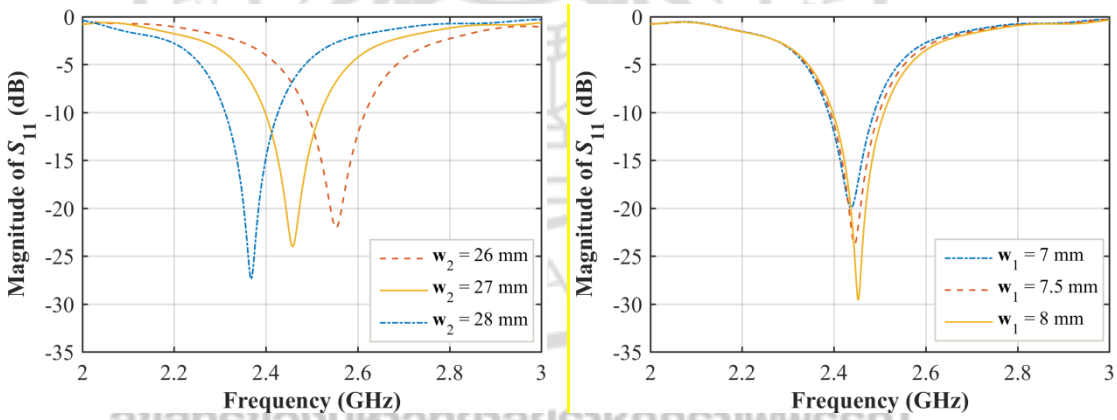
บทที่ 4
ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการดำเนินการวิจัยตามวิธีการวิจัยที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อออกแบบและสร้างการพัฒนาระบบเซนเซอร์ตรวจสอบกำลังอัดของคอนกรีตผลการวิจัยที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สายอากาศต้นแบบ

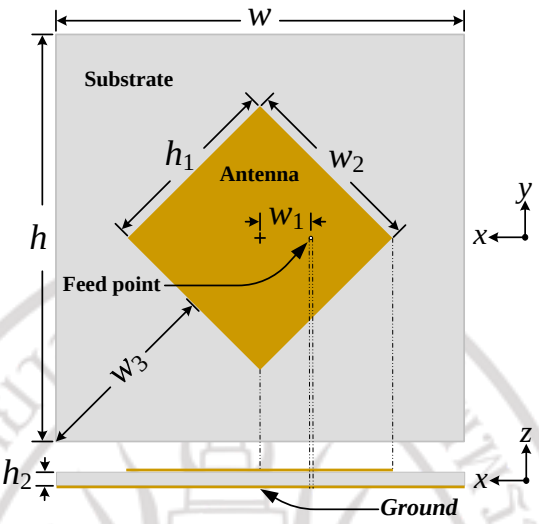
สายอากาศได้รับการจำลองโดยเริ่มจากการปรับความกว้าง (w_2) ของตัวนำในช่วง 26 27 และ 28 มิลลิเมตร การตอบสนองของสายอากาศ คือ ทำงานได้ดีที่ความถี่ 2.55 2.46 และ 2.37 กิกะเฮิรตซ์ และให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ -22.05 -24.01 และ -27.4 เดซิเบล ตามลำดับ ซึ่งความถี่ที่ได้รับความสนใจในงานนี้ คือ ความถี่ 2.46 กิกะเฮิรตซ์ เนื่องจากใกล้เคียงกับความถี่กลางที่ใช้ในระบบตรวจวัด ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) จากนั้นตัวนำของสายอากาศที่ขนาด 27 มิลลิเมตร ได้รับการพัฒนาต่อเนื่องด้วยการปรับระยะจุดป้อนสัญญาณ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำสุด ระยะจุดป้อนสัญญาณ (w_1) ได้รับการปรับที่ 7 7.5 และ 8 มิลลิเมตร ให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำสุดอยู่ที่ -19.98 -23.76 และ -29.6 เดซิเบล ตามลำดับ ระยะจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสมคือ 8 มิลลิเมตร เนื่องจากให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดและมีช่วงความถี่ทำงานที่ต่ำกว่า -10 เดซิเบล กว้างอยู่ในช่วง 2.39 ถึง 2.51 กิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.1



(ก) (ข)

ภาพที่ 4.1 การปรับโครงสร้างของสายอากาศ (ก) ขนาดของตัวนำ (ข) ระยะจุดป้อนสัญญาณ

โครงสร้างของสายอากาศแพทช์จากการจำลองมีลักษณะสีเหลี่ยมจัตุรัส ขนาดตัวนำของสายอากาศอยู่ที่ 27 มิลลิเมตร วางอยู่ด้านบนของวัสดุฐานรอง ระนาบกราวด์อยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองและมีขนาด 60 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศจากการจำลองที่ให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 เดซิเบล ในช่วงความถี่ทำงานของระบบตรวจวัด ดังในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศแพทช์

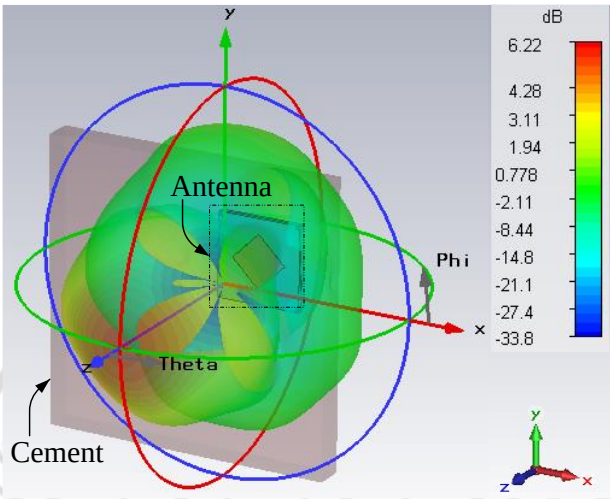
ตารางที่ 4.1 ขนาดของสายอากาศแพทช์

ตัวแปร	h, w	w_1	h_1, w_2	h_2	w_3
ขนาด (มิลลิเมตร)	60.0	8.0	27	4.8	14.2

2. ผลการจำลองการทำงาน

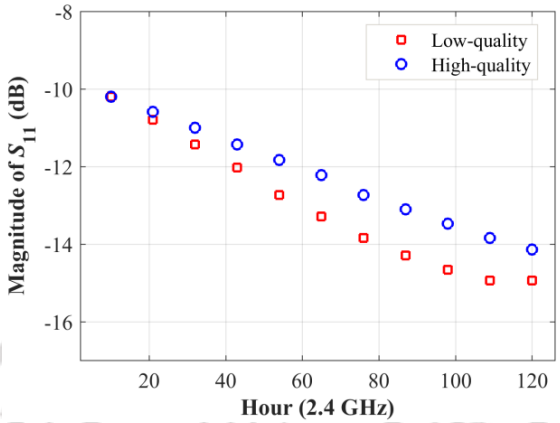
โครงสร้างที่เหมาะสมของสายอากาศจากการจำลองได้รับการพัฒนาเข้ากับระบบตรวจวัดคอนกรีต โดยการจำลองได้แบ่งระดับความแข็งของคอนกรีตสอดคล้องตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจากการวิเคราะห์ช่วงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากงานวิจัยก่อนหน้าในตารางที่ 3.1 คอนกรีตคุณภาพสูงมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในช่วงเวลาการบ่ม 7 วัน หรือ 120 ชั่วโมง อยู่ที่ 10 ถึง 8 และคอนกรีตคุณภาพต่ำอยู่ที่ 10 ถึง 7 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โมเดลของระบบตรวจวัดได้จัดวางตำแหน่งของคอนกรีตทางด้านหน้าของสายอากาศที่ระยะห่าง 7 เซนติเมตร และคอนกรีตหนา กว้างxยาวxหนา อยู่ที่ 10x10x3 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.3

สถาบันวิทยบริการมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

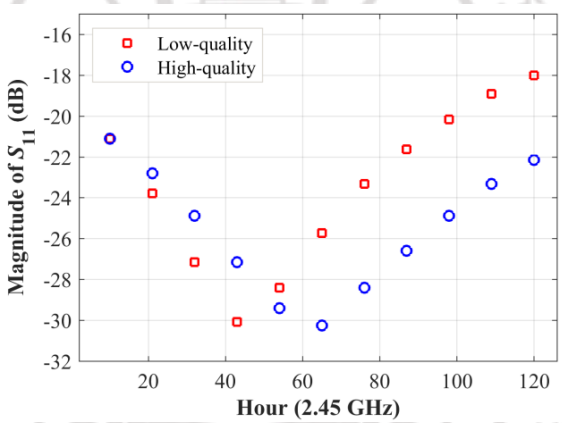


ภาพที่ 4.3 จำลองระบบตรวจวัดคุณภาพคอนกรีต

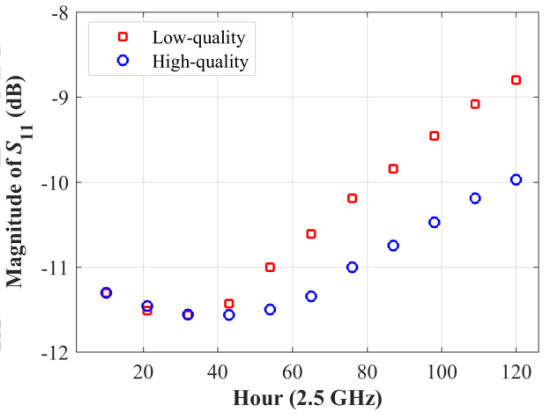
การตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตเบื้องต้นได้รับการวิเคราะห์ในช่วงความถี่กว้างที่ 2.4 2.45 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้การจำลอง คอนกรีตแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ คอนกรีตคุณภาพสูงและคุณภาพต่ำ ในแต่ละกลุ่มประกอบด้วย 11 ตัวอย่าง ระยะเวลาการบ่มแทนด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอย่างสอดคล้องกัน (Chung et al., 2017) ช่วงเวลาการบ่ม 10 ถึง 120 ชั่วโมง โมเดลคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำได้รับการกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 10 ถึง 8 และ 10 ถึง 7 ตามลำดับ จำลองการตรวจวัดเริ่มที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ของคอนกรีตคุณภาพสูงและคุณภาพต่ำที่ระยะเวลาการบ่ม 10 ชั่วโมง ให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ -10.2 และ -10.2 เดซิเบล เมื่อระยะการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 21 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำอยู่ที่ -10.8 และ -10.6 เดซิเบล ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของที่ได้จากคอนกรีตทั้ง 2 แบบ ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการบ่มสุดท้ายที่ 120 ชั่วโมง ให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อยู่ที่ -14.94 และ -14.14 เดซิเบล ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ก) ต่อมาเป็นการตรวจวัดที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่การบ่ม 10 ชั่วโมง ของคอนกรีตทั้ง 2 คุณภาพให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ เท่ากันที่ -21.11 เดซิเบล เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ลดลงและต่ำสุดที่ 54 ชั่วโมง ของคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำอยู่ที่ -28.4 และ -29.42 เดซิเบล ในทางกลับกันเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 65 ถึง 120 ชั่วโมง ค่าที่วัดได้อยู่ที่ -25.73 และ -30.26 เดซิเบล ถึง อยู่ที่ -18.02 และ -22.15 เดซิเบล ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ของคอนกรีตทั้งสองคุณภาพมีค่าลดลงที่เวลาการบ่มน้อยกว่า 43 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเมื่อมากกว่า 54 ชั่วโมง ข้อมูลขาดความชัดเจนจึงไม่ได้รับการนำมาใช้สำหรับการตัดสินใจ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ข) ความถี่สุดท้ายที่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ระยะการบ่ม 10 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของคอนกรีต 2 แบบ ให้ค่าเท่ากันที่ -11.31 และ -11.31 เดซิเบล และลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นถึง 43 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 54 65 ถึง 120 ชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ได้รับของคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำเพิ่มขึ้นเป็น -11 และ -11.5 เดซิเบล -10.61 และ -11.35 เดซิเบล ถึง -8.8 และ -9.97 เดซิเบล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ค)



(ก)



(ข)

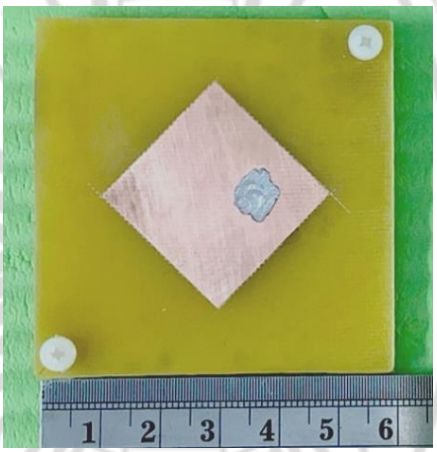


(ค)

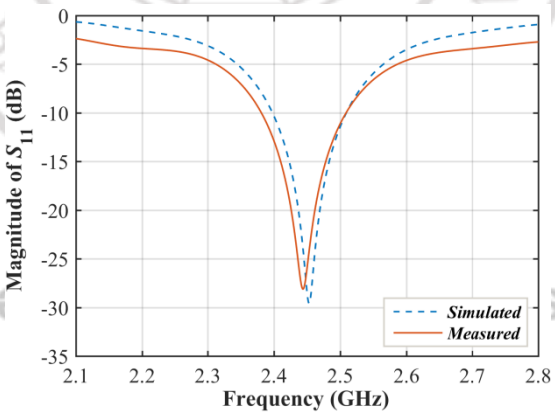
ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองตรวจวัดคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำที่ความถี่ (ก) 2.4 (ข) 2.45 และ (ค) 2.5 กิกะเฮิรตซ์

การจำลองระบบตรวจวัดคุณภาพคอนกรีตแสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟตอบสนองต่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีต โดยสามารถสังเกตได้จากค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่แตกต่างกันระหว่างคอนกรีตคุณภาพสูงและคอนกรีตคุณภาพต่ำ ดังนั้นสายอากาศจึงได้รับการประยุกต์ใช้ในระบบเซ็นเซอร์

โครงสร้างและขนาดจากการจำลองถูกใช้ในการพัฒนาสายอากาศ สายอากาศได้รับการพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (ก) จากนั้นสายอากาศต้นแบบได้รับการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 2 ถึง 3 กิกะเฮิรตซ์ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความถี่ทำงานของสายอากาศอยู่ในช่วง 2.38 ถึง 2.51 กิกะเฮิรตซ์ โดยให้ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 เดซิเบล ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (ข)



(ก)



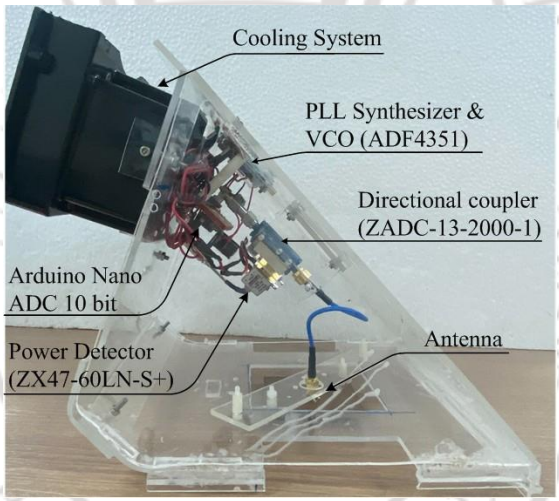
(ข)

ภาพที่ 4.5 (ก) สายอากาศต้นแบบ (ข) ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

จากการจำลองเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของคลื่นความถี่ไมโครเวฟจากค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่มีต่อคอนกรีตคุณภาพสูงและคอนกรีตคุณภาพต่ำ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คลื่นในช่วงความถี่กว้างในการแบ่งระดับคุณภาพของคอนกรีต รวมถึงสายอากาศต้นแบบได้รับการพัฒนาและมีช่วงความถี่ทำงานอยู่ในช่วง 2.38 ถึง 2.51 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งครอบคลุมการทำงานของระบบเซนเซอร์จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

ระบบต้นแบบ

จากการเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการนำมาสร้างเป็นระบบต้นแบบได้ดังภาพที่ 4.6 โดยสายอากาศที่ใช้ในการสร้างระบบเป็นสายอากาศแพทช์ที่ออกแบบวางขนานกับคอนกรีตที่ต้องการวัดสามารถส่งและรับคลื่นสะท้อนกลับมาจากคอนกรีตทดสอบได้ แต่ยังไม่มีส่วนประมวลผล นำไปทดสอบการทำงานเบื้องต้น



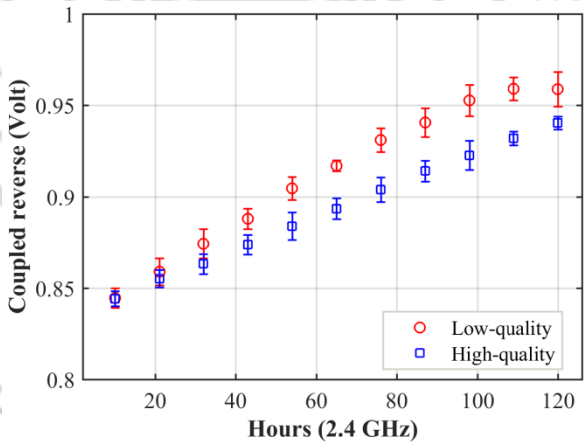
ภาพที่ 4.6 ระบบต้นแบบ

ส่วนควบคุมการทำงานของระบบถูกพัฒนาลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน ตั้งค่าโปรแกรมให้มีอัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) ที่ 38400 บิตต่อวินาที ควบคุมการสร้างความถี่ทั้งหมด 3 ความถี่ คือ 2.4 2.45 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ เป็นชุดคำสั่งที่สร้างจากโปรแกรม Analog device ADF435x กำหนดค่าหน่วงเวลาในการประมวลผลห่างกันครั้งละ 1 ชั่วโมงกำลังงานที่สะท้อนกลับมายังภาครับเข้ามายังคัปเปอร์แบบมีทิศทางและแปลงสัญญาณความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตรงทั้งหมด 3 ข้อมูล และส่งไปให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลแสดงค่าออกทางหน้าจอ รวมถึงคอนกรีตตัวอย่างที่ได้รับการตรวจวัดถูกจัดวางอยู่ด้านล่างของสายอากาศ

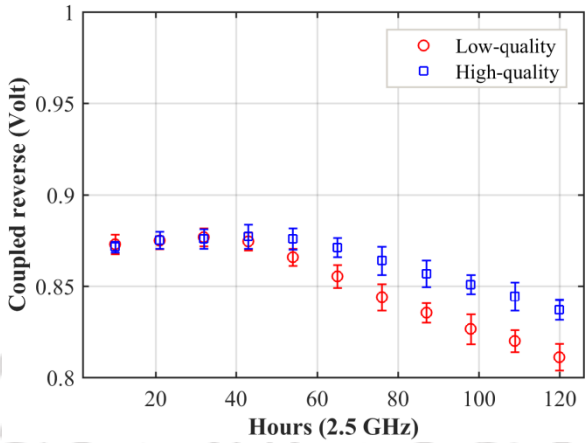
ผลการทดสอบระบบ

ระบบตรวจวัดที่พัฒนาได้รับการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีต โดยระบบทำงานที่ความถี่ 2.4 2.45 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ การตรวจวัดคุณภาพคอนกรีตด้วยระบบเซนเซอร์ย่านความถี่ไมโครเวฟทำงานในเป็นลักษณะวนซ้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้การควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในการตรวจวัดครั้งละ1 ความถี่ทั้งหมด 3 ความถี่ การตรวจวัดและเก็บค่าทำอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 120 ชั่วโมง ความถี่แรกในการตรวจวัดคุณภาพคอนกรีต คือ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต 10 ถึง 54 ชั่วโมง คอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.844 ถึง 0.884 โวลต์ และ 0.845 ถึง 0.905 โวลต์ สามารถสังเกตได้ว่าค่าความต่างของสัญญาณเชื่อมต่อ (Coupling signal) จากคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำต่างกันเพียงเล็กน้อย และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 65 ถึง 120 ชั่วโมง ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.894 ถึง 0.94 โวลต์ และ 0.917 ถึง 0.959 โวลต์ ความต่างของสัญญาณเชื่อมต่อ แยกกันได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ก)

ต่อมาตรวจวัดด้วยความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในช่วงเวลาการบ่ม ค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ของคอนกรีตทั้งสองคุณภาพมีค่าลดลงที่เวลาการบ่มน้อยกว่า 43 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเมื่อมากกว่า 54 ชั่วโมง ข้อมูลขาดความชัดเจนจึงไม่ได้รับการนำมาใช้สำหรับการตัดสินใจความถี่สุดท้ายที่ใช้ตรวจวัด คือ 2.5 กิกะเฮิรตซ์สัญญาณเชื่อมต่อ ที่ได้ในช่วงเวลาการบ่ม 10 ถึง 43 ชั่วโมง สัญญาณที่ได้รับมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคอนกรีตคุณภาพสูงอยู่ในช่วง 0.871 ถึง 0.877 โวลต์ และคอนกรีตคุณภาพต่ำอยู่ที่ 0.873 ถึง 0.875 โวลต์ เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นที่ 54 ถึง 120 ชั่วโมง สัญญาณเชื่อมต่อ ของคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำให้ค่าความแตกต่างชัดเจนอยู่ในช่วง 0.876 ถึง 0.837 โวลต์ และ 0.866 ถึง 0.811 โวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ข)



(ก)



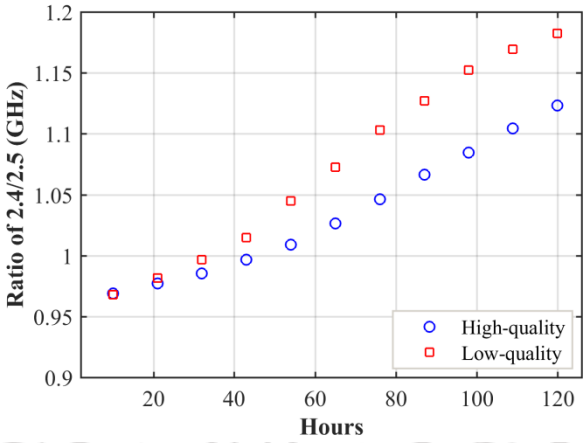
(ข)

ภาพที่ 4.7 ค่าแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อจากการตรวจวัดคอนกรีตด้วยระบบเซนเซอร์ต้นแบบที่ความถี่ (ก) 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 2.5 กิกะเฮิรตซ์

ผลการพัฒนากระบวนการตัดสินใจของระบบ

จากการตรวจวัดคุณภาพคอนกรีตของทั้ง 3 ความถี่ ด้วยระบบเซนเซอร์ต้นแบบ สามารถสังเกตได้ว่าสัญญาณเชื่อมต่อของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่ได้จากคอนกรีตคุณภาพสูงและคุณภาพต่ำเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างกันในระดับของสัญญาณ คอนกรีตคุณภาพต่ำให้โวลต์ สัญญาณเชื่อมต่อสูงกว่าคอนกรีตคุณภาพสูงและชัดเจนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากกว่า 54 ชั่วโมง และเช่นเดียวกันที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ค่าความแตกต่างของโวลต์สัญญาณเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำค่อนข้างชัดเจนเมื่อระยะเวลาการบ่มมากกว่า 54 ชั่วโมง แต่ในทางกลับกันแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อมีความลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ข้อมูลแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อที่ได้จากการตรวจวัดคอนกรีตที่ความถี่ 2.4 และ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ มีความสัมพันธ์กันอย่างที่มีนัยสำคัญ ข้อมูลของทั้ง 2 ความถี่ ได้รับการเทียบอัตราส่วนของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อ คือ แรงดันสัญญาณเชื่อมต่อ 2.4 กิกะเฮิรตซ์/2.5 กิกะเฮิรตซ์ ในช่วงระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ 10 ถึง 32 ชั่วโมง ให้ค่าอัตราส่วนของคอนกรีตคุณภาพสูงอยู่ที่ 0.969 ถึง 0.985 และคุณภาพต่ำอยู่ที่ 0.968 ถึง 0.997 เมื่อเวลาบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สูงสุดที่ 120 ชั่วโมง ให้ค่าอัตราส่วนอยู่ที่ 1.123 และ 1.183 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.8

อัตราส่วนของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างคุณกรีตคุณภาพสูงและคุณภาพต่ำได้รับการนำมาหาค่าขนาดของความต่าง $|Ratio_{Low} - Ratio_{High}|$ เพื่อสำหรับการตัดสินใจในการแบ่งคุณภาพของคอนกรีตในแต่ละช่วงเวลาการบ่ม



ภาพที่ 4.8 อัตราส่วนแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อของความถี่ 2.4/2.5 กิกะเฮิรตซ์ ต่อเวลาบ่มคอนกรีต

การแยกคุณภาพคอนกรีตในช่วงเวลาการบ่ม 10 ถึง 37 ชั่วโมง ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากความต่างมีเพียงเล็กน้อย เมื่อช่วงเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นที่ 38 ถึง 59 ชั่วโมง อัตราส่วนของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่ออยู่ที่ 1.003 และเปลี่ยนแปลงได้อยู่ในช่วง ±0.014 ซึ่งเริ่มมีความเป็นได้ได้ในการแยกคุณภาพของคอนกรีต จากนั้นที่เวลาการบ่ม 60 ถึง 104 ชั่วโมง ความต่างของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตคุณภาพสูงและต่ำเริ่มแยกกันได้ชัดเจนอยู่ที่ 1.036 และเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง ±0.026 ความต่างของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อที่ชัดเจนในการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตอยู่ที่การบ่ม 82 ถึง 120 ชั่วโมง ให้ระดับความต่างอยู่ที่ 1.076 และ 1.114 เปลี่ยนแปลงได้อยู่ที่ ±0.032 และ ±0.031 ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความต่างของอัตราส่วนแรงดันของสัญญาณเชื่อมต่อที่แต่ละระยะเวลาการบ่ม

จำนวนชั่วโมง	$\lvert Ratio_{Low} - Ratio_{High} \rvert$ (โวลต์)
10 ถึง 37	0.977±0.003
38 ถึง 59	1.003±0.014
60 ถึง 81	1.036±0.026
82 ถึง 104	1.076±0.032
105 ถึง 120	1.114±0.031

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

อัตราส่วนของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อในช่วงการบ่มเริ่มต้นมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ค่าความต่างของแรงดันสัญญาณเชื่อมต่อในการแยกคุณภาพคอนกรีต โดยเฉพาะที่ระยะการบ่มมากกว่า 82 ชั่วโมง การแยกคอนกรีตคุณภาพสูงออกจากคอนรีตคุณภาพต่ำมีช่วงกว้างในการตัดสินใจไม่น้อยกว่า ±0.03 โวลต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 3.53 ของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ซึ่งความต่างที่ชัดเจนส่งผลให้การตัดสินใจสามารถทำได้

แม่นยำ ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อจำแนกคอนกรีตที่ผ่านการบ่มอย่างถูกต้องและคอนกรีตที่ไม่ผ่านการบ่ม โดยไม่ต้องเก็บตัวอย่างคอนกรีตหรือทำลายคอนกรีตที่ต้องการวัด และเป็นระบบที่สามารถใช้งานภาคสนาม

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี