี่ยอยู่ที่ 0.806 โวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 0.868, 0.907, 0.974 ถึง 1.194

โวลต์ ที่ความชื้นร้อยละ 5, 10, 15 และ 35 ตามลำดับ เมื่อความชื้นสูงขึ้นระดับกำลังงานที่ตรวจวัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันของทั้ง 2 ความถี่ และให้ค่า R^2 ที่ความถี่ 2.40 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.993 และความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.982 แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันของคลื่นสะท้อนสามารถแยกระดับความชื้นของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อมูลจากการวัดของทั้ง 2 ความถี่ ถูกนำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดินที่ความชื้นต่ำ ร้อยละ 0 ให้ค่า SD อยู่ที่ 0.112 และ 0.128 และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่า SD มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย และค่า SD สูงสุดที่ความชื้นร้อยละ 35 ของทั้ง 2 ความถี่ จากนั้นพิจารณาค่าความผิดพลาดแบบเฉลี่ยรวมของทั้ง 2 ความถี่ สามารถสังเกตเห็นได้ว่าที่ระดับความชื้น 0 ให้ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 1.83 เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5, 10 และ 35 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของทั้ง 2 ความถี่ อยู่ที่ร้อยละ 2.07, 2.35 และ 3.12 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

Table 3 Standard deviation of soil moisture measurement

Moisture content (%)		0	5	10	15	20	25	30	35
SD	$f = 2.40$ GHz	0.112	0.135	0.172	0.169	0.171	0.148	0.175	0.244
	$f = 2.45$ GHz	0.128	0.176	0.172	0.187	0.159	0.193	0.229	0.278
Error (%)		1.83	2.07	2.35	2.74	2.71	2.69	3.18	3.12

จากความไม่สม่ำเสมอของผิวดินและระยะห่างที่ต่างกันเล็กน้อยขณะตรวจวัด ส่งผลต่อข้อมูลการวัดค่อนข้างชัดเจนโดยเฉพาะที่ระดับความชื้นสูง ดังนั้นการควบคุมระยะห่างระหว่างระบบตรวจวัดความชื้นและดินจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาและได้รับการควบคุม ระบบวัดความชื้นดินได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในระบบให้ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ลด

ผลกระทบจากความร้อนที่เกิดจากตัวอุปกรณ์และความร้อนจากสภาพอากาศภายนอก กรณีที่ดินมีความชื้นสูงในทางทฤษฎีระบบที่นำเสนอยังคงสามารถใช้ในการตรวจวัดดินได้ เนื่องจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินที่ความชื้นสูงเกินร้อยละ 35 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น [29] ส่งผลให้ค่ากำลังงานการสะท้อนของคลื่นเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นระบบตรวจวัดความชื้นดิน

ที่นำเสนอจึงสามารถประยุกต์ใช้ในการวัดดินที่มีความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 35

5. สรุปผลการวิจัย

ระบบตรวจวัดความชื้นดินแบบไร้การสัมผัสประยุกต์ใช้กำลังงานการสะท้อนของ 2 คลื่นความถี่เพื่อตรวจวัดปริมาณความชื้นในดิน โดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่ต่างกันในแต่ละระดับความชื้น มาเป็นค่าอ้างอิงเทียบกับกำลังงานการสะท้อนของคลื่นความถี่ระบบตรวจวัดแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับที่อยู่ด้านเดียวกัน ภายในของภาคส่งใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่สามารถปรับความถี่ได้ระหว่าง 2.40 และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และส่งออกคลื่นความถี่ด้วยสายอากาศแพทช์ ภายในของภาครับมีวงจรตรวจจับกำลังงานและส่วนประมวลผลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของกำลังงานที่ได้รับเทียบกับระดับความชื้น การตรวจวัดความชื้นทำทั้งหมด 8 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 ถึง 35 ค่ากำลังงานแรงดันการสะท้อนของคลื่นความถี่ 2.40 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.927, 0.976, 1.038 ถึง 1.378 โวลต์ และความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.690, 0.736, 0.765 ถึง 1.011 โวลต์ ระดับแรงดันของทั้ง 2 ความถี่ เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันและตอบสนองต่อระดับความชื้นอย่างชัดเจน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการตรวจวัดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.179 และให้ความแม่นยำไม่น้อยกว่าร้อยละ 96.82 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจวัดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดความชื้นดินโดยไม่สัมผัส

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปี 2565 เลขที่ 2248/2565

7. References

- [1] Susha Lekshmi, S. U., Singh, D. N. and Baghini, M. S., 2014, A critical review of soil moisture measurement, Measurement, 54: 92–105.
- [2] Majcher, J., Kafarski, M., Wilczek, A., Woszczyk, A., Szyplowska, A., Lewandowski, A., Szerement, J. and Skierucha, W., 2020, Application of a monopole antenna probe with an optimized flange diameter for TDR soil moisture measurement, Sensors, (20): 1-13.
- [3] Wang, Y., Peng, J., Song, X., Leng, P., Ludwig, R. and Loew, A., 2018, Surface soil moisture retrieval using optical/thermal infrared remote sensing data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(9): 5433 - 5442.
- [4] Xu, K., Sheng, Q., Zhang, X., Li, P. and Chen, S., 2015, Design and calibration of the unilateral sensitive soil moisture sensor, IEEE Sensors Journal, 15(8): 4587-4594.
- [5] Badr A. E. and Abuarab, M. E., 2013, Soil moisture distribution patterns under surface and subsurface drip irrigation systems in sandy soil using neutron scattering technique, Irrig. Sci., v31: 317–332.
- [6] Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T. and Rosolem, R., 2012 COSMOS: the Cosmic-ray Soil Moisture Observing System, Hydrology Earth System Sci., 16: 4079–4099.

- [7] Boonpong, A. Poonprasert T. and Picha, R., 2011, Neutron scattering and X ray scattering, Thailand Institute of Nuclear Technology, Available Source: <http://nkc.tint.or.th/nkc54/content-01/nstkc54-045.html>, May 25 2011 (in Thai)
- [8] Burton, L., Jayachandran, K. and Bhansari, S., 2020, The real-time revolution for in situ soil nutrient sensing, *Journal of the Electrochemical Society*, 167(3): 1-8.
- [9] Kalita, H., Palaparthi, V. S., Shojaei Baghini, M. and Aslam, M., 2016, Graphene quantum dot soil moisture sensor, *Sensors and Actuators B*, 233: 582–590.
- [10] Pandey, G., Weber, R. J. and Kumar, R., 2018, Agricultural Cyber-Physical System: In-Situ Soil Moisture and Salinity Estimation by Dielectric Mixing, *IEEE Access*, 6:43179-43191.
- [11] Curtis, J. O., 2001, Moisture effects on the dielectric properties of soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 125-128.
- [12] Bouksila, F., Persson, M., Berndtsson, R. and Bahri, A., 2008, Soil water content and salinity determination using different dielectric methods in saline gypsiferous soil, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1): 253-265.
- [13] Lakhankar, T., Krakauer, N. and Khanbilvardi, R., 2009, Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2(1): 81-91.
- [14] Salam, A., Vuran, M. C. and Irmak, S., 2019, Di-sense: In Situ real-time permittivity estimation and soil moisture sensing using wireless underground communications, *Computer Networks*, 151: 31-41.
- [15] Bhat, A. M., Rao, B. H. and Singh, D. N., 2007, A generalized relationship for estimating dielectric constant of soils," *Journal of ASTM International*, 4(7): pp.1-12.
- [16] Orangi, A., Narsilio, G. A. and Ryu, D., 2019, A laboratory study on non-invasive soil water content estimation using capacitive based sensors, *Sensors*, 19(3): 1-29.
- [17] Zhen, X., Changjun, S., Hua, Y. and Shirui, Z., 2014, Research and design of soil water content sensor based on high-frequency capacitive, *Sensors & Transducers*, 26(Special Issue): 56-60.
- [18] Yao, Y.-S., Zheng, J.-L., Chen, Z.-S., Zhang, J.-H. and Li, Y., 2016, Field measurements and numerical simulations of temperature and moisture in highway engineering using a frequency domain reflectometry sensor, *Sensors*, 16(857): 1-18.
- [19] You, K. Y., Lee, C. Y., Then, Y. L., Chong, S. H. C., You, L. L., Abbas, Z. and Cheng, E. M., 2013, Precise moisture monitoring for various soil types using handheld microwave sensor meter, *IEEE Sensors Journal*, 13(7): 2563-2570.
- [20] Rezaei, M., Ebrahimi, E., Naseh, S. and Mohajerpour, M., 2012, A new 1.4-GHz soil moisture sensor, *Measurement*, 45(7): 1723–1728.

- [21] Suchorab, Z., Widomski, M. K., Logod, G., B-Hunek, D. and Majerek, D., 2018, A noninvasive TDR sensor to measure the moisture content of rigid porous materials, *Sensor*, 18(11): 1-20.
- [22] Luciani, G., Berardinelli, A., Cresentini, M., Romani, A., Tartagni, M. and Ragni, L., 2017, Non-invasive soil moisture sensing based on open-ended waveguide and multivariate analysis, *Sensors and Actuators A: Physical*, 265: 236-245.
- [23] Franceschelli, L., Bernardinelli, A., Crescentini, M., Iaccheri, E., Tartagni, M. and Ragni, L., 2020 A non-invasive soil moisture sensing system electronic architecture: A real environmental assessment, *Sensors*, 20(21): 1-18.
- [24] Bindlish, R., Jackson, T., Sun, R., Cosh, M., Yueh, S. and Dinardo, S., 2009, Combined passive and active microwave observations of soil moisture during CLASIC, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(4): 644-648.
- [25] Kim, Y. and van Zyl, J. J., 2009, A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2519-2527.
- [26] Shekhar, S., Prakash R. and Vidyarthi, A., 2021, Investigation of NavIC and GPS multipath phase for soil moisture studies, *Journal of Graphic Era University*, 9_2: 183-194.
- [27] Leekul, P. and Chaisaeng, P., 2019, Non-contact moisture content monitoring of growing media in bonsai pot by using radio wave frequency at 2.5 GHz, *Journal of Industrial Technology : Suan Sunandha Rajabhat University*, 7(1): 21-30. (in Thai)
- [28] Pozar, D. M., 2012, *Microwave engineering*, 4th Ed., John Wiley & Sons, USA.
- [29] Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Reichert J. M. and Minella, J. P. G., 2010, Dielectric constant obtain from TDR and volumetric moisture of soil in southern Brazil, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34: 649-658.