

**EVALUASI KONDISI *BALLAST* MENGGUNAKAN PENDEKATAN
KECEPATAN, DOMAIN FREKUENSI, ATENUASI GELOMBANG
ELEKTROMAGNETIK, DAN STFT (*SHORT-TIME FOURIER
TRANSFORM*) PADA DATA GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)**

(Skripsi)

Oleh

Restu Wildanu Ahadi

1915051045



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

**EVALUASI KONDISI *BALLAST* MENGGUNAKAN PENDEKATAN
KECEPATAN, DOMAIN FREKUENSI, ATENUASI GELOMBANG
ELEKTROMAGNETIK, DAN STFT (*SHORT-TIME FOURIER
TRANSFORM*) PADA DATA GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)**

Oleh

RESTU WILDANU AHADI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

ABSTRAK

EVALUASI KONDISI *BALLAST* MENGGUNAKAN PENDEKATAN KECEPATAN, DOMAIN FREKUENSI, ATENUASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK, DAN STFT (*SHORT-TIME FOURIER TRANSFORM*) PADA DATA GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)

Oleh

Restu Wildanu Ahadi

Ballast adalah material granular yang digunakan untuk mendistribusikan tegangan akibat beban kereta api yang lewat ke tanah dasar. Kondisi lapangan yang dinamis membuat perubahan kondisi *ballast* dan dapat menyebabkan kereta anjlog. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kondisi *ballast* menggunakan pendekatan kecepatan, domain frekuensi, atenuasi gelombang EM (Elektromagnetik), dan STFT (*Short-time Fourier Transform*). Penelitian ini menggunakan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) dan dilakukan dalam skala lab dengan tiga kondisi *ballast* yang berbeda, yakni bersih, terendam air, dan *fouled* (terdapat pengotor). Jenis *ballast* yang digunakan berupa batu andesit dengan ketinggian *ballast* 30 cm dan pengotor 23 cm dari dasar *ballast*. Pola refleksi yang didapatkan pada radargram berupa *hummocky* dan bebas refleksi. Kecepatan gelombang EM pada *ballast* bersih sebesar 0.13 m/ns, *ballast* terendam air sebesar 0.08 – 0.09 m/ns, dan *ballast* dengan kondisi *fouled* 0.10 m/ns. Domain frekuensi gelombang EM *ballast* dalam kondisi bersih memiliki spektrum yang lebih tinggi dibandingkan *ballast* terendam air dan *ballast* dalam keadaan *fouled*. *Ballast* dalam keadaan *fouled* memiliki nilai atenuasi yang paling tinggi diantara tiga variabel *ballast* dan memiliki energi frekuensi yang sangat rendah.

Kata Kunci: GPR, *Ballast*, Kecepatan, Domain-Frekuensi, Atenuasi, STFT

ABSTRACT

EVALUATION OF BALLAST CONDITION USING VELOCITY, FREQUENCY DOMAIN, ATTENUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE AND STFT (SHORT-TIME FOURIER TRANSFORM) APPROACHES ON GPR (GROUND PENETRATING RADAR) DATA

By

Restu Wildanu Ahadi

Ballast is a granular material used to distribute stress due to the weight of passing trains to the subgrade. Dynamic field conditions change the condition of the ballast and can cause the train to derail. The aim of this research is to evaluate the condition of the ballast using the speed approach, frequency domain, EM (Electromagnetic) wave attenuation, and STFT (Short-time Fourier Transform). This research used the GPR (Ground Penetrating Radar) method and was carried out on a lab scale with three different ballast conditions, namely clean, submerged in water, and fouled (containing impurities). The type of ballast used is andesite stone with a ballast height of 30 cm and impurities 23 cm from the base of the ballast. The reflection pattern obtained on the radargram is hummocky and reflection-free. The EM wave speed in clean ballast is 0.13 m/ns, ballast submerged in water is 0.08 – 0.09 m/ns, and ballast in fouled conditions is 0.10 m/ns. The EM wave frequency domain of ballast in a clean condition has a higher spectrum than ballast submerged in water and ballast in a fouled state. Ballast in a fouled state has the highest attenuation value among the three ballast variables and has very low frequency energy.

Key Words: GPR, Ballast, Velocity, Frequency-Domain, Attenuation, STFT

Judul Skripsi

: **EVALUASI KONDISI *BALLAST* MENGGUNAKAN
PENDEKATAN KECEPATAN, DOMAIN
FREKUENSI, ATENUASI GELOMBANG
ELEKTROMAGNETIK, DAN STFT (*SHORT-TIME
FOURIER TRANSFORM*) PADA DATA GPR
(*GROUND PENETRATING RADAR*)**

Nama Mahasiswa

: **Restu Wildanu Ahadi**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **1915051045**

Program Studi

: **Teknik Geofisika**

Fakultas

: **Teknik**



1. **Komisi Pembimbing**

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP.

NIP 19720928 199903 1 001

Dosen Pembimbing II

Ilham Dani, S.T., M.T.

NIP 19850917 201903 1 004

2. **Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

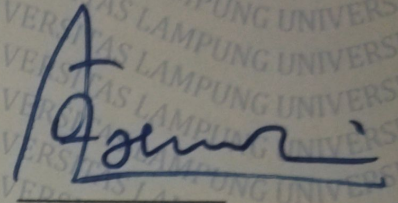
Karyanto, S.Si., M.T.

NIP 19691230 199802 1 001

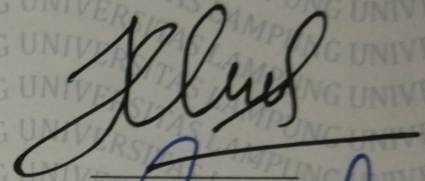
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

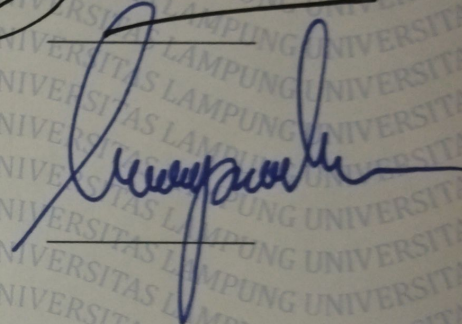
Ketua : Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP.



Sekretaris : Ilham Dani, S.T., M.T.



Anggota : Karyanto, S.Si., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. ♡
NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 8 Desember 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan dengan judul "Evaluasi Kondisi *Ballast* Menggunakan Pendekatan Kecepatan, Domain Frekuensi, Atenuasi Gelombang Elektromagnetik, Dan STFT (*Short-Time Fourier Transform*) Pada Data GPR (*Ground Penetrating Radar*)" adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang diakui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 16 Desember 2023



Restu Wildanu Ahadi

NPM. 1915051045

RIWAYAT HIDUP



Restu Wildanu Ahadi lahir di Bogor pada tanggal 24 Juni 2001, sebagai anak kedua dari lima bersaudara dari Bapak Koharudin dan Ibu Faridah. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari Taman kanak-kanak (TK) Mawar pada tahun 2006 hingga 2007. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan ke Sekolah Dasar (SD) hingga tahun 2013 di SDN Tanah Sareal 4. Lalu, menempuh pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) hingga tahun 2016 di SMP Negeri 20 Kota Bogor dan dilanjutkan ke jenjang Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 8 Kota Bogor hingga tahun 2019. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan ke tingkat perguruan tinggi di Universitas Lampung Jurusan Teknik Geofisika melalui SBMPTN 2019.

Selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika Unila, penulis aktif mengikuti beberapa organisasi kemahasiswaan dan aktif di berbagai kegiatan mahasiswa. Diantaranya pada Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana sebagai Anggota Sains dan Teknologi pada periode 2021 dan 2022, *Society of Exploration Geophysicists (SEG) Unila Student Chapter* sebagai anggota Divisi Internal periode 2021/2022 dan sebagai Presiden pada periode 2022/2023. Penulis juga aktif mengikuti perlombaan dan mendapatkan penghargaan, seperti mendapatkan pendanaan Program Kreativitas Mahasiswa pada tahun 2021 dan 2023, Juara 2 Mahasiswa Beprestasi tingkat Fakultas Teknik, Juara 2 LKTI Provinsi Lampung tahun 2023, dan mendapatkan *Travel Grant* pada tahun 2023 di Houston USA untuk mengikuti *SEG/Chevron Student Leadership Symposium* dan *Case Study Competition* dengan Tim dari Jerman, India, USA, dan Arab Saudi.

Penulis pernah menjadi *oral presenter* pada PIT HAGI Ke-47 tahun 2022 di Malang dengan topik GPR, menjadi *oral presenter* pada *The Universitas Lampung International Conference on Science, Technology, and Environment (ULICoSTE)* 2023 di Bandar Lampung dengan topik GPR, menjadi *oral presenter* Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri pada tahun 2023 di Bandar Lampung dengan topik Likuefaksi, dan menjadi *poster presenter* pada *The 5th International Conference on Geoscience and Earth Resources (ICGERE)* tahun 2023 di Bandung dengan topik *Carbon Capture Storage (CCS)*. Penulis juga mengikuti program di luar kampus seperti Program Magang Mahasiswa Bersertifikat di PTPN7 yang diselenggarakan oleh BUMN. Penulis juga melakukan *Joint Project* bersama PT. Pertamina EP Asset 2 dan PT. Medco E&P Rimau. Pada tahun 2022 penulis melaksanakan KP di PT. Bukit Asam Tbk dan melanjutkan Tugas Akhir mengenai evaluasi kondisi *ballast* menggunakan pendekatan baru. Penulis sangat tercandu dengan hal – hal yang berhubungan dengan Astronomi.

PERSEMBAHAN

Dengan ini mengucapkan Puji dan Syukur kepada Allah SWT, atas berkat rahmat, karunia, serta hidayahnya sehingga terselesaikan skripsi ini dengan lancar.

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

Papa dan Mama

BAPAK KOHARUDIN DAN IBU FARIDAH

Ucapan terima kasih dan rasa syukur takan pernah terbalaskan etu kepada Papa dan mama yang selalu memberikan hal-hal yang tebaik hingga etu bisa mencapai pencapain ini.

Berkat ridho dan doa Papa dan Mama etu bisa menyelesaikan jejang pendidikan etu hingga tahap ini dengan beragam macam suka dan duka. Terima kasih Pah Mah sudah menjadi orang tua terbaik buat etu. Semoga etu bisa selalu membanggakan Papa dan Mama serta bisa menjadi anak yang Papa dan Mama inginkan.

Kakak dan Adik-adik ku tersayang,

KA FANJI, AMEL, NORMA, DAN ZULFA

Terima kasih telah menjadi kakak dan adik yang terbaik buat etu, walaupun banyak hal yang sering sekali buat kita berantem, tapi kalian paling Top Margotop. Kita kudu tiasa jadi orang sukses dunia jeung akhirat na, kudu tiasa ngabanggakeun orang tua kita.

Supaya usaha nu ku mereka didik ti leutik nepi ka gede teu sia-sia. Semangat untuk kita semua.

Angkatan ku tergemoy,

TG19

Makasih banyak guyss empat tahun yang tak pernah terlupakan buat gw, semoga kita sukses selalu.

MOTTO HIDUP

“Silih Asah, Silih Asih, Silih Asuh”

-Prabu Siliwangi-

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul. **EVALUASI KONDISI BALLAST MENGGUNAKAN PENDEKATAN KECEPATAN, DOMAIN FREKUENSI, ATENUASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK, DAN STFT (*SHORT-TIME FOURIER TRANSFORM*) PADA DATA GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)** dengan lancar dan barokah. Saya ucapakan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan laporan ini. Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari sempurna karena adanya keterbatasan ilmu dan pengalaman yang dimiliki. Oleh karena itu, semua kritik dan saran yang bersifat membangun akan terima dengan sepenuh hati. Penulis berharap, semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Bandar Lampung, 16 Desember 2023

Penulis,



Restu Wildanu Ahadi

NPM. 1915051045

SANWACANA

Puji syukur penulis haturkan atas kehadiran Alloh *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Jurusan Teknik Geofisika, tidak lupa Sholawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad *Shallallohu'alahi Wa Sallam*.

Dalam penyusunan skripsi ini, tentunya melibatkan bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Alloh SWT, Tuhan Yang Maha Esa. Berkat segala rahmat, karunia, dan kehendak-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar dan barokah.
2. Kedua orang tua, Papa dan Mama. Bapak Koharudin dan Ibu Faridah yang selalu memberikan dukungan dan doa tiada henti kepada penulis.
3. Ka Fanji, Amel, Norma, dan Zulfa yang selalu memberikan semangat dan motivasi untuk selalu menjadi yang terbaik.
4. Bapak Karyanto, S.Si., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan Dosen Penguji dalam Tugas Akhir yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP selaku Dosen Pembimbing I dalam Tugas Akhir yang selalu memberikan arahan serta bimbingan dengan sabar kepada penulis, sehingga Tugas Akhir ini berjalan dengan lancar.
6. Bapak Ilham Dani, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan arahan dan pelajaran yang berarti untuk penulis.

7. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan nasehat yang membangun pribadi penulis.
8. Seluruh Dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung atas setiap Ilmu dan bimbingan yang diberikan selama penulis empat tahun penulis berkuliah.
9. Tim *Ballst* oi oi maju ka Annisa yang sudah membatu banyak sehigga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
10. Para pencari kebaikan Ambrodas, Egi, Ican, Mega, Wa Ode, dan Ijah. Makasih banyak sudah selalu memberikan semangat kepada penulis.
11. Keluarga Besar Teknik Geofisika 2019 yang sudah bersama melalui suka dan duka serta membantu penulis selama berkuliah.
12. SLS OI OI Roufiq, Alfian, Stella, Devina, Adelia, dan Dhecan yang sudah memberikan banyak kenangan tak terlupakan di US dan memberikan semangat kepada penulis.
13. Tim Oi Vivek Thomas, Andie William, Sarah Marie, dan Danilo yang sudah memberika penulis banyak sekali pelajaran.
14. Seluruh Civitas Teknik Geofisika Universitas Lampung yang membuat suasana TG menjadi berwarna.
15. Seluruh pihak yang terlibat, penulis mengucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 16 Desember 2023

Penulis,



Restu Wildanu Ahadi

NPM. 1915051045

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	x
MOTTO HIDUP	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Komponen <i>Ballast Track</i>	4
2.2 <i>Ballast</i>	4
2.3 <i>Ballast Fouling</i> dan Sumbernya.....	5
2.4 Aplikasi GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>) untuk Evaluasi <i>Ballast</i>	6
III. TEORI DASAR.....	9

3.1	Gelombang Elektromagnetik.....	9
3.2	<i>Skin Depth</i>	14
3.3	Transmisi, Refleksi, dan Refraksi pada Gelombang Elektromagnetik	16
3.4	Metode GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>).....	17
3.5	Pengolahan Data GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>).....	19
3.5.1	Koreksi Statis	20
3.5.2	1D <i>Filter-Dewow</i>	20
3.5.3	<i>Gain</i>	21
3.5.4	1D <i>Filter-Bandpass Frequency</i>	22
3.5.5	2D <i>Filter-Background Removal</i>	23
3.5.6	2D <i>Filter-Stack Trace</i>	24
3.6	Interpretasi Data GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	24
3.7	<i>Fourier Transform</i>	26
3.8	STFT (<i>Short-time Fourier Transform</i>).....	26
IV.	METODOLOGI PENELITIAN.....	28
4.1	Waktu dan Tempat Penelitian	28
4.2	Alat dan Bahan	29
4.3	Prosedur Penelitian.....	30
4.3.1	Studi Literatur	30
4.3.2	Pembuatan Model Rel Kereta	30
4.3.3	<i>Scanning Data</i>	31
4.3.4	Pengolahan Data GPR Menggunakan Reflexw	33
4.3.5	Identifikasi Pola Refleksi.....	46
4.3.6	Analisis Kecepatan Gelombang EM.....	46
4.3.7	Analisis Domain Frekuensi.....	47
4.3.8	Analisis Atenuasi	48
4.3.9	Pengolahan dan Interpretasi Menggunakan Metode STFT	48
4.4	Diagram Alir Penelitian	50
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
5.1	Akuisisi Data GPR	52
5.2	Identifikasi Pola Refleksi Pada Radargram.....	53

5.3	Analisis Kecepatan Gelombang EM	57
5.4	Analisis Domain Frekuensi	57
5.5	Analisis Atenuasi.....	61
5.6	Interpretasi Spektogram STFT	65
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	70
6.1	Kesimpulan.....	70
6.2	Saran.....	71
	DAFTAR PUSTAKA	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Komponen penyusun rel (Selig dan Waters, 1994).....	4
2. (a) GPR <i>trace</i> untuk determinasi kondisi <i>ballast</i> dan (b) radargram yang menunjukkan perbedaan antara kondisi <i>ballast</i> yang bersih dan terdapat pengotor (Kovacevic dkk., 2019)	6
3. Domain frekuensi GPR pada <i>ballast</i> bersih dan kotor (Wang dkk., 2022)	7
4. (a) Spektrum STFT dengan kondisi 50% pengotor pada <i>ballast</i> dan (b) Spektrum STFT dengan kondisi 50% pengotor basah pada <i>ballast</i>	7
5. Ilustrasi penjalaran gelombang elektromagnetik (Kimura, 2017)	9
6. Ilustrasi refleksi, refraksi, dan transmisi (Annan, 2012)	16
7. Prinsip kerja GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>) (Reynolds, 2018)	18
8. Konsep 1D <i>Filter-Dewow</i> (Jol, 2008)	21
9. Penerapan <i>Bandpass-filter</i> (Benedetto dkk., 2017)	23
10. Proses <i>Stacking Trace</i> (Goodman dan Piro, 2013).....	24
11. Jenis konfigurasi refleksi (Modifikasi Beres dan Haeni, 1991)	25
12. Model rel kereta api.....	30
13. Proses <i>scanning</i> data menggunakan Geoscanner	31
14. <i>Ballast</i> dalam kondisi <i>clean</i>	31
15. <i>Ballast</i> dalam kondisi tersaturasi air	32
16. <i>Ballast</i> dalam kondisi <i>fouled</i>	32
17. <i>Import raw data GPR</i>	33
18. <i>Raw data GPR</i>	33
19. <i>Window</i> kerja koreksi statis	34
20. Sebelum koreksi statis (kiri) dan setelah koreksi statis (kanan).....	35
21. <i>Window</i> kerja <i>Subtract-mean (dewow)</i>	36

22.	Sebelum diaplikasikan <i>filter dewow</i> (kiri) dan setelah diaplikasikan <i>filter dewow</i> (kanan).....	37
23.	<i>Window</i> kerja <i>gain function</i>	38
24.	Sebelum dilakukan <i>gain</i> (kanan) dan setelah dilakukan <i>gain</i> (kiri)	39
25.	<i>Window</i> kerja <i>Bandpass Frequency</i>	40
26.	Sebelum dilakukan <i>filter Bandpass Frequency</i> (kiri) dan setelah dilakukan <i>filter Bandpass Frequency</i> (kanan).....	41
27.	<i>Window</i> kerja <i>Background Removal</i>	42
28.	Sebelum dilakukan <i>Background Removal</i> (kiri) dan setelah dilakukan <i>Background Removal</i> (kanan).....	43
29.	<i>Window</i> kerja <i>Stack Trace</i>	44
30.	Sebelum dilakukan <i>stacking</i> (kiri) dan setelah dilakukan <i>stacking</i> (kanan).....	45
31.	Penentuan kecepatan gelombang EM.....	46
32.	Grafik domain frekuensi GPR	47
33.	Grafik atenuasi gelombang EM	48
34.	Spektrogram STFT	49
35.	Diagram alir penelitian	51
36.	Akuisisi data GPR pada model rel kereta	52
37.	(a) Model <i>ballast</i> dalam kondisi bersih (b) Radargram <i>ballast</i> dengan kondisi bersih.....	53
38.	(a) Model <i>ballast</i> dalam kondisi terendam air (b) Radargram <i>ballast</i> kondisi terendam air	54
39.	(a) Model <i>ballast</i> dalam kondisi <i>fouled</i> (b) Radargram <i>ballast</i> kondisi <i>fouled</i>	55
40.	Spektrum (domain frekuensi) sinyal GPR dalam kondisi <i>ballast</i> bersih.....	58
41.	Spektrum (domain frekuensi) sinyal GPR dalam kondisi <i>ballast</i> terendam air	59
42.	Spektrum (domain frekuensi) sinyal GPR dalam kondisi <i>ballast fouling</i>	60
43.	Grafik atenuasi gelombang EM pada <i>ballast</i> bersih.....	62
44.	Grafik atenuasi gelombang EM pada <i>ballast</i> terendam air	63
45.	Grafik atenuasi gelombang EM pada <i>ballast fouling</i>	64
46.	Spektrogram STFT pada <i>ballast</i> kondisi bersih	65

47.	Spektrogram STFT pada <i>ballast</i> kondisi terendam air	67
48.	Spektrogram STFT pada <i>ballast</i> kondisi <i>fouled</i>	68

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sumber <i>ballast fouling</i>	5
2. Tabel konstanta dielektrik, konduktivitas elektrik, kecepatan gelombang elektromagnetik, dan atenuasi gelombang elektromagnetik pada beberapa materi (Annan, 2012).....	14
3. Nilai frekuensi dan penetrasi gelombang radar (Lehmann dan Green, 1999).....	16
4. Jadwal kegiatan penelitian.....	28
5. Alat dan bahan beserta fungsinya.....	29
6. Perbandingan pola refleksi dan jumlah <i>void</i> pada radargram.....	56
7. <i>Picking Velocity</i> , konstanta dielektrik dan jenis material.....	57
8. Perbandingan puncak amplitudo pada grafik spektrum antara tiga perlakuan <i>ballast</i>	61
9. Perbandingan nilai atenuasi dan keberadaan <i>void</i> antara ketiga perlakuan <i>ballast</i>	65
10. Perbandingan energi frekuensi antara tiga perlakuan <i>ballast</i>	69

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan Kereta Api sebagai moda transportasi di Indonesia terus meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Hal ini dikarenakan kebutuhan transportasi untuk mobilisasi antar wilayah yang efisien dan ekonomis semakin dibutuhkan. Pada tahun 2020 – 2021 Kementerian Perhubungan mencatat panjang rel kereta api yang dimiliki Indonesia, yakni sepanjang 632.000 km (Kemenhub, 2022).

Rel kereta api terdiri atas dua bagian, yakni Superstruktur dan Substruktur. Komponen superstruktur terdiri dari rel, bantalan, dan penambat rel. Sedangkan komponen substruktur terdiri dari *ballast*, *sub-ballast*, dan *subgrade* (Kutz, 2004). *Ballast* merupakan salah satu komponen *track* terpenting. *Ballast* adalah material granular yang digunakan untuk mendistribusikan tegangan akibat beban kereta api yang lewat ke tanah dasar (Tennakoon, 2012).

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi umur dan kualitas *ballast*, salah satunya adalah *Ballast Fouling*. Kondisi ini terjadi dimana *ballast* mengalami penurunan kinerja akibat terisinya rongga-rongga antar agregat oleh partikel – partikel kecil. Partikel tersebut berasal dari beberapa sumber, yakni (a) erosi internal dari bagian tepi dan ujung agregat, (b) infiltrasi akibat beban siklik dan tanah yang jenuh (*saturated soil*) (Indraratna dkk., 2011). Jika dibiarkan kondisi ini akan mengakibatkan *mud pumping* dan mengurangi daya dukung *ballast* terhadap beban sehingga akan mengurangi stabilitas badan jalan rel dan akan menyebabkan anjlog pada kereta api

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi *ballast* tersebut adalah metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) (Guo dkk., 2023). Metode GPR adalah metode geofisika non-destruktif yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi bawah permukaan. Dalam mengevaluasi kondisi *ballast* metode ini memiliki beberapa keunggulan, yakni (a) tidak merusak struktur jalan pada rel kereta, (b) pengumpulan data dapat dilakukan dengan cepat, dan (c) tidak menyebabkan gangguan lalu lintas kereta yang signifikan (Leng dan Al-Qadi, 2010).

Analisis kecepatan gelombang EM digunakan untuk menentukan jenis material pada suatu lapisan (Annan, 2012), sehingga dapat diasumsikan untuk mengevaluasi kondisi *ballast* rel kereta. Penelitian evaluasi kondisi *ballast* berdasarkan domain frekuensi dan atenuasi pernah dilakukan oleh Wang dkk. (2022), dalam penelitian tersebut domain frekuensi *ballast* cenderung menurun dan atenuasi meningkat ketika diberikan perlakuan tambahan seperti air dan pengotor, sedangkan pada *ballast* yang bersih cenderung memiliki domain frekuensi yang lebih besar dibandingkan *ballast* yang diberikan air dan pengotor.

Selain analisis kecepatan, domain frekuensi, dan atenuasi gelombang EM, terdapat metode analisis tambahan untuk memperkuat evaluasi *ballast*, yakni Metode STFT (*Short-Time Fourier Transform*). STFT. Metode ini merupakan bentuk transformasi waktu-frekuensi yang dapat mengubah sinyal domain waktu menjadi spektrogram yang merepresentasikan energi sinyal pada waktu dan frekuensi yang berbeda (Al-Qadi dan Zhao, 2016). Metode ini diterapkan untuk melacak perubahan energi frekuensi *ballast* yang diakibatkan oleh faktor pengotor dan kelembapan (Leng dan Al-Qadi, 2010). Oleh karena itu penelitian ini dilakukan menggunakan STFT sebagai metode untuk menganalisis data GPR, sehingga evaluasi kondisi *ballast* pada rel kereta api dapat dilakukan

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi pola refleksi pada radargram untuk mengetahui keberadaan *void* pada *ballast*.
2. Menganalisis dan membandingkan kecepatan gelombang EM pada data GPR untuk mengevaluasi kondisi *ballast*.
3. Menganalisis dan membandingkan domain frekuensi pada data GPR untuk mengevaluasi kondisi *ballast*.
4. Menganalisis dan membandingkan atenuasi gelombang EM pada data GPR untuk mengevaluasi kondisi *ballast*.
5. Menganalisis dan membandingkan spektrogram STFT untuk mengevaluasi kondisi *ballast*.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Antena yang digunakan pada penelitian ini hanya menggunakan antena 1 GHz.
2. Penelitian ini masih menggunakan Skala Lab (Belum diuji coba pada kondisi rel kereta yang sebenarnya).
3. Hanya terdapat tiga asumsi kondisi *ballast* yang diterapkan, yakni bersih (*clean*), terendam air, dan terdapat pengotor (*fouled*).
4. Evaluasi kondisi *ballast* didapatkan dari hasil metode pada data GPR dengan pendekatan kecepatan, domain frekuensi, atenuasi gelombang EM dan STFT.

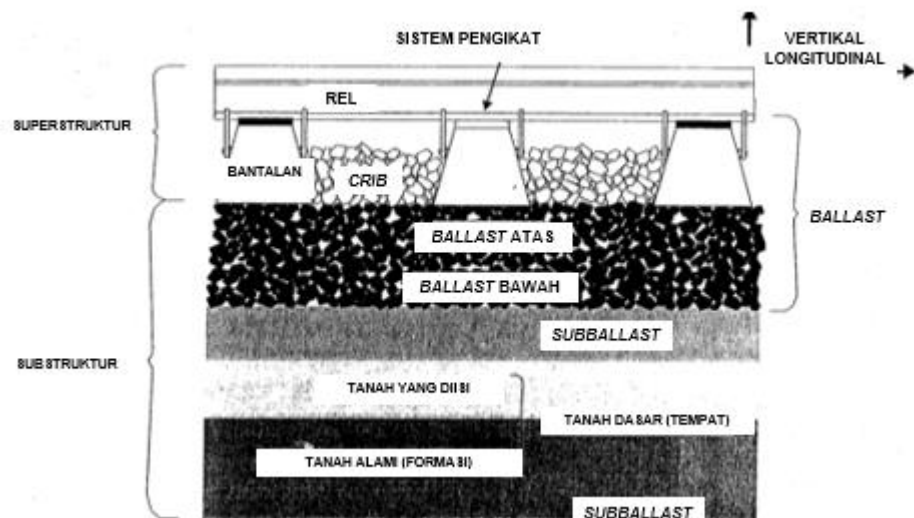
1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dilaksanakannya penelitian ini adalah dapat memberikan gambaran dan analisis kondisi pengotor yang ada pada *ballast*, sehingga evaluasi kondisi *ballast* pada rel kereta apa dapat dilakukan dengan efisien dan ekonomis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Komponen Ballast Track*

Track kereta api terdiri atas bagian superstruktur dan substruktur (Kutz, 2004; Selig dan Waters, 1994). Komponen superstruktur terdiri dari rel, bantalan, dan penambat rel. Sedangkan komponen substruktur terdiri dari *ballast*, *sub-ballast*, dan *subgrade*. Superstruktur dan substruktur dibatasi oleh bantalan *ballast* seperti yang terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Komponen penyusun rel (Selig dan Waters, 1994).

2.2 *Ballast*

Menurut peraturan Menteri No. 60 tahun 2012, *ballast* merupakan sekumpulan batu kecil yang memiliki fungsi untuk mendistribusikan tegangan akibat tekanan dari kereta pada jalan rel ke tanah dasar, memperkuat bantalan, dan meloloskan air sehingga tidak terjadi penggenangan di bantalan dan rel. *Ballast* juga berguna untuk penyerapan getaran dan meminimalisir

deformasi plastis dari struktur jalan rel (Indraratna dkk., 2011). Secara umum sumber material *ballast* dapat berupa batu reolit, dolomit, granit, andesit, basalt, gamping, dan *blast furnace slag* (Lackenby, 2006).

2.3 *Ballast Fouling* dan Sumbernya

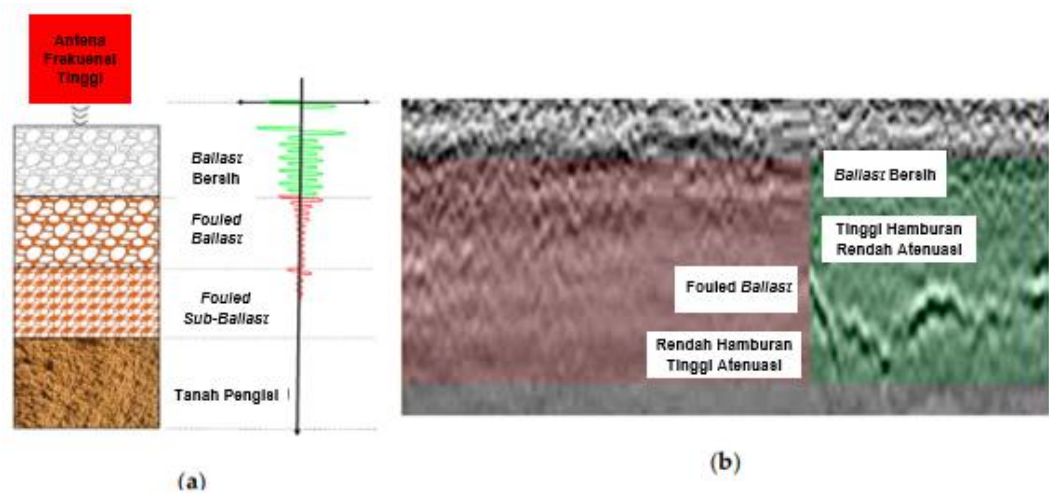
Ballast fouling merupakan partikel – partikel halus dari proses erosi internal yang dapat mengurangi permeabilitas *ballast* dan kemampuan *ballast* dalam mempertahankan geometri jalan rel (Selig dan Waters, 1994). Sumber *ballast fouling* dapat di lihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Sumber *Ballast Fouling* (Selig dan Waters, 1994)

Tipe <i>Ballast Fouling</i>	Sumber
<i>Ballast breakdown</i>	<i>Handling (quarry, transportation, dan dumping)</i> Temperatur tinggi Pelapukan fisik dan kimiawi Beban siklis, getaran, dan tekanan hidrolik
Infiltrasi permukaan	Tumpahan material dari kereta Material terbawa angin dan air Kotoran dan area sekitar
Migrasi partikel dari <i>sub-ballast</i> dan tanah dasar	Partikel halus dari lapisan tanah di bawah balas yang bermigrasi ke arah atas (<i>ballast</i>) akibat beban siklik dan keberadaan air di dalam struktur jalan rel
Bantalan (hanya kayu)	Degradasi material kayu dari bantalan

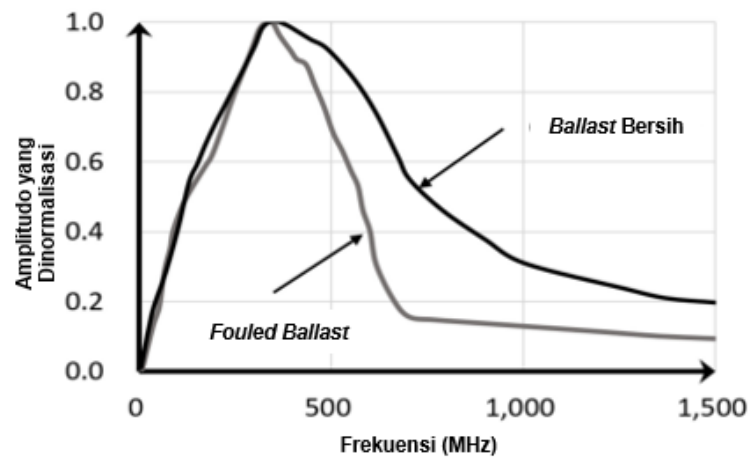
2.4 Aplikasi GPR (*Ground Penetrating Radar*) untuk Evaluasi *Ballast*

Pemanfaatan GPR (*Ground Penetrating Radar*) untuk evaluasi kondisi *ballast* pada rel kereta api dilakukan dengan berbagai pengolahan data. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kovacevic dkk. (2019) mereka menyelidiki kondisi *ballast* menggunakan *Multi-Attribute Utility Theory* yang mana akan membantu dalam mengkategorikan prioritas ketika akan dilakukan perawatan. GPR pada metode ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi *ballast* berdasarkan radargram dan nilai amplitudo seperti pada **Gambar 2**.



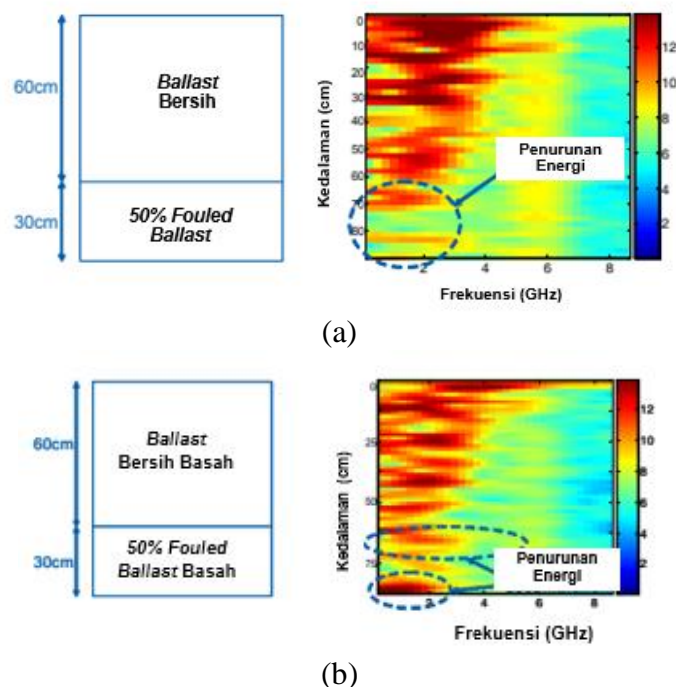
Gambar 2. (a) GPR *trace* untuk determinasi kondisi *ballast* dan (b) radargram yang menunjukkan perbedaan antara kondisi *ballast* yang bersih dan terdapat pengotor (Kovacevic dkk., 2019).

Penelitian lain pernah dilakukan oleh Wang dkk. (2022) mereka menyelidiki kondisi *ballast* berdasarkan domain frekuensi dan atenuasi gelombang EM pada data GPR. Ketika nilai spektrum suatu *ballast* rendah maka dapat dikategorikan sebagai *ballast* yang memiliki pengotor tetapi ketika nilai spektrum suatu *ballast* relatif tinggi maka dapat dikategorikan sebagai *ballast* yang bersih. Sebaliknya nilai atenuasi akan meningkat pada *ballast* yang memiliki pengotor. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Domain frekuensi *ballast* bersih dan kotor (Wang dkk., 2022).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Leng dan Al-Qadi (2010) mereka menggunakan STFT untuk menganalisa kondisi *ballast* berdasarkan perubahan energi frekuensi. Metode ini sangat efektif dalam menentukan kondisi pengotor dan air yang terperangkap dalam *ballast*. Seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 4**.



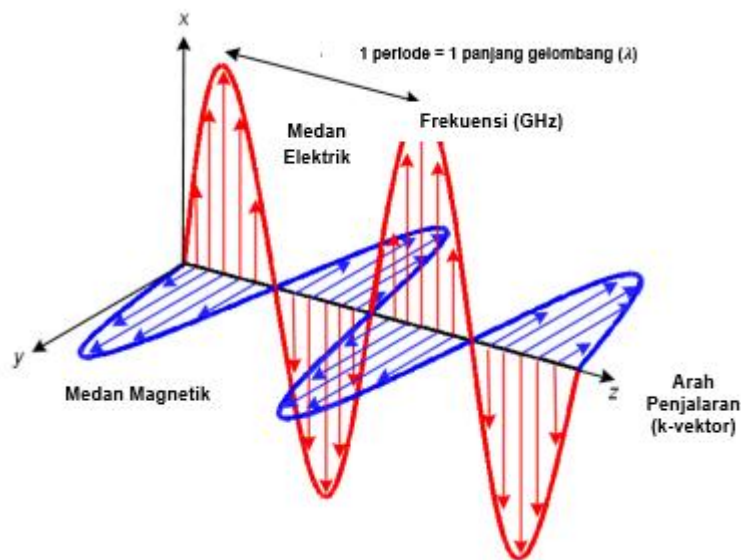
Gambar 4. (a) Spektrum STFT dengan kondisi 50% pengotor pada *ballast* dan (b) Spektrum STFT dengan kondisi 50% pengotor basah pada *ballast* (Leng dan Al-Qadi, 2010).

Penelitian lanjutan dilakukan oleh Al-Qadi dan Zhao (2016), mereka menggunakan tambahan *Discrete Wavelet Techniques* untuk pendekatan lebih kuantitatif dalam memprediksi tingkatan pengotor pada *ballast*. Hal ini dilakukan karena metode STFT hanya baik dalam visualisasi kondisi *ballast*.

III. TEORI DASAR

3.1 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merupakan hasil dari dua medan listrik dan magnet yang tegak lurus, dan merambat dalam arah yang saling tegak lurus terhadap medan tersebut (Hussein, 2007).



Gambar 5. Ilustrasi penjalaran gelombang elektromagnetik (Kimura, 2017).

Gelombang elektromagnetik didasarkan atas empat Persamaan Maxwell. Pada persamaan ini dijelaskan adanya hubungan secara linear antara medan magnet yang dapat menghasilkan listrik dan medan listrik yang dapat menghasilkan medan magnet. Pada Kong (2008) persamaan Maxwell dijabarkan dalam notasi vektor tiga dimensi. Pada persamaan Maxwell I menjelaskan mengenai hukum Gauss untuk medan elektrik statik, menjelaskan suatu muatan akan menghasilkan medan elektrik:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Persamaan Maxwell II menjelaskan hukum Gauss untuk medan magnet statik yang menyatakan, kutub utara harus bersamakutub selatan dan membentuk *loop* tertutup:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

Persamaan Maxwell III menjelaskan mengenai hukum Faraday, yang menyatakan perubahan medan magnet menghasilkan medan elektrik:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (3)$$

Persamaan Maxwell IV menyatakan perubahan medan elektrik akan menghasilkan medan magnet:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (4)$$

Keterangan:

\vec{E} : Kuat medan listrik (V/m)

\vec{J} : Rapat arus (A/m^2)

\vec{B} : Induksi magnetik ($webers/m^2$)

ρ : Rapat muatan (C/m^3)

ϵ_0 : Permittivitas dalam ruang hampa ($8.885 \times 10^{-12} F/m$)

μ_0 : Permeabilitas magnetik ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

Permittivitas listrik (ϵ), Permeabilitas magnetik (μ), dan Konduktivitas (σ) merupakan variabel penting dalam gelombang elektromagnetik. Hubungan antara permittivitas ruang hampa dan material disebut konstanta dielektrik (Syukur, 2009). Konstanta dielektrik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Kecepatan gelombang elektromagnetik dipengaruhi beberapa faktor, yakni konstanta dielektrik, permeabilitas magnetik, dan konduktivitas elektrik. Kecepatan gelombang elektromagnetik dapat diturunkan menggunakan persamaan Maxwell dalam keadaan vakum, dimana rapat muatan $\rho = 0$ dan densitas arus $J = 0$, maka didapatkan persamaan Maxwell berikut:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \text{ (Elektrik Gauss)} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Magnetik Gauss)} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \text{ (Faraday)} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \text{ (Maxwell)} \quad (9)$$

Turunkan persamaan Maxwell terhadap waktu:

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla} \times \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (10)$$

Masukkan persamaan Faraday ke dalam turunan medan magnet:

$$\vec{\nabla} \times (-\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (11)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan khusus medan listrik. Gunakan prinsip identitas pada vektor $BAC - CAB$:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \quad (12)$$

Masukkan persamaan Elektrik Gauss ke dalam persamaan diatas dan lakukan operasi curl ganda sehingga didapatkan:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (13)$$

Kecepatan gelombang dapat diambil langsung dari persamaan gelombang, sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (14)$$

Koefisien suku turunan kedua adalah kebalikan dari kuadrat cepat rambat gelombang:

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0 \quad (15)$$

Sinyal GPR dicirikan sebagai frekuensi tinggi. Jadi alam banyak kasus dapat diasumsikan bahwa bumi bersifat resistif. Hal ini dikenal dengan pendekatan rezim gelombang (Annan, 2012). Dengan menggunakan perkiraan tersebut dan asumsi bumi bersifat non-permeabel ($\mu = \mu_0$), kecepatan gelombang elektromagnetik dapat disederhanakan menjadi:

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

Keterangan :

c :Kecepatan cahaya ($3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$)

v : Kecepatan gelombang elektromagnetik (m/s)

ϵ_0 : Permittivitas dalam ruang hampa ($8.885 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

ε_r : Konstanta/permitivitas dielektrik

μ_0 : Permeabilitas magnetik ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)

Propagasi gelombang elektromagnetik ke bumi akan mengalami reduksi energi, hal ini terjadi karena adanya proses absorpsi dan atenuasi gelombang elektromagnetik. Atenuasi ada proses berkurangnya energi gelombang elektromagnetik akibat penyerapan energi gelombang pada oleh suatu material. Sedangkan absorpsi gelombang elektromagnetik adalah perubahan energi gelombang elektromagnetik menjadi energi panas. (Leucci, 2008; Liu dkk., 2021). Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya atenuasi, yakni konduktivitas elektrik (σ) dan permitivitas dielektrik (ε). Menurut Davis dan Annan (1989) nilai atenuasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0}{2}} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \approx \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} & \text{untuk } \omega \varepsilon_0 < \sigma \\ \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} & \text{untuk } \sigma < \omega \varepsilon_0 \end{cases} \quad (17)$$

Keterangan:

α = Atenuasi (dB/m)

σ = Konduktivitas listrik (mS/m)

Nilai konstanta dielektrik, konduktivitas elektrik, kecepatan gelombang elektromagnetik, dan atenuasi gelombang elektromagnetik pada beberapa objek dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Tabel konstanta dielektrik, konduktivitas elektrik, kecepatan gelombang elektromagnetik, dan atenuasi gelombang elektromagnetik pada beberapa materi (Annan, 2012)

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Udara	1	0	0.30	0
Air	80	0.5	0.033	0.1
Pasir kering	3-5	0.01	0.15	0.01
Pasir tersaturasi	20-30	1-10	0.06	0.03-0.3
Batugamping	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Andesit	5	10	0.134	-
Serpih	5-15	1-100	0.09	1-100
Lantau	5-30	1-100	0.07	1-100
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Lempung	5-40	2-100	0.06	1-100
Batubara	4-5	-	0.145	-

3.2 *Skin Depth*

Gelombang radar memiliki kedalaman penetrasi tergantung pada frekuensi gelombang dan karakteristik elektrik lingkungannya, semakin tinggi frekuensi yang digunakan, semakin rendah kedalaman yang dicapai. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi yang digunakan maka semakin dalam penetrasi yang diinginkan (Salih dkk., 2017). Faktor penterasi gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh resistivitas. Pada material yang memiliki resistivitas yang tinggi maka penetrasi akan semakin baik, sedangkan material yang memiliki resistivitas rendah akan melemahkan gelombang, sehingga akan menghasilkan penetrasi yang dangkal (Porsani dan Sauck, 2007).

Skin Depth (δ) menentukan jarak rambat dimana amplitudo gelombang elektromagnetik melemah dengan faktor $1/e$. Sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\delta = \left[\frac{2\rho}{\mu_0\omega} \right]^{1/2} \quad (18)$$

Nilai *skin depth* pada medium konduktif bergantung pada nilai permeabilitas magnetik ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$), resistivitas (ρ), dan frekuensi angular ($\omega = 2\pi f$). Maka persamaan (18) dinyatakan sebagai berikut:

$$\delta = \left[\frac{2\rho}{4\pi \times 10^{-7} \times 2\pi f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\delta = \left[\frac{2\rho}{8\pi^2 \times 10^{-7} \times f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\delta = \left[\frac{2}{8\pi^2 \times 10^{-7}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\rho}{f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$\delta = \left[\frac{10^7}{4\pi^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\rho}{f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Sehingga *skin depth* gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (23)$$

$$\delta = 503 \sqrt{\rho T} \quad (24)$$

Keterangan:

δ : *Skin depth* (m)

f : Frekuensi (Hz)

ω : Frekuensi sudut (rad/s)

ρ : Resistivitas (ohm.m)

T : Periode (detik)

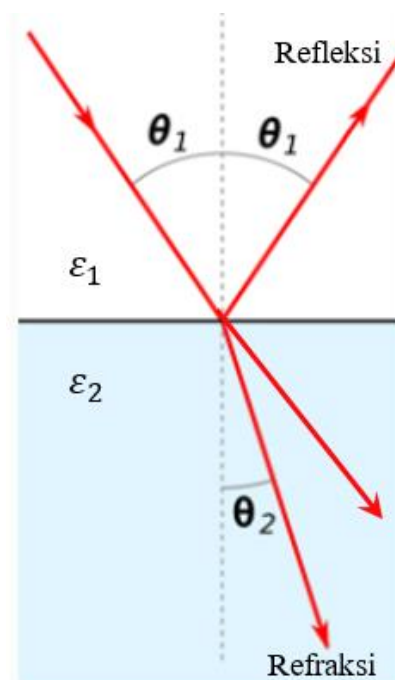
Pemilihan frekuensi gelombang radar yang tepat berguna untuk menentukan penetrasi kedalaman, ukuran target, dan jangkauan kedalaman yang diinginkan. Seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Nilai frekuensi dan penetrasi gelombang radar (Lehmann dan Green, 1999)

Frekuensi (MHz)	Dimensi target minimal (m)	Jangkauan kedalaman (m)	Penetrasi kedalaman maksimum (m)
25	≥ 1.0	5 – 30	35 – 60
50	≥ 0.5	5 – 20	20 – 30
100	0.1 – 1.0	2 – 15	15 – 25
200	0.05 – 0.5	1 – 10	5 – 15
400	≈ 0.05	1 – 5	3 – 10
1000	≥ 0.01	0.05 – 2	0.5 – 4

3.3 Transmisi, Refleksi, dan Refraksi pada Gelombang Elektromagnetik

Ketika gelombang elektromagnetik mencapai suatu material maka terjadi peristiwa transmisi (gelombang melewati medium) dan refleksi (gelombang terpantulkan). Pada peristiwa transmisi terjadi juga refraksi dimana gelombang mengalami pembelokan jenis medium. Refleksi perilaku sinyal GPR pada antarmuka sangat bergantung pada sifat dielektrik yang melintasi batas tersebut (Annan, 2012). Ilustrasi transmisi, refleksi, dan refraksi dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Ilustrasi refleksi, refraksi, dan transmisi (Annan, 2012).

Pada sinyal GPR dalam keadaan normal, Transmisi (T) dan Koefesien Refleksi (R) disederhanakan menjadi:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (25)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (26)$$

Refraksi sinyal GPR dapat dipahami menggunakan hukum Snell. Hukum menyatakan bagaimana muka gelombang berubah arah ketika medan bergerak melalui material yang kecepatannya tidak konstan. Hukum Snell memperkirakan bahwa gelombang berubah arah rambatnya ketika gelombang merambat pada dua material yang berbeda (Annan, 2012). Prinsip refraksi menggunakan hukum Snell dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\sqrt{\varepsilon_1} \sin\theta_1 = \sqrt{\varepsilon_2} \sin\theta_2 \quad (27)$$

Keterangan:

ε_1 : Konstanta dielektrik pada medium 1

ε_2 : Konstanta dielektrik pada medium 2

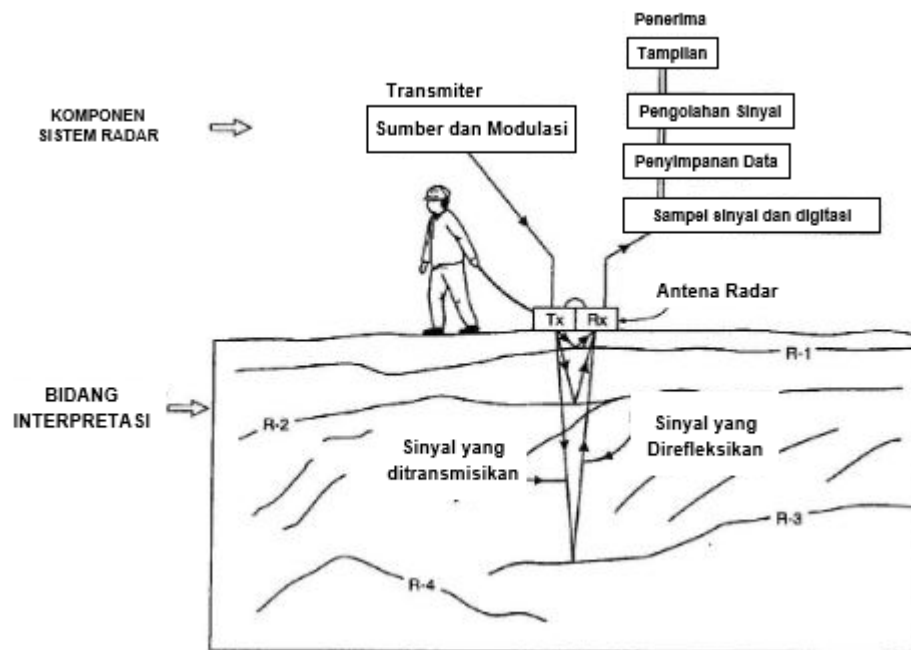
θ_1 : Sudut datang gelombang

θ_2 : Sudut refraksi gelombang

3.4 Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*)

GPR merupakan teknik non-destruktif secara *real time* yang menggunakan gelombang radio frekuensi tinggi, menghasilkan data dengan resolusi sangat tinggi dalam waktu singkat. Teknik ini menggunakan gelombang elektromagnetik yang merambat dengan kecepatan tertentu yang ditentukan oleh permitivitas material (Yazdani dkk., 2018). Umumnya frekuensi yang sering digunakan untuk GPR adalah 10 – 1000 Mhz. GPR menggunakan sistem *Electromagnetic Subsurface Profiling* (ESP), sistem ini memanfaatkan

refleksi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan (*transmitter*) ke bumi melalui antena. Refleksi dan transmisi gelombang elektromagnetik ini sangat cepat dengan satuan waktu *nanosecond* (Allen, 1979). Penetrasi kedalaman GPR dipengaruhi oleh permitivitas dan konduktivitas material dibawah permukaan bumi. Jika terjadi peningkatan konduktivitas maka penetrasi kedalaman akan menurun, hal ini disebabkan energi elektromagnetik yang teratenuasi (Venkateswarlu dan Tewari, 2014).



Gambar 7. Prinsip kerja GPR (*Ground Penetrating Radar*) (Reynolds, 2011).

Banyak teori dasar yang digunakan untuk menjelaskan metode seismik juga dapat diterapkan pada GPR. Pada **Gambar 7** sistem GPR terdiri dari pemancar, antena, dan unit kontrol. Sumber sistem GPR mengirimkan pulsa gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi (gelombang radio) ke bumi. Oleh karena itu, peralatan GPR tidak mengirimkan sinyal secara terus menerus ke dalam Bumi. Pulsa sinyal berisi sekumpulan gelombang elektromagnetik yang beresilasi mendekati frekuensi tertentu. Ketika gelombang radio ini merambat melalui bumi, gelombang tersebut terdistorsi

karena distribusi sifat elektromagnetik bawah permukaan (Konduktivitas elektrik, Permeabilitas Magnetik, dan Permittivitas Elektrik).

Ketika gelombang radio dalam pulsa bersentuhan dengan suatu objek atau *interface* (batas yang ditentukan oleh perubahan mendadak sifat elektromagnetik bumi), sebagian gelombang radio yang masuk dapat dipantulkan, ditransmisikan, dan/atau dibiaskan. Pemantulan, transmisi dan pembiasan gelombang radio bergantung pada sifat elektromagnetik yang menentukan setiap sisi *interface* serta sudut datangnya sinyal gelombang radio yang masuk. Antena menerima gelombang pantulan ini dan variasi terkait dicatat. Informasi tersebut ditafsirkan dan ditampilkan pada radargram. Waktu yang dibutuhkan oleh sinyal yang dipantulkan untuk melakukan perjalanan kembali diukur, yang merupakan indikasi kedalaman dan lokasi anomali.

Gelombang GPR menembus berbagai puing-puing tanah, air, beton, dan material berbeda yang memiliki sifat dielektrik dan konduktif berbeda. Bumi dapat dianggap sebagai sekumpulan wilayah homogen yang dipisahkan oleh antarmuka. Dengan menggunakan sinyal yang diukur oleh penerima, tujuan GPR adalah untuk menentukan *interface* sehingga dapat memperoleh informasi tentang struktur di bawah permukaan bumi yang dapat terjadi secara alami atau buatan manusia. Perbedaan ini diamati pada gelombang GPR berdasarkan interpretasi data GPR. Gambar data akhirnya ditampilkan di layar (Reynolds, 2011).

3.5 Pengolahan Data GPR (*Ground Penetrating Radar*)

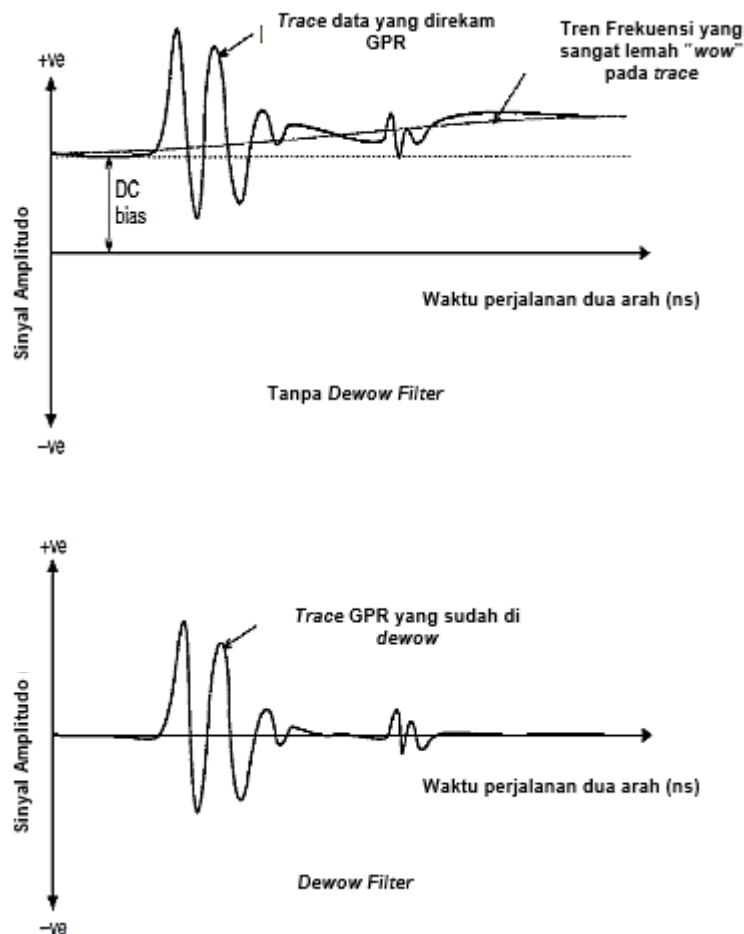
Data hasil akuisisi merupakan data yang masih banyak terdapat *noise* sehingga diperlukan pengolahan lebih lanjut. Terdapat beberapa pengolahan data yang digunakan pada penelitian ini, yakni Koreksi Statis, 1D *Filter-Dewow*, *Gain*, 1D *Filter-Bandpass Frequency*, 2D *Filter-Background Removal*, dan 2D *Filter-Stack Trace*.

3.5.1 Koreksi Statis

Koreksi bertujuan untuk menghilangkan pengaruh gelombang udara dengan cara mengembalikan waktu tiba pertama gelombang pada *interface* pertama yang ditemukan (posisi awal gelombang ke titik nol). Terdapat amplitudo refleksi yang besar antara *interface* udara dan tanah di bawah antenna. Kontrasi tinggi ini (konduktivitas udara dan tanah) menciptakan gelombang *direct* dan gelombang udara yang dapat mengaburkan pola refleksi dari *interface* di bawah permukaan (Yulius dkk., 2008). Terdapat beberapa acuan batas yang sering digunakan untuk koreksi ini, yakni *break-point* pertama, puncak negatif pertama, titik amplitudo nol antara puncak negatif dan positif, titik tengah amplitudo antara puncak negatif dan positif, dan puncak negatif pertama. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan sehubungan dengan sifat dielektrik bahan permukaan dan frekuensi sentral penyelidikan (Yelf dan Yelf, 2006).

3.5.2 1D Filter-Dewow

Proses ini merupakan proses yang temporal untuk menghilangkan bias arus DC (*Direct Current*) dan frekuensi sangat rendah yang terekam pada data. *Wow* adalah *noise* frekuensi rendah yang terekam oleh alat radar. Hal ini terjadi karena instrumen elektronik yang tersaturasi oleh amplitudo besar dari *direct wave* dan *air wave* (Jol, 2008). Filter ini akan bekerja dengan cara mengkalkulasikan nilai frekuensi rata – rata dari *trace*. Setelah itu, nilai frekuensi pada tiap-tiap *time window* akan dikurangi dengan nilai frekuensi rata-rata yang telah dikalkulasikan sehingga *noise* dengan frekuensi rendah dapat dihilangkan (Muniroh, 2020), seperti pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Konsep 1D *Filter-Dewow* (Jol, 2008).

3.5.3 Gain

Karena sifat dispersif gelombang elektromagnetik, sinyal GPR mengalami atenuasi ketika merambat melalui suatu *interface*. Intensitas atenuasi tersebut berhubungan dengan konduktivitas listrik dari medium yang dilewati. Oleh karena itu dilakukan fungsi *gain* untuk menguatkan sinyal GPR (Daniels, 2004). Fungsi gain sebenarnya mengubah sinyal radar, oleh karena itu harus diterapkan dengan hati-hati. Prosedur pemrosesan ini kemungkinan besar akan bekerja secara efektif ketika data bersih dari *noise*. Jika fungsi penguatan diterapkan pada sinyal yang memiliki *noise* yang tinggi, komponen *late-arrival noise* akan ditingkatkan, sehingga berpotensi menyebabkan interpretasi data yang salah (Benedetto dkk., 2017).

Menurut Daniels (2004) umumnya fungsi *gain* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y'(n) = Y(n) \cdot k \cdot n \quad (28)$$

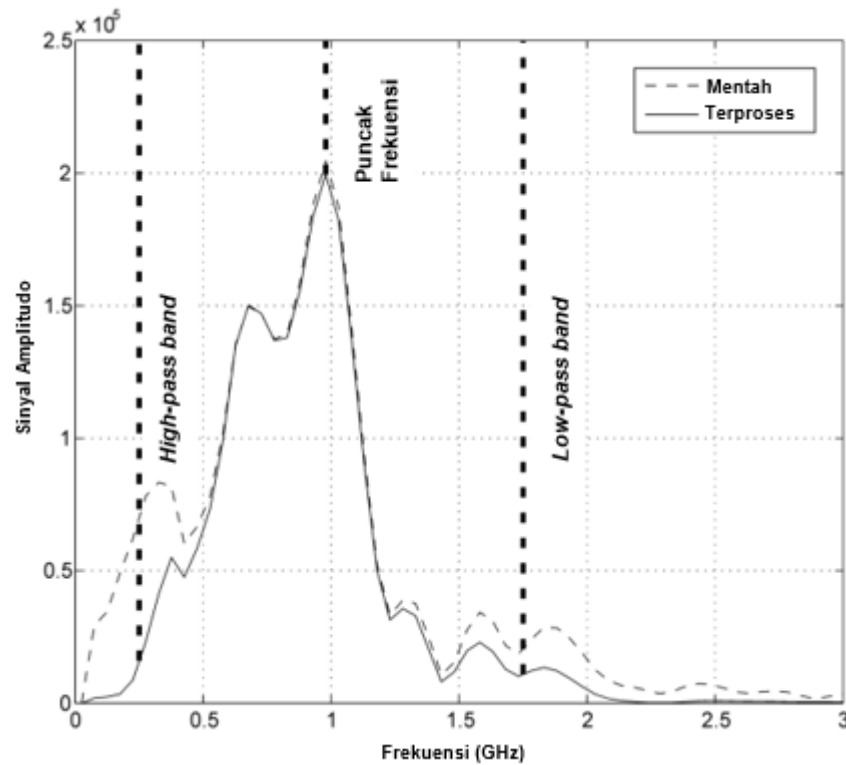
Dimana $y'(n)$ adalah sampel ke- n dari *trace* dalam domain waktu dan k adalah *gaining function* dari sampel ke- n .

3.5.4 1D Filter-Bandpass Frequency

Filter ini bertujuan untuk meningkatkan SNR (*Signal to Noise Ratio*) dengan menyaring data komponen sinyal dengan frekuensi di luar *bandwidth* utama yang direkam. *Band-pass filter* merupakan kombinasi dari *High-pass filter* dan *Lowpass-filter*. *Highpass-filter* akan melewatkan sinyal dengan frekuensi lebih tinggi dari frekuensi *cutoff* tertentu dan melemahkan sinyal dengan frekuensi lebih rendah dari frekuensi *cutoff*. *Low-pass filter* akan melewatkan sinyal dengan frekuensi lebih rendah dari frekuensi *cutoff* yang dipilih dan melemahkan sinyal dengan frekuensi lebih tinggi dari frekuensi *cutoff*. Sehingga *band-pass filter* akan melewatkan frekuensi dalam rentang tertentu dan melemahkan frekuensi di luar rentang tersebut (Benedetto dkk., 2017).

Pada **Gambar 9** garis putus-putus menunjukkan bentuk spektrum setelah penerapan *band-pass filter* pada wilayah spektral antara 250 MHz dan 1750 MHz. Menurut Benedetto, dkk., (2017) jika *raw data* sinyal *trace* dalam domain waktu $y(t)$, representasi spektralnya $Y(\omega)$, dan data yang diproses dalam domain frekuensi $Y'(\omega)$. Maka filter *band-pass* $H(\omega)$ beroperasi sebagai berikut:

$$Y'(\omega) = Y(\omega) \cdot H(\omega) \quad (29)$$



Gambar 9. Penerapan *Bandpass-filter* (Benedetto dkk., 2017).

3.5.5 2D Filter-Background Removal

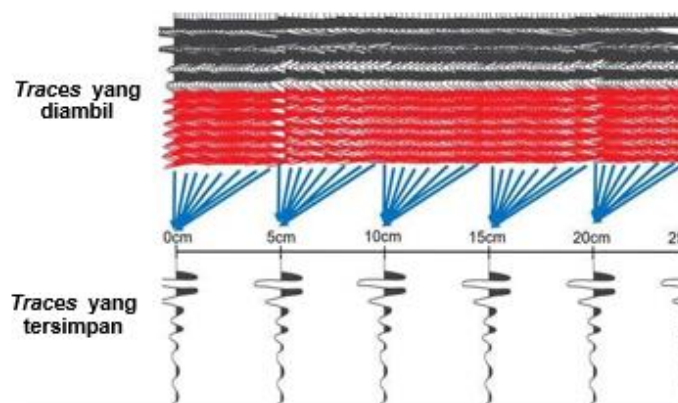
Filter ini dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan *noise* konsisten yang selalu muncul pada profil radagram, hal ini menyebabkan sinyal yang sebenarnya menjadi tertutup. Profil radagram terdiri atas beberapa gabungan *trace*, *noise* yang muncul dapat dikurangi dengan mengurangi nilai rata-rata amplitudo dengan sampel tunggal yang dihitung pada seluruh profil radagram atau dapat dijelaskan dengan menghilangkan energi koheren yang horizontal. Filter ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$y'(n) = y(n) - \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K y_k(n) \quad (30)$$

Dimana $y'(n)$ *trace* yang sudah diproses, $y(n)$ *trace* yang belum diproses, n merupakan nomor sampel, dan k merupakan jumlah *trace* pada profil radagram yang dipilih (Benedetto dkk., 2017).

3.5.6 2D Filter-Stack Trace

Stacking merupakan proses untuk meningkatkan SNR (*Signal to Noise Ratio*) dengan cara menghitung rata-rata *trace* yang dikumpulkan untuk mengurangi random *noise*. Sinyal mempunyai fase yang sama, sedangkan *noise* mempunyai fase acak. Proses *stacking* ini dapat memperkuat amplitudo sinyal dan melemahkan amplitudo *noise*. Semakin banyak dilakukan *stacking* pada *trace* maka akan semakin rendah *noise*, semakin baik sinyal GPR, dan semakin dalam kedalaman penetrasi (Goodman dan Piro, 2013). Ilustrasi proses *stacking* ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Proses *Stacking Trace* (Goodman dan Piro, 2013).

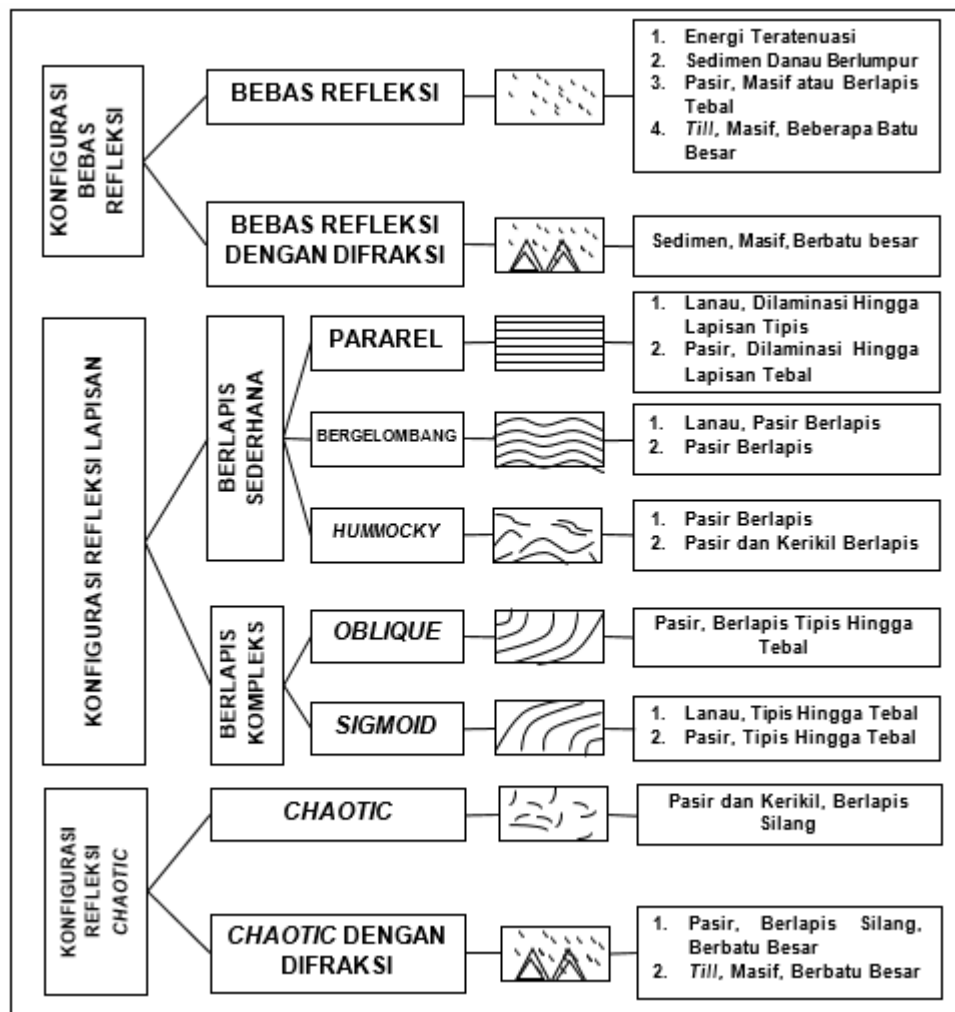
3.6 Interpretasi Data GPR (*Ground Penetrating Radar*)

Dalam interpretasi radargram, tanda hiperbolik merupakan indikator penting dari fitur bawah permukaan. Lebar hiperbola biasanya beberapa kali lebih besar dari objek aslinya dan hiperbola akan mendatar seiring bertambahnya kedalaman. Terdapat beberapa pola radargram yang harus diperhatikan ketika akan melakukan interpretasi, yakni :

1. Pada lapisan tanah yang relatif lunak akan menunjukkan sejumlah pantulan kecil dan individual yang disebabkan oleh berbagai permukaan miring dan celah.
2. Bahan homogen dengan kadar air lebih tinggi memperlambat gelombang. Ketika gelombang merambat lebih lambat, pantulan tunggal menebal dalam arah vertikal

3. Lapisan atas tanah sebagian besar berbentuk horizontal, terkadang sedikit bergelombang, pantulan terlihat jelas.
4. Pola batuan akan digambarkan dengan serangkaian refleksi kecil dan pendek (Annan, 2012).

Interpretasi data GPR juga dapat dilakukan berdasarkan radar fasies seperti **Gambar 11**. Karakteristik radar fasies diinterpretasikan berdasarkan konfigurasi internal dan kontinuitas pantulan, serta pola terminasi pantulan (Shan dkk., 2015) dan secara umum dicirikan berdasarkan bentuk dasar, amplitudo, kontinuitas dan konfigurasi pantulan internal serta bentuk eksternal (Chowksey dkk., 2011).



Gambar 11. Jenis konfigurasi refleksi (Modifikasi Beres dan Haeni, 1991).

3.7 *Fourier Transform*

Transformasi *fourier* adalah model matematika yang membantu mentransformasikan sinyal antara dua domain berbeda, seperti mentransformasikan sinyal dari domain frekuensi ke domain waktu atau sebaliknya. Transformasi *fourier* biasa diaplikasikan dalam pengolahan data sinyal, hal ini akan membantu memperluas deret Fourier ke fungsi non-periodik, yang membantu kita melihat fungsi sinyal dalam bentuk jumlah sinusoid sederhana. (Franchetti dan Püschel, 2011). Bentuk persamaan transformasi *fourier* dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (31)$$

dimana ω adalah frekuensi, t adalah waktu, dan i adalah satuan imajiner.

3.8 *STFT (Short-time Fourier Transform)*

STFT merupakan transformasi waktu-frekuensi yang mengubah sinyal domain waktu menjadi spektogram yang mewakili energi sinyal pada jendela waktu dan frekuensi yang berbeda. STFT akan mengevaluasi transformasi *fourier* dalam *short-time window*. STFT akan memberikan informasi mengenai fluktuasi frekuensi dari waktu ke waktu. Koefisien spektogram dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(\tau) \cdot w(\tau - t)] \cdot e^{-i\omega t} d\tau \quad (32)$$

dimana t adalah waktu, ω adalah variabel frekuensi radial, $x(\tau)$ adalah sinyal domain waktu, adalah variabel integrasi, i adalah satuan imajiner, dan w merupakan fungsi jendela (Al-Qadi dan Zhao, 2016).

Tingkat *fouling* pada *ballast* dapat diperkirakan berdasarkan kecepatan atenuasi energi. Karena konduktivitas pada *ballast* kering mendekati nol,

penyebab utama atenuasi gelombang EM adalah hamburan. Menurut Benedetto (2010) dan Tosti dkk. (2013), intensitas hamburan sebanding dengan pangkat empat frekuensi gelombang EM. Patriarca dkk. (2013) menemukan bahwa kehadiran partikel halus menurunkan faktor kualitas, yang didefinisikan sebagai rasio terhadap bagian imajiner dari permitivitas dielektrik (Bano, 2004), dan meningkatkan atenuasi gelombang mikro pada tingkat frekuensi tinggi. Hal ini terjadi karena ukuran hamburan halus mendekati panjang gelombang gelombang EM frekuensi tinggi. Oleh karena itu, energi komponen frekuensi tinggi dari sinyal GPR akan dilemahkan lebih cepat ketika pembert dikotori dengan partikel halus (Al-Qadi dan Zhao, 2016).

BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun pelaksanaan penelitian ini dilaksanakan pada:

Waktu : Agustus s.d November 2023

Tempat : Laboratorium Hidrologi, Laboratorium Eksplorasi Geotermal,
dan Laboratorium PPDG (Pengolahan dan Pemodelan Data
Geofisika)

Alamat : Jl. Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota
Bandar Lampung, Lampung 35142

Adapun jadwal kegiatan penelitian ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Jadwal kegiatan penelitian

No	Kegiatan	Bulan																	
		Agustus				September				Oktober				November				Desember	
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
1	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Penyusunan proposal penelitian				■	■	■	■	■	■	■	■	■						
3	Seminar proposal													■					
4	Pengumpulan data				■	■	■	■	■	■	■	■	■						
5	Pengolahan data					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
6	Penyusunan hasil penelitian					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
7	Seminar hasil																	■	■
8	Sidang komperhensif																		■

4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Alat dan bahan beserta fungsinya.

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Laptop	Perangkat keras untuk menyusun laporan dan melakukan pengolahan data
2	Reflexw	Perangkat lunak mengolah <i>raw</i> data GPR dan <i>picking velocity</i>
3	Matlab	Perangkat lunak untuk melakukan proses pengolahan domain frekuensi, atenuasi dan STFT
4	Microsoft Word	Perangkat lunak untuk menyusun laporan
5	Satu paket Geoscanner Akula 9000 C (Antena GCB1000, Control Unit, Survey Carts, Control Cables, dan Miscellaneous	Perangkat keras untuk melakukan akuisisi data GPR
6	Aki 12 Volt	Sumber listrik untuk Geoscanner Akula 9000 C
7	Model rel kereta dalam box	Tempat untuk menyimpan <i>ballast</i> serta menjadi alat simulasi rel kereta
8	Batubara halus	Digunakan sebagai pengotor pada <i>ballast</i> (variabel utama penelitian)
9	<i>Ballast</i> dari batu andesit	Objek yang akan dideteksi dan dianalisis tingkatan pengotor serta ketinggian rendaman air
10	Air	Digunakan untuk mesaturasi <i>ballast</i>

4.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian ini adalah sebagai berikut:

4.3.1 Studi Literatur

Pada tahapan dilakukan pengumpulan dan peninjauan pustaka yang mendukung hipotesis, sehingga dapat digunakan sebagai landasan teori dan tahapan eksperimen. Berdasarkan studi literatur ini didapatkan jenis *ballast* dan ketinggian *ballast* yang sesuai standar di Indonesia. Landasan penelitian ini didasarkan pada studi yang dilakukan oleh Leng dan Al-Qadi (2010) yang membahas tentang pemanfaatan STFT untuk evaluasi *ballast fouling*. Selain itu, untuk analisis domain frekuensi dan atenuasi didasarkan pada penelitian Wang dkk. (2010) yang menyatakan terdapat penurunan spektrum pada *ballast fouling* dan peningkatan atenuasi pada *ballast fouling*. Sedangkan untuk analisis kecepatan didasarkan pada Annan (2012) yang menganalisis hubungan kecepatan gelombang EM terhadap jenis material yang berbeda.

4.3.2 Pembuatan Model Rel Kereta

Pada tahapan ini dilakukan pembuatan model rel kereta menggunakan box akrilik dengan dimensi 1.35 m x 1.16 m x 0.5 m. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 12**.



Gambar 12. Model rel kereta api.

4.3.3 Scanning Data

Proses *scanning* data (**Gambar 13**) dibagi menjadi tiga tahap, yakni kondisi *clean*, *water saturated*, dan *Fouled*

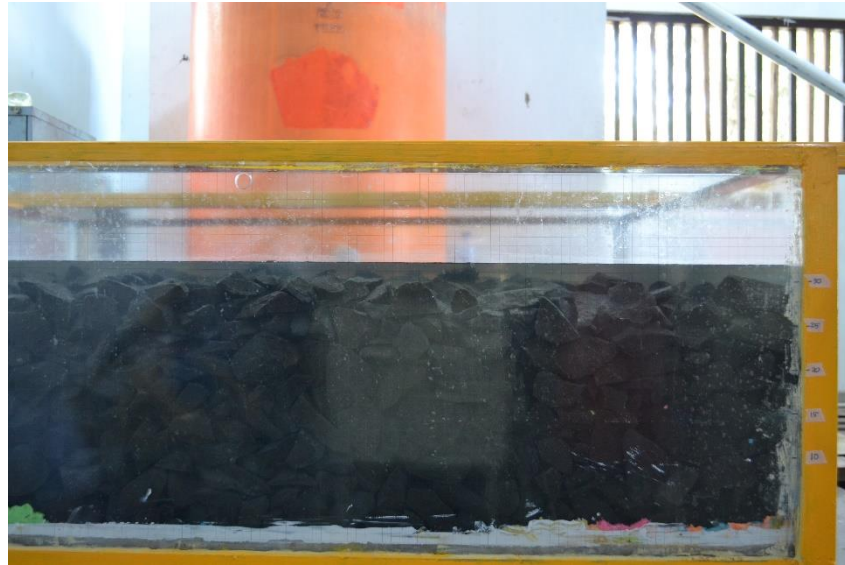


Gambar 13. Proses *scanning* data menggunakan Geoscanner.



Gambar 14. *Ballast* dalam kondisi bersih.

Pada kondisi *clean* box akrilik akan dimasukan *ballast* bersih terlebih dahulu setinggi 30 cm, seperti pada **Gambar 14**. Proses memasukan *ballast* kedalam box dilakukan secara bertahap dan dilakukan perataan agar *ballast* dalam kondisi yang padat, kemudian dilakukan *scanning*.



Gambar 15. *Ballast* dalam kondisi terendam air.

Selanjutnya *ballast* akan direndam dengan air (**Gambar 15**) dengan ketinggian 30 cm dari dasar *ballast*, kemudian dilakukan *scanning*.



Gambar 16. *Ballast* dalam kondisi *fouled*.

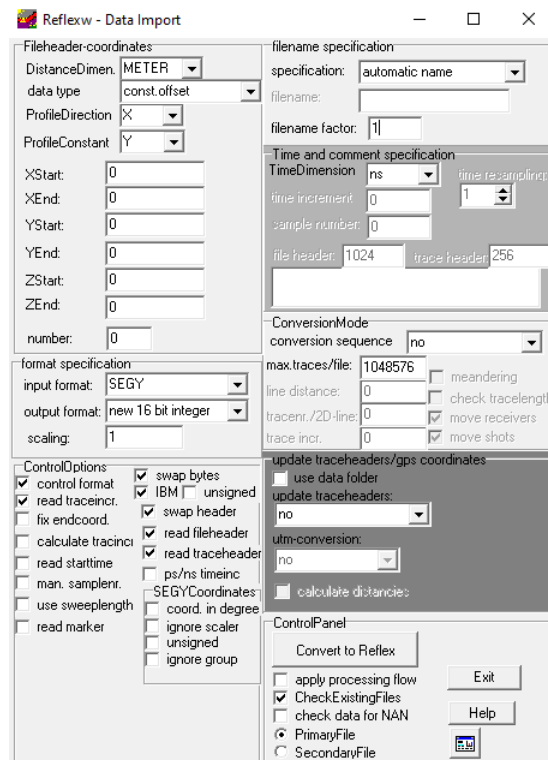
Setelah *ballast* dalam kondisi kering, maka akan diberikan pengotor berupa batubara halus (**Gambar 16**) dengan ketinggian 23 cm dari dasar *ballast*. Masing-masing ketinggian dilakukan *scanning*. Proses penyisipan *ballast* ini seharusnya dibantu dengan mesin penggetar agar pengotor masuk ke dalam celah – celah *ballast*.

4.3.4 Pengolahan Data GPR Menggunakan Reflexw

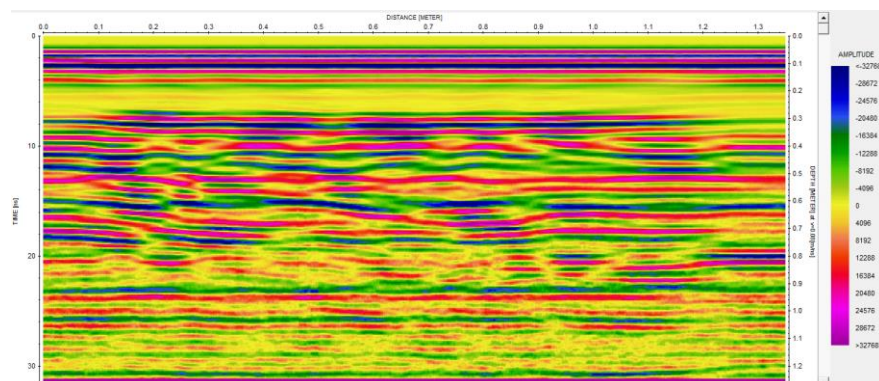
Adapun pengolahan data GPR menggunakan Reflexw terdiri dari beberapa tahapan, seperti berikut:

a. *Import Data*

Data *raw* hasil akuisisi dengan format SEGY dilakukan *input data* kedalam Reflexw. Parameter *import* data dapat dilihat pada **Gambar 17** dan hasil *import* data pada **Gambar 18**.



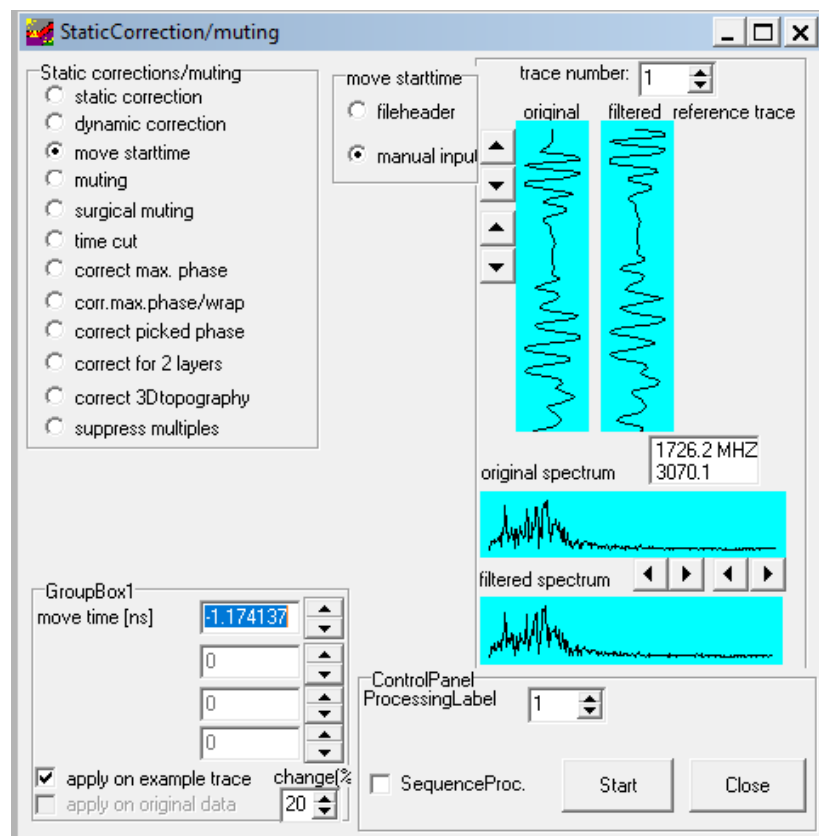
Gambar 17. *Import raw data GPR.*



Gambar 18. *Raw data GPR.*

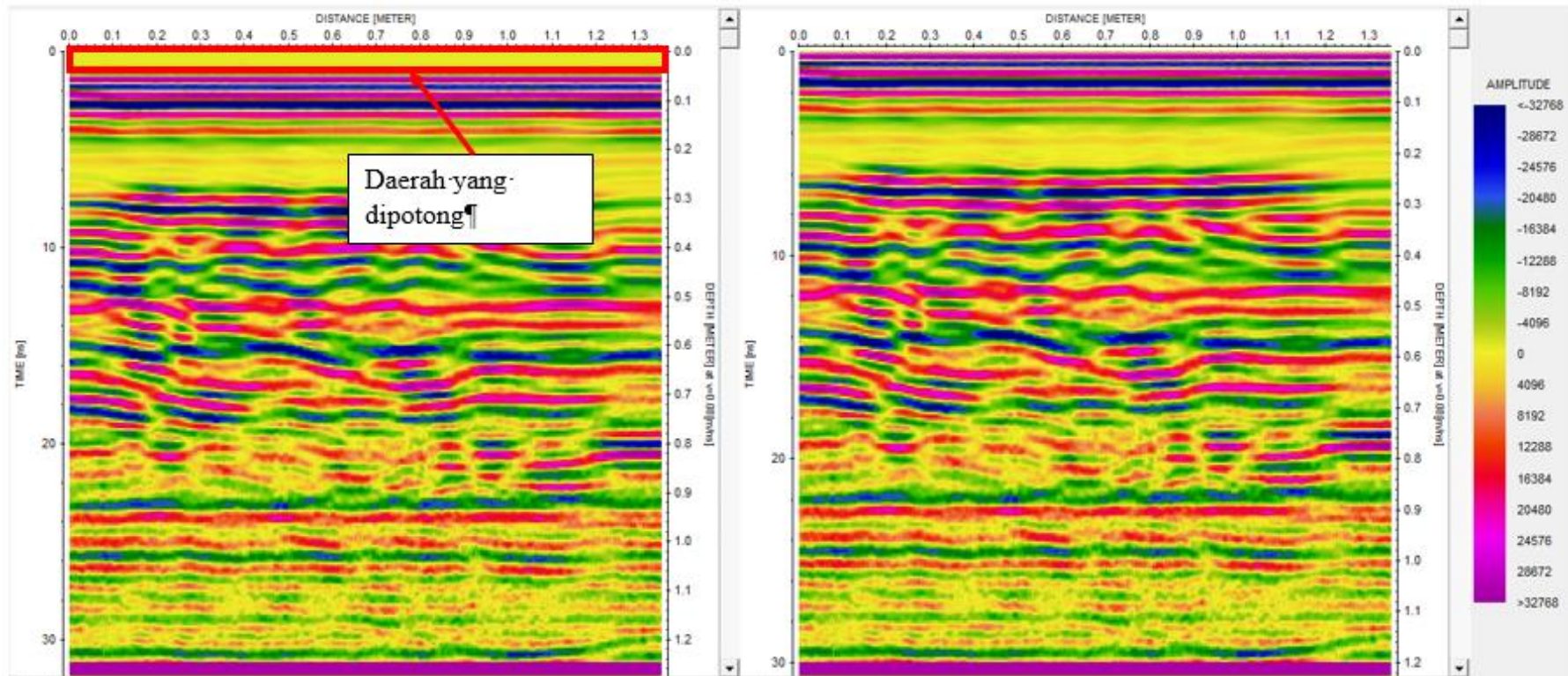
b. Koreksi Statis

Koreksi dilakukan untuk mengembalikan waktu tiba gelombang pertama (posisi awal) ke titik nol. Jenis koreksi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Move Starttime*. Window kerja *move starttime* dapat dilihat pada **Gambar 19** dan hasil koreksi dapat dilihat pada **Gambar 20**.



Gambar 19. Window kerja koreksi statis.

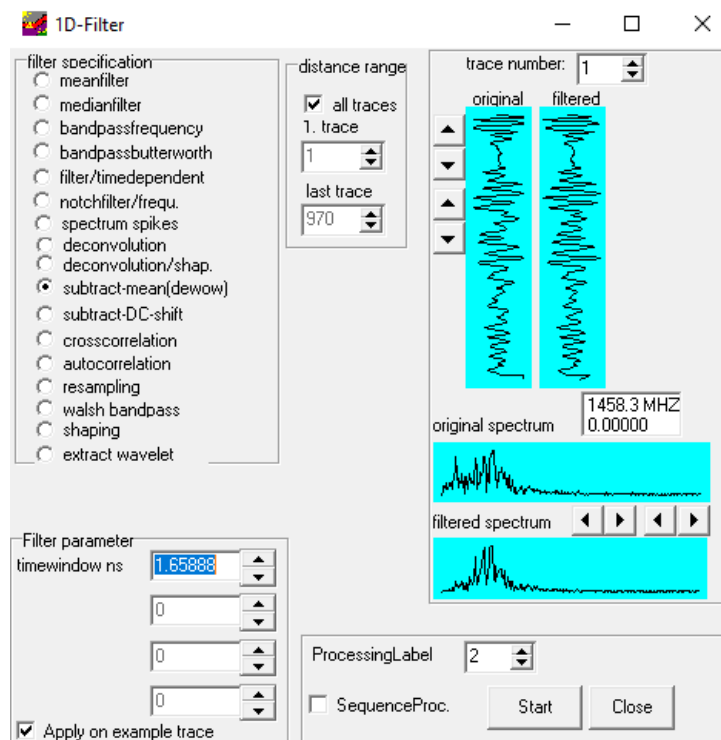
Move start time bekerja dengan menghapus gelombang langsung udara yang diakibatkan oleh efek dari perangkat GPR. Gelombang langsung tersebut dihapus dengan menaikkan gelombang yang seharusnya dideteksi. Pada **Gambar 20** terlihat kotak merah merupakan daerah yang akan dipotong dengan nilai *move start time* -1.174 ns..



Gambar 20. Sebelum koreksi statis (kiri) dan setelah koreksi statis (kanan).

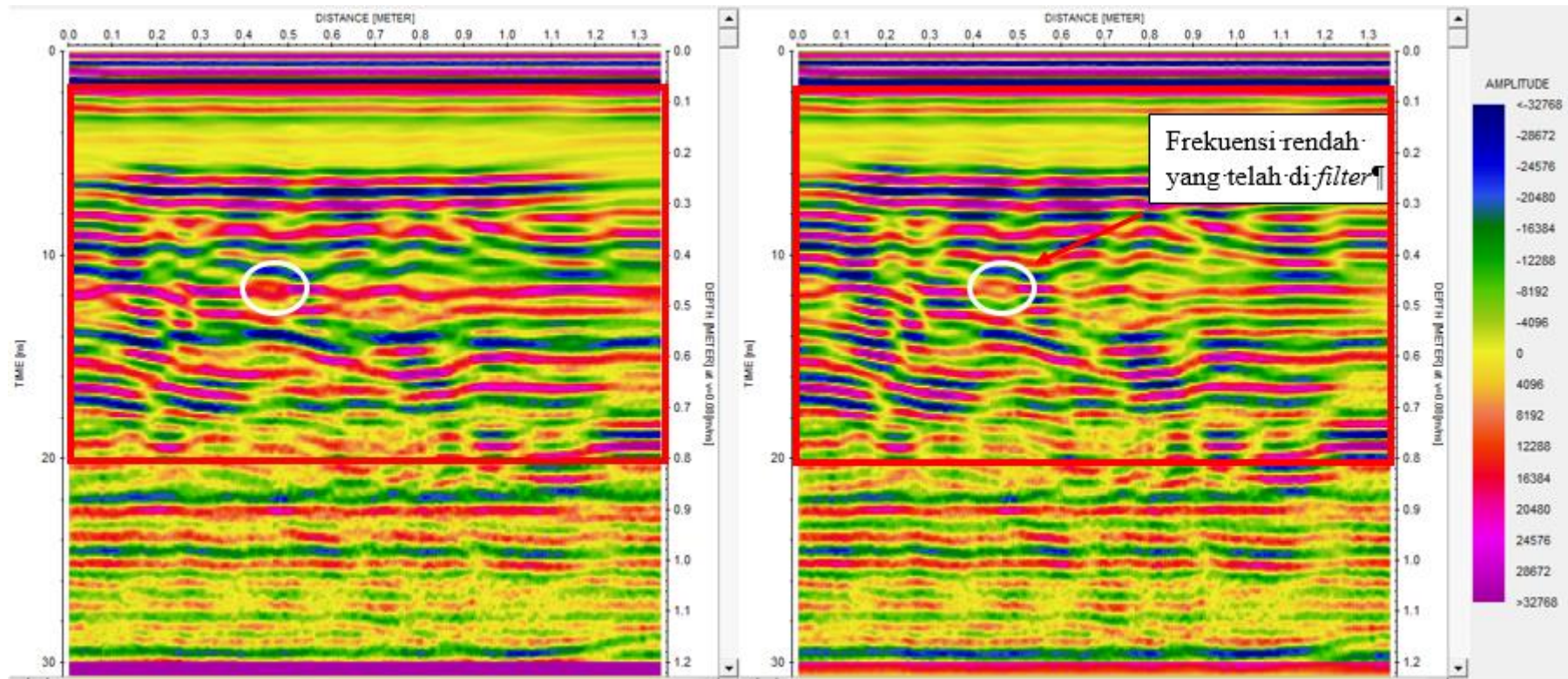
c. 1D Filter-Dewow

Filter ini bertujuan untuk menghilangkan *noise* frekuensi rendah yang terekam oleh alat radar. Hal ini terjadi karena instrumen elektronik yang tersaturasi oleh amplitudo besar dari *direct wave* dan *air wave*. Window kerja *Subtract-mean (dewow)* dapat dilihat pada **Gambar 21** dan hasil *filter* dapat dilihat pada **Gambar 22**.



Gambar 21. Window kerja *Subtract-mean (dewow)*.

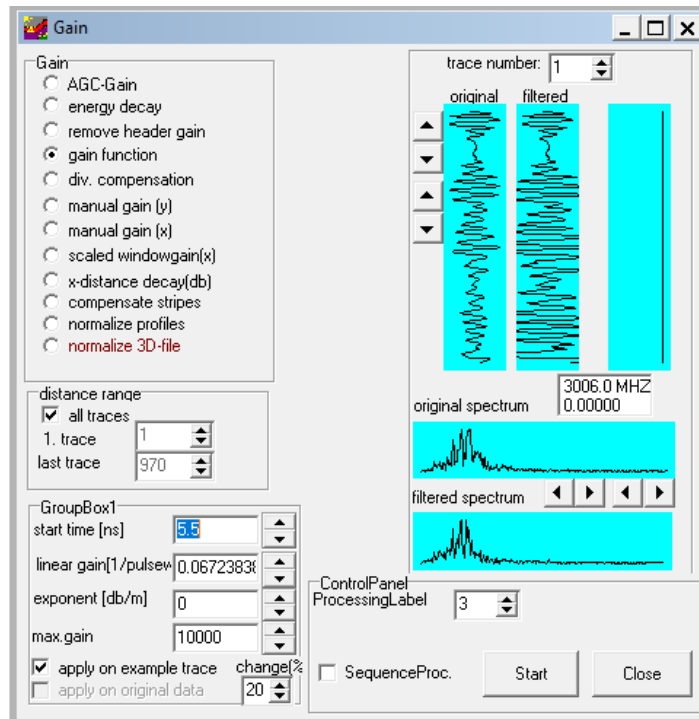
Pada *filter* ini spektrum gelombang original dan *filtered* harus dijaga mempunyai *peak* frekuensi dan amplitudo yang hampir sama. Hal ini dimaksudkan agar frekuensi diluar data original tidak ada yang masuk. Pada kota merah **Gambar 22** merupakan fokus area yang akan dilakukan *filter*. Terlihat pada lingkaran putih yang menandakan *noise* frekuensi rendah telah hilang.



Gambar 22. Sebelum diaplikasikan *filter dewow* (kiri) dan setelah diaplikasikan *filter dewow* (kanan).

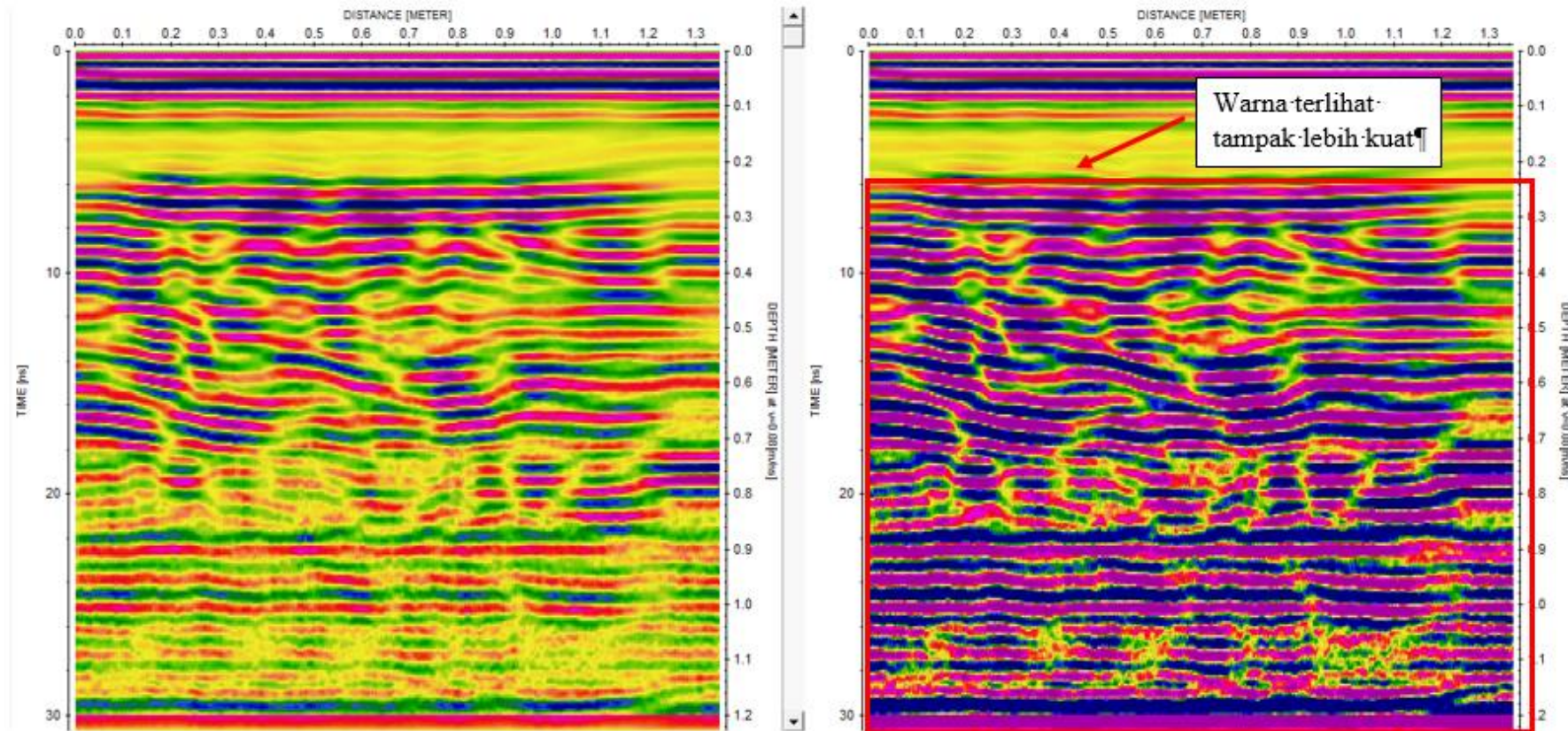
d. *Gain*

Gain bertujuan untuk meningkatkan sinyal berdasarkan **Persmaan 28** yang telah teratransi karena sifat dispersif gelombang elektromagnetik. *Window* kerja *Gain* dapat dilihat pada **Gambar 23** dan hasil *gain* dapat dilihat pada **Gambar 24**.



Gambar 23. *Window* kerja *gain function*.

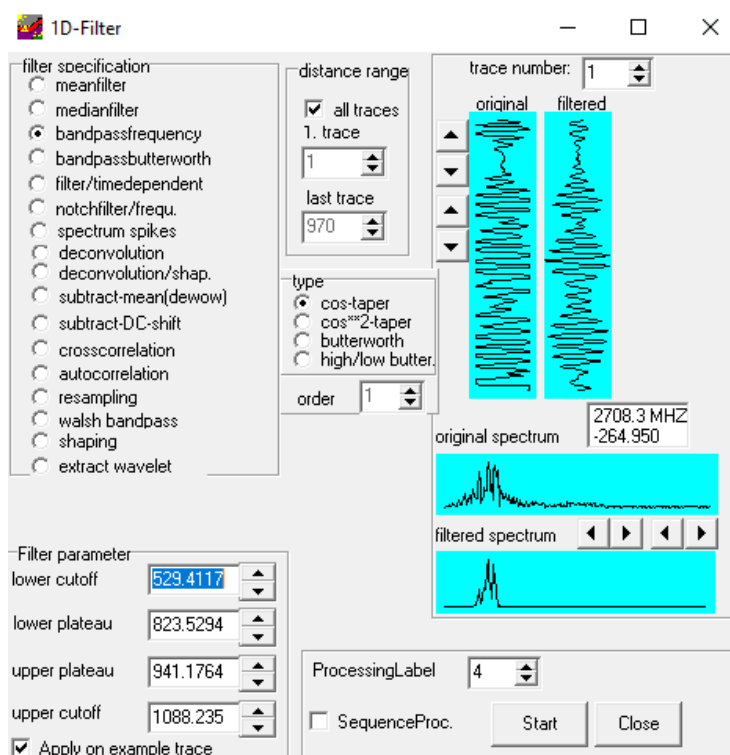
Tipe *gain* yang dipakai adalah *gain function*. Tipe ini akan memungkinkan *start time* dapat disesuaikan spektrum mana yang akan ditingkatkan sinyalnya, dengan *linear gain*. Pada kotak merah **Gambar 24** terlihat terdapat perbedaan warna yang signifikan pada radargram yang telah ditingkatkan sinyalnya, hal ini disebabkan nilai amplitudo yang meningkat.



Gambar 24. Sebelum dilakukan *gain* (kanan) dan setelah dilakukan *gain* (kiri).

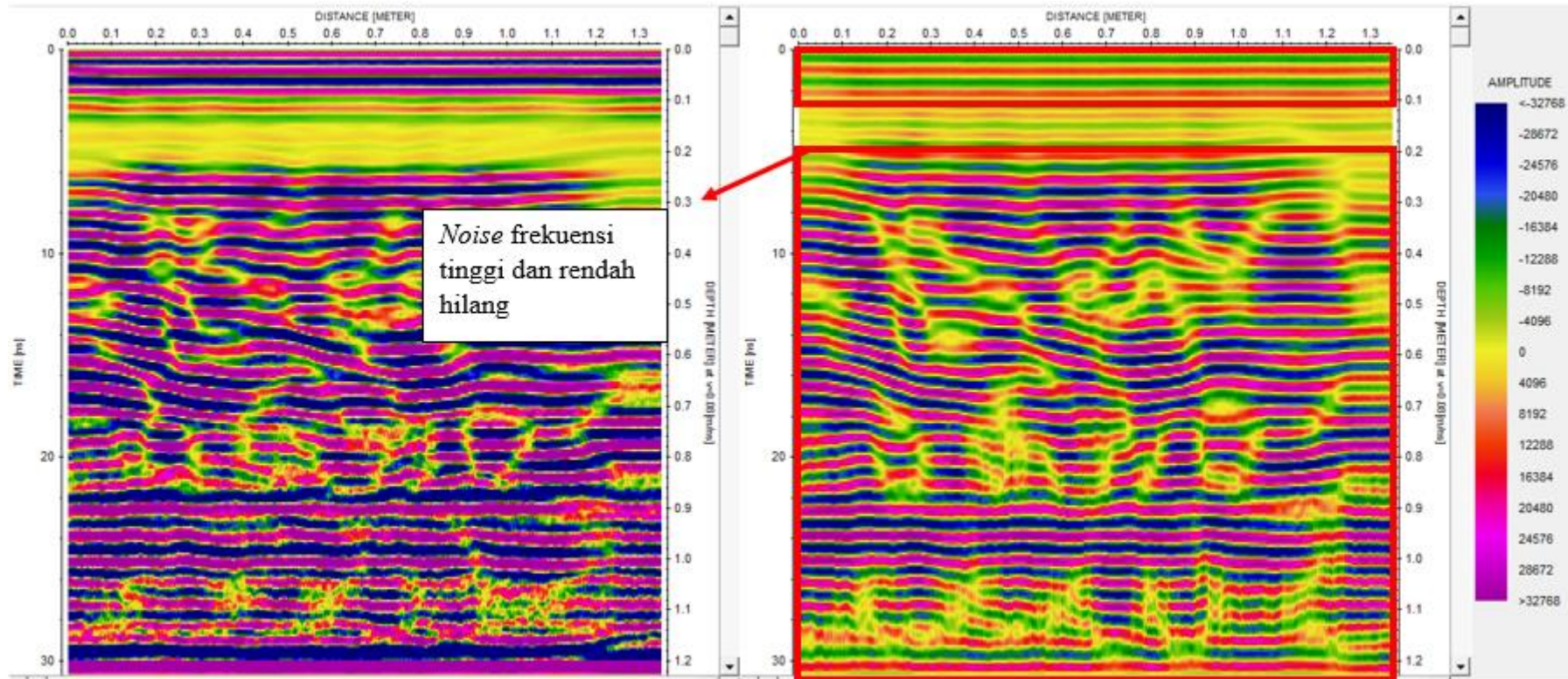
e. 1D Filter-Bandpass Frequency

Filter ini bertujuan untuk meningkatkan SNR (*Signal to Noise Ratio*) dengan menyaring data komponen sinyal dengan frekuensi di luar *bandwidth* utama yang direkam berdasarkan **Persamaan 29**. *Window kerja Bandpass Frequency* dapat dilihat pada **Gambar 25** dan hasil *filter* dapat dilihat pada **Gambar 26**.



Gambar 25. Window kerja *Bandpass Frequency*.

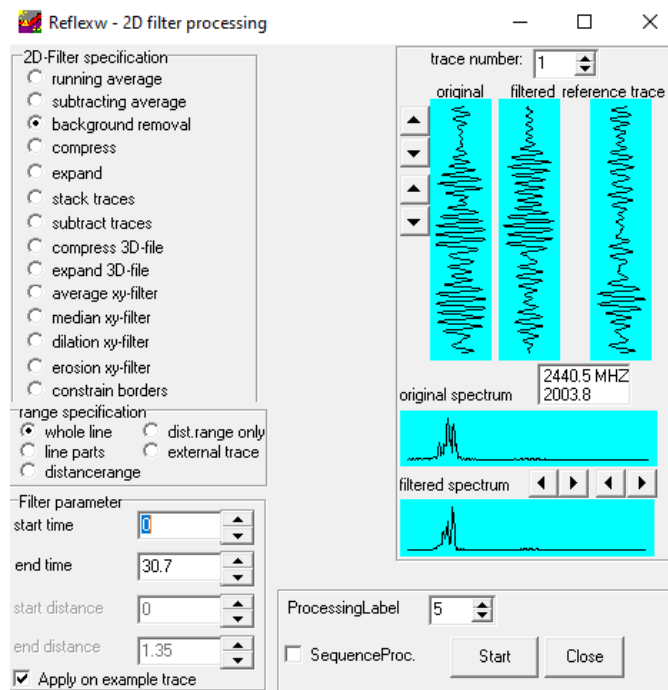
Pada filter ini parameter *lower cutoff*, *lower plateau*, *upper plateau*, dan *upper cutoff*. Secara berurutan dapat digunakan batasan frekuensi 500 MHz, 700 MHz, 1000 MHz, dan 1200 MHz. Parameter ini harus dilakukan *trial and error* agar memiliki frekuensi yang tepat sehingga jangkauan sinyal dapat dibatasi dengan baik (Benedetto dkk., 2017). Pada **Gambar 26** terlihat kotak merah merupakan *noise* frekuensi tinggi dan rendah telah terpotong sesuai dengan batasan frekuensi.



Gambar 26. Sebelum dilakukan filter *Bandpass Frequency* (kiri) dan setelah dilakukan filter *Bandpass Frequency* (kanan).

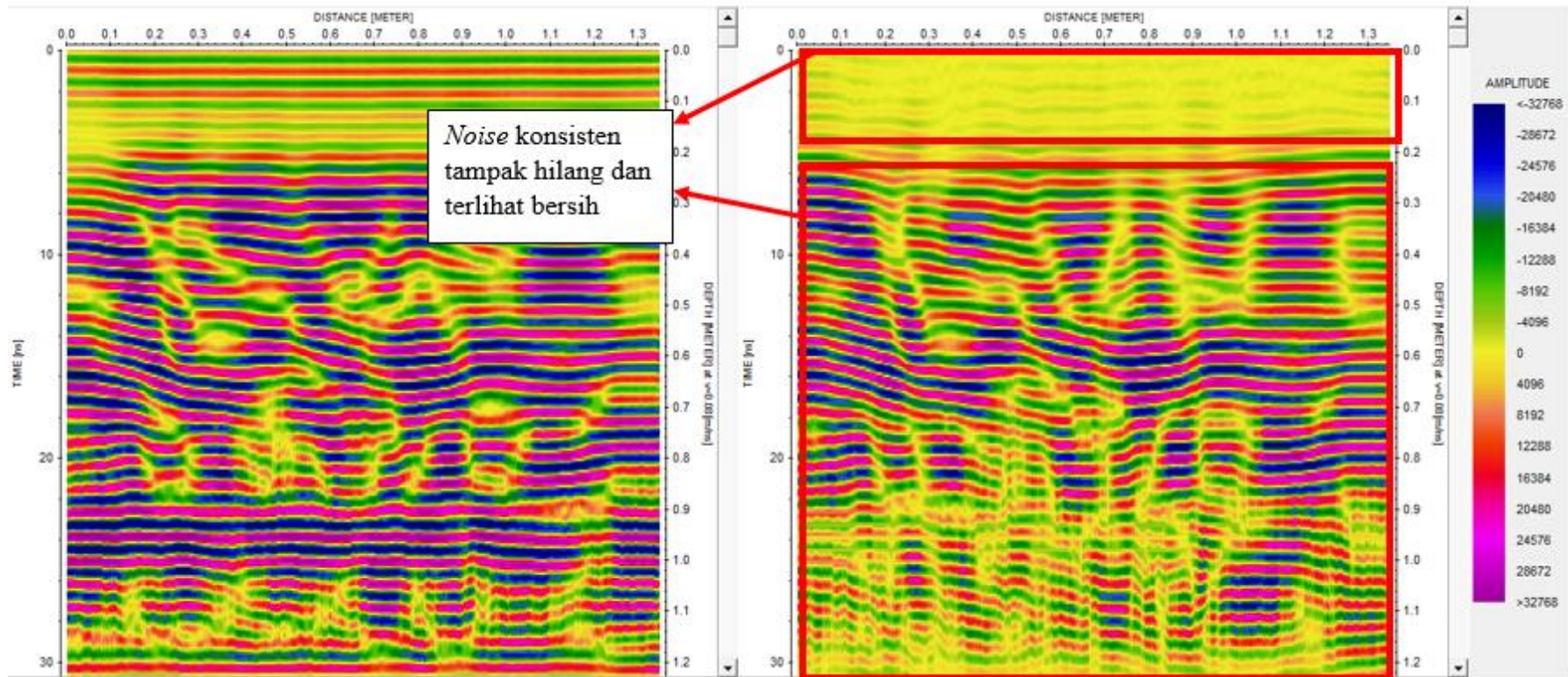
f. *2D Filter-Background Removal*

Filter ini dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan *noise* konsisten yang selalu muncul pada profil radagram. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menghilangkan energi koheren horizontal. *Window kerja Background Removal* dapat dilihat pada **Gambar 27** dan hasil *filter* dapat dilihat pada **Gambar 28**.



Gambar 27. *Window kerja Background Removal.*

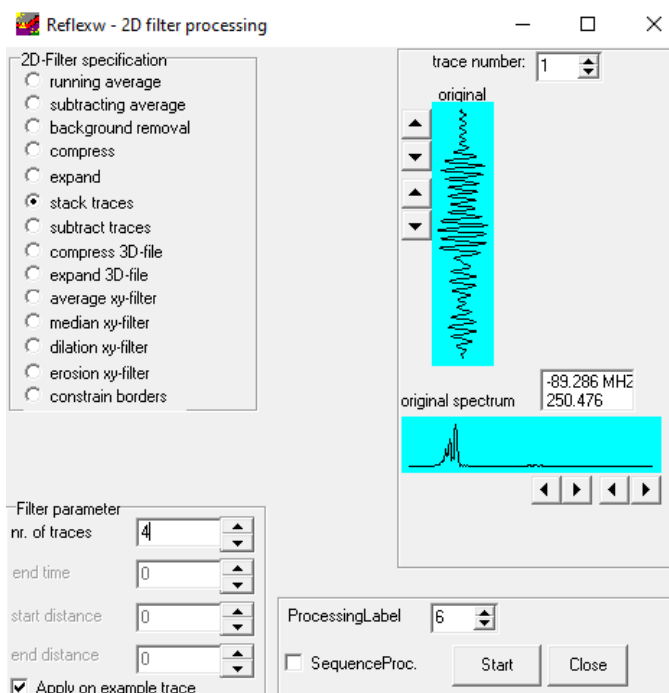
Noise yang muncul dapat dikurangi dengan mengurangi nilai rata-rata amplitudo dengan sampel tunggal yang dihitung pada seluruh profil radagram atau dapat dijelaskan dengan menghilangkan energi koheren yang horizontal (Benedetto dkk., 2017). Pada **Gambar 28** terlihat jelas *noise* konsisten pada *background* telah terhapus sehingga dapat menjadi lebih jelas.



Gambar 28. Sebelum dilakukan *Background Removal* (kiri) dan setelah dilakukan *Background Removal* (kanan).

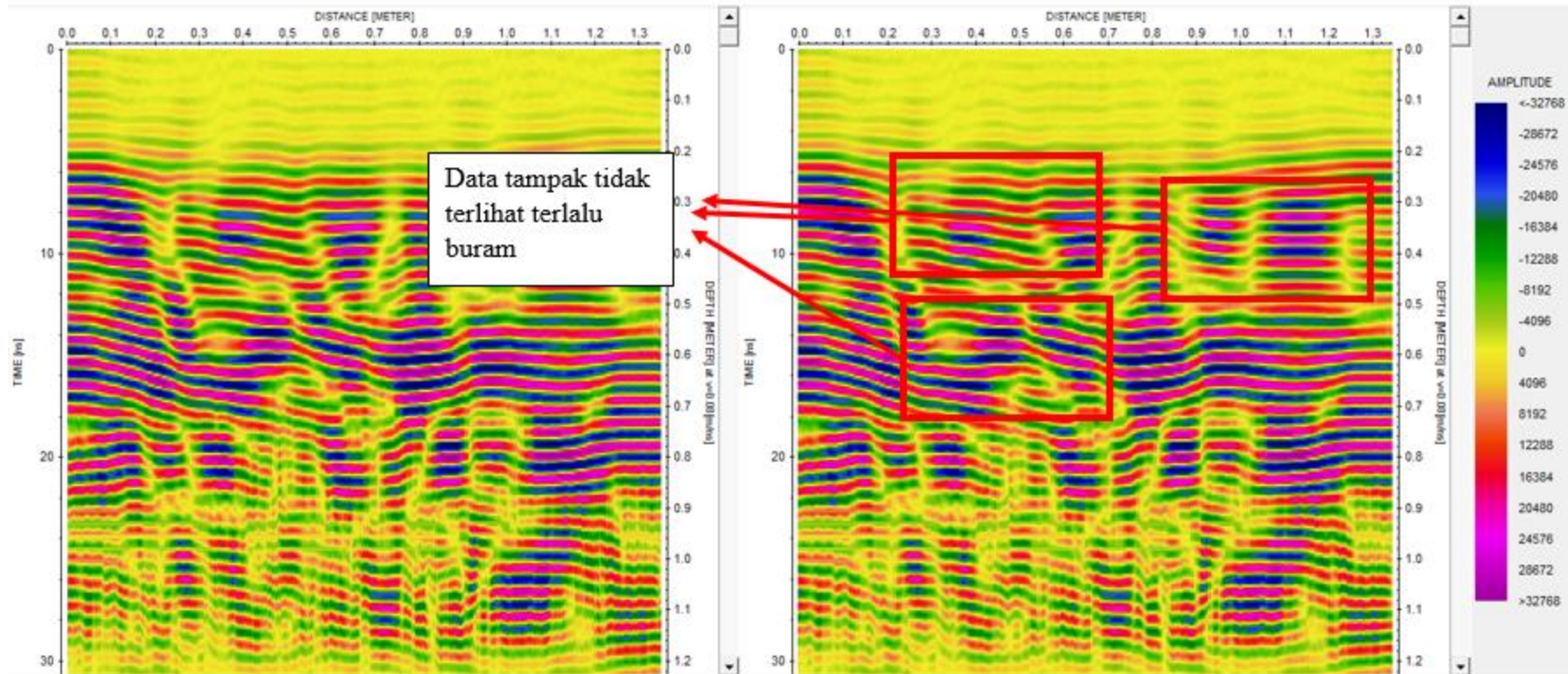
g. 2D Filter-Stack Trace

Stacking merupakan proses untuk meningkatkan SNR (*Signal to Noise Ratio*) dengan cara menghitung rata-rata *trace* yang dikumpulkan untuk mengurangi *random noise*. *Window* kerja *Stack Trace* dapat dilihat pada **Gambar 29** dan hasil *filter* dapat dilihat pada **Gambar 30**.



Gambar 29. *Window* kerja *Stack Trace*.

Jumlah *trace* yang akan di *stack* disesuaikan dengan peningkatan SNR, jumlah *stack* yang tidak sesuai dengan SNR akan menyebabkan data menjadi *noisy*. Pada **Gambar 30**, terlihat kotak merah terlihat data jauh lebih jelas, karena ada peningkatan SNR.



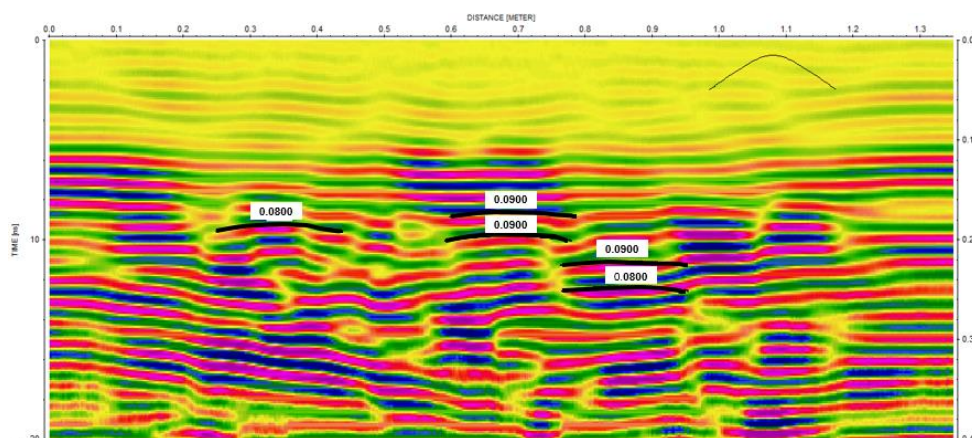
Gambar 30. Sebelum dilakukan *stacking* (kiri) dan setelah dilakukan *stacking* (kanan).

4.3.5 Identifikasi Pola Refleksi

Identifikasi ini dilakukan dengan mempertimbangkan pola refleksi gelombang EM dan warna radargram berdasarkan amplitudo. Pola refleksi akan menggambarkan jenis lapisan berdasarkan klasifikasi fasies Beres dan Haeni (1991) pada **Gambar 11**. Pada *ballast* yang *clean void* udara akan terekam dengan nilai amplitudo mendekati nol. Indikasi keberadaan *void* dapat menentukan juga apakah *ballast* tersebut dalam keadaan rapat atau masih terdapat celah – celah yang masih belum tersisipi oleh batubara halus. Pada radargram yang *noisy* dapat dipertimbangkan sebagai indikasi keberadaan material lainnya yang cukup masif, seperti air dan batubara halus. Proses atenuasi terjadi secara signifikan pada *ballast fouled* dan terendam air air. Pola atenuasi dapat dilihat dengan penurunan spektrum amplitudo.

4.3.6 Analisis Kecepatan Gelombang EM

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui jenis medium berdasarkan nilai kecepatannya, selain itu dapat juga menentukan perbedaan kondisi *ballast* tersebut (Annan, 2012). Analisis ini mempertimbangkan besar hiperbola pada tiap-tiap refleksi sehingga dapat ditentukan seberapa besar kecepatannya. Pendekatan analisis kecepatan ini berdasarkan **Persamaan 16**. Proses penentuan kecepatan gelombang EM dapat dilihat pada **Gambar 31**.



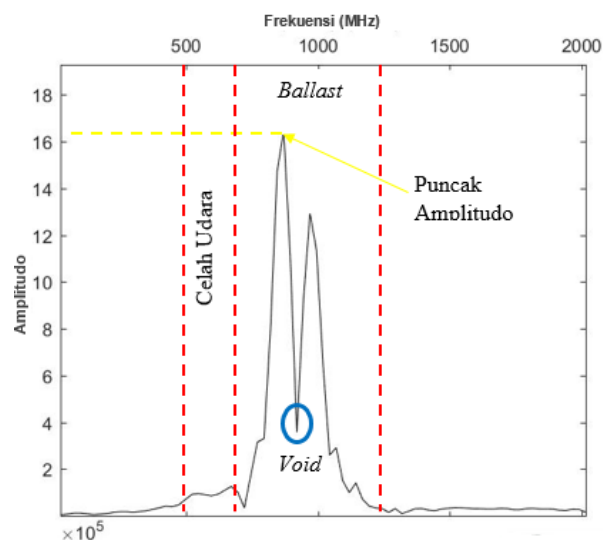
Gambar 31. Penentuan kecepatan gelombang EM.

Picking Velocity tersebut berdasarkan bentuk kurva pada radargram. Kurva akan semakin melengkung ketika nilai kecepatan semakin naik dan akan semakin mendatar seiring pertambahan kedalaman. Hasil *picking velocity* juga dapat menentukan nilai konstanta dielektrik, berdasarkan **Persamaan 16**. Jika c adalah kecepatan cahaya ($3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$), v adalah kecepatan gelombang EM, maka formulasi untuk menentukan konstanta dielektrik (ϵ_r) adalah sebagai berikut:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (33)$$

4.3.7 Analisis Domain Frekuensi

Analisis ini dilakukan menggunakan *fourier transform*. Menurut Franchetti dan Püschel (2011) analisis *fourier transform* dilakukan untuk merubah domain waktu menjadi domain frekuensi berdasarkan **Persamaan 31**. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi perubahan spektrum dan perbedaan spektrum pada masing – masing perlakuan *ballast*. Menurut Wang dkk. (2022) pada *ballast* yang bersih akan cenderung memiliki nilai spektrum yang lebih tinggi dibandingkan *ballast* yang *fouled*. Grafik domain frekuensi dapat dilihat pada **Gambar 32**.

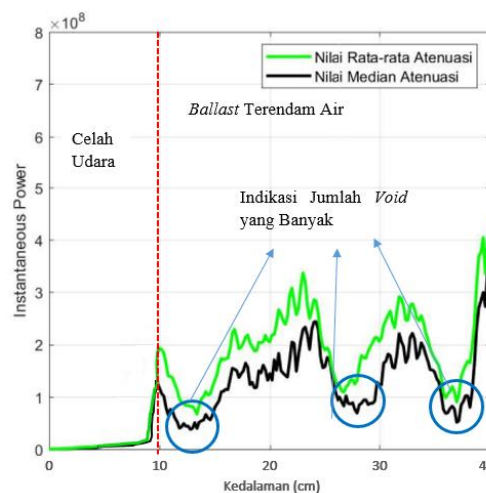


Gambar 32. Grafik domain frekuensi GPR.

Proses ini dilakukan dengan cara mencuplik *trace* pada radargram pada Matlab menggunakan GUI MatGPR, kemudian dilakukan *Fourier Transform* untuk mendapatkan domain frekuensi pada (Tzanis, 2010).

4.3.8 Analisis Atenuasi

Analisis dilakukan berdasarkan prinsip Davis dan Annan (1989), dengan meninjau permitivitas dielektrik dan konduktivitas dielektrik. Ketika pada suatu material kedua variabel tersebut memiliki nilai yang tinggi maka akan mendapatkan nilai atenuasi yang tinggi. Hal ini dapat dilihat dari penambahan material pada *ballast* berupa air dan batubara halus yang menyebabkan nilai konduktivitas dan permitivitas dielektrik meningkat sehingga terjadi atenuasi secara signifikan. Grafik atenuasi dapat dilihat pada **Gambar 33**.



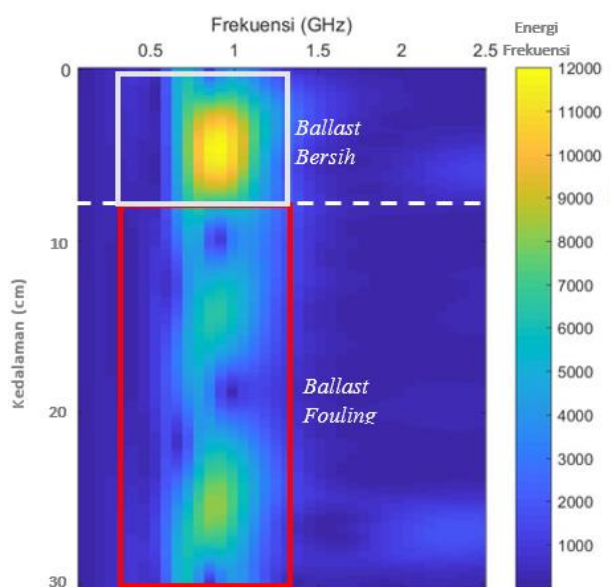
Gambar 33. Grafik atenuasi gelombang EM.

Proses tersebut dilakukan menggunakan Matlab dengan GUI MatGPR dengan cara mencari nilai rata – rata atenuasi pada radargram dengan mempertimbangkan nilai permitivitas dielektrik.

4.3.9 Pengolahan Data dan Interpretasi Menggunakan Metode STFT

Karena redaman energi hamburan bergantung pada frekuensi dan sifat media transmisi, *short-time Fourier transform* (STFT) adalah teknik

yang layak untuk melacak perubahan frekuensi dan menilai perubahan kondisi pengotoran *ballast* dari waktu ke waktu (Leng dan Al-Qadi, 2010). STFT merupakan transformasi waktu-frekuensi yang mengubah sinyal domain waktu menjadi spektrogram berdasarkan **Persamaan 32** yang mewakili energi sinyal pada jendela waktu dan frekuensi yang berbeda. Spektrogram STFT dapat dilihat pada **Gambar 34**.

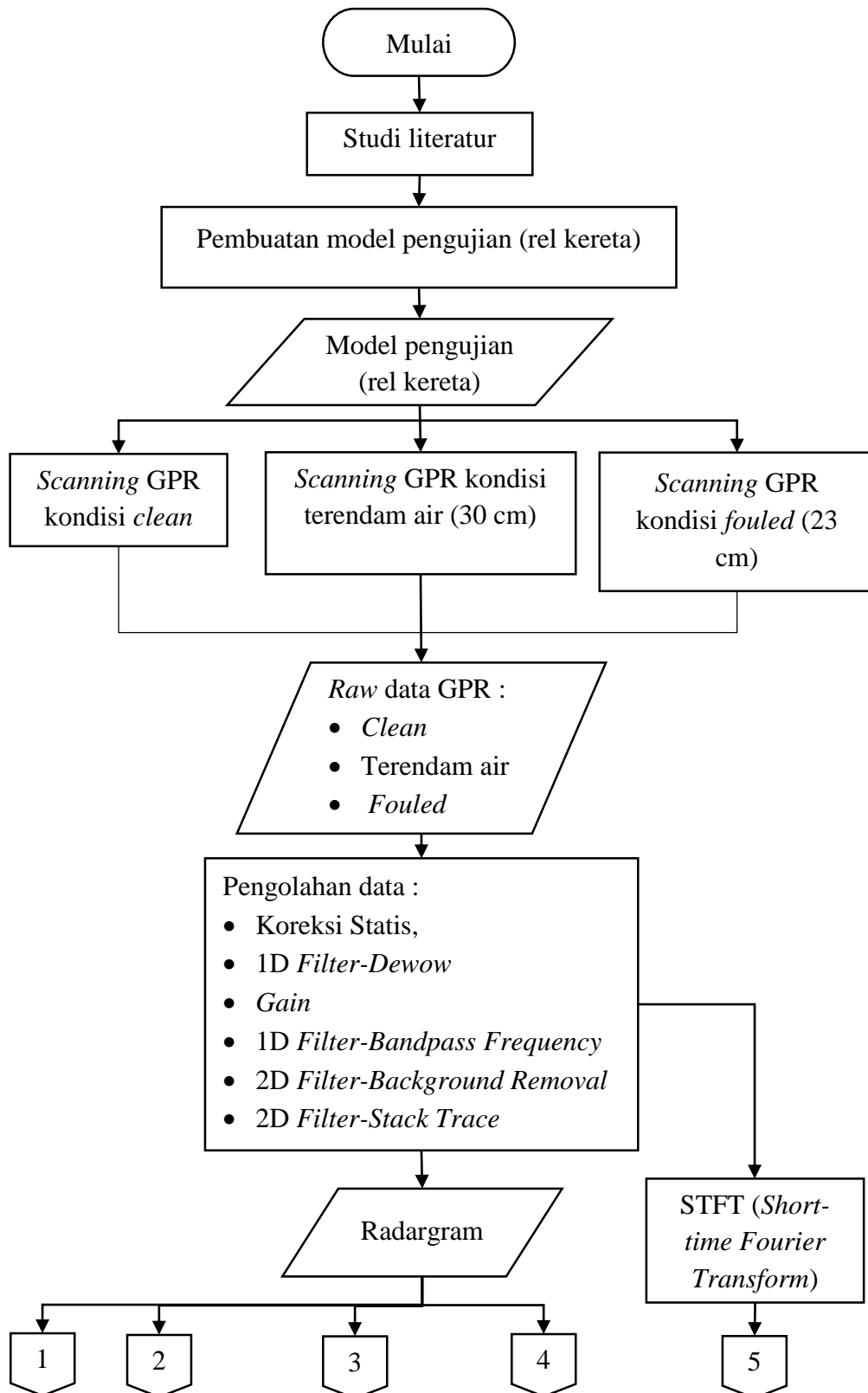


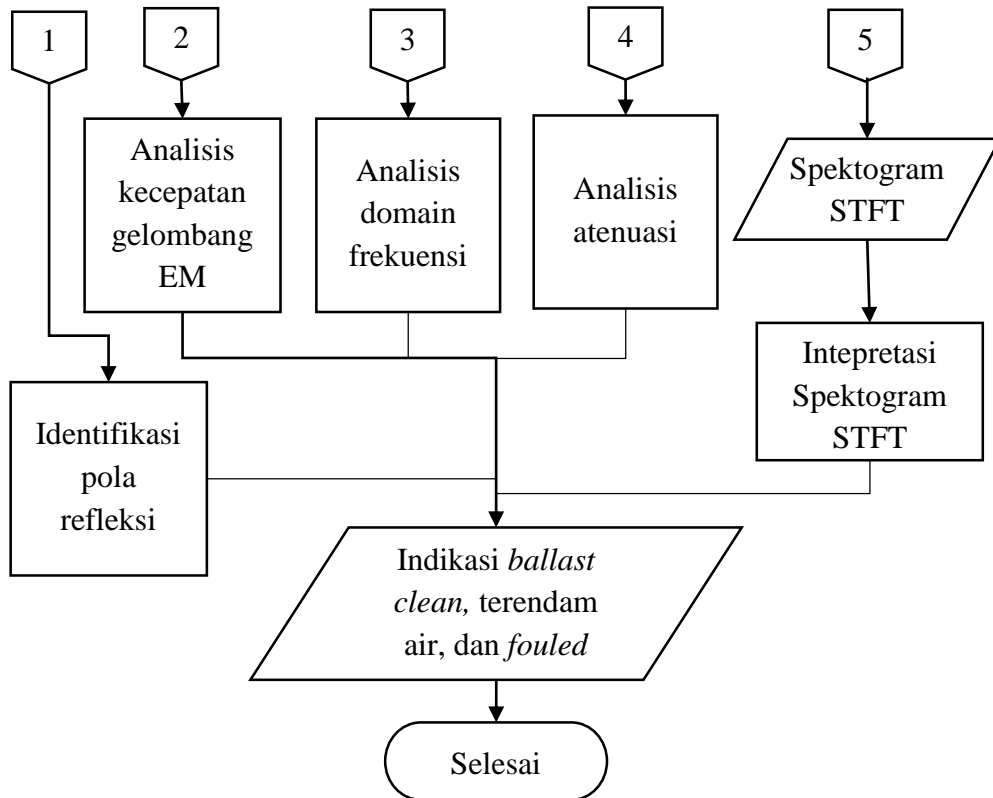
Gambar 34. Spektrogram STFT.

Menurut Leng dan Al-Qadi (2010) Interpretasi hasil STFT dapat dilakukan dengan cara meninjau energi frekuensi yang dihasilkan pada *ballast clean* energi frekuensi akan relatif stabil dan menurun seiring dengan kedalaman. Pada *ballast fouled* akan terjadi penurunan frekuensi secara tiba-tiba. Sedangkan pada *ballast* yang tersaturasi air terjadi penurunan frekuensi namun tidak terlalu signifikan seperti *ballast fouled*.

4.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian ini seperti pada **Gambar 33**.





Gambar 35. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pola refleksi radargram pada ketiga perlakuan *ballast* (bersih, terendam air, dan *fouled*) memiliki pola *hummocky* dan bebas refleksi. Pola *hummocky* menunjukkan terdapat lapisan kerikil berupa andesit yang cukup tebal. Sedangkan bebas refleksi menunjukkan *void* pada celah antara antenna dan *ballast* serta keberadaan *void* udara pada *ballast*.
2. Kecepatan gelombang EM pada *ballast* bersih sebesar 0,13 m/ns, *ballast fouled* sebesar 0.10 m/ns, dan *ballast* dengan kondisi terendam air 0.08 - 0.09 m/ns. Keberadaan air dan pengotor dapat diidentifikasi dengan meninjau penurunan kecepatan gelombang EM.
3. Pada analisis domain frekuensi gelombang EM, *ballast* dalam kondisi bersih memiliki spektrum yang lebih tinggi dibandingkan *ballast* terendam air dan *ballast* dalam keadaan *fouled*. Sedangkan pada *ballast* terendam air memiliki spektrum lebih tinggi dibandingkan *ballast* dalam keadaan *fouled*. Sehingga *ballast* dalam keadaan *fouled* memiliki spektrum yang paling rendah.
4. Pada analisis atenuasi gelombang EM *ballast* dalam kondisi bersih memiliki nilai atenuasi yang kecil dibandingkan *ballast* terendam air dan *ballast* dalam keadaan *fouled*. Sedangkan *ballast* terendam air memiliki nilai atenuasi yang lebih kecil dibandingkan *ballast* dalam keadaan *fouled*. Sehingga *ballast* dalam keadaan *fouled* memiliki nilai atenuasi yang paling tinggi diantara tiga variabel *ballast*.

5. Perbedaan energi frekuensi *ballast* dalam keadaan bersih dan terendam air tidak terlalu berbeda secara signifikan sehingga akan sulit membedakan dua kondisi *ballast* tersebut secara visual tanpa meninjau data statistiknya, akan tetapi perbedaan secara signifikan tampak jelas pada *ballast* dalam keadaan *fouled*, terjadi penurunan energi frekuensi secara drastis di kedalaman 7 - 30 cm.

6.2 Saran

Sebaiknya untuk evaluasi *ballast* digunakan frekuensi GPR sebesar 2 GHz, agar perbedaan kondisi *ballast* dapat terlihat dengan menggunakan radargram dan akan meningkatkan kualitas data metode STFT. Selain itu, pengujian kedepannya dilakukan secara langsung di lapangan, agar dapat memvalidasi data dari pengujian skala lab dan memperoleh data yang *real*.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R. L. (1979). Studies In Fluvial Sedimentation: An Elementary Geometric Model for The Connectedness of Avulsion-Related Channel Sand Bodies. *Sedimentary Geology*, 24(1), 253-267.
- Al-Qadi, I.L. dan Zhao, S. (2016). Railway Ballast Fouling Detection Using GPR Data: Introducing a Combined Time–Frequency and Discrete Wavelet Techniques. *Near Surface Geophysics*, 14(2), 145-153.
- Annan, A.P. (2012). *Near Surface Geophysics*. Houston : Society of Exploration Geophysicists.
- Bano , M. (2004). Modelling Of GPR Waves For Lossy Media Obeying A Complex Power Law of Frequency for Dielectric Permittivity. *Geophysical Prospecting*, 52(1), 11–26.
- Benedetto , A. (2010). Water Content Evaluation In Unsaturated Soil Using GPR Signal Analysis In The Frequency Domain. *Journal of Applied Geophysics*. 71(1), 26–35.
- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L.B., dan D'Amico, F. (2017). An Overview of Ground-Penetrating Radar Signal Processing Techniques for Road Inspections. *Signal Processing*, 132(1), 201-209
- Beres, Jr.M. and Haeni, F.P. (1991). Application of Ground Penetrating Radar Methods In Hydrogeological Studies. *Ground Water*, 29(3), 375-386.

- Chowksey, V., Joshi, P., Maurya, D.M., dan Chamyal, L.S. (2011). Ground Penetrating Radar Characterization of Fault-Generated Quaternary Colluvio-Fluvial Deposits Along The Seismicity Active Kachchh Mainland Faults, Western India. *Research communication, Current Science*, 100(6), 915-921.
- Daniels, D.J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. London : The Institution of Electrical Engineers
- Davis, J. L. dan Annan, A.P. (1989). Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37 (5), 531–551.
- Franchetti, F. dan Püschel, M. (2011). *FFT (Fast Fourier Transform) : Dalam Encyclopedia of Parallel Computing*. Boston: Springer
- Guo, Y., Liu, G., Jing, G., Wang, S dan Qiang, W. (2023). Ballast Fouling Inspection and Quantification with Ground Penetrating Radar (GPR). *International Journal of Rail Transportation*, 11(2), 151-168.
- Goodman, D. dan Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Berlin: Springer Berlin.
- Hussein, E. M. A. (2007). *Radiation Mechanics Principles dan Practice*. Elsevier Science : New Brunswick, Canada.
- Indraratna, B., Su, L., dan Rujikiatkamjorn, C. (2011). A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 322-326.
- Jol, H.M. (2008). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Oxford: Elsevier Science.

- Kemenhub. (2022). *Membangun Jaringan Transportasi KA Luar Jawa*. Diakses 20 Agustus 2023 di <https://dephub.go.id/post/read/membangun-jaringan-transportasi-ka-luar-jawa>.
- Kimura, D.W. (2017). *Electromagnetic Waves and Lasers*. Morgan & Claypool :San Rafeal, USA.
- Kong, J.A. (2008). *Electromagnetic Wave Theory*. EMW Publishing : Cambridge, Massachusetts, USA.
- Kovacevic, M.S., Basic, M., Stiponavic, I., dan Gavin, K. (2019). Categorization of the Condition of Railway. Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory. *Applied Sciences*, 9(5089), 1-17.
- Kutz, M. (2004). *Handbook of Transportation Engineering*. New York: Mc-Graw Hill.
- Lackenby, J. (2006). Triaxial behavior of ballast and the role of confining pressure under cyclic loading. *PhD Thesis*. University of Wollongong. NSW, Australia.
- Lehmann, F. dan Green, A. G. (1999). Semi–Automated Georadar Data Acquisition in Three Dimensions. *Geophysics*, 64 (3), 719–731.
- Leng, Z. dan Al-Qadi, I.L. (2010). Railroad Ballast Evaluation Using Ground Penetrating Radar: Laboratory Investigation and Field Validation. *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 10 - 14 Januari 2010, Washington DC, 10 - 562.
- Leucci, G. 2008. Ground Penetrating Radar: The Electromagnetic Signal Attenuation and Maximum Penetration Depth. *Scholarly Research Exchange*, 2008(4), 1-7.

- Liu, S., Li, Z., dan Zhao., G. (2021). Attenuation Characteristics of Ground Penetrating Radar Electromagnetic Wave In Aeration Zone. *Earth Science Informatics*, 14(1), 259-266.
- Muniiroh, F. 2020. Aplikasi Metode Ground Penetrating Radar Untuk Identifikasi Gua Bawah Tanah. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Patriarca C., Tosti F., Velds C., Benedetto A., Lambot, S. dan Slob, E. (2013). Frequency Dependent Electric Properties of Homogeneous Multiphase Lossy Media In The Ground Penetrating Radar Frequency Range. *Journal of Applied Geophysics*, 97(1), 81–88.
- Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012. (2012). *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Kementerian Perhubungan, Republik Indonesia
- Porsani, J.L. dan Sauck, W.A. (2007). Ground-penetrating Radar Profiles Over Multiple Steel Tanks, Artifact Removal Through Effective Data Processing. *Geophysics*, 72(6), J77-J83.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Edisi Ke-2. New York: John Wiley & Sons.
- Salih, M.M., Al-Hameedawi., A.N.M., dan Mahmud, S.S. (2017). The Effect of the Different Frequency on Skin Depth of GPR Detection. *Journal of Babylon University/Engineering*, 25(2), 617-631.
- Selig, E. dan Waters, J.M., (1994). *Track Technology and Substructure Management*. London : Thomas Telford.
- Shan, X., Yu, X., Clift, P.D., Tan, C., Jin, L., Li, M., dan Li, W. (2015). The Ground Penetrating Radar Facies And Architecture of A Paleo-Spit From Huangqihai

Lake, North China: Implication For Genesis And Evolution. *Sedimentary Geology*, 323(1), 1-14.

Syukur, A. (2009). Pemetaan Batuan Dasar Sungai Dengan Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar. *Skripsi*. Universitas Indonesia.

Tennakoon, N. C. (2012). Geotechnical Study of Engineering Behaviour of Fouled Ballast. *PhD Thesis*. University of Wollongong. NSW, Australia.

Tosti, F., Patriarca, C., Slob, E., Benedetto, A., dan Lambot, S. (2013). Clay Content Evaluation In Soils Through GPR Signal Processing. *Journal of Applied Geophysics*, 97(1), 69–80.

Tzanis, A. (2010). MatGPR Release 2: A freeware MATLAB® Package for the Analysis & Interpretation of Common and Single Offset GPR Data. *FastTimes*, 15(1), 17 – 43.

Venkateswarlu , B. dan Tewari, V. C. (2014). Geotechnical Applications of Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal Indian Geological Congress*, 6(1), 35-46.

Wang, S., Liu, G., Jing, G., Feng, Q., Liu, H., dan Guo Y. (2022). State-of-the-Art Review of Ground Penetrating Radar (GPR) Applications for Railway Ballast Inspection. *Sensors*, 22(7), 1 – 28.

Yazdani, N., Garcia, E. C., dan Riad, M. (2018). *Field Assessment of Concrete Structures Rehabilitated With FRP. Eco-Efficient Repair And Rehabilitation Of Concrete Infrastructures*. UK : Woodhead Publishing.

Yelf, R. dan Yelf, D. (2006). Where is True Time Zero?. *Electromag Phenom*, 1(18), 159-163.

Yulius., Yudi., Wahyu, Y., dan Oktafiani, F. (2008). Studi Pemrosesan dan Visualisasi Data Ground Penetrating Radar. *Jurnal Informatika LIPI*, 2(1), 1-6.