# Using open-source software to process Ground Penetrating Radar (GPR): A Case Study of Underground Utilities

1, 2 3

*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร*

* - : sarit.sam@ku.th, suchanpong.o@ku.th

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันซอฟต์แวร์ที่นำมาประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วยเรดาร์ทะลุผิวดิน หรือ Ground Penetrating Radar (GPR) มักเป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ผลิตขึ้นเพื่อจำหน่าย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการทดสอบซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open source software) ในการประมวลผลข้อมูล GPR โดยผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ Rstudio และ Reflex2DQuick ในการศึกษาลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องมือสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วย GPR โดยใช้ข้อมูลสำรวจบนถนนสายโรจนะในบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและถนนสาย 7 พัทยา-มาบตาพุด เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ปี พ.ศ. 2565 และพื้นที่บริเวณ The Tagliamento River ประเทศอิตาลี เป็นกรณีศึกษา โดยอ้างอิงจากค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ เพื่อจัดกลุ่มของชั้นข้อมูลเป็น 2 ประเภท ได้แก่บริเวณที่พบวัตถุที่เป็นอโลหะ (Non-Metallic Pipe) และบริเวณที่พบวัตถุที่เป็นโลหะ (Metallic Pipe) เพื่อให้ทราบว่าวัตถุนั้นเป็นวัตถุชนิดใด โดยผลลัพธ์ที่จะได้ออกมานั้นจะอยู่ในรูปแบบของกราฟเส้นโค้งไฮเพอร์โบลาที่สามารถบ่งบอกลักษณะของวัตถุที่ GPR ตรวจพบ เช่น ท่อคอนกรีต ท่อโลหะ หรือกำแพงโบราณที่ถูกฝังอยู่ใต้พื้นดิน เป็นต้น โดยซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open source software) ที่นำมาใช้งานนั้นสามารถปรับแต่งคลื่นสัญญาณและยังสามารถขจัดคลื่นรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณ ทำให้ผู้สำรวจสามารถระบุชนิดของสาธารณูปโภคใต้ผิวทางได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

คำสำคัญ: การสำรวจด้วยเรดาร์ทะลุผิวดิน , ค่าการนำไฟฟ้า , ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก , Rstudio , Reflex2DQuick

## Abstract

Currently, the software used to process data obtained from underground geological surveys with Ground Penetrating Radar (GPR) is often commercial software produced. This research aimed to test open-source software for GPR data processing. The researcher used Rstudio and Reflex2DQuick. We study the characteristics of signals obtained from underground geological survey tools using GPR survey data on Rojana Road in Ayutthaya Province and Road No. 7 Pattaya - Map Ta Phut, Pattaya City, Chonburi Province, 2022. The signal is based on electrical conductivity, which can conduct electric current, and the dielectric constant, which is the electrical properties. The dielectric constant refers to the polarity of the material at any temperature. The data layer is divided into two categories: the area with non-metallic pipes and the area with metallic pipes to determine the object type. The result is in a hyperbolic curve, indicating the characteristics of objects detected by GPR, such as concrete pipes, embedded underground metal pipes or antique walls. Through open-source software, it can be used to customise the signal wave and eliminate the interference mixed with the signal. It enables the surveyor to recognise that underground utilities can be used accurately without software cost.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR) , Conductivity , Dielectric constant , Rstudio , Reflex2DQuick

## 1.บทนำ

การสำรวจด้วยสัญญาณเรดาร์ (Ground Penetration Radar: GPR) เป็นเทคนิคการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อย่างหนึ่ง GPR มีความสำคัญในการใช้งานสำรวจใต้พื้นดินอย่างละเอียด และ ยังถูกใช้งานในกระบวนการควบคุมคุณภาพในงานวิศวกรรมหรือทางโบราณคดีตัวอย่าง เช่น การค้นหาระบบสาธารณูปโภคที่อยู่ภายใต้ดิน จากงานวิจัยของ Adichar Surinkum, et al. [1] ได้ทำการศึกษาวิธีการใช้ GPR มาประยุกต์ใช้ในการสำรวจไม้กลายเป็นหินที่ฝังตัวอยู่ในธรรมชาติ โดยจากการศึกษาพบว่าลักษณะการประมวลข้อมูลภาพสัญญาณของท่อนไม้กลายเป็นหินที่ตอบสนองให้ลักษณะเป็นเส้นโค้งไฮเปอร์โบลา และความถี่ของสัญญาณเรดาร์จะมีแอมพลิจูดการตอบสนองมากขึ้นเมื่อตรวจพบวัสดุโครงสร้างเป็นท่อนไม้ หรือ ชากกำแพงที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน ซึ่งในอดีตเมื่อมีการเริ่มโครงการหรือการก่อสร้างตึกหรืออาคารต่าง ๆ จะมีการเขียนแผนผังแนวท่อ แต่เมื่อเวลาผ่านไป เมื่อมีการซ่อมแซม การขยายและสร้างถนนใหม่ ทำให้ข้อมูลที่มีอยู่นั้นไม่เป็นปัจจุบัน ส่งผลกระทบทำให้การที่จะขุดหรือซ่อมแซมนั้นเป็นไปได้ยาก GPR จึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการทดสอบซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open source software) ในการประมวลผลข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นมักเป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ผลิตขึ้นเพื่อจำหน่าย ทางผู้วิจัยต้องการให้ผู้ที่มีข้อมูล GPR อยู่แล้วสามารถนำข้อมูลที่มีอยู่ไปประมวลผลปรับแต่งคลื่นสัญญาณซ้ำได้และยังสามารถขจัดคลื่นรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณ ทำให้ผู้สำรวจสามารถระบุชนิดของสาธารณูปโภคใต้ผิวทางได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

## 2.

2.1 ศึกษาการใช้ Open-Source Software Rstudio และ ใช้ Open-Source Software Reflex2Dquick ในการประมวลผลข้อมูล GPR

2.2 เพื่อศึกษาและสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วย GPR

2.3 เพื่อศึกษารูปลักษณะต่างๆของสัญญาณที่เครื่องมือสำรวจ GPR ตรวจพบใต้ผิวดิน

## 3.พื้นที่ศึกษา

*1. พื้นที่บริเวณ ประเทศอิตาลี*



รูปที่ 1 ภาพ Street View Tagliamento River

*2. พื้นที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา*




รูปที่ 2 ภาพแสดงพื้นที่ที่ทำการสำรวจคนหาขอบเขตของกำแพงโบราณ บริเวณใต้สะพาน

*3. พื้นที่บริเวณ เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี*




รูปที่ 3 ภาพแสดงพื้นที่ที่ทำการสำรวจแนวสำรวจริมถนนสาย 7 พัทยา-มาบตาพุด

## 4.แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจด้วยวิธีการทางธรณีฟิสิกส์จะทำการวัดค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุโดยความสำคัญของการสำรวจด้วยวิธีทางธรณีฟิสิกส์นี้อยู่ที่การตรวจวัดความผิดปกติที่เกิดจากความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุหรือพื้นที่เป้าหมายกับสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบๆสำหรับการสำรวจด้วยวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ประกอบไปด้วย [2]

*วิธีการสำรวจด้วยเรดาร์ทะลุพื้นดิน (*

เป็นวิธีสำรวจทางธรณีฟิสิกส์โดยการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (25 ถึง1.500 MHz) ลงสู่ใต้ผิวดินจากตัวส่งสัญญาณเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสัมผัสกับวัตถุใต้ผิวดินที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกันจะเกิดการสะท้อนกลับสู่ผิวดินและรับสัญญาณที่สะท้อนกลับขึ้นมาด้วยตัวรับสัญญาณ ซึ่งการสะท้อนกลับของสัญญาณจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหินที่อยู่ด้านล่าง [3]

*วิธีการสำรวจด้วยค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (*

เป็นการสำรวจวัดค่าความแตกต่างแรงโน้มถ่วงของโลกอันเนื่องมาจากลักษณะและชนิดของหินใต้พื้นโลกหินต่างชนิดกันจะมีความหนาแน่นต่างกันหินที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีลักษณะโค้งขึ้นเป็นรูปประทุนคว่ำค่าของแรงดึงดูดโลกตรงจุดที่อยู่เหนือแกนของประทุนจะมากกว่าบริเวณริมของโครงสร้าง [4]

*วิธีการสำรวจด้วยค่าความเป็นแม่เหล็ก (*

เป็นการวัดสนามแม่เหล็กโลกรวมหรือสนามแม่เหล็กโลกแนวดิ่งหรือสนามแม่เหล็กโลกแนวนอน เพื่อแปลความหมายหาสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินโดยการวิเคราะห์จากความผิดปกติของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้ในพื้นที่การสำรวจ [5]

*. วิธีการสำรวจด้วยไฟฟ้า (*

หรือที่นิยมเรียกกันว่า การสำรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปใต้ผิวดินด้วยตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรง (Direct current, DC) โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์และทางเดินกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของดินหรือหินซึ่งประกอบด้วยแร่องค์ประกอบในเนื้อดิน-หินของเหลวในรูพรุนหรือองค์ประกอบอื่น ๆ [6]

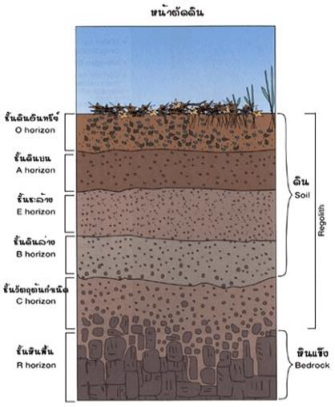
โดยการสำรวจในครั้งนี้จะเป็นการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจด้วยเรดาร์ทะลุพื้นดิน (Ground Penetration Radar , GPR) เพราะการกรณีศึกษาสาธารณูปโภคใต้ผิวทางจำเป็นต้องใช้ GPR ในการสำรวจ GPR วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ที่ใช้ในการสำรวจใต้ผิวโลก ใช้การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟเพื่อตรวจจับและถ่ายภาพลักษณะและโครงสร้างใต้ผิวดิน GPR มีประโยชน์สำหรับการสำรวจใต้ดิน เพราะสามารถเจาะวัสดุได้หลายประเภท รวมถึงดิน หิน น้ำแข็ง และคอนกรีต

*ชั้นดิน*

โดยทั่วไปเมื่อเรายืนอยู่บนพื้นดินนั้น เราจะมองเห็นดินเป็นเพียงแผ่นดินหรือพื้นผิวทีมี 2 มิติ คือ มีความกว้างและความยาวแต่หากว่าเราขุดดินลงไปจนเป็นหลุมขนาดใหญ่จะเห็นว่าดินมีมิติที่ **3** คือมีความลึกหรือความหนาและเมื่อมองตามความลึกลงไปตามแนวดิ่งจะเห็นว่าดินนั้นมีการทับถมกันเป็นชั้น ๆ โดยที่แต่ละชั้นจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสิ่งที่มีอยู่ภายในดินดังแสดงในรูปที่ 4 เช่น สีดิน เนื้อดินชนิดของวัสดุหรือสิ่งที่ปะปนอยู่ในดิน เป็นต้น

ซึ่งประสิทธิภาพของคลื่นสัญญาณ **GPR** สามารถทะลุผ่านชั้นดินได้ตั้งแต่ชั้น **O** หรือเรียกว่าชั้นดินอินทรีย์คือชั้นที่มีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่งที่มาจากพืชและสัตว์ ต่อมาคือชั้น A หรือเรียกว่าชั้นดินบนชั้นดินบนจะประกอบด้วยอินทรียวัตถุที่สลายตัวแล้วผสมคลุกเคล้าอยู่กับแร่ธาตุในดินมักมีสีคล้ำ ต่อมาคือชั้น E หรือเรียกว่าชั้นชะล้างเป็นชั้นดินที่มีสีซีดจาง มีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยกว่ากว่าชั้น A และมักจะมีเนื้อดินหยาบกว่าชั้น **B** ที่อยู่ตอนล่างลงไป

ซึ่งข้อจำกัดของ GPR คือจะไม่สามารถทะลุผ่านชั้น B หรือเรียกว่าชั้นดินล่างเป็นชั้นที่แสดงถึงการเคลื่อนย้ายมาสะสมของวัสดุต่างๆ เช่น อนุภาคดินเหนียว ซึ่งอนินทรียวัตถุหรืออนุภาคดินเหนียว จะมีประจุลบอยู่ที่พื้นผิวทำให้สามารถดูดซับและแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินให้เข้ามาเกาะที่พื้นผิวของตัวเองได้ ซึ่งการที่ดินเหนียวเป็นวัตถุที่มีค่าทางไฟฟ้าสูงทำให้ไปรบกวนคลื่นสัญญาณ GPR ได้ [7]



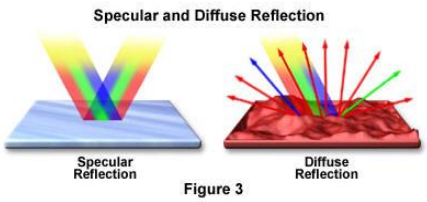

รูปที่ 4 ภาพแสดงชั้นดิน [7]

*เรดาร์*

ระบบเรดาร์มีเครื่องส่งสัญญาณที่ปล่อยคลื่นวิทยุที่เรียกว่าสัญญาณเรดาร์ออกมาในทิศทางที่กำหนดไว้ เมื่อสัญญาณสัมผัสกับวัตถุมักจะสะท้อนกลับหรือกระจายอยู่ในหลาย ๆ ทิศทาง สัญญาณเรดาร์ถูกสะท้อนกลับได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงโดยเฉพาะโลหะสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับไปสู่เครื่องส่งสัญญาณเป็นสิ่งที่ต้องในการทำงานของเรดาร์ [8]

*การสะท้อน ของเรดาร์*

การสะท้อนกลับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเรดาร์ เนื่องจากการตรวจจับเป้าหมายต้องอาศัยคลื่นที่สะท้อนจากเป้าหมายนั้น ๆ กลับเข้ามาในภาครับ (Receiver) เพื่อใช้ในการประมวลผลพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนจากวัตถุที่มีความหนาแน่นต่างจากสื่อกลาง หรือบรรยากาศ ซึ่งจะสามารถประมวลผลมาเป็นตำแหน่ง ระยะห่างและความเร็วได้ การสะท้อนของเรดาร์มี 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 5 คือ การสะท้อนที่สมบูรณ์ (Specular Reflection) กับการสะท้อนที่ไม่สมบูรณ์ (Diffuse หรือ Scattering Reflection)




รูปที่ 5 การสะท้อนของพลังงาน หรือคลื่น [8]

*การสะท้อนที่สมบูรณ์ (*

เป็นการสะท้อนคลื่นที่เกิดเมื่อพลังงานกระทบกับวัตถุที่มีผิวเรียบเหมือนกระจกจะทำให้เกิดมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ซึ่งจะมีปัจจัย 3 ประการคือ

1. มุมตกกระทบของพลังงานที่พุ่งเข้าสู่พื้นผิว
2. วัสดุของผิววัตถุ โดยพื้นผิวที่เป็นโลหะจะสะท้อนได้ดีต่อพลังงานหรือคลื่นในทุกความถี่ แต่สำหรับวัสดุจำพวกคาร์บอน ไฟเบอร์จะสะท้อนพลังงานออกมาน้อยมาก
3. ทิศทางของคลื่น (Polarization) เมื่อมีมุมตกกระทบต่ำ ๆ หากใช้ทิศทางของคลื่นตามแนวนอน (Horizontal Polarization) จะทำให้เกิดการกระท้อนกลับน้อย ทำให้ได้รับสัญญาณที่ต้องการน้อย ในขณะทิศทางของคลื่นจะไม่มีผลกระทบมากนั้นหากใช้บนพื้นดิน ดังนั้นเรดาร์จะใช้คลื่นทิศทางตามแนวตั้ง (Vertical Polarization)

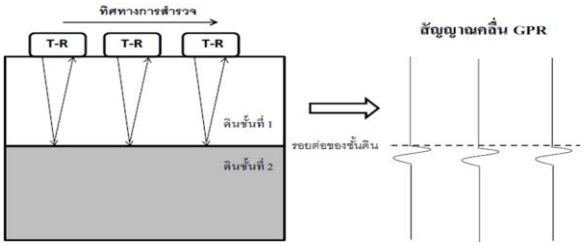
*การสะท้อนที่ไม่สมบูรณ์ ( หรือ* Reflection)

เป็นการสะท้อนที่เกิดจากวัตถุทั่วไปที่มีพื้นผิวไม่เรียบ หรือมีรูปทรงประกอบที่ซับซ้อน เช่น อากาศยาน จะมีรูปแบบของสัญญาณสะท้อนที่ซับซ้อน และกระจัดกระจายไปในหลายทิศทาง โดยการออกแบบจะพยายามไม่ให้คลื่นสัญญาณของเรดาร์สะท้อนไปในทิศทางของอุปกรณ์รับสัญญาณ [9]

*การสำรวจด้วยเรดาร์ทะลุผิวดิน (*

GPR เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดี ซึ่งพื้นฐานของ GPR อยู่ในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยหลักการทำงานจะทำงานโดยการส่งคลื่นสัญญาณจากหัวส่งสัญญาณลงไปใต้ดินอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง แล้วจะทำการรับสัญญาณที่สะท้อนกลับขึ้นมาโดยการสะท้อนของสัญญาณเกิดขึ้นจากการที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือหินที่อยู่ด้านล่าง โดยพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือหินจะมีด้วยกัน 2 พารามิเตอร์ คือ 1. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่มีค่าเปลี่ยนตามสภาพแวดล้อม ค่าไดอิเล็กทริกสูงจะจัดเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่ในมุมของเครื่อง GPR ค่าไดอิเล็กที่ แตกต่างกันในแต่ละชนิดของวัตถุ จะส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนของ

สัญญาณที่ผ่านตัวกลาง แตกต่างกัน 2. ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductivity) จะเปลี่ยนไปตามชนิดของชั้นดินและความชื้น ซึ่งเป็นความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้า ข้อมูลใต้ผิวดินสามารถวิเคราะห์และแปลความหมายได้โดยการวัดเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับรวมถึงค่าความแรงของการสะท้อนของคลื่น (Amplitude) ดังแสดงในรูปที่ 6 [10]




รูปที่ 6 ภาพแสดงสัญญาณคลื่น GPR [10]

*ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (*

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, **ε**) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ โดยในสุญญากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 1 ส่วนอากาศบริเวณผิวโลกมีค่าประมาณ 1.00054 (ไม่มีหน่วย) วัตถุทางธรรมชาติบนผิวโลก เช่น ดิน หิน ไม้ ทราย ที่อยู่ในสภาพแห้งส่วนใหญ่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างประมาณ 3 – 16 ในขณะที่น้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 78.5 ซึ่งสูงกว่าวัตถุธรรมชาติบนผิวโลกในระดับสิบเท่าหรือมากกว่า ปริมาณของน้ำหรือความชื้นในวัตถุจึงมีอิทธิพลอย่างสูงต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุ โดยทั่วไปดินมีค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่าง 30 – 60 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น เนื่องจากวัตถุที่มีความชื้นอยู่มากจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟได้มาก ในทางกลับกันความสามารถในการทะลุเข้าไปในวัตถุของคลื่นไมโครเวฟแปรผกผันตามค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกหรือปริมาณความชื้นของวัตถุแต่ละชนิด ดังนั้นปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับมาของคลื่นไมโครเวฟจึงสัมพันธ์อยู่กับปริมาณของน้ำหรือความชื้นของวัตถุ

*ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับค่าความถี่ของคลื่น*

ในการตรวจสอบวัตถุใต้ผิวดินจำเป็นต้องคำนึงถึงความละเอียดของข้อมูล GPR ที่ได้ด้วยซึ่งความละเอียดของข้อมูลจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะได้แก่ความละเอียดในแนวดิ่งและความละเอียดในแนวราบ โดยที่ความละเอียดทั้ง 2 แบบนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ (ความยาวคลื่น) ของคลื่นเรดาร์ที่ใช้และค่าคงที่ไดอิเล็กทริคของวัสดุความละเอียดในแนวดิ่งหมายถึงความสามารถของคลื่นเรดาร์ในการแยกสิ่งสองสิ่งออกจากกันในแนวดิ่งความละเอียดในแนวดิ่งสามารถประมาณได้เท่ากับความยาวคลื่นหารด้วยสี่ ($\lambda/4$) ซึ่ง คลื่นความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นมากและความแม่นยำในแนวดิ่งมีค่าน้อยยกว่าคลื่นที่มีความถี่สูงซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นระยะในแนวดิ่งจะใช้ความถี่ตามตารางที่ 1 ส่วนความแม่นยำในแนวราบจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการส่งสัญญาณของสายอากาศและระยะห่างของเส้นข้อมูลถ้าหากสายอากาศส่งสัญญาณออกมาเป็นกรวยแคบ เราจะเห็นวัตถุมีลักษณะเป็นจุดแต่ถ้าหากสายอากาศส่งสัญญาณออกมาเป็นกรวยขนาดใหญ่เราจะเห็นวัตถุเป็นเส้นโค้งไฮเปอร์โบล่า(hyperbola) [11]

ตารางที่ 1 ตารางค่าความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับค่าความถี่ของคลื่น GPR [11]

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

*ค่าการนำไฟฟ้า (*

เป็นการวัดสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า เกลือหรือสารเคมีอื่นๆ ที่ละลายในน้ำสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกและลบได้ไอออนอิสระเหล่านี้ในน้ำจะนำไฟฟ้า โดยค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค็มนั่นเพิ่มขึ้น ส่วนสารประกอบอื่น ๆ เช่นน้ำมันการนำไฟฟ้าจะไม่ดีนักเมื่ออยู่ในน้ำเพราะมีความเค็มที่น้อย และ ค่าการนำไฟฟ้านั้นยังได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิได้อีกเช่นกันยิ่งอุณหภูมิสูงก็ยิ่งนำไฟฟ้าได้ดีดั้ง ตารางที่ 2

*ความสำคัญของค่าการนำไฟฟ้า (*

สาเหตุหลักๆที่ค่า Conductivity ของน้ำมีความสำคัญมากเพราะว่าสามารถบอกได้ว่าปริมาณสารเคมีและแร่ธาตุที่อยู่ในน้ำนั้นมีมากน้อยเพียงใด และยังเป็นตัวบ่งบอกความสามรถในการที่เราจะระบุรูปแบบสัญญาณจาก GPR ได้อีกว่า เป็นวัตถุอะไร ชนิดใด [12]

ตารางที่ 2 แสดงตารางแปลงค่านำไฟฟ้า [12]

| mS/cm$^2$ | EC | CF | PPM 500 (TDS) | PPM 700 | mS/cm$^2$ | EC | CF | PPM 500 (TDS) | PPM 700 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 0.1 | 1 | 50 | 70 | 1.9 | 1.9 | 19 | 950 | 1330 |
| 0.2 | 0.2 | 2 | 100 | 140 | 2 | 2 | 20 | 1000 | 1400 |
| 0.3 | 0.3 | 3 | 150 | 210 | 2.1 | 2.1 | 21 | 1050 | 1470 |
| 0.4 | 0.4 | 4 | 200 | 280 | 2.2 | 2.2 | 22 | 1100 | 1540 |
| 0.5 | 0.5 | 5 | 250 | 350 | 2.3 | 2.3 | 23 | 1150 | 1610 |
| 0.6 | 0.6 | 6 | 300 | 420 | 2.4 | 2.4 | 24 | 1200 | 1680 |
| 0.7 | 0.7 | 7 | 350 | 490 | 2.5 | 2.5 | 25 | 1250 | 1750 |
| 0.8 | 0.8 | 8 | 400 | 560 | 2.6 | 2.6 | 26 | 1300 | 1820 |
| 0.9 | 0.9 | 9 | 450 | 630 | 2.7 | 2.7 | 27 | 1350 | 1890 |
| 1 | 1 | 10 | 500 | 700 | 2.8 | 2.8 | 28 | 1400 | 1960 |
| 1.1 | 1.1 | 11 | 550 | 770 | 2.9 | 2.9 | 29 | 1450 | 2030 |
| 1.2 | 1.2 | 12 | 600 | 840 | 3 | 3 | 30 | 1500 | 2100 |
| 1.3 | 1.3 | 13 | 650 | 910 | 3.1 | 3.1 | 31 | 1550 | 2170 |
| 1.4 | 1.4 | 14 | 700 | 980 | 3.2 | 3.2 | 32 | 1600 | 2240 |
| 1.5 | 1.5 | 15 | 750 | 1050 | 3.3 | 3.3 | 33 | 1650 | 2310 |
| 1.6 | 1.6 | 16 | 800 | 1120 | 3.4 | 3.4 | 34 | 1700 | 2380 |
| 1.7 | 1.7 | 17 | 850 | 1190 | 3.5 | 3.5 | 35 | 1750 | 2450 |
| 1.8 | 1.8 | 18 | 900 | 1260 | 3.6 | 3.6 | 36 | 1800 | 2520 |

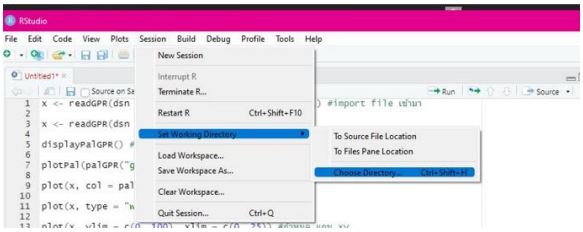
**5.**

ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน ตั้งแต่การเลือกพื้นที่การศึกษา, การดาวน์โหลดข้อมูล GPR data, การประมวลผลข้อมูล GPR data , รวมไปถึงผลลัพธ์การประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลจาก GPR data โดยผลลัพธ์ที่จะได้รับจากการประมวลผลและวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Rstudio และ Reflex2dQuick จะออกมาในรูปแบบของกราฟที่แสดงรูปลักษณะต่างๆของสัญญาณที่เครื่องมือสำรวจ GPR ตรวจพบใต้ผิวดินเพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงงานในครั้งนี้

*การประมวลผลผ่าน*

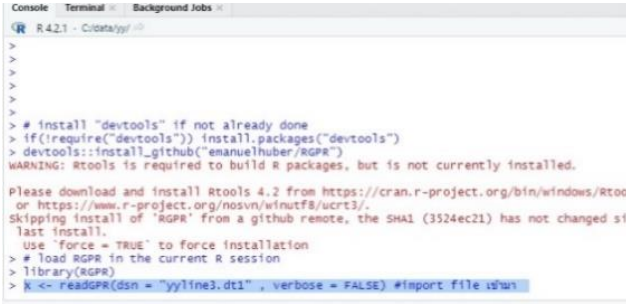
Rstudio เป็นโปรแกรมสำหรับการพัฒนาและวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้งานกับภาษา R ซึ่งมีผู้พัฒนาหลักคือสองนักวิทยาการคอมพิวเตอร์ชื่อ Hadley Wickham และ JJ Allaire Hadley Wickham เป็นนักวิทยาการคอมพิวเตอร์และนักสถิติศาสตร์ที่มีชื่อเสียงในชุมชนของภาษา R โดยได้รับการยกย่องว่าเป็นผู้พัฒนาแพ็กเกจ R ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ในขณะที่ JJ Allaire เป็นผู้ก่อตั้งของบริษัท RStudio ที่เป็นผู้พัฒนา RStudio IDE สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลเกี่ยวกับ ground penetrating radar (GPR) ภายใน RStudio มีแพ็กเกจ GPR ที่ชื่อว่า 'gpr' ที่พัฒนาโดย Miguel Angel Garcia-Ruiz ซึ่งเป็นนักวิจัย GPR ในศูนย์วิจัยและการพัฒนาซอฟต์แวร์ในสเปน (Centre for Research and Development of Software, CRDS) โดยแพ็กเกจ 'gpr' นี้จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถนำเข้าข้อมูล GPR และวิเคราะห์ผลได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น [12]

การประมวลผลข้อมูลทางธรณีวิทยาใต้ดิน เราสามารถเริ่มได้โดยการเชื่อมต่อ Directory ของไฟล์ ที่เราต้องการจะประมวลผลก่อน ไปที่ Session > Set work directory > Choose directory ดังแสดงในรูปที่ 7

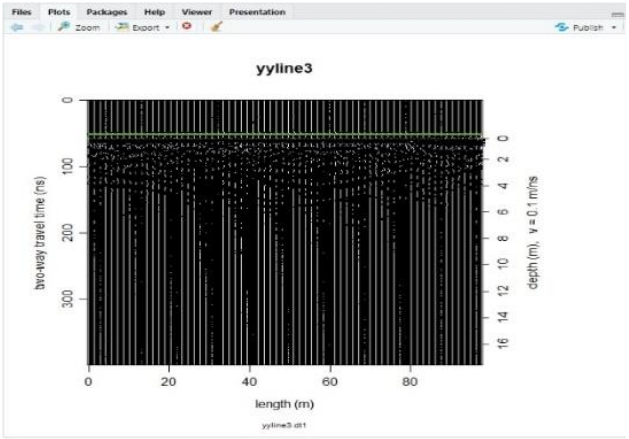



รูปที่ 7 ภาพแสดงการ set directory

หลังจากทำการ Set Directory เสร็จแล้วเราจะสามารถทำการนำเข้าข้อมูลทางธรณีวิทยาใต้ดินโดยใช้ code read GPR ในการนำเข้าข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 8 เข้ามาเพื่อประมวลผล โดยข้อมูลที่นำมาประมวลผลในขั้นตอนนี้เป็นข้อมูลบริเวณพื้นที่ The Tagliamento River ประเทศอิตาลี (รูปที่ 1) และ สามารถเปลี่ยนกราฟต่าง ๆหรือสามารถที่จะ plot เป็นแบบ wiggle ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยหน้าตาของกราฟนั้นจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 13




รูปที่ 8 ภาพแสดงการนำเข้าข้อมูล

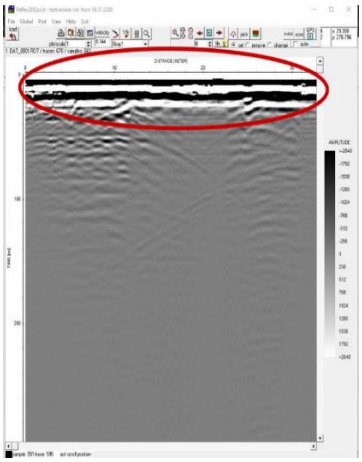



รูปที่ 9 ภาพแสดง plot แบบ wiggle style

*5.2 การประมวลผลผ่าน 2*

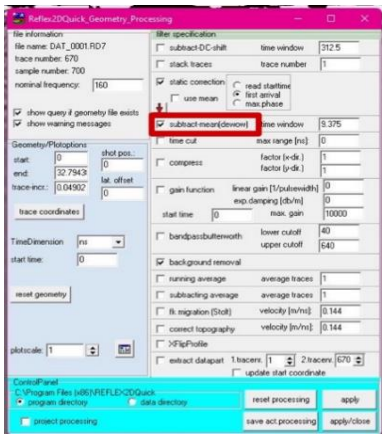
ซอฟต์แวร์ Reflexw เป็นหนึ่งในแพ็คเกจการประมวลผลและการแปลผลธรณีฟิสิกส์ใกล้พื้นผิวที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลกครอบคลุมช่วงข้อมูลคลื่นที่สมบูรณ์ซึ่งถูกพัฒนาโดย Dr.Karl-Josef Sandmeier ซึ่งซอฟต์แวร์ Reflexw สามารถประมวลและตีความคลื่นสัญญาณอื่นได้ เช่น การตีความการสะท้อนแผ่นดินไหว , การตีความการหักเหของคลื่นไหวสะเทือน , การตีความข้อมูลหลุมเจาะ [13]

Reflex 2D-Quick สามารถประมวลผลข้อมูลทางธรณีวิทยาได้ สามารถเริ่มการประมวลผลได้โดยการนำไฟล์จากการสำรวจภาคสนามมาเปิด พื้นที่ศึกษาคือ บริเวณจังหวัดพนะนครศรีอยุธยาและบริเวณจังหวัดชลบุรี โดยเริ่มจากการนำข้อมูลพื้นที่ศึกษาบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาเข้ามา (รูปที่ 2) เมื่อนำเข้ามาแล้วจะเห็นได้ว่าจุดเริ่มต้นของข้อมูลเกิดช่องว่างและไม่ได้เริ่มต้นที่ 0 สามารถแก้ปัญหาได้โดยการ Static Correction ให้ทำการเลือกไปที่ First Arrival จะเห็นว่าสิ่งแรกที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนนั้นก็คือ Direct Arrivals(วงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งเกิดขึ้นมาจาก 1. Direct Air wave คือ สัญญาณแรกที่เครื่องส่งสัญญาณ GPR ส่งผ่านอากาศด้วยความเร็วแสงไปยังเสารับสัญญาณของเครื่อง GPR และ 2. Direct Ground wave คือ พลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวด้วยความเร็วและมาถึงเสาส่งสัญญาณหลังจาก Direct Air wave เพียงเสี้ยววินาที (nano second ) สามารถปิด Direct Arrivals ได้โดยการไปปิดที่ BackGround remove การมีอยู่หรือหายไปไม่ได้มีผลต่อการวิเคราะห์



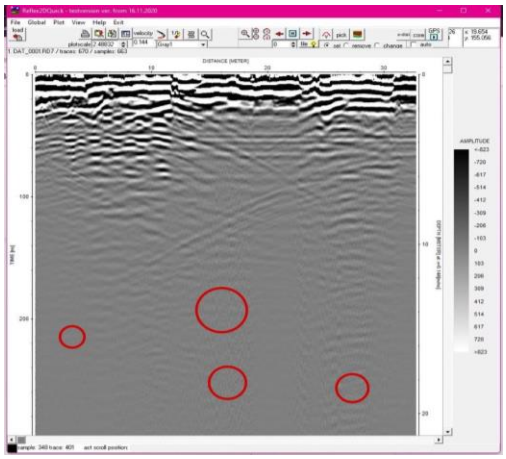
รูปที่ 10 ภาพแสดงบริเวณที่เกิด Direct Arrival

โดยส่วนต่อไปจะ ทำการเปิด Subtract dewow ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นการทำให้ภาพที่ประมวลผลออกมามีความชัดเจนมากขึ้นโดยจะนำพื้นที่เป็นสีดำปรับให้อ่านและวิเคราะห์ภาพง่ายขึ้นและหลังจากนั้นให้ทำการเพิ่มแกนความลึกเพื่อจะได้ทำการอ่านค่าและวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ

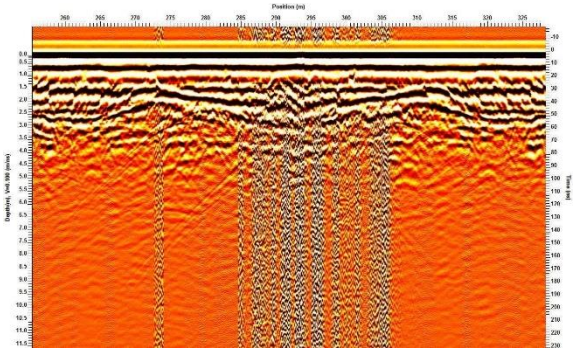


รูปที่ 11 ภาพแสดงการตั้งค่า dewow

สิ่งที่เราจะเห็นได้ชัดเจนคือ RF Noise (Radio Frequency Noise) (วงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งเกิดขึ้นได้กับ GPR data ทุก ๆ ข้อมูลไม่ว่าข้อมูลนั้นจะได้มาอย่างไรต้องมี RF noise เกิดขึ้น เพราะอุปกรณ์ ที่สามารถส่งสัญญาณออกมาเป็นคลื่นวิทยุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น เสาส่งสัญญาณวิทยุ วิทยุสื่อสาร หรือแม้กระทั่งโทรศัพท์มือถือ จะเห็นได้ชัดเลยว่ารูปแบบของตัว RF noise จะมีลักษณะเหมือนโทรทัศน์ไม่มีสัญญาณ และหากใกล้กับแหล่งกำเนิดของคลื่นนั้นมากๆ หน้าตาและรูปร่างอาจมาในรูปแบบของเส้นตรงหนา ๆ ดังแสดงในรูปที่ 13

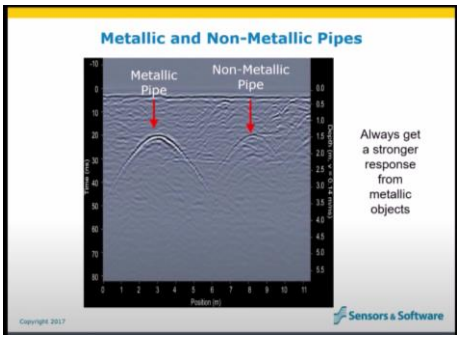


รูปที่ 12 ภาพแสดงตำแหน่งที่เกิด RF noise



รูปที่ 13 ภาพแสดงตำแหน่งการเกิด RF noise ใกล้กับที่สำรวจ GPR ที่มา บริษัท Sensor & Software inc.

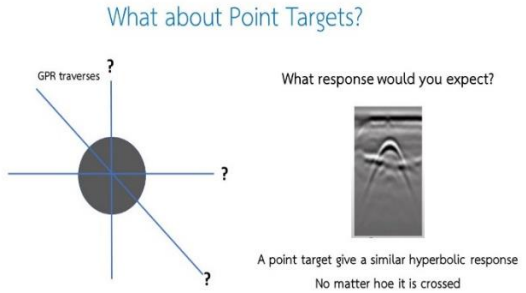
โดย Hyperbola ที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่เครื่อง GPR ส่งสัญญาณ ไปกระทบวัตถุต่างๆและสะท้อนขึ้นมายังเสารับสัญญาณ ซึ่งวัตถุที่คลื่นสัญญาณไปกระทบด้วยนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ โลหะและอโลหะ โดยสามารถแยกโหละออกจากอโลหะได้อย่างง่าย เพราะตัว Hyperbola ของโลหะเองจะมีความคมชัดมากเมื่อเทียบกับอโลหะดังแสดงในรูปที่ 14



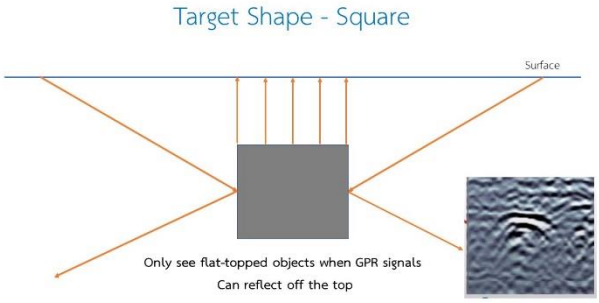

รูปที่ 14 ภาพแสดงวิธีสังเกต hyperbola ของโลหะและอโลหะ ที่มา บริษัท Sensor & Software inc.

รูปร่างของ Hyperbola เองนั้นก็สามารถที่จะบ่งบอกว่าวัตถุนั้นๆที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน มีรูปร่างหรือรูปทรงอะไรได้อีก เช่น แบบ Point (เป็นจุดวงกลม) เช่น ลูกปืนใหญ่ เนื่องจากรูปแบบนี้ไม่มีเหลี่ยมจึงทำการสะท้อนเป็นไปได้ง่ายจึงทำให้เกิดรูปทรง Hyperbola ที่สวย ดังแสดงในรูปที่ 15 แบบ Round (ทรงกลม) เช่น ท่อ เป็นต้น Hyperbola ของรูปแบบ Round จะมีความคล้ายคลึงกับ Point แต่ความยาวจะยาวกว่าและระยะห่างระหว่างหางกับหัวของรูป Round จะสามารถบ่งบอกระยะที่สัญญาณจับได้ดังแสดงในรูปที่ 17 และแบบ

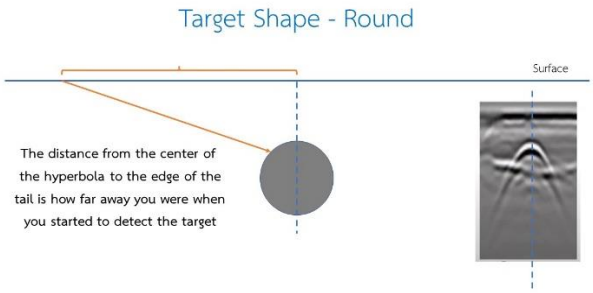
สุดท้ายคือแบบ Square (ทรงสี่เหลี่ยม) ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยสามารถบ่งได้ว่าเป็นวัตถุที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมเช่น Duct bank หรือกำแพงที่ถูกฝังไว้ รูปแบบนี้รูปทรง Hyperbola เองจะมีความแตกต่างจาก 2 แบบด้านบนเพราะจะมีความแบนและสั้นกว่า เนื่องจากสามารถสะท้อนกลับได้เพียงผิวด้านบน




รูปที่ 15 ภาพแสดงวัตถุรูปทรงกรมเล็กๆ
ที่มา บริษัท Sensor & Software inc.

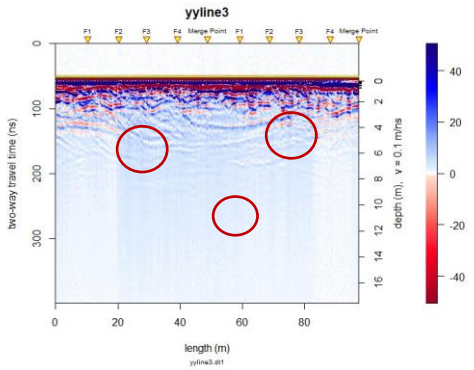



รูปที่ 16 ภาพแสดงวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม
ที่มา บริษัท Sensor & Software inc.




รูปที่ 17 ภาพแสดงวัตถุรูปทรงกลม
ที่มา บริษัท Sensor & Software inc.

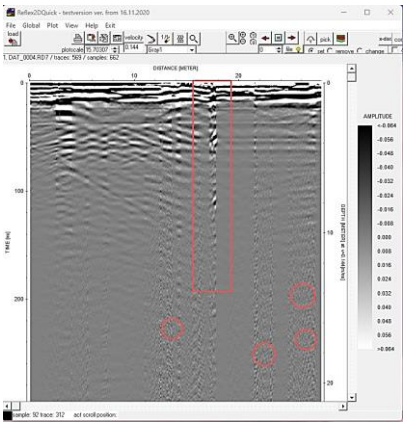
ในแนวการสำรวจพื้นที่บริเวณ The Tagliamento River ประเทศอิตาลี (รูปที่ 1) จากการประมวลผลและวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Rstudio พบว่าจะเห็นเพียง RF Noise (วงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 18 ที่เกิดขึ้นเป็นเพราะตัวโปรแกรม Rstudio ต้องมีความชำนาญด้านการเขียนโปรแกรมทำให้ไม่สามารถที่จะปรับคลื่นสัญญาณเพื่อทำให้เห็นวัตถุใต้ผิวดินและวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ




รูปที่ 18 ภาพแสดงการประมวลผลและวิเคราะห์พื้นที่บริเวณ The Tagliamento River ประเทศอิตาลี

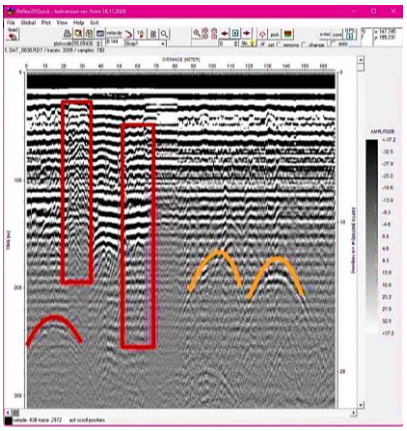
ในแนวการสำรวจที่ 0004 พื้นที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (รูปที่ 2) หลังจากที่นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Reflex2D Quick แล้วจะเห็นว่ามี สิ่งที่ปรากฏขึ้นมาอย่างชัดเจน คือ RF noise ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยเกิดขึ้นที่ความลึกประมาณ 10 เมตร

(วงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 19 และอีกสิ่งหนึ่งที่ปรากฏขึ้นมาแล้วเห็นได้ชัดเจนเลยคือบริเวณที่เกิด Ringy (สี่เหลี่ยมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 19 Ringy เกิดขึ้นจากการเดินสำรวจด้วยเครื่อง GPR แล้วเข็นผ่านมีวัตถุที่เป็นเหล็ก โดยมีขนาดเล็กถึงปานกลางเช่น ฝาน้ำอัดลม ลวดทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กรวมถึง ฝาของท่อระบายน้ำ หรือเข็นผ่านแอ่งน้ำเล็กๆ พอเครื่อง GPR ส่งคลื่นออกไปกระทบกับวัตถุข้างต้นทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปมาซ้ำๆและจากการวิเคราะห์ข้อมูลชุดนี้คาดการณ์ว่ากำแพงที่ถูกฝังอยู่น่าจะอยู่ในบริเวณเดียวกันกับที่เกิด Ringy (สี่เหลี่ยมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ภาพแสดงการวิเคราะห์บริเวณจังหวัดพนะนครศรีอยุธยา

ตัวอย่างแนวการสำรวจที่ Line 0030 บริเวณเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี (รูปที่ 3) จากการสำรวจด้วยเครื่องมือ GPR ที่ความถี่คลื่นเท่ากับ 160 MHz เมื่อทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Reflex 2D Quick ออกแล้วจะเห็นได้เลยว่า RF noise ค่อนข้างเข้มมาก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า ณ ตำแหน่งที่การสำรวจอาจมีคลื่นวิทยุบางอย่างรบกวนอยู่ใกล้ๆ ทำให้เกิดแถบยาวค่อนข้างมาก และ จากการวิเคราะห์ยังสามารถเห็นท่อที่เป็นโลหะได้อย่างชัดเจน (เส้นโค้งสีส้ม) ดังแสดงในรูปที่ 20 อยู่ที่ระดับความลึก 10 เมตร และท่ออโลหะ (คอนกรีต) (เส้นโค้งสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 ภาพแสดงตำแหน่งที่พบ noise และ ท่อต่างๆ บริเวณเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

## 7.

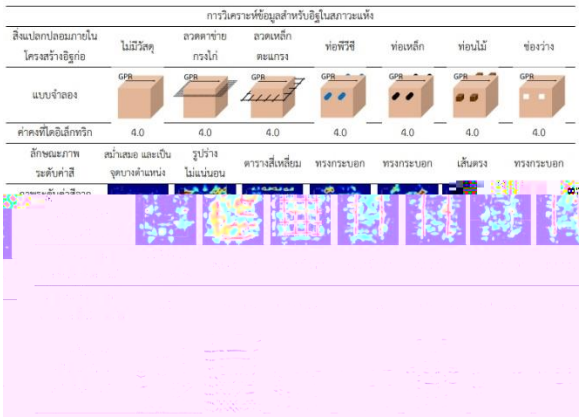
จากการศึกษาการใช้ Open-Source Software Rstudio และ ใช้ Open-Source Software Reflex2Dquick เพื่อศึกษาและสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วย GPR และ เพื่อศึกษารูปลักษณะต่างๆของสัญญาณที่เครื่องมือสำรวจ GPR ตรวจพบใต้ผิวดิน พบว่าในส่วนของโปรแกรม Rstudio มีความไม่สะดวกกว่า โปรแกรม Reflex2DQuick ในทุกขั้นตอนการดำเนินการไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการลงโปรแกรมหรือการลง Package และ Devtool ต่าง ๆ เนื่องทางโปรแกรมจำเป็นต้องใช้ทักษะด้านการเขียนโปรแกรมสูงจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมามีความละเอียดที่ต่ำมากจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เพื่อศึกษาและสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วย GPR ได้อย่างเต็มที่

ในส่วนของโปรแกรม Reflex2DQuick เป็นโปรแกรมที่ทำความเข้าใจค่อนข้างได้ง่าย เนื่องจากมีข้อดีมากกว่าทั้งในด้านความเรียบง่ายตั้งแต่ในขั้นตอนดาวน์โหลดเพราะเมื่อทำการดาวน์โหลดเสร็จแล้วก็สามารถที่จะใช้งานโปรแกรมได้ทันทีไม่ต้องทำการลง Package หรือ Devtool เพิ่มเติมเพียงแค่มีข้อมูล GPR data ก็สามารถนำมาประมวลผลและเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ได้อย่างไม่ซับซ้อน และผลลัพธ์ที่ออกมายังมีความละเอียดและชัดเจนจึงทำให้สามารถนำมาศึกษาและสำรวจธรณีวิทยาใต้ดินด้วย GPR ได้อย่างเต็มที่ และ อีกทั้งยังมีความชัดเจนมากพอที่จะนำไปวิเคราะห์ หารูปลักษณะต่างๆของสัญญาณที่เครื่องมือสำรวจ GPR ตรวจพบใต้ผิวดิน ดังผลลัพธ์ที่ได้ทำ

การวิเคราะห์ข้างต้นในบริเวณบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และถนนสาย 7 พัทยา-มาบตาพุด เมืองพัทยาจังหวัดชลบุรี ในส่วนของข้อเสียเนื่องจากตัวโปรแกรมเป็นเวอร์ชันเก่าแล้วทางผู้พัฒนาจึงนำมาปล่อยเป็นแบบ Open-Source Software ทำให้เครื่องมือบางส่วนหรือความละเอียดของภาพบางส่วนยังไม่ได้ถูกพัฒนาต่อ

## 8.

จากการศึกษาเรื่อง การสำรวจด้วยสัญญาณคลื่นเรดาร์สำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอมภายในโครงสร้างอิฐก่อ [15] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างอิฐ โดยนำมาเรียงต่อกัน 6 ชั้นแบบไม่ใช้วัตถุประสานหรือปูนก่อ และจำลองว่ามีสิ่งแปลกปลอมประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ลวดเหล็กตะแกรง ลวดตาข่ายกรงไก่ ท่อพีวีซี ท่อเหล็ก ท่อนไม้ และรวมถึงช่องว่าง ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 21




รูปที่ 21 แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลอิฐในสภาวะแห้ง [15]

เมื่อดูจากผลลัพธ์ในการศึกษาของพื้นที่บริเวณ The Tagliamento River ประเทศอิตาลี ไม่พบคลื่นใดๆเนื่องจากใต้ดินไม่มีวัตถุและผลลัพธ์ในการศึกษาของพื้นที่บริเวณจังหวัดพนะนครศรีอยุธยามีลักษณะรูปร่างเป็น Ringy ซึ่งคาดการว่าเป็นลวดเหล็กหรือตะแกรงเละผมลัพธ์ในการศึกษาของพื้นที่บริเวณเมืองพัทยาจังหวัดชลบุรีมีลักษณะเป็นไฮเปอร์โบลาและคลื่นสะท้อนออกมาเป็นเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งคาดการได้ว่าเป็นท่อเหล็กทรงกระบอกซึ่งผลที่กล่าวมาสามารถเปลี่ยนเทียมความถูกต้องได้จากรูปที่ 21

.

[1] Adichat Surinkum, Weera galong, Pracha Kuttikul, Apichart Paiyarom. (2000). The Application of Ground Penetrating Radar (GPR) for Petrified Wood Mapping. 11-49.

[2] ดร.อัฆพรรค์ วรรณโกมล เอกสารประกอยการสอนรายวิชาการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ สืบค้น 13 ตุลาคม 2022 จาก http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/2813/1.pdf

[3] กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม 2022 จาก https://www.dmr.go.th/เทคโนโลยีธรณี

[4] Scimath, วิธีการสำรวจด้วยค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Methods) สืบค้น 27 มีนาคม 2022, จาก https://www.scimath.org/lesson-physics/item/

[5] เพียงตา สาตรักษ์ อภิชาติ บุตรพิเศษ ประดิษย์ นูเล และ ถนัด สร้อยชา. 2545. การตรวจหาโพรงและชั้นเกลือหินใต้ผิวดินด้วยวิธีการสำรวจด้วยค่าความเป็นแม่เหล็ก. วารสารวิจัย มข. ปีที่ 7 (ฉบับที่ 2): 22-32.

[6] การสำรวจวัดสภาพต้านไฟฟ้า. (ม.ป.ป.). [ออนไลน์]. จาก https://home.kku.ac.th/peangta/ch4-resistivity-full-final.pdf

[7] ชั้นดินชั้นหิน สืบค้น 13 ตุลาคม 2022, จาก https://www.ldd.go.th/museum/thai-7.html

[8] "Fundamentals of Radar Signal Processing," Mark A. Richards, McGraw Hill, 2005

[9] น.อ.นิวัติ เนียมพลอย, B.Sc.in Command, Control & Communication and Information System, RMCS., การสะท้อนของเรดาร์ จาก https://nniwat.wordpress.com/

[10] Daniels, D.J., Gunton,D.J.,andScott,H.F.,1988.Introduction to subsurface radar. In: IEE Proceedings,Communications radar and signalprocessing, 1988, 35 (4),

[11] Thanop T. and Napassapong J. Determination of void under pavement using ground penetrating radar (GPR). Civil Engineering Magazine (In Thai), 2012, July - September
[12] บริษัท นีโอนิคส์ จำกัด, ค่าการนำไฟฟ้า สืบค้น 13 ตุลาคม ปี 2022,https://www.neonics.co.th/water-quality-testing/what-is-electrical-conductivity-ec.html
[13] RStudio Team (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL https://www.rstudio.com/.
[14] Dr.Karl-Josef Sandmeier. Geophysical research Zipser Str.1 D-76277 Karlsrush
[15] พนิดา อินทะเรื่องศร , พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย , ชัยณรงค์ ธิสกุล , สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์' และรักติพงษ์ สหมิตรมงคล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย