

ระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตในช่วงอายุต้นแบบไม่ทำลาย ด้วยอัตราส่วนของกำลังงานการสะท้อนในย่านความถี่ไมโครเวฟ

Non-destructive Concrete Curing in Early Age Evaluation System with Microwave Reflection Power Ratio

พรพิมล ฉายแสง, อลงกต ไชยอุปละ, สีนัด โกศลนันท์, ประพนธ์ ลีกุล*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี 22000

Pornpimon Chaisaeng, Alongkot Chaiupala, Sinat Koslanant, Prapan Leekul*

Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000

Received 11 May 2023; Received in revised 5 July 2023; Accepted 13 July 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตแบบไม่ทำลายในช่วงอายุต้น การตรวจวัดใช้การส่งออกกำลังงานของสองคลื่นความถี่ไปยังวัสดุทดสอบและตรวจจับกำลังงานสะท้อนที่เกิดขึ้น จากนั้นเปรียบเทียบและหาค่าอัตราส่วนที่ตอบสนองต่อคุณภาพคอนกรีต ระบบตรวจวัดแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับ โดยภาคส่งทำหน้าที่ส่งออกกำลังงานความถี่ด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง กำลังงานถูกส่งผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทางไปยังสายอากาศแพทช์ต้นแบบ สายอากาศทำหน้าที่แพร่กระจายกำลังงานความถี่ไปยังคอนกรีตทดสอบและเกิดเป็นกำลังงานสะท้อนย้อนกลับมายังภาครับของระบบ กำลังงานการสะท้อนได้รับการตรวจสอบด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทางและถูกเปลี่ยนเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานแบบเป็นเชิงเส้น ระดับแรงดันไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต ด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและได้รับการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การตรวจวัดคอนกรีตในช่วงเวลาการบ่ม 10 ถึง 120 ชั่วโมง ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ให้ระดับแรงดันอยู่ในช่วง 0.844 ถึง 0.94 โวลต์ และ 0.845 ถึง 0.959 โวลต์ และความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.871 ถึง 0.876 โวลต์ และ 0.873 ถึง 0.866 โวลต์ ตามลำดับ ระดับแรงดันของ 2 คลื่นความถี่ได้รับการเทียบอัตราส่วน 2.4/2.5 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อหาความต่างของคอนกรีตบ่มน้ำและบ่มอากาศ ในช่วงอายุการบ่มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 54 ชั่วโมง ให้อัตราส่วนอยู่ในช่วง 0.969 ถึง 1.009 และ 0.968 ถึง 1.045 และที่การบ่ม 65 ถึง 120 ชั่วโมง ให้ค่าในช่วง 1.026 ถึง 1.123 และ 1.073 ถึง 1.183 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความต่างสัมบูรณ์ของคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศ ในช่วงอายุน้อยกว่าหรือเท่ากับ 37 ชั่วโมง ความต่างมีเพียงเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นในช่วงอายุ 38 ถึง 81

ชั่วโมง ให้ความต่างอยู่ที่ 1.003 ± 0.014 ถึง 1.036 ± 0.026 และมีความแตกต่างสูงสุดในช่วง 82 ถึง 120 ชั่วโมง อยู่ที่ 1.076 ± 0.032 ถึง 1.114 ± 0.031 ความต่างที่ชัดเจนส่งผลให้การแยกคุณภาพการบ่มคอนกรีตทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบเซนเซอร์; การบ่มคอนกรีต; คลื่นสะท้อน

Abstract

This paper presents a non-destructive concrete curing evaluation system in early age. The system using transmission of two frequency signals tests material and measures reflected power signal to compare and calculate response ratio to curing quality of concrete. The system consists of transmitted and received parts. The transmitted part generates signal by a high-frequency synthesizer and sends the signal through a directional coupler to patch antenna prototype. The antenna serves to propagate signal power to concrete sample and receives reflected signal from the concrete sample backward to the received part. The reflected signal is detected by directional coupler and converted to DC voltage by linear power detector. Subsequently, DC voltage is converted to digital signal 10-bit by ADC convertor and then processed with microcontroller board. The voltage level of concrete measurement in early age from 10 to 120 hours at 2.4 GHz was in range of 0.844 to 0.94 V and 0.845 to 0.959 V, and at 2.5 GHz was in range of 0.871 to 0.876 V and 0.873 to 0.866 V. The voltage data measurement from two frequencies with ratio of 2.4/2.5 GHz was adopted to obtain the difference between wet curing and air curing concretes. In age below 54 hours, the ratio was difference in range of 0.969 to 1.009 and 0.968 to 1.045. In age between 65 and 120 hours, it was in range of 1.026 to 1.123 and 1.073 to 1.183. Considering the absolute voltage ratio difference between wet and air curing concretes in age less than or equal to 37 hours, it was slightly different. When curing age was 38 to 81 hours, the absolute voltage ratio difference was 1.003 ± 0.014 to 1.036 ± 0.026 . The most difference was 1.076 ± 0.032 to 1.114 ± 0.031 at age in range of 82 to 120 hours. The result indicates that the clearly different ratio can be an effective method to classify curing concrete quality.

Keywords: Sensor system; Curing concrete; Reflected wave

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุหลักสำหรับงานโยธาที่แพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งอาคาร ทางเท้า โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ถนน สะพาน กำแพงอิฐ ฐานรากประตูและรั้ว [1] แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นสารหลักที่กำลังแก่คอนกรีต เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งของปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเมื่อมีน้ำทำปฏิกิริยาสาร CSH เกิดขึ้นมากส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดสูง ดังนั้นการบ่มคอนกรีตจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องจากเป็นวิธีรักษาความชื้นในคอนกรีตในช่วงอายุต้นหลังผสมเสร็จทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดตามต้องการ หากมีน้ำไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์น้อยลงในในช่วงหลัง สาร CSH เกิดขึ้นน้อยเกิดช่องว่างระหว่างซีเมนต์มาก ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเมื่อแข็งตัวรับกำลังได้น้อย แตกง่าย นอกจากนั้นคอนกรีตที่ไม่ถูกบ่มอย่างเหมาะสม สารเคมีอันตรายต่างๆ ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม [2] นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันในการบ่ม [3] จำนวนวันบ่มที่เหมาะสมขึ้นกับการนำไปใช้งาน การก่อสร้างจริงอาจทำได้ไม่เป็นไปตามกำหนด เนื่องจากข้อกำหนดเวลาในสัญญาการก่อสร้าง ทำให้ผู้ควบคุมการก่อสร้างต้องตรวจสอบเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ได้มาตรฐาน การบ่มโดยทั่วไปใช้การให้ความชื้นระเหยไปข้างที่สุดหรือเรียกว่าบ่มน้ำ คอนกรีตที่แห้งตามธรรมชาติไม่มีกระบวนการรักษาความชื้นเรียกว่าบ่มในอากาศ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นหนึ่งในคุณสมบัติสำคัญ โดยเฉพาะด้านแผ่นดินไหว การประเมินค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการประเมินอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก [4]

การตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัดมีทั้งวิธีแบบทำลายและไม่ทำลาย การตรวจสอบแบบไม่ทำลายถูกนำมาใช้แพร่หลายเนื่องจากสะดวก สามารถตรวจสอบ

บนโครงสร้างจริง ไม่ต้องเก็บตัวอย่าง และการตรวจสอบแบบไม่ทำลายช่วยลดขยะคอนกรีตที่เป็นของเสียจากการทดสอบ ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เชื่อถือได้ [5] การตรวจสอบอาคารโดยทั่วไปตรวจสอบแบบไม่ทำลายก่อน เมื่อพบข้อบกพร่องจึงทดสอบแบบทำลายซึ่งแม่นยำมากกว่า วิธีการตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายที่ใช้โดยทั่วไปคือ ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's rebound hammer) [6] วิธีนี้ใช้เวลาทดสอบน้อย แต่มีข้อจำกัดด้านผลกระทบจากแรงโน้มถ่วง ทำให้ค่าอ่านได้ไม่เท่ากันสำหรับคอนกรีตชนิดเดียวกันเมื่อวัดในทิศทางต่างกัน และต้องปรับให้ถูกต้องด้วยการคูณค่าสัมประสิทธิ์ หรืออ่านค่าจากตารางของแต่ละทิศทาง [7] จึงไม่สามารถแสดงผลได้ทันที และยังไม่สะท้อนความเป็นจริงของโครงสร้าง [8] การตรวจสอบด้วยความเร็วพัลส์ของอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity) [9] วิธีการนี้ผลการทดลองให้ค่าที่ประเมินไว้การกระจายตัวมาก โดยมีความเบี่ยงเบนจากค่ากำลังรับแรงอัดของจริงค่อนข้างมาก [10] นักวิจัยได้นำเสนอเทคนิคการวัดค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แห้งสนิทแล้วแบบไม่ทำลายไว้หลายเทคนิค ได้แก่ การวัดกำลังอัดคอนกรีตโดยการใช้ 2 วิธีควบคู่กัน คือ ความเร็วพัลส์อัลตราโซนิกร่วมกับค้อนกระแทกแบบสมิทท์ และใช้การประมวลผลแบบการวิเคราะห์การถดถอย [8] หรือการใช้โครงข่ายประสาทเทียม [10] วิธีนี้สามารถวัดบนโครงสร้างจริงโดยไม่ทำลาย ใช้วิธีการวัดที่ใช้งานอยู่ทั่วไปจึงง่ายต่อการประยุกต์ใช้ และให้ผลการทดสอบที่ความแม่นยำมากขึ้น แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดยังไม่สามารถแสดงผลได้ทันที เทคนิคการใช้เครื่องมือวัด 3 ชนิด ได้แก่ ความเร็วพัลส์อัลตราโซนิก ค้อนกระแทกแบบสมิทท์ และการวัดความพรุน วิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นและนำโครงสร้างพัฒนาเป็นระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้สัญลักษณ์ภาพ (Graphic user interface : GUI) เมื่อกรอกข้อมูลการวัดจากเครื่องมือทั้ง 3 ชนิด จึงแสดงผลได้ทันที

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 (\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)) \quad (1)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุม และ คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศ สำหรับขนาดของกำลังงานการสะท้อนกลับสามารถแสดงได้จากสมการสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ของคลื่น Γ กรณีที่คลื่นเดินทางจากตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นอากาศไปยังตัวกลางที่ 2 ที่เป็นตัวกลางไดอิเล็กตริกค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสดงดังสมการที่ (2) [21]

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

มีนักวิจัยให้ความสนใจศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์คอนกรีตไว้ในงานก่อนหน้า [16], [17] โดยพบว่าที่ระดับอายุคอนกรีตเท่ากัน กำลังอัดรับแรงอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อวัดที่ความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และค่าไดอิเล็กตริกลอสมแพคเตอร์สัมพัทธ์ตอบสนองต่อคอนกรีตที่ใช้วิธีแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศแต่ละช่วงอายุ [18] ดังนั้นเมื่อคลื่นความถี่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกันจึงเกิดการสะสมพลังงานหรือเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน รวมถึงเกิดการสะท้อนของกำลังงานความถี่ที่ไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความแตกต่างของกำลังอัดคอนกรีตในบทความ โดยอ้างอิงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีตจาก [16], [17] เพื่อใช้ในการจำลองระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีต

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 จำลองระบบตรวจสอบคุณภาพคอนกรีต

การวิเคราะห์ระบบเริ่มจากการจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Microwave CST studio suite) ในการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.4 2.45 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ การจำลองประยุกต์ใช้สายอากาศแพทช์เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนต่ำ ขนาดกะทัดรัด ติดตั้งเข้ากับระบบได้ง่าย สายอากาศได้รับการจำลองบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR 4 ความหนาของวัสดุฐานรอง 2.4x2 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ 4.1 ดังนั้นค่าความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง (λ_g) ที่ความถี่ทำงานต่ำสุด 2.4 กิกะเฮิรตซ์ คือ 78.3 มิลลิเมตร สายอากาศมีส่วนแพร่กระจายคลื่นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Figure 1) ขนาดความกว้างและสูงเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง และระยะจุดบ่อนสัญญาณประมาณ $\lambda_g/4$ และสายอากาศได้รับการจำลองเพื่อปรับโครงสร้างอย่างละเอียด

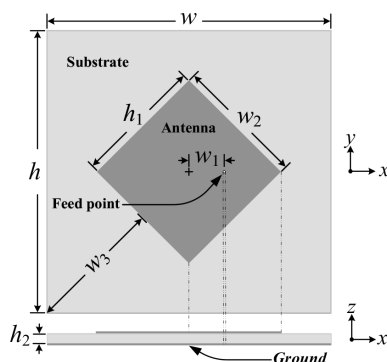
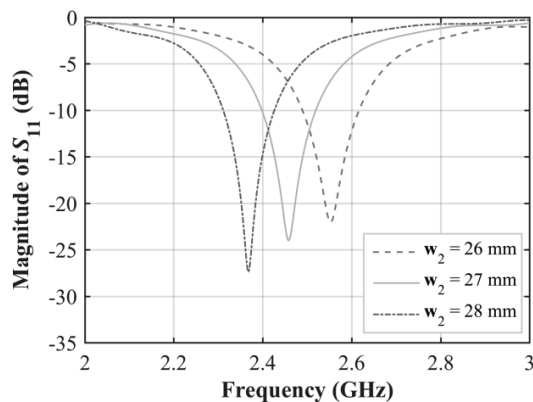


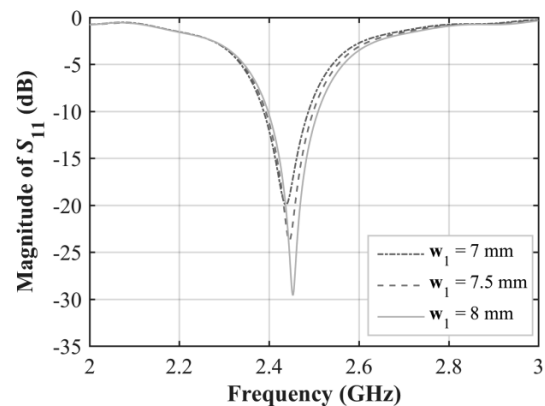
Figure 1 Patch antenna configuration.

การปรับความขนาด (h_1 , w_2) ของตัวนำส่วนแพร์กระจายคลื่นที่ระยะ 26 27 และ 28 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ จากการจำลองอยู่ที่ -22.05 -24.01 และ -27.4 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.55 2.46 และ 2.37 กิกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นว่าขนาดที่เหมาะสมของตัวนำอยู่ที่ 27 มิลลิเมตร (Figure 2a) จากนั้นปรับระยะจุดป้อนสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำสุด โดย



(a)

การปรับระยะจุดป้อนสัญญาณ (w_1) ตั้งแต่ 7 7.5 และ 8 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ได้รับอยู่ที่ -19.98 -23.76 และ -29.6 เดซิเบล ตามลำดับ ดังนั้นจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสมอยู่ที่ 8 มิลลิเมตร ความถี่ทำงานที่ต่ำกว่า -10 เดซิเบล อยู่ในช่วง 2.39 ถึง 2.51 กิกะเฮิรตซ์ (Figure 2b)



(b)

Figure 2 Antenna configuration (a) patch width (b) feed point.

โครงสร้างของสายอากาศแพทช์จากการจำลอง มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดตัวนำส่วนแพร์กระจายคลื่นของสายอากาศอยู่ที่ระยะ 27 มิลลิเมตร วางอยู่

บนของวัสดุฐานรองที่มีระนาบกรวดอยู่ด้านล่างขนาด 60 มิลลิเมตร โครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศ (Table 1)

Table 1 Dimension of patch antenna

Parameters	Dimension (mm)
h, w	60.0
w_1	8.0
h_1, w_2	27
h_2	4.8
w_3	29

สายอากาศถูกนำมาใช้ในการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีต โมเดลคอนกรีตแบบบ่มน้ำและแบบบ่มอากาศได้รับการปรับคุณสมบัติไดอิเล็กทริกอย่างสอดคล้องกับช่วงอายุต้น คอนกรีตแบบบ่มน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่

ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 10 ถึง 8 และคอนกรีตแบบบ่มอากาศอยู่ที่ 10 ถึง 7 โมเดลการจำลองกำหนดตำแหน่งของคอนกรีตอยู่ด้านหน้าของสายอากาศที่ระยะห่าง 7 เซนติเมตร ขนาดคอนกรีต กว้างxยาวxหนา อยู่ที่ 10x10x3 เซนติเมตร (Figure 3)

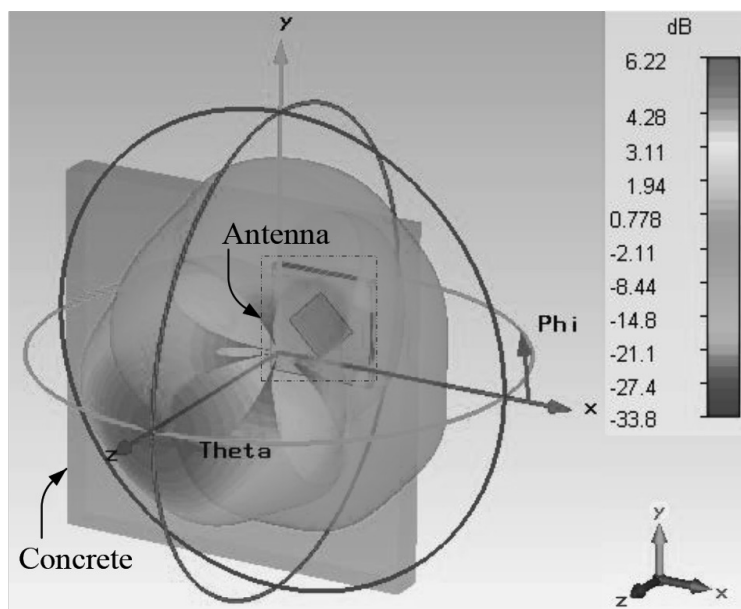


Figure 3 Curing concrete quality measurement system simulation in CST studio suite.

การจำลองทำในช่วงความถี่ 2.4 2.45 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมีทั้งหมด 11 ตัวอย่าง และมีช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 10-120 ชั่วโมง การตรวจวัดคอนกรีตแบบบ่มน้ำและแบบบ่มอากาศที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่อายุ 10 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ได้รับมีค่าเท่ากันที่ -10.2 เดซิเบล เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 21 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ที่ -10.8 และ -10.6 เดซิเบล เมื่ออายุเพิ่มขึ้น ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง และที่อายุ 120 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ที่ -14.94 และ -14.14 เดซิเบล (Figure 4a) สำหรับความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่อายุ 10 ชั่วโมง คอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ เท่ากันที่ -21.11 เดซิเบล เมื่ออายุเพิ่มขึ้นที่ 54 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ลดลงอยู่ที่ -28.4 และ -29.42 เดซิเบล

และเมื่ออายุเพิ่มขึ้นจาก 65 ถึง 120 ชั่วโมง ค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง -25.73 และ -30.26 เดซิเบล ถึง อยู่ที่ -18.02 และ -22.15 เดซิเบล ตามลำดับ (Figure 4b) อย่างไรก็ตามความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ข้อมูลมีความซับซ้อนในการตัดสินใจจึงไม่ได้รับการพิจารณาเพื่อใช้งานจริงและความถี่สุดท้ายคือ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ที่อายุ 10 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของคอนกรีต 2 แบบ ให้ค่าเท่ากันที่ -11.31 เดซิเบล และลดลงเล็กน้อยเมื่ออายุเพิ่มขึ้นถึง 43 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 54 65 ถึง 120 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ได้รับจากคอนกรีตแบบบ่มน้ำและแบบบ่มในอากาศเพิ่มขึ้นเป็น -11 และ -11.5 เดซิเบล -10.61 และ -11.35 เดซิเบล ถึง -8.8 และ -9.97 เดซิเบล ตามลำดับ (Figure 4c)

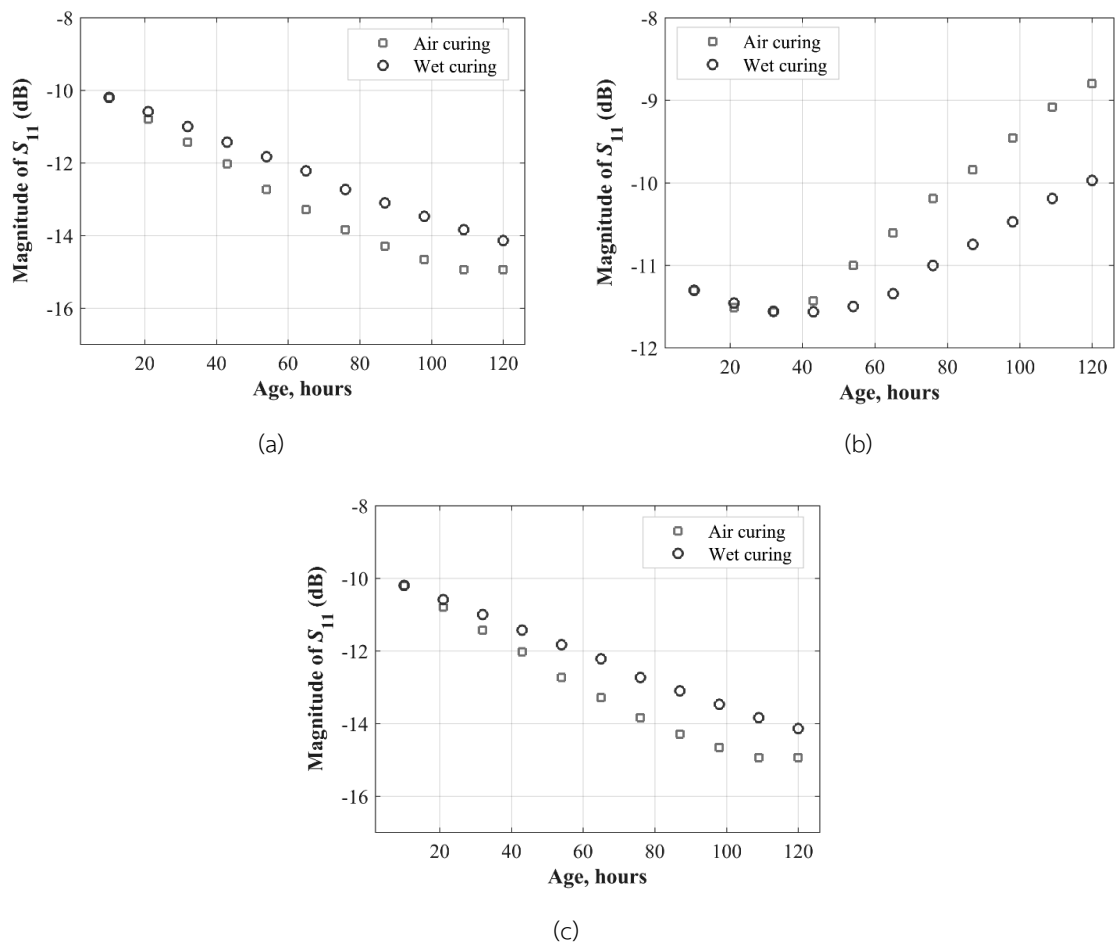


Figure 4 Wet curing and air curing concrete measurement simulation at (a) 2.4 (b) 2.45 and (c) 2.5 GHz.

จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟตอบสนองต่ออายุการบ่มคอนกรีต สังเกตได้จากคุณสมบัติไดโพลเล็กทรอนิกส์ของคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศที่ต่างกันตามการสูญเสียน้ำ ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นมีผลกับกำลังงานการสะท้อนกลับของ $|S_{11}|$ รวมถึงส่งผลกระทบต่อความถี่ทำงานของสายอากาศ เมื่อสังเกต $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ แสดงให้เห็นถึงกำลังงานการสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ต่างกันตามอายุการบ่มคอนกรีต ดังนั้นสายอากาศจึงได้รับการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัด

3.2 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

ระบบแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับที่ทำหน้าที่ส่งออกกำลังงานความถี่และตรวจจับกำลังงานสะท้อนโดยใช้สายอากาศ 1 ตัว ภาคส่งประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมระบบและแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ กำลังงานความถี่ถูกสร้างที่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานความถี่ส่งออกไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทาง (Directional coupler) และผ่านไปยังสายอากาศ กำลังงานความถี่แพร่กระจายไปยังคอนกรีตและเกิดเป็นกำลังงานสะท้อนกลับมายังสาย

อากาศ กำลังงานสะท้อนถูกส่งต่อมายังอุปกรณ์เชื่อมต่อ
รวมแบบมีทิศทางและได้รับการตรวจจ็ับด้วยอุปกรณ์
ตรวจจ็ับกำลังงานเพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
จากนั้นถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อนำมาใช้ในการ

ประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลได้รับ
การวิเคราะห์และแสดงผลด้วยหน้าจอแอลอีดี (OLED)
(Figure 5)

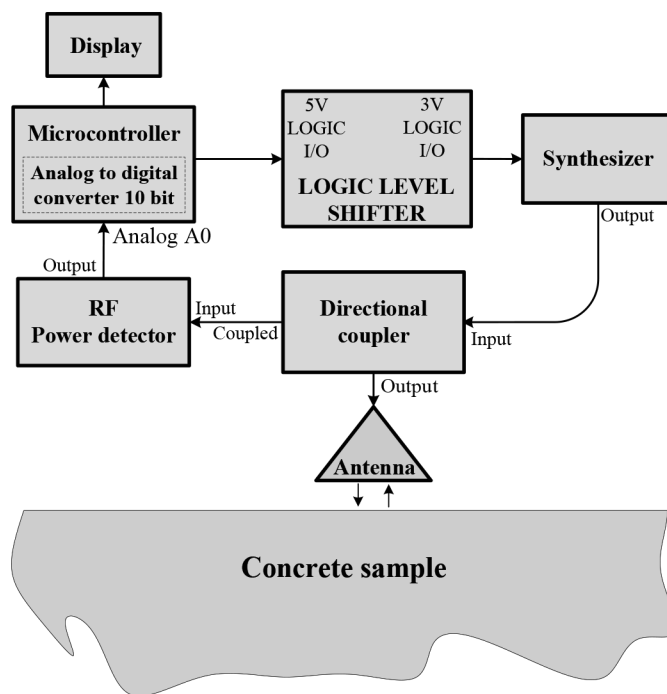


Figure 5 Schematic of sensor system prototype.

คอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศในช่วงอายุต้นตั้งตั้งแต่
10 ถึง 120 ชั่วโมง ได้รับการประมวลผลโดยใช้การเปรียบ
เทียบอัตราส่วนของกำลังงานสะท้อนระหว่างความถี่
2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ รวมถึงวิเคราะห์ที่ค่าความ
ต่างสมบรูณ์ของอัตราส่วนกำลังงานสะท้อนจากคอนกรีต
แต่ละแบบเพื่อใช้เป็นระดับอ้างอิงในการตัดสินใจ

3.3 การพัฒนาสายอากาศต้นแบบ

โครงสร้างจากการจำลองของสายอากาศได้
รับการพัฒนาเป็นสายอากาศต้นแบบ (Figure 6a)

สายอากาศได้รับการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่อง
วิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network
analyzer: VNA) ของบริษัท Keysight รุ่น fieldfox
N9916A ในช่วงความถี่ 2 ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์ สายอากาศ
ต้นแบบให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 เดซิเบล ใน
ช่วงความถี่ 2.38 ถึง 2.51 กิกะเฮิรตซ์ จากการทดสอบ
แสดงให้เห็นว่าความถี่ทำงานของสายอากาศสอดคล้อง
กับผลการจำลอง (Figure 6b)

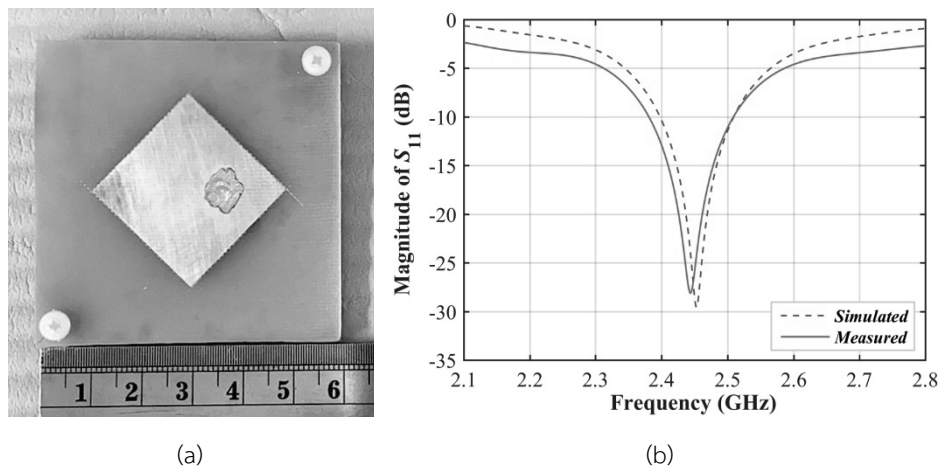


Figure 6 (a) Fabricated antenna prototype and (b) comparison of measured with simulated $|S_{11}|$.

การจำลองระบบตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการแยกคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นสายอากาศจึงได้รับการพัฒนาและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจากการทดสอบสายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 2.4 ถึง 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับระบบต้นแบบ

3.4 ระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตต้นแบบ

ระบบที่ได้รับการพัฒนาประยุกต์ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Nano V 3.0 รุ่น AT-MEGA328P ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่สามารถปรับความถี่ได้รุ่น ADF4351 ของบริษัท Analog Devices ที่สร้างความถี่ได้ในช่วง 0.035 ถึง 4.4 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานความถี่ปรับได้ในช่วง -4 ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ โมดูล ADF4351 ใช้สัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน 3 โวลต์ สัญญาณควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จึงได้รับการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจาก 5 เป็น 3 โวลต์ เพื่อควบคุมการสร้างสัญญาณความถี่ที่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ที่กำลังงานส่ง +4 เดซิเบลมิล

ลิวัตต์ กำลังงานถูกส่งเข้าขาอินพุตของอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทางของบริษัท Mini circuit รุ่น ZHDC-10-63-S+ ระดับของสัญญาณคัปปีงอยู่ที่ -10 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 0.05 ถึง 6 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานถูกส่งต่อไปยังสายอากาศแพทช์ต้นแบบและแพร่กระจายไปยังคอนกรีตทดสอบ กำลังงานสะท้อนที่เกิดจากคอนกรีตได้รับการตรวจจับด้วยสายอากาศตัวเดียวกันและส่งกลับมายังอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทาง กำลังงานการสะท้อนกลับที่ได้รับถูกใช้เป็นอินพุตสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานของบริษัท Mini circuit รุ่น ZX47-60LN-S+ ทำงานในช่วงความถี่ 0.01 ถึง 8 กิกะเฮิรตซ์ ระดับกำลังงานที่สามารถตรวจจับได้อยู่ในช่วง -60 ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และให้เอาต์พุตในทางตรงข้ามอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 0.5 โวลต์ ระดับแรงดันที่ได้รับถูกส่งเข้าที่ขา A0 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต ด้วยวงจรแปลงสัญญาณที่ฝังอยู่ภายในและส่งออกข้อมูลเพื่อแสดงผลโดยใช้หน้าจอโอแอลอีดี (Figure 7)

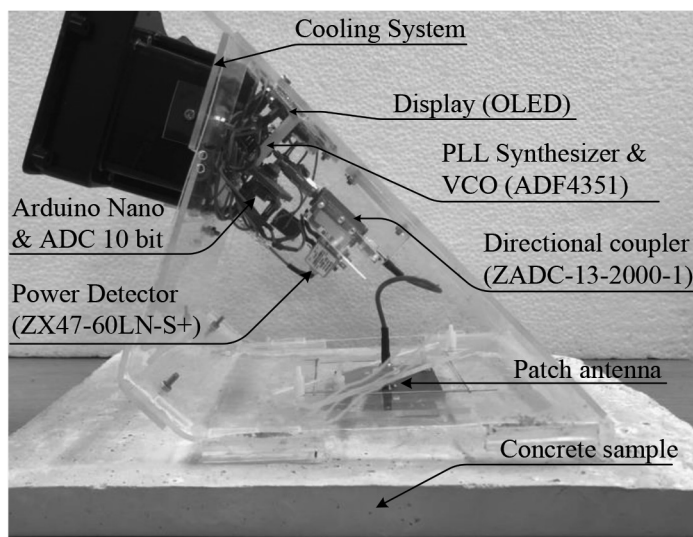


Figure 7 Fabricated sensor system prototype.

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

ระบบตรวจวัดได้รับการทดสอบการแยกคุณภาพคอนกรีตโดยไม่ทำลาย ระหว่างคอนกรีตแบบบ่มน้ำที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงและแบบบ่มอากาศที่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำ ระบบทำงานที่ความถี่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ การตรวจวัดในแต่ละตัวอย่างของการบ่มคอนกรีตได้รับการวัดซ้ำ 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ข้อมูลมีความแม่นยำมากที่สุด การเก็บข้อมูลทำทุกๆ 1 ชั่วโมง และทำต่อเนื่องทั้งหมด 120 ชั่วโมง ภายในห้องทดลองได้รับการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ตรวจจับกำลังแบบให้เอาต์พุตในทางตรงข้าม (ZX47-60LN-S+) ถูกใช้ระบบตรวจวัด ดังนั้น เมื่อกำลังงานความถี่ต่ำส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงและที่กำลังงานความถี่สูงส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ การตรวจวัดคอนกรีตที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ในช่วงอายุ 10 ถึง 54 ชั่วโมง คอนกรีตแบบบ่มน้ำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.844 ถึง 0.884 โวลต์

และแบบบ่มอากาศอยู่ที่ 0.845 ถึง 0.905 โวลต์ ค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าจากคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศต่างกันเพียงเล็กน้อย ต่อมาในช่วงอายุ 55 ถึง 64 ชั่วโมง ค่าความต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่ออายุเพิ่มขึ้นในช่วง 65 ถึง 120 ชั่วโมง ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.894 ถึง 0.94 โวลต์ และ 0.917 ถึง 0.959 โวลต์ ในช่วงอายุดังกล่าวค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศแตกต่างกันอย่างชัดเจน (Figure 8a) การตรวจวัดที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ในช่วงอายุ 10 ถึง 43 ชั่วโมง คอนกรีตทั้ง 2 แบบ ให้ระดับแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.871 ถึง 0.877 โวลต์ และ 0.873 ถึง 0.875 โวลต์ และในช่วงอายุ 44 ถึง 53 ชั่วโมง ให้ค่าความต่างลดลงและที่อายุคอนกรีต 54 ถึง 120 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้ามีความต่างชัดเจนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.876 ถึง 0.837 โวลต์ และ 0.866 ถึง 0.811 โวลต์ (Figure 8b)

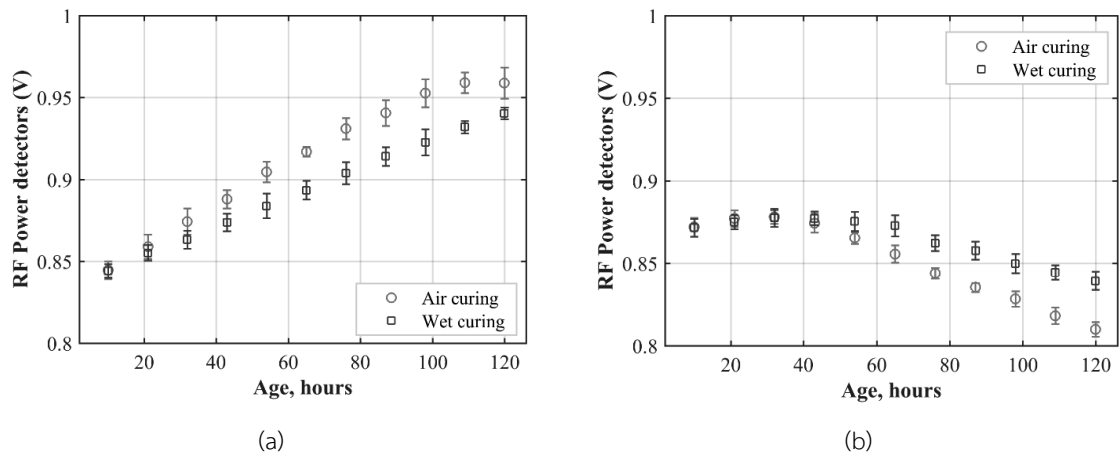


Figure 8 Measure curing quality of concrete with sensor system prototype (a) 2.4 GHz (b) 2.5 GHz.

ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากคอนกรีตแบบบ่มน้ำแตกต่างจากบ่มอากาศอย่างชัดเจนในแต่ละช่วงอายุคอนกรีต แรงดันที่ได้จากคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศของความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ต่างกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้า คอนกรีตแบบบ่มอากาศให้ระดับแรงดันสูงกว่าคอนกรีตแบบบ่มน้ำและชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตมากกว่า 54 ชั่วโมง และที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่ออายุคอนกรีตมากกว่า 54 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าระหว่างคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศต่างกันค่อนข้างชัดเจน โดยมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน

ข้อมูลถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่ 2.4 ต่อ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ ทั้งแบบบ่มน้ำ R_w และแบบบ่มอากาศ R_a เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการแยกคุณภาพการบ่มเทียบกับอายุคอนกรีต สังเกตได้ว่าในช่วงอายุที่ 10 ถึง 32 ชั่วโมง ค่าอัตราส่วนของคอนกรีตแบบบ่มน้ำอยู่ที่ 0.969 ถึง 0.985 และบ่มอากาศอยู่ที่ 0.968 ถึง 0.997 เมื่ออายุเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและที่ 120 ชั่วโมง ค่าอัตราส่วนแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศอยู่ที่ 1.123 และ 1.183 ซึ่งอัตราส่วนแสดงให้เห็นถึงความต่างของคุณภาพในการบ่มคอนกรีตอย่างชัดเจน (Figure 9)

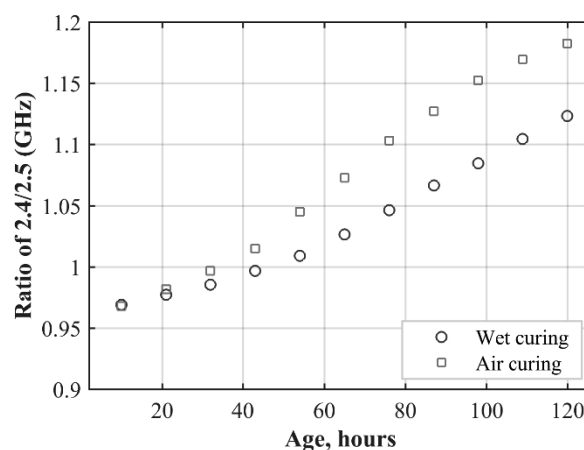


Figure 9 Voltage ratio of 2.4/2.5 GHz signal compared with concrete age.

อัตราส่วนของระดับแรงดันไฟฟ้าได้รับการคำนวณค่าความต่างสัมบูรณ์ $|R_A - R_W|$ เพื่อแบ่งคุณภาพการบ่มคอนกรีตตามช่วงอายุ การแยกคุณภาพการบ่มคอนกรีตในช่วงอายุ 10 ถึง 37 ชั่วโมง ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากความต่างมีเพียงเล็กน้อย เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 38 ถึง 59 ชั่วโมง อัตราส่วนของระดับแรงดันอยู่ที่ 1.003 และเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ± 0.014

แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการแยกคุณภาพการบ่มคอนกรีต และที่อายุ 60 ถึง 104 ชั่วโมง ความต่างของอัตราส่วนสามารถแยกกันได้ชัดเจนอยู่ที่ 1.036 และเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง ± 0.026 ความชัดเจนในการแบ่งคุณภาพคอนกรีตอยู่ที่เวลา 82 ถึง 120 ชั่วโมง ซึ่งมีความต่างอยู่ที่ 1.076 และ 1.114 เปลี่ยนแปลงได้อยู่ที่ ± 0.032 และ ± 0.031 (Table 2)

Table 2 Absolute voltage ratio differences at each range of concrete age

Age (hour)	$ R_W - R_A $
10 to 37	0.977 $\pm$ 0.003
38 to 59	1.003 $\pm$ 0.014
60 to 81	1.036 $\pm$ 0.026
82 to 104	1.076 $\pm$ 0.032
105 to 120	1.114 $\pm$ 0.031

ในช่วงการบ่มคอนกรีตที่ระยะเริ่มต้นค่าความต่างสัมบูรณ์ของอัตราส่วนแรงดันต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นการแยกคุณภาพคอนกรีตด้วยอัตราส่วนสามารถทำได้ชัดเจน โดยเฉพาะที่อายุการบ่มมากกว่า 82 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ค่าความต่างสัมบูรณ์ระหว่างคอนกรีตบ่มน้ำและบ่มอากาศมีความละเอียด ดังนั้นค่าสัมบูรณ์ดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับระบบที่มีเสถียรภาพและข้อมูลมีความแปรปรวนต่ำ ในกรณีที่ข้อมูลมีความผันผวนสูงระบบควรได้รับการประยุกต์ใช้วงจรปรับแต่งย่านการวัดแบบเชิงเส้น (Zero and span circuits) สำหรับขยายแรงดันการสะท้อน ซึ่งวงจรขยายสามารถปรับปรุงให้ค่าความต่างสัมบูรณ์ต่างกันชัดเจนและเพิ่มสมรรถนะของระบบตรวจวัด

ผลการตรวจวัดคอนกรีตด้วยระบบต้นแบบให้ค่าเอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยขนาดของ S_{11} ตามหลักการของอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน Mini circuit รุ่น ZX47-60LN-S+ ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ รวมถึงความใหม่ของระบบที่นำเสนอ คือ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ โดยเปรียบเทียบความแตกต่าง

ของกำลังงานการสะท้อนของ 2 คลื่นความถี่ ด้วยระบบต้นแบบที่ใช้งานง่าย ซึ่งโดยทั่วไปการตรวจสอบความต่างของความถี่เรโซแนนซ์ใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการที่มีราคาสูงและผู้ใช้ต้องมีทักษะการใช้งาน

5. สรุป

ระบบการตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตแบบไม่ทำลายประยุกต์ใช้อัตราส่วนของกำลังงานสะท้อนระหว่าง 2 คลื่นความถี่ การวิเคราะห์เริ่มจากการจำลองความสามารถในการแยกคุณภาพการบ่มคอนกรีตด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นระบบได้รับการพัฒนาโดยแบ่งออกเป็น แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงทำหน้าที่สร้างกำลังงานความถี่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และส่งออกกำลังงานความถี่ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทางไปยังสายอากาศแพทช์ สายอากาศทำหน้าที่แพร่กระจายกำลังงานของแต่ละความถี่ไปยังคอนกรีตตัวอย่างและเกิดเป็นกำลังงานสะท้อน สายอากาศทำหน้าที่รับกำลังงานสะท้อนและส่งต่อไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อร่วมแบบมีทิศทาง กำลังงานความถี่ถูกเปลี่ยนเป็นระดับแรงดัน

ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานและเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 บิต ด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จากนั้นข้อมูลได้รับการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และตัดสินใจการตรวจวัดคอนกรีตแบบบ่มน้ำและบ่มอากาศของทั้งสองความถี่ในช่วงอายุการบ่ม 10 ถึง 120 ชั่วโมง ระดับกำลังงานของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ในช่วง 0.844 ถึง 0.94 โวลต์ และ 0.845 ถึง 0.959 โวลต์ และของ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ อยู่ที่ 0.871 ถึง 0.876 โวลต์ และ 0.873 ถึง 0.866 โวลต์ ตามลำดับ จากนั้นระดับแรงดันของทั้งสองความถี่ได้รับการเทียบอัตราส่วน คือ 2.4/2.5 กิกะเฮิรตซ์ ในช่วงอายุการบ่มที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 54 ชั่วโมง ให้อัตราส่วนอยู่ในช่วง 0.969 ถึง 1.009 และ 0.968 ถึง 1.045 และที่การบ่ม 65 ถึง 120 ชั่วโมง ให้ค่าในช่วง 1.026 ถึง 1.123 และ 1.073 ถึง 1.183 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความต่างสัมบูรณ์ของคอนกรีตในช่วงอายุ 10 ถึง 37 ชั่วโมง อยู่ที่ 0.977 ± 0.003 ซึ่งความต่างมีเพียงเล็กน้อย เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นที่ 38 ถึง 81 ชั่วโมง ความแตกต่างเพิ่มขึ้นตามลำดับที่ 1.003 ± 0.014 ถึง 1.036 ± 0.026 ตามลำดับ และช่วงอายุการบ่มที่แยกได้ชัดเจนอยู่ที่ 82 ถึง 120 ชั่วโมง ให้ค่าความต่าง 1.076 ± 0.032 ถึง 1.114 ± 0.031 แสดงให้เห็นว่าระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

6. References

- [1] Makul, N., Chatveera, B. and Ratanadecho, P., 2009, Use of microwave energy for accelerated curing of concrete: a review, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 31(1): 1-13.
- [2] CPAC academy, 2000, Technology concrete. CPAC, Bangkok.
- [3] Gao, S., Chung, K. L., Cui, A., Ghannam, M., Luo, J., Wang, L., Ma, M. and Liao, Z., 2021, Accurate strength prediction models of ordinary concrete using early-age complex permittivity. Materials and Structures, 54 (172): 1-19.
- [4] Pucinotti, R., 2015, Reinforced concrete structure: Nondestructive in situ strength assessment of concrete. Construction and Building Materials, 75 :331-341.
- [5] Bois, K. J., Benally, A. D. and Zoughi, R., 2000, Microwave Near-Field Reflection Property Analysis of Concrete for Material Content Determination, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 49(1): 49-55
- [6] Helal, J., Sofi, M. and Mendis, P., 2015, Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue 14(1): 97-105.
- [7] Department of Public Works and Town and Country Planning, 2008, Standard for inspection of reinforced concrete structures by non-destructive testing methods, 1st Ed, Bangkok.
- [8] Hannachi, S. and Guetteche, M. N., 2012, Application of the combined method for evaluating the compressive strength of concrete on site, Open Journal of Civil Engineering, 2: 16-21.
- [9] Bogas, J. A., Gomes, M. G and Gomes, A., 2013, Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method, Ultrasonics 53: 962-972.
- [10] Asteris, P. G. and Mokos, V. G., 2020, Concrete compressive strength using

- artificial neural networks, *Neural Computing and Applications*, 32: 11807-11826.
- [11] Skentou, A. D., Bardhan, A., Mamou, A., Lemonis, M. E., Kumar, G., Samui, P., Armaghani, D. J. and Asteris, P. G., 2023, Closed-form equation for estimating unconfined compressive strength of granite from three non-destructive tests using soft computing models, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56: 487-514.
- [12] Khormani, M., Jaari, V. R. K., Aghayan, I., Ghaderi, S. H. and Ahmadyfard, A., 2020, Compressive strength determination of concrete specimens using X-ray computed tomography and finite element method, *Construction and Building Materials*, 256: 1-12.
- [13] Wahab, A., Aziz, M. M. A., Sam, A. R. M., You, K. Y., Bhatti A. Q. and Kassim, K. A., 2019, Review on microwave nondestructive testing techniques and its applications in concrete technology, *Construction and Building Materials*, 209: 135-146.
- [14] Shen, P., Lu, L., He, Y., Wang, F. and Hu, S., 2016, Hydration monitoring and strength prediction of cement-based materials based on the dielectric properties, *Construction and Building Materials*, 126: 179-189.
- [15] Ozturk, M., Sevim, U. K., Akgol, O., Unal, E. and Karaaslan, M., 2018, Determination of physical properties of concrete by using microwave nondestructive techniques, *ACES Journal*, 33(3): 265-272.
- [16] Chung, K. L., Yuan, L., Ji, S., Sun, L., Qu, C. and Zhang, C., 2017, Dielectric characterization of Chinese standard concrete for compressive strength evaluation, *Applied Science*, 7(177): 1-14.
- [17] Jamil, M., Hassan, M. K., Al-Mattarneh, H. M. A. and Zain, M. F. M., 2013, Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques, *Materials and Structures*, 46:77-87.
- [18] Lai, W.L., Kou, S. C., Tsang, W.F. and Poon, C.S., 2009, Characterization of concrete properties from dielectric properties using ground penetrating radar. *Cement and Concrete Research*, 39: 687-695.
- [19] Cervený, S., Arrese-Igor, S., Dolado, J. S., Gaitero, J. J., Alegría, A. and Colmenero, J., 2011, Effect of hydration on the dielectric properties of C-S-H gel, *The Journal of Chemical Physics*, 134(034509):1-9.
- [20] Riddle, B., Baker-Jarvis, J. and Krupka, J., 2003, Complex permittivity measurements of common plastics over variable temperatures, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 51(3): 727-733.
- [21] Pozar, D. M., 2012, *Microwave engineering*. 4th Ed. John Wiley & Sons. USA.