

Pengembangan Metode *Audio Frequency Magnetotelluric* untuk Keperluan Geoteknik

Idrus M. Alatas¹, Ribka Sherry Tania Dethan²

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, ISTN Jakarta¹

Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik²

Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jl. Moch Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta 12460, Indonesia

Email: idrusalatas@istn.ac.id¹, ribkasherrytania@gmail.com²

Abstrak

Metode audio frequency magnetotelluric (ADMT) adalah suatu metode geofisika yang bekerja berdasarkan gelombang elektromagnetik domain frekuensi sebagai sumber gelombang atau energi untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan. Metode ADMT adalah metode yang non-destruktif, tidak invasif, portabel, dan ramah lingkungan, sehingga dapat digunakan dalam berbagai bidang teknik, dan geologi. Penelitian ini mengembangkan metode ADMT dalam keperluan geoteknik, khususnya untuk penentuan stratigrafi tanah berdasarkan nilai impedansi. Pengukuran dilakukan di dua lokasi, yaitu Kantor HATTI, Ciracas dan Duren Tiga, Jakarta Selatan, dengan analisis impedansi pada tanah clay, silt, dan sand. Metode yang digunakan untuk mendapatkan data geoteknik adalah dengan pengujian SPT dan pengujian laboratorium. Sedangkan untuk mendapatkan nilai impedansi, dilakukan pengukuran pada lintasan sepanjang 30 titik (Ciracas) dan 7 titik (Duren Tiga) dengan interval 1 meter, menggunakan ADMT tipe 300 HT3. Karena keterbatasan alat yang hanya dapat membaca nilai impedansi dengan interval 5 meter, maka dilakukan pengujian ADMT pada elevasi yang beragam, yaitu elevasi 0 sampai elevasi +4 meter. Analisis korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara nilai N-SPT dan impedansi tergolong rendah di kedua lokasi. Selain itu, hasil korelasi impedansi terhadap stratigrafi tanah tidak dapat langsung diterapkan di lokasi lain karena dipengaruhi oleh faktor seperti kandungan mineral logam. Penerapan hasil korelasi dari Kantor HATTI ke Duren Tiga memiliki tingkat kecocokan 70,83%, dengan ketidaksesuaian 29,17%, terutama pada tanah kohesif. Oleh karena itu, metode ADMT dapat digunakan dalam tahap awal penyelidikan tanah, tetapi tetap memerlukan verifikasi melalui pemboran dan deskripsi visual minimal satu titik untuk kalibrasi.

Kata Kunci: *Audio Frequency Magnetotelluric*, Impedansi, Stratigrafi Tanah, Geoteknik, Korelasi N-SPT.

Abstract

The audio frequency magnetotelluric (ADMT) method is a geophysical method that works based on frequency domain electromagnetic waves as a source of waves or energy to determine the subsurface resistivity structure. This study develops the Audio Frequency Magnetotelluric (ADMT) method for geotechnical purposes, particularly for determining soil stratigraphy based on impedance values. Measurements were conducted at two locations: the HATTI Office in Ciracas and Duren Tiga, South Jakarta, with impedance analysis on clay, silt, and sand soils. Geotechnical data were obtained through Standard Penetration Tests (SPT) and laboratory testing. Impedance measurements were carried out along a 30-point line (Ciracas) and a 7-point line (Duren Tiga) with 1-meter intervals, using the ADMT type 300 HT3. Due to the instrument's limitation of reading impedance at 5-meter intervals, measurements were conducted at various elevations, ranging from 0 to +4 meters, to increase vertical resolution. Correlation analysis revealed a weak relationship between N-SPT values and impedance at both locations. Furthermore, impedance-to-stratigraphy correlations could not be directly applied to other sites, as they are influenced by factors such as metallic mineral content. The application of correlation results from Ciracas to Duren Tiga yielded a 70.83% match, with a 29.17% mismatch, particularly in cohesive soils. Thus, the ADMT method can be utilized during the preliminary stage of soil investigation but requires validation through at least one borehole and visual description for calibration.

Keywords: *Audio Frequency Magnetotelluric, Impedance, Soil Stratigraphy, Geotechnical, N-SPT Correlation.*

1. Pendahuluan

Penyelidikan tanah memegang peran penting dalam pembangunan konstruksi bangunan sipil dan merupakan salah satu persyaratan yang wajib dilakukan dalam perencanaan konstruksi bangunan bawah (Solin et al, 2022). Salah satu faktor penentu keberhasilan pelaksanaan suatu proyek sipil adalah input data (data penyelidikan tanah) dengan ketelitian tinggi (Virman, 2013). Penyelidikan tanah yang kurang atau penghematan anggaran untuk penyelidikan tanah terbukti merupakan pilihan ekonomi yang salah, karena dapat menyebabkan peningkatan biaya dan keterlambatan waktu pada pekerjaan konstruksi (Fernandes dan Chaminé, 2023).

Untuk mendapatkan hasil penyelidikan tanah yang baik, pemanfaatan metode lain selain metode geoteknik kerap kali digunakan. Kombinasi dari pengeboran dalam secara geoteknik dengan pengukuran menggunakan metode geofisika terbukti dapat menghasilkan data dan interpretasi stratigrafi tanah yang lebih baik daripada hanya menggunakan metode geoteknik saja. Penggunaan metode geoteknik dan geofisika dapat mengidentifikasi struktur bawah permukaan Shobihah, S (2018) dan memberikan informasi mengenai karakteristik tanah dengan lebih lengkap (Sudha et al, 2008).

Metode geofisika yang sudah dimanfaatkan untuk geoteknik adalah metode geolistrik. Metode geolistrik adalah ilmu yang mempelajari kondisi di bawah permukaan bumi dengan pendekatan fisika berupa sifat – sifat kelistrikan batuan, formasi batuan, atau bagian dari suatu formasi batuan (Vebrianto, 2016). Metode geolistrik sudah banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah geoteknik. Di Jember, Jawa Timur, Hiskiawan (2008) menggunakan metode geolistrik dan geoteknik untuk monitoring pelemahan daya dukung struktur terowongan kereta api di Terowongan Mrawan. Chandrasasi et al. (2018) melakukan analisis rembesan pada maindam Waduk Greneng, Kabupaten Blora. Rizky et al. (2014), melakukan analisis stabilitas Bendungan

Selorejo terhadap beban gempa, Di Swiss utara,

Friedel et al. (2006) melakukan analisis kelongsoran akibat curah hujan dengan menggunakan metode 3D resistivity tomography. Selain metode geolistrik, ada metode geofisika lain yang dapat dikembangkan, yaitu audio frequency magnetotelluric (ADMT).

Metode audio frequency magnetotelluric (ADMT) adalah suatu metode geofisika yang bekerja berdasarkan gelombang elektromagnetik domain frekuensi sebagai sumber gelombang atau energi untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan (Umbara et al, 2014). Metode ADMT adalah metode yang non-destruktif, tidak invasif, portabel, dan ramah lingkungan, sehingga dapat digunakan dalam berbagai bidang teknik, dan geologi (Kasidi, 2022).

ADMT banyak dikembangkan untuk eksplorasi mineral, seperti yang dilakukan Jiang (2023) di Australia. Metode ini juga digunakan untuk eksplorasi deposit tambang (Pitiya, 2022). Di Arab Saudi, Abderahman (2019) menggunakan sistem ADMT-9 TESFM untuk mempelajari akuifer *sandstone* hingga kedalaman 350 m. Di Bali, Silalahi, D et al. (2023) memanfaatkan ADMT 300 HT2 untuk uji posisi sumur bor. Pemanfaatan metode geolistrik dan ADMT dapat digunakan untuk mendeteksi kelongsoran. Penelitian Liu et al (2024) menunjukkan bahwa kombinasi metode geolistrik dan ADMT dapat secara efektif dapat mendeteksi karakteristik struktural kelongsoran pada karst dan dapat memperoleh lokasi retakan longsor. Hal ini tentunya dapat memberikan data yang bermanfaat untuk analisis stabilitas lereng pada area longsor.

Meskipun dapat dimanfaatkan untuk keperluan geoteknik, parameter yang pasti antara hasil dari ADMT dengan parameter geoteknik belum dikenal. Menyadari hal tersebut, penelitian ini berfokus untuk mengembangkan metode ADMT untuk keperluan geoteknik, dengan cara mengkorelasikan hasil impedansi tanah yang diperoleh ADMT dengan data geoteknik, yaitu jenis lapisan tanah dan konsistensi tanah yang direpresentasikan dengan nilai N-SPT.

Tanah

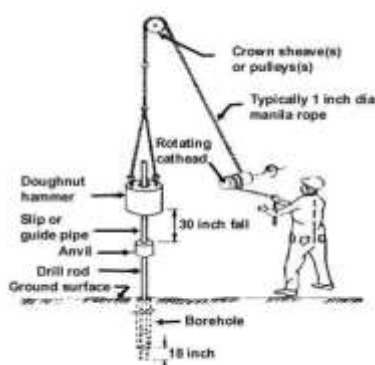
Tanah menurut Dokuchaev dalam (Fauziek dan Suhendra, 2018) adalah lapisan permukaan bumi yang berasal dari material induk yang telah mengalami proses lanjut.

Pengeboran Inti

Pengeboran inti adalah suatu cara membor tanah di lapangan menggunakan bor mesin. Pengeboran dimaksudkan untuk mengetahui jenis litologi tanah atau batuan, tingkat serta sifat – sifat fisik mekanik masing – masing tanah atau batuan bawah permukaan (Alatas, I. M., dan Sugiarto, 2017).

Standard Penetration Test (SPT)

Berdasarkan SNI 4153:2008, *standard penetration test* (SPT) atau uji penetrasi standar adalah suatu uji yang dilaksanakan bersamaan dengan pengeboran untuk mengetahui, baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan. Uji SPT ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alat Bor

Sumber: Sarker & Abedin, 2015

Pelaksanaan pengujian dibagi dalam tiga tahap, yaitu berturut – turut setebal 150 mm untuk masing – masing tahap. Tahap pertama dicatat sebagai kedudukan, sementara jumlah pukulan untuk memasukkan tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan SPT (dinyatakan dalam pukulan/0,3 m atau pukulan per feet (ft)), sehingga didapatkan:

$$N-SPT = N_2 + N_3 \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

N-SPT : *Number of Standard Penetration Test* (blow/counts)

N₂ : Nilai pukulan kedua

N₃ : Nilai pukulan ketiga

Nilai N-SPT yang didapatkan dari persamaan 2.1 digunakan sebagai indikator kepadatan dan konsistensi tanah (Hardjowigeno, 2010). Korelasi Nilai N-SPT dengan konsistensi tanah kohesif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1.

Korelasi N-SPT dengan Konsistensi Tanah Kohesif

No.	N-SPT	Consistency
1	<2	Very Soft
2	2 – 4	Soft
3	4 – 8	Medium
4	8 – 15	Stiff
5	15 – 30	Very Stiff
6	>30	Hard

Sumber: Terzaghi and Peck (1967) dalam Kalantary et al (2009) telah diolah kembali

Korelasi N-SPT dengan kepadatan tanah granular disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Korelasi N-SPT dengan Konsistensi Tanah Kohesif

No.	N-SPT	Relative Density
1	0 – 4	Very Loose
2	4 – 10	Loose
3	10 – 30	Medium
4	30 – 50	Dense
5	>50	Very Dense

(Sumber : Terzaghi and Peck (1948) dalam Hossain (2016) telah diolah kembali)

Metode Audio Frequency Magnetotelluric (ADMT)

Metode *Audio Frequency Magnetotelluric* (ADMT) adalah metode eksplorasi geofisika dengan elektromagnetik yang memetakan sifat kelistrikan (distribusi) bumi pada bawah permukaan bumi (Abderahman, 2019).

Kelebihan dan Kekurangan ADMT

Penggunaan ADMT memiliki keunggulan untuk eksplorasi bawah permukaan, diantaranya adalah mudah dioperasikan. Pengoperasian berbasis Android dengan koneksi via Bluetooth juga membuat alat ini mudah untuk dioperasikan. Alat ini dapat digunakan di segala medan (beton, aspal berbatu, dan air). Karena alat ini

menggunakan sensor elektromagnetik, maka alat ini dapat digunakan tanpa kabel (wireless) (Silalahi et al., 2023).

Walaupun demikian, alat ini juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan diantaranya, alat ini sangat peka terhadap gelombang elektromagnetik lain dan output satuan yang dihasilkan dari alat ini masih dalam bentuk impedansi (mV/nT), satuan ini masih kurang familiar untuk digunakan.

Teori Medan Elektromagnetik dalam ADMT
 Metode ADMT memanfaatkan medan elektromagnetik yang berkorelasi dengan persamaan Maxwell. Fenomena gelombang elektromagnetik arus total ini dapat diturunkan dari persamaan Maxwell sebagai berikut.

$$\nabla \times H = j \dots\dots\dots(2)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \dots\dots\dots(3)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

- $\nabla \times$: Operasi Curl
- H : Medan magnet, (A/m)
- E : Medan listrik, (Volt/m)
- B : Induksi magnetik, (Weber/m² atau Tesla)
- D : Perpindahan listrik (Coulomb/ m²)
- J : Rapat arus, (Ampere/ m²)
- t : Waktu (s)

Persamaan 2 menyatakan bahwa medan magnet menghasilkan rapat arus. Persamaan 3 menyatakan rapat arus terhadap waktu menghasilkan medan magnet sekunder. Persamaan 4 menyatakan perubahan medan magnet terhadap waktu dapat menimbulkan arus listrik.

Impedansi

Imperdansi pada geofisika merujuk pada sifat yang dimiliki material di bawah permukaan tanah (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953 dalam Simpson dan Bahr, 2005). Variasi medan magnet (H_y) dan medan elektrik (E_x) yang diukur secara simultan dapat diaplikasikan pada persamaan impedansi untuk memperoleh nilai resistivitas. Nilai impedansi menurut Ward dan Wannamaker (1983) dalam (Umbara et al, 2014) diperoleh dari persamaan:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = - \frac{E_y}{H_x} \dots\dots\dots(5)$$

$$\rho = \frac{T}{2\pi\mu} |Z|^2 \dots\dots\dots(6)$$

atau

$$\rho = 0,2 T \frac{|E|^2}{|H|^2} \dots\dots\dots(7)$$

dimana:

- Z : Impedansi, (mV/nT)
- E_x : Komponen medan listrik dalam arah x (horizontal) (V/m)
- H_y : Komponen medan magnet dalam arah y (horizontal) (A/m)
- E_y : Komponen medan listrik dalam arah y (horizontal) (V/m)
- H_x : Komponen medan magnet dalam arah x (horizontal) (A/m)
- ρ : Resistivitas, (Ω -m)
- E : Medan listrik horizontal, (mV/km)
- H : Medan Magnet *Orthogonal horizontal*, (gamma)
- T : Periode, (s)

Berdasarkan persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa ada hubungan searah antara metode resistivitas dengan metode ADMT. Dimana saat nilai resistivitas bertambah, nilai Impedansi juga bertambah.

Alat ADMT

Peralatan ADMT yang digunakan pada penelitian adalah ADMT tipe 300 HT 3. Alat ADMT yang digunakan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Set alat *Audio Frequency Magnetotelluric* (ADMT)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, alat ADMT ini memiliki panjang 100 cm. Alat ADMT yang digunakan dalam penelitian dapat mengukur hingga kedalaman 300 m. Alat ini dioperasikan dengan cara menghubungkan *porcelain probe* dengan aplikasi AIDU yang sudah di install pada HP Android menggunakan *Bluetooth*.

2. Metodologi

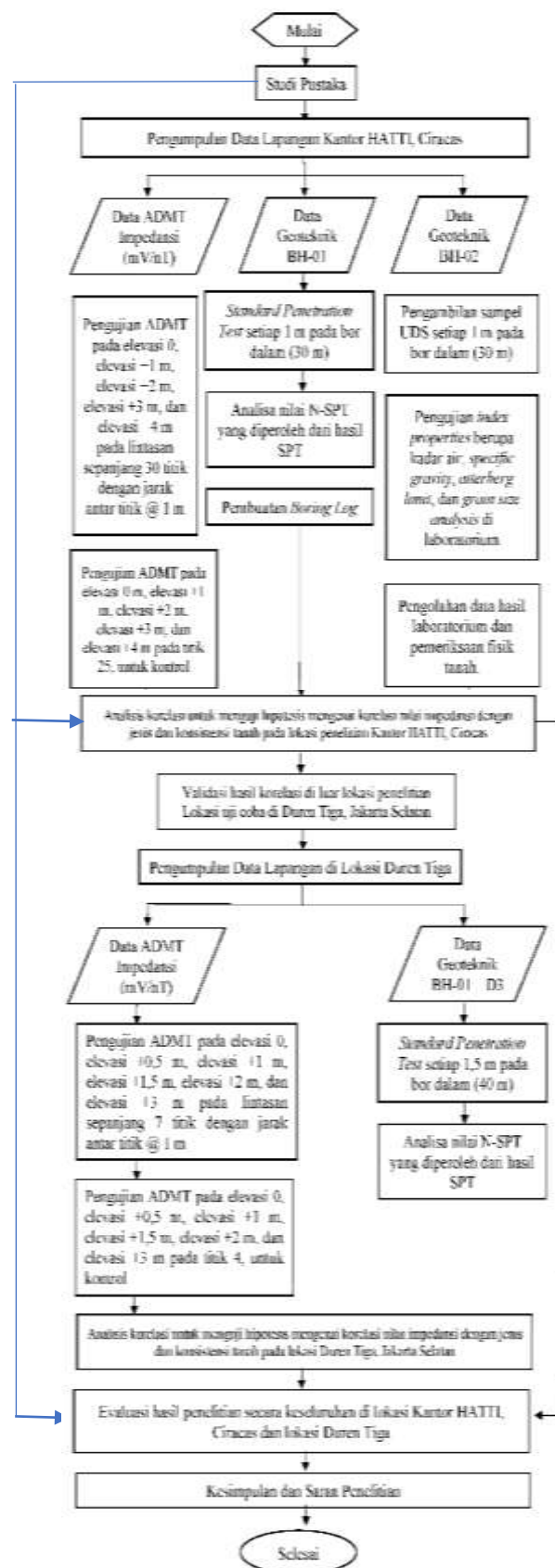
Adapun diagram alir penelitian dan konsep pemikiran metode penelitian untuk penggunaan alat ADMT untuk keperluan penyelidikan geoteknik secara ringkas dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.

Seperti yang dijelaskan pada Gambar 4, penelitian ini dilakukan di 2 lokasi dan dalam periode waktu yang berbeda. Penelitian pertama dilakukan di halaman kantor Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Jl. Asmin no. 45, RT 008 / RW 003, Susukan, Kecamatan Ciracas, Kota Jakarta Timur, Indonesia, pada tanggal 15 – 24 Agustus 2024. Lokasi Kantor Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI) ditunjukkan pada Gambar 5.

Penelitian kedua dilakukan di Duren Tiga, Jakarta Selatan. Penelitian ini berlangsung pada tanggal 1 Februari 2025 dan 4 Februari 2025. Lokasi uji coba Duren Tiga, Jakarta Selatan ditunjukkan pada Gambar 6.

Penelitian dimulai dengan studi pustaka, yang dilanjutkan dengan pengumpulan data ADMT untuk mendapatkan nilai impedansi dan data geoteknik yang bersumber dari penyelidikan lapangan pada lokasi penelitian yang bertempat di Kantor HATTI, Ciracas. Dalam pengambilan data geoteknik pada lokasi penelitian Kantor HATTI, Ciracas dilakukan pengeboran dalam sebanyak 2 titik, yaitu BH-01 dan BH-02, hingga kedalaman 30,0 m. Pengeboran dalam ini dilakukan menggunakan metode pengeboran bilas (*wash boring*). BH-01 dan BH-02 dilakukan di titik 25 pada lintasan dan jarak antara 2 titik bor ini adalah 1 meter.

Seperti yang disajikan pada Gambar 7, pada titik BH – 01 dilakukan uji SPT setiap 1 meter dan pada titik BH – 02 dilakukan pengambilan *undisturbed sample* (UDS) yang dilakukan setiap 1 m. Setelah itu UDS dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian laboratorium berupa pengujian kadar air, berat jenis tanah, uji atterberg, dan analisis butir.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Lokasi Penelitian Kantor HATTI
 Sumber: *Google Maps*, 2024



Gambar 6. Lokasi Penelitian di Ciracas
 Sumber: *Google Maps*, 2025



Gambar 7. Lokasi Titik Pengeboran Dalam dan ADMT Kantor HATTI, Ciracas

Pengukuran ADMT dilakukan pada elevasi 0, elevasi +1 m, elevasi +2 m, elevasi +3 m, dan elevasi +4 m pada lintasan sepanjang 30 titik dengan jarak antar titik 1 meter. Selanjutnya dilakukan pengujian ADMT pada titik 25 sebanyak 6 kali untuk kontrol.

Selanjutnya, dilakukan validasi hasil yang didapatkan pada lokasi lain di luar lokasi penelitian. Validasi hasil dilakukan di Duren Tiga, Jakarta Selatan. Validasi hasil ini dilakukan dengan pengumpulan data lapangan pada lokasi Duren Tiga.

Pengambilan data geoteknik pada lokasi Duren Tiga, dilakukan pengeboran dalam sebanyak 1 titik, yaitu BH-01 D3 hingga kedalaman -40,0 m. Pengeboran dalam ini dilakukan menggunakan metode pengeboran *rotary core drilling*. Pengeboran dalam BH-01 D3 dilakukan di titik 4 pada lintasan dan jarak antara titik bor ini dengan titik 4 adalah 1 m.



Gambar 8. Lokasi Titik Pengeboran Dalam dan ADMT Duren Tiga

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, pengambilan data impedansi dilakukan pada lintasan sepanjang 7 titik dengan jarak antar titik 1 m. Pengujian ADMT di Duren Tiga dilakukan pada elevasi 0, elevasi +0,5 m, elevasi +1 m, elevasi +1,5 m, elevasi +2 m, dan elevasi +3 m pada lintasan sepanjang 7 titik dengan jarak antar titik 1 meter. Selanjutnya dilakukan pengujian ADMT pada titik 4 untuk kontrol sebanyak 6 kali.

Data geoteknik yang didapatkan dari pengeboran dalam BH-01 di Kantor HATTI, Ciracas berupa nilai N-SPT yang diperoleh dari uji SPT diolah dalam bentuk boring log. Sedangkan hasil UDS dari BH-02 diuji di laboratorium *Geoinves Soil Mechanic Laboratory* untuk pengujian laboratorium. Untuk data geoteknik yang didapatkan dari pengeboran dalam BH-01 D3 di Duren Tiga berupa nilai N-SPT, juga diolah dalam bentuk boring log.

Data impedansi hasil pengukuran ADMT dari aplikasi AIDU di Kantor HATTI, Ciracas dan lokasi Duren Tiga diolah menggunakan *software Microsoft excel* dan dimodelkan secara 2D dengan *software Surfer 13*.

Setelah itu dilakukan analisis korelasi data geoteknik dengan data impedansi. Korelasi ini ditentukan dengan menganalisis grafik perubahan data impedansi dan data N-SPT.

3. Hasil dan Pembahasan

a. Analisis Data Kantor HATTI, Ciracas

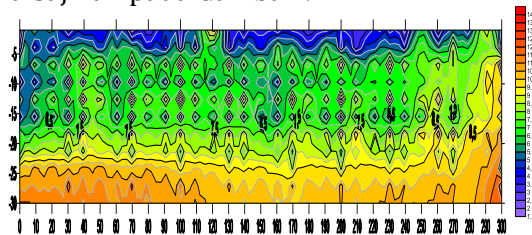
Hasil dari data boring log BH – 01 Kantor HATTI, Ciracas menunjukkan hasil yang tersaji pada Tabel 3.

Tabel 3.

Lapisan Tanah di Area Kantor HATTI, Ciracas

Kedalaman (m)	Keterangan Lapisan Tanah
0 – 7.00	<i>Silty CLAY</i> , konsistensi <i>medium</i>
7.00 – 14.00	<i>Clayey SILT</i> , konsistensi <i>soft – medium</i>
14.00 – 15.00	<i>Clayey SILT Cemented</i> , konsistensi <i>stiff</i>
15.00 – 17.00	<i>Clayey SILT</i> , konsistensi <i>very stiff</i> .
17.00 – 18.00	<i>Sandy Clayey SILT</i> , konsistensi <i>medium</i> .
18.00 – 20.00	<i>Clayey SILT</i> , konsistensi <i>very stiff</i> .
20.00 – 21.00	<i>Sandy SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
21.00 – 22.00	<i>Silty SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
22.00 – 24.00	<i>Cemented SAND</i> , konsistensi <i>very hard</i>
24.00 – 28.00	<i>Gravelly SAND</i> , konsistensi <i>very hard</i> .
28.00 – 30.00	<i>Fine SAND</i> , konsistensi <i>hard</i> .

Hasil dari pengukuran ADMT di Kantor HATTI, Ciracas pada lintasan 30 titik disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kontur Nilai Impedansi Lintasan 30 Titik Kantor HATTI, Ciracas

Gambar 9 menunjukkan impedansi fluktuatif di Kantor HATTI, Ciracas. Dari permukaan hingga kedalaman 15–20 m, beberapa titik memiliki impedansi lebih rendah, mengindikasikan keberadaan muka air tanah. Setelah kedalaman 20 m, impedansi meningkat, menunjukkan lapisan tanah lebih konsisten dan padat.

Hasil pengukuran ADMT pada titik 25 yang dilakukan sebanyak 6 kali disajikan pada Tabel 4.

Pengukuran tersebut menunjukkan hasil yang memiliki tren meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Pada kedalaman -1,0 m hingga -15,0 m, nilai impedansi cenderung rendah dengan rentang nilai impedansi antara 2,70 – 11,21 mV/mT. Setelah kedalaman -15,0 m, nilai impedansi cenderung tinggi dengan rentang nilai impedansi antara 9,0 hingga 11,21 mV/nT.

Tabel 4.

Hasil Pengukuran ADMT pada Titik 25 Kantor HATTI, Ciracas

Kedalaman (m)	Percobaan ADMT, Impedasi(mV/nT)					
	1	2	3	4	5	6
1	11	8	5	3	4	7
2	4	6	8	6	4	6
3	10	4	6	4	9	10
4	4	4	7	4	4	9
5	8	6	11	10	6	8
6	11	10	11	10	7	7
7	8	8	8	7	8	8
8	7	8	8	10	8	8
9	9	9	9	8	9	9
11	10	10	10	11	11	10
12	8	8	8	8	7	8
13	8	8	9	10	8	8
14	9	9	9	9	9	9
15	8	9	8	7	7	11
16	11	11	10	11	10	10
17	8	8	8	8	8	8
18	8	8	9	10	8	9
19	9	9	9	9	9	9
20	8	9	7	7	7	11
21	10	11	10	11	11	11
22	8	8	8	8	8	8
23	10	10	10	10	10	10
24	9	9	9	9	9	9
25	11	11	11	11	11	11
26	10	10	10	11	11	11
27	8	8	8	8	8	8
28	10	10	10	10	10	10
29	9	9	9	9	9	9
30	11	11	11	11	11	11

Pengukuran tersebut menunjukkan hasil yang memiliki tren meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Pada kedalaman -1,0 m hingga -15,0 m, nilai impedansi cenderung rendah dengan rentang nilai impedansi antara 2,70 – 11,21 mV/mT. Setelah kedalaman -15,0 m, nilai impedansi cenderung tinggi dengan rentang nilai impedansi antara 9,0 hingga 11,21 mV/nT.

Nilai impedansi dan N-SPT di Kantor HATTI, Ciracas kemudian diperbandingan antara nilai impedansi dan N-SPT terhadap kedalaman pada titik 25. Hasil analisis korelasi antara nilai N-SPT dan nilai impedansi pada Kantor HATTI, Ciracas menunjukkan korelasi yang lemah antara kedua variabel dengan $R^2 = 0,181$.

Interpretasi nilai impedansi dengan jenis tanah di Kantor HATTI, Ciracas dapat dikategorikan menjadi 6 jenis, yaitu *Silty CLAY* konsistensi *soft – medium*, *SILT* konsistensi *soft – medium*, *SILT*, konsistensi *stiff – very stiff*, *SAND*, konsistensi *medium*, *SAND* konsistensi

hard, dan *SAND* konsistensi *very hard* yang tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5.

Rentang Nilai Impedansi terhadap Jenis Tanah di Kantor HATTI, Ciracas

Jenis Tanah	Rentang Nilai Impedansi di Kantor HATTI, Ciracas (mV/nT)
<i>Silty CLAY, soft – medium</i>	4,21 – 7,66
<i>SILT, soft – medium</i>	7,60 – 8,09
<i>SILT, stiff – very stiff</i>	6,55 – 8,32
<i>SAND, medium</i>	8,32 – 9,22
<i>SAND, hard</i>	9,22 – 9,81
<i>SAND, very hard</i>	9,70 – 11,03

b. Analisis Data Duren Tiga, Jakarta Selatan

Hasil dari data *boring log* BH – 01 D3 Duren Tiga menunjukkan hasil yang tersaji pada Tabel 6.

Tabel 6.

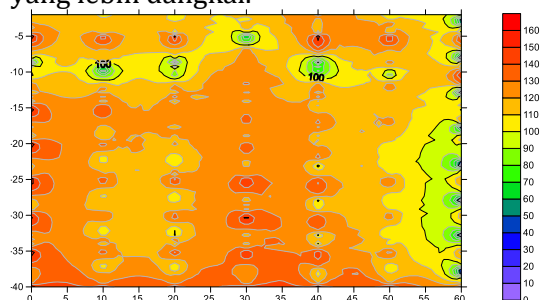
Lapisan Tanah di Duren Tiga, Jakarta Selatan

Kedalaman (m)	Keterangan Lapisan Tanah
0,0 – 4,0	<i>Silty CLAY</i> , konsistensi <i>medium – stiff</i>
4,0 – 6,0	<i>Sandy SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
6,0 – 7,5	<i>SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
7,5 – 9,5	<i>Silty Fine SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
9,5 – 12,0	<i>Sandy SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
12,0 – 14,0	<i>Silty Fine SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
14,0 – 16,5	<i>Gravelly SAND</i> , konsistensi <i>very hard</i>
16,5 – 17,5	<i>Medium to Coarse SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
17,5 – 19,5	<i>SILT with some Fine Sand</i> , konsistensi <i>hard</i>
19,5 – 21,0	<i>Sandy SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
21,0 – 22,5	<i>Gravelly SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
22,5 – 24,0	<i>Silty Fine SAND</i> , konsistensi <i>dense</i>
24,0 – 26,0	<i>Sandy SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>
26,0 – 30,5	<i>Silty Fine to Medium SAND</i> , konsistensi <i>hard</i>
30,5 – 32,0	<i>SILT</i> , konsistensi <i>hard</i>

Hasil dari pengukuran ADMT di Duren Tiga, Jakarta Selatan pada lintasan 7 titik disajikan pada Gambar 11.

Gambar 11 menunjukkan impedansi tinggi di Duren Tiga, Jakarta Selatan,

dengan dominasi warna oranye dan merah hingga kedalaman 40 m. Kontur hijau dan kuning dengan impedansi 50–90 mV/nT muncul di sekitar titik 7 pada kedalaman yang lebih dangkal.



Gambar 11. Kontur Nilai Impedansi Lintasan 7 Titik Duren Tiga, Jakarta Selatan

Hasil pengukuran ADMT pada titik 4 yang dilakukan sebanyak 6 kali disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7.

Hasil Pengukuran ADMT pada Titik 4 Duren Tiga

Kedalaman (m)	Percobaan ADMT, Impedansi(mV/nT)					
	1	2	3	4	5	6
3	11	20	11	21	10	13
6	43	37	35	36	39	39
9	47	47	41	42	42	47
12	43	43	42	41	41	41
15	28	27	29	30	32	31
18	20	19	20	20	21	20
21	42	41	43	40	40	40
24	47	46	47	46	46	47
27	41	43	43	42	43	41
30	33	33	34	33	32	33
33	21	21	20	20	20	19
36	41	43	41	43	42	43
39	46	46	47	45	47	44
40	36	32	33	33	33	32

Nilai impedansi dari permukaan hingga sekitar kedalaman 12,0 m, lalu menunjukkan fluktuasi nilai impedansi tanpa tren peningkatan atau penurunan yang jelas seiring bertambahnya kedalaman.

Nilai impedansi dan N-SPT di Duren Tiga, Jakarta Selatan kemudian diperbandingkan antara nilai impedansi dan N-SPT terhadap kedalaman pada titik 4. Hasil analisis korelasi antara nilai N-SPT dan nilai impedansi pada lokasi uji coba Duren Tiga menunjukkan korelasi yang lemah antara nilai N-SPT dan nilai impedansi dengan nilai $R^2 = 0,1427$.

Interpretasi nilai impedansi dengan jenis tanah di lokasi uji coba Duren Tiga,

Jakarta Selatan dapat dikategorikan menjadi 4 jenis, yaitu *CLAY* konsistensi *medium*, *SILT* konsistensi *hard*, *SAND*, konsistensi *hard*, *SAND* konsistensi *very hard* yang tersaji pada Tabel 8.

Tabel 8.

Rentang Nilai Impedansi terhadap Jenis Tanah di Lokasi Uji Coba Duren Tiga

Jenis Tanah	Rentang Nilai Impedansi di Kantor HATTI, Ciracas (mV/nT)
<i>CLAY, medium</i>	9,44 – 19,02
<i>SILT, hard</i>	35,46 – 39,00
<i>SAND, hard</i>	35,42 – 39,43
<i>SAND, very hard</i>	36,22 – 46,44

c. Kecocokan Rentang Nilai Impedansi Kantor HATTI, Ciracas terhadap Duren Tiga

Untuk mengetahui seberapa jauh rentang nilai impedansi yang telah didapatkan di lokasi penelitian (Kantor HATTI, Ciracas) dapat diterapkan di lokasi uji coba Duren Tiga, maka dilakukan interpretasi dengan menggunakan rentang nilai impedansi terhadap jenis tanah hasil pengukuran di Kantor HATTI, Ciracas dengan hasil pengukuran ADMT di titik 4 lokasi uji coba Duren Tiga. Hasil ini dibandingkan dengan data *boring log*, seperti ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9.

Tingkat Kecocokan Interpretasi Nilai Impedansi dengan Data *Boring Log* di Duren Tiga

Kedalaman (m)	I (mV/nT)	Interpretasi Jenis Tanah	Kecocokan
2	114,58	SAND	TIDAK
3	100,41	SAND	TIDAK
3,5	130,90	SAND	TIDAK
4	109,30	SAND	TIDAK
4,5	110,40	SAND	TIDAK
5	42,97	SAND	TIDAK
7	135,90	SAND	TIDAK
8	113,32	SAND	COCOK
8,5	141,00	SAND	COCOK
9	109,30	SAND	COCOK
9,5	131,53	SAND	COCOK
10	123,91	SAND	TIDAK
12	132,98	SAND	COCOK
13	111,97	SAND	TIDAK
13,5	140,18	SAND	TIDAK
14	106,26	SAND	TIDAK
14,5	128,29	SAND	TIDAK
15	125,53	SAND	TIDAK
17	135,90	SAND	TIDAK
18	110,51	SAND	TIDAK
18,5	141,84	SAND	COCOK
19	104,25	SAND	COCOK

Tabel 9.

Tingkat Kecocokan Interpretasi Nilai Impedansi dengan Data *Boring Log* di Duren Tiga (lanjutan)

Kedalaman (m)	I (mV/nT)	Interpretasi Jenis Tanah	Kecocokan
19,5	127,76	SAND	COCOK
20	134,77	SAND	COCOK
22	128,18	SAND	TIDAK
23	105,54	SAND	COCOK
23,5	145,74	SAND	COCOK
24	109,30	SAND	COCOK
24,5	123,06	SAND	COCOK
25	157,08	SAND	COCOK
27	127,53	SAND	COCOK
28	107,46	SAND	COCOK
28,5	145,74	SAND	TIDAK
29	108,62	SAND	COCOK
29,5	123,61	SAND	COCOK
30	157,81	SAND	TIDAK
32	129,88	SAND	COCOK
33	107,67	SAND	COCOK
33,5	144,11	SAND	COCOK
34	103,93	SAND	COCOK
34,5	124,54	SAND	TIDAK
35	154,51	SAND	TIDAK
37	128,56	SAND	TIDAK
38	113,23	SAND	COCOK
38,5	142,30	SAND	COCOK
39	102,97	SAND	COCOK
39,5	126,77	SAND	COCOK
40	155,09	SAND	COCOK

Dari 48 data nilai impedansi yang ada (Tabel 7), kecocokan rentang nilai impedansi di lokasi penelitian Kantor HATTI, Ciracas yang diterapkan pada lokasi tryout Duren Tiga dan divalidasi dengan hasil boring log memiliki tingkat kecocokan 70,83% (34 data) dan ketidakcocokan 29,17%. (14 data). Data yang cenderung tidak cocok adalah tanah kohesif.

4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Rentang nilai impedansi tanah bervariasi di setiap lokasi:
 - Kantor HATTI, Ciracas: Clay (4,21–7,66 mV/nT), Silt (7,60–8,32 mV/nT), Sand (8,32–11,03 mV/nT).
 - Duren Tiga, Jakarta Selatan: Clay (9,44–19,02 mV/nT), Silt (35,46–39,00 mV/nT), Sand (35,42–46,44 mV/nT).
2. Hubungan antara nilai impedansi dan N-SPT tergolong rendah.

3. Korelasi impedansi dengan stratigrafi tanah tidak dapat langsung diterapkan ke lokasi lain karena dipengaruhi faktor seperti kandungan mineral logam.
4. Penerapan korelasi dari Kantor HATTI ke Duren Tiga memiliki tingkat kecocokan 70,83% dan ketidakcocokan 29,17%. Data yang cenderung tidak cocok adalah tanah kohesif.
5. Untuk menentukan stratigrafi tanah pada tahap awal penyelidikan tanah dapat dipakai uji ADMT. Dibandingkan dengan metode konvensional, seperti pengeboran inti dan uji SPT, ADMT menawarkan beberapa keunggulan antara lain: bersifat non-destruktif, portabel, cepat dalam pengambilan data. Akan tetapi masih diperlukan pengeboran tanah (deskripsi tanah secara visual), minimal 1 titik untuk tujuan kalibrasi.

Acknowledgement

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Ir. M. Idrus Alatas, M.Sc. sebagai perwakilan HATTI dan seluruh dosen di Program Studi Magister Teknik Sipil ISTN yang telah membantu selama proses penelitian dan penyusunan jurnal ini.

Daftar Pustaka

- Abderahman, A. dan Kotb, A. (2019).** Magnetotelluric Deep Into Ground Water Exploration. Bsc Research Essay. Faculty of Science Geology Department, Helwan University.
- Alatas, I. dan Sugiarto. (2017).** Korelasi Parameter Kuat Geser Tanah Terhadap N-SPT Pada Tanah Lempung Over Konsolidasi di Jakarta dan Sekitarnya. Institut Sains dan Teknologi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008).** Tata Cara Pencatatan dan Identifikasi Hasil Pengeboran Inti (SNI 2436:2008).
- Chandrasasi, D., et al (2018).** Penerapan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner–Schlumberger untuk Analisis Rembesan pada Maindam Waduk Greneng, Kabupaten Blora. Jurnal Teknik Pengairan, Volume 9 No. 2, pp.114-124. DOI: <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2018.009.02.5>
- Fauziek, M. dan Suhendra, A. (2018).** Efek Dari Dynamic Compaction (Dc) Terhadap Peningkatan Kuat Geser Tanah. JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil, Volume 1 No.2, pp. 205-214. DOI: <https://doi.org/10.24912/jmts.v1i2.2683>
- Fernandes, I., & Chaminé, H. I. (2023).** In Situ Geotechnical Investigations. In Springer Tracts in Civil Engineering (pp. 29-54). (Springer Tracts in Civil Engineering). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_2
- Friedel, S., et al (2006).** Investigation Of A Slope Endangered By Rainfall-Induced Landslides Using 3D Resistivity Tomography and Geotechnical Testing. Journal of Applied Geophysics, Volume 60 No.2, pp. 100-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.001>
- Hardjowigeno, S. (2010).** Ilmu Tanah (edisi baru). Akademika Pressindo. Jakarta.
- Hiskiawan, P., et al (2008).** Penerapan Metode Geofisika Terpadu (Ground Penetrating Radar (GPR), Geolistrik dan Geoteknik) Untuk Monitoring Pelemahan Daya Dukung Struktur Terowongan Kereta Api. Studi Kasus: Terowongan Mrawan, Jember-Jatim. Repository Universitas Jember.
- Hossain, S. (2016).** Effects Of Drop Energy On SPT Value Of Soil In Bangladesh Context. Bangladesh University of Engineering and Technology, (Theses).
- Ibrahim, Marcho. (2024).** Evaluasi Back Analysis Daya Dukung Pondasi Tiang Berdasarkan Hasil Loading Test dan Pile Driving Analyzer. Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi, Volume 34 No.2. DOI: <https://doi.org/10.37277/stch.v34i2.2044>
- Jiang, W., et al (2023).** Probabilistic Inversion Of Audio-Frequency Magnetotelluric Data And Application To Cover Thickness Estimation For Mineral Exploration In Australia. Journal of Applied Geophysics,

- Volume 208, 104869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104869>
- Kalantary, F., et al. (2009).** An Investigation On The Su-NSPT Correlation Using GMDH Type Neural Networks And Genetic Algorithms. *Engineering Geology*, Volume 104, Issues 1-2, pp.144-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.006>
- Kasidi, S. (2022).** Groundwater exploration using Advance Magnetotelluric (ADMT-600S-X) in Tsahuda Road Campus Adamawa state University Mubi, Adamawa State. *Adamawa State University Journal of Scientific Research*, Volume 10, Issues 1, ADSUJSR1001007.
- Liu, Y., et al (2024).** Application Of High-Density Resistivity Method And Audio Frequency Magnetotelluric Method In The Structure Detection Of Houchang Landslide. *Carsologica Sinica*, Volume 43 Issues 2, pp. 441-453. DOI: <http://dx.doi.org/10.11932/karst20240208>
- Manaf, F. (2015).** Penentuan Jenis dan Karakteristik Tanah Sebagai Tanah Dasar Badan Jalan. *Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, Volume 25 No.1. DOI: <https://doi.org/10.37277/stch.v25i1.142>
- Pitiya, R., et al (2022).** Audio Magnetotellurics Study Of The Geoelectric Structure Across The Zhugongtang Giant Lead-Zinc Deposit, NW Guizhou Province, China. *Minerals*, Volume 12(12), 1552. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121552>
- Rizky, A., et al (2014).** Pemanfaatan Data Electrical Resistivity Tomography Dalam Analisis Stabilitas Bendungan Selorejo Terhadap Beban Gempa. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*. Volume 1 No. 3, pp. 1250-1259.
- Sarker, D. dan Abedin, Z. (2015).** Applicability Of Standard Penetration Test In Bangladesh and Graphical Representation Of SPT-N Value. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, Volume 4 Issues 41, pp.55-58.
- Shobihah, S. (2018).** Identifikasi struktur bawah permukaan dengan menggunakan geolistrik konfigurasi Wenner-schlumberger dan data SPT (Standart Penetration Test): Studi kasus Jalan Tol Manado-Bitung. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim (Skripsi).
- Silalahi, D., et al (2023).** Uji Posisi Sumur Bor Terhadap Akuifer Menggunakan Metode Audio Magnetotelluric (ADMT). *Kappa Journal*, Volume 7 No.3, pp.458-467. DOI: <https://doi.org/10.29408/kpj.v7i3.21468>
- Simpson, F. dan Bahr, K. (2005).** Practical magnetotellurics. Cambridge University Press.
- Solin, D., et al (2022).** Analisis Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang pada Tanah Berlempung Berdasarkan Data Penyelidikan Tanah. *AGREGAT*, Volume 7 No. 1, pp. 655-662. DOI: <https://doi.org/10.30651/ag.v7i1.13319>
- Sudha, K., et al (2009).** Soil Characterization Using Electrical Resistivity Tomography and Geotechnical Investigations. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 67, Issue 1, pp.74-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.012>
- Umbara, I., et al (2014).** Penerapan Metode Magnetotellurik Dalam Penyelidikan Sistem Panasbumi. *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-7. UGM*.
- Vebrianto, S. (2016).** Eksplorasi Metode Geolistrik. Universitas Brawijaya Press.
- Virman, V. (2013).** Analisis Data Geolistrik Dan Data Uji Tanah Untuk Menentukan Struktur Bawah Tanah Daerah Skyland Distrik Abepura Papua. *Jurnal Fisika Unnes*, Volume 3 No.1, 80253. DOI: <https://doi.org/10.15294/jf.v3i1.3965>