



TUGAS AKHIR - RF 184838

IDENTIFIKASI JARINGAN PIPA AIR BAWAH PERMUKAAN PADA JALUR “SZJT” MENGGUNAKAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

RAYHAN FARISI RAMADHAN

NRP 03411840000012

Dosen Pembimbing

Mariyanto, S.Si., M.T.

NIP. 1991 2017 11044

Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.

NIP. 1989 0612 201504 1 003

Program Studi Teknik Geofisika

Departemen Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - RF 184838

**IDENTIFIKASI JARINGAN PIPA AIR BAWAH
PERMUKAAN PADA JALUR “SZJT” MENGGUNAKAN
METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR)**

RAYHAN FARISI RAMADHAN

NRP 03411840000012

Dosen Pembimbing

Mariyanto, S.Si., M.T.

NIP. 1991 2017 11044

Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.

NIP. 1989 0612 201504 1 003

Program Studi Teknik Geofisika

Departemen Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - RF 184838

**IDENTIFICATION OF SUBSURFACE WATER PIPELINE
UNDER “SZJT” TRACK USING GROUND PENETRATING
RADAR (GPR) METHOD**

RAYHAN FARISI RAMADHAN

NRP 03411840000012

Advisor

Mariyanto, S.Si., M.T.

NIP. 1991 2017 11044

Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.

NIP. 1989 0612 201504 1 003

Study Program Geophysical Engineering

Department of Geophysical Engineering

Faculty of Civil, Environmental and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN




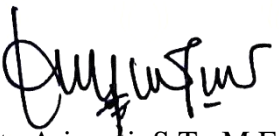
IDENTIFIKASI JARINGAN PIPA AIR BAWAH PERMUKAAN PADA JALUR “SZJT” MENGGUNAKAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana pada
Program Studi S-1 Teknik Geofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **RAYHAN FARISI RAMADHAN**
NRP. 0341184000012

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|---|---------------|
| 
1. Mariyanto, S.Si., M.T. | Pembimbing |
| 
2. Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T. | Ko-Pembimbing |
| 
3. Wien Lestari, S.T., M.T. | Penguji |
| 
4. Nita Ariyanti, S.T., M.Eng. | Penguji |

SURABAYA

JULI, 2022

APPROVAL SHEET




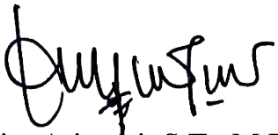
IDENTIFICATION OF SUBSURFACE WATER PIPELINE UNDER “SZJT” TRACK USING GROUND PENETRATING RADAR (GPR) METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a Bachelor's degree at
Undergraduate Study Program of Geophysical Engineering
Department of Geophysical Engineering
Faculty of Civil, Planning and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **RAYHAN FARISI RAMADHAN**
NRP. 0341184000012

Approved by Final Project Examiner Team:

- 
1. Mariyanto, S.Si., M.T. Advisor
- 
2. Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T. Co-Advisor
- 
3. Wien Lestari, S.T., M.T. Examiner
- 
4. Nita Ariyanti, S.T., M.Eng. Examiner

SURABAYA

JULY, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Rayhan Farisi Ramadhan / 0341184000012

Departemen : Teknik Geofisika – ITS

Dosen Pembimbing / NIP : Mariyanto, S.Si., M.T. / 1991 2017 11044

Dosen Ko-Pembimbing / NIP : Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T. / 1989 0612 201504 1 003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Identifikasi Jaringan Pipa Air Bawah Permukaan pada Jalur “SZJT” Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR)” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 19 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Mariyanto, S.Si., M.T.)

NIP. 1991 2017 11044

Mahasiswa,



(Rayhan Farisi Ramadhan)

NRP. 0341184000012

Dosen Ko-Pembimbing



(Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.)

NIP. 1989 0612 201504 1 003

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Rayhan Farisi Ramadhan / 0341184000012
Department : Geophysical Engineering – ITS
Advisor / NIP : Mariyanto, S.Si., M.T. / 1991 2017 11044
Co-Advisor / NIP : Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T. / 1989 0612 201504 1 003

hereby declare that the Final Project with the title of “Identification of Subsurface Water Pipeline under “SZJT” Track Using Ground Penetrating Radar (GPR) Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 19 July 2022

Acknowledged

Advisor



(Mariyanto, S.Si., M.T.)

NIP. 1991 2017 11044

Student



(Rayhan Farisi Ramadhan.)

NRP. 0341184000012

Co-Advisor



(Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.)

NRP. 1989 0612 201504 1 003

IDENTIFIKASI JARINGAN PIPA AIR BAWAH PERMUKAAN PADA JALUR “SZJT” MENGGUNAKAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Nama Mahasiswa / NRP : Rayhan Farisi Ramadhan
Departemen : Teknik Geofisika FTSPK – ITS
Dosen Pembimbing : Mariyanto, S.Si., M.T.
Dosen Ko-Pembimbing : Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.

ABSTRAK

Pembangunan sarana dan prasarana umum di Kota Surabaya akan menyebabkan perubahan struktur lingkungan, sehingga banyak hal yang harus diperhatikan. Salah satunya yaitu memperhatikan letak dan lokasi objek bawah permukaan seperti pipa gas, saluran kabel listrik, dan juga pipa-pipa air. Kurangnya pengelolaan dan pemetaan pipa berpotensi menyebabkan pipa bawah tanah mengalami kerusakan selama dilakukannya penggalian. Jaringan pipa air bawah permukaan termasuk dalam jaringan pipa penting dalam menopang kebutuhan hidup masyarakat. Mengetahui lokasi pipa-pipa ini merupakan hal penting bagi instansi pemerintah dalam melakukan kegiatan pemeliharaan, pengembangan jaringan pipa maupun perbaikan. Identifikasi struktur jaringan pipa air bawah permukaan dilakukan dengan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR). Karena bersifat non-destruktif dan sangat baik diaplikasikan dalam menginvestigasi infrastruktur yang tertimbun di bawah tanah yang memiliki kontras konstanta dielektrik dengan tanah di sekitarnya. Penelitian ini dilakukan di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo Surabaya. Akuisisi data dilakukan dengan instrumen GPR GSSI dengan frekuensi antenna 270 MHz pada 21 lintasan pengukuran (JB07 s/d JB27). Tujuan yang diharapkan yaitu untuk mengetahui lokasi, kedalaman serta struktur dari jaringan pipa air bawah permukaan di lokasi penelitian tersebut. Data hasil pengukuran diolah menggunakan perangkat lunak *MatGPR R-3.1* dan *SketchUp Pro 2021* dengan tahap *adjust signal position, dc removal, dewowing, median filter, inverse amplitude decay, background removal, K-L filter, bandpass filter* dan *time to depth conversion*. Data kemudian dimodelkan dalam profil 2-D dan 2,5-D untuk memvisualisasikan struktur jaringan pipa air. Anomali hiperbola yang diduga sebagai pipa air terdeteksi dari adanya amplitudo yang kuat pada kedalaman 1 – 2 meter yang terlihat hampir di setiap lintasan pengukuran dengan nilai kecepatan berkisar dari 0,0609 – 0,113 m/ns dan nilai konstanta dielektrik sebesar 7,05 – 24,27. Dari pemodelan 2,5-D diketahui bahwa jaringan pipa air menerus dari arah selatan (Sungai Kalimas) menuju utara lokasi pengukuran.

Kata Kunci: *Ground Penetrating Radar*, Konstanta Dielektrik, Pipa Air Bawah Permukaan.

IDENTIFICATION OF SUBSURFACE WATER PIPELINE UNDER “SZJT” TRACK USING GROUND PENETRATING RADAR (GPR) METHOD

Student Name / NRP : Rayhan Farisi Ramadhan
Department : Teknik Geofisika FTSPK – ITS
Advisor : Mariyanto, S.Si., M.T.
Co-Advisor : Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T.

ABSTRACT

Public facilities and infrastructure development in Surabaya will change the environmental structure, so there are many things that must be considered. One of them is the location of subsurface objects such as gas pipes, electrical cable lines, and also water pipes. Lack of pipeline management and mapping can cause underground pipelines to be damaged during excavation. The subsurface water pipe is one of the most important things to support people's needs. Knowing the location of these pipes is important for government agencies in carrying out maintenance, pipeline development and repair activities. Identification of the subsurface water pipeline is carried out using the Ground Penetrating Radar (GPR) method. Because it is non-destructive and very well applied in investigating infrastructure buried underground that has a dielectric constant contrast with the surrounding soil. This research was conducted around Surabaya Zoo and Joyoboyo Terminal. Data acquisition was carried out with the GPR GSSI with antenna frequency of 270 MHz on 21 measurement lines (JB07 to JB27). The aim is to determine the location, depth and structure of the subsurface water pipeline at the research location. The measurement data were processed using MatGPR R-3.1 and SketchUp Pro 2021 software by adjusting signal position, dc removal, dewowing, median filter, inverse amplitude decay, background removal, K-L filter, bandpass filter and time to depth conversion. 2-D and 2,5-D modeling conducted to visualize the water pipeline. Hyperbolic anomaly which is suspected to be a water pipe is detected from the presence of strong amplitude at a depth of 1 – 2 meters which is seen in almost every line with velocity values from 0,0609 – 0,113 m/ns and dielectric constant value of 7,05 – 24,27. From the 2,5-D modeling, it is known that the water pipeline continues from the south (Kalimas River) to the north of the research location.

Keywords: *Ground Penetrating Radar, Dielectric Constant, Subsurface Water Pipe.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala nikmat, rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Identifikasi Jaringan Pipa Air Bawah Permukaan pada Jalur “SZJT” Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR)”. Adapun tujuan penulisan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai syarat untuk menyelesaikan program studi Strata Satu Teknik Geofisika ITS Surabaya. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat diselesaikan berkat semangat dan dukungan baik secara moril maupun materiil dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi dalam penyelesaian tugas akhir ini dan secara khusus penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah *Subhanahu wa Ta’ala*
2. Orang tua penulis, Bapak Endang Sulardi dan Ibu Setia Prastiwi, yang selalu memberikan dukungan penuh baik secara moril dan materiil serta senantiasa mendoakan penulis demi kelancaran selama penyusunan tugas akhir. Serta adik penulis, Dandi Ayubi Raya yang selalu menghibur dan memberikan semangat.
3. Keluarga besar Bapak Kislam Rusianto yang senantiasa mendukung serta memberi semangat kepada penulis.
4. Bapak Mariyanto, S.Si., M.T. dan Bapak Juan Pandu G.N.R, S.Si., M.T., selaku pembimbing yang senantiasa membimbing, mengajarkan dan mengarahkan selama penyusunan tugas akhir ini dari awal hingga selesainya tugas akhir ini.
5. Teman-teman dan senior-senior yang telah memberikan masukan, bantuan dan pengetahuannya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Sahabat-sahabat baik penulis Rahmi Azizah, Rintan Widhi Hapsari, Jefrizal Sihombing dan Ramadhana Millenio O. W., yang senantiasa menemani dan berjuang bersama baik di dalam maupun di luar dunia perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini sehingga kritik dan saran akan sangat membantu demi perbaikan yang jauh lebih baik kedepannya. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat tidak hanya untuk penulis namun juga untuk para pembaca.

Surabaya, 19 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Dasar Teori.....	3
2.1.1 Geologi Regional.....	3
2.1.2 Gelombang Elektromagnetik.....	9
2.1.3 Metode <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR).....	10
2.1.4 Prinsip Dasar Metode GPR.....	14
2.1.5 Pengolahan Data GPR.....	18
2.1.6 Pemodelan 2,5 Dimensi.....	22
2.2 Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III METODOLOGI	25
3.1 Lokasi Penelitian.....	25
3.2 Peralatan.....	27
3.2.1 Perangkat Keras.....	28
3.2.2 Perangkat Lunak.....	28
3.3 Tahapan Penelitian.....	28
3.3.1 Tahap Persiapan.....	28

3.3.2	Tahap Pengolahan Data dan Interpretasi	29
3.3.3	Analisis Kecepatan.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		36
4.1	Hasil Pengolahan.....	36
4.1.1	Hasil Radargram 2-D	36
4.1.2	Hasil Pemodelan 2,5-D	46
4.2	Pembahasan.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA		54
LAMPIRAN.....		58
BIODATA PENULIS.....		68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Fisiografi Pulau Jawa dan Madura (Bemmelen, 1949).....	3
Gambar 2.2 Zona Fisiografi Regional Jawa Timur (Bemmelen, 1949).....	3
Gambar 2.3 Stratigrafi Regional Jawa Timur (Pringgoprawiro, 1983)	6
Gambar 2.4 Peta Geologi Surabaya berdasarkan Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu (Supandjono et al., 1992, dimodifikasi); Pin Berwarna Hitam Menunjukkan Lokasi Penelitian.	8
Gambar 2.5 Ilustrasi Gelombang Elektromagnetik; Gelombang Elektrik (E) dan Gelombang Magnetik (B).....	9
Gambar 2.6 Prinsip Kerja Metode GPR (Ciampoli et al., 2019)	11
Gambar 2.7 Ilustrasi Penjalaran Gelombang GPR (Reynolds, 1997)	11
Gambar 2.8 Pola Radargram Pipa Besi (Kiri) dan Pipa yang Terdapat Air (Kanan) (Skolnik, 2008).....	12
Gambar 2.9 Ilustrasi Konfigurasi Common-Offset (Annan, 2003)	12
Gambar 2.10 Ilustrasi Konfigurasi Common-Midpoint (Annan, 2003)	13
Gambar 2.11 Konsep Dasar Metode GPR (Bahri et al., 2009).....	14
Gambar 2.12 a. Persamaan 1 Maxwell Mengenai Hukum Faraday dan b. Persamaan 2 Maxwell Mengenai Hukum Ampere (Annan, 2003)	15
Gambar 2.13 c. Persamaan 3 Maxwell Mengenai Perpindahan Listrik dan d. Persamaan 4 Maxwell Mengenai Loop Fluks Magnetik (Annan, 2003)	16
Gambar 2.14 Gambaran Umum Alur Pengolahan Data Metode GPR (Annan, 2003)	19
Gambar 2.15 Contoh Radargram dengan Koreksi DC (Reynolds, 1997).....	20
Gambar 2.16 Profil GPR; Sebelum (Kiri) dan Sesudah Diterapkan Dewow (Kanan) (Dojack, 2012).....	20
Gambar 2.17 Hasil Rekonstruksi dan Residual Filter Karhunen-Loeve.....	21
Gambar 2.18 Time to Depth Conversion; Sebelum (Atas) dan Sesudah (Bawah)	22
Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian	25
Gambar 3.2 Rancangan Desain Akuisisi Pengukuran GPR.....	26
Gambar 3.3 Overlay Rancangan Desain Akuisisi Pengukuran GPR.....	26
Gambar 3.4 Peta Desain Akuisisi Pengukuran GPR.....	27
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 3.6 Diagram Alir Pengolahan Data GPR	29
Gambar 3.7 Radargram JB12 Sebelum (Kiri) dan Sesudah (Kanan) Adjust Signal Position	29
Gambar 3.8 Radargram JB12 Setelah Remove DC	30
Gambar 3.9 Radargram JB12 Sebelum (Kiri) dan Sesudah (Kanan) Dewowing.....	30
Gambar 3.10 Median Filter 1x3 Pada Radargram JB12	31
Gambar 3.11 Decay Model JB12 Menggunakan Median Attenuation dan Ordo 3	31
Gambar 3.12 Radargram JB12 Setelah Inverse Amplitude Decay	32
Gambar 3.13 Radargram JB12 Setelah Remove Global Background	32
Gambar 3.14 Radargram JB12 Sebelum (Kiri) dan Sesudah (Kanan) K-L Filter (Eigen vector = 3).....	33
Gambar 3.15 Radargram JB12 Setelah Resample Scan Axis	33
Gambar 3.16 Informasi Marker Lintasan JB12	34

Gambar 3.17 Window Input 1-D Velocity Model Lintasan JB12.....	34
Gambar 3.18 Radargram JB12 Setelah Time to Depth Conversion.....	35
Gambar 3.19 Proses Analisis Kecepatan dengan Fitur Fit Diffraction Hyperbola pada Lintasan JB12	35
Gambar 4.1 Profil Radargram 2-D Lintasan JB12 (Jetscale).....	36
Gambar 4.2 Profil Radargram 2-D Lintasan JB12 (Grayscale). Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (Kotak Merah) sedangkan Efek Ringing Berada di Bawahnya (Kotak Hijau).	37
Gambar 4.3 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB12.	37
Gambar 4.4 Profil Radargram 2-D Lintasan JB13 (Jetscale).....	38
Gambar 4.5 Profil Radargram 2-D Lintasan JB13 (Grayscale). Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (Kotak Merah) sedangkan Efek Ringing Berada di Bawahnya (Kotak Hijau).	38
Gambar 4.6 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB13.	39
Gambar 4.7 Profil Radargram 2-D Lintasan JB14 (Jetscale).....	40
Gambar 4.8 Profil Radargram 2-D Lintasan JB14 (Grayscale).	40
Gambar 4.9 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB14.	41
Gambar 4.10 Profil Radargram 2-D Lintasan JB17 (Jetscale).....	41
Gambar 4.11 Profil Radargram 2-D Lintasan JB17 (Grayscale). Target Pipa Air Terlihat pada Pola Refleksi Hiperbola (Kotak Merah) dan Kemungkinan Lapisan Tanah Timbunan (Kotak Hijau).	42
Gambar 4.12 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB17.	42
Gambar 4.13 Profil Radargram 2-D Lintasan JB22 (Jetscale).....	43
Gambar 4.14 Profil Radargram 2-D Lintasan JB22 (Grayscale). Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (Kotak Merah) dan Utilitas Terkubur Lainnya (Kotak Hijau).	44
Gambar 4.15 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB22.	44
Gambar 4.16 Profil Radargram 2-D Lintasan JB25 (Jetscale).....	45
Gambar 4.17 Profil Radargram 2-D Lintasan JB25 (Grayscale). Target Pipa Air (Kotak Merah) dan Utilitas Terkubur serta Efek Ringing (Kotak Hijau).	45
Gambar 4.18 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB25.	46
Gambar 4.19 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27 Beserta Kemungkinan Struktur Jaringan Pipa Air Bawah Permukaan (Garis Hijau dan Garis Kuning)	47
Gambar 4.20 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27. a. Tampak Samping Kanan; b. Tampak Samping Kiri. Kemenerusan Pipa Air Besar Melintasi Sungai Kalimas (Kotak Biru) dan Perkiraan Arah Kemenerusan (Kotak Merah).....	48
Gambar 4.21 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27. c. Tampak Belakang; d. Tampak Depan. Kemenerusan Pipa Air Besar (Kotak Biru) dan Perkiraan Arah Kemenerusan (Kotak Merah).....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Resolusi, Bandwith Frekuensi dan Kedalaman Penetrasi Sistem GPR (Annan, 2003)	13
Tabel 2.2 Nilai Parameter Fisis Berbagai Material (Annan dan Cosway, 1992; Goodman dan Piro, 2013; Deffian et al., 2019)	18
Tabel 3.1 Deskripsi Lintasan Pengukuran GPR	27
Tabel 3.2 Tabel Parameter Median Filter (Elfarabi et al., 2017; Murdaningtyas, 2019).....	31
Tabel 4.1 Nilai Konstanta Dielektrik Berbagai Material Besi (Chen et al., 2014; Didik, 2020; Kamal et al., 2020)	51

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan dan pembangunan sarana dan prasarana umum di Kota Surabaya akan menyebabkan perubahan struktur lingkungan, sehingga banyak hal yang harus diperhatikan. Salah satunya yaitu memperhatikan letak dan lokasi objek-objek bawah permukaan seperti pipa gas, saluran kabel listrik, dan pipa-pipa air. Dalam banyak situasi, kurangnya pengelolaan dan pemetaan pipa yang efisien dapat berpotensi menyebabkan situasi dimana pipa bawah tanah mengalami kerusakan selama dilakukannya penggalian. Fenomena ini mencerminkan bahwa perlu untuk secara efisien menemukan posisi pipa bawah tanah sebelum melakukan penggalian. Jaringan pipa air bawah permukaan termasuk dalam jaringan pipa penting dalam menopang kebutuhan hidup masyarakat. Mengetahui lokasi pipa-pipa ini merupakan hal penting bagi instansi pemerintah dalam melakukan kegiatan pemeliharaan, pengembangan jaringan pipa maupun perbaikan. Solusi yang ditawarkan untuk mengatasi persoalan tersebut yaitu pengaplikasian metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) dalam mengidentifikasi lokasi pipa bawah permukaan.

Ground Penetrating Radar (GPR) atau Georadar merupakan metode geofisika dengan prinsip elektromagnetik (EM) dengan frekuensi 10 MHz – 1 GHz, metode ini menggunakan gelombang radio yang diaplikasikan untuk eksplorasi *very near surface* (dekat permukaan). Penetrasi kedalaman dari metode GPR dapat mencapai kurang lebih 10 m. Prinsip kerja instrumen GPR yaitu mentransmisikan pulsa radar dari antena pemancar (*transmitter*) ke dalam tanah dan merekam gelombang yang dipantulkan dari bawah permukaan oleh antena penerima (*receiver*) sehingga didapatkan visualisasi bawah permukaan dalam bentuk radargram (Conyers, 2016). Kedalaman atau penetrasi yang dapat dicapai dari metode GPR ini bergantung pada besar frekuensi yang digunakan.

Penelitian mengenai identifikasi objek terkubur khususnya pipa menggunakan metode GPR telah dilakukan oleh (Tong, 1993; Ghazali et al., 2019; Deffian et al., 2020; Merkle et al., 2021). Tong (1993) melakukan pengukuran GPR untuk menemukan letak pipa-pipa bawah tanah dengan bahan yang berbeda-beda (besi, beton dan PVC). Respon sinyal dari bahan besi dan beton sangat jelas namun untuk bahan PVC memiliki respon yang lemah. Ghazali et al., (2019) melakukan penelitian untuk mengetahui apakah perbedaan jenis tanah akan mempengaruhi visibilitas dan letak kedalaman pipa pada citra radargram. Diketahui bahwa respon GPR dipengaruhi oleh jenis tanah sehingga pemilihan frekuensi harus disesuaikan dengan kondisi tanah.

Sedangkan Deffian et al., (2020) melakukan survey GPR untuk mendeteksi lokasi pipa PDAM di Bogor, Jawa Barat. Selain itu, dilakukan juga validasi hasil pemodelan dengan *software* geospasial. Merkle et al., (2021) menggabungkan metode GPR dengan LiDAR (*Remote Sensing*) untuk pemetaan infrastruktur pada alun-alun Kota Wina, Austria. Hasilnya didapatkan bahwa gabungan kedua metode ini menghasilkan visualisasi objek secara 3D baik dipermukaan maupun dibawah permukaan. Selain mendeteksi pipa bawah permukaan, GPR juga dapat diaplikasikan untuk mendeteksi *septic tank* seperti yang dilakukan oleh Pramudhita et al., (2021), untuk mendeteksi rembesan di area sekitar waduk resapan air di Jakarta (Yulianita et al., 2021) dan bahkan dalam mitigasi bencana GPR dapat diaplikasikan dalam mendeteksi korban tertimbun akibat bencana seperti penelitian yang dilakukan oleh Bagaskara et al., (2021).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana lokasi dan kedalaman dari jaringan pipa air bawah permukaan pada jalur “SZJT” berdasarkan radargram 2-D?
2. Bagaimana struktur jaringan pipa air bawah permukaan pada jalur “SZJT” berdasarkan pemodelan 2,5-D yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Data yang digunakan didapatkan dari akuisisi Georadar (GPR) di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo, Surabaya, dengan 21 lintasan pengukuran.
2. Fokus bahasan pada penelitian ini yaitu mendeteksi lokasi dan kedalaman jaringan pipa air bawah permukaan dari radargram 2-D serta mengidentifikasi struktur dan kemenerusan jaringan pipa air tersebut berdasarkan pemodelan 2,5-D.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya tugas akhir ini adalah:

1. Mendeteksi lokasi dan kedalaman jaringan pipa air bawah permukaan pada jalur “SZJT” berdasarkan radargram 2-D.
2. Mengetahui struktur jaringan pipa air bawah permukaan pada jalur “SZJT” berdasarkan pemodelan 2,5-D.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan informasi aktual mengenai letak dan kedalaman jaringan pipa air bawah permukaan sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo untuk validasi informasi mengenai letak jaringan pipa-pipa air di Surabaya.
2. Menunjukkan kontribusi geofisika dalam bidang pembangunan dan pengembangan kota.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

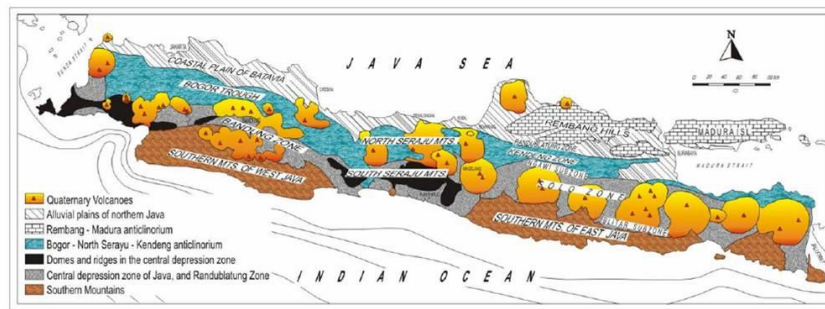
2.1 Dasar Teori

2.1.1 Geologi Regional

2.1.1.1 Fisiografi Regional

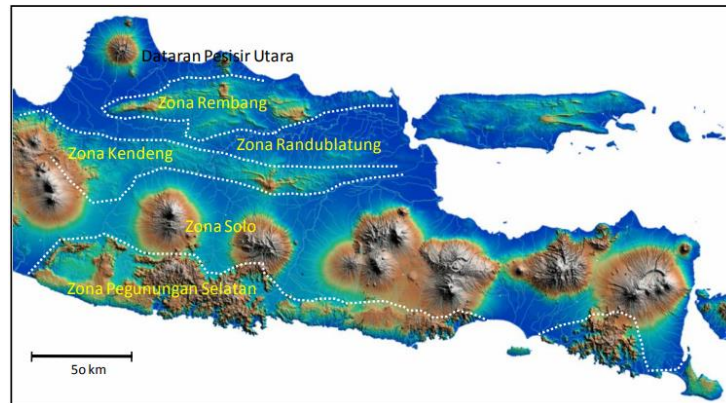
Struktur utama Pulau Jawa sebagian besar merupakan struktur antiklin Jawa Selatan yang menempati sepanjang pantai selatan pulau dan struktur sinklin Jawa Utara yang menempati setengah bagian utara pulau Jawa. Struktur sinklin ini kemudian melebar dan membentuk percabangan menjadi dua bagian yaitu percabangan ke arah Utara yang meliputi perbukitan Rembang dan Madura, dan percabangan ke arah Selatan yang meliputi Punggungan Kendeng dan Selat Madura. Struktur antiklin Jawa Selatan terus berkembang yang disebabkan oleh longsornya bagian puncak dari antiklin Jawa sehingga sekarang membentuk fisiografi berupa zona depresi. Sementara itu, Pegunungan Selatan membentuk sisi bagian selatan dari antiklin pulau Jawa. Pegunungan Selatan bagian tengah pulau Jawa telah tenggelam di bawah permukaan laut, sehingga batas depresi dibatasi oleh Samudera Hindia (Bemmelen, 1949). Fisiografis dan perbedaan struktur Pulau Jawa dibagi menjadi empat bagian, yaitu:

1. Jawa Barat (sebelah barat Cirebon)
2. Jawa Tengah (antara Cirebon dan Semarang)
3. Jawa Timur (antara Semarang dan Surabaya)
4. Taji Bagian Timur Jawa



Gambar 2.1 Fisiografi Pulau Jawa dan Madura (Bemmelen, 1949)

Mengacu pada Bemmelen (1949) fisiografi regional Jawa Timur terbagi menjadi beberapa zona fisiografi meliputi Zona Pesisir Utara, Zona Pegunungan Rembang-Madura, Zona Depresi Randublatung, Zona Kendeng, Zona Solo, dan Zona Pegunungan Selatan.



Gambar 2.2 Zona Fisiografi Regional Jawa Timur (Bemmelen, 1949)

A. Zona Pesisir Utara

Zona Pesisir Utara memiliki karakteristik terdiri dari Gunung Muria yang tersusun atas batuan leucite, Gunung Lasem dan Gunung Butak yang tersusun atas batuan andesitik. Gunung Muria pada Kala Holosen merupakan gunung yang berdiri sendiri, namun saat ini dihubungkan dengan Pulau Jawa oleh dataran alluvial Semarang – Demak – Kedu – Pati – Rembang. Gunungapi Muria dan Lasem, diduga merupakan gunungapi belakang busur (*back-arc volcanism*). Pembentuk utama dari dataran pesisir utara ini yaitu sedimentasi Sungai Serang dan Sungai Tuntang. Sungai Serang mengerosi perbukitan Zona Kendeng dimana hulunya menjulur hingga ke lereng sebelah timur Gunung Merbabu. Sungai Serang menerima pasokan sedimen dari Sungai Lusi dan keduanya bertemu di sebelah barat Purwodadi. Kedua sungai ini selain mengerosi Perbukitan Kendeng turut pula membentuk Perbukitan Rembang.

B. Zona Pegunungan Rembang-Madura

Zona Pegunungan Rembang-Madura merupakan sebuah daerah antiklinorium Rembang Utara sedangkan di bagian selatannya merupakan Cepu, dengan arah memanjang dari barat ke timur. Antiklinorium Rembang ini memiliki luas rata-rata 50 km, dengan puncak tertinggi hingga 500 mdpl. Kedua antiklinorium ini dipisahkan oleh Depresi Blora-Kening. Antiklinorium ini disebabkan oleh gejala tektonik Tersier Akhir yang dapat ditelusuri hingga Selat Madura. Zona ini sejajar dengan Zona Kendeng dan dipisahkan oleh Depresi Randublatung. Zona ini tersusun atas endapan pasir dan kerikil.

C. Zona Depresi Randublatung

Zona Depresi Randublatung membentang dari Semarang melalui Purwodadi – Randublatung – Ngimbang hingga Wonokromo. Depresi ini terbentuk pada Kala Plistosen dengan arah barat-timur. Zona ini memisahkan Zona Rembang dan Kendeng. Bagian tersempitnya berada di sekitar Cepu yang melebar ke arah timur hingga Selat Madura. Zona ini memiliki struktur sinklin yang tersusun atas berbagai batuan sedimen tebal. Kepentingan struktural dari zona sinklinal ini mengikuti dari fakta bahwa arah lipatan di Rembang umumnya ke selatan, sedangkan strata Kendeng ke utara.

D. Zona Kendeng

Zona Kendeng merupakan antiklinorium yang memiliki panjang 250 km, dengan lebar ± 20 km, dan ketinggiannya mencapai ± 500 m. Zona ini membentang dari Gunung Ungaran ke arah timur hingga ke daerah Mojokerto dan dapat ditelusuri hingga Madura. Zona ini terpotong oleh Sungai Solo yang mengalir dari selatan ke utara di dekat Ngawi. Perbukitan Kendeng mengalami pengurangan dari segi luas dan ketinggian ke arah timur mulai dari Gunung Pandan, antiklin pegunungan ini mulai menghilang di sekitar Mojokerto di bawah endapan alluvial delta Brantas. Zona Kendeng terbagi menjadi beberapa wilayah berdasarkan intensitas vulkanik dan variasi stratigrafinya yaitu daerah-daerah yang berbatasan dengan Gunung Ungaran disebelah barat hingga daerah sekitar Purwodadi digolongkan menjadi Kendeng Barat, cangkupan daerah Purwodadi hingga Gunung Pandan digolongkan menjadi Kendeng Tengah, dan cangkupan daerah Gunung Pandan hingga Mojokerto yang digolongkan menjadi Kendeng Timur.

E. Zona Solo

Zona Solo merupakan zona depresi terjadi di antara Perbukitan Kendeng dan sebelah timur Pegunungan Selatan. Secara tektonik dan fisiografis, zona ini serupa dengan Zona Bandung, Jawa Barat. Zona depresi ini tersusun atas deretan pegunungan muda. Zona Solo

terbagi menjadi tiga subzona, yaitu Subzona Ngawi, Subzona Solo, dan Subzona Blitar. Saat ini, Zona Solo merupakan cekungan sedimenter aktif dengan sistem fluvial yang menerima pasokan sedimen dari busur gunungapi, Zona Pegunungan Selatan, dan Zona Perbukitan Kendeng.

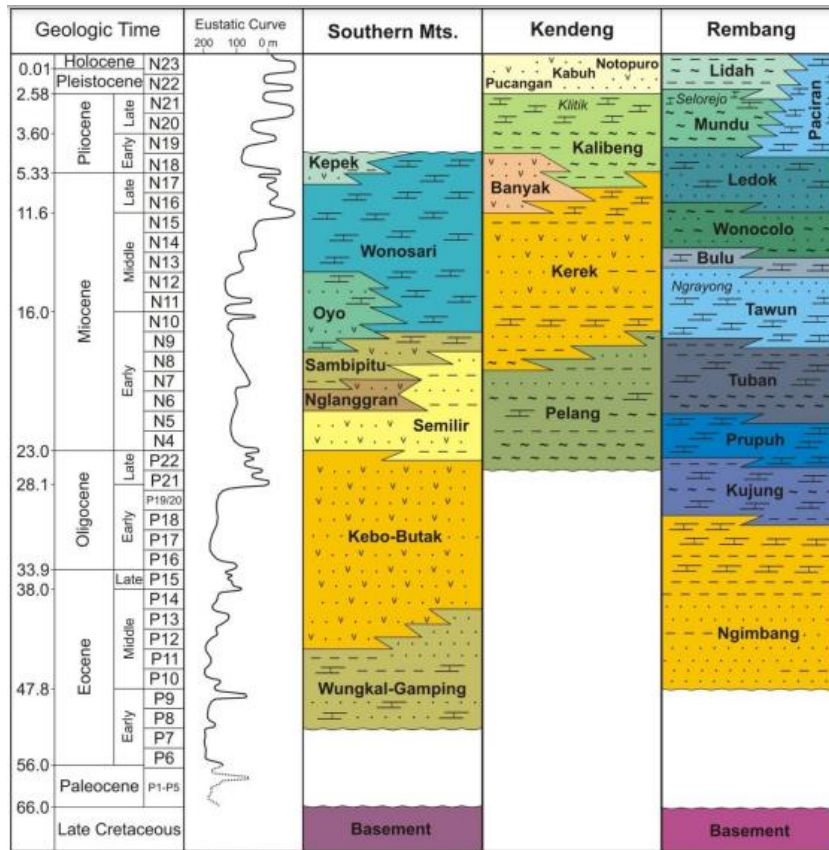
F. Zona Pegunungan Selatan

Zona Pegunungan Selatan merupakan suatu blok yang telah tersingkap dan tererosi dengan lebar ± 55 km. Pada bagian timur zona tersusun atas batugamping sedangkan bagian utara zona tersusun atas sedimen vulkanik. Batas utara zona ini dicirikan dengan lereng curam yang kompleks. Sedangkan pada bagian timur (antara Opak dan Pacitan), tersusun atas batugamping dengan fenomena Karst yang khas yaitu Gunung Sewu. Pada bagian selatan, zona ini ditutupi oleh batugamping Gunung Sewu.

Secara fisiografis, lokasi penelitian yang berada di wilayah Kecamatan Wonokromo, Kota Surabaya terletak di bagian sebelah timur Zona Kendeng. Dimana Zona Kendeng ini meliputi deretan pegunungan dengan arah memanjang dari barat-timur dan terletak langsung di sebelah utara sub Zona Ngawi. Pegunungan ini tersusun oleh batuan sedimen laut dalam yang telah mengalami deformasi secara intensif membentuk suatu antiklinorium. Cekungan ini tersusun oleh batuan yang memiliki rentang usia dari Eosen menengah hingga Miosen, mirip dengan Busur Pegunungan Selatan Jawa (De Genevraye dan Samuel, 1972).

2.1.1.2 Stratigrafi Regional

Menurut Pringgoprawiro (1983), stratigrafi regional Jawa Timur dibagi menjadi tiga zona, yaitu Zona Pegunungan Selatan, Zona Kendeng dan Zona Rembang (**Gambar 2.3**). Stratigrafi penyusun Zona Kendeng terdiri atas endapan laut dalam pada bagian bagian bawah yang semakin ke atas berubah menjadi endapan laut dangkal hingga pada akhirnya menjadi tersusun atas endapan non-laut. Endapan di Zona Kendeng merupakan endapan turbidit klastik, karbonat dan vulkaniklastik (De Genevraye dan Samuel, 1972; Pringgoprawiro, 1983).



Gambar 2.3 Stratigrafi Regional Jawa Timur (Pringgoprawiro, 1983)

Berdasarkan Pringgoprawiro (1983), Zona Kendeng terbagi menjadi beberapa formasi, yaitu; Formasi Pelang, Formasi Kerek, Formasi Kalibeng, Formasi Pucangan, Formasi Kabuh, Formasi Notopuro.

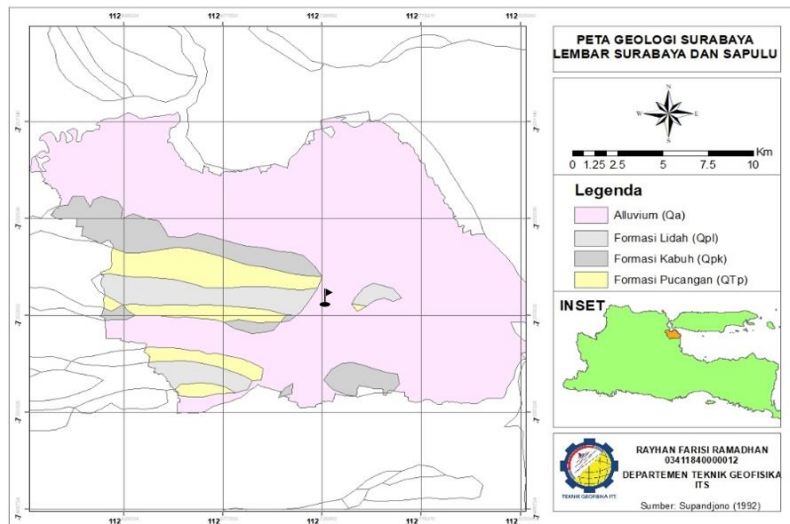
1. Formasi Pelang dianggap sebagai formasi tertua yang tersingkap di Zona Kendeng. Formasi ini berbatasan langsung dengan formasi Kerek yang lebih muda. Litologi utama penyusun dari formasi ini adalah napal, napal lempungan dengan lensa kalkarenit bioklastik yang banyak mengandung fosil foraminifera besar.
2. Formasi Kerek memiliki karakteristik litologi berupa perulangan perselingan batulempung, napal, batupasir tuf gampingan dan batupasir tufan. Perulangan ini menunjukkan struktur sedimen yang khas yaitu *graded bedding*. Formasi ini terbagi menjadi tiga anggota (tua - muda) yaitu Anggota Banyuurip, Anggota Sentul, dan Anggota Batugamping Kerek.
3. Formasi Kalibeng terbagi menjadi dua bagian yaitu Kalibeng Bawah dan Kalibeng Atas (Formasi Sonde). Bagian bawah Formasi Kalibeng tersusun oleh napal tak berlapis berwarna putih kekuning-kuningan hingga abu-abu kebiru-biruan, yang kaya akan komposisi foraminifera planktonik. Pada Zona Kendeng Timur, di sekitar Gunung Pandan, bagian atas formasi ini tersusun atas endapan vulkanik laut yang menunjukkan struktur turbidit.

Formasi Kalibeng Atas (Formasi Sonde), berumur Pliosen dan tersusun mula-mula atas Anggota Klitik (kalkarenit putih kekuning-kuningan, lunak, mengandung fosil laut dangkal dan bersifat napalan atau pasiran. Bagian atas tersusun batuan breksi dengan fragmen gamping berukuran kerikil dan semen karbonat. Berikutnya disusul dengan

endapan napal pasiran yang semakin keatas bersifat semakin lempungan. Bagian teratas merupakan lapisan lempung berwarna hijau kebiruan.

4. Formasi Pucangan memiliki penyusun berupa fasies vulkanik dan fasies lempung hitam yang terdiri atas batupasir berbutir kasar hingga konglomeratan, batupasir tufan berbutir halus hingga kasar dan batupasir tufan dengan gangguan lempung serta sisipan breksi tufan, batukerikil, batupasir tufan napalan. Bagian atas formasi menunjukkan kondisi pengendapan air tawar yang mengandung moluska.
5. Formasi Kabuh tersusun atas batupasir material non vulkanik seperti kuarsa, yang memiliki struktur silang siur dengan sisipan konglomerat, mengandung moluska air tawar dan fosil-fosil vertebrata.
6. Formasi Notopuro terdiri atas batuan tuf berselingan dengan batupasir tufaan, breksi lahar dan konglomerat vulkanik. Semakin keatas sisipan batupasir tufaan semakin banyak. Formasi Notopuro berumur Plistosen Akhir serta merupakan endapan lahar di daratan. Formasi ini terendapkan diatas Formasi Kabuh secara selaras.

Menurut pada peta geologi Lembar Surabaya yang dimodifikasi berdasarkan Supandjono *et al.* (1992) pada **Gambar 2.4**, diketahui bahwa lapisan batuan yang terdapat di wilayah Kota Surabaya sebagian besar merupakan jenis batuan alluvial khususnya pada morfologi dataran, sedangkan pada wilayah lainnya termasuk ke dalam jenis batuan sedimen. Batuan sedimen tersebut terdiri dari beberapa formasi seperti Formasi Lidah (Qpl), Formasi Kabuh (Qpk), Formasi Pucangan (QTp), serta Endapan Alluvial (Qa). Endapan Alluvial (Qa) merupakan endapan terluas yang meliputi hampir 70% dari keseluruhan luas Kota Surabaya. Batuan dasar dari Kota Surabaya merupakan Formasi Lidah yang berumur Pliosen (*pre-tertiary*). Formasi ini berada pada kedalaman 250 – 300 meter. Daerah Surabaya juga merupakan cekungan endapan aluvial muda hasil pengendapan laut dan sungai, tuf dan batu pasir (Soekardi, 1992). Satuan geologi daerah Surabaya di golongan menjadi 4 daerah yaitu: Endapan aluvial (Qa) yang tersebar di sebagian besar wilayah Surabaya pada bagian utara, selatan, timur dan di daerah sekitar pesisir pantai serta tersusun atas kerakal, kerikil, pasir dan lempung. Formasi Lidah (Qpl) dengan persebaran batulempung biru dan lempung pasiran meliputi sebagian daerah Wonokromo, Sawahan, Dukuh Pakis, Lakarsantri, Wiyung dan Karangpilang. Formasi Kabuh (Qpk) dengan persebaran batupasir yang meliputi sebagian wilayah Kecamatan Rungkut, Wonocolo, Tenggilis, Wiyung, Karangpilang, Lakarsantri, Tandes, Sukomanunggal, Benowo dan Dukuh Pakis. Formasi Kabuh didominasi oleh lapisan lempung, pasir, dan kerikil yang memiliki tingkat porositas sedang hingga tinggi. Formasi Pucangan (QTp) dengan persebaran batupasir tufan dan batulempung berada di sekitar pusat kota menyebar ke arah barat dan selatan meliputi daerah Dukuh Pakis, Sawahan, Sukomanunggal, Tandes, Wiyung, Lakarsantri, Karangpilang dan Gubeng (Bahri dan Madlazim, 2012).



Gambar 2.4 Peta Geologi Surabaya berdasarkan Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu (Supandjono et al., 1992, dimodifikasi); Pin Berwarna Hitam Menunjukkan Lokasi Penelitian.

2.1.1.3 Sejarah Geologi Daerah Penelitian

Selama periode Zaman Kapur, Laut Jawa merupakan suatu daratan (Pringgoprawiro, 1983) hingga terjadi suatu regresi besar datang dari arah selatan, tenggara, timur, dan sebagian Jawa bagian tengah yang terjadi pada Zaman Tersier. Hal ini menjadikan endapan Kala Eosen lebih bersifat litoral hingga sub-litoral. Pada Kala Oligosen, Zona Kendeng tertutup oleh laut dalam dimana endapannya bersifat material vulkanik klastik. Endapan ini berasal dari *old andesite volcanoes* di sebelah selatan Pulau Jawa (Sujanto dan Sumantri, 1977). Zona Kendeng meliputi deretan pegunungan yang berarah memanjang dari barat-timur dan terletak di sebelah utara dari sub Zona Ngawi. Penyusun utama dari pegunungan ini adalah batuan sedimen laut dalam yang secara intensif telah mengalami deformasi hingga membentuk suatu antiklinorium. Cekungan pada zona ini tersusun atas batuan yang memiliki rentang usia dari Eosen menengah hingga Miosen, mirip dengan Busur Pegunungan Selatan Jawa.

Menurut (De Genevraye dan Samuel, 1972), antiklinorium Kendeng mengalami pengangkatan pertama kali pada Kala Pliosen Akhir. Pengangkatan ini beriringan dengan terbentuknya sesar-sesar serta lipatan-lipatan dengan arah barat-timur yang sejajar dengan poros Pulau Jawa (Paltrinieri et al., 1976). Pada Kala Plio-Pleistosen terjadi aktivitas tektonik regional di Pulau Jawa bagian utara sebagai akibat dari adanya pendangkalan samudra di daerah utara. Kegiatan tektonik ini berangsur-angsur semakin melemah dan berlangsung hingga Kuartar. Efek yang dihasilkan dari peristiwa tektonik ini yaitu terbentuknya lipatan dan sesar-sesar dengan komposisi endapan material klastik halus sampai kasar pada Formasi Lidah, Formasi Pucangan dan Formasi Kabuh. Pada Kala Pleistosen Akhir terjadi peningkatan aktivitas gunungapi sehingga menghasilkan endapan piroklastik (Formasi Notopuro) pada lingkungan darat. Berikutnya kegiatan tektonik tidak mengalami pergerakan yang signifikan sehingga membentuk morfologi seperti sekarang ini.

Soekardi (1992) menuturkan bahwa secara geologi Kota Surabaya tersusun atas endapan batuan sedimen berumur Miosen hingga Plistosen. Hal ini sejalan dengan stratigrafi regional Kota Surabaya yang berada pada Zona Kendeng menurut Pringgoprawiro (1983). Batuan sedimen penyusunnya merupakan bagian dari Zona Kendeng dengan Formasi Sonde (*Upper Kalibeng*), Lidah, Pucangan, dan Formasi Kabuh. Batuan dasar dari Kota Surabaya ini berumur Pliosen (*pre-tertiary*) yang berada pada Formasi Lidah. Dimana formasi ini berada

pada kedalaman 250 – 300 m. Surabaya juga merupakan cekungan endapan alluvial muda yang merupakan hasil dari endapan laut dan sungai, tuf serta batupasir.

Menurut Bahri dan Madlazim (2012), Kota Surabaya didominasi oleh daerah dataran rendah, dimana 80% merupakan endapan alluvial dan sisanya merupakan perbukitan rendah yang terbentuk oleh tanah hasil pelapukan batuan tersier/tua. Surabaya Timur, Utara dan Selatan tergolong kedalam dataran rendah dengan kemiringan $< 3\%$ yang letaknya pada ketinggian < 10 m dari permukaan laut. Endapan alluvial sungai dan endapan pantai ini membentuk daerah dataran rendah. Endapan Sungai Brantas dan endapan Sungai Rowo membentuk bagian tengah Kota Surabaya. Endapan Sungai Brantas ini berasal dari material gunungapi yang berada di hulu dan beberapa rombakan sebelumnya. Endapan ini berupa pasir (0,075 mm – 0.2 mm) dan kerikil (2 mm – 75 mm). Pada Bagian timur dan utara hingga di sepanjang Selat madura dibentuk oleh endapan pantai yang masuk ke daratan sampai ± 5 km. Endapan ini terdiri atas lempung kelanauan dengan sisipan tipis yang mengandung banyak kepingan kerang.

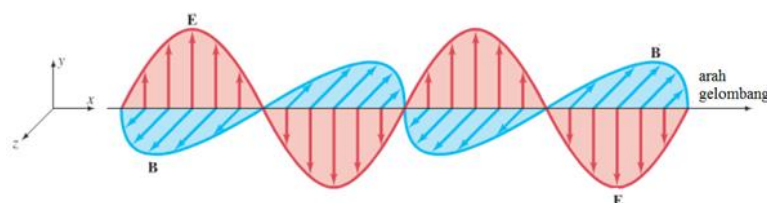
2.1.2 Gelombang Elektromagnetik

Teori gelombang elektromagnetik pertama kali dikemukakan oleh James Clerk Maxwell (1831–1879). Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang memancar tanpa memerlukan media rambat (sama seperti radiasi) yang membawa muatan energi listrik dan magnet (elektromagnetik). Dikarenakan tidak memerlukan media perambatan, maka gelombang elektromagnetik dapat juga disebut sebagai radiasi eletromagnetik (Halliday et al., 2013).

Maxwell mengemukakan hipotesis yang mengacu pada tiga aturan dasar listrik dan magnet yaitu:

1. Muatan medan listrik dapat menghasilkan medan listrik di sekitarnya, yang besarnya ditunjukkan oleh Hukum Coulomb.
2. Muatan atau arus listrik yang mengalir dapat menghasilkan medan magnet di sekitarnya, yang besar dan arahnya ditunjukkan oleh Hukum Bio-Savart atau Hukum Ampere.
3. Perubahan medan magnet dapat menimbulkan GGL induksi yang dapat menghasilkan medan listrik dengan aturan berdasarkan Hukum Induksi Faraday.

Hipotesis Maxwell menyatakan bahwa karena perubahan medan magnet (B) dapat menimbulkan medan listrik (E), maka perubahan medan listrik pun dapat menimbulkan perubahan medan magnet. Perubahan dari medan listrik dan perubahan dari medan magnetik ini akan menghasilkan gelombang medan listrik dan gelombang medan magnet yang dapat merambat di ruang hampa. Gelombang medan listrik (E) dan medan magnet (B) ini kemudian dikenal dengan gelombang elektromagnetik.



Gambar 2.5 Ilustrasi Gelombang Elektromagnetik; Gelombang Elektrik (E) dan Gelombang Magnetik (B)

Komponen dari gelombang elektromagnetik terdiri atas gelombang elektrik (E) dan gelombang magnetik (B) yang saling tegak lurus. Bentuk gelombang elektromagnetik

menyerupai bentuk gelombang transversal pada umumnya, namun pada gelombang elektromagnetik terdapat muatan energi listrik dan magnetik dimana medan listrik (E) selalu tegak lurus terhadap medan magnet (B) yang keduanya menuju ke arah gelombang (Alonso dan Finn, 1992).

Prinsip gelombang elektromagnetik mengacu pada Persamaan Maxwell yang terdiri atas empat persamaan medan. Persamaan Maxwell menjelaskan bagaimana medan listrik dan medan magnet dapat terjadi (Muniroh, 2020). Pada ruang hampa atau pada medium udara, Persamaan Maxwell dinyatakan sebagai:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

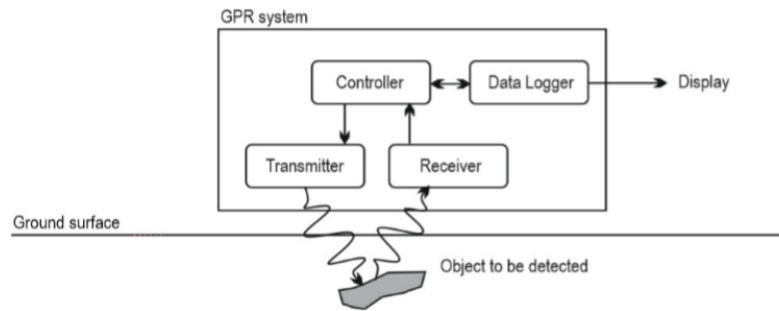
$$\nabla \times B = \epsilon_0 \mu_0 + \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

Dengan E merupakan kuat medan listrik (V/m), B merupakan induksi magnet (Wb/m^2), t adalah waktu (s), ϵ_0 merupakan permitivitas listrik dalam ruang vakum ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$) dan μ_0 adalah permeabilitas magnet dalam ruang vakum ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) (Griffiths et al., 1999).

2.1.3 Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR)

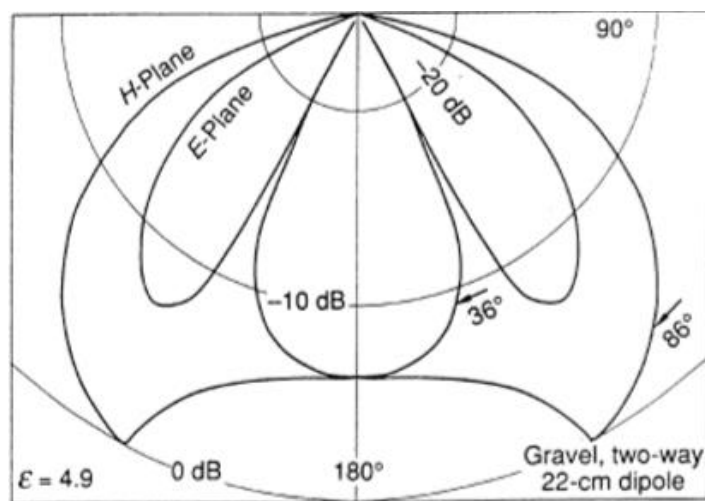
Ground Penetrating Radar (GPR) atau Georadar merupakan metode geofisika dengan prinsip elektromagnetik (EM), metode ini menggunakan gelombang radio yang diaplikasikan untuk eksplorasi *very near surface* (dekat permukaan), umumnya dalam skala kecil. Penetrasi kedalaman dari metode GPR dapat mencapai kurang lebih 10 meter. Prinsip kerja instrumen GPR yaitu mentransmisikan pulsa radar dari antenna pemancar (*transmitter*) ke dalam tanah dan merekam gelombang yang dipantulkan dari bawah permukaan oleh antenna penerima (*receiver*) (Conyers, 2016). Kedalaman atau penetrasi yang dapat dicapai dari metode GPR ini bergantung pada besar frekuensi yang digunakan. Semakin kecil frekuensi *transmitter* yang digunakan dalam pengukuran, maka akan semakin besar kedalaman penetrasi yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya.

Georadar bekerja dengan mentransmisikan gelombang radar (*Radio Detection and Ranging*) ke dalam medium target, selanjutnya gelombang tersebut dipantulkan kembali ke permukaan dan diterima oleh *receiver* (**Gambar 2.5**), dari hasil refleksi didapatkan berbagai macam objek yang terdeteksi dan terekam dalam radargram. Georadar terdiri dari sebuah pembangkit sinyal, antenna *transmitter*, dan *receiver*. Sinyal yang dipancarkan ditransmisikan sebagai pulsa yang tidak terserap oleh medium bumi tetapi dipantulkan dalam kurun waktu tertentu. Mode konfigurasi pada georadar terdiri dari mode monostatik dan bistatik. Mode monostatik yaitu ketika *transmitter* dan *receiver* digabung dalam satu antenna, sedangkan mode bistatik yaitu ketika kedua antenna memiliki jarak pemisah (Bahri et al., 2009).



Gambar 2.6 Prinsip Kerja Metode GPR (Ciampoli et al., 2019)

Pada dasarnya metode GPR menggunakan prinsip penjalaran gelombang elektromagnetik dengan frekuensi 10 MHz - 1 GHz. Kelebihan dari metode ini yaitu bersifat non-destruktif dan memiliki resolusi tinggi. Namun metode ini memiliki keterbatasan yaitu kedalaman penetrasi yang dangkal. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke dalam bumi akan direkam kembali oleh antenna pada saat gelombang telah mencapai permukaan. Gelombang elektromagnetik diteruskan, dipantulkan dan dihamburkan oleh struktur dan anomali yang berada di bawah permukaan. Gelombang elektromagnetik yang dipantulkan dan dihamburkan akan direkam oleh antenna (*receiver*) di permukaan. Metode ini dapat menghasilkan gambaran bawah permukaan dengan resolusi yang tinggi terhadap kontras dielektrik material (Elfarabi et al., 2017).



Gambar 2.7 Ilustrasi Penjalaran Gelombang GPR (Reynolds, 1997)

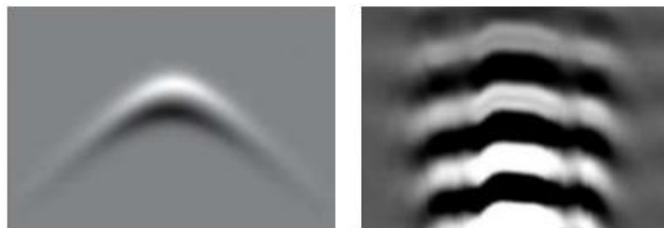
Metode GPR sangat baik digunakan dalam investigasi struktur beton dan jalan, pemetaan struktur lapisan (urutan sedimen), penentuan kedalaman air tanah, dan penentuan infrastruktur yang tertimbun dibawah tanah seperti pipa, terowongan dan kabel listrik. Metode GPR sangat cocok digunakan terutama pada eksplorasi material berbahan logam karena gelombang EM yang digunakan dalam metode ini sangat sensitif terhadap keberadaan objek yang memiliki konduktivitas tinggi (Bahri et al., 2015).

2.1.3.1 Akuisisi Metode GPR

Metode GPR termasuk ke dalam sistem *Electromagnetic Subsurface Profiling (ESP)*, metode ini bekerja dengan memanfaatkan pengembalian gelombang elektromagnet yang dipancarkan melalui permukaan tanah dengan perantara antenna. Pemancaran dan pengembalian gelombang elektromagnet berlangsung cepat sekali dalam satuan waktu *nanosecond* (Budiono

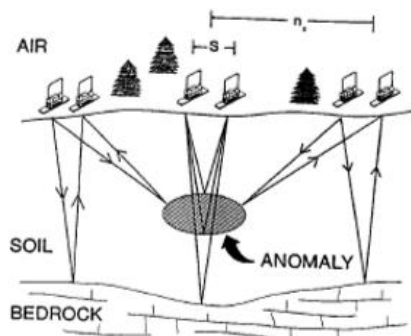
et al., 2010). Masing-masing instrumen GPR mempunyai jangkauan kedalaman yang berbeda-beda. Perbedaan jangkauan kedalaman tersebut dikarenakan masing-masing instrument GPR mempunyai spesifikasi antena dengan frekuensi yang berbeda-beda. Oleh karena itu pemilihan frekuensi antena yang digunakan harus disesuaikan dengan objek yang akan dideteksi. Langkah pengambilan data dengan metode GPR meliputi survei awal pada lokasi pengukuran, memberikan tanda/*marking* menggunakan GPS pada lokasi lintasan pengambilan data. Penentuan parameter akuisisi data seperti besar *bandwidth* frekuensi yang akan digunakan, berikutnya pengambilan data dengan instrumen di setiap lintasan pengukuran. Pada saat melakukan akuisisi data, alat juga dijalankan dengan cara didorong (Solihin et al., 2017).

Selama perekaman data GPR, sinyal yang dipantulkan dari dalam tanah berikutnya diperkuat dan ditampilkan secara *real time* agar dapat dilakukan pengamatan langsung sebelum berikutnya dilakukan proses pasca-akuisisi dan pemodelan. Bentuk refleksi yang dihasilkan dari disebut dengan hiperbola. Hiperbola merupakan refleksi penting karena dihasilkan dari "sumber titik" di tanah seperti batu, puncak dinding, atau objek lain yang merupakan fitur terisolasi. Pada umumnya objek seperti pipa, baik dari bahan besi maupun PVC akan menghasilkan pantulan yang sangat kuat serta menunjukkan respon berbentuk hiperbola pada radargram, meskipun respon tersebut data mengindikasikan objek lain seperti kabel, beton maupun material lainnya. Apabila di dalam pipa terdapat air, maka pada radargram akan tampak juga pola air di dalamnya (Skolnik, 2008).



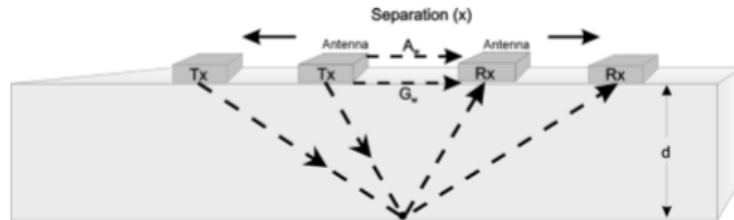
Gambar 2.8 Pola Radargram Pipa Besi (*Kiri*) dan Pipa yang Terdapat Air (*Kanan*) (Skolnik, 2008)

Akuisisi data GPR dilakukan dengan mengukur di setiap lintasan dengan dugaan adanya objek target yang ingin dideteksi dengan menggunakan konfigurasi survey tertentu. Konfigurasi yang paling sering digunakan dalam survey GPR yaitu *common-offset*. Dalam survei *common-offset*, jarak antara pemancar dan penerima tetap. Data dikumpulkan setiap kali pasangan pemancar-penerima dipindahkan ke posisi baru. Survei *common-offset* efektif untuk menemukan pipa, terowongan, dan benda padat yang tertimbun.



Gambar 2.9 Ilustrasi Konfigurasi *Common-Offset* (Annan, 2003)

Konfigurasi berikutnya yaitu *common-midpoint* (CMP) yang digunakan untuk memperoleh perkiraan kecepatan sinyal radar terhadap kedalaman dengan mengatur variasi jarak antenna dan mengukur perubahan dalam waktu (Jol, 2008). Pada konfigurasi CMP, jarak antara pemancar dan penerima diubah untuk setiap kali pengukuran. Namun, titik tengah antara pemancar dan penerima tetap sama.



Gambar 2.10 Ilustrasi Konfigurasi *Common-Midpoint* (Annan, 2003)

2.1.3.2 Instrumentasi GPR

Pada instrumen GPR, salah satu bagian utama dari keseluruhan sistem GPR adalah antenna. Antena GPR harus dapat membuat dan mendeteksi medan elektromagnetik. Sistem GPR terdiri dari dua antena yaitu antena pengirim (Tx) dan antena penerima (Rx). Antena pengirim harus menerjemahkan tegangan eksitasi ke bidang temporal dan spasial yang dapat diprediksi. Sedangkan antena penerima harus mendeteksi variasi temporal komponen vektor medan elektromagnetik yang dibuat oleh antena pengirim dan respons pada permukaan tanah. Adapun karakteristik antena GPR harus memenuhi persyaratan yaitu sebagai sumber harus dapat mengirimkan pulsa radar yang tepat sehingga dapat mendeteksi lokasi objek-objek bawah permukaan dan respon antara pemancar dan penerima harus tetap terhadap ruang dan waktu (tidak berubah-ubah) (Annan, 2003).

Penetrasi kedalaman dari gelombang radar bergantung dengan besar frekuensi antenna yang digunakan. Semakin kecil frekuensi yang digunakan maka akan semakin dalam penetrasi yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya. Penentuan dari besar frekuensi antenna GPR yang digunakan bergantung pada jenis tanah atau batuan pada area pengukuran dan target penetrasi serta resolusi yang ingin dihasilkan. Semakin kecil frekuensi antenna maka semakin dalam penetrasi kedalaman namun resolusi data akan semakin menurun. Semakin besar frekuensi antenna maka penetrasi kedalaman akan terbatas namun dihasilkan data dengan resolusi yang baik. Adapun hubungan antara *bandwith* frekuensi antenna dengan penetrasi kedalaman disajikan pada Tabel dibawah.

Tabel 2.1 Resolusi, Bandwith Frekuensi dan Kedalaman Penetrasi Sistem GPR (Annan, 2003)

Kedalaman Maksimum (m)	Resolusi (m)	Envelope Width (ns)	Bandwith Frekuensi (MHz)
0.1	0.001	0.02	50000
1	0.01	0.2	5000
10	0.1	2	500
100	1	20	50

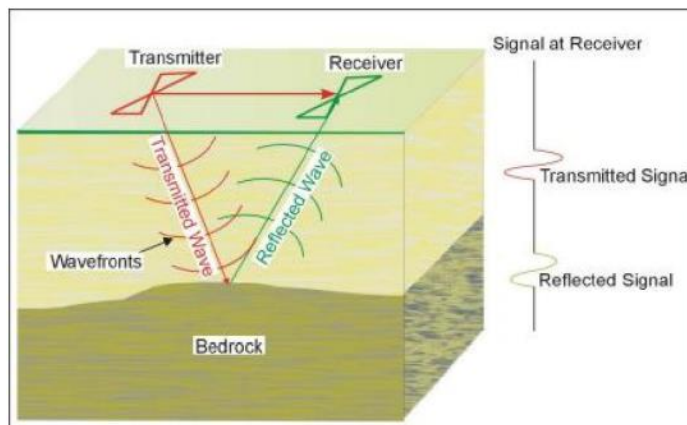
Selain antena GPR, resolusi juga merupakan salah satu aspek penting dalam sistem GPR. Resolusi GPR ditentukan oleh kedalaman dari penetrasi gelombang, penetrasi kedalaman sendiri dikendalikan oleh *bandwidth* frekuensi yang ditransmisikan oleh antena (Conyers,

2016). Resolusi GPR terdiri dari dua komponen, yaitu resolusi kedalaman atau jarak dan resolusi sudut. Resolusi kedalaman oleh diasumsikan sebagai 1/100 dari kedalaman maksimum. Berdasarkan Annan (2003) persamaan resolusi dari GPR adalah sebagai berikut:

$$\Delta r \approx \frac{d_{max}}{100} \quad (2.5)$$

2.1.4 Prinsip Dasar Metode GPR

Prinsip dasar dari metode GPR yaitu metode ini bekerja dengan memanfaatkan pemantulan sinyal (**Gambar 2.11**). Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh *transmitter* akan dipantulkan kembali ke permukaan ketika bertemu dengan bidang batas perlapisan. Pantulan gelombang elektromagnetik ini akan ditangkap oleh *receiver* dan kemudian ditampilkan pada data *display* secara *real-time* (Sugiarto et al., 2018). Secara lebih rinci, rangkaian pemancar akan menghasilkan pulsa listrik dalam bentuk PRF (*Pulse Repetition Frequency*), energi, dan durasi tertentu. Pulsa ini akan dipancarkan oleh antenna ke dalam tanah dan akan mengalami atenuasi sinyal selama perambatannya di dalam tanah. Jika tanah memiliki sifat homogen, maka sinyal yang dipantulkan akan sangat kecil. Jika pulsa menabrak suatu objek *non-homogen* di dalam tanah, maka akan ada sinyal yang dipantulkan ke antenna penerima. Berikutnya sinyal ini kemudian diproses oleh rangkaian penerima. Kedalaman dari objek terukur dapat diketahui dengan mengukur selang waktu antara pemancaran dan penerimaan pulsa. Dalam selang waktu ini, pulsa akan merambat bolak balik dari antenna ke objek dan kembali lagi ke antenna (Bahri et al., 2009).



Gambar 2.11 Konsep Dasar Metode GPR (Bahri et al., 2009)

Metode GPR menggunakan prinsip penjaralan gelombang elektromagnetik. Dimana sifat fisis dari metode ini yaitu Konstanta Dielektrik (k). Sinyal GPR termasuk ke dalam gelombang elektromagnetik yang dapat diuraikan dengan Persamaan Maxwell, dimana persamaan ini menjelaskan sifat elektromagnetik secara matematis dan hubungan konstitutif yang mengukur properti sebuah objek atau materi (Annan, 2003). Gelombang mikro yang merambat melalui tanah atau batuan dapat terpengaruh akibat dari adanya sifat dielektrik pada tanah atau batuan di sekitarnya. Sifat dielektrik ini berperan sebagai penghambat atau penghalang dari gelombang mikro ketika merambat kedalam tanah dengan cepat, dikarenakan tanah berperan sebagai penyimpan gelombang mikro dan mengisi muatan tanah. Apabila tanah atau suatu material ini tidak memiliki sifat dielektrik (atau lemah) maka gelombang dapat menjalar lebih cepat. Gelombang mikro akan menjalar mendekati kecepatan cahaya dalam ruang hampa jika nilai dielektrik sebesar 1 (Goodman dan Piro, 2013).

2.1.4.1 Prinsip Matematis Elektromagnetik pada GPR

Sinyal yang dipancarkan dari pemancar pada metode GPR menggunakan prinsip gelombang elektromagnetik. Sifat gelombang elektromagnetik ini dapat diuraikan melalui Persamaan Maxwell yang menjelaskan sifat dari elektromagnetik secara matematis dan konstitutif dalam mengukur properti fisik sebuah objek maupun materi. Berdasarkan Annan (2003), secara matematis medan elektromagnetik dan sifat-sifat terkait dinyatakan sebagai:

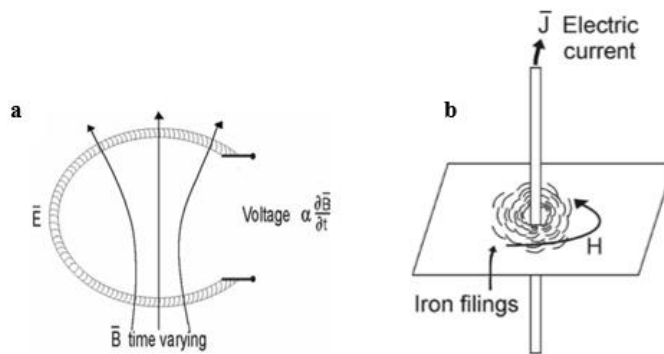
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.8)$$

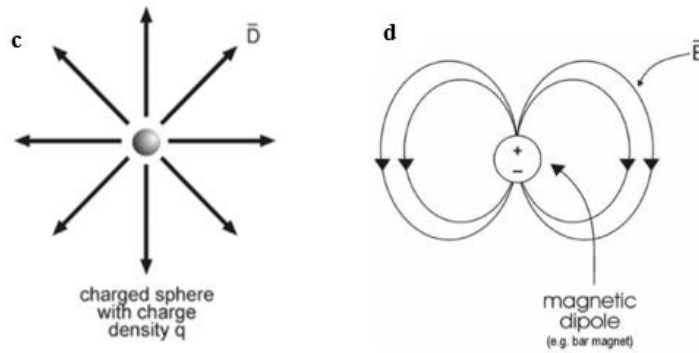
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

Dengan \vec{E} adalah vektor kuat medan listrik (V/m), \vec{B} adalah vektor rapat flux magnetik atau juga medan magnetik (Wb/m² atau Tesla), \vec{H} merupakan intensitas medan magnet (A/m), \vec{D} merupakan vektor perpindahan listrik (Coulomb/m²), \vec{J} merupakan vektor rapat arus listrik (A/m²) dan q merupakan muatan listrik.



Gambar 2.12 a. Persamaan 1 Maxwell Mengenai Hukum Faraday dan **b.** Persamaan 2 Maxwell Mengenai Hukum Ampere (Annan, 2003)

Persamaan (2.6) menjelaskan mengenai pengamatan Faraday bahwa medan magnet yang berubah terhadap waktu dapat menyebabkan muatan listrik bergerak dan menghasilkan medan listrik. Pada **Gambar 2.12 (a)** diketahui bahwa medan magnet yang berubah terhadap waktu dapat menghasilkan medan listrik *loop* tertutup. Contoh umum dari peristiwa ini adalah generator listrik dimana magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan dalam *loop* kawat. Persamaan (2.7) merupakan dasar dari pengamatan Ampere yang menyatakan bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Material bersifat magnetik akan memiliki perilaku yang sama ketika terdapat magnet lainnya atau dialiri arus listrik. **Gambar 2.12 (b)** menggambarkan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet. Konsep ini di demonstrasikan dengan serbuk besi pada selembar kertas yang membentuk lingkaran di sekitar kawat pembawa arus (Annan, 2003).



Gambar 2.13 c. Persamaan 3 Maxwell Mengenai Perpindahan Listrik dan **d.** Persamaan 4 Maxwell Mengenai *Loop* Fluks Magnetik (Annan, 2003)

Pada Persamaan (2.8) ditunjukkan bahwa sumber dari medan listrik adalah muatan listrik. Berdasarkan pengamatan Faraday, medan listrik yang memiliki waktu bervariasi akan berbentuk *loop* tertutup ketika terjadi induksi. Medan listrik akan memancar keluar (atau masuk) ketika muatan bebas adalah sumber medan. **Gambar 2.13 (c)** menjelaskan bahwa perpindahan listrik dimulai (atau berakhir) dengan adanya muatan listrik. Muatan magnet bebas tidak pernah diamati di alam; akibatnya, medan magnet harus membentuk *loop* tertutup yang menjelaskan Persamaan (2.9) dan membedakan perilaku fluks magnet dari karakter medan listrik. **Gambar 2.13 (d)** di atas menjelaskan bahwa *loop* fluks magnetik akan menutup sendiri jika tidak ada muatan magnet bebas. Dari keempat persamaan di atas, seluruh teori klasik elektromagnetik (induksi, gelombang radio, resistivitas, teori rangkaian, dll.) dapat diturunkan untuk mengkarakterisasi sifat-sifat dari material (Annan, 2003).

Berdasarkan Kafi (2016), hubungan antara besaran-besaran \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} , \vec{D} , dan \vec{J} pada Persamaan (2.6), (2.7), (2.8) dan (2.9) di atas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.10)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.11)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (2.12)$$

Dengan μ merupakan permeabilitas magnet (Wb/A), ϵ merupakan permitivitas listrik (Farad/m), σ merupakan konduktivitas (Ω/m) dan ρ merupakan tahanan jenis (Ωm).

Persamaan (2.10), (2.11) dan (2.12) di atas merupakan persamaan konstitutif yang menjelaskan secara makroskopis (atau perilaku rata-rata) mengenai bagaimana respon dari elektron, atom, dan molekul secara massal terhadap penerapan medan EM. Persamaan di atas juga menjelaskan bahwa dalam kasus metode GPR, terdapat parameter fisis yang menentukan pergerakan gelombang elektromagnetik dalam suatu medium yaitu permeabilitas magnetik (μ), permitivitas dielektrik (ϵ) dan konduktivitas material (σ). Permeabilitas magnetik (μ) menjelaskan tentang bagaimana sifat intrinsik atom dan momen magnetik dari suatu molekul merespon terhadap medan magnet. Permitivitas dielektrik (ϵ) menjelaskan bagaimana muatan terbatas dapat berpindah sebagai respon terhadap medan listrik. Sedangkan konduktivitas material (σ) menggambarkan bagaimana pergerakan muatan bebas dapat menciptakan arus ketika terdapat medan listrik (P. Annan, 2003). Pada pengaplikasian metode GPR nilai konduktivitas material (σ) dan permitivitas dielektrik (ϵ) merupakan hal paling penting yang harus diutamakan.

Selain itu, diketahui bahwa kecepatan cahaya pada ruang hampa yaitu:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.13)$$

Pada medium linear dan homogen, kecepatan gelombang elektromagnetik (v) dalam satuan m/s dirumuskan sebagai:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.14)$$

Berdasarkan Persamaan (2.13) dan (2.14) diatas maka didapatkan persamaan Konstanta Dielektrik (k) atau Permittivitas Dielektrik Relatif (ϵ_r) sebagai berikut:

$$\frac{c}{v} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}} \quad (2.15)$$

$$\frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.16)$$

Menurut Supriyanto (2007), untuk material non magnetik (non metalik) nilai permeabilitas magnetiknya (μ) mendekati nilai permeabilitas vakum (μ_0) sehingga nilai perbandingan keduanya dianggap sama dengan satu, maka:

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r} \text{ atau } \epsilon_r = \frac{c^2}{v^2} \quad (2.17)$$

Dimana, c merupakan kecepatan cahaya pada ruang hampa, v merupakan kecepatan gelombang elektromagnetik dan ϵ_r merupakan konstanta dielektrik (Griffiths *et al.*, 1999).

Dari Persamaan (2.17) diketahui bahwa ϵ_r sama dengan k .

$$\epsilon_r = k \quad (2.18)$$

$$\frac{c^2}{v^2} = \frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.19)$$

Maka,

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

Dengan ϵ_0 merupakan permitivitas ruang hampa (vakum) dengan satuan F/m atau C²/Nm².

2.1.4.2 Sifat Fisis Material

Pemantulan dari sinyal yang ditransmisikan dihasilkan oleh adanya perubahan sifat listrik, seperti pada batas-batas antara unit stratigrafi yang berbeda, muka air tanah, dan adanya rongga atau pipa terkubur. Energi gelombang yang dipantulkan dan kedalaman dari penetrasi yang dicapai tergantung pada sifat listrik, konstanta dielektrik, konduktivitas listrik, kecepatan serta sifat atenuasi dari tanah. Sejumlah sifat fisik dan kimia bawah permukaan turut mempengaruhi kemampuan gelombang radar untuk disebarkan dan dipantulkan kembali dari dalam tanah, termasuk sifat listrik dan magnet, kadar air, litologi, densitas, dan porositas. Seperti yang disajikan pada **Tabel 2.2** mengenai sifat-sifat fisis berbagai medium seperti konstanta dielektrik (k), konduktivitas (σ), kecepatan (v) dan atenuasi (a).

Tabel 2.2 Nilai Parameter Fisis Berbagai Material (Annan dan Cosway, 1992; Goodman dan Piro, 2013; Deffian et al., 2019)

Nomor	Material	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	a (dB/m)
1	Udara	1	0	0,3	0
2	Air Sulingan	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
3	Air Tawar	80	0,5	0,033	0,1
4	Air Laut	80	3×10^3	0,01 – 0,025	103
5	Pasir (Kering)	3 – 5	0,01	0,15	0,01
6	Pasir (Basah)	20 – 30	0,1 – 1	0,06	0,03 – 0,3
7	Batugamping	4 – 8	0,5 – 2	0,12	0,4 – 1
8	Batuserpih	5 – 15	1 – 100	0,09	1 – 100
9	Batupasir	6	40	0,12	3,04
10	Lanau	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
11	Lempung	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
12	Granit	4 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
13	Garam (Kering)	5 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1
14	Es	3 – 4	0,01	0,16	0,001
15	Aspal	6	1	0,123	0,08
16	Beton	7	0,1	0,113	0,01
17	Tanah Pasiran (Kering)	2,5	0,14	0,189	0,02
18	Tanah Pasiran (Basah)	25	7	0,06	0,26
19	Tanah Lempungan (Kering)	2,4	0,3	0,194	0,04

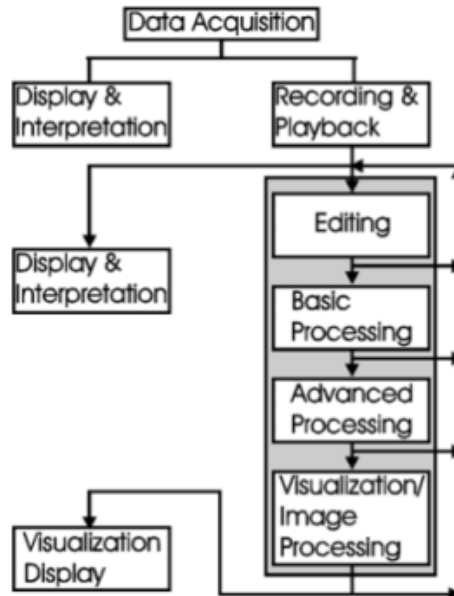
Menurut (Ghazali et al., 2019), pemantulan sinyal GPR dapat terjadi ketika permitivitas dielektrik relatif (ϵ_r) dari arus dan medium berikutnya memiliki nilai yang berbeda, perbedaan utamanya ditentukan oleh sifat bahan ataupun faktor luar seperti kandungan air (*water content*) dalam suatu material. Permitivitas dielektrik relatif (RDP) atau juga disebut konstanta dielektrik, memperhitungkan sifat listrik dan magnetik bahan yang terkubur dan merupakan ukuran kemampuan bahan untuk menyimpan muatan dari gelombang elektromagnetik yang digunakan dan kemudian mentransmisikan energi tersebut (Rao et al., 2019). Gelombang radar tidak dapat menembus logam sebaliknya, ketika gelombang bertemu dengan logam maka gelombang akan dipantulkan secara keseluruhan kembali ke permukaan dan dengan demikian menghalangi deteksi endapan di bawah objek logam (Conyers, 2004).

Dalam metode GPR, permitivitas merupakan besaran yang penting. Permitivitas (ϵ) menggambarkan kemampuan suatu bahan untuk menyimpan dan mentransmisikan muatan listrik yang diinduksi oleh medan EM. Permitivitas Relatif (ϵ_r) atau Konstanta Dielektrik (k) menggambarkan kemampuan suatu bahan untuk menyimpan dan mentransmisikan muatan listrik yang diinduksi oleh medan EM yang bervariasi terhadap kedalaman serta perbedaan material bawah permukaan. Nilai konstanta dielektrik dari setiap material di bawah permukaan tanah sangat bervariasi dan berbeda-beda (Annan, 2009). Semakin kecil nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) maka kecepatan rambat dari gelombang elektromagnetik pada suatu material akan semakin besar dan mengakibatkan energi yang dipancarkan akan semakin berkurang (Supriyanto, 2007).

2.1.5 Pengolahan Data GPR

Hampir keseluruhan dari analisis data GPR memerlukan beberapa perlakuan (*treatment*) pada data mentah sebelum konstruksi gambar dari profil jarak dekat dapat diimplementasikan. Pemrosesan sinyal Radargram (RSP) meliputi *basic handling*, penggunaan *filter* khusus untuk meningkatkan resolusi dan menyesuaikan refleksi digital, serta untuk menghilangkan *noise*

yang terkandung dalam *raw data* (Goodman dan Piro, 2013). Jenis pemrosesan sinyal yang diperlukan akan tergantung pada berbagai faktor yang diamati dalam *raw data*. Ada berbagai RSP yang penting dan beberapa hanya digunakan jika ditemukan adanya *noise* tertentu dalam data. Alur pemrosesan sinyal radargram secara umum ditunjukkan pada **Gambar 2.9** dibawah.



Gambar 2.14 Gambaran Umum Alur Pengolahan Data Metode GPR (Annan, 2003)

Pengolahan dasar yang sering dilakukan dalam mengolah data mentah GPR yaitu:

- a) *Adjust Signal Position*
- b) *DC Removal*
- c) *Dewowing*
- d) *Median Filter*
- e) *Inverse Amplitude Decay*
- f) *Karhunan-Loeve Filter*
- g) *Bandpass Filter*
- h) *1-D Velocity Model*
- i) *Phase Shifting Migration*
- j) *Time to Depth Conversion*

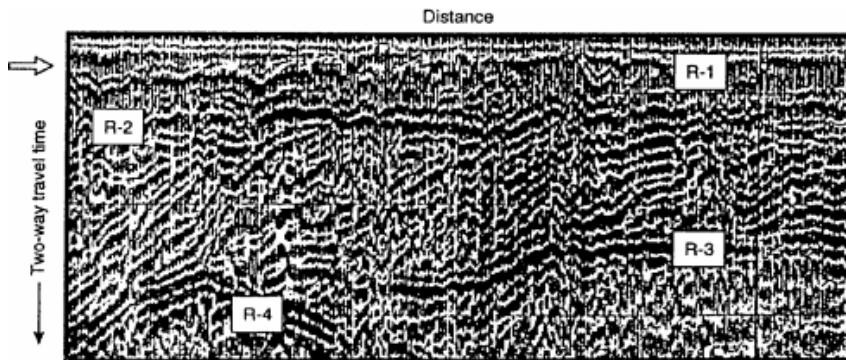
2.1.5.1 *Adjust Signal Position*

Adjust signal position merupakan fitur dalam pengolahan data GPR yang timbul dari kendala fisik, bahwa sistem GPR memiliki pita terbatas sehingga tidak dapat memancarkan atau menerima "dengan benar" impuls dengan kenaikan seketika (Persico, 2014). Hal ini terjadi karena ada penundaan (*delay*) antara waktu instan ketika generator mulai menghasilkan impuls dan waktu instan ketika propagasi sinyal di lingkungan eksternal dimulai.

Zero-timing merupakan parameter penting, karena mempengaruhi pengambilan kedalaman waktu dari target dan juga evaluasi kecepatan perambatan gelombang. Cara kerja dari *adjust signal position* adalah dengan membawa *event* refleksi pertama yang mengindikasikan *ground surface wave* ke nol. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui kedalaman target dengan akurat.

2.1.5.2 DC Removal

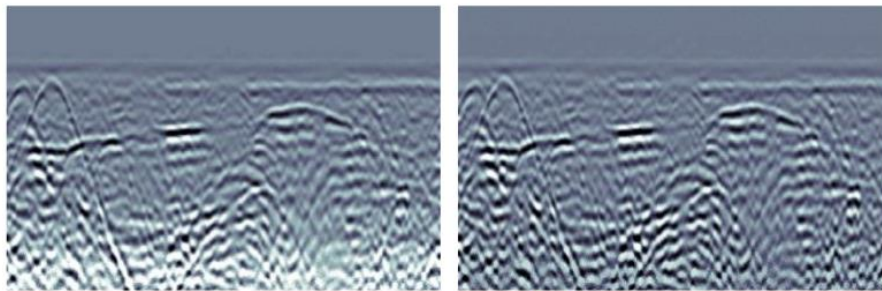
Sebagian besar data *raw* pengukuran GPR memerlukan beberapa *gaining* pasca pemrosesan agar visualisasi pulsa radar memiliki resolusi yang lebih baik. Sebagai akibat dari penyebaran sumber gelombang radar bawah dan atenuasi sinyal radar ketika melewati medium bawah tanah, kedatangan gelombang refleksi yang terekam akan hampir selalu memiliki amplitudo yang lebih rendah daripada kedatangan sebelumnya. Untuk memperbaiki ini maka diperlukan *gaining* untuk memperkuat sinyal (Dojack, 2012). Efek dari filter ini adalah untuk menghapus penyimpangan DC dengan sangat efektif dan menggeser sinyal kembali ke garis 0. *DC Shift Removal* berperan dalam menghapus level DC konstan dari setiap jejak (*trace*). Fitur ini dapat digunakan sebagai tambahan atau sebagai pengganti *dewow*.



Gambar 2.15 Contoh Radargram dengan Koreksi DC (Reynolds, 1997)

2.1.5.3 Dewowing

Koreksi ini digunakan pada awal pemrosesan pada data GPR, filter ini digunakan agar dapat menghilangkan *noise* yang memiliki frekuensi sangat rendah. *Wow* merupakan *noise* yang memiliki nilai frekuensi sangat rendah, hal ini terjadi akibat adanya instrumen elektronik yang tersaturasi oleh nilai amplitudo besar dari gelombang langsung dan gelombang udara (Elfarabi et al., 2017).



Gambar 2.16 Profil GPR; Sebelum (Kiri) dan Sesudah Diterapkan Dewow (Kanan) (Dojack, 2012)

2.1.5.4 Median Filter

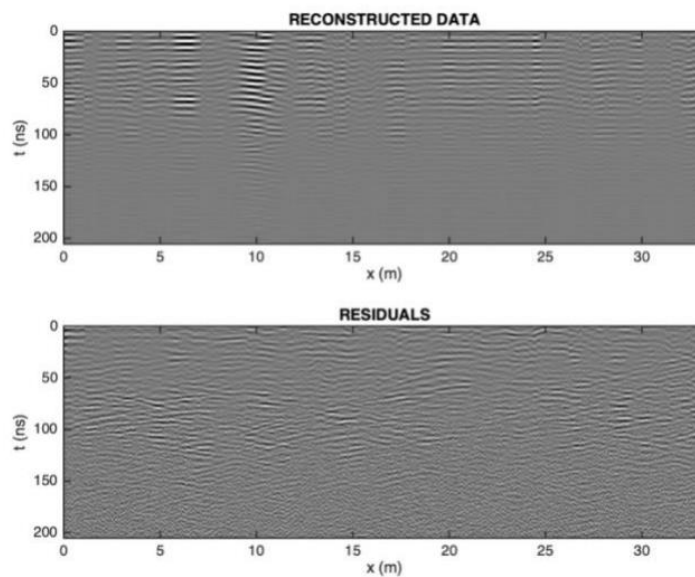
Median filter umumnya digunakan untuk mengurangi noise pada radargram, perannya mirip seperti *mean filter*. Namun, sering kali menghasilkan radargram yang lebih baik daripada *mean filter* dengan mempertahankan detail yang berguna dalam radargram. Pemfilteran median sederhana dilakukan dengan menerapkan filter secara vertikal di sepanjang dan di setiap *trace*, dengan tujuan utama menghilangkan lonjakan noise dengan frekuensi tinggi (Szymczyk, 2013). Pada pengolahan data *median filter* peneliti mencari parameter yang paling optimal dalam dimensi “*time axis*” dan “*scan axis*” (Elfarabi et al., 2017).

2.1.5.5 Inverse Amplitude Decay

Inverse Amplitude Decay digunakan untuk meningkatkan kontras sinyal/penguatan sinyal (*gaining*) dikarenakan sinyal radar yang dipancarkan dari transmitter menjalar sangat cepat dibawah permukaan, sehingga sinyal radar tersebut ter-atenuasi yang menyebabkan informasi sinyal menjadi tidak begitu jelas (kabur). Maka dari itu koreksi ini digunakan untuk memperkuat sinyal tersebut.

2.1.5.6 Karhunen-Loeve Filter

Transformasi Karhunen-Loeve (KLT) digunakan untuk melakukan analisis yang sama seperti analisis Fourier. KLT menggunakan vektor eigen sebagai ganti dari fungsi sinus dalam melakukan analisis. Hasil rekonstruksi sinyal terdiri dari dua data yang dapat dipilih, yaitu data terekonstruksi (*reconstructed data*) atau data residual (*residuals*). Penentuan nilai *eigen vector* didapatkan berdasarkan eksperimen (Annan, 2003).



Gambar 2.17 Hasil Rekonstruksi dan Residual Filter Karhunen-Loeve

2.1.5.7 Bandpass Filter

Filter bandpass merupakan filter untuk menghilangkan frekuensi yang tidak diinginkan dalam *raw data*. Pengaturan filter dimaksudkan untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap noise (Kuo, 2021). Filter bandpass mengharuskan pulsa radargram dikonversi terlebih dahulu ke domain spektral menggunakan Fast Fourier Transforms (FFT). Setelah filter diatur untuk menghapus atau mengurangi komponen frekuensi yang diinginkan, inversi FFT dijalankan untuk mengembalikan spektrum yang difilter ke sinyal radar domain waktu (Dojack, 2012).

2.1.5.8 1-D Velocity Model

1-D Velocity model diperlukan untuk mengoreksi penetrasi *trace* agar sesuai dengan data geologi sehingga domain waktu nantinya dapat diubah menjadi domain kedalaman. Langkah pengolahan data ini juga memberikan pilihan migrasi model sehingga didapat data yang lebih sesuai dengan kondisi daerah pengukuran.

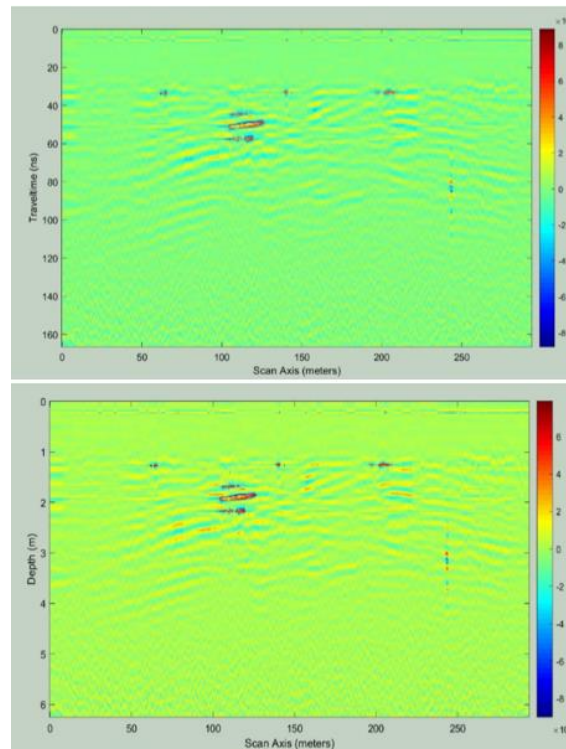
2.1.5.9 Phase Shifting Migration

Phase Shifting Migration merupakan metode yang digunakan untuk memindahkan/mengembalikan data GPR ke posisi yang sebenarnya baik secara horizontal maupun vertikal. Adanya ketidakpastian posisi pada data ini disebabkan oleh efek difraksi. Efek

difraksi dapat terjadi ketika gelombang elektromagnetik bertemu dengan puncak dari suatu diskontinuitas sebagai akibat dari perbedaan struktur geologi seperti sesar ataupun lipatan (Elfarabi et al., 2017).

2.1.5.10 Time to Depth Conversion

Time to Depth Conversion merupakan suatu metode dalam pengolahan data yang tujuannya adalah untuk mengkonversi data GPR dari domain waktu menjadi domain kedalaman untuk memudahkan interpretasi (Elfarabi et al., 2017).



Gambar 2.18 *Time to Depth Conversion*; Sebelum (*Atas*) dan Sesudah (*Bawah*)

2.1.6 Pemodelan 2,5 Dimensi

Menurut MacEachren (2004), pemodelan 2,5 dimensi merupakan proyeksi dua dimensi (2D) dan teknik serupa yang dipakai untuk menampilkan citra/gambar yang menampilkan penampilan secara tiga dimensi (3D) meskipun kenyataannya tidak demikian. Tampilan 2.5D memberikan visualisasi cukup detail meskipun bukan pemodelan 3D. Bagian-bagian gambar dari pemodelan ini merupakan potongan individu dari citra 2D yang disusun sedemikian rupa sehingga dihasilkan model menyerupai pemodelan 3D. Namun pemodelan 2,5D memiliki kekurangan dimana terdapat adanya celah di antara model 2D yang saling berdekatan satu sama lain.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai identifikasi objek terkubur khususnya pipa bawah permukaan menggunakan metode GPR telah dilakukan oleh (Tong, 1993; Amir, 2013; Ghazali et al., 2019; Luga et al., 2019; Deffian et al., 2020; Merkle et al., 2021). Tong (1993) melakukan pengukuran GPR untuk menemukan letak pipa-pipa bawah tanah dengan material penyusun pipa yang berbeda-beda. Hasilnya didapatkan bahwa respon dari pipa besi sangat jelas karena sinyal pantulan yang kuat sebagai akibat dari kontras dielektrik antara pipa besi dan tanah di sekitarnya relatif besar. Dua pipa besi tertutup juga dapat dibedakan dari profil radar. Pipa saluran

pembuangan dan pipa drainase (beton) juga dapat dideteksi dari sifat refleksi ganda dan datar sebagai akibat dari adanya air dan udara di dalam pipa yang memiliki konstanta dielektrik yang berbeda. Namun sulit untuk mendeteksi pipa PVC, karena pantulan sinyal dari pipa PVC sangat lemah. Pantulan yang berasal dari pipa PVC dapat ditingkatkan dengan menerapkan teknik *background removal*. Amir (2013) dalam penelitiannya melakukan survey GPR dengan membuat rancang bangun GPR untuk mendeteksi saluran pipa bawah tanah dan dari rancangan yang dibuat didapatkan kemampuan mendeteksi objek pipa didalam tanah pada kedalaman maksimum dari radar sejauh 15 cm dengan akurasi 96,67% pada jenis tanah berpasir, tanah liat tanah bebatuan dan jenis tanah gambut.

Luga et al., (2019) melakukan survei GPR untuk mengidentifikasi pipa metal dibawah tanah dimana dari 4 lintasan, pipa metal teridentifikasi berada pada lintasan 1 dan lintasan 2 dan berada pada kedalaman kurang dari 1 meter dibawah tanah. Sedangkan Deffian et al., (2020) melakukan survey GPR untuk mendeteksi lokasi pipa PDAM di Bogor, Jawa Barat. Didapatkan hasil bahwa pipa PDAM terletak dikedalaman 1 – 1,2 meter dibawah permukaan. Selain itu dilakukan juga validasi hasil pemodelan dengan *software* geospasial untuk memvalidasi hasil dari metode GPR yang telah dilakukan serta untuk memperbaiki jaringan pipa PDAM wilayah Bogor.

Ghazali et al., (2019) melakukan penelitian untuk mengetahui apakah perbedaan jenis tanah akan mempengaruhi visibilitas dan kedalaman objek terkubur (pipa) pada citra radargram. Penelitian dilakukan dengan memindai pipa logam dan plastik yang terkubur di berbagai jenis tanah yang telah ditentukan sebelumnya. Dilakukan juga pengukuran kedalaman pipa pada radargram dengan kedalaman sebenarnya. Hasilnya didapatkan bahwa respon GPR bervariasi di pasir pantai, lempung, tanah dan batuan tersaturasi, berpori, dan mengandung air. Pengukuran kedalaman pipa pada tanah lempung kurang akurat karena faktor atenuasi yang tinggi pada lempung dibandingkan dengan material lain. Pada jenis pasir pantai, pipa tampak lebih dalam karena *travel time* sebelum diterima kembali oleh GPR. Interpretasi data GPR harus memasukkan pertimbangan variabel-variabel seperti jenis tanah yang dilalui. Pemilihan frekuensi antena juga penting dan harus disesuaikan dengan kondisi tanah yang berbeda.

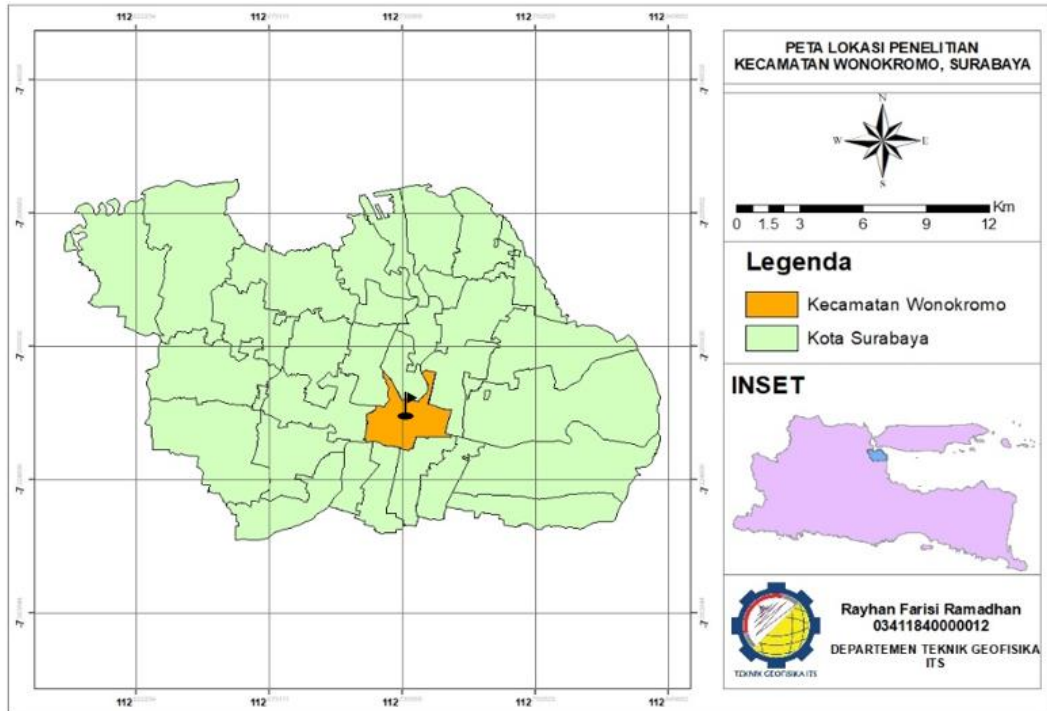
Merkle et al., (2021) menggabungkan metode GPR dengan LiDAR (*Remote Sensing*) untuk pemetaan infrastruktur pada alun-alun Rathausplatz Kota Wina, Austria. Struktur yang diamati pada penelitian ini yaitu pipa-pipa, saluran kabel listrik dan struktur bangunan. Hasilnya didapatkan yaitu radargram hasil pengukuran GPR seperti pipa, saluran air, saluran kabel listrik, dan struktur dinding tua cocok dengan peta hasil pengukuran dengan metode LiDAR. Penggabungan kedua metode ini menghasilkan visualisasi objek secara 3D baik objek diatas permukaan (struktur dinding biara tua) maupun dibawah permukaan (saluran air bawah permukaan, kabel listrik, dan lubang got). Data LiDAR, dapat meningkatkan kemampuan interpretasi data GPR terutama dalam hal struktur permukaan dan bawah permukaan.

Selain diterapkan untuk mendeteksi pipa bawah permukaan, metode GPR juga digunakan untuk mendeteksi objek lain seperti pada penelitian Pramudhita et al., (2021) yang mendeteksi *septic tank* melalui radargram 2D. Hasilnya didapatkan bahwa *septic tank* dengan panjang ± 1 meter dapat dideteksi melalui radargram 2D dengan kondisi *septic tank* lintasan 1 tidak terisi penuh sedangkan *septic tank* lintasan 2 terisi penuh dan lintasan 3 kurang pasti terisi penuh atau tidak. Yulianita et al., (2021) melakukan penelitian identifikasi rembesan air pada struktur badan waduk di salah satu waduk resapan air di Jakarta. Hasil yang tampak pada radargram 2D menunjukkan adanya 4 lapisan tanah pada badan waduk. Anomali yang diduga sebagai rembesan air muncul pada kedalaman 2 meter yang muncul pada beberapa titik dari 4 lintasan pengukuran yang dilakukan. Dilakukan juga validasi dengan metode geolistrik

konfigurasi dipol-dipol agar interpretasi semakin akurat. Dalam bidang mitigasi bencana, Bagaskara et al., (2021) melakukan penelitian identifikasi jasad terkubur dengan menggunakan metode GPR yang tujuannya adalah untuk memudahkan pencarian korban tertimbun akibat adanya bencana. Dengan memindai 2 buah makam, radargram secara akurat menunjukkan kontras amplitudo yang menunjukkan letak jasad terkubur.

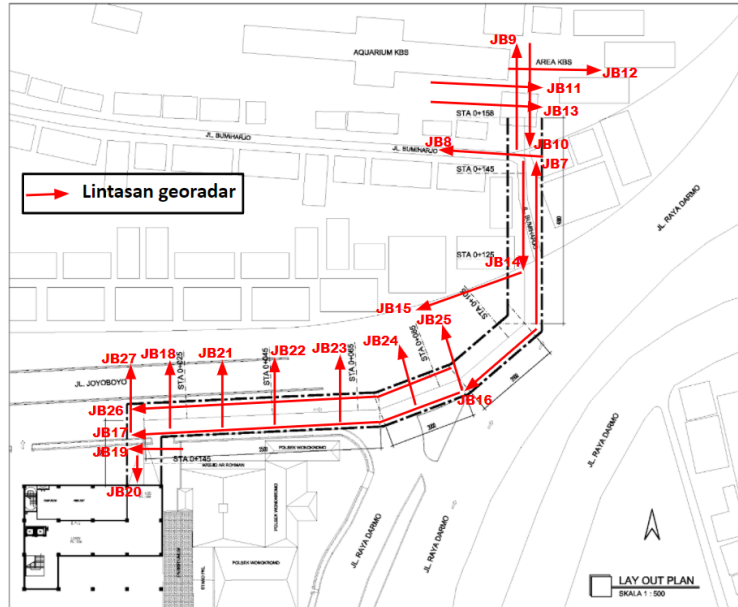
BAB III METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian



Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian

Akuisisi data GPR pada penelitian ini dilakukan di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo. Lokasi pengukuran GPR yaitu di sepanjang jalan yang berada dekat dengan Terminal Joyoboyo, Kelurahan Sawunggaling, Kecamatan Wonokromo, Surabaya. Berdasarkan **Gambar 2.4**, lokasi penelitian berada pada formasi alluvium (Qa). Pada penelitian ini diambil 21 lintasan dimana 9 lintasan berarah S-N, 3 lintasan berarah W-E, 3 lintasan berarah N-S, 4 lintasan berarah E-W, dan 2 lintasan berarah NE-SW. Rancangan desain akuisisi GPR dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.2** dibawah.

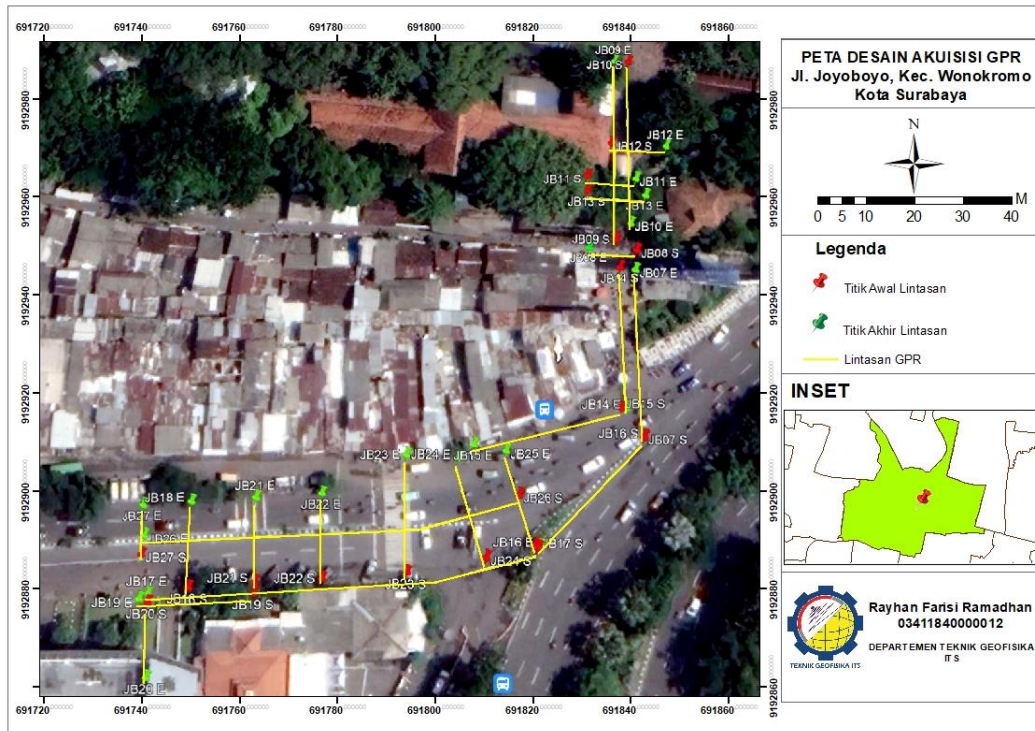


Gambar 3.2 Rancangan Desain Akuisisi Pengukuran GPR

Adapun peta desain akuisisi pengukuran GPR pada lokasi penelitian yaitu di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo, Surabaya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** dibawah.



Gambar 3.3 Overlay Rancangan Desain Akuisisi Pengukuran GPR



Gambar 3.4 Peta Desain Akuisisi Pengukuran GPR

Penjelasan terkait panjang dan arah dari masing-masing lintasan disajikan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Deskripsi Lintasan Pengukuran GPR

No.	Lintasan	Koordinat Awal		Koordinat Akhir		Arah	Panjang (m)
		X UTM	Y UTM	X UTM	Y UTM		
1	JB07	691841,78	9192905,12	691841,25	9192938,52	S - N	33,58
2	JB08	691841,71	9192942,61	691831,88	9192943,42	E - W	9,74
3	JB09	691837,52	9192945,06	691839,11	9192986,31	S - N	41,47
4	JB10	691842,21	9192986,30	691840,73	9192948,37	N - S	38,7
5	JB11	691831,83	9192958,80	691842,10	9192958,09	W - E	10,54
6	JB12	691837,38	9192966,19	691849,19	9192965,81	W - E	11,74
7	JB13	691831,82	9192955,37	691843,96	9192954,33	W - E	11,98
8	JB14	691838,16	9192939,09	691838,60	9192910,66	N - S	28,54
9	JB15	691837,50	9192910,67	691807,54	9192903,15	NE - SW	31,18
10	JB16	691841,78	9192904,90	691820,28	9192883,86	NE - SW	30,38
11	JB17	691819,83	9192883,64	691744,38	9192875,30	E - W	76,22
12	JB18	691752,11	9192876,38	691751,84	9192892,30	S - N	16,14
13	JB19	691764,81	9192875,33	691742,83	9192874,31	E - W	21,98
14	JB20	691744,48	9192873,64	691745,20	9192860,26	N - S	13,66
15	JB21	691764,93	9192877,32	691764,54	9192893,03	S - N	15,58
16	JB22	691777,85	9192878,05	691777,58	9192893,86	S - N	15,26
17	JB23	691794,31	9192879,09	691794,06	9192901,10	S - N	22,14
18	JB24	691809,78	9192881,80	691804,11	9192900,51	S - N	19,26
19	JB25	691819,39	9192884,08	691813,94	9192902,02	S - N	19,1
20	JB26	691816,34	9192893,60	691742,87	9192886,03	E - W	79,02
21	JB27	691742,53	9192882,50	691742,34	9192891,79	S - N	9,42

3.2 Peralatan

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengolahan data GPR yaitu terbagi menjadi perangkat keras dan perangkat lunak.

3.2.1 Perangkat Keras

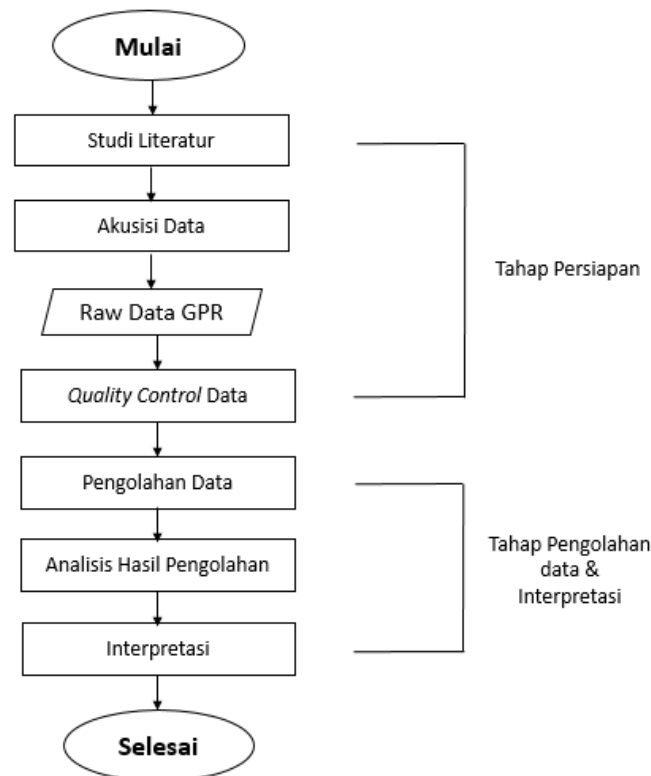
Akuisisi data di lokasi penelitian menggunakan seperangkat instrumen GPR GSSI, *GPS* untuk menentukan posisi pengukuran dan meteran untuk menentukan jarak lintasan pengukuran. Frekuensi yang digunakan yaitu sebesar 270 MHz.

3.2.2 Perangkat Lunak

Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Matlab R2015a, MatGPR R3.1 untuk mengolah data GPR dengan format .DZT. Sedangkan untuk pemodelan 2,5-D menggunakan *software* SketchUp Pro 2021.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun rangkaian kegiatan yang dilakukan dalam tugas akhir ini digolongkan menjadi 2 bagian yaitu tahap persiapan dan tahap pengolahan serta interpretasi. Adapun rangkaian pelaksanaan kegiatan dalam tugas akhir ini secara garis besar dijelaskan dalam diagram alir pada **Gambar 3.5** dibawah.



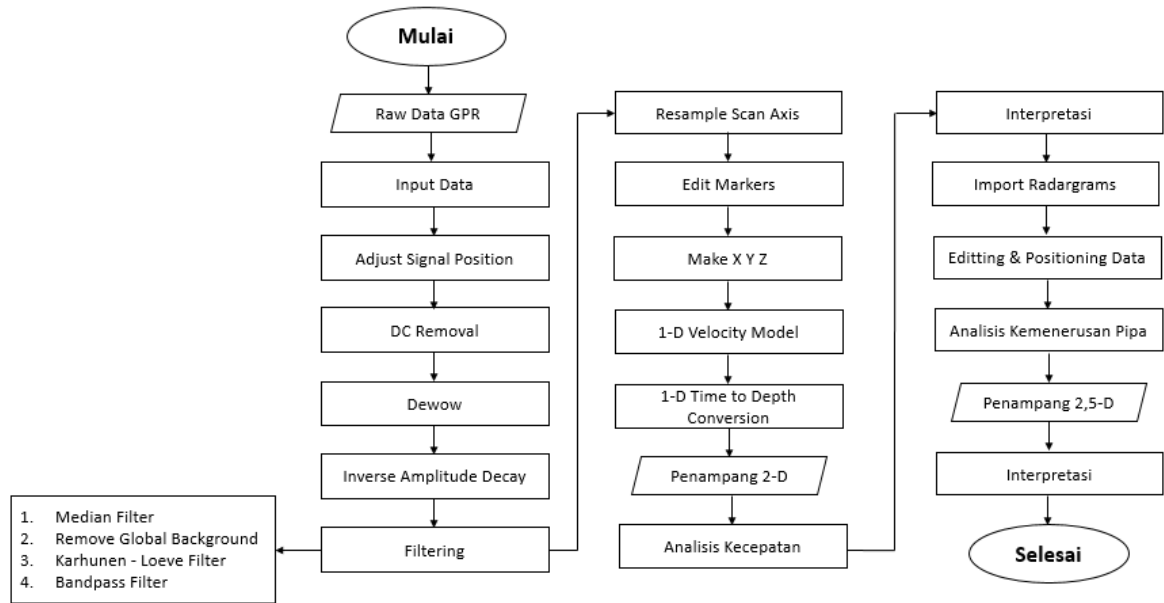
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Tahap Persiapan

1. Studi Literatur, merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mempelajari hal-hal yang berkaitan serta mendukung dengan penelitian ini berdasarkan referensi, meliputi geologi daerah penelitian, metode pengolahan data yang digunakan maupun penelitian terdahulu.
2. *Quality Control* Data Pengukuran, merupakan kegiatan untuk mengecek kembali data yang diperoleh dari hasil pengukuran. Dari hasil pengecekan akan didapatkan kesimpulan apakah data layak diproses lebih lanjut selain itu juga data yang diperoleh dapat di sortir melalui kegiatan *quality control* ini.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data dan Interpretasi

Data yang didapatkan dari hasil akuisisi dan telah melalui proses *quality control* kemudian diolah menggunakan perangkat lunak MatGPR R-3.1 untuk mendapatkan profil bawah permukaan yang lebih baik. Pengolahan data GPR dilakukan mengikuti alur seperti pada **Gambar 3.6** dibawah. Untuk tahapan akhir yaitu tahap interpretasi yaitu tahapan menjelaskan hasil pengolahan dan model yang ditujukan untuk mencapai tujuan penelitian.

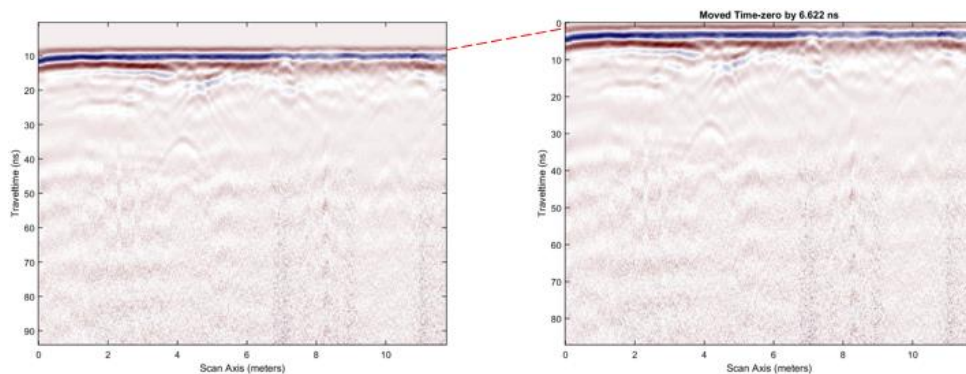


Gambar 3.6 Diagram Alir Pengolahan Data GPR

Berdasarkan diagram alir pada **Gambar 3.6**, *Radargram Signal Processing (RSP)* yang dilakukan pada data GPR dijelaskan pada setiap tahap pengolahan sebagai berikut.

3.3.2.1 Adjust Signal Position

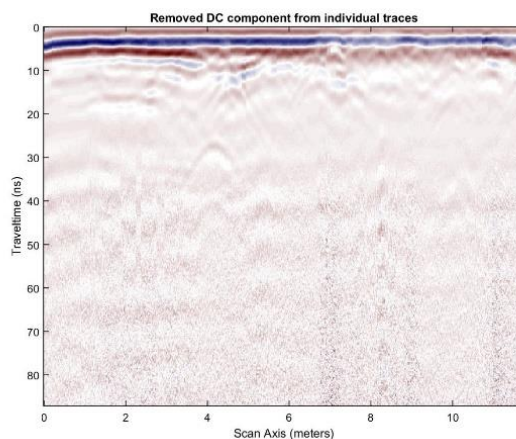
Adjust Signal Position merupakan langkah untuk mengembalikan sinyal ke posisi sebenarnya. Hal ini dilakukan karena data memiliki waktu jeda sebelum sinyal menyentuh permukaan ketika akuisisi data, jeda sinyal tersebutlah yang harus dihilangkan. *Adjust Signal Position* diketahui merupakan tahapan pertama yang harus dilakukan untuk mengetahui *time zero*. Tahap ini dilakukan karena pengukuran GPR ketika di lapangan memiliki waktu jeda sebelum sinyal menyentuh permukaan tanah, hal ini disebabkan oleh adanya jarak antara alat GPR dengan permukaan tanah.



Gambar 3.7 Radargram JB12 Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) *Adjust Signal Position*

3.3.2.2 DC Removal

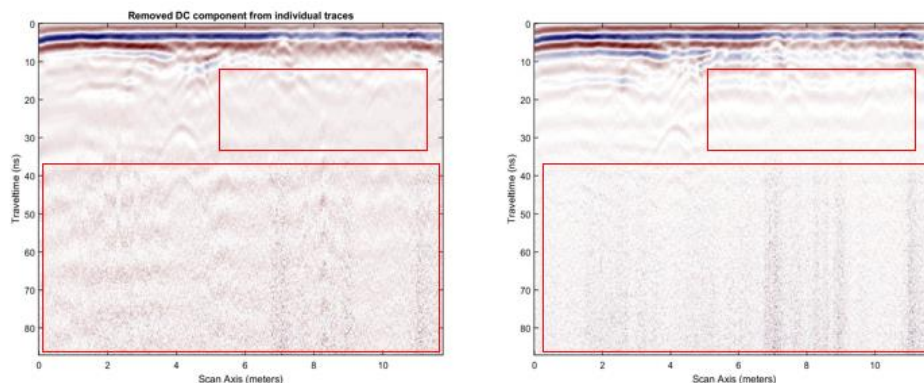
DC Removal merupakan tahapan untuk menghilangkan komponen DC karena dapat menyebabkan distorsi pada gelombang. *DC Removal* diketahui memiliki fungsi untuk membalikkan sinyal diposisi seharusnya (di titik tengah) supaya lebih presisi bukan ke bawah ataupun ke atas sehingga hasil yang didapatkan akan berbentuk sinyal sinusoidal yang sempurna. Pada penggambaran *Remove DC*, dapat dilihat bahwa telah terjadi koreksi sinyal antara keduanya.



Gambar 3.8 Radargram JB12 Setelah *Remove DC*

3.3.2.3 Dewowing

Dewow filter merupakan koreksi yang digunakan untuk menghilangkan *noise* yang memiliki frekuensi sangat rendah. Perlunya menghilangkan komponen berfrekuensi sangat rendah (*wow*) yaitu dikarenakan komponen tersebut disebabkan oleh fenomena induktif atau batas jangkauan instrumen. *Noise wow* ini selalu muncul dalam pengukuran menggunakan metode GPR oleh karenanya *noise* ini harus dihilangkan.



Gambar 3.9 Radargram JB12 Sebelum (Kiri) dan Sesudah (Kanan) *Dewowing*

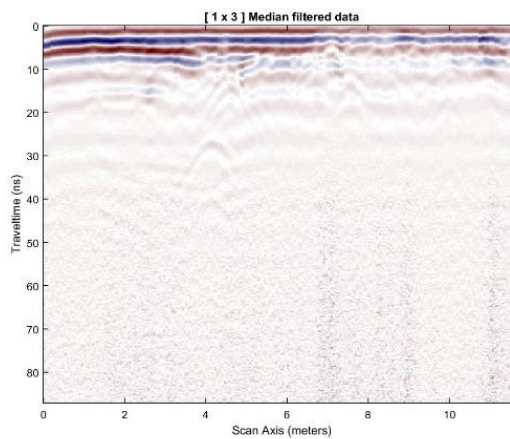
3.3.2.4 Median Filter

Median filter umumnya digunakan untuk mengurangi noise pada radargram, perannya mirip seperti *mean filter*. Namun, sering kali menghasilkan radargram yang lebih baik daripada *mean filter* dengan mempertahankan detail yang berguna dalam radargram. Pemfilteran median dilakukan dengan tujuan utama menghilangkan lonjakan noise dengan frekuensi tinggi (Szymczyk, 2013). Dalam pengolahan ini digunakan rentang *time* dan *scan axis* yang bervariasi

dari berbagai sumber dan menyesuaikan kebutuhan *filtering* berdasarkan data pada radargram. Adapun rentang *time* dan *scan axis* yang digunakan disajikan pada **Tabel 3.2** dibawah.

Tabel 3.2 Tabel Parameter *Median Filter* (Elfarabi et al., 2017; Murdaningtyas, 2019)

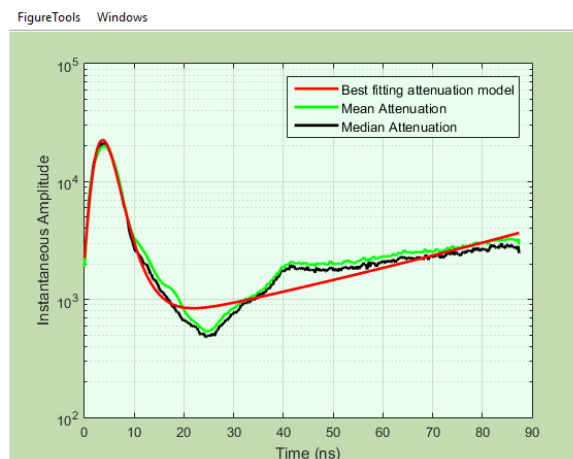
Median Filter	
Time Axis	Scan Axis
1	3
1	5
11	3



Gambar 3.10 *Median Filter 1x3* Pada Radargram JB12

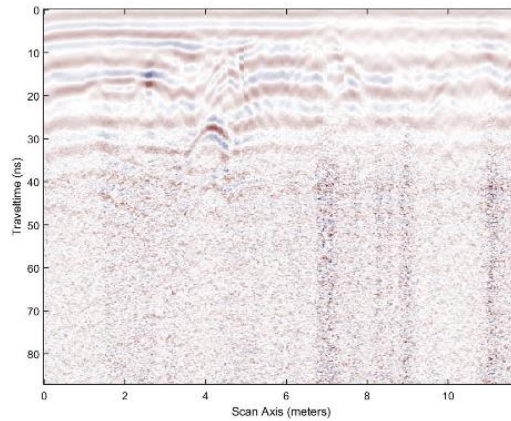
3.3.2.5 Inverse Amplitude Decay

Inverse Amplitude Decay digunakan untuk meningkatkan kontras sinyal/penguatan sinyal (*gaining*) dikarenakan sinyal radar yang dipancarkan dari transmitter menjalar sangat cepat dibawah permukaan, sehingga sinyal radar tersebut ter-atenuasi yang menyebabkan informasi sinyal menjadi tidak begitu jelas (kabur). Saat sinyal di kuatkan maka akan tampak guratan-guratan menyerupai lapisan yang lebih jelas, hal ini dikarenakan adanya efek *multiply* dimana efek ini biasanya terjadi di tengah penampang interpretasi. Efek *multiply* ini menyebabkan hasil penampang lebih jelas ditengah.



Gambar 3.11 Decay Model JB12 Menggunakan *Median Attenuation* dan Ordo 3

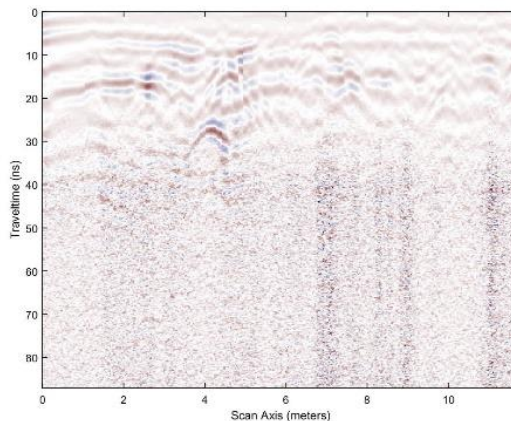
Dari *pengolahan inverse amplitude decay* ini diketahui bahwa sinyal yang terletak dibawah akan menguat, sehingga apabila tidak terlihat pada pengolahan sebelumnya, akan terlihat lebih jelas pada pengolahan ini. Radargram hasil *inverse amplitude decay* akan menunjukkan sinyal-sinyal yang lebih jelas dibandingkan sebelum menggunakan koreksi ini.



Gambar 3.12 Radargram JB12 Setelah *Inverse Amplitude Decay*

3.3.2.6 *Remove Global Background*

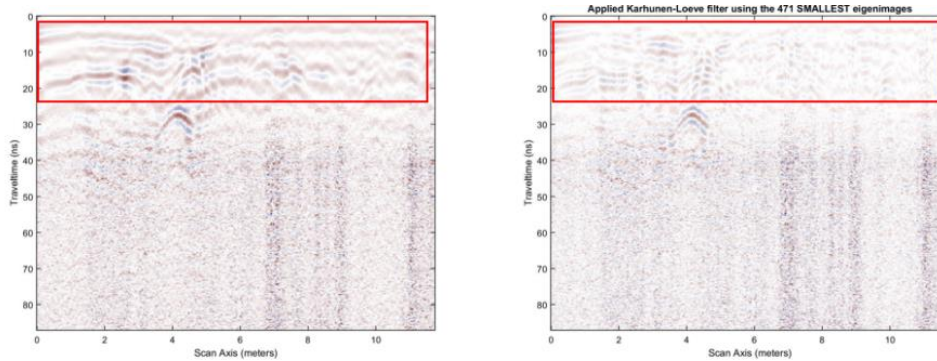
Koreksi ini membersihkan background pada profil GPR dan menghilangkan pengaruh energi koheren lateral (horizontal) dengan frekuensi rendah pada profil. Koreksi ini menghapus efek background lateral pada radargram. Sehingga setelah melakukan *remove global background*, akan didapatkan profil GPR yang tidak lagi memiliki efek *background lateral*.



Gambar 3.13 Radargram JB12 Setelah *Remove Global Background*

3.3.2.7 *Karhunen-Loeve Filter*

Filter *Karhunen-Loeve* digunakan untuk dapat menghilangkan atau mengurangi *noise lateral* dengan memanfaatkan transformasi *Karhunen-Loeve*. Ketika melakukan pengolahan data dengan filter ini, diperlukan parameter *number of largest eigen vectors* yang tepat untuk mendapatkan hasil yang optimal. Pada pengolahan data *K-L filter* perlu dicari parameter *number of largest eigenvectors* yang tepat untuk mendapatkan hasil *reconstructed data* dan *residuals*.



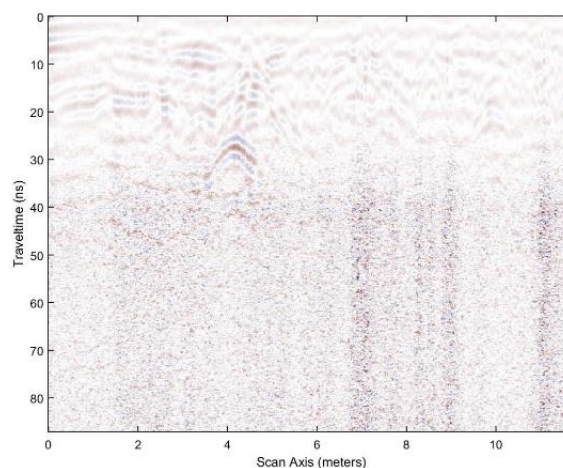
Gambar 3.14 Radargram JB12 Sebelum (Kiri) dan Sesudah (Kanan) *K-L Filter* (*Eigen vector = 3*)

3.3.2.8 Bandpass Filter

Filter bandpass digunakan untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi yang tidak diinginkan (*noise*), dengan membatasi nilai jangkauan frekuensi sinyal pada radargram. Filter *bandpass* ini mampu mengeliminasi sinyal yang tidak diinginkan sesuai dengan keinginan pengolah data dengan menentukan batas *lower cutoff* dan *upper cutoff*. Hasil dari *bandpass filtering* menunjukkan banyaknya frekuensi yang dihilangkan dan juga didapatkan hasil berupa frekuensi sinyal yang lebih jelas terlihat. Selain itu juga didapatkan kontras sinyal pada radargram.

3.3.2.9 Resample Scan Axis

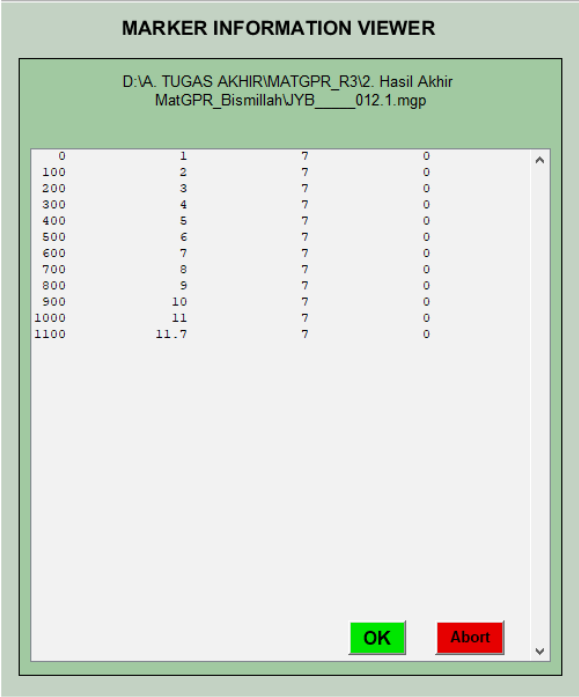
Resample Scan Axis merupakan proses untuk menyesuaikan jumlah trace pada radargram sesuai dengan kebutuhan dengan tujuan agar data yang dihasilkan memiliki resolusi yang baik. Proses ini dilakukan sebelum ke tahap pemodelan 1D. Jumlah trace yang diubah, disesuaikan berdasarkan panjang lintasan serta jumlah trace yang diinginkan per jarak. Seperti **Gambar 3.15** dibawah menunjukkan radargram JB12 setelah dilakukan proses *resample scan axis*. Panjang lintasan JB12 yaitu 11,74 m dan jumlah trace yang diinginkan adalah 100 trace per meter, sehingga trace diubah menjadi 1100.



Gambar 3.15 Radargram JB12 Setelah *Resample Scan Axis*

3.3.2.10 Edit Markers

Edit Markers merupakan tahap untuk memasukkan informasi posisi (x, y, dan z) pada data yang berguna untuk melakukan pemodelan 3D berikutnya. *Edit markers* dilakukan dengan menggunakan fitur *Edit Positioning Data* dan memasukkan informasi marker secara berurutan yaitu nomor trace, posisi x lintasan, posisi y lintasan, dan z sebagai elevasi.

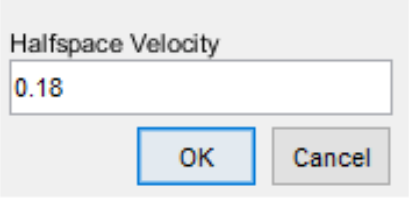


Trace	X	Y	Z
0	1	7	0
100	2	7	0
200	3	7	0
300	4	7	0
400	5	7	0
500	6	7	0
600	7	7	0
700	8	7	0
800	9	7	0
900	10	7	0
1000	11	7	0
1100	11.7	7	0

Gambar 3.16 Informasi Marker Lintasan JB12

3.3.2.11 1-D Velocity Model

Velocity model diperlukan untuk mengoreksi penetrasi *trace* agar sesuai dengan data geologi sehingga domain waktu nantinya dapat diubah menjadi domain kedalaman. Langkah pengolahan data ini juga memberikan pilihan migrasi model sehingga didapat data yang lebih sesuai dengan kondisi daerah pengukuran. *Velocity model* yang digunakan juga akan memengaruhi kedalaman dari pemodelan dalam satuan kedalaman. Untuk penelitian ini digunakan nilai *velocity* 0,18 m/ns disesuaikan dengan klasifikasi *velocity* jenis tanah pada lokasi pengukuran.

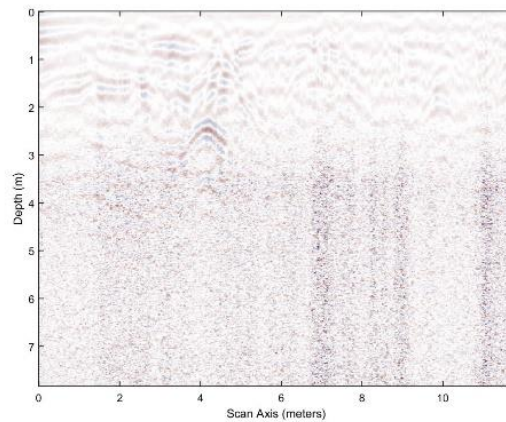


Gambar 3.17 Window Input 1-D Velocity Model Lintasan JB12

3.3.2.12 1-D Time to Depth Conversion

Konversi domain waktu pada *trace* menjadi domain kedalaman dilakukan dengan tujuan untuk memudahkan interpretasi karena kesesuaiannya. Tahap ini merupakan proses

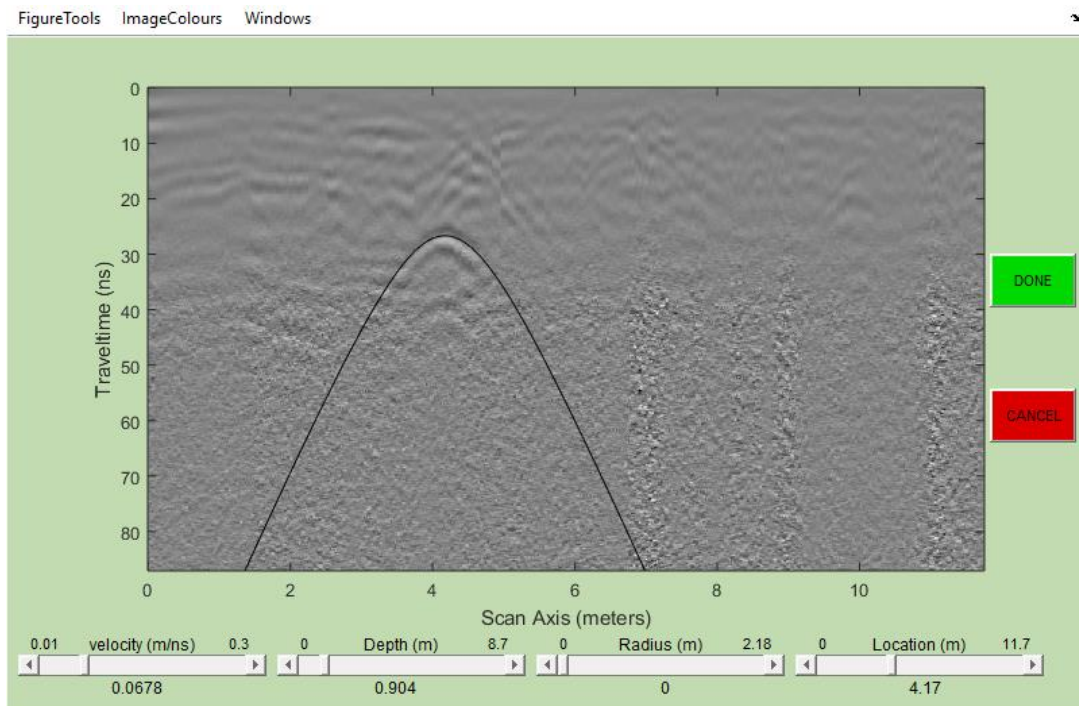
mengonversikan data GPR dari domain waktu (*time*) ke domain kedalaman (*depth*) berdasarkan parameter yang telah diberikan.



Gambar 3.18 Radargram JB12 Setelah *Time to Depth Conversion*

3.3.3 Analisis Kecepatan

Analisis Kecepatan atau *velocity analysis* digunakan untuk memperkirakan kecepatan gelombang elektromagnetik pada anomali yang tampak pada radargram. Analisis kecepatan dilakukan dengan melakukan *fitting* kurva pada anomali yang ditunjukkan dengan respon berbentuk hiperbola. Proses ini dilakukan dengan metode difraksi hiperbola menggunakan fitur *Fit Diffraction Hyperbola* pada *software* MatGPR.



Gambar 3.19 Proses Analisis Kecepatan dengan Fitur *Fit Diffraction Hyperbola* pada Lintasan JB12

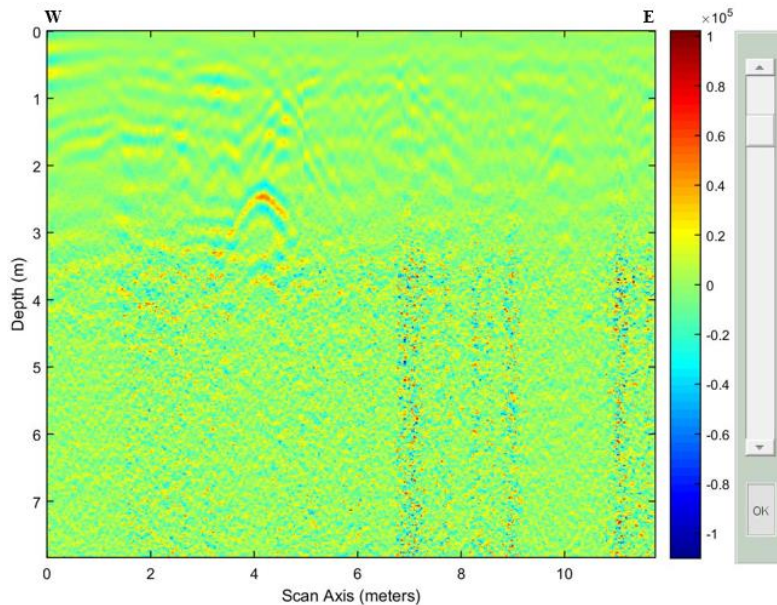
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengolahan

Pada penelitian ini, dilakukan pengolahan data GPR terhadap 21 lintasan dan untuk interpretasi lebih lanjut dipilih 6 lintasan yang menampilkan kemungkinan pipa air bawah permukaan serta objek yang mengakibatkan anomali pada radargram 2D.

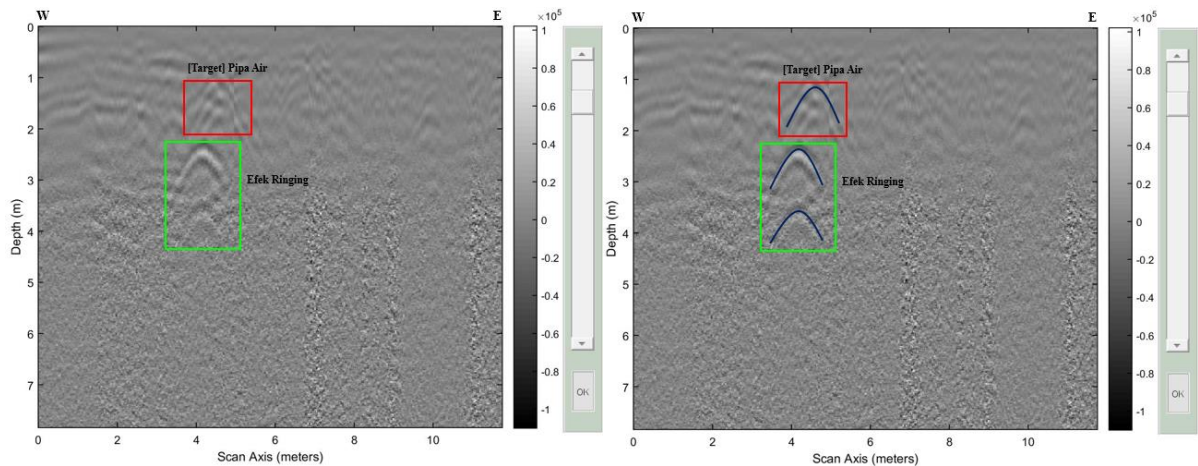
4.1.1 Hasil Radargram 2-D

4.1.1.1 Lintasan JB12



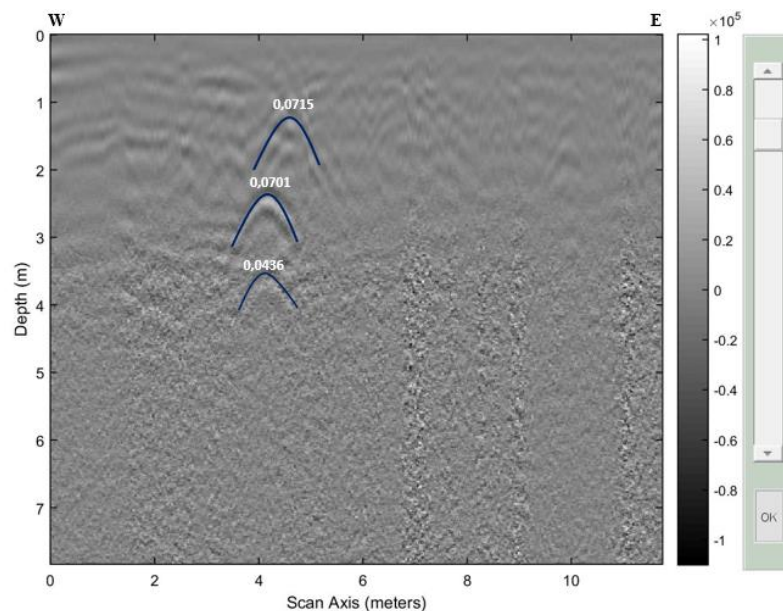
Gambar 4.1 Profil Radargram 2-D Lintasan JB12 (*Jetscale*).

Profil radargram 2-D lintasan JB12 berarah W – E pada **Gambar 4.1** menunjukkan amplitudo bernilai sedang (warna kuning) yang hampir seragam di sepanjang lintasan pengukuran. Tampak juga adanya perbedaan kerapatan amplitudo ketika semakin meningkatnya kedalaman penetrasi. Dimana pada kedalaman 0 – 3,5 meter amplitudo sedang tersebar merata sedangkan pada kedalaman > 3,5 meter terlihat amplitudo menjadi lebih rapat dan menampakkan fitur-fitur horizontal yang lebih kecil (sinyal yang koheren) serta dipengaruhi oleh *noise*. Sementara itu, amplitudo rendah (warna hijau) yang merupakan warna dominan menunjukkan lapisan dasar (*background layer*) di lintasan pengukuran. Sedangkan kemungkinan dari pipa air bawah permukaan yang tersusun dari material besi ditunjukkan dengan anomali berbentuk hiperbola dengan amplitudo kuat yang terlihat jelas.



Gambar 4.2 Profil Radargram 2-D Lintasan JB12 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis. Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (**Kotak Merah**) sedangkan Efek Ringing Berada di Bawahnya (**Kotak Hijau**).

Radargram seperti pada **Gambar 4.2** menampilkan respon anomali target dengan pola hiperbola berukuran besar dan refleksi yang tebal berada pada kedalaman ± 1 meter pada *scan axis* 4,6 meter pada lintasan JB12 (kotak merah). Besarnya radius hiperbola ini dipengaruhi oleh kedalaman bidang pantul atau variasi ukuran objek yang terdeteksi. Anomali hiperbola berukuran besar ini diidentifikasi sebagai kemungkinan letak dari pipa air bawah permukaan. Selain itu, terlihat juga pola refleksi hiperbola besar pada *scan axis* 4,2 pada lintasan dan terletak di kedalaman 2,5 dan 3,5 meter yang diidentifikasi sebagai efek ringing dari objek di atasnya (kotak hijau). Efek ringing ini dapat muncul sebagai akibat dari gelombang EM yang ditransmisikan dari instrumen GPR bertemu dengan utilitas yang bersifat konduktif.

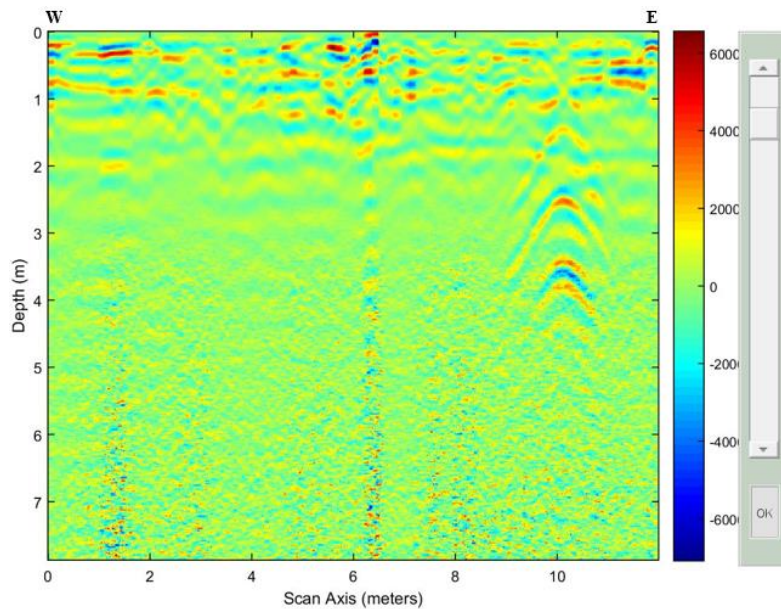


Gambar 4.3 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB12.

Analisis kecepatan pada JB12 dilakukan untuk mengetahui nilai kecepatan dari pola hiperbola yang tampak pada radargram. Nilai kecepatan ini kemudian dapat digunakan untuk menghitung nilai permitivitas relatif/konstanta dielektrik dari objek yang terdeteksi. Berdasarkan **Gambar 4.3** diketahui bahwa kecepatan hiperbola berkisar dari 0,0436 – 0,0715

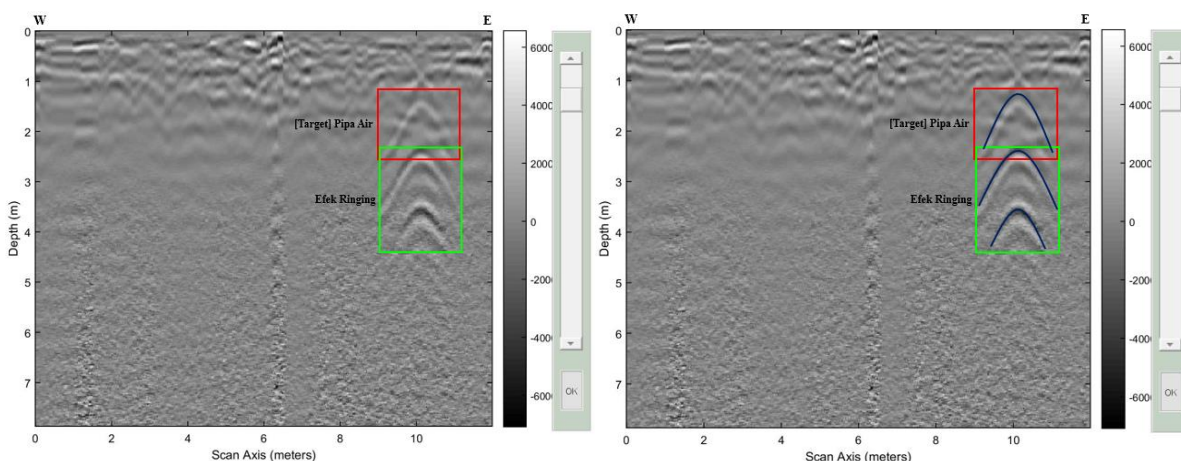
m/ns. Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai konstanta dielektrik objek memiliki rentang dari 17,6 – 47,36.

4.1.1.2 Lintasan JB13



Gambar 4.4 Profil Radargram 2-D Lintasan JB13 (*Jetscale*).

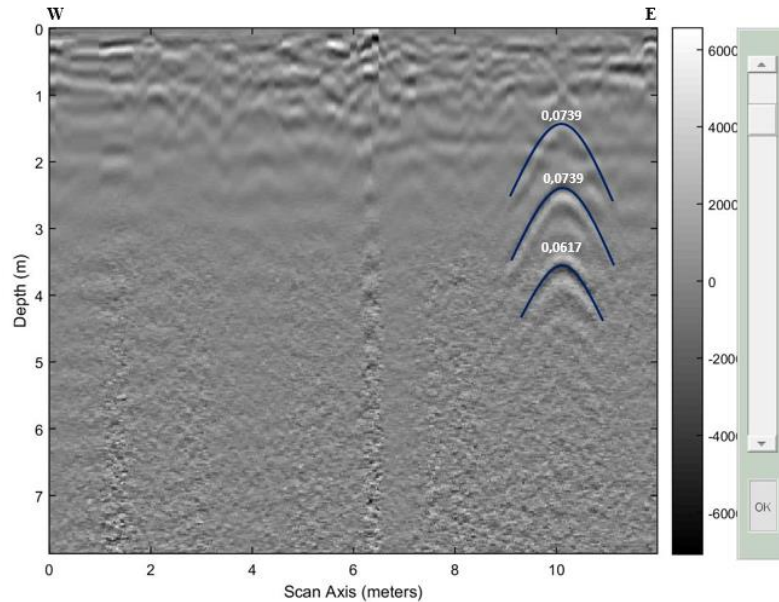
Profil radargram 2-D lintasan JB13 berarah W – E pada **Gambar 4.4** menunjukkan adanya amplitudo kuat berada pada kedalaman 0 – 1 meter. Pada kedalaman 1 – 4 meter terlihat amplitudo sedang, menerus di sepanjang lintasan dengan adanya anomali hiperbola di akhir lintasan dengan kedalaman 1,5 – 3,5 meter. Sedangkan pada kedalaman > 4 meter, amplitudo menjadi lebih rapat dan menampakkan fitur horizontal yang lebih kecil dan dipengaruhi oleh *noise*.



Gambar 4.5 Profil Radargram 2-D Lintasan JB13 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis. Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (Kotak Merah) sedangkan Efek Ringing Berada di Bawahnya (Kotak Hijau).

Berdasarkan **Gambar 4.5** terlihat adanya anomali dengan pola hiperbola berukuran besar dan refleksi yang tebal berada di kedalaman $\pm 1,5$ meter pada *scan axis* 10,2 meter pada

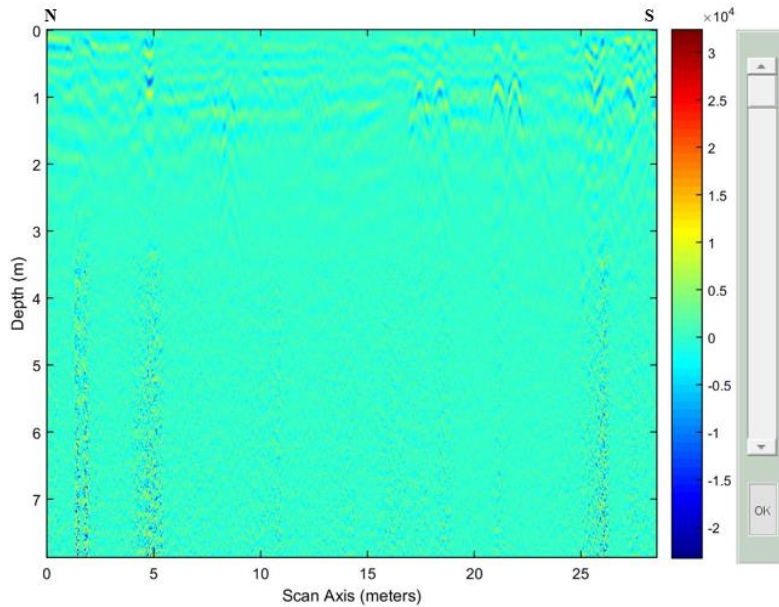
lintasan yang ditunjukkan dengan kotak berwarna merah. Anomali ini diidentifikasi sebagai kemungkinan letak dari pipa air bawah permukaan. Selain itu, terlihat juga pola refleksi hiperbola besar di kedalaman 2,5 dan 3,5 meter yang diidentifikasi sebagai efek ringing (kotak hijau) dari objek di atasnya.



Gambar 4.6 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB13.

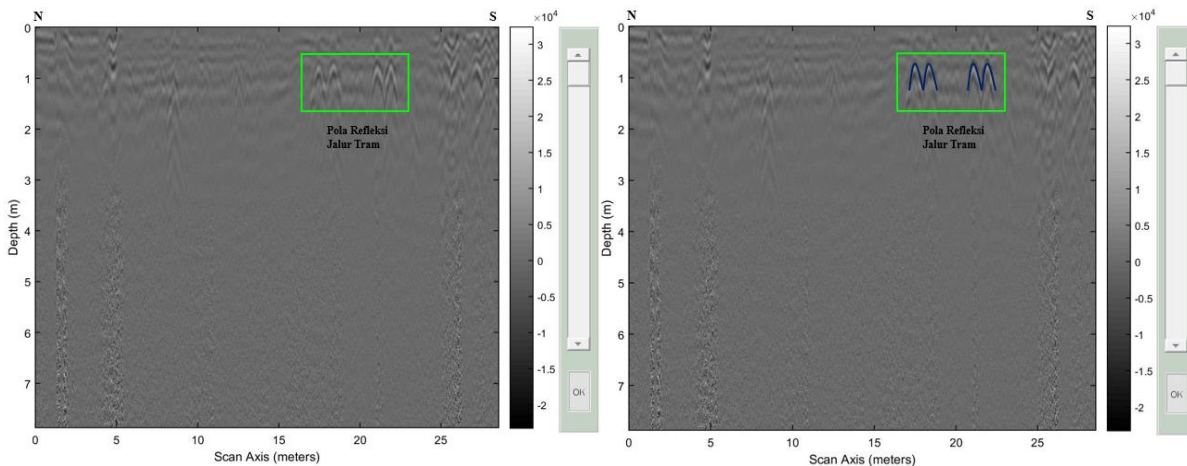
Analisis kecepatan pada JB13 dilakukan untuk mengetahui nilai kecepatan dari pola hiperbola yang tampak pada radargram. Hasil dari analisis kecepatan, diketahui bahwa nilai kecepatan ketiga hiperbola pada lintasan JB13 berkisar dari 0,0617 – 0,0739 m/ns. Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai konstanta dielektrik objek memiliki rentang dari 16,48 – 23,64.

4.1.1.3 Lintasan JB14



Gambar 4.7 Profil Radargram 2-D Lintasan JB14 (*Jetscale*).

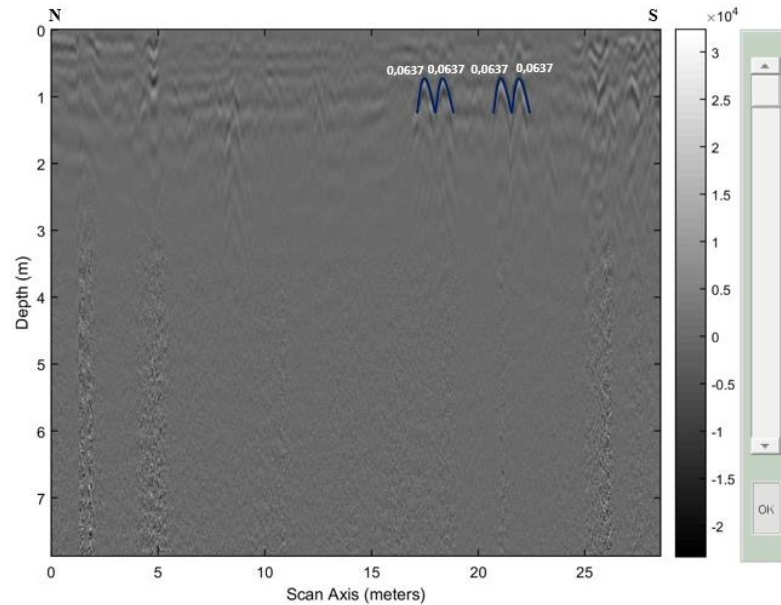
Lintasan JB14 merupakan lintasan berarah N – S dan sejajar dengan lintasan JB07. Kedua lintasan tersebut memotong rangkaian jalur trem Kota Surabaya yang dibangun pada zaman kolonial Belanda. Sehingga kemungkinan jalur trem tersebut juga akan ikut terdeteksi melalui anomali hiperbola berukuran kecil. Pada **Gambar 4.7** terlihat bahwa amplitudo sedang berada pada kedalaman 0 – 2 meter. Sedangkan amplitudo rendah dengan warna dominan (biru muda) terlihat mulai dari kedalaman > 2 meter yang menunjukkan tidak adanya anomali hiperbola yang signifikan.



Gambar 4.8 Profil Radargram 2-D Lintasan JB14 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis.

Berdasarkan **Gambar 4.8** terlihat adanya dua pasang anomali hiperbola berukuran kecil dengan jarak yang konstan diantara keduanya (kotak hijau). Pola refleksi tersebut ditemukan di kedalaman ± 1 meter pada *scan axis* 17,4; 18,4 dan 21,1; 21,9 meter di lintasan pengukuran. Pola refleksi hiperbola berukuran sama ini menunjukkan adanya objek dengan ukuran dan dimensi yang identik. Kedua pasang hiperbola tersebut terpisah sejauh 3 meter. Hal ini menjadi

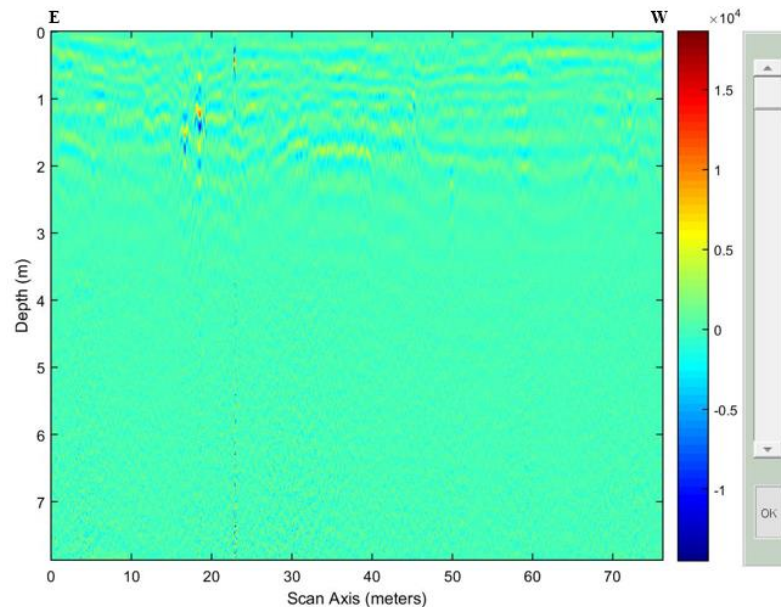
dugaan kuat bahwa anomali tersebut merupakan jalur trem kuno yang ikut terdeteksi pada penelitian ini.



Gambar 4.9 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB14.

Dari hasil analisis kecepatan, diketahui bahwa nilai kecepatan kedua pasang hiperbola tersebut sama yaitu sebesar 0,0637 m/ns. Sehingga nilai konstanta dielektrik dari objek tersebut sebesar 22,18.

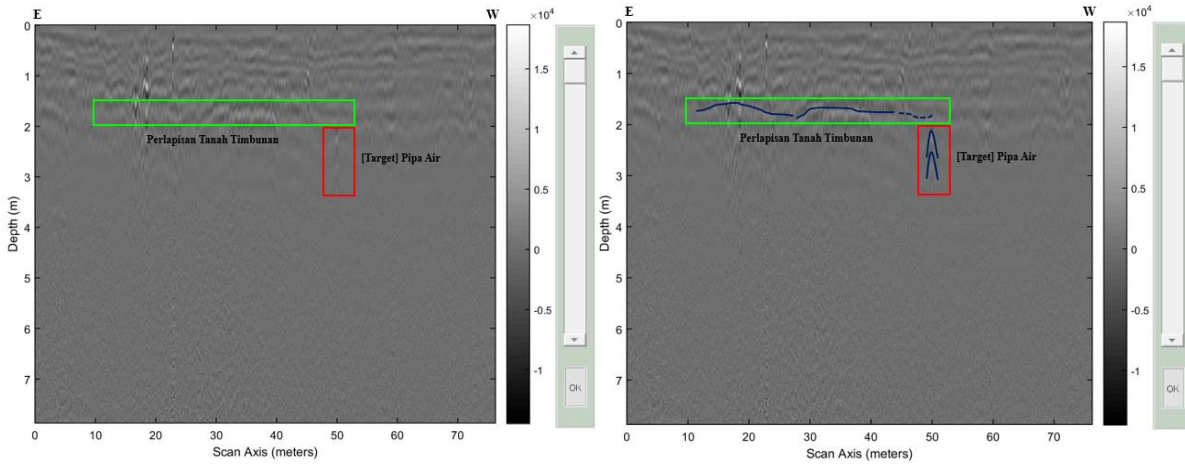
4.1.1.4 Lintasan JB17



Gambar 4.10 Profil Radargram 2-D Lintasan JB17 (*Jetscale*).

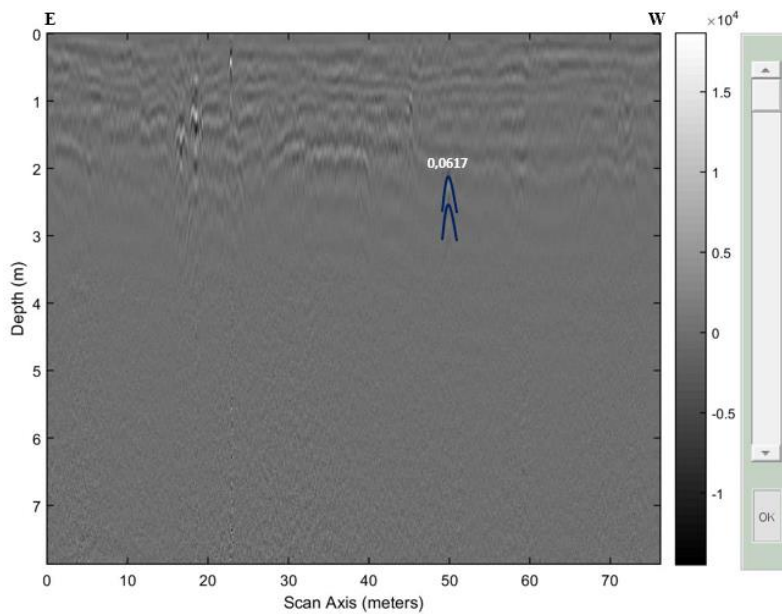
Lintasan JB17 merupakan salah satu lintasan terpanjang dengan panjang 76,22 meter berarah E – W. Profil radargram 2-D lintasan JB17 menunjukkan adanya amplitudo sedang berada pada kedalaman 0 – 2 meter. Sedangkan amplitudo rendah (hijau muda) terlihat mulai

dari kedalaman > 2 meter serta menunjukkan tidak adanya anomali hiperbola yang signifikan. Tidak tampaknya fitur-fitur anomali disebabkan lintasan yang begitu panjang yang menyebabkan pola refleksi anomali hiperbola menjadi lebih berhimpitan dan lebih kecil sehingga perlu memperhatikan pola refleksi yang sangat kecil dengan lebih detail dan teliti.



Gambar 4.11 Profil Radargram 2-D Lintasan JB17 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis. Target Pipa Air Terlihat pada Pola Refleksi Hiperbola (Kotak Merah) dan Kemungkinan Lapisan Tanah Timbunan (Kotak Hijau).

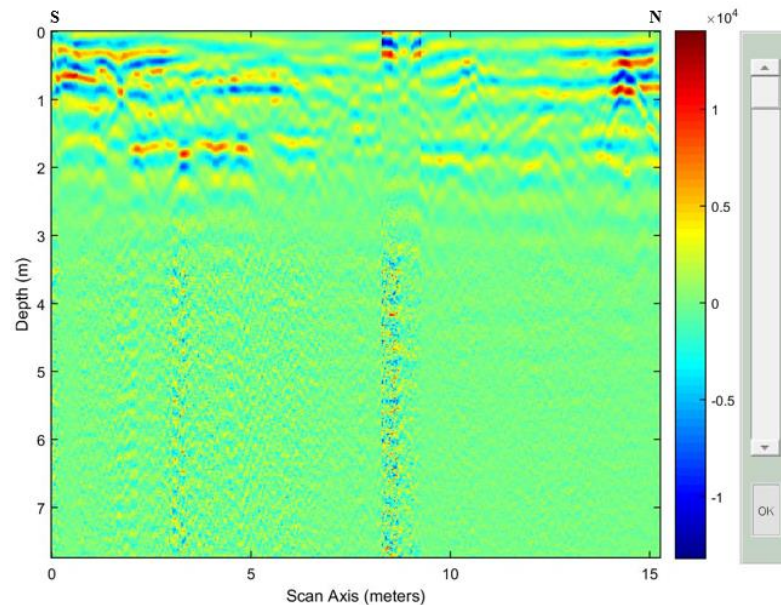
Berdasarkan pengamatan dengan detail terhadap fitur kecil pada **Gambar 4.11** terlihat bahwa terdapat indikasi target pipa air bawah permukaan yang berada di kedalaman ± 2 meter pada meter ke 50 dari total panjang lintasan. Terdapat 2 anomali hiperbola dimana hiperbola atas diduga sebagai lokasi pipa target, sedangkan anomali hiperbola dibawahnya merupakan efek ringing dari pipa di atasnya. Selain itu anomali lateral di kedalaman 1,8 meter pada meter ke 27 – 40 (13 meter) pada lintasan pengukuran diduga sebagai perlapisan tanah timbunan. Walaupun kemenerusannya tidak terlihat dengan jelas hingga akhir lintasan.



Gambar 4.12 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB17.

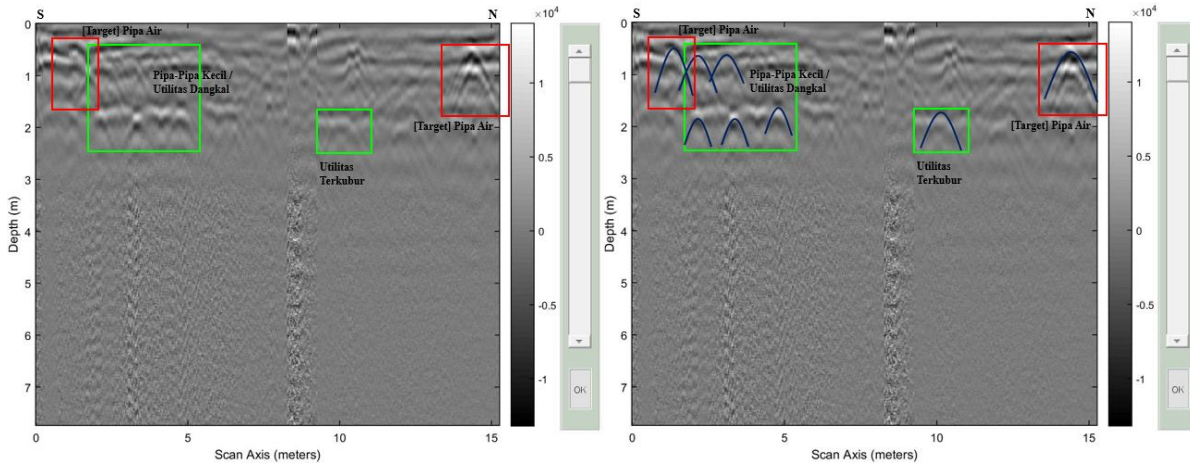
Berdasarkan hasil dari analisis kecepatan seperti pada **Gambar 4.12**, diketahui bahwa nilai kecepatan hiperbola pada lintasan JB17 yaitu sebesar 0,0617 m/ns. Cenderung kecilnya nilai kecepatan hiperbola ini diduga sebagai akibat dari efek atenuasi karena letak objek yang cukup dalam. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai konstanta dielektrik objek yang diduga pipa air bawah permukaan yaitu sebesar 23,64.

4.1.1.5 Lintasan JB22



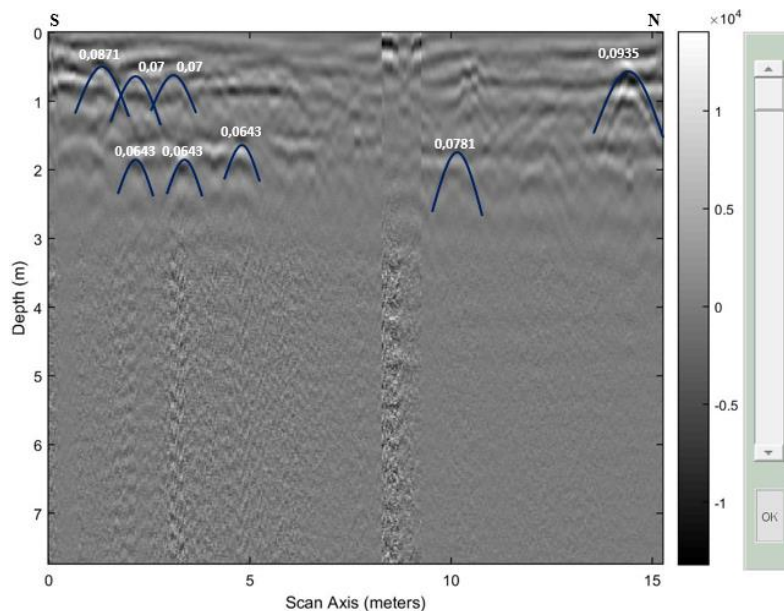
Gambar 4.13 Profil Radargram 2-D Lintasan JB22 (*Jetscale*).

Profil radargram 2-D lintasan JB22 berarah S – N pada **Gambar 4.13** menunjukkan anomali amplitudo kuat berada kedalaman 0 – 2,5 meter. Hal ini menunjukkan terdapat beberapa objek dekat permukaan yang terekam pada radargram. Sehingga diperlukan ketelitian dalam menggolongkan setiap anomali hiperbola yang tampak. Sedangkan untuk amplitudo pada kedalaman > 2,5 meter menampilkan fitur-fitur horizontal yang lebih kecil (sinyal yang koheren) serta dipengaruhi oleh *noise*.



Gambar 4.14 Profil Radargram 2-D Lintasan JB22 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis. Target Pipa Air Terlihat pada Refleksi Hiperbola Tebal dan Berukuran Besar (Kotak Merah) dan Utilitas Terkubur Lainnya (Kotak Hijau).

Pada **Gambar 4.14** diketahui bahwa refleksi hiperbola banyak ditemukan dekat permukaan. Untuk memisahkan objek yang diduga sebagai target (pipa air) dan utilitas lainnya, digolongkan berdasarkan ukuran refleksi hiperbola yang besar dan kedalaman rata-rata dari pipa air bawah permukaan di setiap lintasan pengukuran. Terdapat dua objek yang diduga sebagai pipa air yang masing-masing berada di kedalaman 0,5 dan 0,8 meter (kotak merah). Masing-masing objek tersebut berada pada *scan axis* 1,7 dan 14,4 meter dari lintasan JB22. Sedangkan untuk pola refleksi hiperbola yang lebih kecil diduga sebagai pipa-pipa berdiameter lebih kecil atau juga diduga sebagai utilitas terkubur.

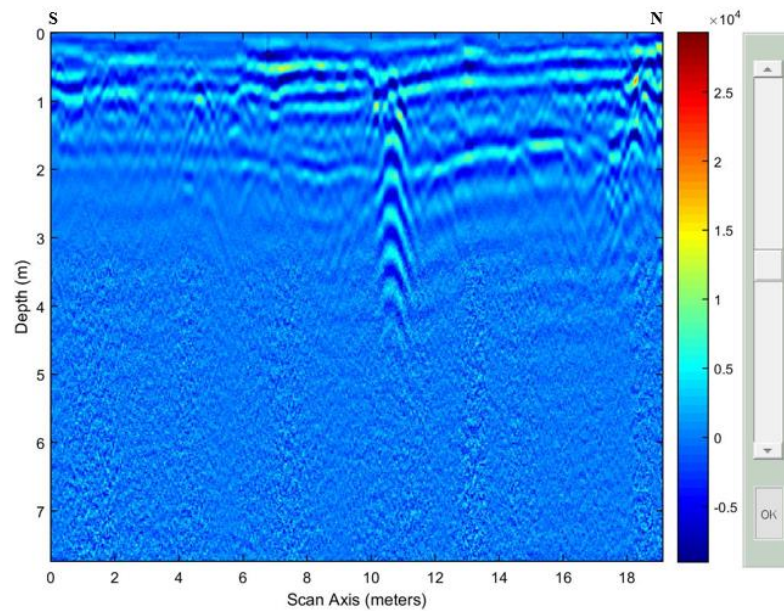


Gambar 4.15 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB22.

Berdasarkan hasil dari analisis kecepatan seperti pada **Gambar 4.15**, diketahui bahwa nilai kecepatan hiperbola pada lintasan JB22 berkisar dari 0,0643 – 0,0935 m/ns. Dimana nilai

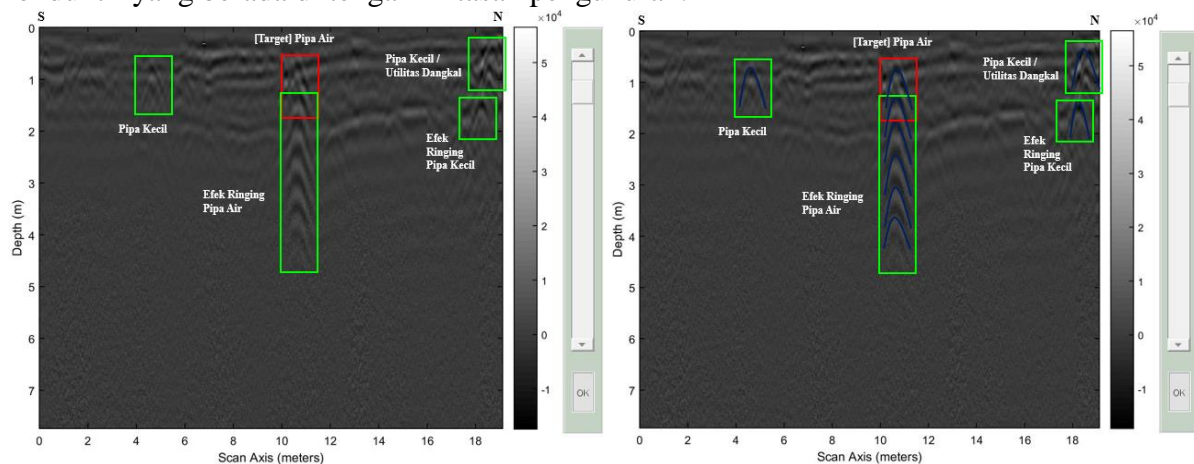
kecepatan 0,0871 dan 0,0935 diduga sebagai pipa air bawah permukaan. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai konstanta dielektrik objek memiliki rentang dari 10,29 – 21,77.

4.1.1.6 Lintasan JB25



Gambar 4.16 Profil Radargram 2-D Lintasan JB25 (*Jetscale*).

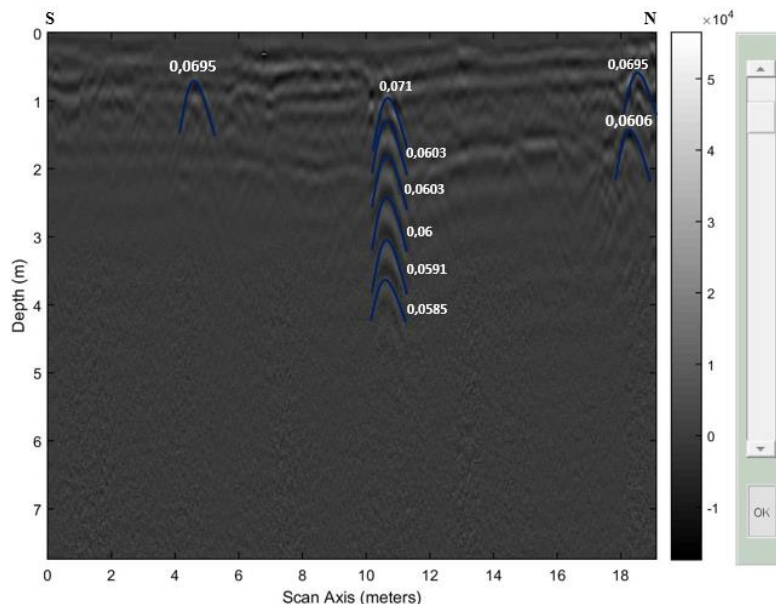
Radargram 2-D lintasan JB25 (**Gambar 4.16**) menunjukkan amplitudo rendah yang seragam dengan warna dominan biru. Namun terdapat kontras dari warna tersebut yang dapat dijadikan acuan dugaan letak anomali. Selain itu juga terlihat jelas efek ringing dari suatu objek konduktif yang berada di tengah lintasan pengukuran.



Gambar 4.17 Profil Radargram 2-D Lintasan JB25 (*Grayscale*), Sebelum (**Kiri**) dan Sesudah (**Kanan**) Analisis. Target Pipa Air (Kotak Merah) dan Utilitas Terkubur serta Efek Ringing (Kotak Hijau).

Radargram seperti pada **Gambar 4.17** menampilkan respon anomali target dengan pola hiperbola berukuran besar dan refleksi yang tebal berada di kedalaman ± 1 meter pada *scan axis* 10,7 meter di lintasan JB25 (kotak merah). Anomali tersebut diduga sebagai target yang dicari yaitu pipa air. Selain itu, objek tersebut juga menimbulkan efek ringing pada radargram

hingga kedalaman 5 meter. Hal ini menunjukkan bahwa objek tersebut bersifat sangat konduktif. Selain objek tersebut, terlihat juga pola hiperbola berukuran lebih kecil yang juga berada di kedalaman ± 1 meter namun terletak di posisi yang berbeda, yaitu pada *scan axis* 4,65 dan 18,2 meter (kotak hijau). Anomali yang berada pada meter ke 18,2 juga terlihat memiliki efek ringing.



Gambar 4.18 Hasil Analisis Kecepatan pada Lintasan JB25.

Berdasarkan analisis kecepatan pada JB25 (**Gambar 4.18**) diketahui bahwa kecepatan hiperbola berkisar dari 0,0585 – 0,071 m/ns. Selain itu, hiperbola efek ringing juga menunjukkan bahwa semakin meningkatnya kedalaman maka nilai kecepatannya akan semakin turun karena adanya pengaruh atenuasi. Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai konstanta dielektrik objek-objek tersebut memiliki rentang dari 17,85 – 26,3.

4.1.2 Hasil Pemodelan 2,5-D

Dari hasil pengolahan radargram 2-D, berikutnya dilakukan pemodelan 2,5-D untuk mengetahui jaringan pipa air bawah permukaan di lokasi penelitian yaitu di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo Surabaya. Pemodelan 2,5-D dilakukan dengan menghubungkan setiap anomali dengan pola refleksi hiperbola berukuran besar yang tampak pada masing-masing radargram setiap lintasan sehingga dapat diketahui kemenerusan dari pipa air tersebut. Adapun hasil pemodelan 2,5-D dapat dilihat seperti pada **Gambar 4.19** dibawah.



Gambar 4.19 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27 Beserta Kemungkinan Struktur Jaringan Pipa Air Bawah Permukaan (Garis Hijau dan Garis Kuning).

Berdasarkan pemodelan 2,5-D (**Gambar 4.19**) terlihat bahwa struktur jaringan pipa air bawah permukaan di lokasi penelitian (di sepanjang jalan dekat Terminal Joyoboyo), berarah dari selatan menuju utara memotong Jalan Joyoboyo dan kemungkinan menerus hingga ke Kebun Binatang Surabaya. Dugaan kuat dari struktur jaringan pipa air tersebut ditunjukkan dengan garis hijau, sedangkan garis kuning menunjukkan kurangnya data sehingga kemenerusannya berdasarkan interpretasi dan sedikit diragukan.



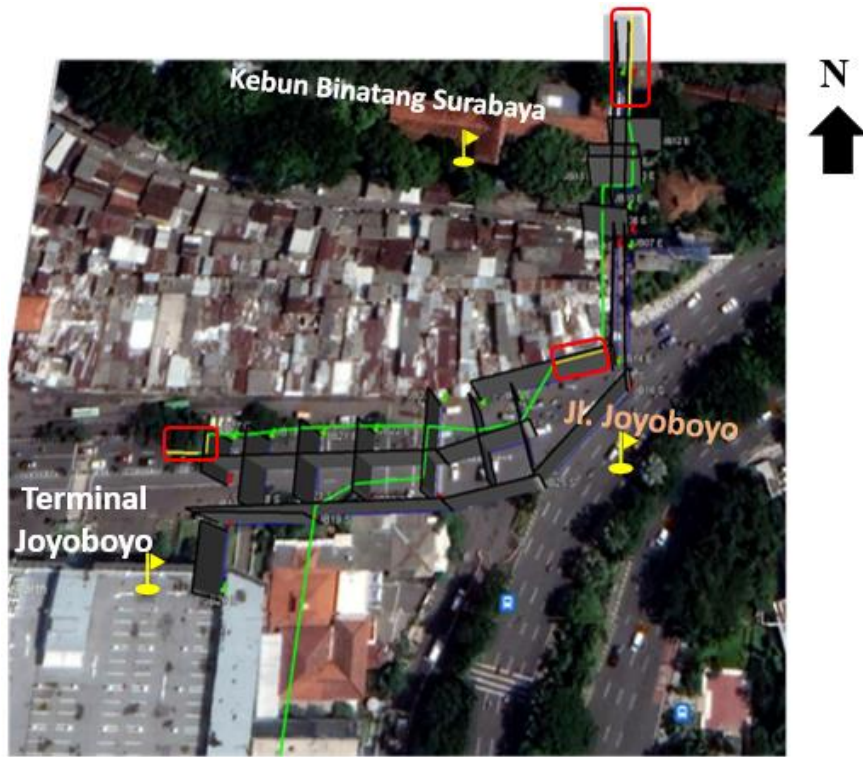
a.



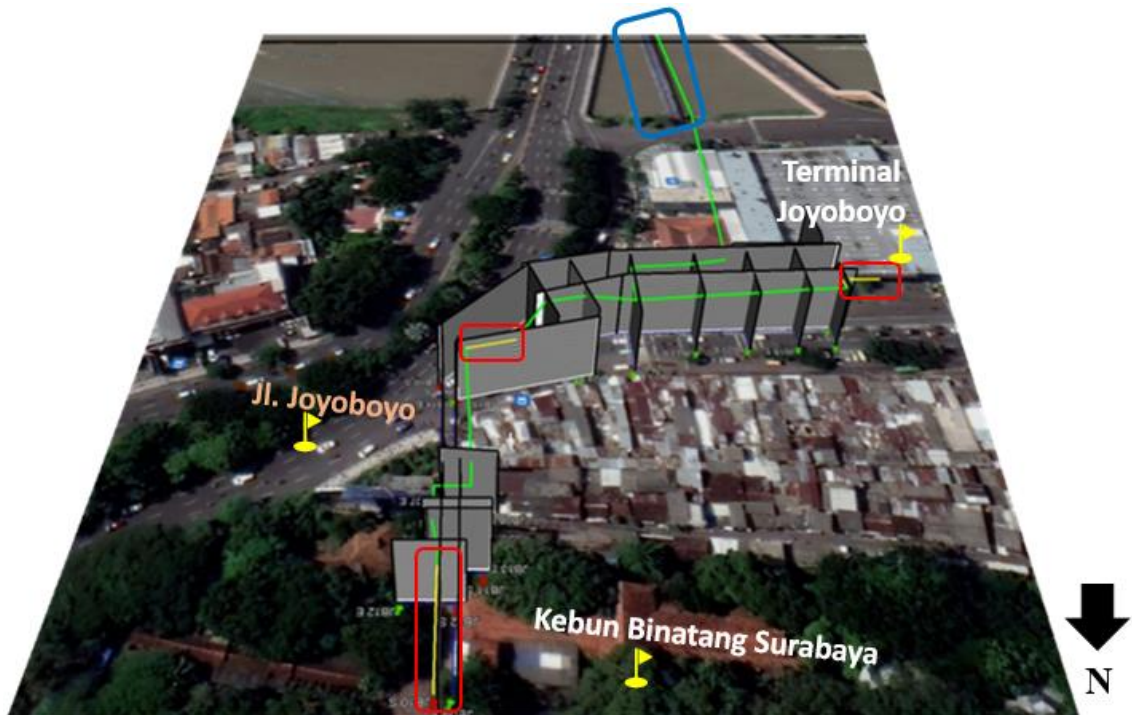
b.

Gambar 4.20 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27. **a.** Tampak Samping Kanan; **b.** Tampak Samping Kiri. Kemenerusan Pipa Air Besar Melintasi Sungai Kalimas (Kotak Biru) dan Perkiraan Arah Kemenerusan (Kotak Merah).

Pemodelan 2,5-D pada **Gambar 4.20** diatas menunjukkan sudut pandang apabila dilihat dari samping kanan dan kiri. Terlihat juga bahwa terdapat pipa besar (kotak biru) yang melintasi Sungai Kalimas ke arah lokasi penelitian.



c.



d.

Gambar 4.21 Pemodelan 2,5-D Lintasan JB07 s/d JB27. **c.** Tampak Belakang; **d.** Tampak Depan. Kemenerusan Pipa Air Besar (Kotak Biru) dan Perkiraan Arah Kemenerusan (Kotak Merah).

Pemodelan 2,5-D seperti pada gambar diatas menunjukkan sudut pandang apabila dilihat dari belakang dan depan. Diduga jaringan pipa air menerus menuju utara ke arah Kebun Binatang

Surabaya. Namun pada **Gambar 4.21**, wilayah bagian utara (lintasan JB09 dan JB10) diwakilkan dengan garis kuning (kotak merah) sebab tidak adanya data di lokasi tersebut sehingga interpretasi kemenerusannya diragukan. Hal ini juga diterapkan pada wilayah bagian barat lintasan JB27 dan pada lintasan JB15.

4.2 Pembahasan

Penelitian ini dilakukan di sekitar Kebun Binatang Surabaya dan Terminal Joyoboyo Surabaya. Akuisisi data dilakukan dengan instrumen GPR GSSI dengan frekuensi antena 270 MHz pada 21 lintasan pengukuran (JB07 s/d JB27). Tujuan yang diharapkan yaitu untuk mengetahui lokasi, kedalaman serta struktur dari jaringan pipa air bawah permukaan di lokasi penelitian tersebut. Kondisi dari masing-masing lintasan pengukuran yaitu lintasan JB07, JB08 dan JB14 terletak di Jl. Bumiharjo yang merupakan lokasi pemukiman penduduk. Lintasan JB09 dan JB10 merupakan terusan dari lintasan JB07 dan JB14 yang lintasan pengukurannya hingga ke Kebun Binatang Surabaya. Sedangkan lintasan JB11, JB12 dan JB13 merupakan lintasan yang memotong ditengah JB09 dan JB10. Lintasan JB15 dan JB16 berada di percabangan Jl. Joyoboyo, dimana JB15 mengukur didekat pemukiman penduduk sedangkan JB16 terletak ditengah jalan raya. Lintasan terpanjang yaitu JB17 dan JB26 membentang di jalan raya dari timur ke arah barat tepat didepan Terminal Joyoboyo. Kedua lintasan ini dipotong oleh lintasan JB18, JB21, JB22, JB23, JB24, JB25, dan JB27 yang semuanya berada di Jl. Joyoboyo depan Terminal serta tidak berada dekat pemukiman penduduk. Lintasan JB19 mengukur dari depan Polsek Wonokromo hingga pintu masuk Terminal. Sedangkan lintasan JB20 mengukur ke arah pintu masuk Terminal Joyoboyo.

Berikutnya data hasil pengukuran diolah menggunakan perangkat lunak MatGPR R-3.1 dengan tahap *adjust signal position, dc removal, dewowing, median filter, inverse amplitude decay, background removal, K-L filter, bandpass filter, velocity model* dan *time to depth conversion*. Data yang telah diproses dimodelkan dalam profil 2-D dan 2,5-D untuk memvisualisasikan struktur jaringan pipa air. Dari hasil pengolahan dan pemodelan 2-D, terdapat pola refleksi hiperbola tebal dan berukuran besar dengan amplitudo yang kuat di kedalaman 1 – 2 meter dari permukaan (**Gambar 4.1** dan **4.2**). Walaupun terdapat beberapa lintasan yang tidak menunjukkan pola anomali tersebut, namun hampir seluruh lintasan pengukuran menunjukkan adanya pola anomali hiperbola. Menurut (Ghazali et al., 2019) pola hiperbola berukuran besar dan memiliki refleksi yang tebal menunjukkan adanya pipa terkubur di lokasi tersebut. Besarnya radius hiperbola ini dipengaruhi oleh kedalaman bidang pantul atau variasi ukuran objek yang terdeteksi. Adapun lintasan yang tidak menunjukkan anomali tersebut diantaranya yaitu JB07, JB14, JB16, JB19 dan JB20.

Berdasarkan **Gambar 4.1**, diketahui bahwa pada kedalaman 0 – 3,5 meter amplitudo sedang tersebar merata dari awal hingga akhir lintasan, sedangkan pada kedalaman > 3,5 meter terlihat amplitudo menjadi lebih rapat dan menampilkan fitur-fitur horizontal yang lebih kecil (sinyal yang koheren) serta dipengaruhi oleh *noise*. Selain itu, amplitudo rendah (warna hijau) yang merupakan warna dominan menunjukkan lapisan dasar (*background layer*) di lintasan pengukuran. Pada tampilan *grayscale* (**Gambar 4.2**) pola hiperbola berukuran besar dan refleksi yang tebal berada di kedalaman ± 1 meter, pada meter ke 4,6 dari lintasan JB12 (kotak merah). Pola inilah yang kemudian diduga sebagai letak pipa air bawah permukaan dengan kedalaman ± 1 meter. Hasil analisis kecepatan pada lintasan JB12 (**Gambar 4.3**) menunjukkan kecepatan gelombang EM dari hiperbola tersebut berkisar dari 0,0436 – 0,0715 m/ns sehingga dengan perhitungan menggunakan persamaan 2.17 didapatkan nilai konstanta dielektrik objek memiliki rentang dari 17,6 – 47,36.

Berdasarkan profil radargram 2-D (*grayscale*), lintasan JB13 (**Gambar 4.5**) dugaan lokasi pipa air berada di kedalaman $\pm 1,5$ meter dan berada pada meter ke 10,2 dari lintasan JB13. Selain itu, terlihat juga pola refleksi hiperbola besar di kedalaman 2,5 dan 3,5 meter yang diidentifikasi sebagai efek ringing dari objek di atasnya. Efek ringing ini dapat muncul sebagai akibat dari gelombang EM yang ditransmisikan dari instrumen GPR bertemu dengan utilitas yang bersifat konduktif. Hal ini menunjukkan bahwa material penyusun pipa-pipa air yang menjadi target penelitian merupakan material logam besi. Efek ringing ini juga ditemukan di lintasan JB25. Berdasarkan radargram 2-D lintasan JB25 (**Gambar 4.17**), dugaan pipa air berada di kedalaman ± 1 meter, pada meter ke 10,7 dari lintasan JB25. Objek pipa tersebut juga menunjukkan efek ringing hingga kedalaman 5 meter dari permukaan. Terlihat juga pola hiperbola berukuran lebih kecil dekat permukaan, yaitu pada meter ke 4,65 dan 18,2. Objek ini diidentifikasi sebagai pipa-pipa kecil dengan kedalaman dangkal. Utilitas dangkal lainnya juga terlihat pada radargram 2-D lintasan JB22 di kedalaman 0 – 2 meter dari permukaan. Anomali hiperbola berukuran kecil yang terletak < 5 meter lintasan pengukuran ini, diduga sebagai utilitas dangkal dekat permukaan. Untuk objek yang diduga sebagai pipa air berada di kedalaman 0,5 dan 0,8 meter pada meter ke 1,7 dan 14,4 dari lintasan JB22. Selain itu, analisis juga dilakukan terhadap salah satu lintasan terpanjang yaitu JB17 dengan panjang total 76,22 meter, indikasi target pipa air bawah permukaan yang berada di kedalaman ± 2 meter pada meter ke 50 dari total panjang lintasan. Terdapat 2 anomali hiperbola dimana hiperbola atas diduga sebagai lokasi pipa target, sedangkan anomali hiperbola dibawahnya merupakan efek ringing dari pipa di atasnya. Selain itu anomali lateral di kedalaman 1,8 meter pada meter ke 27 – 40 (13 meter) pada lintasan pengukuran, diduga sebagai perlapisan tanah timbunan. Walaupun kemenerusannya tidak terlihat dengan jelas hingga akhir lintasan.

Analisis juga dilakukan pada lintasan JB14 yang tidak menunjukkan adanya anomali hiperbola berukuran besar. Perlu diketahui terlebih dahulu sebelumnya bahwa lintasan JB14 merupakan lintasan yang sejajar dengan lintasan JB07. Kedua lintasan tersebut memotong rangkaian jalur trem Kota Surabaya yang dibangun pada zaman kolonial Belanda. Hal ini berdasarkan penelitian (Bahri et al., 2015) yang mengumpulkan informasi jalur trem Kota Surabaya berdasarkan peta peninggalan jalur trem lama Belanda milik PT. KAI ketika melakukan penelitian deliniasi jalur trem lama Kota Surabaya dengan metode GPR. Berdasarkan **Gambar 4.8**, terlihat adanya dua pasang anomali hiperbola berukuran kecil dengan jarak yang konstan. Kedua pasang hiperbola tersebut terpisah sejauh 3 meter. Pola refleksi yang ditemukan pada kedalaman ± 1 meter ini juga terlihat pada radargram JB07 dengan kedalaman yang sama. Dari hasil analisis kecepatan, diketahui bahwa nilai kecepatan objek tersebut sama yaitu sebesar 0,0637 dengan nilai konstanta dielektrik sebesar 22,18. Pola hiperbola kembar dan sepasang ini menunjukkan adanya objek dengan ukuran dan dimensi yang identik dan diduga sebagai jalur trem kuno peninggalan kolonial Belanda.

Tabel 4.1 Nilai Konstanta Dielektrik Berbagai Material Besi (Chen et al., 2014; Didik, 2020; Kamal et al., 2020)

Material	Konstanta Dielektrik (ϵ)
Besi Oksida	12,0 - 20,0
Bijih Besi	9,41 - 14,22
Pipa Besi	3,6 - 14,4

Berikutnya dilakukan analisis kecepatan di setiap lintasan untuk mengetahui nilai kecepatan dari pola hiperbola yang tampak pada radargram. Nilai kecepatan ini kemudian

digunakan untuk menghitung nilai permitivitas relatif/konstanta dielektrik dari objek yang terdeteksi. Pada radargram 2-D yang menunjukkan adanya efek ringing (**Gambar 4.5** dan **4.17**) terlihat bahwa semakin meningkatnya kedalaman, nilai kecepatannya akan semakin berkurang dikarenakan adanya pengaruh atenuasi. Berdasarkan analisis kecepatan dari setiap anomali hiperbola di setiap lintasan, diketahui bahwa kecepatan hiperbola berkisar dari 0,0609 – 0,113 m/ns. Dari hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.17, didapatkan bahwa nilai konstanta dielektrik objek memiliki rentang dari 7,05 – 24,27. Menurut Chen et al., (2014), Didik (2020) dan Kamal et al., (2020), rentang nilai ini termasuk ke dalam klasifikasi nilai konstanta dielektrik untuk material logam besi. Hal ini semakin menguatkan bahwa material penyusun pipa-pipa air yang menjadi target penelitian terbuat dari logam besi.

Pemodelan 2,5-D dilakukan dengan menghubungkan setiap anomali hiperbola yang diduga target pipa air pada setiap radargram sehingga dapat diketahui kemenerusan dari pipa air tersebut. Berdasarkan hasil pemodelan 2,5-D (**Gambar 4.19**) diketahui bahwa jaringan pipa air menerus dari arah selatan menuju utara lokasi pengukuran. Jaringan pipa air ini memotong Jalan Joyoboyo dan kemungkinan menerus hingga ke Kebun Binatang Surabaya. Garis hijau pada gambar mewakili dugaan kuat dari struktur jaringan pipa air, sedangkan garis kuning menunjukkan kurangnya data sehingga kemenerusannya berdasarkan interpretasi dan sedikit diragukan. Garis kuning ini terdapat di beberapa lintasan seperti JB10, JB15 dan JB27. Pada lintasan JB15, interpretasi kemenerusan jaringan pipa air terlihat seperti terputus sebab radargram hasil pengolahan yang buram dan banyak fitur-fitur yang terpotong. Sehingga tidak diketahui apakah pipa air memotong atau sejajar lintasan tersebut. Namun kemenerusan diduga kuat sejajar dengan lintasan (garis kuning JB15). Berdasarkan **Gambar 4.20** dan **4.21** terlihat juga bahwa terdapat pipa besar (kotak biru) yang melintasi Sungai Kalimas ke arah lokasi penelitian. Anomali pipa besar ini terlihat pertama kali di profil radargram JB17 (**Gambar 4.11**) sebelum terhubung dan terdeteksi di profil radargram lainnya. Dari hasil interpretasi, jaringan pipa air diduga bermula dari selatan (pipa besar yang melintasi Sungai Kalimas) kemudian memotong di bawah Jalan Joyoboyo dan sejajar dengan lintasan JB23. Berikutnya pipa air bercabang ke arah barat dan ke arah timur. Pipa yang mengarah barat menyusuri Jalan Joyoboyo, sedangkan pipa yang mengarah ke timur diduga memotong di persimpangan Jalan Joyoboyo hingga sejajar dengan lintasan JB15. Berikutnya jaringan pipa terlihat menerus ke utara menuju Kebun Binatang Surabaya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan terhadap hasil pemodelan metode GPR dalam mengidentifikasi struktur jaringan pipa air bawah permukaan pada lokasi penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Jaringan pipa air bawah permukaan pada Jalur “SZJT” terdeteksi dari adanya pola refleksi hiperbola tebal berukuran besar dengan amplitudo yang kuat pada kedalaman 1 – 2 meter yang terlihat hampir di setiap lintasan pengukuran. Adapun lintasan yang tidak menunjukkan anomali tersebut diantaranya yaitu JB07, JB14, JB16, JB19 dan JB20. Dari hasil perhitungan, diketahui rentang kecepatan pipa air berkisar dari 0,0609 – 0,113 m/ns dengan nilai konstanta dielektrik sebesar 7,05 – 24,27.
2. Struktur jaringan pipa air pada Jalur “SZJT” berdasarkan pemodelan 2,5-D memiliki arah kemenerusan dari selatan menuju utara. Struktur ini diduga bermula dari selatan lokasi penelitian yaitu berupa pipa besar yang melintasi Sungai Kalimas, kemudian memotong di bawah Jalan Joyoboyo dan sejajar dengan lintasan JB23 yang berada tepat di depan Polsek Wonokromo. Berikutnya pipa air bercabang ke arah barat dan ke arah timur. Pipa yang mengarah barat menyusuri Jalan Joyoboyo, sedangkan pipa yang mengarah ke timur diduga memotong di persimpangan Jalan Joyoboyo hingga sejajar dengan lintasan JB15. Berikutnya jaringan pipa terlihat menerus ke utara menuju Kebun Binatang Surabaya.

5.2 Saran

Dalam penelitian selanjutnya penulis menyarankan beberapa hal, diantaranya yaitu:

1. Perlu adanya integrasi dengan metode geofisika lainnya seperti VLF dan Geolistrik 2-D dengan tujuan validasi hasil yang diperoleh.
2. Edukasi ke masyarakat sekitar terkait dengan adanya utilitas terkubur lain yaitu jalur trem kuno Kota Surabaya di lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Alonso, M., & Finn, E. (1992). *Dasar-dasar Fisika Universitas (terjemahan)*. Erlangga, Jakarta.
- Amir, D. (2013). Rancang bangun ground penetrating radar untuk mendeteksi saluran pipa bawah tanah. *Prosiding SNYuBe*, 169–176.
- Annan, A. P. (2009). Electromagnetic principles of ground penetrating radar. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, 1*, 1–37.
- Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1992). Ground penetrating radar survey design. *5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, cp-210.
- Annan, P. (2003). Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and Software*, 278.
- Bagaskara, A., Wafi, A., Setiawan, N. S., & Mariyanto, M. (2021). Detection of buried human bodies using ground-penetrating radar method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1876(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1876/1/012014>
- Bahri, Ayi Syaeful; Supriyanto; Sentosa, B. J. (2009). Penentuan Karakteristik Dinding Gua Seropan Gunung Kidul dengan Metode Ground Penetrating Radar. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 1–12. <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-12481-Paper.pdf>
- Bahri, A. (2015). S., Syaifuddin, F., and Pandu, J., GNR “Delineation of Buried Old Tram Tracks of Surabaya City with Ground Penetrating Radar Technology.” *Joint Convention Balikpapan*. HAGI-IAGI-IAFMI-IATMI.
- Bahri, A. S., & Madlazim. (2012). *PEMETAAN TOPOGRAFI, GEOFISIKA DAN GEOLOGI KOTA SURABAYA*. 2(2), 23–28.
- Bahri, A., Syaifuddin, F., & Pandu, J. (2015). *Delineation of Buried Old Tram Tracks of Surabaya City with Ground Penetrating Radar Technology*. HAGI-IAGI-IAFMI-IATMI.
- Bemmelen, V. R. W. (1949). The geology of Indonesia, vol. 1A. *Government Printing Office, The Hague*, 732.
- Budiono, K., HandoKo, H., Hernawan, U., & Godwin, G. (2010). Penafsiran Struktur Geologi Bawah Permukaan di Kawasan Semburan Lumpur Sidoarjo, Berdasarkan Penampang Ground Penetrating Radar (GPR). *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), 187–195. <https://doi.org/10.17014/ijog.v5i3.102>
- Chen, D., Yen, M., Lin, P., Groff, S., Lampo, R., McInerney, M., & Ryan, J. (2014). A corrosion sensor for monitoring the early-stage environmental corrosion of A36 carbon steel. *Materials*, 7(8), 5746–5760. <https://doi.org/10.3390/ma7085746>
- Ciampoli, L. B., Tosti, F., Economou, N., & Benedetto, F. (2019). Signal processing of GPR data for road surveys. *Geosciences (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences9020096>
- Conyers, L. B. (2004). *Ground-penetrating Radar for Archaeology* Altamira Press. *Walnut Creek, California*.

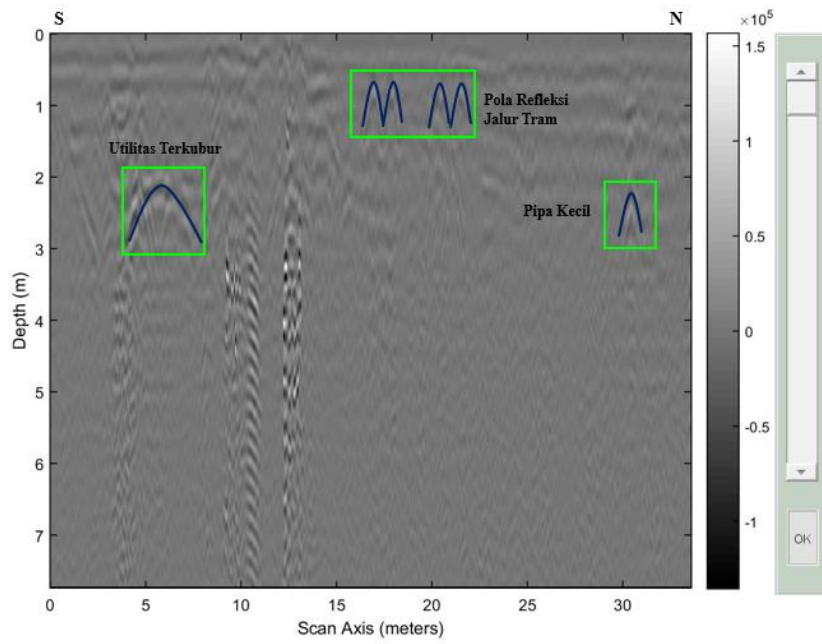
- Conyers, Lawrence B. (2016). *Ground-penetrating radar for geoarchaeology*. John Wiley & Sons.
- De Genevraye, P., & Samuel, L. (1972). *Geology of the Kendeng zone (Central & east Java)*.
- Deffian, V., Ramadianti, N., Pranatya, A., Saragih, D., & Nababan, R. (2019). *Aplikasi Ground Penetrating Radar Untuk Mengidentifikasi Voids Pada Beton*. October.
- Deffian, V., W., N. R., Pranatya, A., Alamsah, D., & Nababan, R. N. (2020). *VALIDASI JARINGAN PIPA EXISTING PDAM MENGGUNAKAN METODE GEORADAR DI DAERAH BOGOR, JAWA BARAT*.
- Didik, L. A., & Wahyudi, M. (2020). ANALISA KANDUNGAN Fe DAN KARAKTERISTIK SIFAT LISTRIK PASIR BESI PANTAI TELINDUNG YANG DISINTESIS DENGAN BEBERAPA METODE. *Indonesian Physical Review*, 3(2), 64–71. <https://doi.org/10.29303/ipr.v3i2.58>
- Dojack, L. (2012). *Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists*. Project Report, University of British Columbia, April.
- Elfarabi, Widodo, A., & Syaifudin, F. (2017). Pengolahan data Ground Penetrating Radar (GPR) dengan menggunakan software MATGPR R-3.5. *Jurnal Teknik ITS, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 6(1), 91–94.
- Ghazali, R., Rasam, A. R. A., Razali, M. H., Razali, R., & Latif, Z. A. (2019). Estimation of different subsurface materials depth using ground penetrating radar. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1.3 S1), 363–370. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/6581.32019>
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR remote sensing in archaeology* (Vol. 9). Springer.
- Griffiths, David J; College, R. (1999). *Introduction to Electrodinamic* (p. 599).
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons.
- Jol, H. M. (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.
- Kafi, M. S. (2016). *Analisa Kondisi Bawah Permukaan Tanggul Lumpur Sidoarjo Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) pada Titik P76-77, P78-79, P79-83*.
- Kuo, C. (2021). Ground-penetrating radar to investigate mud pumping distribution along a railway line. *Construction and Building Materials*, 290, 123104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123104>
- Luga, A. L., Muliadi, M. M., & Ivansyah, O. (2019). Identifikasi Pipa Metal Bawah Permukaan Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR). *Prisma Fisika*, 7(1), 20. <https://doi.org/10.26418/pf.v7i1.32286>
- MacEachren, A. M. (2004). *How maps work: representation, visualization, and design*. Guilford Press.
- Merkle, D., Frey, C., & Reiterer, A. (2021). Fusion of ground penetrating radar and laser scanning for infrastructure mapping. *Journal of Applied Geodesy*, 15(1), 31–45.

<https://doi.org/10.1515/jag-2020-0004>

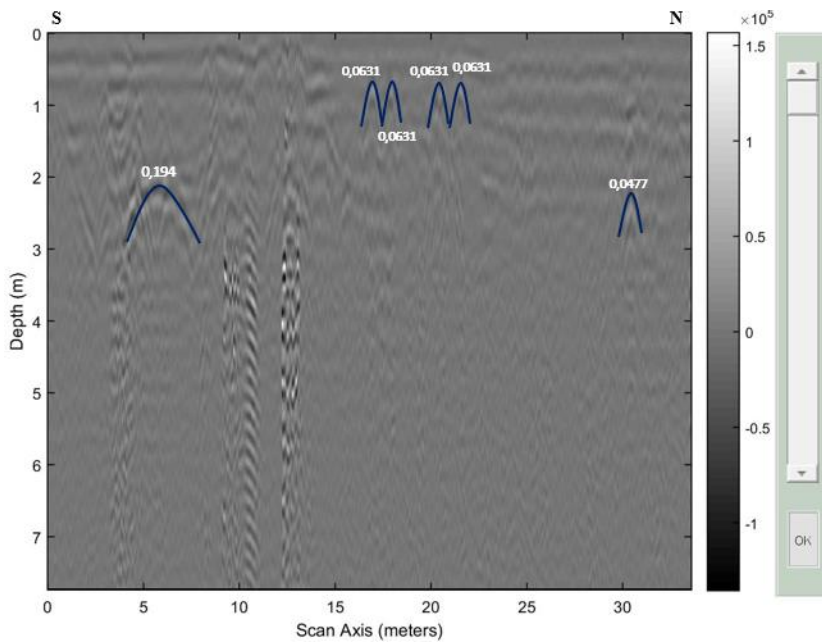
- Mohd Kamal, N. H. B., Amin, Z. M., & Mohamad, N. B. (2020). The Effect of Ground Penetrating Radar (GPR) Image Reflection on Different Pipes and Soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 540(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012093>
- Muniroh, F. (2020). *Aplikasi metode ground penetrating radar untuk identifikasi gua bawah tanah*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Murdaningtyas, D. A. (2019). *Pemodelan 3D Data Ground Penetrating Radar (GPR) Studi Kasus : Situs Joko Dhahar Desa Terung Wetan , Krian , Sidoarjo*.
- Paltrinieri, F., Saint-Marc, P., & Situmorang, B. (1976). *Stratigraphic and paleogeographic evolution during Cenozoic time in Western Indonesia*.
- Persico, R. (2014). *Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing*. John Wiley & Sons.
- Pramudhita, B. D. P. A., Yusroni, S. A., Wafi, A., Setiawan, N. S., Santoso, S. B., & Mariyanto, M. (2021). Georadar method for detecting underground septic tank. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012020>
- Pringgoprawiro, H. (1983). Biostratigraphy and Paleogeography of North East Java Basin: A New Approach. *Disertasi Doktor ITB*.
- Rao, B. V., Sevu, M., & Narasaiah, V. (2019). Determination of dielectric constants of overburden materials using ground penetrating radar. *1st Indian Near Surface Geophysics Conference and Exhibition, January*, 113–124. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201979021>
- Reynolds John, M. (1997). An introduction to applied environmental geophysics John Wiley & Sons Ltd. *West Sussex, England*, 796.
- Skolnik, M. (2008). Radar Handbook Third Edition. In *The McGraw-Hill Companies*. <https://doi.org/10.1007/s10194-006-0268-4>
- Soekardi. (1992). Geologi Lembar Pacitan, Jawa. *Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi Indonesia*.
- Solihin, C., Taufik, A., Muhamad, F. H., & Denya, R. (2017). Studi Geofisika Untuk Menentukan Batas Formasi Jampang dan Formasi Ciletuh di Kawasan Geopark Ciletuh. *Wahana Fisika*, 2(2), 31. <https://doi.org/10.17509/wafi.v2i2.9373>
- Sugiarto, B., Junursyah, G. M. L., & Pratomo, I. (2018). Identifikasi Objek Bawah Permukaan Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar di Kompleks Candi Kedaton, Muarojambi, Indonesia. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 19(4), 201–211.
- Sujanto, F. X., & Sumantri, Y. R. (1977). *Preliminary study on the Tertiary depositional patterns of Java*.
- Supandjono, J. B., Hasan, K., Panggabean, H., Satria, D., & Sukardi. (1992). *Peta Geologi Lembar Surabaya & Sapulu, Jawa*. Bandung, Indonesia: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Supriyanto. (2007). *Perambatan Gelombang Elektromagnetik*. 1–17.

- Szymczyk, M., & Szymczyk, P. (2013). Preprocessing of GPR data. *Ipc*, 18(2–3), 83–90. <https://doi.org/10.2478/v10248-012-0082-3>
- Tong, L.-T. (1993). Application of ground Penetrating Radar to Locate Underground Pipes. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 4(2), 171. [https://doi.org/10.3319/tao.1993.4.2.171\(t\)](https://doi.org/10.3319/tao.1993.4.2.171(t))
- Yulianita, D., Aisyah, R. R., Wafi, A., Setiawan, N. S., & Mariyanto, M. (2021). Detection of water seepage in lake body using ground penetrating radar method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1876(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1876/1/012012>

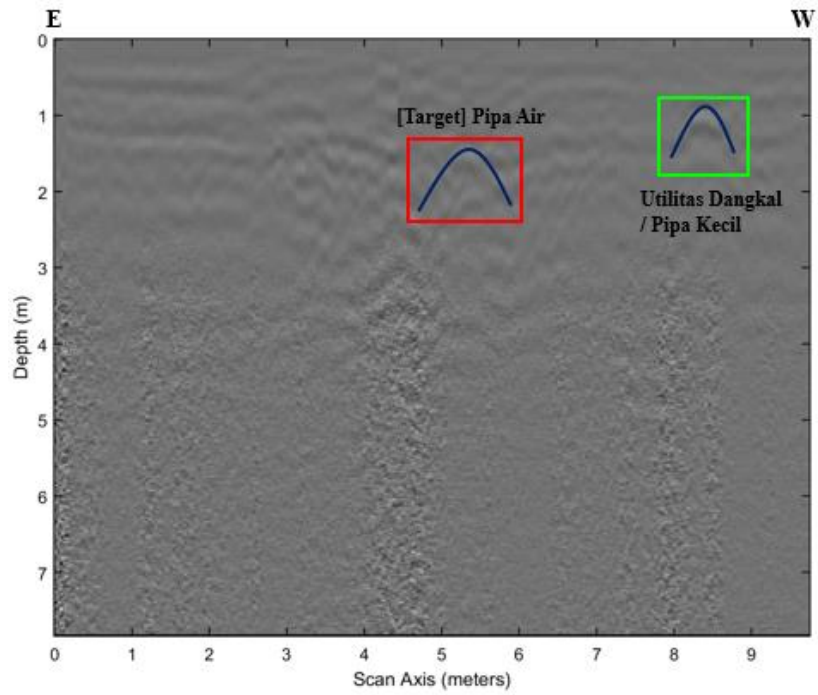
LAMPIRAN



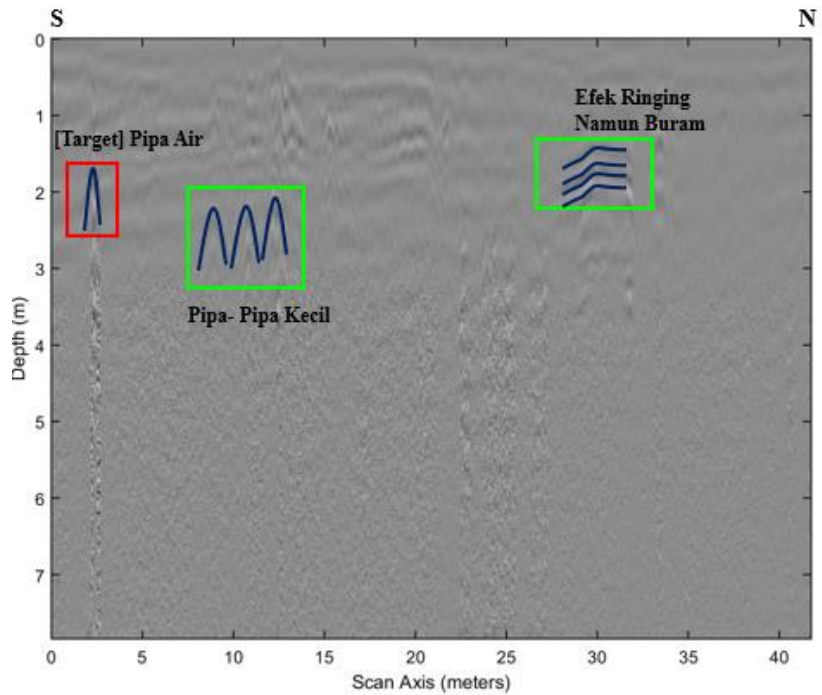
Gambar 1. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB07



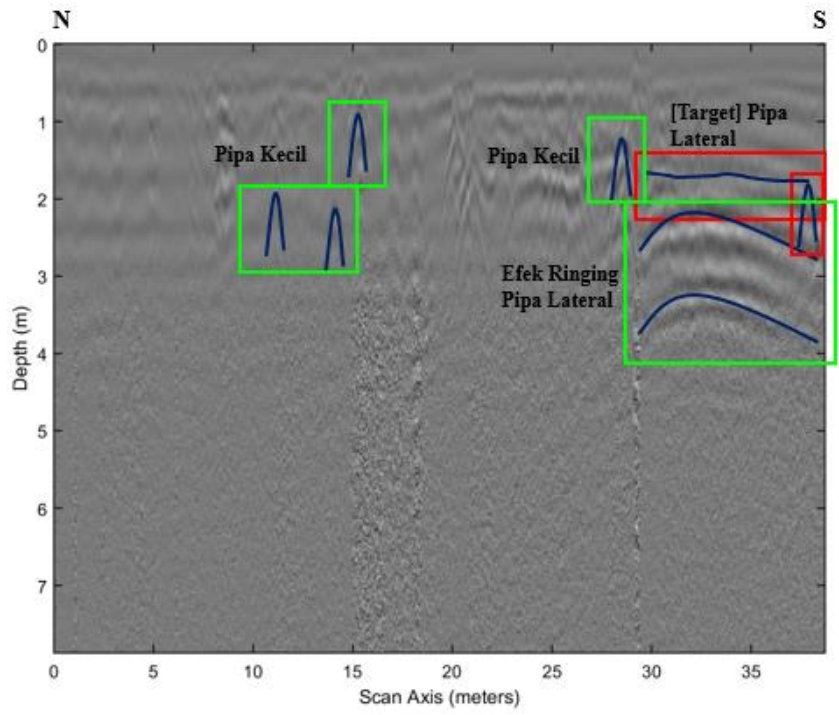
Gambar 2. Analisis Kecepatan Lintasan JB07



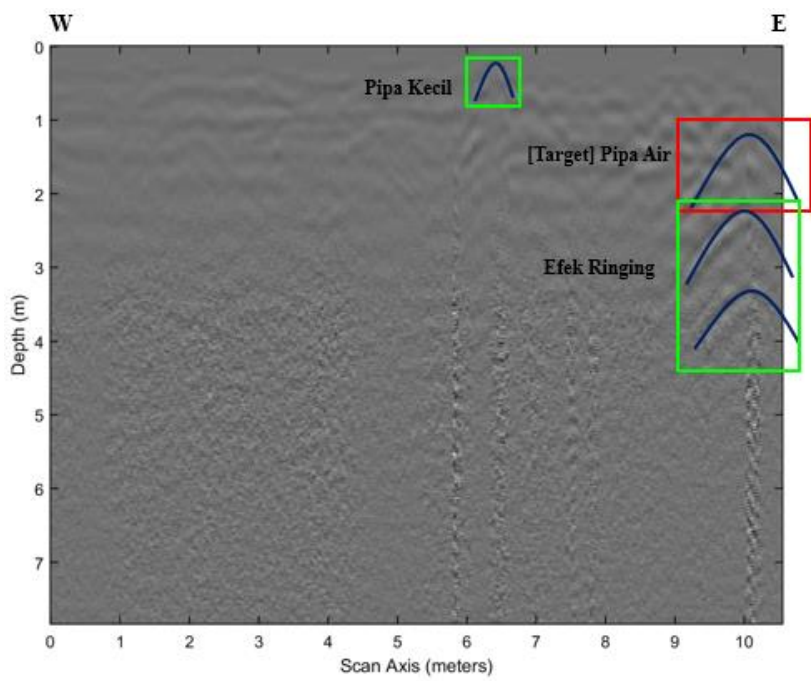
Gambar 3. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB08



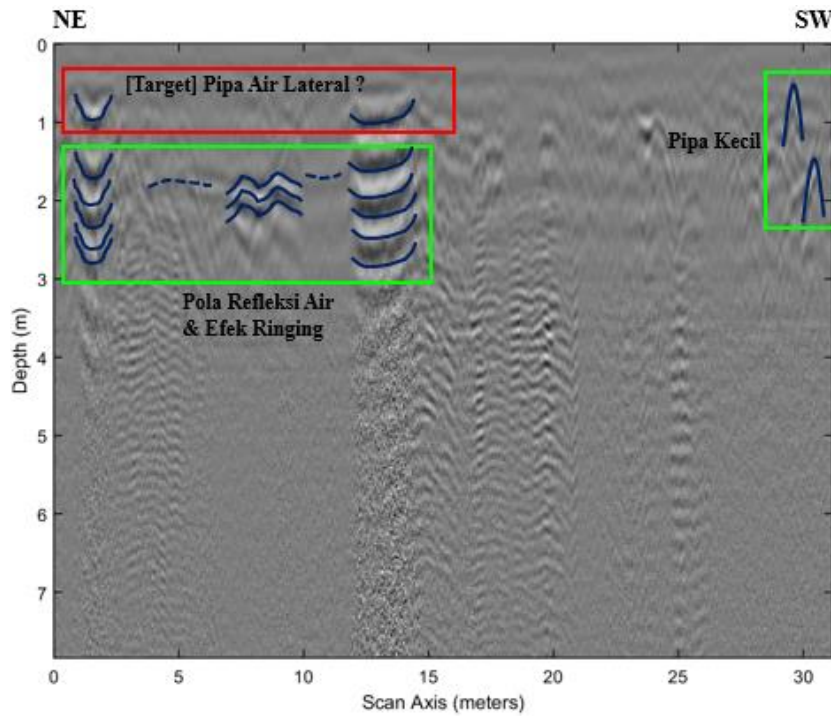
Gambar 4. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB09



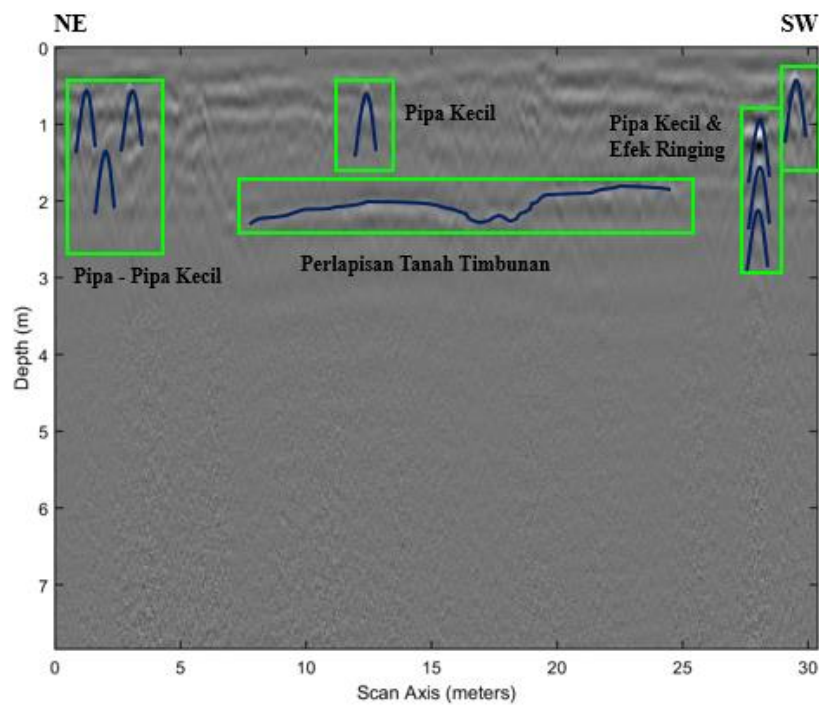
Gambar 5. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB10



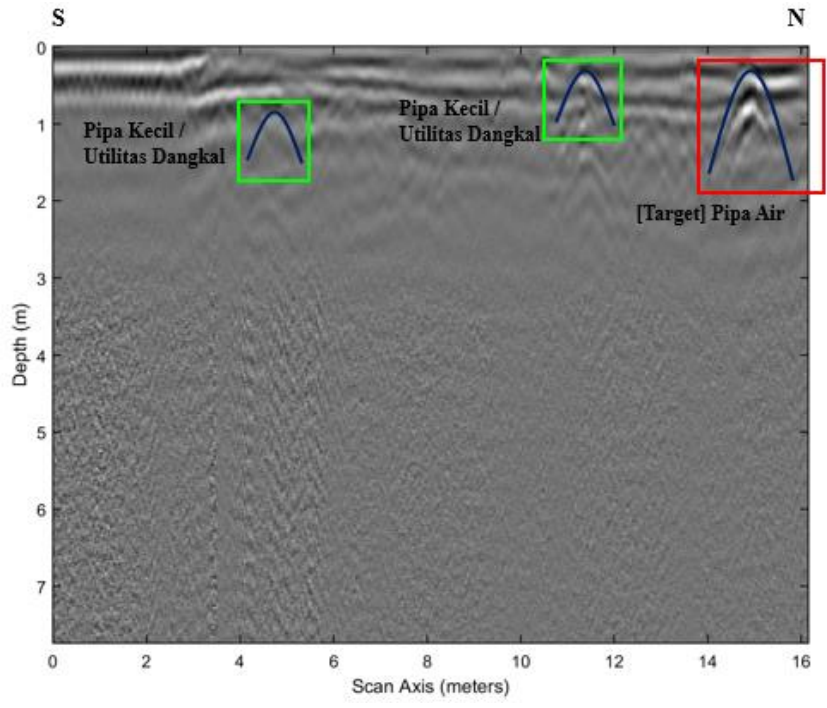
Gambar 6. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB11



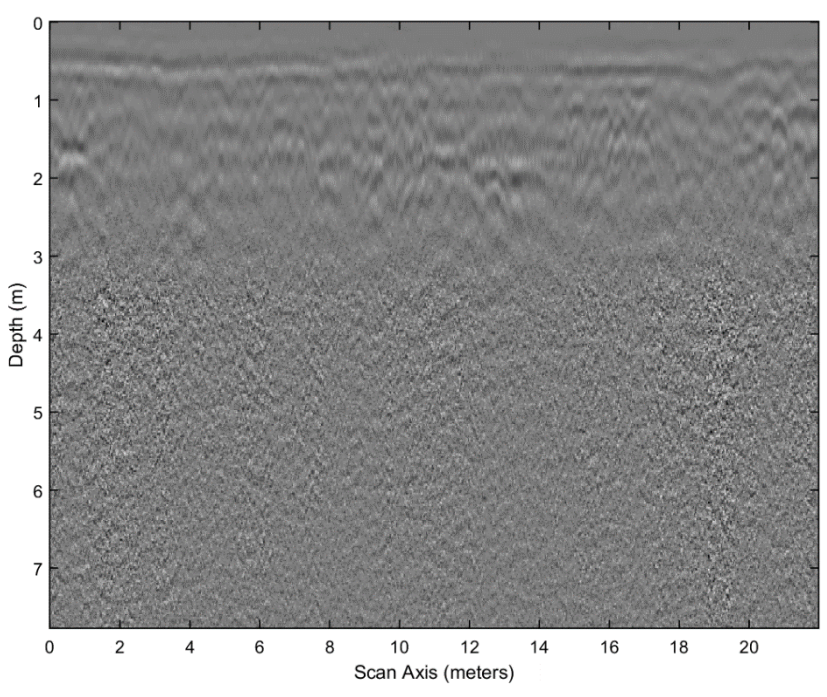
Gambar 7. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB15



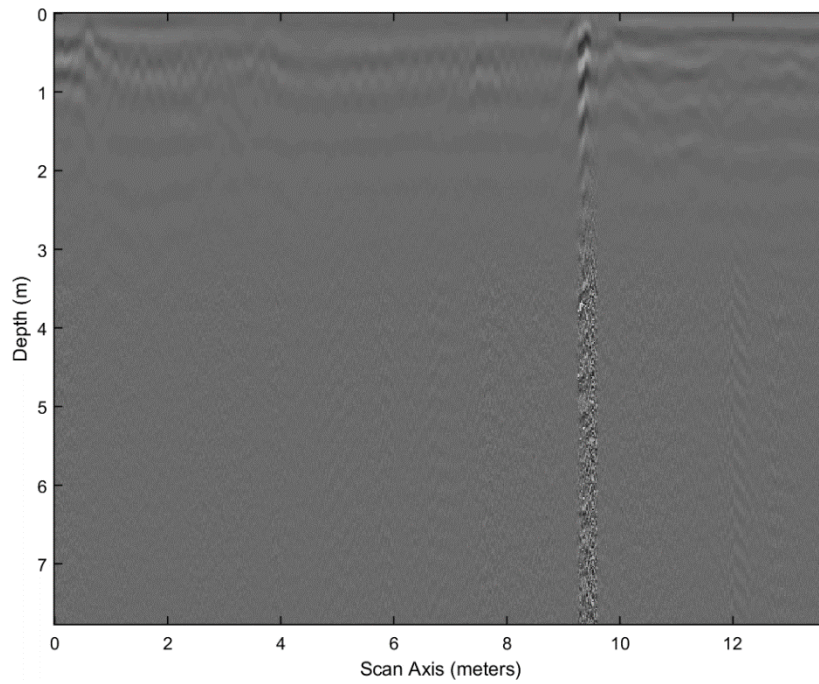
Gambar 8. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB16



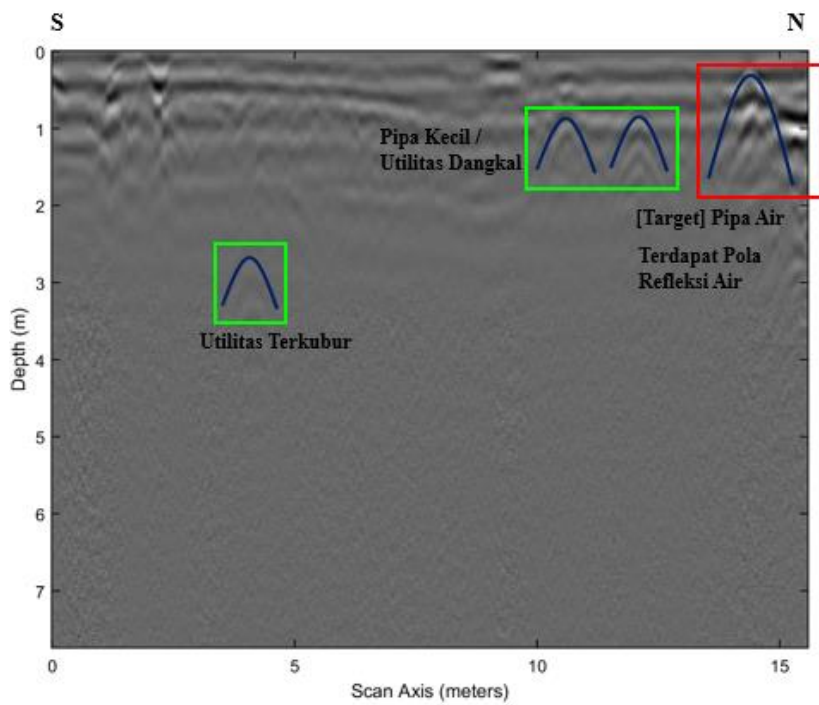
Gambar 9. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB18



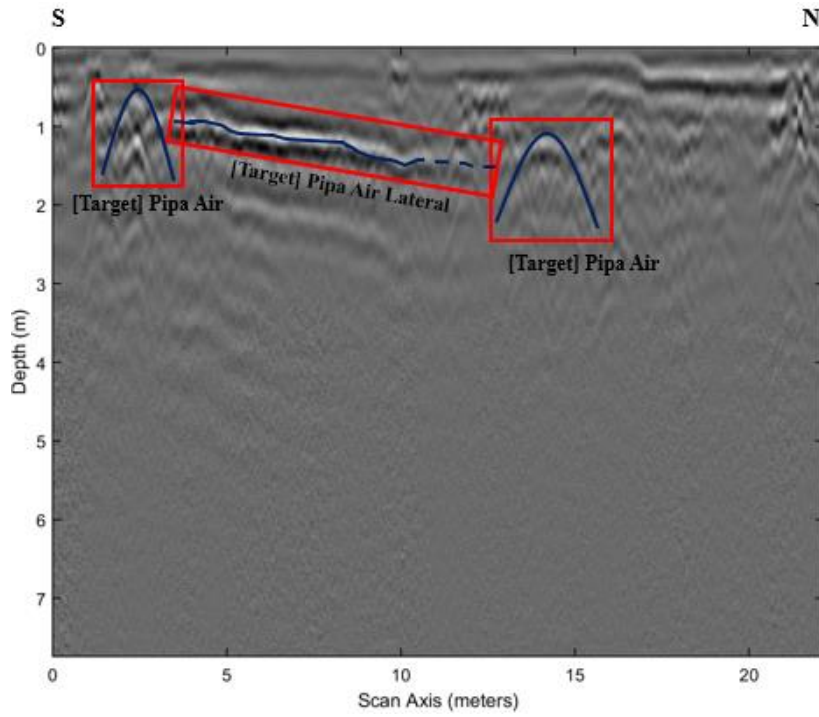
Gambar 10. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB19



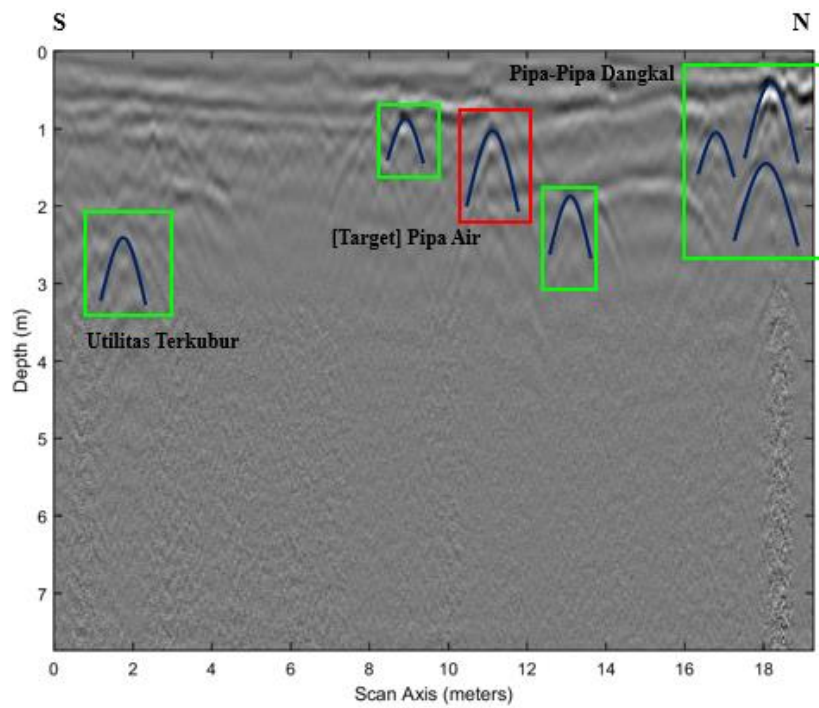
Gambar 11. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB20



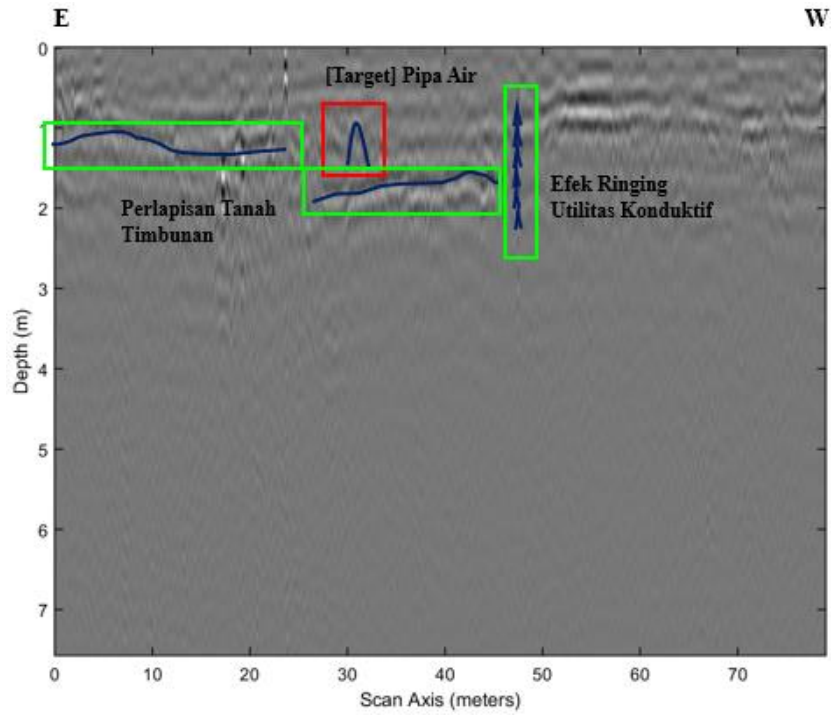
Gambar 12. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB21



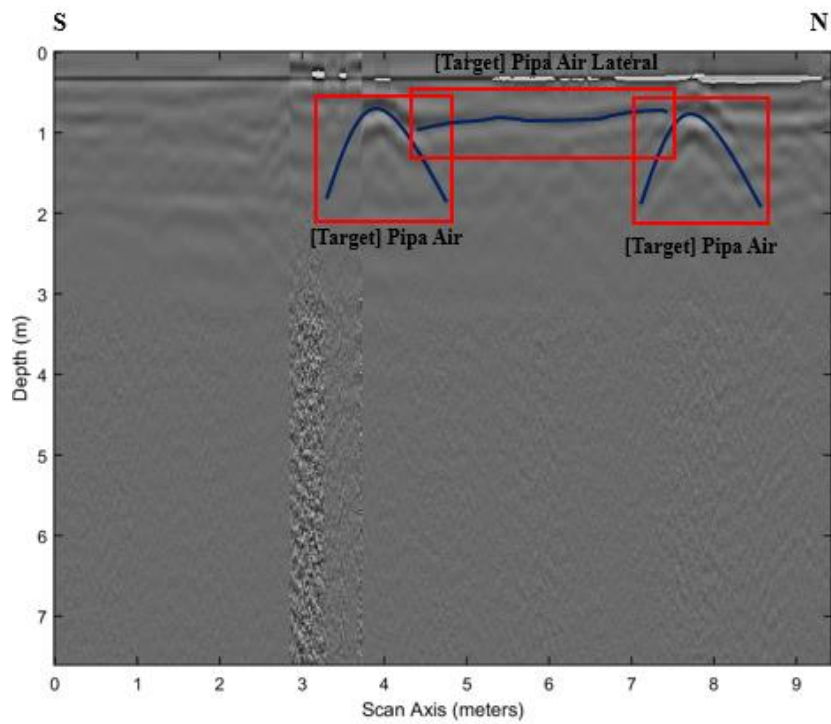
Gambar 13. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB23



Gambar 14. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB24



Gambar 15. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB26



Gambar 16. Profil Radargram GPR 2-D Lintasan JB27

Tabel 1. Kemungkinan Letak Pipa Air

Kemungkinan Letak Pipa Air						
Line	Velocity (m/ms)	Depth (m)	Radius (m)	Location (m)	Keterangan	Konstanta Dielektrik
JB07	0,194	2,84	0,507	5,74	Utilitas Terkubur	2,39
	0,0402	0,477	0	30,4	Pipa Kecil	55,69
	0,0631	0,237	0	16,9	Jalur Tram	22,60
	0,0631	0,237	0	17,9		22,60
	0,0631	0,237	0	20,5		22,60
	0,0631	0,237	0	21,5		22,60
JB08	0,0706	0,548	0	5,28	[Target] Pipa Air	18,06
	0,068	0,347	0	8,38	Utilitas Dangkal/Pipa Kecil	19,46
JB09	0,0784	0,767	0	2,4	[Target] Pipa Air	14,64
	0,0596	0,782	0	8,85	Pipa-Pipa Kecil	25,34
	0,0596	0,695	0	10,8		25,34
	0,0596	0,695	0	12,2		25,34
JB10	0,0579	0,677	0	14,1	Pipa Kecil	26,85
	0,0648	0,196	0,0655	15,4		21,43
	0,057	0,196	0	11,1		27,70
	0,0744	0,546	0	28,6		16,26
	0,07	0,913	0	38,4		[Target] Pipa Air
	Kemungkinan Pipa Air Lateral Kedalaman 1,5 m Disertai Efek Ringing					
JB11	0,085	0,113	0	6,4	Pipa Kecil	12,46
	0,0968	0,813	0	10	[Target] Pipa Air	9,60
	0,0789	0,996	0	10,1	Efek Ringing Pipa Air	14,46
	0,0789	1,49	0	10,1		14,46
JB12	0,0715	0,423	0	4,61	[Target] Pipa Air	17,60
	0,0701	0,975	0	4,19	Efek Ringing Pipa Air	18,31
	0,0436	0,879	0,0087	4,19		47,34
JB13	0,0739	0,574	0	10,2	[Target] Pipa Air	16,48
	0,0739	0,976	0	10,2	Efek Ringing Pipa Air	16,48
	0,0617	1,25	0	10,2		23,64
JB14	0,0637	0,266	0	17,4	Jalur Tram	22,18
	0,0637	0,266	0	18,4		22,18
	0,0637	0,266	0	21,1		22,18
	0,0637	0,266	0	21,9		22,18
JB15	0,0635	0,56	0	30,4	Pipa Kecil	22,32
	0,0635	1,47	0	30,8		22,32
	Pola Refleksi Air dan Efek Ringing Kemungkinan Pipa Lateral Pada Meter ke-2 dan ke 13,5					
JB16	0,402	0,104	0	0,993	Pipa Kecil	0,56
	0,402	0,104	0	2,98		0,56
	0,555	0,534	0	2,07		0,29
	0,0589	0,155	0	12,4		25,94
	0,0486	0,25	0	28,1		38,10
	0,0415	0,311	0	28	Pipa Kecil & Efek Ringing	52,26
JB17	0,0617	0,747	0	50	[Target] Pipa Air	23,64
Kemungkinan Terdapat Perlapisan Tanah Timbunan						
JB18	0,0423	0,52	0,352	4,67	Utilitas Dangkal/Pipa Kecil	50,30
	0,0423	0,649	0,352	11,4		50,30
		0,0609	0,503	0,352	14,9	[Target] Pipa Air
JB19	Tidak Ada Kenampakan Signifikan					
JB20	Tidak Ada Kenampakan Signifikan					

JB21	0,039	0,571	0	4,11	Utilitas Terkubur	59,17
	0,0781	0,392	0	10,6	Utilitas Dangkal/Pipa Kecil	14,76
	0,0781	0,392	0	12,1		14,76
	0,0781	0,323	0	14,5	[Target] Pipa Air	14,76
JB22	0,0871	0,477	0	1,7	[Target] Pipa Air	11,86
	0,0643	0,393	0	2,39	Utilitas Dangkal/Pipa-Pipa Kecil	21,77
	0,0643	0,076	0	2,39		21,77
	0,07	0,758	0	3,32		18,37
	0,07	0,758	0	4,77		18,37
	0,0758	0,333	0	6,03		15,66
	0,0799	0,835	0	10,2	Utilitas Terkubur	14,10
	0,0935	0,298	0	14,4	[Target] Pipa Air	10,29
	0,11	0,373	0	2,31	[Target] Pipa Air	7,44
0,113	0,682	0	14,1	[Target] Pipa Air	7,05	
Kemungkinan Terdapat Pipa Lateral yang Menghubungkan Kedua Pipa Air						
JB24	0,0643	1,18	0	2,05	Utilitas Terkubur	21,77
	0,0768	0,427	0	11,1	[Target] Pipa Air	15,26
	0,0715	0,333	0	8,89	Utilitas Dangkal/Pipa-Pipa Kecil	17,60
	0,0768	0,869	0	13,1		15,26
	0,0768	0,443	0	16,6		15,26
	0,0843	0,179	0	18,2		12,66
	0,0843	0,656	0	18		12,66
0,071	0,459	0	10,7	[Target] Pipa Air	17,85	
JB25	0,0603	0,656	0	10,7	Efek Ringing Pipa Air	24,75
	0,0603	0,828	0	10,7		24,75
	0,06	0,957	0	10,7		25,00
	0,0591	1,15	0	10,7		25,77
	0,0585	1,15	0	10,7	26,30	
	0,0606	0,282	0	4,65	Pipa Kecil	24,51
	0,0606	0,459	0	18,2		24,51
	0,0695	0,562	0	18,2		18,63
	JB26	0,0598	0,175	0	47,5	Efek Ringing Utilitas Konduktif
Kemungkinan Terdapat Perlapisan Tanah Timbunan						
JB27	0,0824	0,387	0,0733	3,93	[Target] Pipa Air	13,26
	0,0824	0,37	0,0733	7,75	[Target] Pipa Air	13,26
Rata - Rata Nilai Konstanta Dielektrik Pipa Air						14,92

BIODATA PENULIS



Rayhan Farisi Ramadhan lahir di Jakarta, 02 Desember 2000 merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Endang Sulardi dan Ibu Setia Prastiwi. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Malaka Jaya 09 Pagi (2006 – 2012), kemudian di SMPN 139 Jakarta (2012 – 2015), lalu melanjutkan sekolah di SMAN 103 Jakarta (2015 – 2018), dan terakhir penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjadi mahasiswa di ITS, penulis aktif dalam kegiatan organisasi dan kegiatan yang diselenggarakan oleh Fakultas, Departemen dan Himpunan Mahasiswa. Dalam Himpunan Mahasiswa, penulis pernah menjabat sebagai Kepala Divisi PSDM-D periode 2020 – 2021.

Selain itu, penulis juga aktif sebagai Asisten Praktikum Eksplorasi Seismik dan Asisten Praktikum Eksplorasi Elektromagnetik. Penulis terbuka untuk masukan, saran dan diskusi terkait Laporan Tugas Akhir ini dengan menghubungi email rayhanfr1@gmail.com.