

Skripsi Geofisika

**ANALISIS DAYA DUKUNG TANAH MENGGUNAKAN METODE
MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) DI
SEKITAR TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR TAMANGAPA**



OLEH :

ASMIYENI ISLAMIATI

H061181012

**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

HALAMAN JUDUL

Analisis Daya Dukung Tanah Menggunakan Metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir

Tamangapa

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains pada

Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

ASMIYENI ISLAMIATI

H061181012

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS DAYA DUKUNG TANAH MENGGUNAKAN METODE
MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) DI
SEKITAR TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR TAMANGAPA**

Disusun dan Diajukan Oleh:

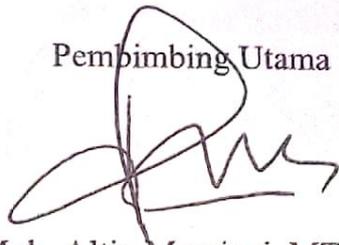
**Asmiyeni Islamiati
H061181018**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Menyetujui,

Makassar, 23 Desember 2022

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT, Surv. IPM
NIP. 196406161989031006

Pembimbing Pertama



Dr. Erfan, M.Si
NIP. 196406161989031006

**Ketua Departemen Geofisika
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin Makassar**



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Asmiyeni Islamiati

NIM : H0181012

Program Studi : Geofisika

Menyatakan bahwa karya tulis berjudul

“Analisis Daya Dukung Tanah Menggunakan Metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Tamangapa” merupakan karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 Desember 2022

Yang menyatakan



Asmiyeni Islamiati

ABSTRAK

Tanah merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dalam perencanaan bangunan karena memiliki lapisan dan karakteristik yang beragam sehingga akan mempengaruhi kemampuannya dalam menopang suatu beban. Kemampuan tanah untuk menopang beban maksimum di atasnya disebut daya dukung tanah. Salah satu cara untuk memperoleh nilai daya dukung tanah dalam metode geofisika adalah dengan memanfaatkan kecepatan gelombang geser menggunakan metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur perlapisan sub-permukaan tanah berdasarkan kecepatan gelombang geser Vs30 serta memperoleh informasi daya dukung tanah dari hasil identifikasi dan analisis data MASW di sekitar TPA Tamangapa Antang. Akuisisi data menggunakan metode MASW diperoleh pada tiap lintasan berturut-turut yakni L1, L2, L3 dan L4. Data yang awalnya dalam domain waktu kemudian ditransformasi ke domain frekuensi melalui transformasi Fourier, yang selanjutnya dianalisa menggunakan metode *phase shift* menjadi frekuensi-kecepatan fase sehingga akan menampilkan citra dispersi yang hubungan antara kecepatan fase dan frekuensi gelombang. Citra dispersi yang muncul selanjutnya akan diproses untuk menampilkan kurva dispersi eksperimental. Proses inversi ini dilakukan dengan menghubungkan nilai antara kurva dispersi teoritis dengan kurva dispersi eksperimental. Dari kurva tersebut diperoleh profil Vs terhadap kedalaman melalui proses inversi.

Kata Kunci: MASW, Kurva Dispersi, Gelombang Geser, Daya Dukung Tanah,

ABSTRACT

Soil is an inseparable part of building planning because it has various layers and characteristics that will affect its ability to support a load. The ability of the soil to support the maximum load on it is called the soil bearing capacity. One way to obtain soil-bearing capacity values in geophysical methods is to utilize the shear wave velocity using the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method. This study aims to determine the structure of the sub-surface layers of the soil based on the shear wave velocity V_{s30} and to obtain soil-bearing capacity information from the results of the identification and analysis of MASW data around the TPA Tamangapa Antang. Data acquisition using the MASW method was obtained at each successive path, namely L1, L2, L3, and L4. Data that was initially in the time domain is then transformed to the frequency domain through the Fourier transform, which is then analyzed using the phase shift method to become phase-frequency so that it will display a dispersion image which is the relationship between the phase velocity and wave frequency. The dispersion image that appears will then be processed to display the experimental dispersion curve. This inversion process is carried out by correlating the value between the theoretical and experimental dispersion curves. This curve obtains the V_s profile against depth through the inversion process.

Keywords: MASW, Dispersion Curve, Shear Wave, Soil Bearing Capacity

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaykum Wa Rahmatullahi Wa Barakaatuuuh,

Alhamdulillahirabbil'alamiin, puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran *Allah Subhanahu Wa Ta'ala*. Zat dengan segala Rahman dan Rahim-Nya yang membantu penulis menyelesaikan Skripsi dengan judul “**Analisis Daya Dukung Tanah Menggunakan Metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Tamangapa**”. Shalawat serta salam tidak luput penulis curahkan kepada *Rasulullah Muhammad Shallaahu 'Alaihi Wa Sallam*. Sebagai Rasul dan Nabi akhir zaman yang menjadi teladan bagi Umat dalam berakhlak, berusaha dan berdoa.

Dengan selesainya skripsi ini, penulis ingin memberikan penghargaan setinggi-tingginya kepada keluarga penulis yakni Ayahanda **Aris, ST** dan Ibunda **Syamsiar**, serta **Ayuni** selaku orang tua dan saudara kandung yang telah memberikan banyak dukungan dengan cinta dan kasih serta doa-doa tulus kepada penulis selama menjalani kehidupan perkuliahan di Universitas Hasanuddin.

Melalui skripsi ini pula penulis ingin mengucapkan terima kasih banyak kepada pihak-pihak yang yang senantiasa mendukung dan membantu penulis dalam hal apapun. Terima kasih kepada:

1. Kepada ayahanda **Dr. Ir. Muh Altin Massinai, MT, Surv** selaku pembimbing Utama yang senantiasa memberikan ilmu, bimbingan, nasihat dan motivasi yang luar biasa berarti bagi penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Kepada ayahanda **Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku pembimbing pertama yang selalu memberikan

ilmu, bimbingan dan motivasi yang diberikan kepada penulis. Terima kasih atas waktu, arahan dan segala jenis bantuan yang Bapak-bapak berikan selama penyelesaian penelitian ini, hingga berakhir dalam sebuah tulisan Skripsi Geofisika.

2. Kepada ayahanda **Ir. Bambang Harimei, M.Si** dan bapak **Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., MT** selaku tim penguji yang senantiasa memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih atas saran dan masukan yang sangat berarti bagi penulis sehingga pada akhirnya banyak membantu dalam proses lahirnya skripsi ini.
3. Kepada Ayahanda **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika sekaligus dosen penasehat akademik penulis yang telah memberikan banyak saran dan arahan hingga saat ini. Tak lupa pula kepada seluruh Bapak dan Ibu dosen Departement Geofisika yang telah mendedikasikan waktunya dalam mengajar dan membimbing penulis selama menjalani masa studi di Departemen Geofisika.
4. Kepada orang-orang baik yang sudah seperti saudara bagi penulis, **Ayu Andira, A. Nurqalbi Annisa, Nur Rahma,** dan **A. Nahdiyat Abdullah** yang tiada hentinya mendukung penulis secara mental dan materi.
5. Kepada **Ayu Andira** dan **Faradhiba A. Patuti** yang banyak mendukung penulis terutama selama proses pengolahan data. Skripsi ini selesai berhak bantuan materi dari kalian.

6. Kepada sahabat baik penulis, **Dinda, Dibet, Issah, Echa, Kiki, Rahma, Rahmi, Pio**, selaku tempat penulis untuk berbagi keluhan dan saling mendukung.
7. Kepada dawetku, selaku teman-teman baik penulis yang banyak sekali menghabiskan waktu selama kurang lebih empat tahun belakangan ini, **Evy, Fiskah, Juni, Kiki, Nilam, dan Sheren**, serta teman dawet **Dilla**, dan **Innah**.
8. Kepada tim lapangan, **Agung, Uci, Wawan, Sarwan, Fhaika, Jihan, Irma, Haidir, Ita**, dan lain-lain yang telah membantu penulis dalam proses pengambilan data lapangan
9. Teman-teman dari MABA sekaligus saudara yang selalu membantu untuk setiap masalah **Himafi 2018** atas kebersamaanya hingga saat ini. Tetaplah **SATU TEKAD TAKLUKKAN WAKTU**.
10. Teman-teman KKN 107 sektor Bontoala, Yusril, Abdi, Rafli, Ronal, Fayat, Yiz, Mas Bagus, Wahid, Uni, Roses, Ola, Dewi, Trixi, Fatim, Inda, Elvina, Uci, dan lain-lain yang telah saling mendukung hingga akhir masa bakti KKN.
11. Kepada kakak-kakak 2017 pengurus HMGF dan juga board SPE Unhas SC, terutama Kak Ale, Kak Khusnul, kak Dandung, dan Kak Titien, yang telah memberi ilmu dan bantuan selama menjalani kehidupan kampus dan organisasi.

12. Kepada teman-teman seperjuangan lab padat kloter Desember-Februari, terutama **Fhaika, Wilda, Andri, Muhaimin, Irma, Fya, Marni, Iis, Sepa, Iful**, dan lain-lain.
13. Kepada **Jihan Faruk Zubedi S.Si** dan **Nurul Fhaika S.Si** yang tiada hentinya memberikan dukungan dan ilmu kepada penulis hingga akhir pengerjaan skripsi ini.
14. Kepada teman-teman baru yang penulis kenal melalui burung gendut, **Rapit, Blup, Mba Petrik, Pio**, dan lain-lain yang telah memberikan pengalaman baru selama satu tahun belakangan ini.

Kepada seluruh pihak yang telah meluangkan banyak hal kepada penulis yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih. Skripsi ini tidak mungkin selesai jika tanpa ada campur tangan dari orang-orang baik seperti kalian. Semoga Allah merahmati kita dalam kebaikan-kebaikan ikhlas kita.

Penulis berharap, skripsi ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan. Mengingat keterbatasan penulis sebagai manusia biasa, kritik dan saran akan sangat membantu untuk mengembangkan kemampuan penulis dalam menyusun hasil penelitian di kemudian hari.

Wassalamu'alaykum Wa Rahmatullaahi Wa Barakaatuuh

Makassar, 23 Desember 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ixi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Ruang Lingkup	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Geologi Regional.....	4
2.2 Gelombang Seismik.....	10
2.3 Gelombang Rayleigh.....	14
2.4 Metode Seismik <i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i> (MASW)	15
2.5 Transformasi Fourier	17
2.6 Kurva Dispersi.....	20

2.7	Inversi.....	21
2.8	Kecepatan Gelombang Geser Vs30.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		27
3.1	Lokasi Penelitian	27
3.2	Alat dan Bahan	28
3.2.1	Alat.....	28
3.2.2	Bahan.....	28
3.3	Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1	Tahap Persiapan	29
3.3.2	Proses Akuisisi Data	29
3.3.3	Prosedur Pengolahan Data	29
3.4	Bagan Alir	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Hasil.....	33
4.1.1	Geometri Pengukuran Lapangan.....	33
4.2	Pengolahan Data.....	34
4.2.1	Memasukkan Data.....	34
4.2.2	Citra Dispersi	36
4.2.3	Kurva Dispersi	39
4.2.4	Kurva Dispersi Eksperimental	39
4.2.5	Kurva Dispersi Teoritis	41
4.2.6	Profil Kecepatan Gelombang Geser	41

4.3	Pembahasan	43
4.3.1	Profil Sub-Permukaan Tanah	43
4.3.2	Analisis Daya Dukung Tanah	45
BAB V PENUTUP.....		50
5.1	Kesimpulan.....	50
5.2	Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA		52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Geologi Lokasi Penelitian	5
Gambar 2.2 Jenis Gelombang Seismik	11
Gambar 2.3 Prinsip Huygens	12
Gambar 2.4 Asas Fermat.....	13
Gambar 2.5 Hukum Snellius.....	13
Gambar 2.6 Prinsip Pengukuran MASW (Mohammed dkk., 2020).....	16
Gambar 2.7 Kurva Dispersi (Olafsdottir dkk., 2018).....	20
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	27
Gambar 4.1 Geometri Pengukuran Lintasan 1	33
Gambar 4.2 Geometri Pengukuran Lintasan 2.....	33
Gambar 4.3 Geometri Pengukuran Lintasan 3	34
Gambar 4.4 Geometri Pengukuran Lintasan 4.....	34
Gambar 4.5 Lintasan Pertama (L1).....	34
Gambar 4.6 Lintasan Kedua (L2).....	35
Gambar 4.7 Lintasan Ketiga (L3)	35
Gambar 4.8 Lintasan Keempat (L4).....	35
Gambar 4.9 Citra Dispersi Lintasan 1.....	37
Gambar 4.10 Citra Dispersi Lintasan 2.....	37
Gambar 4.11 Citra Dispersi Lintasan 3.....	37
Gambar 4.12 Citra Dispersi Lintasan 4.....	38
Gambar 4.13 Kurva Eksperimental Lintasan 1	39
Gambar 4.14 Kurva Eksperimental Lintasan 2	40

Gambar 4.15 Kurva Eksperimental Lintasan 3	40
Gambar 4.16 Kurva Eksperimental Lintasan 4	40
Gambar 4.17 Profil Kecepatan Gelombang Geser Lintasan 1	42
Gambar 4.18 Profil Kecepatan Gelombang Geser Lintasan 2	42
Gambar 4.19 Profil Kecepatan Gelombang Geser Lintasan 3	42
Gambar 4.20 Profil Kecepatan Gelombang Geser Lintasan 4	43
Gambar 4.21 Profil Sub-bawah Permukaan Lintasan 1	43
Gambar 4.22 Profil Sub-bawah Permukaan Lintasan 2	44
Gambar 4.23 Profil Sub-bawah Permukaan Lintasan 3	44
Gambar 4.24 Profil Sub-bawah Permukaan Lintasan 4	44
Gambar 4.25 Nilai Dukung Izin pada Lintasan I	46
Gambar 4.26 Nilai Dukung Izin pada Lintasan 2	46
Gambar 4.27 Nilai Dukung Izin pada Lintasan 3	47
Gambar 4.28 Nilai Dukung Izin pada Lintasan 4	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas Aman Daya Dukung untuk Berbagai Jenis Material (UWE Bristol Environment, 2015).....	9
Tabel 2.2 Faktor Keamanan (Tezcan dk., 2009).....	10
Tabel 2. 3 Nilai V_p dan V_s Berbagai Material Dekat Permukaan (Foti dkk, 2014).	24
Tabel 2.4 Nilai V_s Berdasarkan Klasifikasi Situs (SNI 1726:2012, 2003).....	25

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah adalah bagian kerak bumi yang terdiri atas berbagai jenis mineral, bahan organik, serta endapan yang relatif lepas (*loose*). Tanah merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dalam perencanaan bangunan teknik sipil karena memiliki lapisan dan karakteristik yang beragam sehingga akan mempengaruhi kemampuannya dalam menopang suatu beban. Kemampuan tanah untuk menopang beban maksimum di atasnya disebut daya dukung tanah. Dalam perhitungan daya dukung tanah, salah satu parameter yang paling berpengaruh adalah kecepatan gelombang geser karena nilai tersebut dapat mengetahui karakteristik lapisan tanah (Muhtar, 2016).

Penelitian untuk mengetahui nilai daya dukung tanah ini dilaksanakan di sekitar Tempat Pembuangan Akhir Tamangapa. Dalam (Farida, 2013) TPA Tamangapa adalah tempat pembuangan sampah utama bagi penduduk kota Makassar yang menghasilkan sampah sekitar 4.494,86 m³/tahun. TPA Tamangapa masih menerapkan metode *open dumping* yakni hanya menghamparkan sampah begitu saja lalu dibiarkan dalam kondisi terbuka. Seiring perkembangan pembangunan dan perluasan wilayah kota, penumpukan sampah di TPA semakin mencapai kapasitasnya sehingga tidak cocok untuk penimbunan yang lebih lanjut karena akan memberikan efek buruk terhadap lingkungan di sekitarnya (Suto, 2013).

Perhitungan nilai daya dukung tanah di sekitar TPA Tamangapa dilatarbelakangi oleh adanya rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah serta beberapa hunian di lokasi tertentu. Karena pembangunan di sekitar TPA masih terus berjalan hingga saat ini, PLTSa dianggap menjadi solusi dari permasalahan lingkungan akibat penumpukan sampah dengan metode *open dumping*. PLTSa merupakan suatu pembangkit listrik yang bekerja dengan memanfaatkan gas *landfill* sebagai bahan bakar utama. Gas *landfill* tersebut berasal dari sampah organik yang mengalami penguraian secara alami dengan proses anaerobik. Gas *landfill* yang mengandung berbagai jenis senyawa seperti karbon dioksida dan gas metana nantinya akan dimanfaatkan sebagai bahan bakar generator yang kemudian akan menghasilkan listrik (Huda dkk, 2019).

Dalam mengidentifikasi daya dukung tanah, metode geofisika yang paling cocok digunakan adalah *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW). MASW merupakan salah satu metode analisis yang dikembangkan dari teknik seismik dan memanfaatkan penggunaan multi sensor dalam pengukuran gelombang permukaan. Metode MASW dapat merekam perambatan gelombang Rayleigh dalam menginvestigasi karakteristik mekanis lapisan bawah permukaan serta tingkat kepadatan batuan (Rosyidi, 2015).

Pengukuran dengan menggunakan metode MASW ini akan menghasilkan parameter berupa kecepatan gelombang geser (V_s). Perambatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{s30}) digunakan untuk menentukan karakteristik jenis sub-bawah permukaan untuk mengetahui nilai daya dukung tanahnya.

1.2 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini dibatasi oleh analisis data MASW untuk memperoleh daya dukung dan struktur perlapisan pada sub-permukaan tanah berdasarkan hasil perhitungan V_{s30} . Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data gelombang permukaan hasil pengukuran langsung di sekitar TPA Tamangapa Antang yang diproses sehingga akan menghasilkan profil 1D perlapisan tanah.

1.3 Rumusan Masalah

- 1.) Bagaimana menentukan struktur sub-permukaan melalui analisis kecepatan gelombang geser V_{s30} menggunakan metode MASW?
- 2.) Bagaimana penerapan metode MASW dalam menentukan daya dukung tanah sebagai tahap persiapan pembangunan di sekitar TPA Tamangapa?

1.4 Tujuan Penelitian

- 1.) Mengetahui struktur perlapisan sub-permukaan tanah berdasarkan kecepatan gelombang geser V_{s30} menggunakan metode MASW.
- 2.) Memperoleh informasi daya dukung tanah dari hasil identifikasi dan analisis data MASW di sekitar TPA Tamangapa Antang.

BAB II

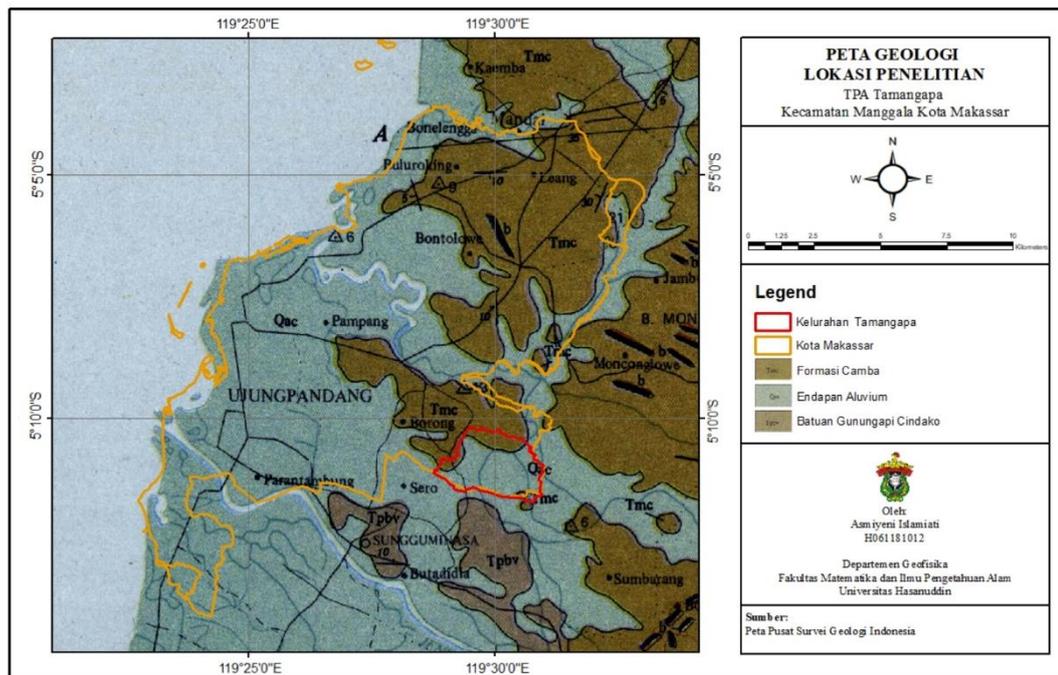
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Daerah penelitian berada di sekitar Tempat Pembuangan Akhir Sampah Tamangapa Antang, Kecamatan Manggala, Kota Makassar. Seluruh wilayah tersebut masuk dalam peta geologi regional lembaran Ujungpandang, Benteng dan Sinjai yang dapat dilihat berdasarkan kondisi geomorfologi dan stratigrafi. Secara geologi regional, wilayah sekitar penelitian didominasi oleh Formasi Camba, dan endapan *alluvial*. Sementara morfologi Sulawesi Selatan bagian timur seperti daerah Sinjai dan Bantaeng diduga merupakan ekspresi keterjalan dari zona pemekaran dasar laut teluk Bone. Dugaan ini merupakan kelanjutan dari morfologi daerah lembah Palu dan dapat melebar hingga ke pulau Selayar yang mencapai jarak sekitar 750 km. keterjalan dasar teluk bone berhubungan dengan kemiringan regional sepanjang garis median yang disebabkan pertumbukan Mandala Timur terhadap Mandala Barat Sulawesi (Massinai dkk, 2022).

Batuan gunungapi Formasi Camba yang terdiri dari batuan breksi, lava, konglomerat, dan tufa mendominasi lapisan batuan dasar (*bedrock*) di Kota Makassar. Di sebelah utara lembar terdapat dua daerah yang berciri topografi karst, yakni dibentuk oleh batugamping Formasi Tonasa dan dipisahkan oleh pegunungan yang tersusun atas batuan gunungapi berumur Miosen sampai Pliosen (Sukanto & Supriatna, 1982).

Berdasarkan peta geologi regional di bawah, daerah sekitar lokasi penelitian tersebar dan tersusun atas batuan yang berasal dari formasi Camba (Tmc). Formasi Camba terdiri atas batuan sedimen laut yang berselingan dengan batuan gunungapi. Batuan gunungapi Cindako (Tpbv) terdiri atas breksi, lava, konglomerat, dan tufa berbutir halus. Selain itu, Kota Makassar secara umum disusun oleh endapan alluvial (Qac) yang tersebar luas mulai di sekitar dataran, sungai, hingga pantai yang meliputi kerikil, pasir, lempung, lumpur, serta batugamping koral. Bagian timur dari lembar ini terdapat bukit-bukit terisolir yang tersusun atas batuan klastika gunungapi berumur Miosen dan Pliosen (Sukanto & Supriatna, 1982)



Gambar 2. 1 Peta Geologi Lokasi Penelitian

Bentuk morfologi yang menonjol di lembar ini adalah adanya kenampakan kerucut gunungapi Lompobatang dan Gunung Bawakaraeng yang menjulang dan

mencapai ketinggian 2876 m dan 2833 mdpl. Kenampakan kerucut gunungapi ini masih memperlihatkan bentuk aslinya dari kejauhan serta menempati sepertiga daerah yang ada di lembar lembaran Ujungpandang, Benteng dan Sinjai. Kerucut gunungapi Lompobarang ini tersusun oleh batuan gunungapi berumur Plistosen. dua buah kerucut yang tererosi ini disusun oleh batuan berumur Pliosen. Di bagian utara terdapat dua daerah yang bercirikan topografi karst yang dibentuk oleh batugamping formasi Tonasa (Massinai dkk, 2022).

Secara stratigrafi, batuan yang tersingkap di daerah Sulawesi Selatan terdiri atas Satuan Batuan Gunungapi Formasi Camba yang berumur Miosen Tengah-Miosen Akhir terdiri dari breksi gunungapi, lava, konglomerat, dan tufa halus hingga batuan lapili. Batuan gunungapi berumur Pliosen terjadi setempat dan menyusun batuan gunungapi Baturape-Cindako. Endapan Aluvial Sungai merupakan endapan permukaan hasil rombakan dari batuan yang lebih tua dan terdiri dari material kerikil, pasir, lempung yang atumannya tersebar di tepi-tepi sungai dan dasar sungai. Satuan ini berumur Holosen–Resen (Sukanto & Supriatna, 1982).

2.1 Tempat Pembuangan Akhir (TPA)

Peningkatan pertumbuhan industri dan kebutuhan hidup tiap orang khususnya yang bermukim di daerah perkotaan memberikan dampak pada produksi limbah sehingga timbunan sampah kota terus meningkat baik perkapita maupun keseluruhan. TPA menjadi media terakhir untuk mengembalikan sampah ke lingkungan agar tidak berserakan di lalu lintas kehidupan perkotaan. TPA digunakan sebagai media untuk menyimpan dan memusnahkan sampah dengan

cara tertentu sehingga dampak negatif yang ditimbulkan kepada lingkungan dapat berkurang (Renou et al., 2008)

TPA Tamangapa yang berlokasi di Kota Makassar saat ini masih menggunakan metode *open dumping* dan sebagian *control landfill* dalam mengelola sampahnya. Sayangnya, efek yang ditimbulkan dari metode *open dumping* adalah rembesan lindi yang mencemari saluran air di bawah permukaan tanah. Lindi merupakan limbah cair yang mengandung sejumlah senyawa organik seperti hidrokarbon, tanat dan galat, serta senyawa anorganik natrium, nitrogen dan beberapa senyawa logam berat tinggi sehingga dapat mencemari air tanah dan akan berdampak terhadap masyarakat (Renou et al., 2008).

Namun, adanya ancaman kesehatan tidak menurunkan niat masyarakat sekitar untuk tetap membangun hunian di sekitar TPA Tamangapa. Karena pembangunan di sekitar TPA masih terus berjalan hingga saat ini, maka telah direncanakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah. PLTSa merupakan upaya yang telah direncanakan oleh pemerintah diberbagai kota di Indonesia, salah satunya di kota Makassar. PLTSa akan memanfaatkan gas methana hasil pembakaran sampah yang diproses sehingga akan disalurkan menjadi listrik. Karena adanya rencana pembangunan tersebut, maka perlu diketahui besar kekuatan tanah untuk menahan beban bangunan yang ada di atasnya.

2.2 Daya Dukung Tanah

Menurut Surendro (2014), tanah merupakan bagian teratas dan menduduki sebagian besar daratan di bumi serta memiliki lapisan yang bervariasi dicirikan

dengan adanya perbedaan warna serta tekstur yang bermacam-macam. Tanah terdiri atas suatu material endapan dengan butiran yang bersifat lepas-lepas (*loose*) serta memiliki jenis yang disebut *kohesive* dan *non kohesive*. Tanah berasal dari serangkaian proses pelapukan batuan yang dapat terjadi secara fisik maupun kimia (Suroso & Tjitradi, 2020).

Dalam proses perancangan suatu bangunan, tanah menjadi salah satu aspek penting karena posisinya yang berada di bawah pondasi bangunan. Tanah harus memiliki kemampuan untuk menahan tekanan atau beban bangunan dengan aman tanpa menimbulkan keruntuhan geser atau penurunan yang berlebihan, hal tersebut dikenal dengan istilah daya dukung tanah. Dalam bidang geofisika, pengujian daya dukung tanah dapat dilaksanakan dengan pengukuran langsung di lapangan menggunakan metode MASW. Pengujian dengan metode ini dapat dilakukan dengan cepat lebih dari satu tempat dalam sehari. Oleh karena itu metode ini akan sangat membantu untuk menentukan karakteristik tanah yang heterogen (Dutta, 2018).

Kapasitas nilai daya dukung tanah didasarkan pada karakteristik tanah dasar yang mempertimbangkan nilai penurunan dan stabilitas termasuk faktor aman terhadap keruntuhan. Untuk itu, berdasarkan *British Standard Code Of Practice CP 2004* dalam (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013) terdapat nilai perkiraan daya dukung izin untuk berbagai jenis material yang aman terhadap keruntuhan.

Tabel 2.1 Batas Aman Daya Dukung untuk Berbagai Jenis Material (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Jenis Material	qa (kN/m ²)
Batu sangat keras	10000
Batu kapur/batupasir keras	4000
Kerikil padat sedang, atau pasir dan kerikil dengan kepadatan sedang (<i>Medium dense gravel, or medium dense sand and gravel</i>)	200-600
Pasir kompak (<i>Compact sand</i>)	>300
Pasir padat sedang (<i>Medium dense sand</i>)	100-300
pasir lepas (<i>Loose sand</i>)	<100
Tanah liat kaku (<i>Stiff clays</i>)	150-300
Tanah liat kokoh (<i>Firm clay</i>)	75-150
Tanah liat dan lanau lunak (<i>Soft clays and silts</i>)	1-75

Nilai daya dukung diperoleh dari hasil kali antara unit berat dan kedalaman. Setelah mendapatkan nilai q_u , selanjutnya dilakukan perhitungan nilai daya dukung izin yang merupakan nilai beban per satuan luas yang diizinkan untuk membebani tanah agar terhindar dari keruntuhan atau kegagalan bangunan. Daya dukung ultimit (q_u) didapatkan melalui persamaan (Tezcan et al., 2012):

$$q_u = \gamma H \quad 2.1$$

$$\gamma = 4.3 V_s^{0.25} \quad 2.2$$

$$q_a = \frac{q_u}{n} = \frac{\gamma H}{n} \quad 2.3$$

Dengan:

$$\gamma = \text{unit berat (kN/m}^3\text{)}$$

$$V_s = \text{kecepatan gelombang geser (m/s)}$$

q_u = Daya dukung batas (kN/m^2)

q_a = daya dukung izin tanah (kN/m^2)

H = Ketebalan (m)

Daya dukung tanah ditentukan dan dibatasi oleh faktor keamanan terhadap potensi keruntuhan tanah serta faktor aman terhadap penurunan akibat konsolidasi tanah sehingga penurunan total tidak terlalu besar. Faktor keamanan dalam menentukan daya dukung tanah berdasarkan nilai kecepatan gelombang gesernya dapat dilihat pada tabel berikut:

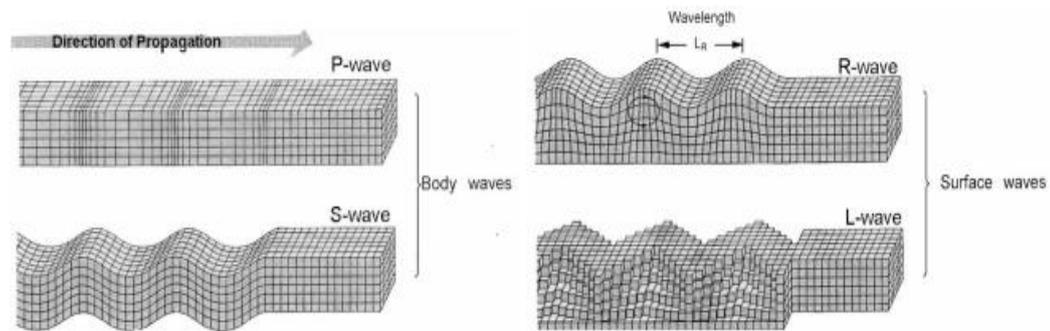
Tabel 2.2 Faktor Keamanan (Tezcan et al., 2009)

Tipe Tanah	V_s (m/s)	Faktor Keamanan (n)
Hard rocks (Batuan Keras)	$V_s \geq 4000$	1.4
Soft rocks (batuan lunak)	$750 \leq V_s \leq 4000$	$4.6-8.10^{-4}V_s$
Soil (Tanah)	$750 \geq V_s$	4.0

2.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan getaran yang merambat melalui interior bumi atau disepanjang permukaannya. Karakteristik perambatan gelombang seismik diperlukan untuk menganalisa permasalahan dinamika tanah dalam proses konstruksi. Sebagian besar masalah tersebut berkaitan dengan getaran buatan karena aktivitas manusia, seperti lalu lintas kendaraan, peledakan, konstruksi, dan sebagainya. Namun, intensitas getaran tersebut tetap lebih rendah daripada getaran alami oleh bumi. Gelombang seismik yang dihasilkan oleh aktivitas manusia merambat di lapisan tanah superfisial dalam beberapa puluh meter dari permukaan

tanah lalu merambat menjauhi sumbernya. Hal tersebut memberikan efek yang terbatas pada jarak horizontal di beberapa ratus meter karena energinya perlahan akan menghilang seiring pertambahan jarak dari sumbernya. Adapun jenis utama gelombang seismik yang dapat dirambatkan ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Athanasopoulos et al., 2000).



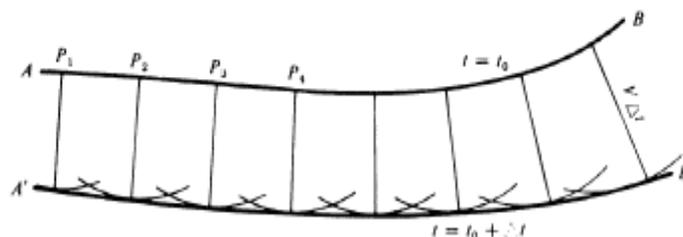
Gambar 2. 2 Jenis Gelombang Seismik

Gelombang Body dapat merambat di dalam atau di sepanjang permukaan tanah dan dapat berupa gelombang kompresional (gelombang P) yang merambat dengan kecepatan V_p , atau distorsional (gelombang S). Sementara gelombang permukaan hanya dapat merambat di sekitar permukaan tanah dan dapat berupa gelombang Love atau gelombang Rayleigh. Gelombang Love adalah gelombang geser terpolarisasi horizontal dan muncul ketika ada lapisan kecepatan rendah di atas permukaan lapisan kecepatan tinggi. Sementara gelombang Rayleigh merupakan gelombang yang merambat sepanjang lapisan permukaan dengan ketebalan yang sama dengan satu panjang gelombangnya (Athanasopoulos et al., 2000). Terdapat tiga hukum dasar dalam teori gelombang yang digunakan untuk menjelaskan teori gelombang seismik, yakni Prinsip Huygens, Hukum Snellius, dan Asas Fermat.

1. Prinsip Huygens

Prinsip Huygens menyatakan bahwa setiap satu partikel gelombang dapat dianggap sebagai sumber atas deretan partikel gelombang yang baru. Energi total gelombang baru berjumlah sama dengan partikel utama yang telah dihasilkan sebelumnya. Dalam kegiatan eksplorasi seismik di lapangan, partikel gelombang tersebut dapat bersumber dari patahan struktur bawah permukaan bumi, antiklin, rekahan, pembajian, dan lain-lain. Sedangkan deretan gelombang baru merupakan gelombang-gelombang yang terdifraksi (Foti et al., 2014).

Pada gambar di bawah, AB adalah gelombang pada waktu t_0 dan akan diketahui gelombang di waktu $(t_0 + \Delta t)$. Pada selang Δt , gelombang akan maju sejauh $V\Delta t$ dimana V adalah kecepatan yang dapat bervariasi dari satu titik ke titik lainnya. Sementara itu titik pada muka gelombang P_1, P_2, P_3 , dan seterusnya didasarkan pada $V\Delta t$. Gambar dibawah ini menunjukkan prinsip Huygens yang telah dijelaskan (Telford & Geldart, 1990).

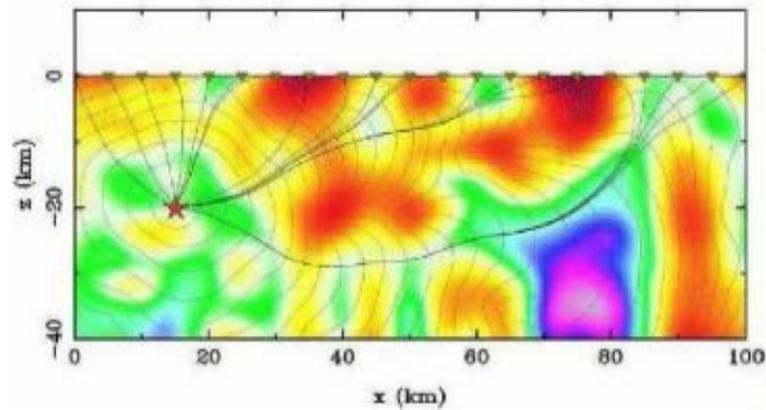


Gambar 2. 3 Prinsip Huygens

2. Asas Fermat

Asas Fermat yang lebih lengkap dan lebih umum dikemukakan pertama kali oleh matematikawan Prancis Pierre de Fermat pada abad ke-17 yang menyatakan bahwa “Lintasan yang dilalui oleh cahaya untuk merambat dari satu titik ke titik lain adalah sedemikian rupa sehingga waktu perjalanannya tidak berubah

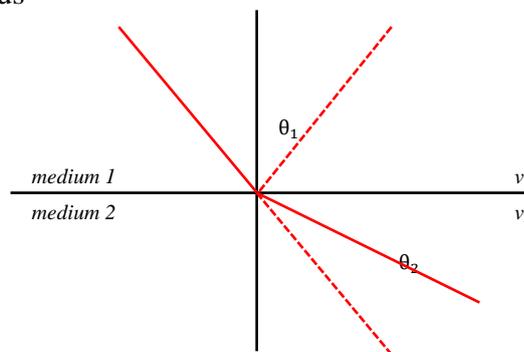
sehubungan dengan variasi-variasi yang ada dalam lintasan tersebut". Artinya, jika gelombang merambat dari suatu titik ke titik yang lain, maka gelombang tersebut akan memilih jejak yang tercepat (Linda dkk., 2019).



Gambar 2. 4 Asas Fermat

Gambar di atas memperlihatkan sumber gelombang yang ditunjukkan dengan simbol bintang menghasilkan gelombang yang menjalar ke segala arah. Jika gelombang tersebut melewati medium dengan variasi kecepatan gelombang seismik, maka gelombang-gelombang tersebut akan cenderung melalui zona dengan kecepatan tinggi dan menghindari zona dengan kecepatan yang rendah.

3. Hukum Snellius



Gambar 2. 5 Hukum Snellius

Hukum Snellius yang menyatakan apabila sinar datang dari medium 1 ke medium 2, maka pada bidang batas lapisan sinar tersebut sebagian akan direfleksikan (dipantulkan), sebagian akan ditransmisikan (diteruskan), dan sebagian akan direfraksikan. Sinar yang dipantulkan berada dalam bidang sinar datang dan garis normal antarmuka. Sementara ketika sebuah sinar melewati antarmuka dua lapisan isotropik dengan V_1 dan V_2 , sinar itu dibiaskan sehingga sinar bias berada pada bidang sinar datang dan garis normal pada antarmuka. Hubungan antara besar sudut dan kecepatan gelombang tersebut dilihat pada (Meunier, 2011):

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_{21}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad 2.4$$

Dengan:

θ_i = sudut datang

θ_r = sudut bias

v_1 = kecepatan gelombang datang

v_2 = kecepatan gelombang bias

n_1 = indeks bias medium 1

n_2 = indeks bias medium 2

2.3 Gelombang Rayleigh

Dalam eksplorasi seismologi, jenis gelombang permukaan yang sering digunakan adalah gelombang Rayleigh. Gelombang ini merambat di sepanjang permukaan bumi dan melibatkan kombinasi gerak longitudinal dan transversal dengan hubungan fase tertentu satu sama lain. Amplitudo gerakan gelombang Rayleigh ini akan berkurang secara eksponensial dengan penambahan kedalaman, serta

memiliki gerak partikel yang terbatas pada bidang vertikal yang meliputi arah rambat gelombang (Telford & Geldart, 1990).

Gelombang Rayleigh memiliki intensitas gerakan tanah yang kuat di dekat permukaan, oleh karena itu struktur bawah tanah dengan kedalaman dangkal akan tergambar dengan baik oleh gelombang Rayleigh dibandingkan dengan struktur bawah tanah yang lebih dalam (Chaumont-olive et al., 2009). Kecepatan gelombang Rayleigh bergantung pada konstanta elastis di dekat permukaan dan selalu lebih kecil dari kecepatan gelombang S. Gelombang Rayleigh akan lebih mudah diamati menggunakan peralatan seismik dengan geophone vertikal, karena sifat ground roll gelombang Rayleigh (Telford & Geldart, 1990).

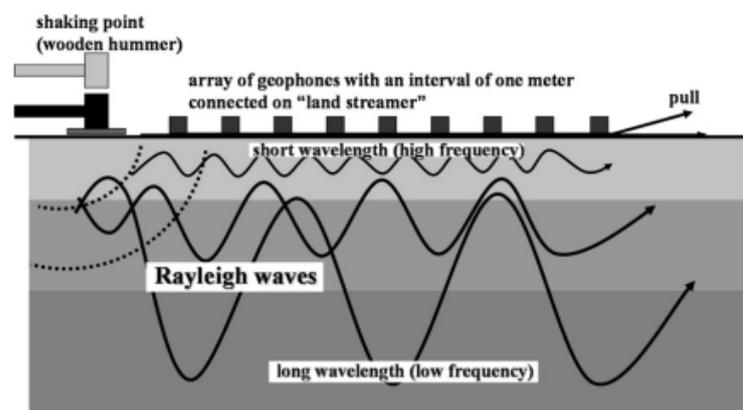
Pada analisa sekitar permukaan, gelombang Rayleigh menjadi jenis gelombang yang dominan karena memiliki tingkat redaman yang lebih rendah dan persentase energi getaran tinggi yakni sekitar 70% dari total energi di sekitar permukaan tanah. Gelombang Rayleigh bersifat dispersif sehingga kurva dispersi dapat menggambarkan hubungan antar kecepatan gelombang permukaan disetiap mode getarannya (Athanasopoulos et al., 2000).

2.4 Metode Seismik *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW)

Metode MASW merupakan salah satu metode seismik yang memiliki ketepatan dan resolusi tinggi pada struktur dekat permukaan secara efektif, efisien dan mudah dalam pengolahannya dengan menganalisis gelombang Rayleigh pada rekaman sinyal seismik. Berdasarkan sumber seismiknya, metode MASW dibagi menjadi dua yaitu MASW aktif dan MASW pasif (Syamsuddin & Assegaf, 2021).

MASW aktif menggunakan sumber luar seperti palu atau dinamit untuk membangkitkan gelombang seismik yang kemudian direkam oleh geofon. Sedangkan pada MASW pasif menggunakan respon dari alam seperti pasang surut air laut dan lalu lintas kendaraan. Diantara kedua metode tersebut, MASW aktif merupakan metode yang paling sering digunakan. MASW mampu memberikan informasi tentang kecepatan gelombang geser (V_s) untuk dapat mengategorikan jenis batuan bawah permukaan (Indanartha dkk., 2018).

Metode ini menggunakan teknik perekaman dan pemrosesan *multichannel* yang memiliki persamaan dan perbedaan dengan yang digunakan dalam survei refleksi konvensional (Park et al., 1999). Teknik MASW dirancang untuk menampilkan rekayasa karakterisasi lokasi untuk mengukur penampang kecepatan gelombang S dan menghasilkan profil 1D dan 2D. V_s memberikan hasil yang dapat membantu kinerja gerakan tanah, potensi likuifaksi dan frekuensi alami akibat gempa. Jadi informasi yang didapatkan sangat penting untuk informasi kekakuan tanah melalui parameter dasar terhadap reaksi guncangan (Mohammed et al., 2020).



Gambar 2.6 Prinsip Pengukuran MASW (Mohammed dkk., 2020)

Pada gambar di atas terlihat proses pengukuran dengan metode MASW dimana palu yang dipukulkan ke sebuah pelat akan memberikan getaran ke permukaan tanah dan akan memicu gelombang Rayleigh. Gelombang permukaan yang muncul kemudian akan merambat dan mengikuti karakteristik gelombangnya. Struktur kecepatan gelombang geser dapat diperkirakan dengan analisis kecepatan rambat yang sesuai dengan frekuensi (Watabe & Sassa, 2008). Pada proses akuisisi data, biasanya digunakan geofon yang disusun memanjang dengan frekuensi 4.5 Hz (Indanartha dkk., 2018).

Struktur kecepatan gelombang geser dapat diperkirakan dengan analisis dari berbagai kecepatan rambat yang sesuai dengan frekuensi. Perekam yang digunakan bisa sejumlah 12 atau 24 dengan jarak antar perekam yang sama. MASW dapat dilakukan dalam 3 tahap yaitu akuisisi, ekstraksi kurva dispersi, hingga inversi kurva disperse yang nantinya akan menampilkan profil kecepatan gelombang geser (V_s) 1D (Indanartha dkk., 2018).

2.5 Transformasi Fourier

Transformasi fourier merupakan suatu metode yang sangat efisien untuk keperluan analisa sinyal seperti pemfilteran, analisa korelasi, dan analisa spektrum. Pada metode geofisika, transformasi fourier berkaitan erat dengan frekuensi, sehingga frekuensi menjadi parameter penting dalam menjelaskan suatu kejadian dalam data pengamatan. Sementara itu, *Fast Fourier Transformation* (FFT) dilakukan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Proses ini bertujuan agar sinyal dapat diproses dalam spektral substraksi (Rayana & Andriani, 2019).

Analisa dalam domain frekuensi banyak digunakan pada tahap filtering dengan memanfaatkan Transformasi Fourier sehingga suatu sinyal dapat dilihat dalam domain frekuensi. Data rekaman *multi-channel* awalnya berdomain jarak-waktu kemudian akan ditransformasikan menjadi domain jarak-frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) menggunakan persamaan:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad 2.5$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) \cdot e^{-i2\pi ft} d\omega \quad 2.6$$

Dengan $F(\omega)$ disebut sebagai transformasi fourier dari $f(t)$. Transformasi ini dapat dihitung lebih cepat menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) pada komputasi digital (Tanjung dkk., 2019). Persamaan (2.5) *Forward Fourier Transform* yang mentransformasikan sinyal domain waktu ke domain frekuensi. Sedangkan persamaan (2.6) disebut *Inverse Fourier Transform* yang mentransformasikan sinyal domain frekuensi ke domain waktu.

Data seismik yang telah direkam oleh geofon atau biasa disebut data rekaman *multichannel* selanjutnya akan dibuat citra dispersi. Citra dispersi memperlihatkan amplitudo dari sinyal gelombang yang terekam dan dibentuk dari data rekaman *multi-channel*. Hal ini dilakukan dengan menggunakan FFT dan metode yang telah dikembangkan oleh (Park et al., 1999) yaitu metode pergeseran fase. Metode pergeseran fasa merupakan metode yang kuat dan efektif secara komputasi dengan hasil yang akurat. Dalam penelitian ini rekaman gelombang permukaan yang diperoleh kemudian dianalisis dengan metode pergeseran fasa (Olafsdottir et al., 2018).

Gelombang yang terekam di dua geofon kemudian dianalisis pada kecepatan fase C_f berdasarkan beda waktu tempuh Δt_f untuk frekuensi yang berbeda, dapat dilihat pada persamaan:

$$C_f = \frac{dx}{\Delta t_f} \quad 2.7$$

Beda fase diperoleh dari hasil perhitungan Transformasi Fourier antara dua gelombang dimana $f(t)$ dan $g(t)$. Hasil transformasi dinyatakan dalam bentuk amplitudo dan fase, maka diperoleh:

$$F(\omega) = A_f(\omega)e^{-i\phi_f(\omega)} \quad 2.8$$

$$G(\omega) = A_g(\omega)e^{-i\phi_g(\omega)} \quad 2.9$$

Beda fasa antara keduanya dapat dituliskan:

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_f(\omega) - \phi_g(\omega) \quad 2.10$$

Sehingga diperoleh kecepatan fase:

$$C(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\Delta\phi_f(\omega)} \quad 2.11$$

$$C(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\Delta\phi_f(\omega) + 2n\pi} \quad 2.12$$

Untuk memperoleh citra dispersi, dilakukan stack dengan metode phase-shift.

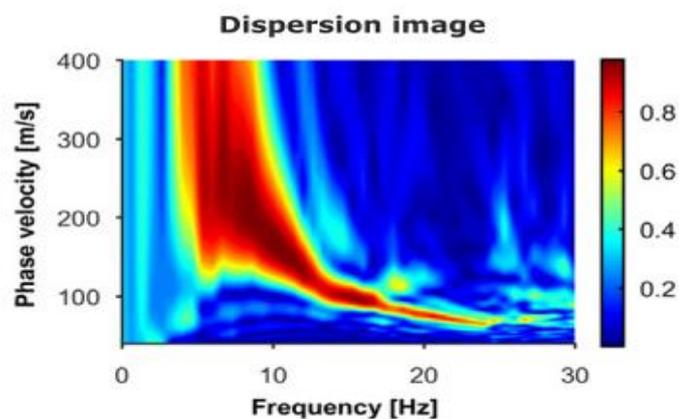
$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (x, \omega) \cdot e^{\frac{i\omega x}{c}} dx \quad 2.13$$

Dari persamaan (2.13), didapatkan citra dispersi yang menunjukkan perubahan kecepatan fase (C) terhadap frekuensi (ω) seperti yang ditampilkan pada gambar 2.7.

2.6 Kurva Dispersi

Pembuatan kurva dispersi merupakan salah satu langkah paling kritis yang dilakukan untuk dapat menghasilkan profil kecepatan gelombang geser. Kurva dispersi adalah plot dari kumpulan data yang terdiri dari frekuensi dan kecepatan fase. Oleh karena itu, kurva dispersi eksperimental yang tidak akurat dapat menyebabkan kesalahan parah pada profil kecepatan gelombang geser yang dihitung kembali. Profil V_s ditentukan berdasarkan kurva dispersi, sehingga penentuan kurva dispersi yang akurat merupakan bagian terpenting dan hasilnya akan sangat berpengaruh pada keakuratan profil V_s (Park et al., 1999).

Dari citra kurva dispersi, jenis-jenis gelombang dapat teridentifikasi dengan lebih jelas sehingga penentuan mode dasar untuk membentuk kurva dispersi dapat dilakukan dengan lebih akurat. Tujuan dari analisis dispersi adalah untuk mengidentifikasi kurva dispersi eksperimental berdasarkan rekaman gelombang permukaan *multichannel* yang diperoleh. Jika kurva dispersi diperoleh dengan akurat, maka tingkat ketelitian profil kecepatan gelombang geser dari hasil inversi juga akan lebih tepat (Olafsdottir et al., 2018).



Gambar 2.7 Kurva Dispersi (Olafsdottir dkk., 2018)

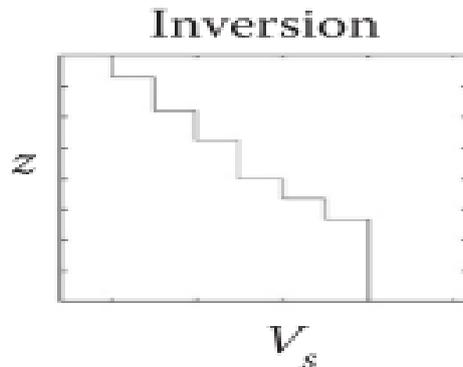
Dalam tampilan dispersi terdapat mode fundamental gelombang Rayleigh yang rentang panjang gelombangnya membatasi kedalaman penyelidikan survei. Semakin panjang gelombang maksimum yang diperoleh, maka semakin dalam penyelidikan maksimum. Sementara, semakin pendek suatu gelombang minimum yang direkam maka semakin baik resolusi survei pada kedalaman dangkal. Kurva dispersi tunggal dapat mencakup rentang panjang gelombang yang berbeda, sementara gabungan kurva dispersi dapat mencakup rentang panjang gelombang yang lebih luas karena adanya peningkatan kedalaman (Olafsdottir et al., 2018).

Kurva dispersi hasil pengukuran akan dibandingkan dan dicocokkan dengan kurva hasil perhitungan dari model lapisan yang telah ditentukan di awal proses. Pada tahapan ini akan dilakukan proses iterasi dengan menerapkan metode *least square* sehingga akhirnya diperoleh satu profil lapisan material perkiraan yang akan mendekati keadaan yang sebenarnya (Rosyidi, 2015).

2.7 Inversi

Pada proses penerapan metode inversi, hanya nilai v_s yang akan diperbarui disetiap iterasi, sementara *poisson ratio*, densitas, dan ketebalan model tetap tidak berubah selama inversi (Park et al., 1999). Proses inversi ini dimulai dengan melakukan perkiraan terhadap beberapa parameter model profil awal. Kurva dispersi dari kecepatan fase dibangun berdasarkan model profil awal yang lalu akan dilakukan perbandingan terhadap kurva eksperimen. Model profil kemudian diinversi agar memperlihatkan jarak antara kurva dispersi eksperimental dan teoritis yang sedekat mungkin dengan data (Foti et al., 2014).

Proses inversi dilakukan dengan dasar iterasi yang akan merubah nilai kecepatan gelombang geser namun tetap mempertahankan nilai ketebalan serta kedalaman. (Muhtar, 2016). Proses inversi akan menghasilkan profil perlapisan tanah berdasarkan nilai V_s terhadap kedalaman, seperti pada gambar di bawah.



Gambar 2. 8 Profil nilai V_s terhadap kedalaman (Park, Miller, & Xia, 1999)

Proses iterasi pada tahapan inversi bertujuan untuk memperoleh nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) minimum. Nilai RMSE merupakan nilai yang menunjukkan presentase kesalahan dari hasil yang diperoleh. Nilai ini berasal dari pencocokan nilai untuk data yang didapatkan dari pengukuran langsung di lapangan dengan data perhitungan teoritis. Semakin kecil nilai RMSE maka semakin mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Proses inversi kurva dispersi dapat mengurangi kesalahan relatif 3.6% dibanding hanya menggunakan data lubang bor. Pencitraan dan kualitas tampilan pada kurva dispersi fundamental juga dipengaruhi oleh parameter akuisisi data lapangan seperti panjang sebaran geofon dan *offset* saat melakukan pengukuran (Ivanov et al., 2011).

2.8 Kecepatan Gelombang Geser V_{s30}

Gelombang geser merupakan gelombang S yang berarti sekunder atau shear. Gelombang sekunder memiliki kecepatan yang lebih rendah jika dibandingkan

dengan gelombang P (primer atau pressure). Dalam medium yang padat, gelombang geser menjalar dengan kecepatan antara 3-4 km/detik. Ketika menjalar di bawah permukaan gelombang geser dapat memberikan regangan geser pada material yang dilaluinya (Rasimeng dkk., 2017)

Gelombang seismik permukaan menghasilkan parameter kecepatan gelombang geser (V_s). Kecepatan gelombang geser adalah parameter yang digunakan untuk menentukan karakteristik tanah melalui perilaku dan daya dukung dinamik dalam kondisi elastik. Nilai V_{s30} merupakan teknik untuk mengkategorikan tanah, dan memastikan ketahanan atau kerusakan yang mungkin dialami oleh struktur yang diletakkan di atasnya jika terjadi gempa bumi (Chiemeke, 2021).

Nilai kecepatan gelombang geser V_{s30} juga digunakan dalam menentukan standar bangunan tahan gempa lalu dapat disalurkan melalui rancangan pondasi. Selain itu nilai ini juga dapat digunakan dalam penentuan klasifikasi batuan berdasarkan kekuatan getaran dari gempabumi akibat efek lokal. Digunakan parameter V_{s30} karena lapisan-lapisan batuan yang berada hingga kedalaman 30 meter saja yang paling berpengaruh untuk menentukan pembesaran gelombang gempa dalam geoteknik (Rasimeng dkk., 2017)

Rata-rata V_{s30} dikaitkan dengan waktu tempuh gelombang dari permukaan tanah hingga kedalaman paling atas yaitu 30 m. V_{s30} dalam geoteknik digunakan untuk mengklasifikasikan jenis lapisan yang ada di bawah permukaan berdasarkan penjalaran gelombangnya. Adapun nilai V_{s30} dapat ditentukan dengan persamaan (Mohammed et al., 2020).

$$V_{S_{30}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m \frac{t_i}{V_{S_i}}} \quad 2.14$$

Dimana:

i = indeks perlapisan

m = jumlah lapisan hingga kedalaman 30 m

t_i = ketebalan lapisan ke- i (m)

V_{S_i} = kecepatan gelombang lapisan ke- i (m/s)

Nilai V_p dan V_s untuk berbagai jenis material dapat dilihat pada Tabel 2.3 yang memperlihatkan hubungan kecepatan gelombang kompresi (V_p) dan kecepatan gelombang geser (V_s). Nilai V_s pada tabel di bawah akan dijadikan acuan dalam mengetahui jenis lapisan hingga kedalaman 30 meter yang nantinya digunakan untuk menghitung besar daya dukung tanah.

Tabel 2. 3 Nilai V_p dan V_s berbagai material dekat permukaan (Foti et al., 2014).

Geomaterial	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Poison Ratio
<i>Crystalline rocks</i>	4000-6500	2500-3500	0,2-0,3
<i>Calcareous, fractured rocks</i>	1600-3000	1000-1500	0,2-0,3
<i>Soft rocks, very dense gravels</i>	800-2000	500-1000	0,2-0,3
<i>Medium to dense gravels</i>	650-1500	400-800	0,2-0,3
<i>Medium to dense sands</i>	350-750	200-400	0,2-0,3
<i>Clays and silts</i>	250-500	150-300	0,15-0,25
<i>Very soft clays</i>	80-200	50-100	0,15-0,25

Nilai V_s yang didapatkan dari hasil pengukuran MASW di lapangan dapat dikaitkan untuk mengklasifikasi kelas situs tanah berdasarkan SNI 1726-2012. Kecepatan gelombang geser ini juga telah dijadikan parameter dalam mengklasifikasi situs tanah atau batuan. Rentang nilai V_s tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.4 Nilai V_s Berdasarkan Klasifikasi Situs (SNI 1726:2012, 2003)

No.	Klasifikasi Situs	V_s (m/s)	N SPT	S_u (kPa)
1	Batuan Keras (SA)	≥ 1500	N/A	N/A
2	Batuan (SB)	750 – 1500	N/A	N/A
3	Tanah sangat padat dan batuan lunak (SC)	350 – 750	> 50	≥ 100
4	Tanah Sedang (SD)	175 – 350	15 – 50	50 – 100
5	Tanah Lunak (SE)	≤ 175	< 15	< 50
		Setiap profil lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks Plastisitas (PI) > 20 2. Kadar air (w) $\geq 40\%$ 3. Kuat geser tak terdrainase (S_u) < 25 kPa		
6	Tanah khusus (SF)	Setiap profil yang memiliki karakteristik berikut: 1. Rawan dan berpotensi runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif dan tanah tersementasi lemah; 2. Lempung sangat organik dengan ketebalan H > 3 m		

		<p>3. Lempung berplastisitas sangat tinggi dengan ketebalan $H > 7,5$ m dan Indeks Plastisitas (PI) > 75;</p> <p>4. Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa.</p>
--	--	---

Perhitungan kecepatan gelombang geser (V_s) dilakukan dengan menganalisa sifat dispersi dari gelombang Rayleigh pada data seismik yang terekam selama proses akuisisi. Apabila nilai kecepatan gelombang geser semakin besar, maka akan semakin besar pula nilai kekakuan tanah yang mengidentifikasi semakin keras dan padat lapisannya. Kecepatan gelombang geser (V_s) hanya berkaitan dengan kekakuan dari struktur tanah, sedangkan untuk pengaruh tingkat kejenuhan tanah lebih berkaitan dengan kepadatan tanah (Park, Miller, & Xia, 1999). Karakterisasi modulus geser menyertai kecepatan gelombang geser (V_s) tanah dan batuan menjadi komponen penting dari berbagai analisis seismik, termasuk analisis bahaya, klasifikasi lokasi, serta analisis respons lokasi dan tanah (Yeganeh et al., 2017). Kecepatan gelombang geser dari hasil pengukuran akan mewakili kondisi tanah yang sebenarnya jauh lebih efektif dan andal daripada parameter kekuatan geser yang diuji di laboratorium (Tezcan et al., 2009). Setelah mengetahui kecepatan gelombang geser, selanjutnya akan diketahui nilai daya dukung tanah yang diijinkan dengan memanfaatkan modulus reaksi tanah dasar.