

## การสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์สำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ GROUND-PENETRATING RADAR FOR DETECTION OF ANOMALY IN MASONRY STRUCTURES

พนิดา อินทะเรืองศรี<sup>1,\*</sup>, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย<sup>1</sup>, ชัยณรงค์ อธิสกุล<sup>1</sup>, สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์<sup>1</sup> และรักติพงษ์ สหมิตรมงคล<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: panida.in@mail.kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสำรวจโครงสร้างอิฐก่อด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออภิปรายผลการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ การเตรียมตัวอย่างการทดสอบจะใช้อิฐก่อแบบไม่มีวัสดุประสานหรือปูนก่อ นำมาเรียงกันให้มีขนาดกว้าง 0.90 เมตร สูง 0.90 เมตร และหนา 0.30 เมตร โดยมีกรงจำลองว่ามีสิ่งแปลกปลอมภายในตัวอย่างทดสอบเป็นวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ลวดเหล็กตะแกรง ลวดตาข่าย กรงไก่ ท่อพีวีซี ท่อเหล็ก ท่อนไม้ และรวมถึงช่องว่าง จากนั้นทำการตรวจสอบตัวอย่างอิฐก่อที่มีสิ่งแปลกปลอมประเภทต่างๆ ด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์ ทั้งในกรณีที่มีตัวอย่างอิฐแห้งและอิฐเปียก ต่อมาจึงทำการประมวลผลข้อมูลสัญญาณคลื่นเรดาร์จากตัวอย่างทดสอบแต่ละกรณีแล้ว โดยมีการกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุที่เหมาะสม เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของวัสดุจากการสแกนภาพ ซึ่งในขั้นตอนการประมวลผลดังกล่าวนี้ได้มีการเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อประเมินผลกระทบจากความชื้นของอิฐในสถานะเปียกต่อสัญญาณคลื่นเรดาร์ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละกรณีด้วย โดยจากการเปรียบเทียบสัญญาณเรดาร์ของวัสดุที่เหมือนกันภายในโครงสร้างอิฐก่อ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับอิฐในสถานะแห้งจะมีค่าประมาณ 4.0 ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับอิฐในสถานะเปียกจะมีค่าที่มากกว่า 12.0 ซึ่งผลของงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการอนุรักษ์โครงสร้างทางประวัติศาสตร์ของไทยโดยใช้เป็นแนวทางในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในโครงสร้างอิฐโบราณ

**คำสำคัญ:** การตรวจจับสิ่งแปลกปลอม, การสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์, โครงสร้างอิฐก่อ, ผลกระทบของความชื้น

### Abstract

This paper presents the result of ground-penetrating radar (GPR) and discusses anomaly detection inside masonry structures. The masonry without binder or mortar samples of 0.9-m width, 0.9-m height, and 0.3-m depth have been prepared for the experimental investigation. To simulate the different types of anomalies, which are wire mesh, PVC pipe, steel pipe, timber, and void, are installed in the masonry samples. Each case of the anomalies has been examined and analyzed comparatively for both dry and wet conditions by using ground-penetrating radar. The recorded radar data is subsequently processed with the proper dielectric constant, which is the electrical properties of materials, to analyze and identify of the radar signal of the materials from the scanning images. In this procedure, the obtained result was compared to assess the moisture effect on the masonry samples in each case. By comparing the radar signals with identical materials in the masonry structure, it was found that the appropriate dielectric constant in the dry brick is approximately 4.0, and the wet brick condition is greater than 12.0 from the overall scale. The information achieved in this study shall be beneficial for the preservation of Thai historical heritages by as a guideline for anomaly detection in ancient masonry structures.

**Keywords:** Anomaly detection, Ground penetration radar, Masonry structures, Moisture effect

### 1. บทนำ

การสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์ (Ground Penetration Radar: GPR) เป็นเทคนิคการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อย่างหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Techniques: NDT) ที่ใช้สำหรับการประเมินโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยทั่วไปจะใช้งานการตรวจสอบข้อบกพร่องในงานก่อสร้าง จากงานวิจัยของ Janku M., et al. [1] ทำการศึกษาวิธี GPR ในการตรวจจับลักษณะข้อบกพร่องของรอยแยกชั้นแบบโพรงของสะพานคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าการใช้ GPR สามารถระบุตำแหน่งของเหล็กเสริม

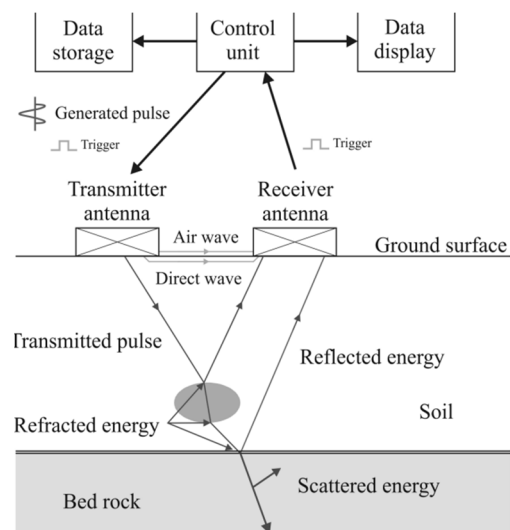
และความลึกของวัตถุได้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลต้องทำการสแกนแบบจุดต่อจุดค่อนข้างใช้เวลานาน แต่สามารถใช้ในการคาดคะเนสำหรับการค้นหาความผิดปกติได้ จากงานวิจัยของ teoh YJ, et al. [2] ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบใต้ผิวดินด้วยวิธี GPR โดยจากการศึกษาพื้นดินสถานะแห้ง พบว่าโครงสร้างของพื้นดินไม่มีการรบกวนทางกายภาพ ลักษณะการสะท้อนของคลื่นเรดาร์มีสัญญาณเรดาร์ค่อนข้างต่ำ และบางพื้นที่ทดสอบมีการสะท้อนของสัญญาณจะมีการรบกวนค่อนข้างสูง ซึ่งคาดว่าลูกคลื่นที่เกิดขึ้นมาจากปริมาณความชื้นหรือก้อนหินขนาดใหญ่แทรก

อยู่ในพื้นดิน [3] ผลกระทบของความชื้นในดินมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับระยะทางการเดินทางของคลื่นสัญญาณ จะทำให้โครงสร้างมีแอมพลิจูดของระยะที่คลื่นเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น [4] และเมื่อมีปริมาณน้ำในโครงสร้างดินความสามารถในการนำไฟฟ้าของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากความชื้นของสภาพแวดล้อม และระยะความลึกของสัญญาณเรดาร์ในการตรวจพบวัสดุลดลง จากงานวิจัยของ Adichar Surinkum, et al. [5] ได้ทำการศึกษาวีธี GPR มาประยุกต์ในการสำรวจไม้กลายเป็นหินที่ฝังตัวใต้พื้นดินอยู่ในธรรมชาติ โดยจากการศึกษาพบว่าลักษณะการประมวลผลข้อมูลภาพสัญญาณของท่อนไม้กลายเป็นหินที่ตอบสนองให้ลักษณะเป็นเส้นโค้งไฮเปอร์โบลา และความถี่ของสัญญาณเรดาร์จะมีแอมพลิจูดการตอบสนองมากขึ้นเมื่อตรวจพบวัสดุโครงสร้างเป็นท่อนไม้ จากงานวิจัยของ Tess X.H. Luo, et al. [6] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของช่องว่างในพื้นดินที่มีผลต่อโครงสร้างถนนด้วยวิธี GPR พบว่าความแตกต่างของพื้นผิวถนนคอนกรีตกับถนนบิทูมินัสไม่มีผลกับการตรวจจับช่องว่างสำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสัญญาณอากาศ และพบว่าลักษณะการสะท้อนกลับของสัญญาณเรดาร์ของการจำลองถนนที่มีช่องว่างมีรูปแบบต่าง ๆ พบจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ได้แก่ ลักษณะไฮเปอร์โบลา ไชว์กากบาท พาราโบลาหงาย และรูปแบบการสะท้อนเป็นลูกคลื่นธรรมดา ตามลำดับ ทั้งนี้จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่า การศึกษาตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างในปัจจุบันเริ่มมีการใช้ GPR มากขึ้น แต่ยังไม่มีการตรวจสอบความถูกต้อง และความชัดเจนในการจำแนกลักษณะของคลื่นสัญญาณที่การสะท้อนกลับไปยังพื้นดิน การศึกษานี้มุ่งประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ โดยทำการทดสอบตัวอย่างอิฐ จะนำมาเรียงต่อกัน 6 ชั้นแบบไม่ใช้วัสดุประสานหรือปูนก่อ และจำลองว่ามีสิ่งแปลกปลอมประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ลวดเหล็กตะแกรง ลวดตาข่ายกรงไก่ ท่อพีวีซี ท่อเหล็ก ท่อนไม้ และรวมถึงช่องว่าง ทั้งในกรณีอิฐแห้ง และกรณีอิฐเปียกทำการศึกษากภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์จากผลตอบสนองการสะท้อนกลับจากการสแกนของตัวอย่างอิฐในกรณีต่าง ๆ จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ลักษณะ และรูปแบบคลื่นที่ได้จากการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ และประเมินผลกระทบของความชื้นที่มีต่อการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในกรณีโครงสร้างอิฐเปียก ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการตรวจหาตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างโบราณสถานประเภทอิฐก่อรวมถึงงานก่ออิฐฉาบปูนทั่วไป เพื่อประโยชน์ด้านการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้าง และการอนุรักษ์โบราณสถาน

## 2. หลักการสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์

ปัจจัยหลักการสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ระบบส่งสัญญาณ ระบบรับสัญญาณ

ระบบเสาสายอากาศ และระบบควบคุมในแสดงผลข้อมูลเรดาร์ ซึ่งจะถูกออกแบบเพื่อค้นหาวัตถุในโครงสร้าง ในปัจจุบันการใช้ GPR มีความสามารถในการแสดงผลด้วยการสแกนเพียงครั้งเดียวและสามารถนำไปประมวลผลหลังการสำรวจต่อได้ ลักษณะการทำงานของเครื่องสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์เป็นการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายคลื่นไปยังโครงสร้างใต้พื้นดิน เมื่อคลื่นกระทบกับวัสดุหรือสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ จะสะท้อนกลับไปยังพื้นผิวดิน และเครื่องมือทดสอบจะรับสัญญาณผ่านการประมวลผลบนเครื่องสำรวจเป็นรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเสารับสัญญาณจะมีค่าความถี่อยู่ในช่วง 10 MHz ถึง 2000 MHz ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน ระดับความลึกที่เหมาะสม [7]



รูปที่ 1 หลักการทำงานของวิธีการสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์ [7]

### 2.1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติเฉพาะในการเคลื่อนที่ผ่านสัญญาณอากาศโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางวัสดุด้วยความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3 ร้อยล้านเมตรต่อวินาที ซึ่งการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติได้แก่ ความถี่ ความยาวคลื่น ระดับพลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่ของแอมพลิจูด [7]

### 2.2. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นค่ากำหนดสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของพลังงานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของวัสดุ รวมทั้งเป็นปัจจัยที่มีผลกับการสะท้อนกลับ และการลดทอนคลื่นสัญญาณของวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ เช่น คอนกรีต วัสดุอิฐก่อ เป็นต้น โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสำหรับวัสดุก่อสร้าง พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสำหรับอิฐมีค่าเท่ากับ 4 ถึง 6 สำหรับสัญญาณอากาศมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับน้ำมีค่าเท่ากับ 81 สำหรับคอนกรีตแห้งมีค่าเท่ากับ 4 ถึง 6 และสำหรับคอนกรีตเปียกมีค่าเท่ากับ 11 ถึง 12 [7],[8]

### 3. การดำเนินการศึกษา

#### 3.1. การเตรียมตัวอย่างของโครงสร้างอิฐก่อ

การศึกษานี้จะทำการจำลองเตรียมตัวอย่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กำหนดโครงสร้างอิฐมีขนาดความกว้าง 0.90 เมตร สูง 0.90 เมตร และหนา 0.30 เมตร ซึ่งจะใช้อิฐทดแทนในการทดสอบ โดยอิฐที่นำมาใช้จัดทำตัวอย่างทดสอบ มีขนาดความกว้าง 0.15 เมตร ยาว 0.30 เมตร และหนา 0.05 เมตร จะนำมาเรียงต่อกัน 6 ชั้นแบบไม่ใช้วัสดุประสานหรือปูนก่อ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยกำหนดสิ่งแปลกปลอมภายในตัวอย่างอิฐ ได้แก่ ลวดเหล็กตะแกรง ลวดตาข่ายกรงไก่ ท่อพีวีซี ท่อเหล็ก ท่อนไม้ และช่องว่าง



รูปที่ 2 ตัวอย่างของโครงสร้างอิฐก่อ

#### 3.2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ทำการสำรวจหาสิ่งแปลกปลอมในอิฐตัวอย่างด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์ โดยทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ที่อยู่ภายในตัวอย่างโครงสร้างอิฐก่อ 2 ประเภท ได้แก่ อิฐแห้ง และอิฐเปียก การศึกษานี้เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่อง HILTI PS1000 ซึ่งใช้สัญญาณเรดาร์ความถี่ 2.0 GHz [9] และเวลาที่คลื่นตรวจพบตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมมีค่าอยู่ในช่วง 0-8 นาโนวินาที (ns) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าอยู่ในช่วง 1.0-12.0 เนื่องจากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องดังกล่าวในรูปแบบข้อมูลสองทิศทาง การเก็บข้อมูลในแต่ละทิศทางจำเป็นต้องใช้ระยะการเก็บข้อมูลอย่างน้อย 1 เมตร เพื่อให้เครื่องมือสามารถเก็บข้อมูลทั้งสองทิศทางได้อย่างครบถ้วนในขอบเขตพื้นที่ 1 ตารางเมตร การเก็บข้อมูลจึงกระทำผ่านแผ่นไม้ที่มีขนาดความกว้าง 1 เมตร สูง 1 เมตร และหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งวางบนตัวอย่างทดสอบที่มีขนาด 0.9x0.9 ตารางเมตร จากนั้นนำผลข้อมูลมาวิเคราะห์โดยพิจารณาการประมวลผลภาพจากระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์ รูปแบบที่ 2 เป็นการประมวลผลพิจารณาลักษณะสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามลำดับระดับชั้นความลึก และรูปแบบที่ 3 เป็นการพิจารณาของกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ ซึ่งต้องทำการประมวลผลผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ต่อไป [10] โดยการทดสอบโครงสร้างอิฐสภาวะเปียก จะดำเนินการใช้ลักษณะเดียวกัน แต่อิฐจะต้องผ่านการแช่น้ำทิ้งไว้จนอิ่มตัวก่อนทำการทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบอิฐตัวอย่างด้วยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของอิฐที่เพิ่มขึ้นจากการแช่น้ำพบว่าการแช่น้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 30

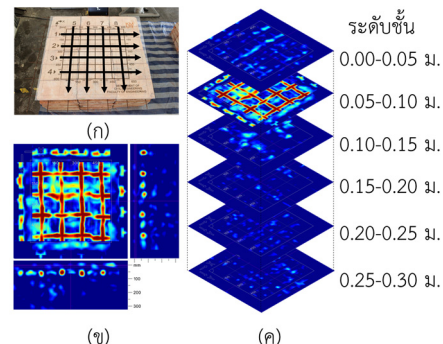
นาที จะทำให้น้ำหนักของอิฐที่อิ่มตัวด้วยน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้เกณฑ์เวลานี้สำหรับการทำให้อิฐอิ่มตัวด้วยน้ำโดยอิฐในสภาวะเปียกจะผ่านการแช่น้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาทีก่อนทำการทดสอบ

### 4. ผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการทดสอบกับอิฐก่อทดแทนสำหรับงานอนุรักษ์โครงสร้างโบราณสถาน แต่กระบวนการทดสอบและผลวิเคราะห์รวมถึงการปรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถนำไปใช้กับงานก่ออิฐฉาบปูนสำหรับโครงสร้างทั่วไปได้เช่นเดียวกัน โดยผลที่ได้จากการทดสอบจะพิจารณาในรูปแบบการประมวลผลทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับตัวอย่างอิฐแห้ง และอิฐเปียกตามลำดับ

#### 4.1. ผลการวิเคราะห์การประมวลผลภาพจากระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์

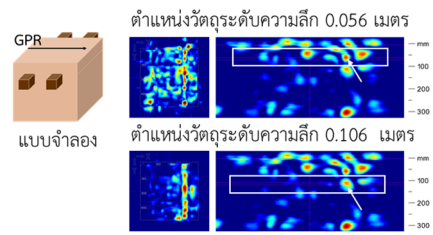
ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยการสแกนแนวราบเป็นรูปแบบภาพ 2 มิติ ทั้งในมิติภาพด้านบนและภาพด้านข้าง สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะที่ปรากฏขึ้นเป็นรูปการกระจายของสีในลักษณะต่าง ๆ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ลวดเหล็กตะแกรง (ก) ทิศทางในการเก็บข้อมูล (ข) ภาพจากระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์ที่ระดับชั้น 0.066 เมตร และ (ค) ภาพจากระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์ในระดับชั้นต่าง ๆ

จากตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาผลสำหรับอิฐแห้งพบว่าภาพการกระจายสีสามารถแสดงลักษณะสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ได้แก่ ช่องว่าง ลวดตาข่ายกรงไก่ ลวดเหล็กตะแกรง และท่อได้ค่อนข้างชัดเจน จะมีเพียงท่อนไม้ พบว่าค่าระดับสีจากการสะท้อนกลับสัญญาณเรดาร์มีลักษณะไม่ชัดเจน โดยพบว่าตำแหน่งความลึกของวัตถุที่ตรวจพบได้ชัดเจนมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริงที่ระดับ 0.056 เมตร แต่การตรวจวัดตำแหน่งกลับพบภาพที่มีความชัดเจนในระดับความลึก 0.106 เมตร และตรวจพบภาพท่อนไม้ได้เพียง 1 ท่อน ดังรูปที่ 4 และเมื่อพิจารณากรณีที่มีท่อพีวีซี ท่อเหล็ก

และช่องว่างระดับความลึก 0.056 ถึง 0.066 เมตร จะพบว่าสามารถตรวจพบสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ดังกล่าวได้ชัดเจน โดยลักษณะภาพระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์จะมีความคล้ายกันมาก ทำให้ทราบว่าภาพการพิจารณาภาพจากการกระจายสีสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเพียงรูปแบบเดียวสามารถตรวจพบสิ่งแปลกปลอมได้ แต่ยังไม่สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะของวัตถุได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบอื่นเพิ่มเติม ดังจะแสดงในลำดับถัดไป



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์ของอิฐแห้งมีท่อนไม้อยู่ภายใน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับอิฐในสภาวะแห้ง

การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับอิฐในสภาวะแห้ง							
สิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ	ไม่มีวัสดุ	ลวดตาข่ายกรงไก่	ลวดเหล็กตะแกรง	ท่อพีวีซี	ท่อเหล็ก	ท่อนไม้	ช่องว่าง
แบบจำลอง							
ค่าคงที่ได้โอเล็กทริก	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
ลักษณะภาพระดับค่าสี	สม่ำเสมอ และเป็นจุดบางตำแหน่ง	รูปร่างไม่แน่นอน	ตารางสี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก	ทรงกระบอก	เส้นตรง	ทรงกระบอก
ภาพระดับค่าสีจากการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์							
ลักษณะภาพตามระดับชั้นความลึก	ไม่มีลักษณะโดดเด่นพิเศษ	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า
ตำแหน่งที่ตรวจพบจากระยะพื้นผิวของอิฐ	ไม่มี	0.050 เมตร	0.050 เมตร	0.050 เมตร	0.050 เมตร	0.050 เมตร	0.050 เมตร
ภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามระดับชั้นความลึก							
ค่าแอมพลิจูดตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบ	0	2.28	4.64	-4.44	5.16	0	0
กราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์							

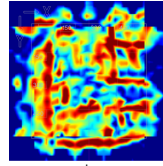
หมายเหตุ: กราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ของความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด มีค่าอยู่ในช่วง -6 ถึง 6 กับเวลา มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง -8 นาโนวินาที (ns) โดยเส้นสีแดงแสดง ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบ และเส้นสีน้ำเงินแสดง ณ ตำแหน่งจริงของวัตถุ



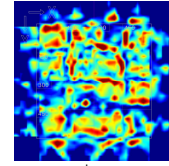
ในส่วนของผลการวิเคราะห์กรณีอิฐเปียกจะแสดงได้ดังตารางที่ 2 สังเกตได้ว่าลักษณะสีการสะท้อนคลื่นเรดาร์ภายในอิฐเปียกนั้นมีลักษณะรูปแบบที่คล้ายคลึงกันมากสำหรับทุกประเภทของสิ่งแปลกปลอม มีเฉพาะลวดเหล็กตะแกรงเท่านั้นที่ยังสามารถแสดงองค์ประกอบของภาพความต่างสีเป็นรูปร่างเหล็กตะแกรงได้ แต่มีลักษณะไม่ชัดเจน สำหรับสิ่งแปลกปลอมอื่นไม่สามารถระบุลักษณะภาพจากระดับค่าสีได้ เมื่อพิจารณาตัวอย่างอิฐแห้งที่มีลวดตาข่ายกรงใก้อยู่ภายในกับตัวอย่างอิฐเปียกที่ไม่มีลวดอยู่ภายใน สังเกตได้ว่ามีภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 5

จากผลที่ได้พบว่าความชื้นทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจพบสิ่ง

แปลกปลอมต่าง ๆ ลดลง และความชื้นส่งผลให้ลักษณะที่ปรากฏเปลี่ยนไป มีขนาดเล็กลง หรือมีรูปร่างไม่คงเดิมจนไม่สามารถระบุลักษณะภาพเป็นรูปร่างที่แน่นอนได้



(ก) อิฐแห้งที่มีลวดตาข่าย



(ข) อิฐเปียกที่ไม่มีลวดอยู่ภายใน

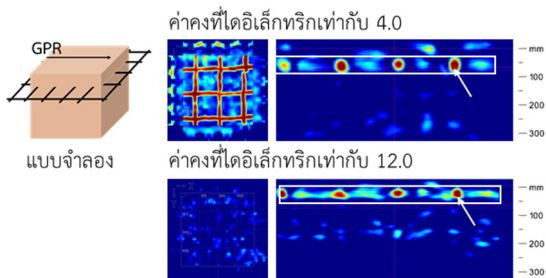
กรงใก้อยู่ภายใน

รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณ

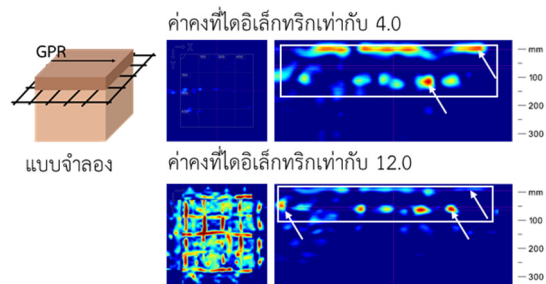
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับอิฐในสภาวะเปียก

การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับอิฐในสภาวะเปียกที่ระดับความลึก 0.05 เมตร							
สิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ	ไม่มีวัสดุ	ลวดตาข่ายกรงใก่	ลวดเหล็กตะแกรง	ท่อพีวีซี	ท่อเหล็ก	ท่อนไม้	ช่องว่าง
แบบจำลอง							
ค่าคงที่ได้โอเล็กทริก	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
ลักษณะภาพระดับค่าสี	รูปร่างไม่แน่นอน	รูปร่างไม่แน่นอน	ตารางสี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก	รูปร่างไม่แน่นอน	รูปร่างไม่แน่นอน	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
ภาพระดับค่าสีจากการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์							
ลักษณะภาพตามระดับชั้นความลึก	เส้น	เส้น	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า	ไฮเปอร์โบล่า
ตำแหน่งที่ตรวจพบจากระยะพื้นผิวของอิฐ	0.089 เมตร	0.106 เมตร	0.106 เมตร	0.106 เมตร	0.106 เมตร	0.106 เมตร	0.079 เมตร
ภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามระดับชั้นความลึก							
ค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบ	-6.01	5.12	0	-5.74	-5.61	-5.93	3.92
กราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์							

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อจากข้อมูลการสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์ภาพ 2 มิติในรูปด้านข้าง โดยทำการปรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างละเอียดผ่านซอฟต์แวร์ กรณีตัวอย่างอิฐแห้ง พบว่าเมื่อกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.0 จะพบสิ่งแปลกปลอมอยู่ที่ระดับความลึก 0.056 เมตร ซึ่งมีตำแหน่งความลึกใกล้เคียงกับตำแหน่งวัสดุจริงที่ระดับความลึก 0.050 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) สำหรับกรณีตัวอย่างอิฐเปียก เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.0 จะพบสิ่งแปลกปลอมอยู่ที่ระดับความลึก 0.110 เมตรซึ่งไม่ปรากฏตรงกับตำแหน่งจริง เมื่อกำหนดค่าใหม่ พบว่าเมื่อกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 12.0 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของเครื่องมือ จะพบสิ่งแปลกปลอมอยู่ที่ระดับความลึก 0.066 เมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับตำแหน่งจริงมากขึ้น แต่ยังคงคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริง ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) จากผลที่ได้จึงคาดว่าค่าการระบุตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมสำหรับอิฐในสภาวะเปียกควรกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่ามากกว่า 12.0



(ก) อิฐแห้งที่มีลวดเหล็กตะแกรงอยู่ภายใน



(ข) อิฐเปียกที่มีลวดเหล็กตะแกรงอยู่ภายใน

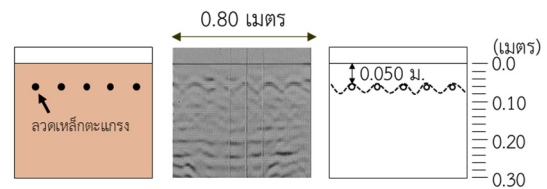
รูปที่ 6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมของโครงสร้างอิฐก่อ

#### 4.2. ผลการวิเคราะห์การประมวลผลพิจารณาลักษณะสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามลำดับระดับชั้นความลึก

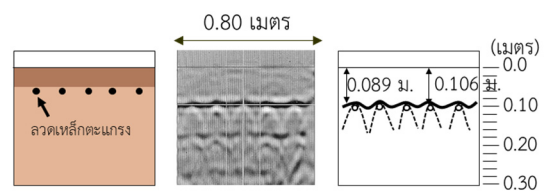
เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบเพิ่มเติมในรูปแบบภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามลำดับระดับชั้นความลึกที่เกิดเป็นลูกคลื่นลักษณะต่าง ๆ สำหรับกรณีอิฐแห้งดังตารางที่ 1 พบว่าลักษณะลูกคลื่นของอิฐแห้งที่ไม่มีวัสดุอยู่ภายในมีรูปแบบการสะท้อนเป็นลูกคลื่นที่มีไม่มีลักษณะโดดเด่นพิเศษอันบ่งชี้ถึงการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นผ่านตัวกลางที่มีลักษณะเดียวกัน สำหรับกรณีที่มีลวด

ตาข่ายกรงไก่อยู่ภายในอิฐแห้งลักษณะรูปแบบการสะท้อนจะเป็นเส้นทึบและเห็นการแทรกสอดของคลื่นเป็นรูปกากบาทไขว้กันอย่างชัดเจน สำหรับกรณีที่มีลวดเหล็กตะแกรง ท่อนไม้ ท่อ และช่องว่างอยู่ภายในอิฐแห้งจะพบว่ามีรูปแบบการสะท้อนลักษณะคล้ายกันโดยเป็นลูกคลื่นรูปไฮเปอร์โบลา

เมื่อพิจารณาภาพสัญญาณเรดาร์ตามระดับชั้นความลึกของอิฐเปียกจากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อมีความชื้นอยู่ภายในโครงสร้างอิฐก่อจะพบว่าการเกิดรูปแบบการสะท้อนเป็นเส้นทึบตามลำดับระดับชั้นของอิฐเปียก เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลอิฐแห้งกับอิฐเปียก พบว่าความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการทะลุผ่านของสัญญาณคลื่นเรดาร์ลดลง ส่งผลให้ตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่ง 0.05 เมตร เป็น 0.106 เมตร โดยลักษณะภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ของสิ่งแปลกปลอมมีรูปแบบเส้นทึบแทรกเน้นในตำแหน่งของลูกคลื่นให้เห็นชัดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



(ก) อิฐแห้งที่มีลวดเหล็กตะแกรงอยู่ภายใน



(ข) อิฐเปียกที่มีลวดเหล็กตะแกรงอยู่ภายใน

รูปที่ 7 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลภาพสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามลำดับระดับชั้นความลึก

#### 4.3. ผลการพิจารณาจากกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์

เมื่อพิจารณาผลในรูปแบบของกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ของความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด มีค่าอยู่ในช่วง -6 ถึง 6 กับเวลา มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง -8 นาโนวินาที โดยการพิจารณาลักษณะของระดับพลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่ของแอมพลิจูด และเฟสของสัญญาณ ตรงตำแหน่งที่ตรวจพบวัตถุจะได้ผลดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 1 สำหรับกรณีโครงสร้างอิฐในสภาวะแห้งเมื่อพิจารณาลักษณะการเกิดค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งที่ตรวจพบวัตถุจากแนวเส้นสีแดงในตารางที่ 1 พบว่าอิฐแห้งที่มีลวดตาข่ายกรงไก่ ลวดเหล็กตะแกรง และท่อเหล็กอยู่ภายใน ลักษณะคลื่น ณ ตำแหน่งที่ตรวจพบวัตถุจะเกิดค่าแอมพลิจูดทางฝั่งคลื่นหรือช่วงบวก ส่วนกรณีอิฐแห้งที่มีท่อพีวีซีอยู่ภายในจะเกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดในฝั่งท้องคลื่นหรือช่วงลบ สังเกตได้ว่า ท่อพีวีซี และท่อเหล็กซึ่งมี

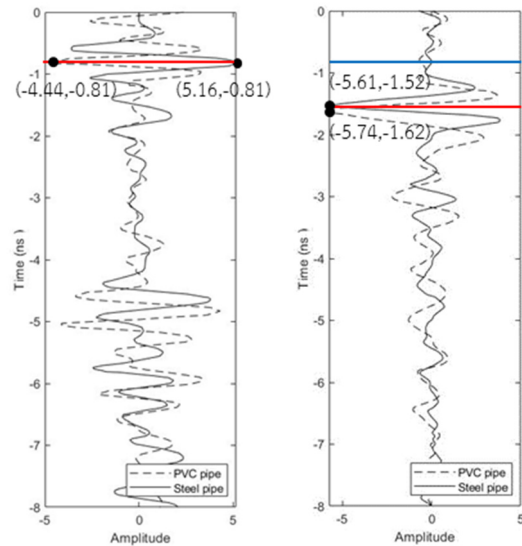
สัญญาณคลื่นเรดาร์คล้ายคลึงกัน เมื่อพิจารณาเฟสการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพบว่า เฟสของคลื่นสัญญาณที่พบจะตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 8(ก)

สำหรับอิฐแห้งที่มีช่องว่างอยู่ภายใน จะเกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดทั้งทางฝั่งคลื่นกับฝั่งท้องคลื่นใกล้เคียงกัน จะสังเกตได้ว่าค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบมีค่าเป็นศูนย์ และสำหรับอิฐแห้งที่มีท่อน้ำอยู่ภายใน เกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดทางฝั่งคลื่น และฝั่งท้องคลื่นที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถระบุลักษณะเฉพาะของวัตถุจากการพิจารณาลักษณะการเกิดค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบได้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษานานแนวทางอื่นเพื่อประเมินลักษณะเฉพาะของวัตถุประเภทท่อน้ำที่มีอยู่ภายในอิฐต่อไป

เมื่อพิจารณาจากกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ของโครงสร้างอิฐเปียกจากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อมีความชื้นอยู่ภายในอิฐจะพบว่ามีลักษณะการเกิดค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบจากแนวเส้นสีแดงในตารางที่ 2 จะมีเฉพาะอิฐเปียกที่มีลวดตาข่ายกรงไก่อยู่ภายในเท่านั้นที่ยังสามารถแสดงค่าแอมพลิจูดทางฝั่งคลื่นหรือช่วงบวกเป็นเช่นเดิม ส่วนกรณีอิฐเปียกที่มีลวดเหล็กตะแกรงอยู่ภายใน จะเกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดทั้งทางฝั่งคลื่นกับฝั่งท้องคลื่นใกล้เคียงกัน จะสังเกตได้ว่าค่าแอมพลิจูด ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับกรณีท่อทั้งสองชนิด และท่อน้ำพบว่าลักษณะคลื่น ณ ตำแหน่งที่ตรวจพบวัตถุจะเกิดค่าแอมพลิจูดทางฝั่งท้องคลื่นหรือช่วงลบ ส่วนกรณีอิฐเปียกที่มีช่องว่างอยู่ภายใน จะแสดงค่าแอมพลิจูดทางฝั่งคลื่นหรือค่าบวก ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบ ซึ่งพบว่าความชื้นทำให้สัญญาณคลื่นทุกกรณีในอิฐเปียกจะระบุตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง ณ ตำแหน่งแนวเส้นสีน้ำเงินในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาจากกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ของกรณีตัวอย่างอิฐเปียกที่มีท่อพีวีซี และท่อเหล็กอยู่ภายใน ดังรูปที่ 8(ข) จะสังเกตได้ว่า ลักษณะคลื่น ณ ตำแหน่งที่ตรวจพบวัตถุจะเกิดค่าแอมพลิจูดทางฝั่งท้องคลื่นหรือช่วงลบใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับกรณีท่อเหล็กภายในอิฐแห้งดังรูปที่ 8(ก) จะพบว่ามีการเปลี่ยนเฟสของค่าแอมพลิจูดจากฝั่งบวกมาเป็นฝั่งลบดังรูปที่ 8(ข) และตำแหน่งที่ตรวจพบสิ่งแปลกปลอมมีความคลาดเคลื่อน โดยสังเกตจากเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมสำหรับกรณีท่อพีวีซี และท่อเหล็กที่อยู่ในอิฐแห้งจะมีค่าประมาณ 0.81 นาโนวินาที แต่เมื่อท่อพีวีซี และท่อเหล็กอยู่ในอิฐเปียกจะพบว่า ค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมจะเปลี่ยนไปเป็น 1.52 นาโนวินาที และ 1.62 นาโนวินาทีตามลำดับ บ่งชี้ถึงความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมอันเป็นผลมาจากความชื้น

การศึกษานี้ทำการทดสอบกับอิฐก่อทดแทนในกรณีที่ไม่มีวัสดุประสาน สำหรับกรณีอิฐก่อที่มีวัสดุประสานนั้นจากประสบการณ์ของคณะผู้ทดสอบที่ได้เคยใช้การสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์กับโครงสร้างอิฐก่อทั่วไป พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามผลของความหนาและชนิดวัสดุประสานที่มีความต่างชนิดกันยังจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมซึ่งยังอยู่ระหว่างขั้นตอนการศึกษาในลำดับถัดไป



(ก) อิฐแห้ง

(ข) อิฐเปียก

รูปที่ 8 ตัวอย่างกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ของอิฐที่มีท่อพีวีซี และท่อเหล็กอยู่ภายใน โดยแนวเส้นสีแดงแสดง ณ ตำแหน่งวัตถุที่ตรวจพบ เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งจริงของวัตถุ เส้นทึบสีดำแทนท่อเหล็ก และเส้นประสีดำแทนท่อพีวีซี

## 5. สรุปผล

การศึกษานี้จะนำเสนอการสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์หรือวิธี GPR สำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อแบบไม่ใช้วัสดุประสานหรือปูนก่อทั้ง 2 ประเภท คือกรณีอิฐแห้ง และกรณีอิฐเปียก โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า การระบุลักษณะเฉพาะของสิ่งแปลกปลอมจำเป็นต้องอาศัยการพิจารณารูปแบบข้อมูลทั้ง 3 รูปแบบประกอบกันโดย รูปแบบที่ 1 เป็นการประมวลผลภาพจากระดับค่าสีการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นเรดาร์ จะทำให้สามารถระบุลักษณะรูปร่างสิ่งแปลกปลอมได้ รูปแบบที่ 2 เป็นการประมวลผลพิจารณาลักษณะสัญญาณคลื่นเรดาร์ตามลำดับระดับชั้นความลึก ซึ่งจำแนกประเภทของสิ่งแปลกปลอมรวมถึงบ่งบอกถึงตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมได้เพิ่มขึ้น และรูปแบบที่ 3 เป็นการพิจารณาจากกราฟสัญญาณคลื่นเรดาร์ ที่สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะของสิ่งแปลกปลอมได้ โดยการใช้ GPR สำหรับกรณีอิฐแห้งจะมีประสิทธิภาพที่ดี เมื่อกำหนดค่าคงที่

ไดอิเล็กทริกไว้เท่ากับ 4.0 และสามารถใช้ระบุตำแหน่งและชนิดของสิ่งแปลกปลอมประเภท ลวดตาข่ายกรงไก่ ลวดเหล็กตะแกรง ช่องว่าง ท่อพีวีซี และท่อเหล็ก ได้อย่างชัดเจน ยกเว้นกรณีท่อนไม้ที่ใช้ GPR ยังให้ผลการตีความที่ไม่ชัดเจน และจากกรณีผลการทดสอบในกรณีอื่นในสภาวะเปียก พบว่าความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการประมวลผลด้วย GPR ลดลงทั้งในด้านสัญญาณคลื่นเรดาร์ และตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมที่คลาดเคลื่อน ซึ่งการปรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมจะช่วยให้การตีความมีความถูกต้องมากขึ้นได้ โดยการศึกษาพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับอิฐในสภาวะเปียกควรมีค่ามากกว่า 12.0

## 6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน การสนับสนุนจากทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาการวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) การสนับสนุนจากภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการวิจัยจากบริษัท ฮิลติ (ไทยแลนด์) จำกัด

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Janku M., Cikrle P., Grosek J., Anton O., Stryk J. (2019). Comparison of infrared thermography, Ground penetration radar and Ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges. *Construction and Building Materials, 2nd edition. England*, 1098-1111.
- [2] teoh YJ, et al. (2018). Introduction of a Ground Penetrating Radar System for Subsurface Investigation in Balik Pulau, *Journal of Physics*, 1-8. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012098.
- [3] Clement W. P., Ward A. L. (2008). GPR Surveys across a Prototype Surface Barrier to Determine Temporal

and Spatial Variations in Soil Moisture Content. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 305-315.

- [4] Allred B. J., Daniels L. J. (2008). Agricultural Drainage Pipe Detection Using Ground Penetration Radar. *Handbook of agricultural geophysics*, CRC Press, Boca Raton, USA, 363-374.
- [5] Adichat Surinkum, Weera galong, Pracha Kuttikul, Apichart Paiyarom. (2000). The Application of Ground Penetrating Radar (GPR) for Petrified Wood Mapping. 11-49.
- [6] Luo T. X.H., Lai W. W.L., Giannopoulos A. (2020). Forward modelling on GPR responses of subsurface air voids. *Tunnelling and Underground Space Technology*, England. 103-114.
- [7] Lourenve P. J. B. B., Zanzi L. (2006). *Evaluation of two novel NDT techniques: Micro drilling of clay bricks and ground Penetrating Rader in Masonry*. Ph.D. Dissertation of Universidade do Minho, Portugal.
- [8] Clark M.R., Crabb G. (2003). Detection of water movement below a concrete road using ground penetration radar. Proc., *Structural Faults and Repair, 10th International Conference and Exhibition*, London, UK, 15.
- [9] Tronca G., Lehner S., Raj L., Tsalicoglou I., Meier J., Mennicke R. (2017). Looking into concrete-multiple frequency usage in radar products to detect structural parameters and defects faster and more accurately. *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017)*, November 13-17, Singapore.
- [10] Qidwai U., Chen C.H. (2010). Digital image processing: an algorithmic approach with MATLAB. Boca Roton: CRC Press, USA, 103-188.