



การตรวจสอบแบบจำลองโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธียังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์

APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) FOR DETECTION OF VOID MODEL
UNDER CONCRETE PAVEMENT

อาทิตมา โคจิมา¹, ฐานบ ธิติมากร^{2*} และ ศศิกานต์ กุ้งษ์ศักดิ์³

^{1,2}ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: Thanop.T@chula.ac.th

บทคัดย่อ

โพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้อ่อนนคอนกรีตเกิดความเสียหาย การตรวจสอบโพรงดังกล่าวกระทำยากเนื่องจากอยู่ใต้ผิวทาง จึงได้มีการพยายามหาวิธีที่เหมาะสมในการตรวจสอบโพรงเหล่านี้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการใช้วิธีการสำรวจยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ (GPR) มาใช้เพื่อตรวจสอบแบบจำลองโพรง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของวิธีนี้ในการตรวจสอบโพรงใต้ถนน ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ได้ใช้สายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz ข้อมูล GPR ที่ได้นำมาประมวลผลซึ่งประกอบด้วย การขยายสัญญาณ การปรับตำแหน่งข้อมูล การกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง และการกำจัดปลายหางของไฮเปอร์โบลาจากเหล็กเสริมรวมถึงการประมวลผลด้วยการแปลงแบบฮิลเบิร์ต (Hilbert transform) ผลการศึกษาพบว่าข้อมูลจากสายอากาศความถี่ 900 MHz เห็นรายละเอียดรูปร่างโพรงได้ชัดเจนกว่า ในขณะที่สายอากาศความถี่ 400 MHz ให้ความลึกในการสำรวจมากกว่า สำหรับข้อมูลแบบ 2 มิติเหมาะสำหรับการดูรูปร่างหน้าตัดขวางของโพรง ในขณะที่ข้อมูลแบบ 3 มิติเหมาะสำหรับใช้ดูรูปร่างของโพรงเมื่อมองจากมุมมองด้านบน เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลแอมพลิจูดในโดเมนเวลากับเมกนิจูดจากการแปลงแบบฮิลเบิร์ต พบว่าข้อมูลแอมพลิจูดในโดเมนเวลาให้รายละเอียดของรูปร่างโพรงที่ชัดเจนกว่า แต่ภาพจากการแปลงฮิลเบิร์ตบอกตำแหน่งได้ง่ายกว่า

คำสำคัญ: โพรง, GPR, พื้นถนนคอนกรีต

ABSTRACT

Void under concrete pavement is a major problem that results in damaging of concrete pavements. Detecting such a void is quite difficult because the void is normally located under the pavement and it will not be able to be observed without any signs on the pavement surface. This study investigated the capabilities of ground penetrating radar (GPR) technique for void detection. The main objective was to determine the appropriate data acquisitions and visualization techniques of GPR data to provide a better image of survey results. In this study, the GPR data were acquired using both 400 and 900 MHz frequency antennas. Then, all 2D profiles were combined to create a 3D GPR model. Additionally, the GPR data were also converted into the frequency,

Atima Kojima¹, Thanop Thitimakorn^{2*} and Sasikan Kupongsak³

^{1,2}Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

³Department of Food Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

phase, and amplitude domain using Hilbert transform. From the results of this study, the image obtained from the 900 MHz frequency antenna provided better resolution while the data from the 400 MHz frequency antenna gave a greater depth of penetration, but its resolution was less than 900 MHz. For 2D profile, it is good for viewing the shape and depth of the voids. In contrast, the 3D image makes it possible to see the boundary of the voids from the top view. The results also concluded that time domain GPR data provided clearer shape and depth of the voids. However, the data from Hilbert transform gave the better position of voids.

KEYWORDS: Void, GPR, Concrete Pavement

1. บทนำ

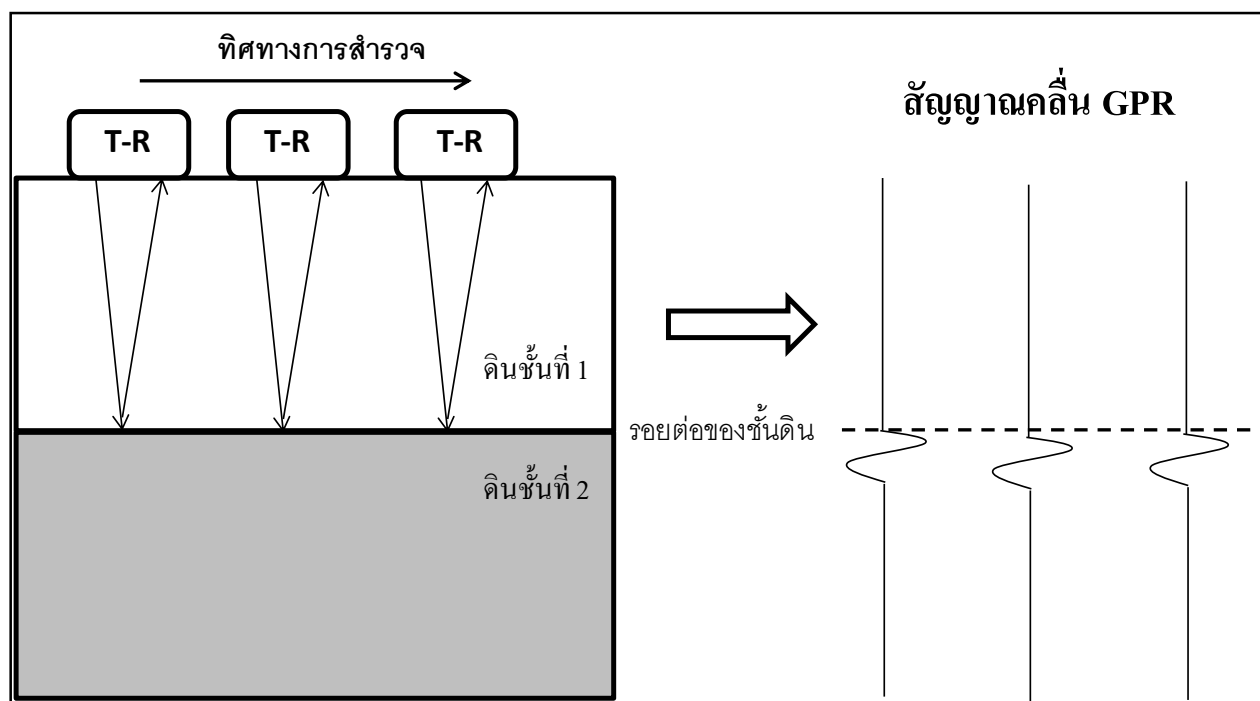
โพรงใต้ถนนเป็นปัญหาสำคัญที่พบในถนนคอนกรีตอันเกิดจากการสูญเสียวัสดุใต้พื้นถนนไปเนื่องจากน้ำที่ซึมลงไปได้ถนนตามรอยแตกหรือเกิดจากน้ำที่รั่วซึมมาจากท่อใต้ถนนที่เกิตรอยแตกขึ้น ดังเช่นข่าวการทรุดตัวของถนนแจ้งวัฒนะเมื่อวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2555 ถนนเกิดการทรุดตัวเป็นหลุมลึก ขนาดกว้างประมาณ 2 เมตร ลึกประมาณ 1.5 เมตร เกิดจากดินและทรายที่อัดเป็นชั้นวัสดุพื้นทางถูกกัดเซาะหายไปจนเกิดเป็นโพรง เนื่องด้วยเหตุการณ์น้ำท่วมในปี พ.ศ. 2554 เป็นสาเหตุของการทรุดตัวและพังทลายของผิวทางคอนกรีต ดังนั้นการตรวจสอบเพื่อค้นหาโพรงใต้ถนนคอนกรีตจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวางแผนทางบำรุงรักษาและการซ่อมแซมก่อนที่ถนนจะเกิดการทรุดตัวขึ้น อย่างไรก็ตามการปิดการจราจรเพื่อทำการสำรวจด้วยวิธีเจาะสำรวจหรือวิธีการอื่นๆอาจไม่สามารถทำได้ในบริเวณถนนที่มีการจราจรหนาแน่น ดังนั้นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในงานสำรวจลักษณะนี้ ในปัจจุบันวิธีการสำรวจใต้ผิวดินด้วยวิธีการสำรวจยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ (Ground Penetration Radar, GPR) เป็นที่นิยมในการใช้หาข้อมูลใต้ผิวดินในระดับตื้นและในปัจจุบันก็ได้ถูกนำมาใช้ในการสำรวจโครงสร้างถนนมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะการสำรวจหาความหนาของชั้นต่างๆ และสำรวจหาความเสียหายเช่น โพรงใต้ถนน วิธีการสำรวจยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ (Ground Penetration Radar, GPR) เป็นวิธีการทดสอบทางด้านธรณีฟิสิกส์โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินระดับตื้นและให้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดสูง อีกทั้งยังเป็นวิธีการสำรวจที่รวดเร็วและไม่ทำลายวัสดุที่ทดสอบ จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อสำรวจ วิเคราะห์และแสดงลักษณะโพรงใต้ถนนคอนกรีตได้เป็นอย่างดี [1, 2, 3]

การสำรวจโพรงใต้ถนนเป็นสิ่งที่กระทำได้อย่างยากหากบนพื้นถนนไม่มีสัญญาณบ่งบอกถึงโพรงที่อยู่ด้านล่างเช่นรอยแตก รอยยุบตัวของพื้นถนน โดยทั่วไปวิธีสำรวจหาโพรงใต้ถนนมักจะใช้วิธีเจาะสำรวจบริเวณที่คาดว่าจะมีโพรงอยู่ ซึ่งเสียค่าใช้จ่ายและเวลาค่อนข้างมาก แต่ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการสำรวจใต้ผิวดินด้วยคลื่นเรดาร์มาใช้ในการตรวจโพรงใต้ถนน ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาถึงวิธีการและแนวทางที่เหมาะสมในการสำรวจหาโพรงด้วยวิธี GPR การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการบริเวณแบบจำลองถนนคอนกรีต ภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ซึ่งได้มีการสร้างแบบจำลองโพรงใต้ถนนเอาไว้หลายรูปแบบ ข้อมูลที่ได้จะนำมาทำการเปรียบเทียบผลการสำรวจจากวิธีการเก็บข้อมูลด้วยความถี่หลายๆความถี่ รวมถึงการประมวลผลและแสดงผลแบบต่างๆ ผลการศึกษานี้จะทำให้สามารถประยุกต์ใช้วิธีการ GPR ในการตรวจสอบโพรงใต้ถนนคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2. หลักการสำรวจด้วยวิธี GPR

วิธี GPR ทำงานโดยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องลงไปได้ดินแล้วรับสัญญาณที่สะท้อนกลับขึ้นมา การสะท้อนของสัญญาณเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหินที่อยู่ด้านล่าง [4, 5, 6] คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวได้แก่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) และ ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับชนิดชั้นวัตถุ ความชื้น และของเหลวที่อยู่ในช่องว่างภายในวัตถุนั้นๆ (ตารางที่ 1) และความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้านี้เองเป็นตัวทำให้สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสะท้อนกลับขึ้นมามบนผิวดิน (รูปที่ 1) ข้อมูลได้ผิวดินสามารถวิเคราะห์และแปลความหมายได้โดยการวัดเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับขึ้นมา รวมถึงค่าความแรงของการสะท้อนของคลื่น (Amplitude)

ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสำรวจจะเป็นตัวกำหนดความลึกของการสำรวจรวมถึงความสามารถในการตรวจสอบเป้าหมายด้วย โดยทั่วไปแล้วสัญญาณความถี่จะสามารถตรวจสอบได้ในระดับลึกแต่ความละเอียดของสัญญาณก็ลดต่ำลงด้วย ส่วนสัญญาณความถี่สูงจะใช้ในการสำรวจระดับตื้นๆและมีความละเอียดคมชัดของข้อมูลสูง ความถี่ของสัญญาณ GPR ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีตั้งแต่ระดับต่ำประมาณ 25 MHz ไปจนถึงระดับสูงถึง 2.5 GHz คลื่นความถี่ต่ำจะนิยมใช้ในการสำรวจด้านธรณีวิทยา สัญญาณความถี่ระดับกลางๆจะใช้งานงานวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก ส่วนความถี่สูงๆจะใช้งานสำรวจถนนและงานตรวจสอบคอนกรีตเป็นหลัก ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความถี่ของคลื่น GPR ที่ใช้ ซึ่งความลึกดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับสภาพชั้นดินในบริเวณนั้น ในบริเวณที่ชั้นดินประกอบด้วยปริมาณดินเหนียวค่อนข้างมากจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นดินมากขึ้นก็จะทำให้ความลึกในการสำรวจลดลงไปด้วย เกิดเนื่องจากพลังงานของสัญญาณเรดาร์จะถูกดูดกลืนโดยดินเหนียวไปเป็นจำนวนมาก ทำให้มีพลังงานเหลือน้อยในการเคลื่อนที่ลงไปที่ความลึกมากขึ้น หลักการสำรวจด้วยวิธี GPR รวมถึงข้อดี ข้อเสียของวิธีนี้ได้มีการสรุปเอาไว้อย่างละเอียดในงานของ [7, 8, 9,10].



รูปที่ 1 หลักการสำรวจด้วยวิธี GPR [11]

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของวัสดุแต่ละชนิด [11]

ชนิดของวัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)
อากาศ	1
น้ำจืด	80
น้ำเค็ม	81 – 88
ทรายแห้ง	3 – 5
ทรายชื้น	20 – 30
คอนกรีต	6-8
แอสฟัลท์	3 - 5
หินปูน	4 – 8
หินดินดาน	5 – 15
หินแกรนิต	4 – 5

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความถี่ของคลื่น GPR [11]

ความถี่ (MHz)	ความลึกโดยประมาณ (เมตร)
1500	0.5
900	1
400	2.5
200	9
70	20
40	มากกว่า 20

ในการตรวจสอบวัตถุใต้ผิวดินจำเป็นต้องคำนึงถึงความละเอียดของข้อมูล GPR ที่ได้ด้วย ซึ่งความละเอียดของข้อมูลจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะได้แก่ ความละเอียดในแนวดิ่งและความละเอียดในแนวราบ โดยที่ความละเอียดทั้ง 2 แบบนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ (ความยาวคลื่น) ของคลื่นเรดาร์ที่ใช้ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ ความละเอียดในแนวดิ่งหมายถึงความสามารถของคลื่นเรดาร์

ในการแยกสิ่งสองสิ่งออกจากกันในแนวดิ่ง ความละเอียดในแนวดิ่งสามารถประมาณได้เท่ากับความยาวคลื่นหารด้วยสี่ ($\lambda/4$) ซึ่งคลื่นความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นมากและความแม่นยำในแนวดิ่งมีค่าน้อยกว่าคลื่นที่มีความถี่สูงซึ่งมีความยาวคลื่นสั้น ส่วนความแม่นยำในแนวราบจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการส่งสัญญาณของสายอากาศและระยะห่างของเส้นข้อมูล ถ้าหากสายอากาศส่งสัญญาณออกมาเป็นกรวยแคบๆ เราจะเห็นวัตถุมีลักษณะเป็นจุด แต่ถ้าหากสายอากาศส่งสัญญาณออกมาเป็นกรวยขนาดใหญ่เราจะเห็นวัตถุเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบลา หากวัตถุ 2 ชนิดวางอยู่ใกล้กัน การที่จะสามารถมองเห็นวัตถุทั้ง 2 แยกออกจากกันชัดเจนจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเรดาร์ที่ใช้ ความละเอียดในแนวราบยังลดลงตามความลึกด้วย ความละเอียดของข้อมูลในแนวดิ่งและราบสำหรับสายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz สรุปไว้ในตารางที่ 3 สำหรับวัตถุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 9

ตารางที่ 3 ความละเอียดของข้อมูลในแนวดิ่งและราบสำหรับสายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz สำหรับวัตถุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 9 [12]

ความถี่ (MHz)	ความละเอียดในแนวดิ่ง (cm)	ความละเอียดในแนวราบ (cm) ที่ระดับความลึกประมาณ 50 cm
900	10	5
400	20	30

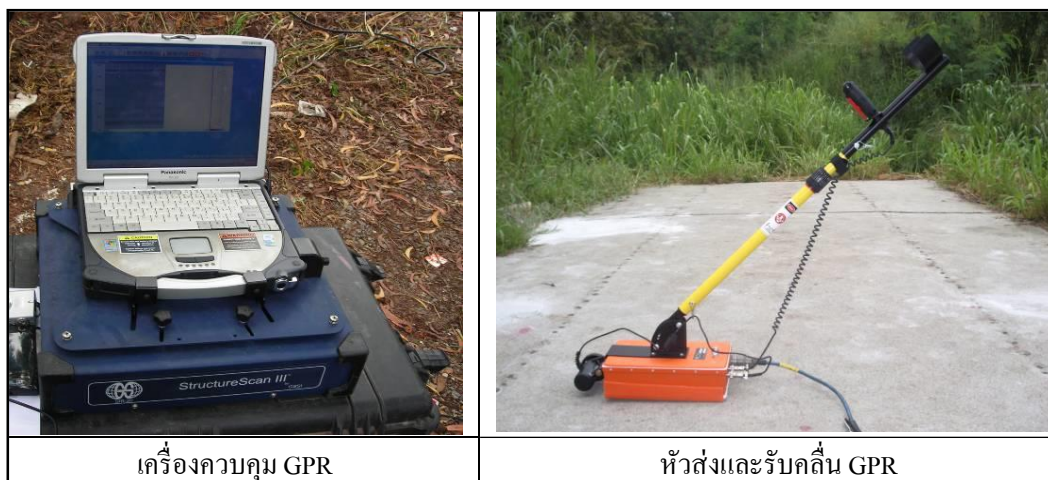
2.1 เครื่องมือสำรวจ GPR และส่วนประกอบ

เครื่องมือสำรวจ GPR โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ (รูปที่ 2) ได้แก่เครื่องควบคุม (Control unit) และชุดส่ง-รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสายอากาศ (Antenna) โดยเครื่องควบคุมนั้นจะเป็นส่วนที่ใช้ในการออกแบบตัวแปรต่างๆ ในการสำรวจ เช่นความถี่ในการส่งคลื่นเรดาร์ ช่วงเวลาในการเปิดรับคลื่นที่สะท้อนขึ้นมา รวมถึงจำนวนเส้นคลื่นเรดาร์ต่อหน่วยความยาวเป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องที่ใช้แสดงข้อมูลการสำรวจได้ทันทีในสนาม ส่วนตัวรับ-ส่งคลื่นเรดาร์จะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีขนาดต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่ โดยทั่วไปกล่องความถี่ต่ำจะมีขนาดใหญ่ ส่วนกล่องความถี่สูงจะมีขนาดเล็ก เครื่องควบคุมและกล่องรับ-ส่งสัญญาณจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายเคเบิล ในการสำรวจบางครั้งอาจจะมีการใช้สวิตช์ระยะทางในการวัดระยะทางในการสำรวจและสวิตช์ระยะทางก็จะถูกใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องส่งคลื่นเรดาร์ด้วย บางกรณีก็มีการนำเครื่อง GPR ไปติดตั้งบนรถเข็นหรือติดตั้งบนรถยนต์เพื่อความสะดวกในการสำรวจและเพิ่มความเร็วในการเก็บข้อมูลในปริมาณมากๆ โดยเฉพาะในการสำรวจถนนหรือการสำรวจท่อสาธารณูปโภคเป็นต้น

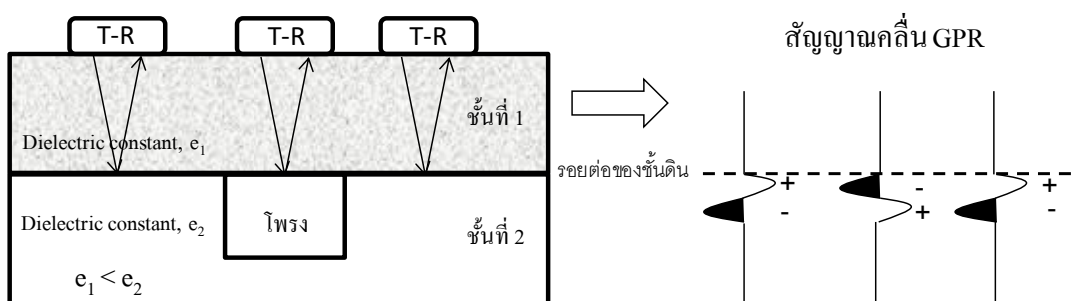
2.2 ลักษณะสัญญาณ GPR จากโพรง

ในการสำรวจโพรงใต้ดินนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจลักษณะของสัญญาณ GPR ที่เกิดจากโพรงว่ามีลักษณะอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณจากบริเวณที่ไม่มีโพรง ความเข้าใจนี้จะทำให้เราสามารถแยกแยะสัญญาณของโพรงออกจากสัญญาณอย่างอื่นได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของสัญญาณ GPR ของบริเวณที่พบโพรงกับบริเวณที่ไม่พบโพรง ในกรณีนี้กำหนดให้ค่า Dielectric Constant ของชั้นที่ 1 มีค่าน้อยกว่าชั้นที่ 2 โดยปกติแล้วสัญญาณ GPR จากบริเวณที่ไม่มีโพรงจะมีค่าการสะท้อนเป็นบวกในกรณีที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของชั้นที่ 1 มีค่าน้อยกว่าชั้นที่ 2 แต่ในบริเวณที่พบโพรงค่าการสะท้อนจะมีค่าเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากในบริเวณที่เป็นโพรงอากาศค่าคงที่ไดอิเล็กทริก จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าวัตถุข้างเคียง (ซึ่งโดยทั่วไปก็จะมีค่า

มากกว่า 1) ซึ่งหากเรากำหนดให้สีขาวเป็นบวกและสีดำเป็นลบ เราจะเห็นว่าบริเวณที่พบโพรงสัญญาณ GPR ก็จะเริ่มต้นด้วยสีดำก่อนแล้วตามด้วยสีขาว ในทางตรงกันข้ามในบริเวณที่ไม่พบโพรงสัญญาณ GPR ก็จะเริ่มด้วยสีขาวก่อนแล้วตามด้วยสีดำ แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่กล่าวถึงนี้กำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของชั้นที่ 1 มีค่าน้อยกว่าชั้นที่ 2 ถ้าหากว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุแต่ละชั้นแตกต่างกันไปจากนี้สัญญาณ GPR ก็จะแตกต่างออกไปด้วย



รูปที่ 2 ชุดเครื่องมือการสำรวจด้วยคลื่นเรดาร์ ในภาพเป็นเครื่อง GPR รุ่น SIR20 และสายอากาศความถี่ 900 MHz แบบแนบติดพื้นดินวางบนถนนจำลองที่ใช้ในการศึกษา



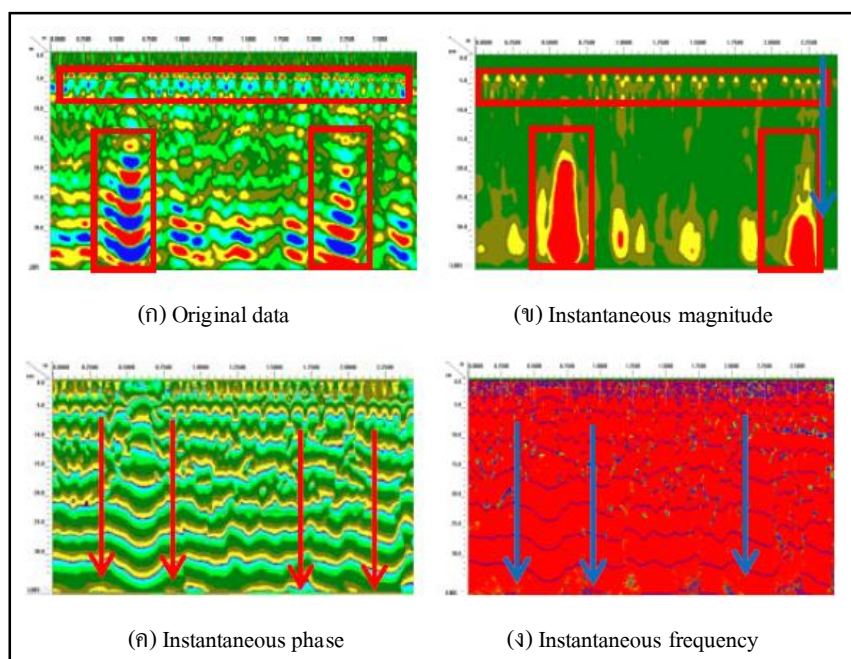
รูปที่ 3 ตัวอย่างของสัญญาณ GPR ของบริเวณที่พบโพรงกับบริเวณที่ไม่พบโพรง [11]

2.3 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

การแปลงฮิลเบิร์ต คือการแปลงข้อมูล GPR ในโดเมนเวลาไปเป็นข้อมูลคุณลักษณะขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous attributes) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 3 แบบได้แก่แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) และความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้นและเห็นรายละเอียดของวัตถุใต้ดินที่สนใจได้ดีขึ้น ปกติวิธี GPR นิยมนำข้อมูลแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับ (Reflector amplitude)

และลักษณะของสัญญาณ (Signal geometry) มาใช้ในการแปลผลและข้อมูลที่ได้เหล่านี้จะนำมาแสดงในรูปของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับโดเมนเวลา (Time domain radar data) แต่เมื่อนำข้อมูลมาแสดงในรูปเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) พบว่าข้อมูลมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุใต้ดินมากกว่า ในขณะที่ข้อมูลแอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) จะแสดงพลังงานสะท้อนที่แตกต่างกันจากวัตถุหรือรอยต่อชั้นวัสดุซึ่งเดิมสัญญาณที่ได้จากคลื่นเรดาร์เองไม่สามารถแสดงได้ชัดเจน ในขณะที่ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) สามารถระบุได้ว่าแต่ละพื้นผิวมีการดูดกลืนสัญญาณมากน้อยเพียงใด

[13] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้การแปลงฮิลเบิร์ตกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโพรงใต้ถนน งานวิจัยดังกล่าวดำเนินการเก็บข้อมูลด้วยสัญญาณเรดาร์ความถี่ 100 MHz เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับในโดเมนเวลากับการแปลงฮิลเบิร์ต (รูปที่ 4) พบว่าการแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงข้อมูลแอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่งให้ผลลัพธ์ชัดเจนและถูกต้องมากกว่า ขณะที่เฟสขณะใดขณะหนึ่งและความถี่ขณะใดขณะหนึ่งแสดงรอยต่อของวัสดุต่างชนิดกันและรูปร่างของวัตถุได้ถูกต้องมากขึ้น แต่เนื่องจากเฟสขณะใดขณะหนึ่งและความถี่ขณะใดขณะหนึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปได้ง่าย ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์บางส่วนจึงมีความคลาดเคลื่อนได้

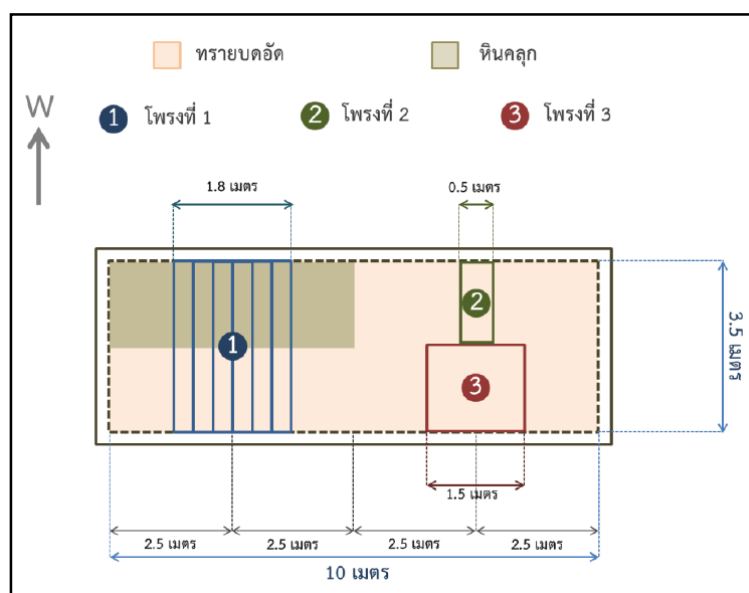


รูปที่ 4 ภาพข้อมูลสะท้อนกลับในโดเมนเวลาและข้อมูลจากการแปลงฮิลเบิร์ต [13]

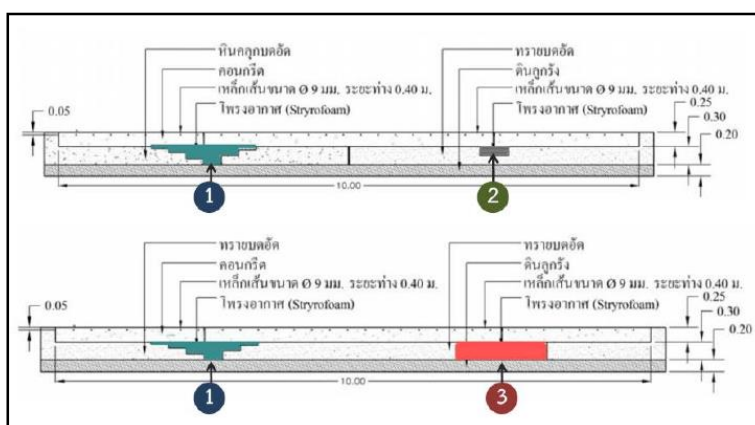
3. วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการเก็บข้อมูล GPR บริเวณแบบจำลองถนนคอนกรีต [14] ที่ได้สร้างโพรงจากแผ่นโฟมหลายรูปแบบเอาไว้ด้านใต้แผ่นคอนกรีตบริเวณพื้นที่ภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อำเภอกลองหลวง จังหวัดปทุมธานี แบบจำลองถนนคอนกรีตนี้ได้ดำเนินการสร้างเลียนแบบถนนจริงมีขนาดกว้าง 3.5 เมตร ยาว 10 เมตร ภายในประกอบด้วย

แบบจำลองโครงทั้งหมด 3 แบบ สร้างจากโฟมเนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับอากาศ เพื่อจำลองเสมือนเป็นโครงอากาศจริง ข้อมูลขนาดของแบบจำลองถนนคอนกรีตและแบบจำลองโครงแสดงในรูปที่ 5 และ 6 นอกนั้นยังได้มีการใช้วัสดุพื้นที่ที่ต่างกันด้วย โดยที่พื้นที่บางส่วนจะใช้เป็นหินคลุกและส่วนที่เหลือเป็นทรายบดอัด ซึ่งเป็นการตรวจสอบสัญญาณสะท้อนจากรอยต่อที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปหินคลุกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าทรายบดอัด ทำให้การสะท้อนของสัญญาณ GPR มีค่ามากกว่าและมองเห็นได้ชัดเจนกว่า ส่วนทรายบดอัดจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตทำให้การสะท้อนมีค่าน้อยและมักจะมองเห็นไม่ชัดเจน

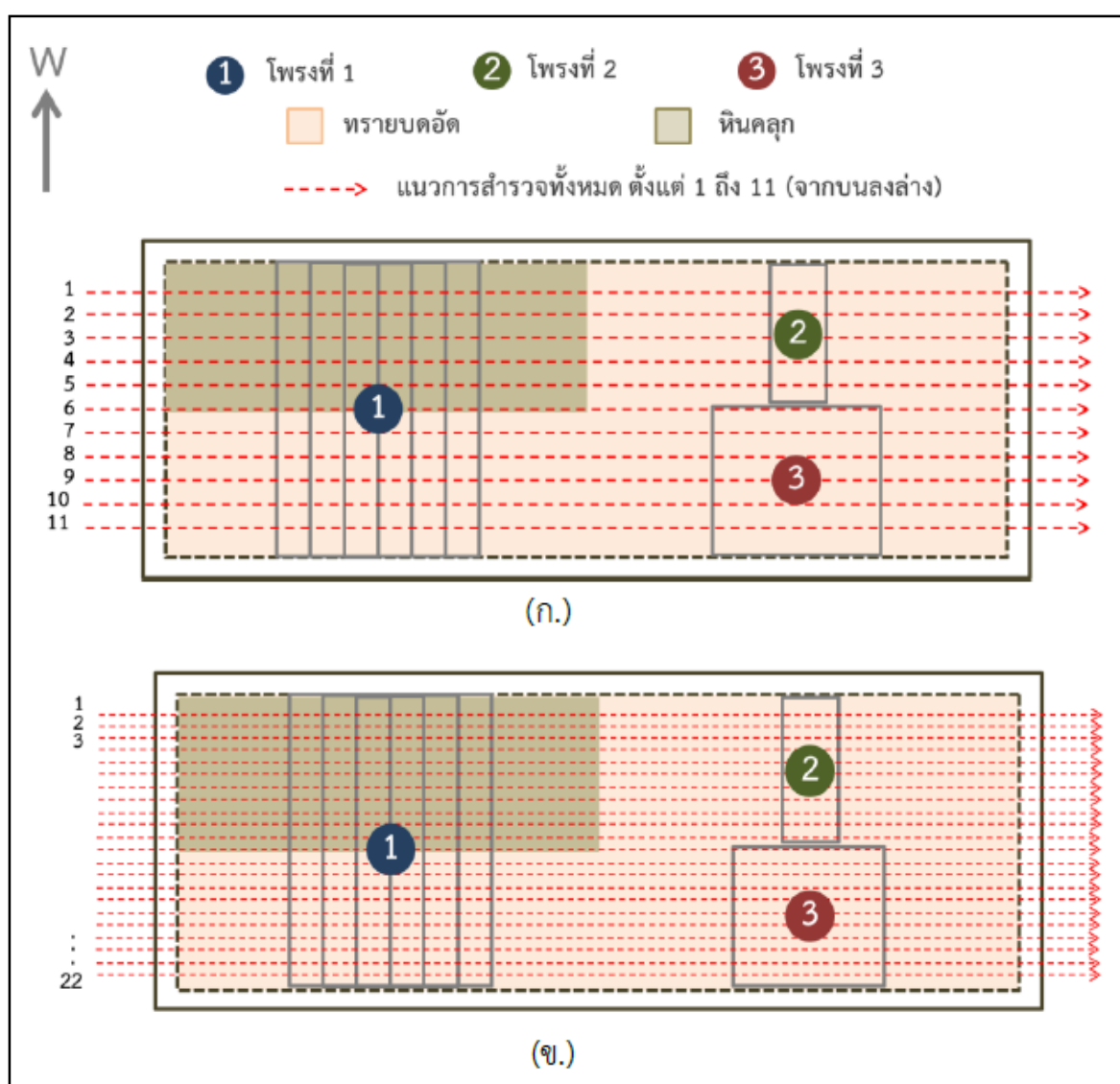


รูปที่ 5 ภาพร่างของแบบจำลองถนนคอนกรีต แสดงขนาด ตำแหน่งของโครง และชนิดของวัสดุพื้นทาง



รูปที่ 6 ภาพตัดขวางของแบบจำลองถนนคอนกรีต

การก่อสร้างแบบจำลองถนนคอนกรีตจากงานวิจัยของ [14] กล่าวว่าในขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลองถนนคอนกรีตได้มีการติดตั้งแบบจำลองโครง 3 แบบภายใต้ผิวทางคอนกรีต ซึ่งทำจากโฟม แต่ละชั้นมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน จากข้อมูลดังกล่าวทางผู้วิจัยได้นำมาประกอบการวางแผนการสำรวจ โดยกำหนดให้มีความถี่ของสายอากาศและจำนวนแนวการสำรวจที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบความคมชัดของภาพแบบจำลองโครงจากแต่ละวิธีการ เลือกใช้สายอากาศที่มีความถี่ 400 และ 900 MHz โดยสายอากาศความถี่ 400 MHz มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 30 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจ (Line) ทั้งหมด 11 แนว ขณะที่สายอากาศความถี่ 900 MHz มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 15 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 22 แนว (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 แนวการสำรวจบนแบบจำลองถนนคอนกรีต (ก.) แนวการสำรวจ 11 แนวของสายอากาศความถี่ 400 MHz (ข.) แนวการสำรวจ 22 แนวของสายอากาศความถี่ 900 MHz

3.1 การเก็บข้อมูล GPR

ก่อนการสำรวจจะต้องเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการใช้งาน รวมถึงโปรแกรมในการเก็บข้อมูล ทำการสำรวจด้วยเครื่องมือสำรวจหยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20 การศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม SIR-20 จากนั้นเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยสายเคเบิล ปรับแก้ระยะ (Calibration) ของลวดระยะทาง ตั้งค่าตัวแปรในการเก็บข้อมูลและทำการเก็บข้อมูล ลากสายอากาศจากทิศใต้ไปทิศเหนือตามแนวการสำรวจ โดยสายอากาศความถี่ 400 MHz มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจเท่ากับ 30 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 11 แนว ดังรูปที่ 8 ขณะที่สายอากาศความถี่ 900 MHz มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจเท่ากับ 15 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 22 แนว



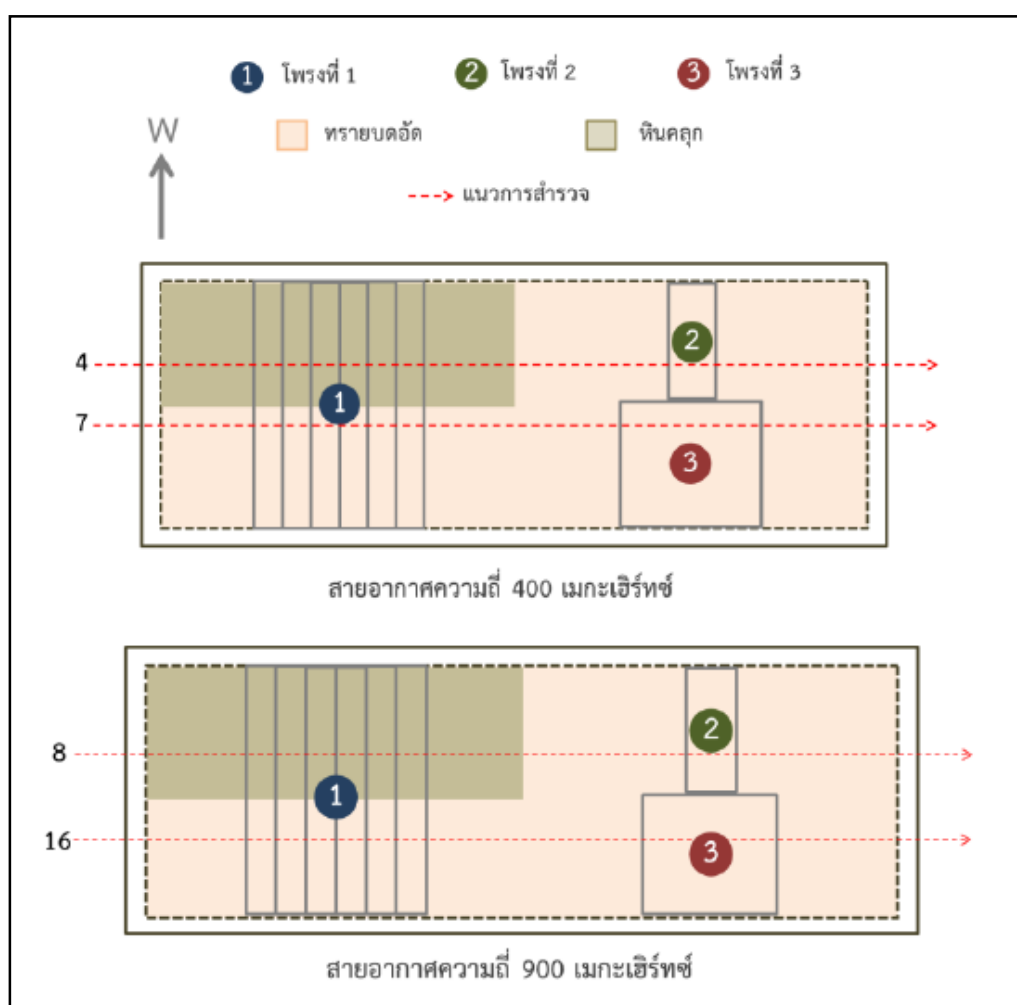
รูปที่ 8 แนวการสำรวจและทิศทางการลากของสายอากาศความถี่ 400 MHz

3.3 การประมวลผลข้อมูล

ภายหลังจากการออกภาคสนามและเก็บข้อมูล ข้อมูลที่ได้คือภาพข้อมูลแบบ 2 มิติจากการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ เนื่องจากข้อมูลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งอาจสังเกตเห็น โครงสร้างหรือวัตถุ ต่างๆ ไม่ชัดเจน ดังนั้นการปรับสีข้อมูลด้วยตารางสี (Color table) ก่อนนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและแปลผลด้วยโปรแกรม RADAN 6.6 อาจทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างข้อมูลก่อนและหลังการประมวลผลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ข้อมูล GPR ทั้งหมดนำมาประมวลผลด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น การปรับตำแหน่งของข้อมูล (Correction position) การกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background removal) การกำจัดปลายหางของไฮเปอร์โบลาที่เกิดจากเหล็กเสริม (Migration) และการขยายสัญญาณ (Gain) หลังจากนั้น ได้ทำการแปลงข้อมูลแบบการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลในโดเมนเวลา

4. ผลการศึกษา

จากข้อมูล GPR ที่เก็บด้วยสายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz จากแนวการสำรวจที่อยู่บริเวณเดียวกันมาเปรียบเทียบ ในที่นี้ ข้อมูลแบบ 2 มิติของสายอากาศความถี่ 400 MHz เลือกจากแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 มาเป็นตัวแทนของข้อมูลในเปรียบเทียบความแตกต่าง ส่วนสายอากาศความถี่ 900 MHz เลือกแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 (รูปที่ 9) มาเป็นตัวแทนของข้อมูลในเปรียบเทียบ เนื่องจากเห็นรูปทรงและตำแหน่งของโพรงชัดเจนเป็นแนวการสำรวจที่ลากผ่านบริเวณกึ่งกลางโพรง ซึ่งการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละขั้นตอนการประมวลผลจะพิจารณาจากการเห็นตำแหน่งของโพรงที่ชัดเจนและรายละเอียดของรูปทรงโพรงเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ นอกจากนั้นยังได้ทำการแสดงการทดสอบเป็นแบบ 3 มิติด้วย เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการแยกแยะโพรงของทั้งสองความถี่ ซึ่งผลการเปรียบเทียบมีดังนี้



รูปที่ 9 ตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 ของสายอากาศความถี่ 400 MHz และตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 ของสายอากาศความถี่ 900 MHz บนแบบจำลองถนนคอนกรีต

4.1 การเปรียบเทียบข้อมูลแบบ 2 มิติ

รูปที่ 10 แสดงข้อมูลแบบ 2 มิติจากทั้งสองความถี่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ได้จากสายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz พบว่าภาพจากสายอากาศความถี่ 400 MHz จะเห็นขอบเขตของโพรงได้ไม่ชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นได้ยาก แต่ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 MHz สามารถเห็นขอบเขตของโพรงได้ชัดเจนกว่าและให้ความละเอียดที่มากกว่า จึงเห็นรูปทรงของโพรงชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณความถี่ 900 MHz มีความถี่สูง จึงมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ถ้าขนาดความยาวคลื่นมีขนาดเล็กกว่าขนาดโพรง การสะท้อนกลับคลื่นจะให้ผลลัพธ์ที่ดี เมื่อพิจารณาโพรงที่ 1 ดังรูปที่ 10 (ข.) ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 MHz เห็นลักษณะของโพรงรูปทรงขั้นบันไดชัดเจนกว่า

แต่เมื่อเปรียบเทียบด้านความลึกในการสำรวจพบว่าภาพจากสายอากาศความถี่ 400 MHz (รูปที่ 10(ก)) ให้ความลึกในการสำรวจมากกว่าข้อมูลความถี่ 900 MHz ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูง ทำให้เกิดการลดทอนพลังงานสูงเมื่อเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างตามไปด้วยเช่นกัน ส่งผลให้สัญญาณไม่สามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ไกลเท่ากับสัญญาณที่มีความถี่ต่ำเช่น 400 MHz

ความชัดเจนของโพรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับขึ้นมานั่นเอง ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเป็นหลักในที่นี้ได้แก่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความสามารถในการนำไฟฟ้า จากแบบจำลองถนนจะเห็นได้ว่ามีการวัดจุดพื้นทางอยู่ 2 ชนิดได้แก่ทรายบดอัดและหินคลุก ซึ่งโดยทั่วไปทรายบดอัดจะมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าหินคลุกพอสมควร ดังนั้นรอยต่อระหว่างคอนกรีตกับหินคลุกจะมีความชัดเจนกว่ารอยต่อระหว่างคอนกรีตกับทราย ยกเว้นในกรณีที่ทรายมีความชื้นสูงก็จะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกสูงขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นรูปที่ 10(ข) โพรงแบบที่ 1 ที่วางอยู่เหนือชั้นหินคลุกมีการสะท้อนที่ชัดเจน (แนวสำรวจที่ 8) เมื่อเทียบกับแนวสำรวจที่ 16 ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นหินคลุก ทำให้เกิดความแตกต่างค่อนข้างมาก

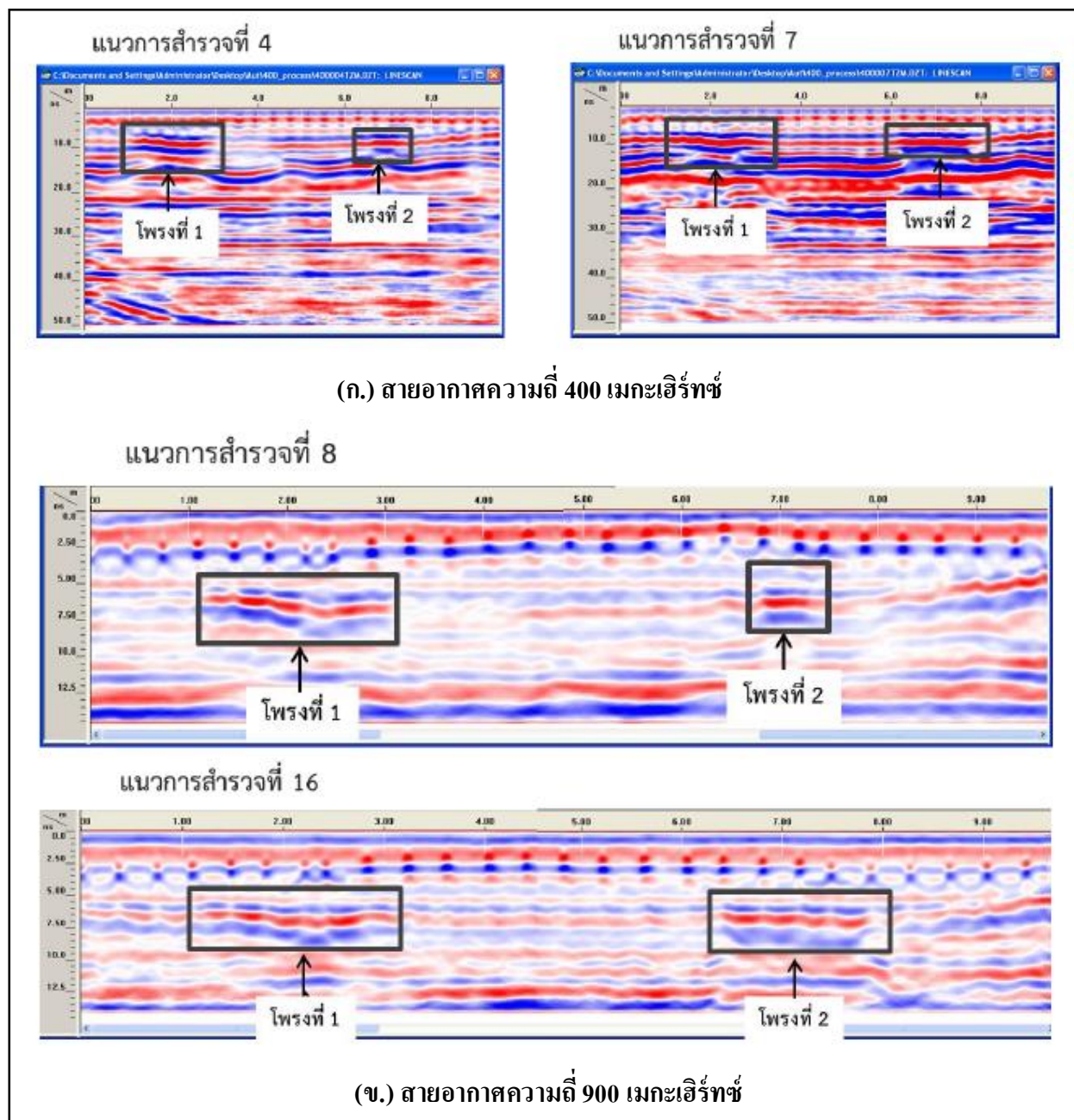
4.2 การเปรียบเทียบข้อมูลแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 11 แสดงข้อมูลภาพตัดในแนวราบที่ระดับความลึก 0.25 เมตรจากพื้นผิว ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างโพรงและแผ่นคอนกรีต ข้อมูลจากสายอากาศทั้งสองความถี่แสดงตำแหน่งและรูปทรงของโพรงได้อย่างชัดเจน แต่ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 MHz จะเห็นรูปทรงของโพรงชัดเจนกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับภาพโพรงไฟล์ 2 มิติในรูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาในรูปที่ 10 พบว่าภาพ 2 มิติจะให้มุมมองด้านความลึก สามารถเห็นภาพตัดขวางของโพรงและความลึกของโพรงจากพื้นผิวได้ชัดเจน ในขณะที่ข้อมูล 3 มิติทำให้เห็นรูปทรงของโพรงเมื่อมองจากมุมมองด้านบน (Top view) ในแต่ละความลึกได้ดี

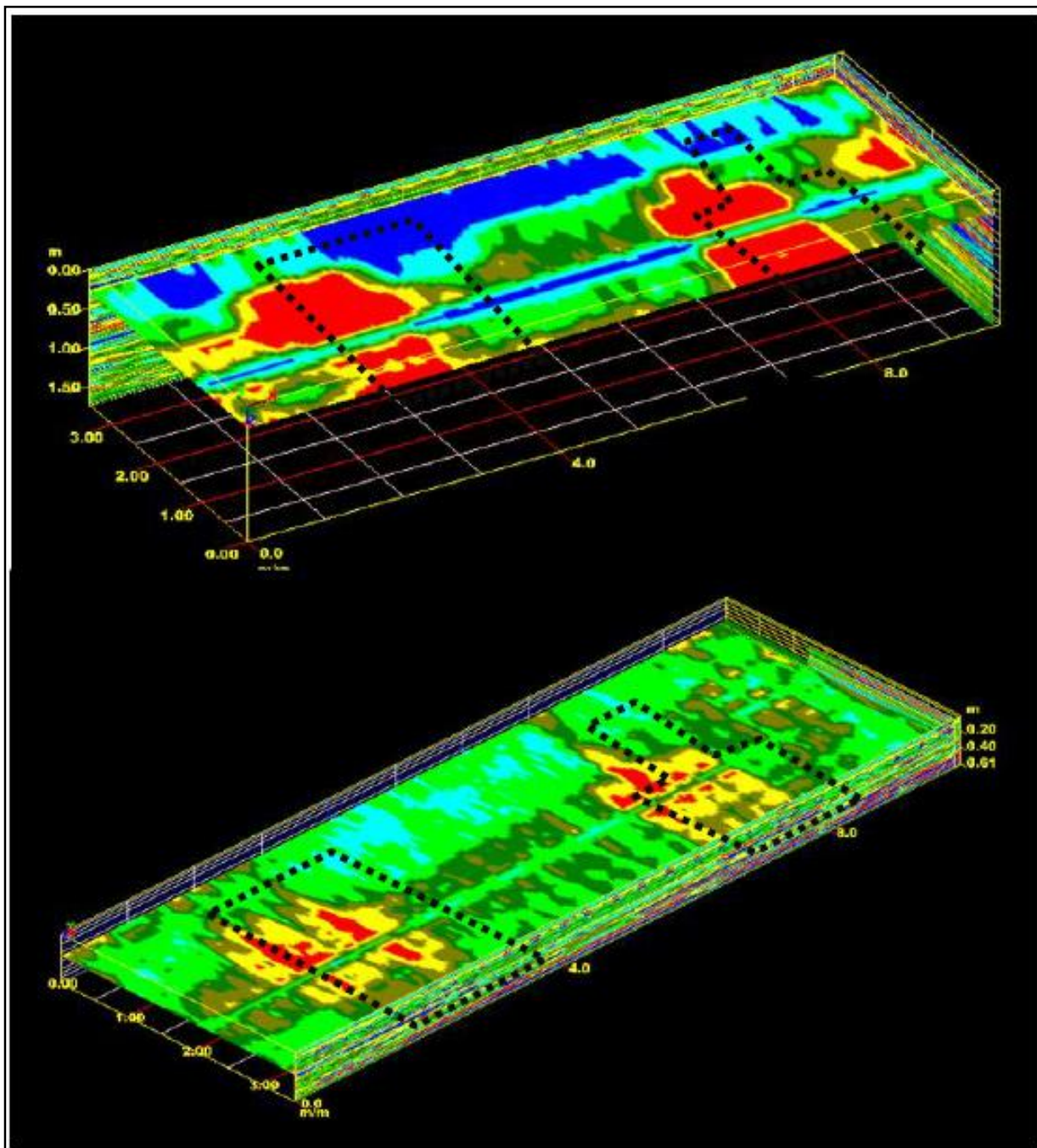
4.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform)

รูปที่ 12 แสดงข้อมูล 3 มิติที่ได้จากการแปลงฮิลเบิร์ต ที่ระดับความลึก 29 เซนติเมตรจากพื้นผิวของข้อมูลทั้ง 2 ความถี่ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูล 3 มิติ ของการแปลงฮิลเบิร์ตแบบต่างๆ พบว่าข้อมูลแมกนิจูดแสดงตำแหน่งของโพรงชัดเจนที่สุดทั้ง 2 ความถี่ (รูป 12(ก,ง)) เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบบจำลองโพรงกับวัตถุอื่น ๆ มีค่อนข้างมาก จึงสังเกตเห็นโพรงได้ง่าย ในที่นี้เจดสีแสดงถึงพลังงานสะท้อนจากแต่ละรอยต่อ สีแดงหมายถึงมีการสะท้อนสูง ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดมีพลังงานสะท้อนแตกต่างกัน ด้านรายละเอียดรูปทรงของโพรงจากแบบจำลอง 3 มิติ พบว่ารูปทรงของโพรงชัดเจนเป็นบางส่วน ในขณะที่บางส่วนของโพรงหายไป จากข้อมูลเฟสของสัญญาณแบบจำลอง 3 มิติ (รูป 12(ข,จ)) มองเห็นโพรงไม่ชัดเจน เห็นขอบโพรงบางส่วน

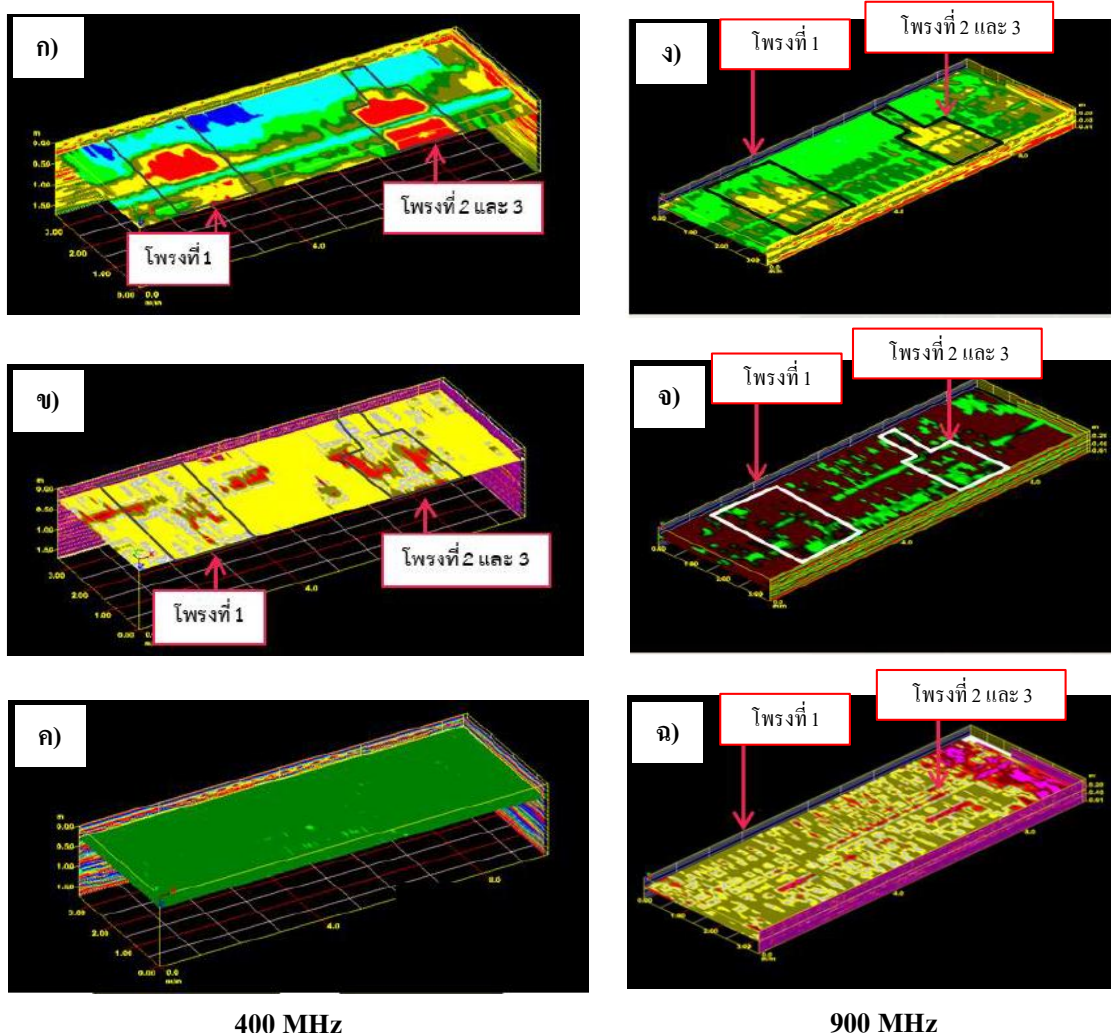
เท่านั้น และจากข้อมูลความถี่พบว่าแบบจำลอง 3 มิติ (รูป 12(ค,ง)) ไม่พบลักษณะของโพรง จากการที่ข้อมูลเฟสและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งมองเห็นโพรงไม่ชัดเจนหรือไม่พบลักษณะของโพรง อาจเนื่องมาจากข้อมูลทั้งสองชนิดมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปได้ง่าย ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์บางส่วนมีความคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 10 เปรียบเทียบภาพโปรไฟล์ 2 มิติที่แสดงใน รูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (ก) สายอากาศความถี่ 400 MHz (ข) สายอากาศความถี่ 900 MHz



รูปที่ 11 เปรียบเทียบข้อมูลแบบ 3 มิติที่แสดงในรูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับในโดเมนเวลาในระดับความลึก 0.25 เมตรจากพื้นผิว รูปบนคือข้อมูลจากความถี่ 400 MHz ส่วนรูปล่างคือข้อมูลความถี่ 900 MHz



รูปที่ 12 เปรียบเทียบภาพข้อมูล 3 มิติที่ได้จากการแปลงฮิลเบิร์ต ของข้อมูลจากสายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว (ก,ง) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) (ข,จ) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) (ค,ฉ) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)

5. สรุปผล

การสำรวจแบบจำลองโรงได้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์โดยใช้สายอากาศความถี่ 400 และ 900 MHz พบว่าสายอากาศความถี่ 900 MHz สามารถตรวจสอบโรงได้ละเอียด ผลลัพธ์ที่ได้เห็นตำแหน่งและรูปร่างของโรงได้ชัดเจน แม้ว่าจะระดับความลึกของการสำรวจจะต่ำ แต่โครงสร้างของถนนคอนกรีตก็มีความลึกจากพื้นผิวไม่มาก การใช้สายอากาศความถี่ 900 MHz จึงเหมาะสมสำหรับการสำรวจถนนคอนกรีตมากกว่า ขั้นตอนประมวลผลเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อการค้นหาโรงได้ผิวทางคอนกรีต เพราะเป็นการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการระบุตำแหน่งและรูปร่างของโรงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพข้อมูล 2 มิติและ 3 มิติพบว่า ภาพข้อมูล 2 มิติจะให้มุมมองความลึกที่ดี จึงเหมาะสำหรับการดูรูปร่างหน้าตัดขวางของโรงและความลึกของโรงจากพื้นผิว ในขณะที่ภาพข้อมูล 3 มิติเหมาะสำหรับการดูรูปร่างโรงเมื่อ

มองจากมุมมองด้านบน เมื่อนำข้อมูลทั้งสองแบบมาแปลผลร่วมกันทำให้สามารถประเมินขนาดและรูปร่างของโพรงได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแมกนีตูดขณะใดขณะหนึ่ง ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งของการแปลงฮิลเบิร์ต พบว่าการแสดงข้อมูลในรูปแมกนีตูดขณะใดขณะหนึ่งจะสามารถแสดงตำแหน่งของโพรงได้ชัดเจนที่สุด หากเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแมกนีตูดขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับในโดเมนเวลา พบว่าข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับในโดเมนเวลาจะเห็นรายละเอียดของรูปทรงโพรงใกล้เคียงกับลักษณะของโพรงจริงมากที่สุด แต่ข้อมูลแมกนีตูดขณะใดขณะหนึ่งสามารถสังเกตเห็นตำแหน่งของโพรงได้ง่ายกว่า ดังนั้นหากต้องการหาตำแหน่งของโพรงควรใช้ข้อมูลแมกนีตูดขณะใดขณะหนึ่งจากการแปลงฮิลเบิร์ต แต่ถ้าต้องการประเมินรูปทรงและขนาดของโพรงก็ควรใช้ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาจึงจะเหมาะสมกว่า

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Associate Professor Dr. Pham Huy Giao จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี เป็นอย่างมากที่ได้ประสานงานและช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล GPR ภายในสถาบัน และขอขอบคุณนิสิตชั้นปีที่ 4 ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยหลายท่านที่มีส่วนสำคัญในการช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Basson, U. *Imaging of active fault zone in the Dead Sea Rift: Evrona Fault Zone as a case study*. Thesis submitted for the degree of Ph.D., Tel-Aviv University, 2000, pp. 196.
- [2] Maierhofer, C. Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15 (3), pp. 287–297.
- [3] Daniels, D.J., Gunton, D.J., and Scott, H.F. Introduction to subsurface radar. In: *IEE Proceedings, communications radar and signal processing*, 1988, 35 (4), pp. 277–392.
- [4] Davis, J.L., Annan, A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37, pp. 531–551
- [5] Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P., Cosway, S.W., Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles. *Geophysics*, 1992, 57, pp. 577–586.
- [6] Neal, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66, pp. 261–330.
- [7] Daniels, D.J., Gunton, D.J., and Scott, H.F., 1988. Introduction to subsurface radar. In: *IEE Proceedings, Communications radar and signal processing*, 1988, 35 (4), pp. 277–392.
- [8] Chen, D.H., Scullion, T. Detecting subsurface voids using Ground-coupled Penetrating Radar. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, 31(3), pp. 217–224.
- [9] Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P., Cosway, S.W. Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles. *Geophysics*, 1992, 57, pp. 577–586.
- [10] Giang, N.V. Possibility of the Ground penetrating radar application for geotechnical and environment investigation in Vietnam, *Journal of Geology*, N. 257, 3-4/2000, pp. 23–32 (Full text in Vietnamese and abstract in English).

- [11] Thanop T. and Napassapong J. Determination of void under pavement using ground penetrating radar (GPR). *Civil Engineering Magazine (In Thai)*, 2012, July – September, pp. 27-33.
- [12] GSSI. *SIR System training note*, Geophysical survey system, Inc, New Hampshire, USA., 2003.
- [13] Longjin Zheng, Zhixin Liu, Guangtao Wang, Zhaoqiao Zhang. Research on application of Hilbert transform in radar signal simulation. In: *7th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics & Summit Forum of Chinese Academy of Engineering on Engineering Science and Technology*, 26 to 29 June 2016, pp. 349-351.
- [14] Giao, P.H. *Final Report, Construction of a Concrete Pavement Model and GPR Survey with Data Interpretation*, funded by Department of Highways of Thailand, 2007.