



Studi bawah permukaan menggunakan metode geolistrik resistivitas dan ground penetrating radar (GPR): Studi kasus di area pembangunan gedung kampus STMKG Tanah Tinggi Tangerang

Puji Ariyanto, Qowiyalsa Ramadhani

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi 9.0)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

23 September 2023

Abstract

The bedrock is an essential component in the planning of high-rise building construction. The depth of the bedrock and the classification of the rock types above it can serve as crucial considerations in the construction planning of high-rise buildings in a particular area. The presence of bedrock provides guidance for determining the foundation of the building's structure. Bedrock, characterized by its hard texture, also serves as a reference for distributing loads on the ground and understanding the effects of infrastructure development on its surface. In this research, the author focuses on utilizing two methods, namely Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Ground Penetrating Radar (GPR), to classify the types of rocks beneath the Earth's surface and identify the bedrock. The primary objective of this study is to identify the depth of the bedrock and classify the types of rocks that constitute the subsurface. Based on the analysis of geoelectric resistivity and ground-penetrating radar data, it can be concluded that the construction area of STMKG Tanah Tinggi Campus in Tangerang has the following layers: the first layer consists of sandy soil, backfill soil, and topsoil with resistivity values ranging from 1.28 Ohm to 4.64 Ohm. The subsequent layer is composed of soft soil with resistivity values ranging from 4.64 Ohm to 7.14 Ohm, and medium soil with resistivity values ranging from 11.0 Ohm to 26.0 Ohm.

Keywords: Tanah Tinggi · Electrical resistivity tomography (ERT) · Ground penetrating radar (GPR) · Bedrock · Interpretation · Subsurface.

PENDAHULUAN

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) merencanakan pembangunan gedung kampus baru yang berada di daerah Tanah Tinggi Kota Tangerang. Dalam membangun sebuah gedung perlu melakukan persiapan yang matang dahulu sebelum memulai, salah satu hal yang penting untuk dilakukan yaitu klasifikasi jenis batuan bawah permukaannya dan penentuan batuan dasar (*bedrock*). Dalam mengklasifikasikan batuan bawah permukaan dan menentukan batuan dasarnya ada beberapa metode geofisika yang dapat digunakan, antara lain yaitu metode tomografi geolistrik resistivitas (ERT) dan metode *ground penetrating radar* (GPR) (Lee dkk., 2021).

✉ Qowiyalsa Ramadhani
qowiyalsa.ramadhani@stmkg.ac.id

Geophysics Department, State College of Meteorology Climatology and Geophysics, Jalan Perhubungan 2, Tangerang Selatan 15221, Indonesia

How to Cite: Ariyanto, P., & Ramadhani, Q. (2023). Subsurface Study Using Electrical Resistivity Tomography And Ground Penetrating Radar (GPR) (A Case Study In The Construction Area Of STMKG Campus Building, Tanah Tinggi, Tangerang). *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 2(1), 404-420. <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi>

Batuan dasar merupakan komponen penting dalam perencanaan pembangunan gedung bertingkat. Kedalaman batuan dasar serta klasifikasi jenis batuan di atasnya dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam perencanaan pembangunan gedung bertingkat pada suatu daerah. Keberadaan batuan dasar dapat dijadikan pedoman untuk menentukan pondasi konstruksi bangunan. Batuan dasar memiliki tekstur yang keras dan dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemberian beban terhadap bumi, efek dari pembangunan infrastruktur di atas permukaannya. Batuan dasar sangat sulit ditemukan dan terlihat oleh mata secara langsung karena adanya proses pelapukan batuan dan vegetasi lainnya yang kemudian menutupi singkapan batuan dasar tersebut. (Nurlaili, 2020).

Peraturan tentang penentuan batuan dasar untuk peletakan pondasi gedung yang berguna untuk memaksimalkan kekuatan gedung tersebut telah tercantum dalam Peraturan Menteri PU No.29 Tahun 2006 Tentang Pedoman Persyaratan Teknis Bangunan Gedung pada Bagian III Persyaratan Teknis, III.3 Persyaratan Keandalan Bangunan Gedung, III.3.1 Persyaratan Keselamatan Bangunan Gedung. Pada penelitian ini penulis memfokuskan penggunaan metode tomografi geolistrik resistivitas (ERT) dan metode *ground penetrating radar* (GPR) untuk mengklasifikasikan jenis batuan penyusun bawah permukaan bumi dan mengidentifikasi batuan dasar (*bedrock*). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kedalaman batuan dasar dan mengklasifikasikan jenis batuan penyusun bawah permukaan bumi yang diharapkan berguna sebagai bahan acuan untuk peletakan pondasi gedung di area pembangunan gedung kampus STMKG Tanah Tinggi Tangerang.

METODE

Geolistrik Resistivitas

Geolistrik adalah suatu metode geofisika untuk mempelajari sifat-sifat kelistrikan dari batuan yang berada di bawah permukaan bumi, seperti pengukuran potensial, arus, dan medan elektromagnetik yang terjadi secara alamiah maupun buatan (injeksi arus ke dalam bumi). Yang termasuk dalam metode geolistrik sebagai yaitu, metode arus (AMT), metode potensial diri (*Self Potensial*), magnetotelurik (MT), elektromagnetik, *Induced Polarization* (IP), dan tahanan jenis (*resitivity*) (Telford dkk., 1990).

Metode geolistrik ini efisien dan cocok untuk eksplorasi yang bersifat relatif dangkal karena kepekaannya yang besar terhadap fluktuasi konduktivitas dekat permukaan. Selain itu, juga peka terhadap kebisingan (*noise*), arus listrik semakin lemah saat digunakan pada jarak yang semakin besar sehingga memungkinkan mengurangi kualitas pengukuran. Oleh karena itu, metode ini jarang digunakan untuk eksplorasi mineral atau minyak tetapi hanya lebih digunakan dalam hal penelitian geologi teknik untuk menentukan kedalaman batuan dasar, pencarian sumber air, eksplorasi air tanah dan energi panas bumi (Telford dkk., 1990).

Pada prinsipnya metode geolistrik resistivitas (tahanan jenis) adalah dengan menancapkan arus listrik ke bawah permukaan bumi melalui elektroda, mengakibatkan beda potensial yang terukur melalui elektroda potensial dan menghasilkan variasi harga tahanan jenis lapisan bawah permukaan dari pengukuran arus dan beda potensial pada tiap – tiap jarak elektroda (Telford dkk., 1990). Dalam metode ini hukum Ohm merupakan teori utama yang dapat dirumuskan sesacara matematis sebagai berikut :

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

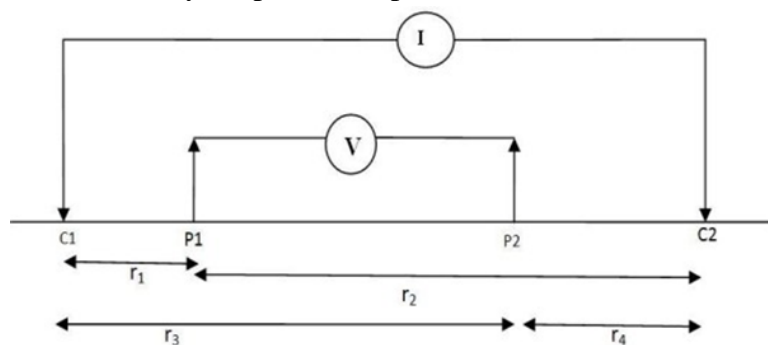
dengan : V adalah Beda potensial (volt); I adalah Arus Listrik (ampere); dan R adalah Hambatan (ohm (Ω)). Nilai dari resistivitas batuan pada permukaan tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai resistivitas batuan (Sosrodarsono dan Takeda, 2003)

Material	Resistivitas (Ωm)
Air	80-200
Air Tanah	30-100
Tanah Liat	10-200
Pasir	100-600
Pasir, Kerikil	100-1000
Batu Berlumpur	20-200
Batu Pasir	50-500
Konglomerat	100-500
Tuf	20-200
Andesit	100-2000
Granit	1000-10000

Schlumberger

Konfigurasi Schlumberger merupakan salah satu konfigurasi elektroda yang paling umum digunakan dalam survei resistivitas. Konfigurasi ini unggul pada sensitivitas terhadap struktur vertikal dalam jarak yang besar, namun memiliki kelemahan terhadap struktur horizontal dalam jarak yang kecil. Jadi dalam konfigurasi Schlumberger memiliki kekurangan yaitu tidak bisa mendeteksi homogenitas batuan di dekat permukaan yang berpengaruh pada hasil perhitungan. Dalam hal kedalaman konfigurasi ini lebih besar sekitar 10 % daripada konfigurasi Wenner dengan jarak yang sama antara elektroda luar ($C1$ dan $C2$) dengan nilai “ n ” lebih besar dari 3. Lalu untuk Penetrasi arus cukup dalam yaitu $1/6$ dari jarak antar elektroda arus yang digunakan. Untuk kekuatan sinyal konfigurasi ini lebih kecil daripada konfigurasi *Wenner*, namun lebih tinggi dari konfigurasi *Dipole – Dipole* (Loke, 2004). Pada konfigurasi *Schlumberger* pada elektroda $P1$ dan $P2$ menghasilkan nilai tegangan yang lebih kecil, terutama jika jarak $C1$ dan $C2$ yang lebih besar. Susunannya dapat dilihat pada Gambar 1.

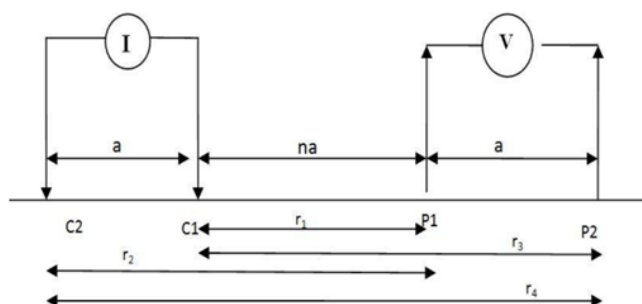


Gambar 1. Konfigurasi Schlumberger (Loke, 2004).

Dipole-dipole

Konfigurasi Dipole-Dipole memiliki keunggulan pada sensitivitas terhadap struktur horizontal yang relatif baik, namun memiliki kekuatan sinyal signifikan lebih rendah jika dibandingkan dengan konfigurasi Pole-Dipole dan tidak lebih sensitif jika dibandingkan dengan konfigurasi Pole-Pole, susunan elektroda ditunjukkan pada gambar 2. Jarak antara pasangan elektroda arus $C1$ - $C2$ diberikan tanda sebagai “ a ” yang sama dengan jarak antara pasangan elektroda potensial $P1$ - $P2$. Pada konfigurasi ini memiliki faktor lain yang ditandai sebagai “ n ”, ini adalah rasio jarak antar elektroda $C1$ dan $P1$ dengan Panjang dipol $C2$ - $C1$ atau $P1$ - $P2$ adalah “ a ”. Untuk

akuisisi dengan konfigurasi ini, jarak “a” pada awalnya dijaga tetap pada jarak unit elektroda terkecil dan factor “n” ditingkatkan dari 1 menjadi 2, kemudian menjadi 3 hingga sekitar 6 untuk meningkatkan kedalaman penetrasi.



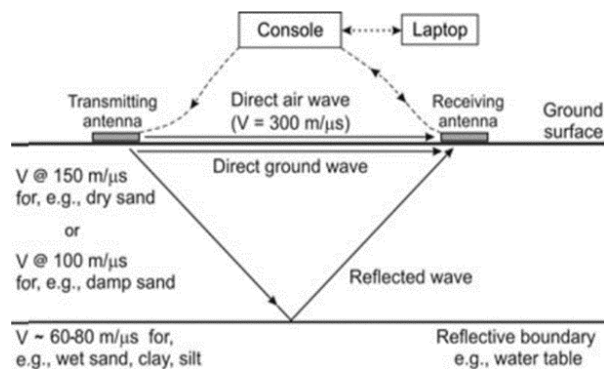
Gambar 2. Konfigurasi Dipole-dipole (Loke, 2004)

Ground Penetrating Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) adalah metode berpresisi tinggi untuk membentuk struktur lapisan dangkal berdasarkan propagasi gelombang elektromagnetik. Amplitudo dan kedalaman penetrasi yang tercatat bergantung pada frekuensi antena yang digunakan dan sifat listrik mediumnya (Ramírez et al., 2020). Berdasarkan prinsip-prinsip ini, dapat dikatakan bahwa metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi benda-benda, retakan, perubahan material, rongga, dan berbagai aplikasi lain untuk tujuan geoteknik (Krzeminska et al., 2022). Kemampuan penetrasi metode ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk efisiensi radiasi antena, frekuensi sumber sinyal, dan sifat dielektrik suatu material. Selain itu, beberapa faktor dapat memengaruhi sinyal yang dikirimkan, metode pemrosesan sinyal, dan jenis antena yang digunakan, termasuk sifat listrik medium, jenis objek yang akan dideteksi, dan kedalaman objek tersebut (Nurlaili, 2020).

Metode Ground Penetrating Radar (GPR) beroperasi dengan mengirimkan pulsa elektromagnetik ke medium target menggunakan antena pemancar. Ketika pulsa-pulsa ini mengalami area dengan perubahan mendadak dalam sifat dielektrik, gelombang elektromagnetik dipantulkan kembali ke permukaan tanah, kemudian direkam dan diperkuat oleh antena penerima. Selama propagasinya, pulsa elektromagnetik mengalami redaman sinyal dan distorsi sinyal. Teknik yang digunakan untuk menerima gelombang elektromagnetik yang dipantulkan dikenal sebagai profil subpermukaan Elektromagnetik (ESP). Dalam teknik ini, pantulan balik gelombang elektromagnetik yang dipancarkan melalui permukaan menggunakan antena pemancar digunakan. Pantulan balik dan transmisi gelombang elektromagnetik terjadi dengan cepat, dapat diukur dalam nanodetik (Mendoza et al., 2021).

Pulsa yang dikirimkan oleh antena pemancar mengambil bentuk energi gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi (Gambar 3), di mana antena penerima dapat menunjukkan tiga jenis sinyal mendasar: gelombang udara langsung, yang bergerak dengan kecepatan 300 m/μs; gelombang permukaan langsung, yang bergerak dengan kecepatan 40–200 m/μs tergantung pada sifat tanah; dan gelombang yang dipantulkan dari batas subpermukaan di mana terjadi perubahan dalam karakteristik listrik dan dielektriknya. Selanjutnya, gelombang radar kembali ke permukaan, memberikan informasi tentang struktur dan lapisan di bawah permukaan (Gómez-Ortiz & Martín-Crespo, 2012).



Gambar 3. Prinsip dasar metode GPR (Annan, 2002).

Sifat-sifat listrik dari bahan, termasuk permitivitas dielektrik (ϵ_r), konduktivitas listrik (σ), dan permeabilitas magnetik (μ), menentukan propagasi gelombang elektromagnetik melalui suatu medium. Permitivitas dielektrik adalah faktor penting yang mempengaruhi propagasi gelombang elektromagnetik dan dapat mengurangi energinya. Permitivitas dielektrik yang lebih rendah menghasilkan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik yang lebih tinggi dalam suatu material. Singkatnya, permitivitas dielektrik mengindikasikan sejauh mana resistensi dalam pembentukan medan listrik yang disuntikkan.

Tabel 2. Permitivitas Dielektrik and Kecepatan.

Mineral	ϵ_r	Kecepatan (m/ns)
Udara	1	300
Air	81	33
Pasir kering	3-6	120-170
Pasir basah	25-30	55-60
Lumpur	10	95
Lempung basah	8-15	86-110
Lempung kering	3	173
Rawa	12	86
Granit	5-8	106-120
Batu gamping	7-9	100-113
Dolomit	6,8-8	106-115
Basalt basah	8	106
Batupasir	6	112
Batubara	4-5	143-150
Kuarsa	4,3	145
Beton	6-12	55-112
Aspal	3-5	134-173
PVC,Epoxy,Polyester	3	173

Jika interval waktu diungkapkan dalam t , dan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik di dalam tanah adalah v , maka kedalaman objek, diungkapkan dalam h , adalah:

$$h = \frac{1}{2} tv$$

Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak Gred HD untuk melakukan pengolahan data. Proses pengolahan data ini melibatkan penggunaan berbagai filter dengan tujuan untuk menghilangkan *noise* atau gangguan yang terlihat pada radargram. Beberapa modifikasi juga dilakukan agar data lebih mudah untuk diinterpretasikan dan dicitrakan.

Berikut adalah langkah-langkah dalam pengolahan data GPR yang dilakukan dalam penelitian ini:

Input Data GPR

Proses dimana data mentah (*raw data*) dari GPR dimasukkan ke dalam perangkat lunak Gred HD. Format data masukan yang digunakan adalah *.rd3.

Koreksi Statik

Proses untuk melakukan koreksi pada waktu tiba gelombang elektromagnetik yang terekam di antena penerima. Koreksi dilakukan dengan metode *move start time* untuk menghilangkan efek gelombang langsung (*direct wave*) dan gelombang udara (*air wave*) secara manual.

Dewow

Proses untuk menghilangkan gangguan atau *noise* dengan frekuensi rendah yang terlihat pada radargram.

Gain

Proses untuk memberikan penguatan sinyal pada sinyal atau pulsa radar yang terlalu lemah.

Bandpass frequency

Proses untuk membatasi jangkauan frekuensi pulsa pada radargram dan menghilangkan frekuensi yang tidak diinginkan.

Background removal

Proses untuk mengurangi atau menghilangkan *noise* atau gangguan yang muncul secara koheren pada radargram sehingga sinyal yang sebenarnya dapat terlihat jelas.

FK Filter

Proses untuk menghilangkan noise yang muncul secara acak pada sepanjang profil.

Setiap langkah di atas dilakukan untuk memperoleh data GPR yang lebih bersih, akurat, dan dapat diinterpretasikan dengan baik dalam penelitian tersebut.

Struktur Geologi

Menurut Suyitno dan Yahya (1998), kota Tangerang terletak pada wilayah dengan tinggian struktur yang dikenal sebagai Tangerang High. Struktur ini terbentuk oleh batuan Tersier yang berfungsi sebagai pemisah antara cekungan Jawa Barat Utara di bagian Barat dan cekungan Sunda di bagian Timur.

Cekungan Tangerang High Barat ditandai oleh endapan pantai dan delta, sementara cekungan Jakarta memiliki endapan aluvial yang tebal. Pada periode ini, endapan Kuartar dalam bentuk batuan vulkanik Gunung Gede-Pangrango dan Gunung Salak, yang lebih muda usianya, telah menutupi lapisan batuan sebelumnya. Oleh karena itu, struktur Tangerang High tidak dapat ditemukan lagi di permukaan karena telah tertutup oleh endapan vulkanik Kuartar tersebut.

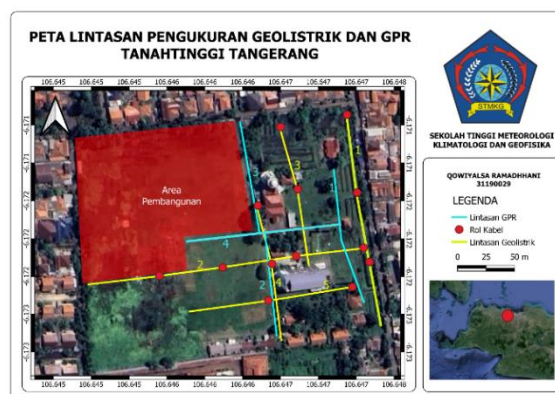


Gambar 4. Peta Geologi Lokal.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Jawa pada gambar diatas, batuan penyusun di wilayah sekitar Tanah Tinggi Tangerang termasuk dalam formasi Tuf Banten (Batuan Gunung Api) dan Aluvium (Endapan Permukaan). Tuf Banten merupakan formasi dengan umur Pliosen dengan litologi penyusun berupa tuf, tuf batuapung, tuf batupasir. Formasi berikutnya yaitu Aluvium dengan umur formasi Holosen dengan litologi penyusun berupa lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal, dan bongkah (Turkandi dkk., 1992).

MODEL PENELITIAN

Dalam penelitian ini akan dilakukan dengan pengukuran secara langsung dengan metode geolistrik resistivitas dan dengan metode GPR. Dari kedua data tersebut akan dianalisis dan kemudian akan diambil kesimpulan mengenai informasi kedalaman batuan dasar dan jenis batuan penyusun bawah permukaannya. Penelitian ini akan dilaksanakan pada area pembangunan gedung kampus STMKG Tanah Tinggi Tangerang pada koordinat $6^{\circ}10'18.379''$ Lintang Selatan dan $106^{\circ}38'46.587''$ Bujur Timur. Pengukuran langsung dalam penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 15-16 Februari 2023.



Gambar 5. Peta area penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Akuisisi Data

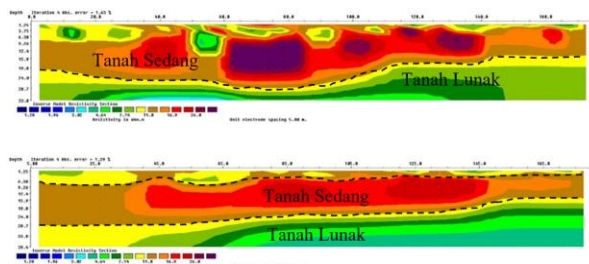
Informasi litologi pada daerah sekitar penelitian diperlukan sebagai acuan untuk menginterpretasikan keadaan dibawah permukaan tanah. Menurut peta geologi regional lembar Jakarta, wilayah Tanah Tinggi tersusun oleh dua formasi yaitu Tuf Banten (Batuan Gunung Api) dan Aluvium (Endapan Permukaan). Tuf Banten merupakan formasi dengan umur Pliosen

dengan litologi penyusun berupa tuf, tuf batuapung, tuf batupasir. Formasi berikutnya yaitu Aluvium dengan umur formasi Holosen dengan litologi penyusun berupa lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal, dan bongkah. (Naryanto dkk., 2020).

Geolistrik Resistivitas

Lintasan 1

Pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 1 dilakukan di sepanjang tepi timur area pengukuran seperti yang terlihat pada gambar 3.3 . Jumlah elektroda yang digunakan pada pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 1 ini sebanyak 36 elektroda dengan spasi antar elektroda 5 meter. Pada akuisisi geolistrik resistivitas ini menggunakan dua konfigurasi, yaitu konfigurasi Dipole-dipole dan konfigurasi Schlumberger. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Dipole-dipole pada lintasan 1 ini adalah 33,8 meter. Berbeda dengan kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Schlumberger pada lintasan 1 ini adalah 39,4 meter.

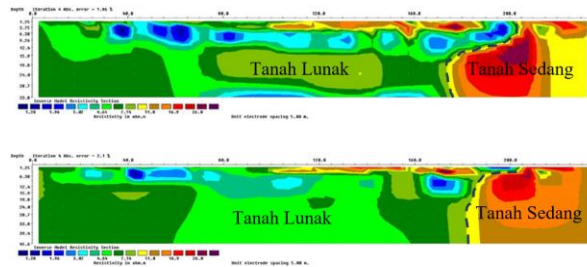


Gambar 6. Geolistrik resistivitas 2d lintasan 1

Dari hasil pengukuran dengan mengacu pada litologi daerah sekitar dapat diinterpretasikan bahwa terdapat tanah lunak dengan nilai resistivitas 4,64 Ohm hingga 11,0 Ohm pada permukaan lapisan hingga kedalaman sekitar 6 meter. Kemudian dari hasil penampang geolistrik resistivitas 2D lintasan 1 pada konfigurasi Schlumberger terlihat bahwa diperkirakan pada kedalaman sekitar 8 meter hingga 24 meter terdapat tanah sedang dengan ketebalan 10-16 meter yang memiliki nilai resistivitas 11,0 Ohm hingga 26,0 Ohm, sedangkan lapisan dibawah tanah sedang diperkirakan lapisan tanah lunak dengan nilai resistivitas 4,64 Ohm hingga 7,14 Ohm.

Lintasan 2

Pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 2 merupakan lintasan terpanjang pada pengukuran geolistrik resistivitas ini, panjang lintasan yaitu sekitar 235 meter dan menjangkau bagian paling timur hingga bagian paling barat area pengukuran. Jumlah elektroda yang digunakan pada pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 2 ini sebanyak 48 elektroda dengan spasi antar elektroda 5 meter. Pada akuisisi geolistrik resistivitas ini menggunakan dua konfigurasi, yaitu konfigurasi Dipole-dipole dan konfigurasi Schlumberger. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Dipole-dipole pada lintasan 2 ini adalah 33,8 meter. Berbeda dengan kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Schlumberger pada lintasan 2 ini adalah 45,6 meter.

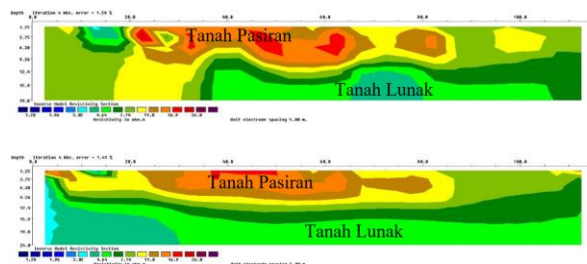


Gambar 7. Geolistrik resistivitas 2d lintasan 2

Dari hasil pengukuran dengan mengacu pada litologi daerah sekitar dapat diinterpretasikan bahwa terdapat tanah lunak hingga basah dan tanah pasiran dengan nilai resistivitas 1,28 Ohm hingga 7,14 Ohm pada permukaan lapisan hingga kedalaman sekitar 6-10 meter. Kemudian dari hasil penampang geolistrik resistivitas 2D lintasan 2 pada konfigurasi Schlumberger terlihat bahwa pada area sebelah kanan diduga tanah yang berada pada area tersebut mengalami pemadatan karena memiliki resistivitas relatif lebih tinggi dengan nilai resistivitas 11,0 Ohm hingga 16,9 Ohm yang diperkirakan lapisan tanah sedang pada panjang penampang 55 meter terakhir dengan kedalaman sekitar 10 meter dan ketebalan yang tidak dapat didefinisikan karena terbatas dalam hal kedalaman penetrasi, sedangkan pada panjang penampang 185 meter pertama diperkirakan memiliki lapisan tanah lunak.

Lintasan 3

Pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 3 merupakan lintasan yang mengarah dari selatan ke utara dan memiliki panjang lintasan yaitu sekitar 115 meter dan melewati daerah yang berair pada 30 meter terakhir (utara). Jumlah elektroda yang digunakan pada pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 3 ini sebanyak 24 elektroda dengan spasi antar elektroda 5 meter. Pada akuisisi geolistrik resistivitas ini menggunakan dua konfigurasi, yaitu konfigurasi Dipole-dipole dan konfigurasi Schlumberger. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Dipole-dipole pada lintasan 3 ini adalah 19,8 meter. Berbeda dengan kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Schlumberger pada lintasan 3 ini adalah 24 meter.

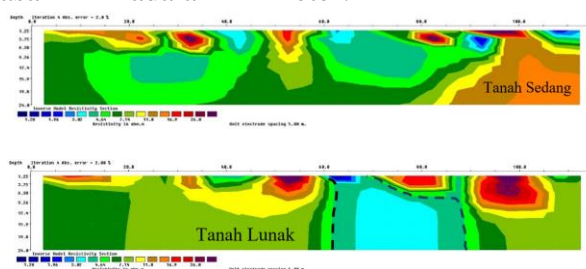


Gambar 8. Geolistrik resistivitas 2d lintasan 3

Dari hasil pengukuran dengan mengacu pada litologi daerah sekitar dapat diinterpretasikan bahwa terdapat tanah lunak dan tanah pasiran dengan nilai resistivitas 7,14 Ohm hingga 16,9 Ohm pada permukaan lapisan hingga kedalaman sekitar 10-12 meter. Kemudian dari hasil penampang geolistrik resistivitas 2D lintasan 3 pada konfigurasi Schlumberger terlihat bahwa terdapat lapisan konsisten dengan kedalaman sekitar 12-24 meter yang diperkirakan mengandung tanah lunak dengan nilai resistivitas 3,02 Ohm hingga 7,14 Ohm.

Lintasan 4

Pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 4 merupakan lintasan yang memiliki panjang lintasan yaitu sekitar 115 meter yang diapit oleh jalan cor, gedung asrama, bangunan koperasi, dan bangunan kantor serta lintasan ini melewati atau memotong 3 jalan cor. Jumlah elektroda yang digunakan pada pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 4 ini sebanyak 24 elektroda dengan spasi antar elektroda 5 meter. Pada akuisisi geolistrik resistivitas ini menggunakan dua konfigurasi, yaitu konfigurasi Dipole-dipole dan konfigurasi Schlumberger. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Dipole-dipole pada lintasan 4 ini adalah 24 meter. Kemudian kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Schlumberger pada lintasan 4 ini adalah 24 meter.

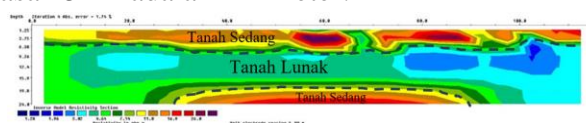


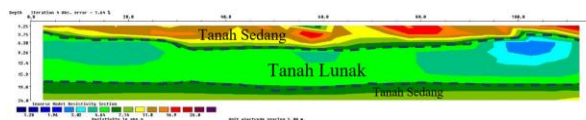
Gambar 9. Geolistrik resistivitas 2d lintasan 4

Dari hasil pengukuran dengan mengacu pada litologi daerah sekitar dapat diinterpretasikan bahwa terdapat tanah sedang dan tanah pasir pada permukaan lapisan hingga kedalaman sekitar 6 meter dengan nilai resistivitas 4,64 Ohm hingga 26 Ohm. Kemudian dari hasil penampang geolistrik resistivitas 2D lintasan 4 pada konfigurasi Schlumberger terlihat bahwa terdapat bagian yang memiliki resistivitas yang relatif lebih rendah dibanding lintasan yang lain, yaitu pada 60 meter pertama dengan panjang sekitar 25 meter dengan nilai resistivitas sekitar 3,02 Ohm dan merupakan lintasan yang dekat dengan bangunan koperasi. Kemudian pada panjang penampang 60 meter pertama dengan kedalaman sekitar 6-24 meter diperkirakan memiliki lapisan tanah lunak dengan nilai resistivitas sekitar 7,14 Ohm.

Lintasan 5

Pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 5 dilakukan di sepanjang tepi selatan bangunan asrama dan di sebagian lapangan seperti yang terlihat pada gambar 3.3 . Jumlah elektroda yang digunakan pada pengukuran geolistrik resistivitas lintasan 5 ini sebanyak 24 elektroda dengan spasi antar elektroda 5 meter. Pada akuisisi geolistrik resistivitas ini menggunakan dua konfigurasi, yaitu konfigurasi Dipole-dipole dan konfigurasi Schlumberger. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Dipole-dipole pada lintasan 5 ini adalah 24 meter. Kemudian kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran geolistrik resistivitas 2D dengan menggunakan konfigurasi Schlumberger pada lintasan 5 ini adalah 24 meter.





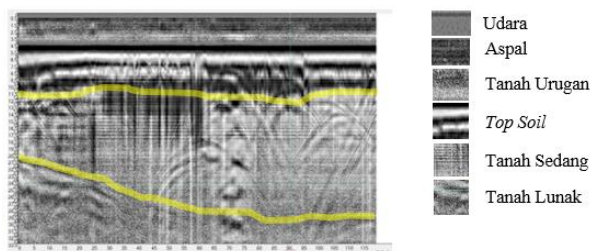
Gambar 10. Geolistrik resistivitas 2d lintasan 5

Dari hasil pengukuran dengan mengacu pada litologi daerah sekitar dapat diinterpretasikan bahwa terdapat tanah sedang pada permukaan lapisan hingga kedalaman sekitar 6-8 meter dengan nilai resistivitas 11,0 Ohm hingga 16,9 Ohm. Kemudian dari hasil penampang geolistrik resistivitas 2D lintasan 5 pada konfigurasi Schlumberger terlihat bahwa diperkirakan pada kedalaman sekitar 17 meter terdapat lapisan tanah sedang dengan ketebalan sekitar 7 meter dengan nilai resistivitas 7,14 Ohm hingga 16,9 Ohm, sedangkan lapisan diantara batuan dasar dan lapisan atas diperkirakan merupakan lapisan tanah lunak dengan nilai resistivitas 3,02 Ohm hingga 4,64 Ohm.

Ground Penetrating Radar

Lintasan 1

Pengukuran GPR lintasan 1 dilakukan menggunakan antenna dengan frekuensi 40 MHz dengan spasi antar sampling yaitu 10 cm dan jarak yang diperoleh adalah 120 meter. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran GPR 2D dengan menggunakan konfigurasi tersebut pada lintasan 1 ini adalah 33,5 meter.

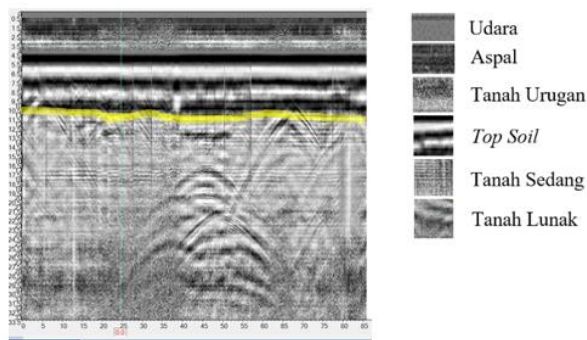


Gambar 11. Penampang GPR lintasan 1

Berdasarkan interpretasi hasil GPR, ditemukan beberapa lapisan di bawah permukaan tanah. Lapisan paling atas teridentifikasi sebagai udara dengan ketebalan sekitar 0,5 meter, yang juga merupakan jarak antara alat GPR dengan permukaan aspal. Di bawah lapisan udara, terdapat lapisan aspal dan lapisan tanah urugan yang terdiri dari tanah, pasir, dan kerikil dengan ketebalan sekitar 3,5 meter. Kemudian, terdapat lapisan yang menyerupai garis hitam putih yang diinterpretasikan sebagai lapisan top soil atau tanah penutup dengan ketebalan sekitar 7 meter. Lapisan ini biasanya memiliki konstanta dielektrik sekitar 16 F/m dan kecepatan perambatan gelombang sekitar 7×10^7 m/s. Pada kedalaman antara 11,5 meter hingga sekitar 29,5 meter dari titik pengukuran, terlihat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah sedang. Sedangkan pada kedalaman antara 20,5 meter hingga 33,5 meter, terdapat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah lunak.

Lintasan 2

Pengukuran GPR lintasan 2 dilakukan menggunakan antenna dengan frekuensi 40 MHz dengan spasi antar sampling yaitu 10 cm dan jarak yang diperoleh adalah 85 meter. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran GPR 2D dengan menggunakan konfigurasi tersebut pada lintasan 2 ini adalah 33,5 meter.

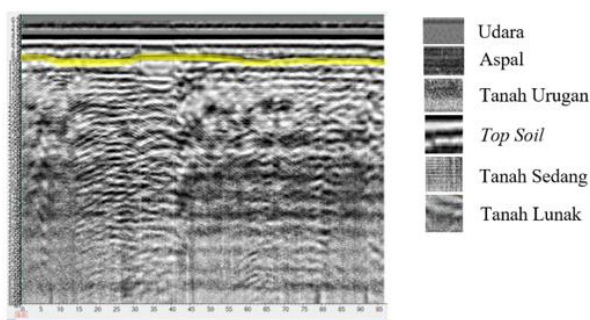


Gambar 12. Penampang GPR lintasan 2

Berdasarkan interpretasi hasil GPR, ditemukan beberapa lapisan di bawah permukaan tanah. Lapisan paling atas teridentifikasi sebagai udara dengan ketebalan sekitar 0,5 meter, yang juga merupakan jarak antara alat GPR dengan permukaan paving. Di bawah lapisan udara, terdapat lapisan paving dan lapisan tanah urugan yang terdiri dari tanah, pasir, dan kerikil dengan ketebalan sekitar 3 meter. Kemudian, terdapat lapisan yang menyerupai garis hitam putih yang diinterpretasikan sebagai lapisan top soil atau tanah penutup dengan ketebalan sekitar 7 meter. Lapisan ini biasanya memiliki konstanta dielektrik sekitar 16 F/m dan kecepatan perambatan gelombang sekitar 7×10^7 m/s. Pada kedalaman antara 10,5 meter hingga 33,5 meter dari titik pengukuran, terlihat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah sedang.

Lintasan 3

Pengukuran GPR lintasan 3 dilakukan menggunakan antena dengan frekuensi 40 MHz dengan spasi antar sampling yaitu 10 cm dan jarak yang diperoleh adalah 85 dan 95 meter. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran GPR 2D dengan menggunakan konfigurasi tersebut pada lintasan 3 ini adalah 67 meter.

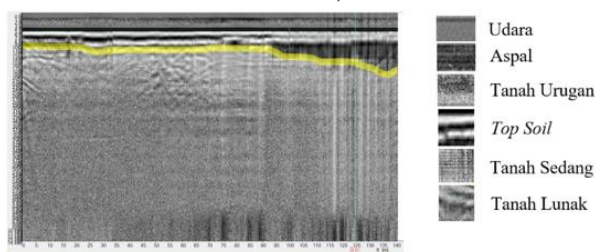


Gambar 13. Penampang GPR lintasan 3

Berdasarkan interpretasi hasil GPR, ditemukan beberapa lapisan di bawah permukaan tanah. Lapisan paling atas teridentifikasi sebagai udara dengan ketebalan sekitar 0,5 meter, yang juga merupakan jarak antara alat GPR dengan permukaan tanah. Di bawah lapisan udara, terdapat lapisan tanah urugan yang terdiri dari tanah pasiran, pasir, dan kerikil dengan ketebalan sekitar 2,5 meter. Kemudian, terdapat lapisan yang menyerupai garis hitam putih yang diinterpretasikan sebagai lapisan top soil atau tanah penutup dengan ketebalan sekitar 6,5 meter. Lapisan ini biasanya memiliki konstanta dielektrik sekitar 16 F/m dan kecepatan perambatan gelombang sekitar 7×10^7 m/s. Pada kedalaman antara 9,5 meter hingga sekitar 67 meter dari titik pengukuran, terlihat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah sedang.

Lintasan 4

Pengukuran GPR lintasan 4 dilakukan menggunakan antena dengan frekuensi 40 MHz dengan spasi antar sampling yaitu 10 cm dan jarak yang diperoleh adalah 125 dan 140 meter. Kedalaman penetrasi yang didapatkan dalam pengukuran GPR 2D dengan menggunakan konfigurasi tersebut pada lintasan 4 ini adalah 74,5 meter.



Gambar 14. Penampang GPR lintasan 4

Berdasarkan interpretasi hasil GPR, ditemukan beberapa lapisan di bawah permukaan tanah. Lapisan paling atas teridentifikasi sebagai udara dengan ketebalan sekitar 0,5 meter, yang merupakan jarak antara alat GPR dengan permukaan tanah. Di bawah lapisan udara, terdapat lapisan aspal dan lapisan tanah urugan yang terdiri dari tanah, pasir, dan kerikil dengan ketebalan sekitar 3,5 meter. Kemudian, terdapat lapisan yang menyerupai garis hitam putih yang diinterpretasikan sebagai lapisan top soil atau tanah penutup dengan ketebalan sekitar 6 meter. Lapisan ini umumnya memiliki konstanta dielektrik sekitar 16 F/m dan kecepatan perambatan gelombang sekitar 7×10^7 m/s. Pada jarak antara 90 meter hingga 140 meter dari titik berangkat pengukuran, dengan kedalaman sekitar 10 meter hingga 18 meter, terlihat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah lunak. Sedangkan pada kedalaman antara 10 meter hingga sekitar 74,5 meter, terdapat citra yang diinterpretasikan sebagai lapisan tanah sedang.

Data Pemanding

Hasil dari pengolahan data MASW, khususnya nilai $Vs30$, dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan jenis tanah di lokasi pengukuran. Dalam penelitian ini, penentuan jenis tanah didasarkan pada klasifikasi jenis tanah sesuai dengan standar SNI 1726:2019, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tabel tersebut akan memberikan informasi tentang jenis-jenis tanah yang ada berdasarkan nilai $Vs30$ yang diukur di masing-masing lokasi pengukuran. Dengan demikian, penggunaan nilai $Vs30$ sebagai parameter untuk menentukan jenis tanah akan mempermudah identifikasi dan pemahaman tentang komposisi tanah di wilayah tersebut sesuai dengan standar yang berlaku.

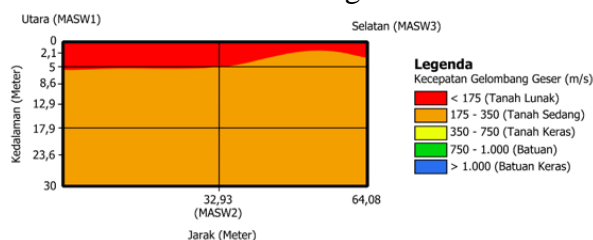
Tabel 3. Nilai MASW (Pajar, 2023)

Point	Longitude	Latitude	Vs30	Soil Type Classification
MASW1	106,646156	-6,171822	222,17	Tanah Sedang (SD)
MASW2	106,646203	-6,172123	209,9	Tanah Sedang (SD)
MASW3	106,646238	-6,172404	253,82	Tanah Sedang (SD)
MASW4	106,646392	-6,172106	195,42	Tanah Sedang (SD)
MASW5	106,646165	-6,172138	203,71	Tanah Sedang (SD)
MASW6	106,647390	-6,171988	155,05	Tanah Lunak (SE)
MASW7	106,647113	-6,172045	194,86	Tanah Sedang (SD)
MASW8	106,646929	-6,171607	183,48	Tanah Sedang (SD)
MASW9	106,646017	-6,172120	186,00	Tanah Sedang (SD)
MASW10	106,646838	-6,171819	174,34	Tanah Lunak (SE)

Point	Longitude	Latitude	Vs30	Soil Type Classification
MASW11	106,646594	-6,172175	163,25	Tanah Lunak (SE)
MASW12	106,647501	-6,172290	181,86	Tanah Sedang (SD)
MASW13	106,646462	-6,171534	144,55	Tanah Lunak (SE)

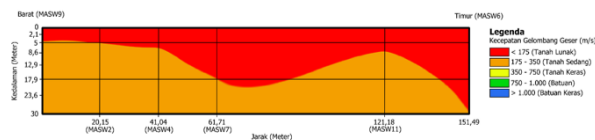
Hasil pengukuran kecepatan gelombang geser (Vs) hingga kedalaman 30 m di Stasiun Geofisika Tanah Tinggi menunjukkan variasi nilai yang beragam, mulai dari 140.96 m/s hingga nilai tertinggi sebesar 253,82 m/s. Pemetaan nilai Vs30 mengindikasikan bahwa bagian utara dan timur wilayah tersebut didominasi oleh tanah lunak, yang direpresentasikan dengan warna merah hingga jingga pada peta. Sementara itu, pada bagian barat dan selatan wilayah, sebagian besar didominasi oleh tanah sedang, yang direpresentasikan dengan warna kuning hingga hijau pada peta. Pemetaan ini memberikan gambaran visual tentang distribusi kecepatan gelombang geser dan tipe tanah di Stasiun Geofisika Tanah Tinggi. Informasi ini dapat sangat berguna dalam mengidentifikasi potensi risiko bencana dan melakukan analisis kestabilan tanah dalam perencanaan dan konstruksi di area tersebut (Pajar, 2023).

Berdasarkan hasil pemodelan 2D dengan menggunakan *cross section*, dapat diklasifikasikan jenis tanah di Stasiun Geofisika Tanah Tinggi hingga kedalaman 30 m berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser (Vs) sesuai dengan SNI 1726:2019. Dari penelitian ini, diketahui bahwa mayoritas wilayah Stasiun Geofisika Tanah Tinggi didominasi oleh jenis tanah sedang (SD). Selain itu, terdapat juga sejumlah titik penelitian, yaitu MASW6, MASW10, MASW11, dan MASW13, yang menunjukkan adanya jenis tanah lunak (SE) di daerah tersebut. Secara keseluruhan, pemodelan menunjukkan bahwa wilayah Stasiun Geofisika Tanah Tinggi terdiri dari dua jenis tanah utama, yaitu tanah lunak (SE) dan tanah sedang (SD), pada kedalaman hingga 30 m. Informasi ini berguna untuk memahami komposisi dan karakteristik tanah di area yang diteliti, yang merupakan hal penting dalam perencanaan dan analisis kestabilan struktur di daerah tersebut (Pajar, 2023). Pada peta tersebut, terdapat jalur garis linier yang membentuk *Cross Section*. *Cross Section* tersebut akan digunakan untuk menghasilkan peta kecepatan gelombang Vs 2-D secara horizontal hingga kedalaman 30 m, sesuai dengan standar SNI 1726:2019. Tujuan dari pembuatan peta ini adalah untuk memberikan informasi tentang distribusi nilai kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman. *Cross section* pertama dimulai dari titik pengukuran MASW1, MASW2, dan MASW3 dengan panjang lintasan mencapai 64,08 meter. Sementara itu, *cross section* kedua dimulai dari titik pengukuran MASW9, MASW2, MASW4, MASW11, MASW7, dan MASW6 dengan panjang lintasan mencapai 151,49 meter. Dengan menggunakan jalur ini, akan dihasilkan informasi tentang kecepatan gelombang geser secara horizontal pada kedalaman tertentu, yang dapat berguna untuk pemahaman lebih mendalam tentang sifat dan struktur tanah (Pajar, 2023).



Gambar 15. MASW lintasan 1 (Pajar, 2023)

Berdasarkan gambar 15 *cross section* 1, dapat disimpulkan bahwa dari titik pengukuran MASW1, MASW2 dan MASW3, sebagian besar tersusun oleh tanah sedang dan terdapat tanah lunak sampai kedalaman kurang lebih 5 meter pada titik pengukuran MASW1 dan MASW2, dan kurang lebih 2,1 meter pada MASW3 (Pajar, 2023).



Gambar 16. MASW lintasan 2 (Pajar, 2023)

Dari gambar 16 dapat disimpulkan bahwa pada *cross section* 2 yaitu dari titik pengukuran MASW9, MASW2, MASW4, MASW11, MASW7 dan MASW6, tersusun oleh tanah sedang dan tanah lunak dengan kedalaman yang bervariasi (Pajar, 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data geolistrik resistivitas dan *ground penetrating radar* didapatkan kesimpulan bahwa pada area pembangunan gedung kampus STMKG Tanah Tinggi Tangerang memiliki lapisan pertama yaitu tanah pasiran, tanah urugan, dan *top soil* dengan dengan nilai resistivitas 1,28 Ohm hingga 4,64 Ohm. Lapisan selanjutnya yaitu tanah lunak dengan nilai resistivitas 4,64 Ohm hingga 7,14 Ohm dan tanah sedang dengan nilai resistivitas 11,0 Ohm hingga 26,0 Ohm. Maka untuk kedalaman batuan dasar (*bedrock maupun engineering bedrock*) pada area pembangunan gedung kampus STMKG Tanhtinggi Tangerang belum dapat diinterpretasikan karena terbatasnya kemampuan alat yang digunakan serta terbatasnya lahan penelitian yang mengakibatkan kedalaman penetrasi yang tidak terlalu dalam.

Dari hasil penampang geolistrik resistivitas serta hasil citra GPR dapat disimpulkan bahwa diperkirakan lapisan tanah yang ada pada area pembangunan gedung kampus STMKG Tanhtinggi Tangerang yaitu terdapat lapisan tanah lunak dan basah pada permukaan. Tanah lunak dapat diinterpretasikan pada lapisan awalnya dengan ketebalan berkisar 9 hingga 11 meter, kemudian dibawah lapisan tersebut yaitu lapisan tanah sedang dengan ketebalan berkisar 8 meter hingga 60 meter. Namun ada beberapa area yang memiliki ketebalan tanah sedang sekitar 8 hingga 24 meter yang dibawahnya masih terdapat lapisan tanah lunak.

REFERENSI

- Amir, H., Akmam, A., Bavitra, B., & Azhari, M. (2017). Penentuan Kedalaman Batuan Dasar Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis Dengan Membandingkan Konfigurasi Dipole-Dipole Dan Wenner Di Bukit Apit Puhun Kecamatan Guguk Panjang Kota Bukittinggi. *EKSAKTA: Berkala Ilmiah Bidang MIPA*, 18(01), 19–30. <https://doi.org/10.24036/eksakta/vol18-iss01/13>
- Annan, A. P. (2002). *Ground-Penetrating Radar*. 357–438.
- Balkaya, Ç., Ekinci, Y. L., Çakmak, O., Blömer, M., Arnkens, J., & Kaya, M. A. (2021). A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104272>
- Bermejo, L., Ortega, A. I., Guérin, R., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Parés, J. M., Aracil, E., Bermúdez de Castro, J. M., & Carbonell, E. (2017). 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de

- Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International*, 433, 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.031>
- Cheng, P. H., Gerl, Y. I., & Lee, S. L. (2008). An electric resistivity study of the Chelungpu fault in the Taichung Area, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(3), 241–255. [https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.3.241\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.3.241(T))
- Degroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613–1624. <https://doi.org/10.1190/1.1442813>
- Diallo, M. C., Cheng, L. Z., Rosa, E., Gunther, C., & Chouteau, M. (2019). Integrated GPR and ERT data interpretation for bedrock identification at Cléricy, Québec, Canada. *Engineering Geology*, 248, 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.011>
- Gómez-Ortiz, D., & Martín-Crespo, T. (2012). Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 149–150, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.022>
- Jatmiko, F. A. W., Mandang, I., & Budiono, K. (2016). Interpretasi Sedimen Bawah Permukaan Tanah Dengan Menggunakan Metode GPR (Ground Penetrating Radar) di Daerah Pantai Kulon Progo Daerah Istimewa Yogyakarta. *Prosiding Seminar Sains Dan Teknologi FMIPA Unmul*, 1(1), 13–17.
- Kannaujiya, S., Chatteraj, S. L., Jayalath, D., Champati ray, P. K., Bajaj, K., Podali, S., & Bisht, M. P. S. (2019). Integration of satellite remote sensing and geophysical techniques (electrical resistivity tomography and ground penetrating radar) for landslide characterization at Kunjethi (Kalimath), Garhwal Himalaya, India. *Natural Hazards*, 97(3), 1191–1208. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03695-0>
- Krzeminska, D., Bloem, E., Starkloff, T., & Stolte, J. (2022). Combining FDR and ERT for monitoring soil moisture and temperature patterns in undulating terrain in south-eastern Norway. *Catena*, 212(February), 106100. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106100>
- Lee, S. C. H., Noh, K. A. M., & Zakariah, M. N. A. (2021). High-resolution electrical resistivity tomography and seismic refraction for groundwater exploration in fracture hard rocks: A case study in Kanthan, Perak, Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218(May), 104880. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104880>
- Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 2004 Revised Edition*. Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, July, 136.
- Mendoza, R., Rey, J., Martínez, J., Hidalgo, M. C., & Sandoval, S. (2021). Geophysical characterisation of geologic features with mining implications from ERT, TDEM and seismic reflection (Mining District of Linares-La Carolina, Spain). *Ore Geology Reviews*, 139(PB), 104581. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104581>
- Menteri Pekerjaan Umum, P. (2006). *PERMEN. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum*, 3, 5–65.
- Metwaly, M., & Alfouzan, F. (2013). Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, 4(4), 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.12.005>
- Muallifah, F. (2009). Perancangan Dan Pembuatan Alat Ukur Resistivitas Tanah, *Jurnal Neutrino* 1(2), 179–197.
- Nurlaili, P. (2020). *Pencitraan utilitas bawah permukaan pada segmen area X di Jakarta untuk pembangunan fondasi tol berdasarkan hasil Processing data Ground Penetrating Radar* Repository.Uinjkt.Ac.Id. <http://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/54607>
- Oldenborger, G. A., Routh, P. S., & Knoll, M. D. (2005). Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophysical Journal International*, 163(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02714.x>
- Ortega-Ramírez, J., Bano, M., Cordero-Arce, M. T., Villa-Alvarado, L. A., & Fraga, C. C. (2020). Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient

- foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 174, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103958>
- Pajar, M.W.R., 2023. *Identifikasi Jenis Tanah Menggunakan Metode Multi Channel Analysis of Surface Wave (MASW) di Stasiun Geofisika Tangerang*. Skripsi. Program Sarjana terapan Geofisika. STMKG. Tangerang Selatan.
- Sibul, I., Plado, J., & Jöeleht, A. (2017). Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography for mapping bedrock topography and fracture zones: a case study in Viru-Nigula, NE Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 66(3), 142.
- Suyitno, P, dan Yahya. 1998. The Basement Configuration of the North West Java Area, 3rd Annual Convention of The IPA, Jakarta.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. In *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney (Vol. 127, Issue 3212, pp. 783–785). <https://doi.org/10.1038/127783a0>
- Udphuay, S., Günther, T., Everett, M. E., Warden, R. R., & Briaud, J. L. (2011). Three-dimensional resistivity tomography in extreme coastal terrain amidst dense cultural signals: Application to cliff stability assessment at the historic D-Day site. *Geophysical Journal International*, 185(1), 201–220. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04915.x>
- Wulandari, R. (2013). Analisis Bawah Permukaan Kelurahan Trikora Dan Sekitarnya Menggunakan Metode GPR (Ground Penetrating Radar) dan Geolistrik. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian*.
- Zhang, J., & Revil, A. (2015). Cross-well 4-D resistivity tomography localizes the oil-water encroachment front during water flooding. *Geophysical Journal International*, 201(1), 343–354. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv028>