# Quality Assessment of Strengthening of Reinforced Concrete with CFRP by Using Ground-Penetration Radar

1, 1

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
*Corresponding author; E-mail address: patsawut.m@mail.kmutt.ac.th

บทความนี้นำเสนอวิธีการประเมินคุณภาพของงานเสริมกำลังเสาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยการใช้คลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบ มีวัตถุประสงค์เพื่ออภิปรายลักษณะการหลุดร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมกำลังและผิวคอนกรีตโครงสร้าง โดยการจำลองลักษณะการหลุดร่อนของงานเสริมกำลังด้วยแผ่นโฟมบาง 4 มิลลิเมตรที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดสำหรับจำลองลักษณะความเสียหายของระบบเสริมกำลังที่แตกต่างกัน โดยมีขนาด 100x100, 40x40 และ 20x20 มิลลิเมตร ติดตั้งลงบนเสาขนาดหน้าตัด 200x200 มิลลิเมตร สูง 1.0 เมตร เสริมกำลังเสาด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดแผ่นติดตั้งที่ผิว ดำเนินการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์ Hilti-PS 1000 X-Scanner ที่มีความถี่กลางในการรับส่งสัญญาณเท่ากับ 2.0 กิกะเฮิรตซ์ ทำการประมวลผลข้อมูลสัญญาณคลื่นเรดาร์จากผลการทดสอบโดยมีการกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุที่เหมาะสม การศึกษาพบข้อจำกัดในการใช้งานคลื่นเรดาร์ในการตรวจจับแผ่นโฟมเนื่องจากความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างตัวกลางและแผ่นโฟมที่มีค่าน้อย ส่งผลต่อการพิจารณาลักษณะของแผ่นโฟมที่จำลองการหลุดร่อนของงานซ่อมแซมภายในผลสแกน ประกอบกับคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ส่งผลให้คลื่นเรดาร์ถูกดูดซับและไม่สามารถเคลื่อนทะลุผ่านแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไปได้ ส่งผลให้การประเมินตำแหน่งและขนาดของการหลุดร่อนในระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยคลื่นเรดาร์ไม่สามารถตรวจสอบได้

คำสำคัญ: การประเมินคุณภาพ, การเสริมกำลังโครงสร้าง, การหลุดร่อน, คลื่นเรดาร์, คาร์บอนไฟเบอร์

## Abstract

This article presents a method for assessing the quality of the reinforcement of reinforced concrete structures with carbon fiber sheets using radar wave inspection. This research aimed to discuss the nature of the debonding between the reinforcement material and the structural concrete surface. Simulate the debonding characteristics of the reinforcement work with 3 different sizes of 4 mm thin foam pads to simulate the damage characteristics of different reinforcement systems. with sizes of 100x100, 40x40, and 20x20 mm. It was installed on a column with a cross-section of 200x200 mm., and a height of 1.0 m. The column was reinforced with a surface-mounted carbon fiber sheet, and the test was carried out using the Hilti-PS 1000 X-Scanner radar probe. with a transmission center frequency of 2.0 GHz. Subsequently, the radar signal data was processed from the test results. The dielectric constant is the electromagnetic property of the appropriate object. The study found limitations in the use of radar waves in foam sheet detection due to the small difference in dielectric constant between the medium and the foam sheet. This affects the consideration of the characteristics of the foam sheet that simulates the debonding of repair work within the scan results. Coupled with the conductivity of the carbon fiber sheet, the radar wave is absorbed and cannot pass through the carbon fiber sheet. As a result, the position and magnitude of the debonding in the carbon fiber reinforcement system with radar waves cannot be assessed as a result.

Keywords Quality assessment, Strengthening, Debonding, Radar, Carbon fiber

## 1.

การเสริมกำลังจากภายนอก (Exterior Reinforcement) ของโครงสร้างเป็นหนึ่งในวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเพื่อให้รับน้ำหนักได้ดังเดิม ดำเนินการเสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็กหรือวัสดุอื่น เช่น คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber-Reinforced Plastics, CFRP) หรือเส้นใยแก้ว (Glass Fiber-Reinforced Plastics, GFRP) ปะกับผิวภายนอกของโครงสร้างคอนกรีตเดิม จากบทความของ Zsombor, et al. [1] ได้มีการศึกษาถึงการใช้งานเส้นใยแก้วในการเพิ่มค่าการแอ่นตัวให้แก่โครงสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างมีความเหนียวและสามารถรับกำลังดัดได้มากขึ้น ภายในบทความมีการนำเสนอรูปแบบของการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังจากภายนอก (Externally Bonded FRP Reinforcements) ที่ส่งผลให้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับการเสริมกำลังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพทั้งหมด 4 รูปแบบ 1. การหลุดร่อนจากรอยร้าวภายในโครงสร้างคอนกรีต 2. การหลุดร่อนระหว่างวัสดุประสานและผิวคอนกรีต 3. การหลุดร่อนจากภายในเนื้อวัสดุประสาน และ 4. การหลุดร่อนระหว่างวัสดุประสานและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยวิธีการซ่อมแซมงานที่บกพร่องของระบบเสริมกำลังด้วย CFRP นั้นขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และขอบเขตของความบกพร่อง โดยภายในมาตฐานการเสริมกำลังโครงสร้าง

คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยหรือ มยผ.1508-51 [2] ได้มีการให้ข้อมูลวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวของวัสดุเคลือบผิว ไปจนถึงวิธีการซ่อมเมื่อเกิดการหลุดร่อนขนาดใหญ่ของระบบเสริมกำลังด้วย CFRP เมื่อพิจารณาถึงขนาดของการหลุดร่อนที่ต้องซ่อมแซมด้วยวิธีการปะชิ้นส่วน CFRP ใหม่ ขนาดของจุดบกพร่องจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 32-150 มิลลิเมตร หรือมีพื้นที่ระหว่าง 800 – 16,000 ตารางมิลลิเมตรต่อการพิจารณาระบบเสริมกำลังด้วย CFRP พื้นที่ 1 ตารางเมตร Rakshith, et al. [3] มีการอภิปรายสาเหตุที่ทำให้ระบบเสริมกำลังด้วย CFRP ขาดประสิทธิภาพไว้ 2 สาเหตุ 1. Barely Visible Impact Damage (BVID) หรือลักษณะการเสียรูปของแผ่น CFRP จากการรับน้ำหนักบรรทุกเกิน และ 2. ปัจจัยจากสภาพแวดล้อม โดยกระบวนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่สามารถใช้ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ในการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วย CFRP มีการนำเสนอภายในบทความทั้งหมด 3 วิธีการทดสอบคือ 1. รังสีอินฟราเรด (Infrared Thermography) 2. คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic Pulse Velocity) และ 3 การถ่ายภาพรังสี (Radiography) ต่อมาในปีเดียวกันนั้น Nur, et al.[4] ได้มีการศึกษาการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วย CFRP ด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บนผิวตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่มีการเจาะรูให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวขนาดต่างๆ เพื่อจำลองถึงพื้นผิวที่เกิดการหลุดร่อนจากนั้นทำการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด และ การใช้คลื่นเรดาร์ ผลการทดสอบพบว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยการใช้รังสีอินฟราเรดปรากฏขนาดของการหลุดที่มากกว่าขนาดการหลุดร่อนจริงอยู่ 25 เปอร์เซนต์ และสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีการใช้คลื่นเรดาร์ปรากฏผลสะท้อนของคลื่นเรดาร์บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และคอนกรีต แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ถึงขนาดพื้นที่ของการหลุดร่อนจากผลสแกน เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า โดยวัสดุที่นำไฟฟ้ามีความสามารถในการดูดซับคลื่นเรดาร์ได้ดีส่งผลให้การปรากฏของการสะท้อนระหว่างรอยต่อของวัตถุที่อยู่ระดับลึกกว่าวัตถุที่นำไฟฟ้าจะปรากฏได้ยากเนื่องจากคลื่นเรดาร์จะถูกลดทอนไปจนหมด ข้อสรุปในประเด็นการใช้งานคลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบและประเมินการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วย CFRP จากบทความนี้จึงยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัด ดังนั้นการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการนำเรดาร์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและประเมินการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วย CFRP จึงเป็นประเด็นศึกษาที่น่าสนใจ

## 2.

เรดาร์หยั่งลึกพื้นดินเป็นการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ความถี่สูงผ่านตัวแปลงส่งสัญญาณ (Transmitter) ไปยังวัตถุใต้ผิววัตถุ จากนั้นทำการบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวแปลงรับสัญญาณ (Receiver) ในแต่ละตำแหน่ง โดยที่ตัวรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะบันทึกเวลาที่ใช้ในการเดินทางจากตัวส่งสัญญาณแล้วสะท้อนวัตถุและกลับมาบนผิววัตถุ (Two-Way Travel Time) สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางลงไปยังชั้นวัตถุใต้ผิวดินที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันหรือเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบรอยต่อระหว่างวัตถุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน ค่าแอมพลิจูดที่ได้จากการสะท้อนกลับมาของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ซึ่งความแตกต่างของสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างรอยต่อของวัตถุนี้ เป็นตัวกำหนดความสามารถในการสะท้อนกลับ เมื่อความแตกต่างของคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างชั้นของวัตถุมีค่ามาก คลื่นจะสามารถสะท้อนกลับมาได้ดี แต่ถ้าหากความแตกต่างดังกล่าวมีค่าน้อยจะส่งผลให้คลื่นสะท้อนกลับได้ไม่ดี หรือไม่มีการสะท้อนกลับ

### *2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่ (Frequency) ตั้งแต่ 1 เฮิรตซ์ ถึงประมาณ $10^{25}$ เฮิรตซ์และมีความยาวคลื่นตั้งแต่ $10^{-17}$ เมตรถึงประมาณ $10^{8}$ เมตร จึงสามารถนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปประยุกต์ในสายงานได้หลากหลาย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในเรดาร์หยั่งลึกพื้นดินจะมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เมกะเฮิรตซ์ถึง 2 จิกะเฮิรตซ์ ในแต่ละช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีข้อจำกัด ซึ่งคลื่นที่มีความถี่สูงจะส่งผลให้ข้อมูลจากการทดสอบมีความละเอียดมากกว่าแต่จะสูญเสียพลังงานค่อนข้างมากส่งผลให้สามารถสำรวจได้ในระยะที่ตื้น ส่วนการใช้คลื่นความถี่ต่ำจะให้ผลการทดสอบมีความละเอียดน้อยกว่า แต่จะสามารถเคลื่อนที่ลงไปใต้พื้นผิวในระยะที่ลึกกว่า โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

### *2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก*

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นค่ากำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวกลาง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของวัตถุ โดยวัตถุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุนั้นจะมีค่าสูงและสำหรับวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยจนมีค่าใกล้เคียงกับอากาศซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1

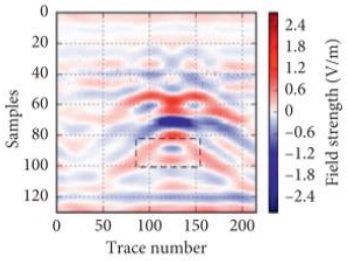
ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้แผ่นโฟมในการจำลองลักษณะการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลัง ด้วยคุณสมบัติความเป็นฉนวนของแผ่นโฟมและการแทรกตัวของอากาศในแผ่นโฟม ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นโฟมมีค่าใกล้เคียงกับอากาศ ทรอดคล้องกับลักษณะของการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีสาเหตุหลักจากการติดตั้งโดยไม่คำนึงถึงกระเปาะอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในระหว่างการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

### *2.3 การประมวลผลภาพคลื่นเรดาร์*

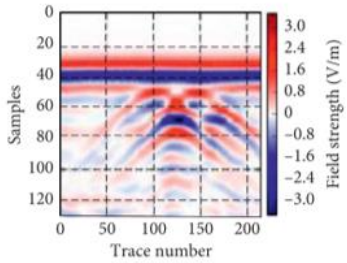
การประมวลผลข้อมูลเป็นการลบสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไปเพื่อทำให้สัญญาณบริเวณที่สนใจ (Signal) ชัดเจนมากขึ้นต่อการแปลความหมาย การกรองความถี่ (Frequency Filtering) เป็นขั้นตอนการกรองสัญญาณข้อมูลเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกไปซึ่งสัญญาณที่ถูกกรองออกไปเป็นได้ทั้งสัญญาณที่มีค่าความถี่สูงและค่าความถี่ต่ำ ในขณะเดียวกันยังคงมีการเก็บสัญญาณที่ถูกกรองออกไป เป็นได้ทั้งสัญญาณในช่วงความถี่กลางซึ่งเกิดจากการปล่อยของตัวส่งสัญญาณเอาไว้ ส่งผลให้ข้อมูลมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ประเภทของตัวกรองความถี่สัญญาณแบ่งออกเป็น 4 ตัวเลือกการกรอง ดังนี้ 1. กรองความถี่ต่ำให้ผ่านได้ (Low Pass Filtering Frequency) 2. กรองความถี่สูงให้ผ่านได้ (High Pass Filtering Frequency) 3. กรองความถี่ช่วงกลางให้ผ่านได้ (Band Pass Filtering Frequency) และ 4. กรองความถี่ช่วงกลางที่ตัดออก (Band Stop Filtering Frequency)

โดยการเลือกประเภทตัวกรองความถี่ของสัญญาณขึ้นอยู่กับวัตถุที่เราสนใจ ให้ปรากฏบนผลภาพของข้อมูลสะท้อนระหว่างรอยต่อของวัตถุจากการใช้คลื่นเรดาร์ โดยบทความของ Yong Yang, et.al [5] ได้ทำการศึกษาข้อจำกัดในการใช้งานอุปกรณ์เรดาร์ในการตรวจสอบวัตถุฝังภายในกระบะทรายจากเงื่อนไขของการถูกลดทอนของสัญญาณเมื่อคลื่นเรดาร์กระทบกับวัตถุที่เป็นโลหะฝังอยู่ในระดับที่ตื้นกว่าโพรงอากาศ ได้ข้อสรุปว่าเมื่อต้องการพิจารณาลักษณะของวัตถุที่เป็นโลหะหรือวัตถุที่มีค่าการนำไฟฟ้าได้ดีการเลือกใช้ตัวกรองความถี่ของสัญญาณในรูปแบบกรองความถี่สูงให้ผ่านได้

(High Pass Filtering Frequency) การปรากฏลักษณะคลื่นที่สะท้อนระหว่างรอยต่อของตัวกลางและแท่งเหล็กมีความชัดเจนมากขึ้นในภาพผลการทดสอบ และ ถ้าหากต้องการพิจารณาลักษณะคลื่นที่สะท้อนระหว่างรอยต่อของอากาศและตัวกลาง การเลือกใช้ตัวกรองความถี่ของสัญญาณในรูปแบบกรองความถี่ต่ำให้ผ่านได้ (Low Pass Filtering Frequency) จะช่วยให้การปรากฏของลักษณะคลื่นสัญญาณที่บ่งบอกถึงช่องว่างหรืออากาศชัดเจนขึ้น โดยภาพการสะท้อนระหว่างรอยต่อของแท่งเหล็กและตัวกลางจะถูกตัดออกจากภาพผลการทดสอบดังรูปที่ 1




(ก) ข้อมูลที่ใช้ตัวกรองสัญญาณเรดาร์ชนิด Low Pass Filtering



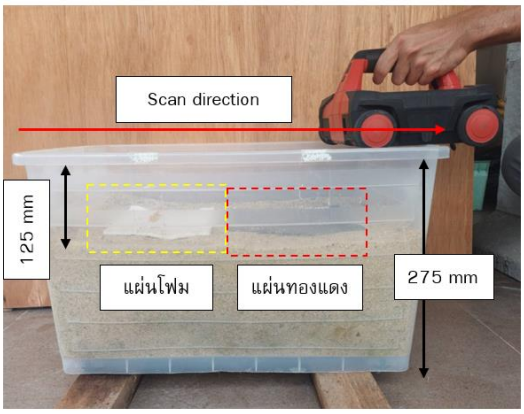

(ข) ข้อมูลที่ใช้ตัวกรองสัญญาณเรดาร์ชนิด High Pass Filtering

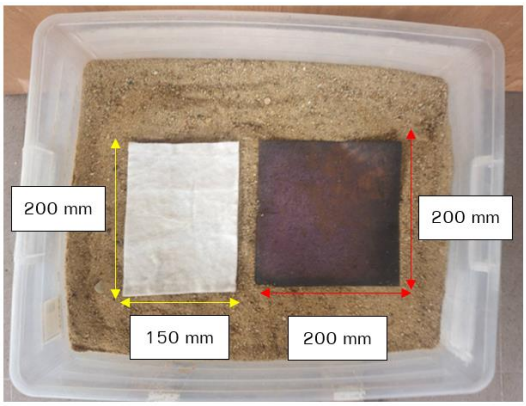
**1** ผลการทดสอบที่มีการประมวลผลภาพภายหลังการสแกนที่แตกต่างกัน

## 3.

*3.1 การทดสอบความสามารถตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์*

การทดสอบความสามารถในการตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการใช้งานอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์สำหรับพิจารณาแผ่นโฟมที่จำลองถึงลักษณะการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลัง ดำเนินการทดสอบด้วยการใช้กระบะทรายที่มีขนาดความลึก 275 มิลลิเมตร ทำการฝังแผ่นทองเหลืองขนาด 200x200 มิลลิเมตร และแผ่นโฟมขนาด 150x200 มิลลิเมตรในระดับความลึก 125 มิลลิเมตรจากพื้นผิวที่ดำเนินการทดสอบดังรูป 2 จากนั้นดำเนินการทดสอบด้วยอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยสัญญาณเรดาร์บริเวณผิวทรายด้านบน



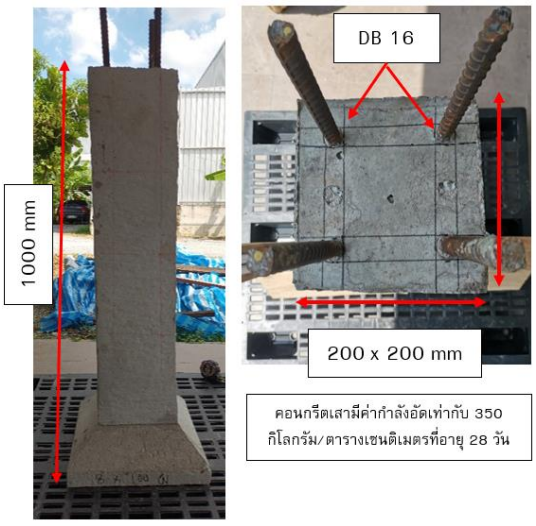




**2** การทดสอบความสามารถตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์

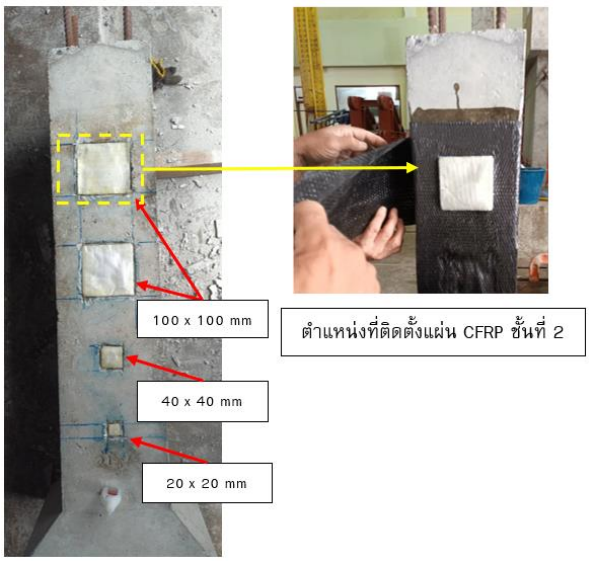
*3.2 การทดสอบใช้งานอุปกรณ์เรดาร์ตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลัง*

*3.2.1 ตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังในตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก*

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาลักษณะการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในเสาโครงสร้างคอนกรีตโดยการใช้งานคลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบ การศึกษาจะทำการเก็บข้อมูลจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังไม่ได้ทำการเสริมกำลังและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์พร้อมทั้งติดตั้งโฟมเพื่อจำลองลักษณะการหลุดร่อน สำหรับการติดตั้งแผ่นโฟมดำเนินการติดตั้งบนพื้นผิวของเสาโครงสร้างด้วยแผ่นโฟมหนา 4 มิลลิเมตร ทั้งหมด 3 ขนาดคือ 100x100, 40x40 และ 20x20 มิลลิเมตร โดยเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นโฟมเท่ากับ 100 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3 เพื่อจำลองกรณีที่เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จึงได้กำหนดตำแหน่งทดสอบเพิ่มเติมที่ระยะ 150 มิลลิเมตรจากขอบด้านบนเสาตัวอย่างทดสอบโดยดำเนินการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชั้นที่ 2 ทับในตำแหน่งดังกล่าว ติดแผ่นโฟมขนาด 100x100 มิลลิเมตรระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดำเนินการทดสอบด้วยอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์เก็บข้อมูลในทิศทางตามความสูงของเสา จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบมาประมวลผลภาพของสัญญาณเรดาร์ภายในโปรแกรม Hilti-Profit เพื่อวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีตเสาและลักษณะการสะท้อนของแผ่นโฟมที่ปรากฏในผลการทดสอบ




(ก)




(ข)

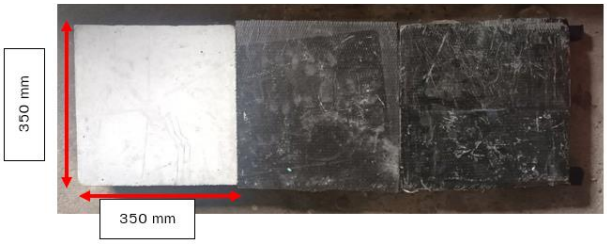


(ค)

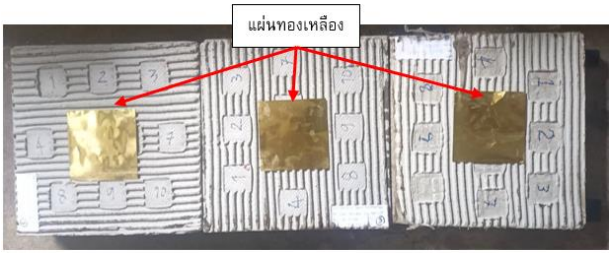
**3** การเตรียมตัวอย่างทดสอบเสาโครงสร้าง (ก) เสาคอนกรีต (ข) การติดตั้งแผ่นโฟมบนเสาคอนกรีต (ค) เสาคอนกรีตภายหลังดำเนินการเสริมกำลัง

*3.2.2 ตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังในตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตต้น*

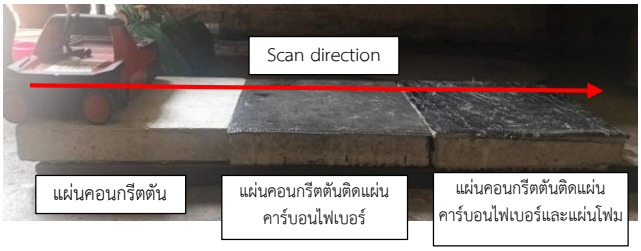
การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรบกวนสัญญาณเรดาร์ของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยการติดตั้งลงบนผิวแผ่นคอนกรีตต้นขนาดหน้าตัด 350x350 มิลลิเมตร ความหนา 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างทดสอบแรกคือแผ่นคอนกรีตผิวเรียบไม่มีการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผิว แผ่นตัวอย่างที่ 2 มีการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผิวบนของแผ่นคอนกรีตต้น และ ตัวอย่างที่ 3 ติดแผ่นโฟมที่ผิวคอนกรีตด้วยกาวร้อนจากนั้นติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทับบนพื้นผิวดังกล่าว ติดแผ่นทองเหลืองขนาด 200x200 มิลลิเมตร ที่ผิวด้านล่างของทุกตัวอย่างทดสอบ นำตัวอย่างแผ่นคอนกรีตทั้ง 3 แผ่นวางเรียงติดกันโดยวางบนไม้รอง จากนั้นจึงเริ่มดำเนินการทดสอบ โดยใช้อุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์เคลื่อนที่ผ่านทั้ง 3 ตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาประมวลผลภาพของสัญญาณด้วยโปรแกรม Hilti-Profit เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของสัญญาณภาพภายหลังการประมวลผลระหว่างการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และไม่ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์




(ก)




(ข)

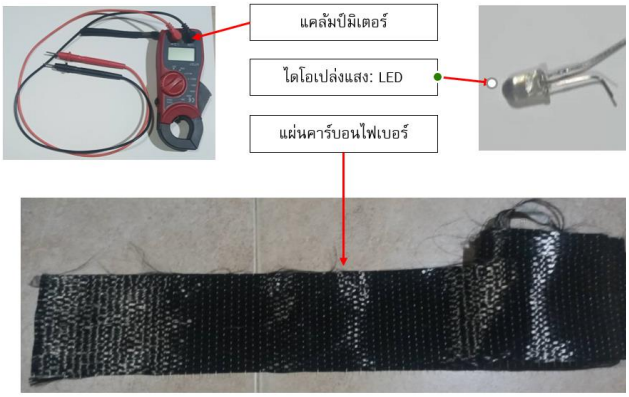



(ค)

**4** การเตรียมตัวอย่างแผ่นคอนกรีตตัน (ก) ผิวด้านบนแผ่นคอนกรีตตัน (ข) ผิวด้านล่างแผ่นคอนกรีตตัน (ค) การเตรียมตัวอย่างทดสอบก่อนเริ่มดำเนินงาน

### *3.3 การทดสอบคุณสมบัตินำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์*

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ ด้วยการใช้แคลป์มิเตอร์ในโหมดทดสอบไดโอดและไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) นำมาเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นพิจารณาลักษณะการเปล่งแสงของไดโอด ดังรูปที่ 5



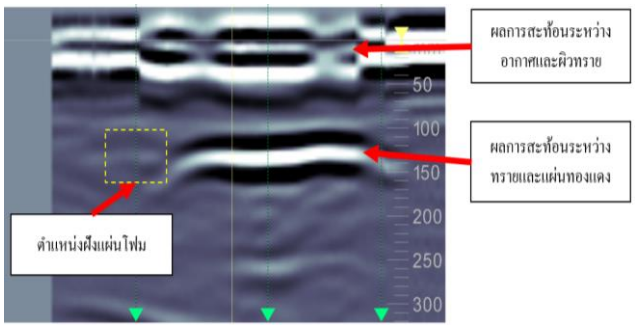

**5** อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

## 4.

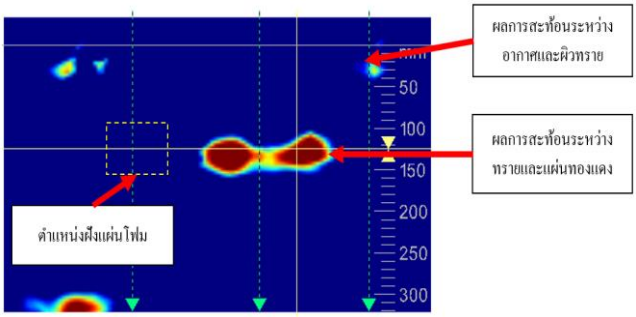
กระบวนการประมวลผลภาพข้อมูลการทดสอบภายหลังดำเนินการทดสอบ จะปรับปรุงภาพผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ 3 ชนิด ชนิดแรกคือชนิดการกรองสัญญาณความถี่ ต่อมาคือการเพิ่มพลังงานของสัญญาณ และการย้ายตำแหน่งของคลื่นเรดาร์ โดยผลการทดสอบในแต่ละชุดการทดสอบนั้น จะมีกระบวนการประมวลผลภาพที่ต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุที่ต้องการพิจารณา

### *4.1 การทดสอบความสามารถตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์*

ผลที่ได้รับจากการทดสอบพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของทรายที่เป็นวัตถุตัวกลางที่ค่าเท่ากับ 4.4 โดยปรากฏระดับความลึกของแผ่นทองเหลืองอยู่ที่ 125 มิลลิเมตรจากระดับผิวภายในผลสแกนดังรูปที่ 6 ทำการประมวลผลภาพด้วยการกรองสัญญาณความถี่สูงออกจากผลสแกนเพื่อตัดลดการปรากฏของวัตถุที่อยู่ใกล้พื้นผิว เช่นรอยต่อระหว่างตัวเครื่องและผิวทราย เป็นต้น ส่งผลให้การปรากฏของแผ่นทองเหลืองที่ฝังอยู่มีขนาดภายในผลสแกนใกล้เคียงกับขนาดของวัตถุจริง โดยมีขนาดความกว้างของแผ่นทองเหลืองในผลสแกนเท่ากับ 190 มิลลิเมตรและความกว้างของแผ่นทองเหลืองจริงที่ฝังภายในกระบะทรายเท่ากับ 200 มิลลิเมตร เลือกใช้วิธีการย้ายตำแหน่งคลื่นเรดาร์ด้วยวิธีของสเตาท์ (Stolt's Migration) และไม่มีการเพิ่มพลังงานของสัญญาณให้แก่ข้อมูลภาพ ดังรูปที่ 7 การปรากฏของแผ่นทองเหลืองให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนซึ่งแตกต่างจากแผ่นโฟมที่ไม่ปรากฏลักษณะสัญญาณใดๆ เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่คาดว่าจะปรากฏลักษณะของแผ่นโฟมจากผลสแกนที่ได้ทำการประมวลผลภาพเรียบร้อยแล้ว




**6** ผลทดสอบการตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์แสดงผลแบบข้อมูลดิบ (Raw Data)



7 ผลทดสอบการตรวจจับแผ่นโฟมด้วยคลื่นเรดาร์แสดงผลข้อมูลภายหลังการประมวลผล (Processing)

*4.2 การทดสอบใช้งานอุปกรณ์เรดาร์ตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลัง*

ผลที่ได้รับจากการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอนกรีตเสามีค่าเท่ากับ 7.6 เมื่อพิจารณาจากผลสแกนตัวอย่างเสาก่อนเริ่มดำเนินการติดตั้งระบบเสริมกำลัง ปรากฏลักษณะของเหล็กปลอกที่ระดับความลึก 36 มิลลิเมตรจากผิวตัวอย่างเสาคอนกรีตดังรูปที่ 8(ก) โดยระดับความลึกดังกล่าวเป็นระยะฝังจริงของเหล็กปลอกเสาดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 7.6 นี้ก็จะนำไปใช้เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสำหรับประมวลผลภาพจากการตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังในตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นลำดับต่อไป

*4.2.1 ตรวจสอบการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังในตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก*

ผลการทดสอบจากรูปที่ 8(ข) เป็นผลการทดสอบภายหลังการประมวลผลภาพด้วยการเลือกใช้ตัวเลือกกรองสัญญาณความถี่ต่ำออกจากผลสแกน เป็นการกำหนดความลึกที่จะพิจารณาผลทดสอบให้อยู่ที่ระดับผิวตัวอย่างทดสอบ ประกอบกับตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และแผ่นโฟมนั้นได้ทำการติดตั้งที่ผิว ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเลือกการกรองความถี่ต่ำออกจากผลสแกนจะทำให้การปรากฏของสัญญาณที่บริเวณผิวมีสีที่เข้มมากขึ้น ไม่มีการเพิ่มพลังงานให้แก่สัญญาณ และเลือกใช้วิธีการย้ายตำแหน่งสัญญาณด้วยวิธีการของสเตาท์ โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่าสัญญาณเรดาร์ปรากฏแถบสีเข้มของสัญญาณบริเวณผิวของตัวอย่างทดสอบ ไม่สามารถจำแนกและระบุได้ถึงลักษณะของแผ่นโฟมในทุกขนาดจากผลการสแกน อีกทั้งยังไม่ปรากฏลักษณะของเหล็กปลอกของเสาโครงสร้างเมื่อพิจารณาในตำแหน่งความลึกเดียวกัน

(ก)

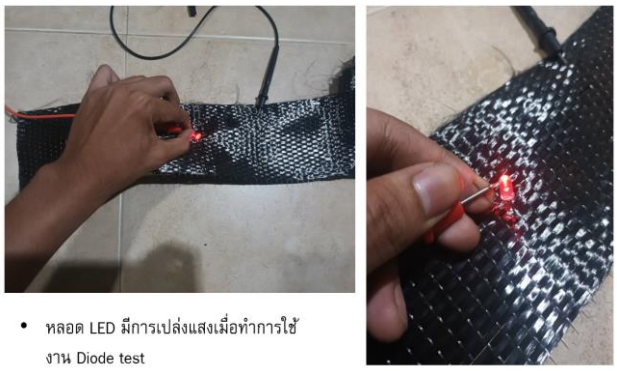
(ข)

8 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตด้วยคบ! น □วล การช บ ต่



ส ารยจเด กษาส ีตช

ผลการทดสอบเมื่อใช้งานแคล์มป์มิเตอร์ในโหมดใช้งานทดสอบการเปล่งแสงของไดโอด เมื่อทำการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และหลอดไดโอดเปล่งแสง ปรากฏการเปล่งแสงของไดโอด ดังนั้นแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาติดตั้งในกระบวนการเสริมกำลังมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า




10 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

## 5.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออภิปรายลักษณะการหลุดร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเสริมกำลังและผิวโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้งานอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์ Hilti-PS1000 X-Scanner สำหรับการประเมินคุณภาพของงานเสริมกำลังโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการศึกษาพบว่าการระบุลักษณะของแผ่นโฟมจากการทดสอบภายในกระบะทรายด้วยอุปกรณ์ Hilti-PS1000 X-Scanner ไม่สามารถตรวจจับแผ่นโฟมที่ฝังอยู่ในกระบะทรายได้ เมื่ออุปกรณ์ถูกใช้งานในการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเล็กประกอบกับวัตถุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับตัวกลางที่คลื่นเรดาร์วิ่งผ่าน การปรากฏคลื่นสะท้อนระหว่างวัตถุและตัวกลางจะไม่ปรากฏในผลสแกน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของทรายเท่ากับ 4.4 และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นโฟมเท่ากับ 1.0 และจากผลทดสอบใช้งานอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์สำหรับตรวจสอบการหลุดร่อนระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และผิวคอนกรีต สรุปได้ว่าอุปกรณ์ทดสอบไม่สามารถตรวจวัดแผ่นโฟมที่จำลองลักษณะการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้ อีกทั้งการปรากฏของลักษณะการสะท้อนระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตจะไม่สามารถตรวจพบได้เช่นกัน สำหรับกรณีเกิดการหลุดร่อนที่ผิวโครงสร้างและการหลุดร่อนระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีพฤติกรรมในการดูดซับสัญญาณคลื่นเรดาร์ ส่งผลให้การปรากฏผลสะท้อนระหว่างวัตถุและตัวกลางที่อยู่ในตำแหน่งลึกกว่าแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไม่สามารถตรวจสอบได้ โดยพิจารณาจากผลการทดสอบตรวจจับการหลุดร่อนในการเสริมกำลังแผ่นคอนกรีตต้น พฤติกรรมการดูดซับพลังงานคลื่นเรดาร์ของวัตถุเป็นคุณสมบัติของวัตถุที่มีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการศึกษามาพิจารณาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าด้วยแคลป์มิเตอร์ ปรากฏว่าแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อการพิจารณาตำแหน่งและขนาดของการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังเมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์หยั่งความลึกด้วยคลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบ

การใช้งานอุปกร์ทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นหนึ่งในวิธีการที่สามารถตรวจสอบและประเมินลักษณะการหลุดร่อนของระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้ เนื่องจากประเภทของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกล ด้วยเหตุนี้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะไม่ส่งผลต่อกระบวนการตรวจสอบ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณและการอำนวยความสะดวกสำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา และได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการวิจัยจากบริษัท ฮิลติ (ไทยแลนด์) จำกัด

[1] Zsombor Kalaman Szabo and Gyorgy L. Balazs (2006). *Near-surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures*, Periodica Polytechnica, Civil Engineering 51/1 (2007), pp.33-38.

[2] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2551), มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, มยผ. 1508-51, หน้า 24-27.

[3] Rakshith Vishwanath and Benjamin Rohit (2019). A Review on Inspection and Maintenance of FRP Structures, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 520, IOP eBooks, 18 April 2019.

[4] Nur Yazadani, Eyosias Beneberu and Mina Riad (2018). *Nondestructive Evaluation of FRP-Concrete Interface Bond due to Surface Defects*, Hindawi, Advances in Civil Engineering, 2019.

[5] Yong Yang, Junwei Lu, Rongzhe Li, Weigang Zhao and Deli Yan (2019). *Small-Scale Void-Size Determination in reinforced Concrete Using GPR*, Hindawi, Advances in Civil Engineering, 2020.