

การทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินโดยไม่ทำลายด้วยการวัดความจุไฟฟ้าร่วมกับคลื่นความถี่วิทยุ 50 เมกะเฮิร์ตซ์

Non-destructive Moisture Content Testing for Soil Brick Using Capacitive Measurement With 50 MHz Radio Frequency

ศุภกิต แก้วดวงตา*, ระพินทร์ ชัดปิก, กฤตยา นาคประสิทธิ์, ผดุงศักดิ์ วงศ์แก้วเขียว และ พินิจ เนื่องภิรมย์

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ช้างเผือก เมือง เชียงใหม่ 50300

Supakit Kawdungta*, Rapin Kudpik¹, Krittaya Nakprasit, Phadungsak Wongkaewkhiao and Pinit Nuangpirom

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai, 50300, Thailand

*Corresponding Author E-mail: supakitking@rmu.ac.th

Received: Aug 23, 2023; Revised: Dec 04, 2023; Accepted: Dec 07, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินด้วยการวัดความจุไฟฟ้าร่วมกับคลื่นความถี่วิทยุ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ และใช้อิฐดินเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นกลางระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อหาความชื้นของอิฐดินจากปริมาณการเก็บค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ การทดสอบประกอบด้วยวงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า วงจรวัดความจุไฟฟ้า วงจรขยายความถี่วิทยุ วงจรตรวจจับสัญญาณวิทยุ และไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นได้ทำการสร้างและประกอบวงจรเป็นเครื่องวัดความชื้นภายในอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทำการทดสอบกับอิฐดินขนาดความกว้าง 20 cm ความยาว 40 cm และความหนา 10 cm จำนวน 4 แบบ ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง 10% ถึง 30% และทำการทดสอบซ้ำอย่างละ 10 ครั้ง จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อความชื้นของอิฐดินมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอิฐดินและค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตรงตามความชื้นจึงทำให้สามารถทราบค่าความชื้นนั้นได้จากค่าความจุไฟฟ้า ผลการทดสอบยังมีความถูกต้องเปรียบเทียบการวัดความชื้นของอิฐดินกับเครื่องวัดความชื้นรุ่น SMART SENSOR AR991 พบว่า มีความผิดพลาดอยู่ที่ 4–16%

คำสำคัญ: วัสดุไดอิเล็กทริก, คลื่นความถี่วิทยุ, ค่าความชื้น, อิฐดิน, ค่าความจุไฟฟ้า

Abstract

This research paper presents a soil brick moisture measurement by capacitive measurement with radio frequency of 50 MHz and the soil brick as the dielectric material sandwiched between the conductive plates of the capacitor. The moisture content of the soil brick was considered from the capacitance storage capacity of the capacitor. The proposed measurement consisted of a voltage-controlled oscillator, capacitance measurement circuit, radio frequency amplifier, radio frequency detector, and microcontroller unit. After that, a circuit was built and assembled to the radio frequency soil moisture meter of soil bricks for evaluate the soil brick with width of 20 cm, length of 40 cm and the thickness of 20 cm. There are four types of soil brick with moisture of 10% to 30% and 10 times of iterations. From measured results, it was

found that the dielectric constant and capacitive value are directed variation with moisture content of soil bricks. Therefore, the moisture content of soil bricks can be found by capacitive measurement. From the measured results, it accurate when comparing the standard measurement with an error of 4–16%.

Keywords: Dielectric Material, Radio Frequency, Moisture Content, Soil Brick, Capacitance

1. บทนำ

จากปัจจัยสี่ของมนุษย์ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและไม่สามารถขาดได้ประกอบไปด้วย อาหาร ที่พักอาศัย เครื่องนุ่งห่ม และยารักษาโรค ดังนั้นมนุษย์เราจึงจำเป็นต้องหาแสวงหาปัจจัยเหล่านี้เพื่อการอยู่รอดและดำรงชีวิต ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ที่พักอาศัย หรือ บ้าน จะมีมูลค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยสี่ทั้งหมด จึงได้มีการเสนอแนวคิดทางเลือกเกี่ยวกับ บ้านดิน ขึ้นเพื่อใช้เป็นที่พักอาศัยที่มีราคาย่อมเยาและสามารถหาวัสดุจากธรรมชาติเพื่อนำมาสร้างเป็นบ้านได้ [1] ในการสร้างบ้านดินนั้นไม่เหมือนการสร้างบ้านทั่วไปเนื่องจากบ้านดินไม่มีระบบโครงสร้างจะใช้กำแพงรับน้ำหนัก โดยเริ่มต้นทำการทำจากก้อนอิฐดินด้วยการผสมโคลนกับเส้นใย เมื่อได้อิฐดินที่แห้งและแข็งแรงแล้วสามารถนำไปประกอบเป็นตัวบ้านดินตามความเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามข้อควรระวังเกี่ยวกับบ้านดินคือ ปัญหาน้ำกัดเซาะ ปัญหาความชื้น และปัญหาเรื่องปลวกและแมลงต่าง ๆ [1–4]

จากข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างบ้านดินที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการที่ บ้านดินจะแข็งแรงทนทานจำเป็นต้องมีความชื้นที่เหมาะสมโดยเฉพาะความชื้นในอิฐดินที่ใช้เป็นโครงสร้างหลักของบ้านดิน โดยทั่วไปแล้วอิฐที่ใช้ในงานก่อสร้างจำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติเกี่ยวกับความชื้นเนื่องจากอาจจะมีผลกระทบเกี่ยวกับความแข็งแรงทนทานและเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของเนื้ออิฐหลังจากถูกผลกระทบจากความชื้นหรือการมีความชื้นมากเกินไป [5] ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษากระบวนการอบแห้งอิฐดินซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผาเนื่องจากถ้าภายในชิ้นงานอิฐดินเผานั้นยังคงมีปริมาณความชื้นอยู่มากจะส่งผลทำให้อิฐเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปทรง เกิดการบิดงอ และไม่แข็งแรงทนทาน [6] จากความสำคัญของความชื้นดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาถึง

ผลกระทบจากความชื้นที่เกิดขึ้นในอิฐและกำแพงด้วยเทคนิคการทดสอบความชื้นแบบต่าง ๆ [7],[8] ด้วยเหตุนี้เพื่อให้บ้านดินที่จะทำการสร้างมีความคงทนแข็งแรงเราควรที่จะทราบถึงคุณสมบัติของอิฐดินด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะคุณสมบัติเกี่ยวกับความชื้นซึ่งเป็นจุดสำคัญของบ้านดิน โดยทั่วไปสามารถทดสอบความชื้นในอิฐได้ด้วยวิธีการทดสอบค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในอิฐในสภาพธรรมชาติต่อน้ำหนักของอิฐที่อบแห้ง คุณด้วย 100 ดังแสดงใน [9]

จากวิธีการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสามารถที่จะทดสอบหาความชื้นของอิฐได้อย่างแม่นยำอย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องอาศัยเครื่องมือและห้องปฏิบัติการที่มีมาตรฐาน ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบค่าความชื้น (Moisture Content: MC) ภายในอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing: NDT) วัสดุทดสอบเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ โดยออกแบบการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินจะใช้หลักการไดอิเล็กทริกของสารหรือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ด้วยการใช้อิฐดินซึ่งเป็นวัสดุทดสอบเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นประจุสองแผ่นซึ่งเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบความชื้นได้ดีและมีต้นทุนต่ำ โดยที่ความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์เป็นความถี่ที่สามารถสร้างได้ง่ายและมีการศึกษามาก่อนในเอกสารอ้างอิงที่ [10]

ซึ่งได้นำเสนอหลักการทดสอบค่าความชื้นด้วยคลื่นวิทยุทั่วไปในหัวข้อที่ 2 การออกแบบการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินในหัวข้อที่ 3 จากนั้นในหัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการสร้างและทดสอบค่าความชื้นของอิฐดิน และสุดท้ายในหัวข้อที่ 5 นำเสนอบทสรุปของบทความวิจัยนี้

2. หลักการทดสอบค่าความชื้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั่วไป

การทดสอบค่าความชื้นมีความสำคัญในหลากหลายสาขาอาชีพไม่ว่าจะเป็น การเกษตรและอุตสาหกรรม

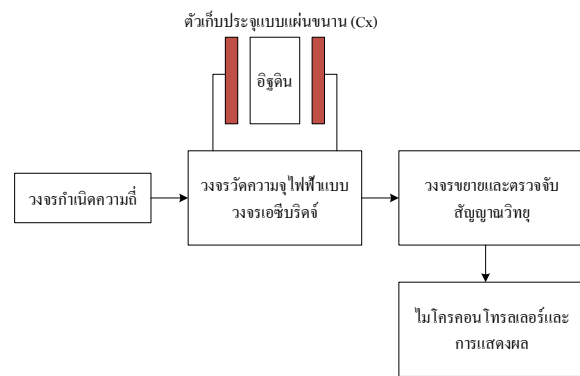
อาหารเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของธัญพืช ผลไม้ และอาหาร [11],[12] การตรวจสอบความชุ่มชื้นของร่างกาย ความชื้นของผิวหนัง [13] ความเข้มข้นของไมโครพลาสติกในของเหลว [14] และความไวของวัสดุแร่ [15] รวมไปถึงค่าความชื้นของสิ่งก่อสร้างต่างๆ อีกด้วย

เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุและค่าความชื้นจึงมีการนำเสนอวิธีการทดสอบค่าความชื้นแบบต่างๆ โดยเฉพาะการทดสอบค่าความชื้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่า S พารามิเตอร์ เช่น การสูญเสียสะท้อนกลับและการสูญเสียการส่งผ่าน [16] การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก [17] และการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เช่น ผ่านแรงดันที่สะท้อน [18] โดยในเอกสารอ้างอิงที่ [19] ได้จัดทำการเปรียบเทียบเป็นตาราง

จะเห็นว่าหลักการทำงานของการทดสอบค่าความชื้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุสามารถทำได้ในหลากหลายย่านความถี่และสามารถทำได้ในวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งในเอกสารอ้างอิงที่ [19] ได้มีการสรุปรวบรวมไว้อย่างละเอียดแต่อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ด้วยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวผ่านสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

3. การออกแบบการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดิน

การทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นการศึกษาและออกแบบ โดยใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ด้วยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวผ่านสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบด้วยวงจรภายในแบ่งเป็นภาคส่วน ดังนี้ วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) วงจรวัดความจุไฟฟ้าแบบวงจรอนุกรม (Series Resonant Circuit) วงจรขยายความถี่สูง วงจรตรวจจับสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency (RF) Detector) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และส่วนแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงทำงานของการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดิน

จากหลักการการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินจะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกของอิฐดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณความชื้นภายในอิฐดินและจากการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริกนั้นจะถูกนำมาเป็นตัวกลางระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนานเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอิฐดินจะทำให้ค่าไดอิเล็กทริกและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในสมการที่ (1)

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

โดยที่ C คือค่าความจุไฟฟ้า A คือพื้นที่แผ่นตัวนำ และ d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ ϵ คือค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุตัวกลางระหว่างแผ่นตัวนำ อย่างไรก็ตามค่าความจุไฟฟ้าที่กล่าวถึงนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งานดังแสดงในสมการที่ (2) [20]

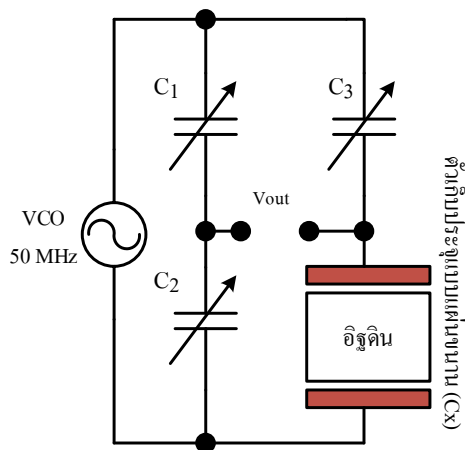
$$C_E = \frac{C}{(1 - (2\pi f_o)^2 L_s C)} \quad (2)$$

เมื่อ C_E คือค่าความจุไฟฟ้าประสิทธิผล (Effective Capacitance) ที่ความถี่ใช้งาน C คือค่าความจุไฟฟ้าปกติที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ L_s คือค่าความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance) f_o คือความถี่ใช้งาน

เมื่อนำ C_x ที่เป็นแบบแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 15 cm ยาว 30 cm มาเชื่อมต่อเป็นวงจรอนุกรม กระแสกลับดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีแหล่งกำเนิดความถี่

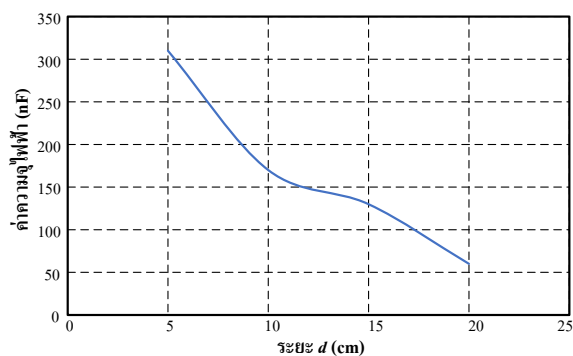
50 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีสภาวะการทำงาน 2 สภาวะคือ สภาวะสมดุล และ สภาวะไม่สมดุล โดยก่อนการทดสอบจะทำการปรับค่าให้วงจรอยู่ในสภาวะสมดุลด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นอากาศที่ระยะห่างเท่ากับขนาดความกว้างของอิเหนอร์และเมื่อต้องการทดสอบค่าความชื้นของอิเหนอร์จึงใส่อิเหนอร์เข้าไปแทนที่อากาศจะเป็นผลทำให้วงจรเกิดสภาวะไม่สมดุลทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าของวงจรขึ้นตามความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในสมการที่ (3)

$$C_1 C_x = C_2 C_3 \quad (3)$$



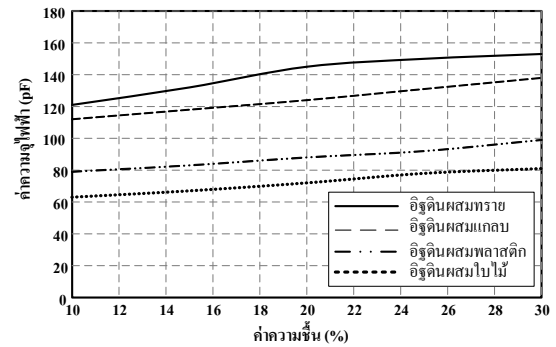
รูปที่ 2 วงจรบริดจ์กระแสสลับ

เมื่อทำการทดสอบค่าความจุไฟฟ้า C_x ในขณะวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นอากาศโดยเปลี่ยนแปลงระยะ d จาก 5 cm ถึง 20 cm พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับระยะห่าง d ดังแสดงในรูปที่ 3



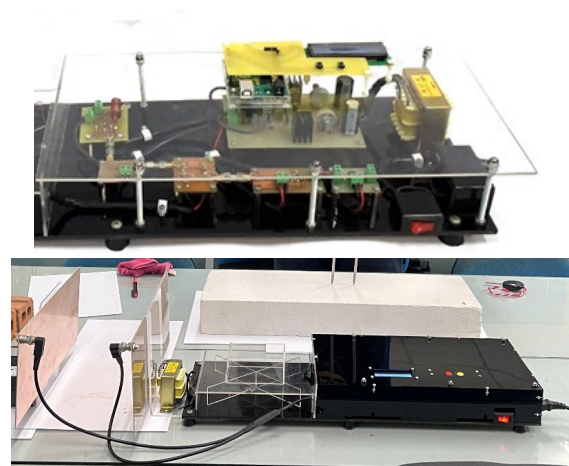
รูปที่ 3 ค่าความจุไฟฟ้า C_x ต่อระยะ d

จากนั้นทำการกำหนดค่าระยะ d ให้มีค่าคงที่เท่ากับความหนาของอิเหนอร์เท่ากับ 10 cm แล้วทำการใส่อิเหนอร์ที่มีความชื้นแตกต่างกัน 6 ระดับเข้าไปแทนที่อากาศแล้วทดสอบค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความจุไฟฟ้า C_x ต่อค่าความชื้นของอิเหนอร์

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นได้ว่าค่าความชื้นของอิเหนอร์ 4 แบบ เป็นอิเหนอร์ที่แตกต่างกันคือ อิเหนอร์ผสมทราย อิเหนอร์ผสมแกลบ อิเหนอร์ผสมถุงพลาสติก และอิเหนอร์ผสมใบไม้ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นสามารถมีผลกระทบทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าของ C_x เกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ซึ่งก็จะสามารถทำให้ประมาณค่าความชื้นจากแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรบริดจ์ จากนั้นจึงทำการสร้างเป็นเครื่องทดสอบความชื้นของอิเหนอร์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุต้นแบบขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 โดยในเครื่องต้นแบบนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันขาออกซึ่งรับมาจากวงจรตรวจจับสัญญาณวิทยุและแสดงผลออกมาเป็นค่าความชื้น



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบความชื้นของอิเหนอร์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุต้นแบบ

4. ผลการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดิน

จากผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของ C_x และเครื่องต้นแบบที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ได้นำมาใช้ในการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินตัวอย่าง 4 แบบ ที่มีขนาดความกว้าง 20 cm ความยาว 40 cm และความสูง 10 cm เท่ากัน โดยทั้ง 4 แบบ เป็นอิฐดินที่แตกต่างกันคือ อิฐดินผสมทราย อิฐดินผสมแกลบ อิฐดินผสมพลาสติก และอิฐดินผสมใบไม้ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยใช้จำนวนการทำซ้ำอย่างละ 10 ก่อน เพื่อการทดสอบซ้ำ

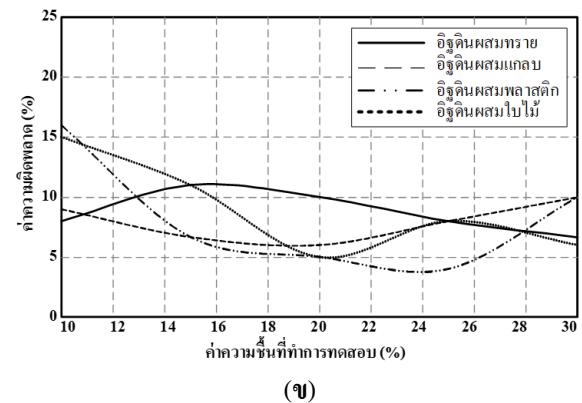
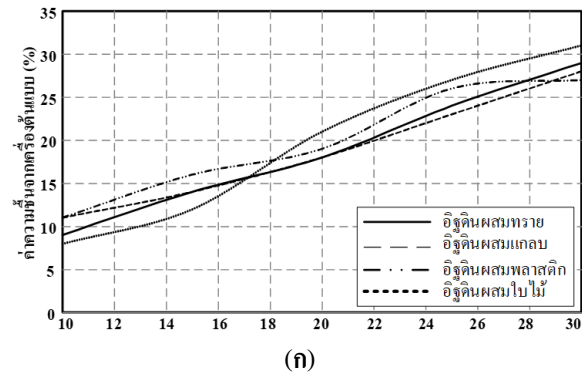
เมื่อทำการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินทั้ง 4 แบบ ด้วยเครื่องต้นแบบและเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้นทั่วไป เครื่องยี่ห้อ SMART SENSOR AR991 ด้วยช่วงของค่าความชื้นตั้งแต่ 10% ถึง 30% ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าสามารถได้ผลของค่าความชื้นของอิฐดินดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้ในการเตรียมอิฐดินตัวอย่างนั้นได้ใช้การฉีดพ่นละอองน้ำให้ทั่วทั้งก้อนของอิฐดินเพื่อเพิ่มระดับความชื้นและใช้วิธีการตากแดดเพื่อลดปริมาณความชื้นของอิฐดินตัวอย่าง



รูปที่ 6 อิฐดินตัวอย่าง 4 แบบ



รูปที่ 7 การทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินด้วยเครื่องต้นแบบและเครื่องวัดความชื้นทั่วไป



รูปที่ 8 ผลการทดสอบค่าความชื้นของอิฐดินทั้ง 4 แบบ (ก)

ค่าความชื้นที่ทดสอบได้จากเครื่องต้นแบบ (ข) ค่าความ

ผิดพลาด

จากผลการทดสอบในรูปที่ 8 พบว่าเครื่องวัดความชื้นอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุต้นแบบสามารถใช้งานได้จริงและวัดความชื้นของอิฐดินได้สามารถวัดความชื้นอิฐดินที่มีระดับความชื้นแตกต่างกันได้แต่ยังมีความถูกต้องและแม่นยำไม่มากนักโดยมีค่าความผิดพลาด 4–16% แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบซ้ำด้วยอิฐดินตัวอย่างจำนวนอย่างละ 10 ครั้ง พบว่าได้ค่าความเที่ยงตรง 90 %

5. สรุป

จากการสร้างและทดลองวงจร พบว่า เครื่องวัดความชื้นอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุสามารถใช้งานได้จริงและวัดความชื้นของอิฐดินได้ โดยเมื่อทำการทดสอบความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุพบว่า สามารถวัดความชื้นอิฐดินที่มีระดับความชื้นแตกต่างกันได้ เมื่อความชื้นอิฐดินเพิ่มขึ้น ความชื้นที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความชื้นอิฐดินด้วยคลื่นความถี่วิทยุก็เพิ่มขึ้นตามด้วย มีความถูกต้องและแม่นยำเมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับ

เครื่องยี่ห้อ SMART SENSOR AR991 พบว่ามีความผิดพลาดประมาณ 4–16%

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ภายใต้สัญญาเลขที่ 2566FF169

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Jandai, S. Sarakom and D. D. Shiraz, “Earth house philosophy and steps in building a clay house ,” in *Earth house, easy way of people who want to have a home*, 5 th edition Bangkok, Thailand: Natural Agriculture, 2012, year, ch. 1, sec. 1, pp. 1–112.
- [2] D. Sinlapasai, “Earth house: an alternative architecture case study: Baan srithan, Aumphor Pateaw, Yasothon Province,” M. Arch., Dept. Architecture, Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2003.
- [3] P. Thaochalee, P. Potibut and S. Jumpadang, “Isan adobe house: Model and utilization,” *Governance Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 252–264, 2019.
- [4] P. Boonsilp and S. Laoakka, “Earth-sheltered architecture: applying wisdom to build for living place in northeast Thailand,” *NRRU Community Research Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 129–143, 2020.
- [5] P. Chuchaisong and S. Wongthong, “Study of the properties of clay bricks produced in Chon Buri Province,” B.E. project, Engineering Dept., Burapha Univ., Thailand, 2009.
- [6] W. Ratanathavorn, S. Junbuala and W. Ratanathavorn, “Research and development of circulating system of heat loss from clay brick kiln for raw clay brick drying,” Suan Dusit University, Bangkok, Thailand, Final rep., 2018.
- [7] A. Hola, “Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings – the overview of methods,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Riga, Latvia, Sep. 17–29, 2017, pp. 1–8.
- [8] D. Giaccone, U. Santamaria and M. Corradi, “An experimental study on the effect of water on historic brickwork masonry,” *Heritage*, vol. 3, pp. 29–46, 2020.
- [9] M. Anuseri, “Testing properties and mechanical properties of bricks,” in *Theory and practice of material testing in civil engineering*, Bangkok, Thailand: Se-Ed Book Center Co., Ltd, 2011, ch. 4, sec. 1, pp. 111–134.
- [10] A. Robert, “Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, no. 1–3, pp. 89–94, 1998, doi: 10.1016/S0926-9851(98)00009-3.
- [11] Department of Internal Trade, “Formulation of moisture deduction standards for maize kernels for animal feed” opsmoac.go.th. <https://www.opsmoac.go.th/news-preview-411991791165> (accessed May 2, 2019)
- [12] J. L. R. Pauco, I. G. B. Carandang, A. B. Cayabyab, C. G. P. Quiño and E. P. Enriquez, “Low-cost DIY capacitive sensor for water activity of food samples,” in *2023 IEEE International Conference on Agrosystem Engineering, Technology & Applications (AGRETA)*, Shah Alam, Malaysia, 2023, pp. 98–101, doi: 10.1109/AGRETA57740.2023.10262650.
- [13] M. A. S. Tajin, W. M. Mongan and K. R. Dandekar, “Passive RFID-Based Diaper Moisture Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 1665–1674, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3021395.
- [14] N. Hosseini and M. Baghelani, “Selective real-time non-contact multivariable water-alcohol-sugar concentration analysis during fermentation process using microwave

- split-ring resonator based sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 325, Jul. 2021, Art. no. 112695, doi: 10.1016/j.sna.2021.112695.
- [15] R. D. Lee, H. J. Kim and P. Y. Semenov, “Precise measurement of the dielectric constants of liquids using the principle of cross capacitance,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 2, pp. 298–301, 2001, doi: 10.1109/19.918126.
- [16] C. Gilmore, M. Asefi, J. Paliwal, and J. LoVetri, “Industrial scale electromagnetic grain bin monitoring,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 136, pp. 210–220, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.03.005.
- [17] B. L. Shrestha, H. C. Wood, L. Tabil, O. -D. Baik and S. Sokhansanj, “Microwave permittivity-assisted artificial neural networks for determining moisture content of chopped alfalfa forage,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 37–42, 2017, doi: 10.1109/MIM.2017.7951691.
- [18] L. Fan, Z. Chai, Y. Wang, Z. Wang, P. Zhao, J. Li, Q. Zhou, X. Qin, J. Yao, S. Yan, et. al., “A novel handheld device for intact corn ear moisture content measurement,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 11, pp. 9157–9169, 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2994603
- [19] N. Javanbakht, G. Xiao and R. E. Amaya, “A comprehensive review of portable microwave sensors for grains and mineral materials moisture content monitoring,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120176–120184, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3108906.
- [20] R. Fiore, “Effective Capacitance VS Frequency,” in *Circuit Designer’s Notebook*, Fountain Inn, SC, USA: American Technical Ceramics, 2000, ch. 8, pp. 8.