

Evaluasi karakteristik fisik lapisan tanah menggunakan metode geolistrik

Ahmad Rifqi Asrib¹, Muhammad Reza Hasrul^{1*}, Moe Kaymuiddin Asnur¹

¹Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan

Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar

Jl. Daeng Tata Raya, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia. 90222

*E-mail: mrezahunm@gmail.com

Abstrak: Pelapukan batuan menghasilkan tanah yang berfungsi sebagai dasar pembangunan. Struktur yang lebih tinggi dari permukaan tanah memberikan tekanan pada tanah di bawahnya, menyebabkan tegangan dan perubahan bentuk yang mempengaruhi stabilitas bangunan. Pondasi bangunan harus ditempatkan di tanah keras atau tanah yang telah dipadatkan untuk menghindari kesalahan konstruksi. Metode geolistrik adalah cara yang cepat dan efisien untuk menentukan sifat tanah di bawah permukaan dengan mengukur resistansi tanah terhadap arus listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik fisik lapisan tanah menggunakan metode geolistrik konfigurasi Wenner di area sekitar Stadion Barombong, Kecamatan Tamalate, Kota Makassar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode geolistrik efektif dalam menentukan struktur bawah permukaan dan karakteristik fisik tanah. Proses inversi dilakukan dengan iterasi lima kali, menghasilkan model resistivitas bawah permukaan yang lebih akurat dengan nilai RMS error menurun hingga 32,9% pada kedalaman 36,9 meter. Tiga lapisan utama diidentifikasi: lapisan pasir hingga pasir berlempung dengan resistivitas 2,15 – 20,5 Ωm , lapisan air asin atau air laut dengan resistivitas 0,00760 – 0,072 Ωm pada kedalaman 18 – 30 meter, dan lapisan padat pada kedalaman 31,3 – 36,9 meter. Korelasi hasil geolistrik dengan hasil uji Standard Penetration Test (N-SPT) diperlukan untuk memperoleh informasi tambahan mengenai kekuatan dan densitas tanah. Integrasi kedua metode ini akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan akurat mengenai kondisi bawah permukaan tanah, mendukung perencanaan dan desain pondasi yang lebih tepat dan aman untuk proyek konstruksi.

Kata Kunci: geolistrik, resistivitas, struktur bawah permukaan, Standard Penetration Test

Abstract: Rock weathering produces soil that serves as a foundation for construction. Structures that are higher than the ground surface put pressure on the soil below, causing stress and deformation that affect the stability of the building. Building foundations must be placed on hard soil or compacted soil to avoid construction errors. The geoelectric method is a fast and efficient way to determine the nature of the soil below the surface by measuring the soil resistance to electric current. This study aims to evaluate the physical characteristics of the soil layer using the Wenner configuration geoelectric method in the area around Barombong Stadium, Tamalate District, Makassar City. The results showed that the geoelectric method was effective in determining the subsurface structure and physical characteristics of the soil. The inversion process was carried out with five iterations, resulting in a more accurate subsurface resistivity model with a RMS error value decreasing to 32.9% at a depth of 36.9 meters. Three main layers were identified: a layer of sand to clayey sand with a resistivity of 2.15 – 20.5 Ωm , a layer of salt water or sea water with a resistivity of 0.00760 – 0.072 Ωm at a depth of 18 – 30 meters, and a dense layer at a depth of 31.3 – 36.9 meters. Correlation of geoelectric results with the results of the Standard Penetration Test (N-SPT) is needed to obtain additional information on soil strength and density. The integration of these two methods will provide a more comprehensive and accurate picture of subsurface conditions, supporting more appropriate and safe foundation planning and design for construction projects.

Keywords: geoelectric, resistivity, subsurface structure, Standard Penetration Test

PENDAHULUAN

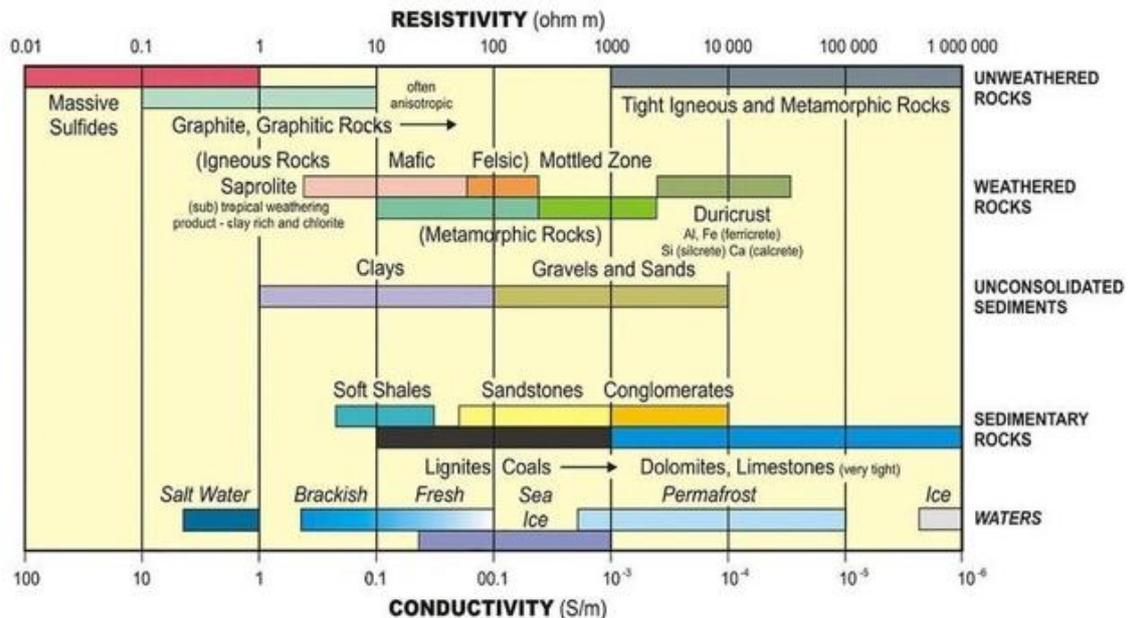
Pelapukan batuan menghasilkan pembentukan tanah, komponen kerak bumi yang berfungsi sebagai dasar pembangunan. Struktur yang lebih tinggi dari permukaan tanah akan memberikan tekanan pada tanah di bawahnya. Permukaan bawah tanah akan mengalami tegangan, sehingga terjadi perubahan bentuk dan penurunan bagi bangunan yang bersangkutan. Pondasi bangunan harus ditempatkan di tanah keras, atau tanah harus dipadatkan jika tidak tersedia tanah keras. Untuk menghindari kesalahan konstruksi, pengetahuan tentang sifat tanah dan desain yang baik sangat penting (Das, 1985).

Metode geolistrik adalah cara yang cepat dan efisien untuk menentukan sifat tanah di bawah permukaan, karena mengukur resistansi tanah terhadap arus listrik. Formulasi ini menggabungkan evaluasi potensial, arus, dan medan elektromagnetik yang disebabkan oleh arus yang terjadi secara normal. Nilai resistansi medium dapat diprediksi dengan mengukur beda potensial (tegangan) ketika arus listrik dialirkan ke medium (Fisika et al., 2016). Metode ini memiliki kelebihan seperti waktu pengambilan data yang cepat, perangkat yang ringan, pengolahan data yang lebih sederhana, dan ramah lingkungan (Loke, 1999; Telford et al., 1990). Setiap batu memiliki konduktivitas listrik yang unik dan harga resistansi, secara teoritis. Nilai resistansi batuan identik tidak selalu sama. Komposisi mineral batuan, kebutuhan batuan, komposisi zat cair dalam batuan, dan unsur eksternal lainnya merupakan faktor penentu nilai ketahanan jenis. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan keefektifan metode geolistrik dalam memetakan struktur bawah permukaan dan karakteristik fisik tanah. Fitrianto et al. (2017) menggunakan pencitraan 3D data geolistrik di Desa Surodadi dan menemukan bahwa batuan konglomerat dan batupasir tufan tersebar pada kedalaman 5-25 meter. Irwan et al. (2020) menerapkan model resistivitas tiga dimensi untuk eksplorasi air tanah di zona vulkanik di Malang, menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam memetakan lapisan akuifer dan struktur geologi bawah permukaan. Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) mengungkapkan bahwa metode geolistrik dapat digunakan untuk mengidentifikasi lapisan akuifer di daerah pegunungan yang sulit dijangkau. Siregar (2006) juga mendukung penggunaan metode ini dalam penyelidikan akuifer air tanah di Kabupaten Sragen, menunjukkan kemampuan metode ini dalam menentukan variasi resistivitas lapisan tanah yang signifikan.

Metode geolistrik resistivitas juga digunakan dalam berbagai aplikasi seperti eksplorasi air tanah, eksplorasi mineral, dan studi lingkungan karena kemampuannya memberikan gambaran detail tentang bawah permukaan serta sifat non-invasifnya (Reynolds, 1997; Damayanti et al., 2011; Supriyadi et al., 2017). Karakteristik ini menjadikannya alat yang sangat berharga dalam teknik sipil untuk menilai sifat tanah dan memastikan stabilitas serta keamanan proyek konstruksi (Reynolds, 1997). Konfigurasi Wenner adalah konfigurasi elektroda geolistrik yang menghasilkan medan listrik simetris ke bidang topografi. Dalam konfigurasi Wenner, keempat elektroda segaris dan simetris mengelilingi pusatnya. Konfigurasi Elektroda Wenner memiliki resolusi vertikal yang baik, sensitivitas lateral yang tinggi tetapi sensitivitas rendah untuk menembus arus di bagian atas (Fisika et al., 2016). Dengan menggunakan konfigurasi Wenner, nilai resistansi spesifik semu (resistivitas semu) dapat dihitung dari hasil pengukuran arus dan beda potensial.

Pada Gambar 1 dapat dilihat nilai resistivitas berbagai jenis tanah dan batuan bervariasi. Contohnya, lempung memiliki resistivitas antara 1-100 Ωm , sementara batu

pasir memiliki resistivitas antara 50-500 Ω m. Nilai resistivitas ini bervariasi berdasarkan komposisi mineral dan kepadatan batuan (Mudral & Malik, 2019). Penelitian oleh Fitrianto et al. (2017) menunjukkan bahwa batuan konglomerat dan batupasir tufan memiliki distribusi resistivitas yang berbeda, yang dapat diidentifikasi melalui pencitraan 3D geolistrik. Irwan et al. (2020) juga menunjukkan keefektifan metode geolistrik dalam memetakan lapisan akuifer dan struktur geologi di Tidar Plateau, Malang.



Gambar 1. Diagram resistivitas dan konduktivitas berbagai jenis batuan dan sedimen

Berdasarkan teori yang telah dideskripsikan di atas, hipotesis yang dibuat oleh peneliti yaitu Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner mampu menggambarkan struktur lapisan tanah dan jenis batuan yang terdapat di bawah permukaan lokasi penelitian. Penulis melakukan penelitian penyelidikan struktur bawah permukaan tanah dengan menggunakan metode geolistrik untuk penentuan karakteristik fisik lapisan tanah, yang bertujuan untuk memberikan informasi yang mendalam dan akurat guna mendukung perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi.

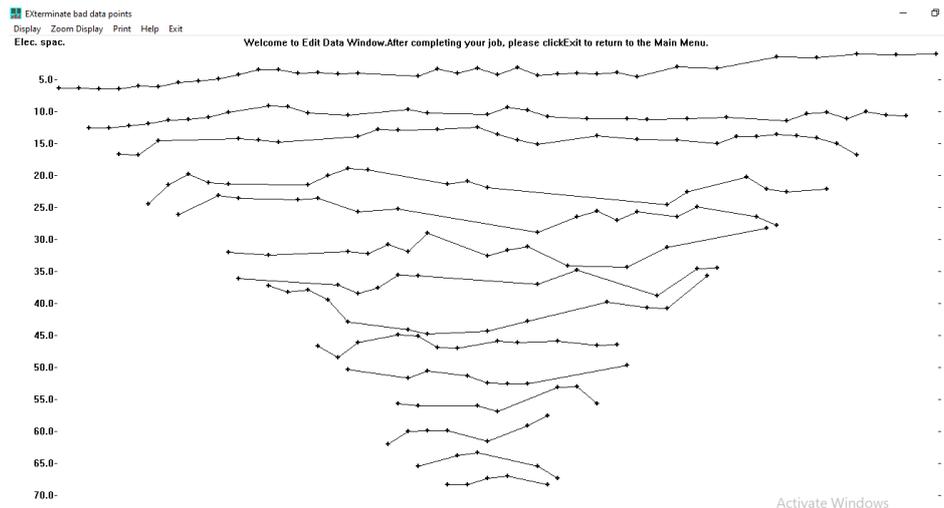
METODE PENELITIAN

Penelitian geolistrik menggunakan metode resistivitas konfigurasi Wenner dilakukan di area sekitar Stadion Barombong, Kecamatan Tamalate, Kota Makassar, Sulawesi Selatan pada Agustus 2022. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif analitik dengan tujuan untuk memperkirakan struktur bawah tanah wilayah penelitian menggunakan model *cross-sectional* dari distribusi resistivitas bawah permukaan daerah tersebut dengan menggunakan standar ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Data yang dikumpulkan difokuskan pada hasil pengukuran geolistrik resistivitas. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software* Res2DINV, yang secara otomatis menentukan model resistivitas 2D (dua dimensi) untuk data bawah permukaan hasil survei resistivitas geolistrik. Model resistivitas ini kemudian digunakan untuk menginterpretasi struktur bawah permukaan di wilayah penelitian. Penelitian ini menggunakan teknik geolistrik resistivitas dengan konfigurasi Wenner untuk mengeksplorasi nilai resistivitas dan jenis aliran listrik di dalam tanah. Alat penelitian yang digunakan adalah SYSCAL JUNIOR. *Software* Res2Dinv kemudian digunakan

untuk mengolah data lapangan dengan melakukan inversi. Langkah inversi yang dilakukan yaitu data diiterasi hingga mendapatkan nilai RMS error minimum supaya diperoleh penampang bawah permukaan yang paling mendekati aslinya.

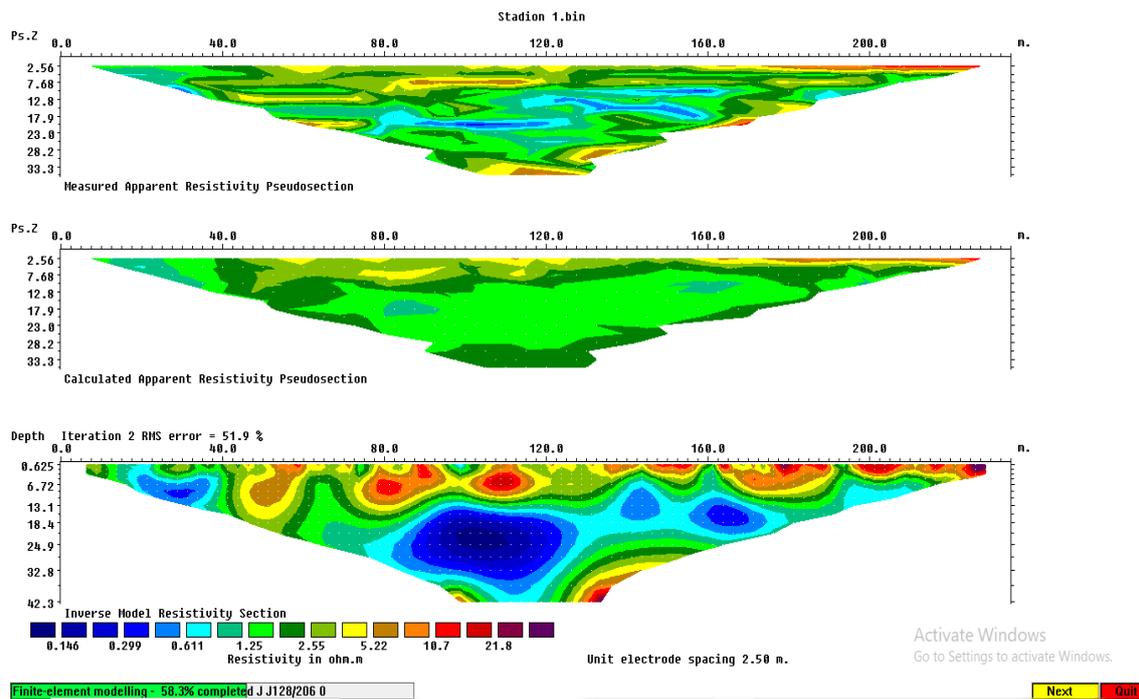
HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah data berhasil dibaca oleh *software* langkah selanjutnya adalah melakukan penyesuaian *Exterminate bad data points*. Pada proses ini, akan dilakukan penghapusan terhadap titik datum yang jauh dari garis horizontal (Loke, 1999; Dahlin, 2001).



Gambar 2. Tampilan data yang akan diedit (Sumber: Screenshot dari Geotomo *software* Res2dinv Pro Version 4.8.10)

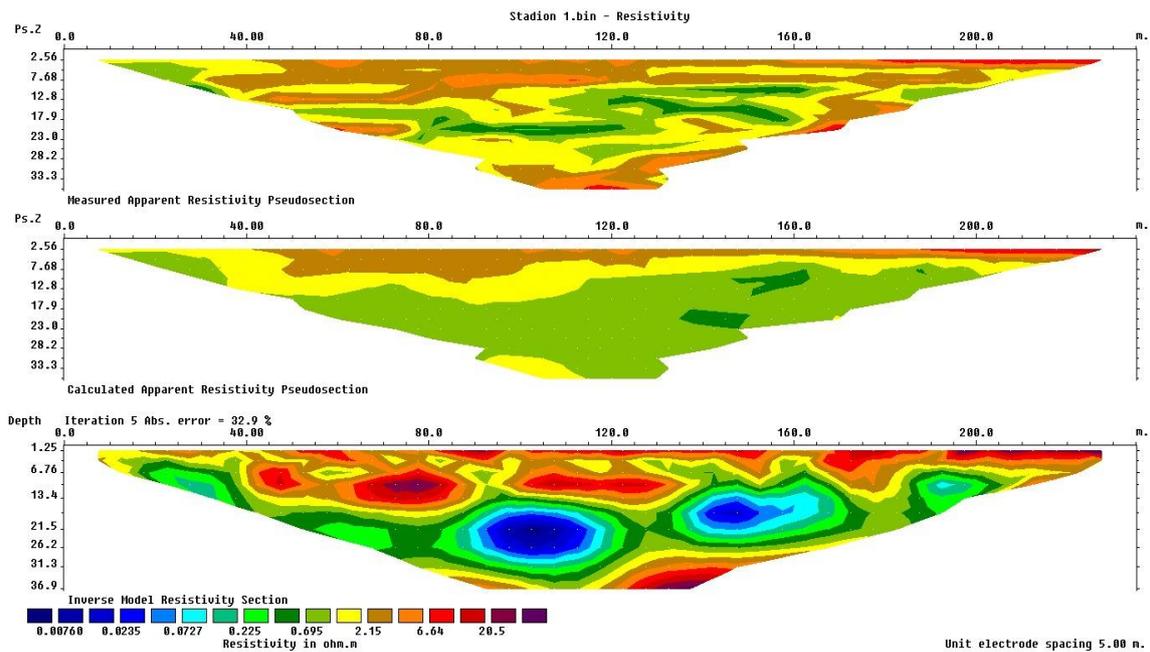
Langkah inversi dilakukan dengan metode iterasi hingga mendapatkan nilai RMS error minimum agar diperoleh penampang bawah permukaan yang paling mendekati aslinya. Data resistivitas yang diukur di lapangan biasanya berupa data resistivitas semu yang tidak langsung menunjukkan struktur bawah permukaan. Proses inversi mengubah data resistivitas semu ini menjadi model resistivitas sebenarnya yang lebih akurat menggambarkan kondisi bawah permukaan. Proses inversi melibatkan iterasi berulang untuk meminimalkan *Root Mean Square (RMS) error* antara data yang diukur dan data yang dihitung dari model. Semakin kecil *RMS error*, semakin baik model yang dihasilkan mencerminkan kondisi bawah permukaan yang sesungguhnya (Loke, 1999). Dengan mengonversi data resistivitas semu menjadi model resistivitas nyata, inversi memungkinkan para peneliti untuk mendapatkan informasi yang lebih rinci tentang berbagai lapisan dan struktur bawah permukaan, termasuk jenis batuan, keberadaan air tanah, dan fitur geologi lainnya (Dahlin, 2001). Inversi juga membantu dalam mengidentifikasi dan memetakan litologi batuan yang berbeda, seperti lempung, pasir, batupasir, dan air asin, dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Ini sangat penting dalam aplikasi geoteknik dan eksplorasi sumber daya alam (Loke, 1999). Selain itu, hasil dari inversi digunakan untuk mendukung keputusan terkait pembangunan infrastruktur, mitigasi bencana, eksplorasi sumber daya air, dan perlindungan lingkungan. Model bawah permukaan yang dihasilkan melalui inversi menyediakan dasar yang kuat untuk perencanaan dan pelaksanaan proyek (Reynolds, 1997).



Gambar 3. Proses iterasi *pseudosection* resistivitas semu, kalkulasi resistivitas semu dan hasil inversi resistivitas

Pada Gambar 3, bagian atas merupakan hasil dari model penampang resistivitas yang terukur di lapangan (*Measured Apparent Resistivity Pseudosection*). Gambar 3, bagian tengah menunjukkan hasil dari model yang dihitung menggunakan *software* untuk mendekati model pengukuran lapangan (*Calculated Apparent Resistivity Pseudosection*). Gambar 3, bagian bawah adalah hasil inversi lanjutan dari gambar bagian tengah, dimana error yang ditunjukkan adalah perbedaan antara gambar pertama dan gambar kedua (*Inverse Model Resistivity Section*). Semakin kecil nilai *RMS error* yang ditampilkan, maka data yang dihasilkan semakin mendekati model bawah permukaan yang sebenarnya (Loke, 1999). Pada Gambar 3, bagian bawah, terlihat bahwa nilai *RMS error* setelah iterasi kedua adalah 51,9%. Nilai ini mencerminkan seberapa baik model inversi sesuai dengan data lapangan. Model resistivitas bawah permukaan yang dihasilkan menunjukkan variasi resistivitas dalam satuan ohm-meter, yang diinterpretasikan melalui skala warna. Warna merah hingga ungu tua menunjukkan area dengan resistivitas tinggi, yang mengindikasikan material yang lebih padat dan keras seperti batuan atau lapisan kering. Sementara itu, warna biru muda hingga biru tua menunjukkan area dengan resistivitas rendah, yang biasanya diinterpretasikan sebagai material yang lebih lunak atau mengandung air seperti lempung atau lapisan jenuh air (Dahlin, 2001).

Proses inversi ini sangat penting dalam penelitian geolistrik karena memungkinkan peneliti untuk memperoleh model resistivitas bawah permukaan yang lebih akurat dibandingkan dengan data resistivitas semu yang diukur langsung di lapangan. Dengan menggunakan metode inversi, model resistivitas yang diperoleh dapat memberikan informasi yang lebih mendetail tentang struktur geologi bawah permukaan, yang sangat penting untuk aplikasi geoteknik, eksplorasi sumber daya alam, dan mitigasi bencana lingkungan (Reynolds, 1997).



Gambar 4. Penampang resistivitas

Dari hasil pengolahan data, selanjutnya dilakukan interpretasi data. Hasil tersebut berupa penampang lintasan 2-Dimensi yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai batuan di bawah lapisan permukaan serta melakukan penyelidikan struktur bawah permukaan pada lokasi yang akan dibangun gedung. Litologi batuan di bawah lapisan permukaan didapatkan dari hasil korelasi antara nilai resistivitas batuan dan data geologi regional. Perbandingan warna pada penampang 2-Dimensi menunjukkan bahwa semakin ke kanan (warna merah hingga ungu tua), kepadatan materialnya akan semakin padat dan keras, sehingga nilai resistivitasnya pun semakin tinggi. Sebaliknya, semakin ke kiri (warna biru muda hingga biru tua), kepadatan materialnya akan semakin rendah (Nurdiniyanti, 2020).

Hasil penampang resistivitas yang diperoleh dari pengolahan data inversi dengan melakukan iterasi sebanyak 5 kali menunjukkan RMS error sebesar 32,9% dengan penetrasi kedalaman hingga 36,9 meter. Penurunan nilai RMS error pada iterasi ke-5 menunjukkan bahwa model resistivitas bawah permukaan yang dihasilkan semakin mendekati kondisi sebenarnya. Nilai RMS error adalah indikator seberapa baik model inversi sesuai dengan data lapangan yang diukur. Penurunan nilai RMS error dari iterasi ke iterasi menunjukkan bahwa proses inversi berhasil mengurangi perbedaan antara data yang diukur dan model yang dihitung, sehingga model yang dihasilkan menjadi lebih akurat (Loke, 1999; Dahlin, 2001). Menurut Li & Oldenburg (1992), penurunan RMS error yang konsisten selama proses iterasi menunjukkan stabilitas dan konvergensi model inversi menuju solusi yang representatif terhadap kondisi bawah permukaan yang sesungguhnya. Selain itu, hasil penelitian oleh deGroot-Hedlin dan Constable (1990) menegaskan bahwa nilai RMS error yang menurun secara signifikan setelah beberapa iterasi merupakan tanda bahwa data outlier telah diminimalkan dan model telah disesuaikan dengan data geofisika yang lebih realistis.

Pengolahan data menggunakan konfigurasi Wenner. Gambar 4 menampilkan nilai resistivitas yang diperoleh, yang bervariasi dari 0,00760 Ωm hingga 20,5 Ωm . Berdasarkan temuan analisis dan interpretasi, ditentukan bahwa batuan dasar hadir pada

kedalaman kurang lebih 28,5 hingga 36,9 meter, yang ditandai dengan gradasi warna kuning hingga ungu gelap dengan nilai resistivitas 2,15 Ωm hingga 20,5 Ωm . Karena tanah di wilayah area stadion telah dipadatkan hingga tingkat yang cukup, gradasi jingga hingga ungu gelap yang dapat diamati pada kedalaman 1,25 hingga 17,45 meter di bawah permukaan tidak dapat diklasifikasikan sebagai batuan dasar.

Lapisan pertama dengan rentang nilai resistivitas 2,15 – 20,5 Ωm dari permukaan tanah berupa original *ground surface* didominasi oleh pasir hingga pasir berlempung. Lapisan kedua berada pada kedalaman 18 – 30 meter dengan nilai resistivitas 0,00760 – 0,072 Ωm , yang diinterpretasikan sebagai air asin atau air laut akibat intrusi langsung dari laut pada bagian barat lintasan. Lapisan ketiga merupakan lapisan paling bawah mulai dari kedalaman 31,3 – 36,9 meter dengan nilai resistivitas 2,15 – 20,5 Ωm .

Tabel 1. Interaksi lapisan berdasarkan nilai resistivitas daerah penelitian

Nilai resistivitas (Ωm)	Zona Resistivitas	Warna	Kedalaman (m)	Interpretasi Litologi
0.00760 – 0.072	Rendah		13.4 – 31.3 dan 13.4 – 21.5	Lapisan ini diinterpretasikan sebagai air asin atau air laut karena intrusi air laut langsung ke bagian barat lintasan.
0.225 – 1.5	Sedang		2.56 – 36.9	Lapisan yang diinterpretasikan sebagai lapisan lempung (clay). Lapisan padat yang lumayan keras (<i>badrock</i>), berupa mengandung batu pasir kasar dan batu pasir tufan yang cukup keras dan aluvial.
2.15 – 20.5	Tinggi		1.25 – 36.9	

Pada Tabel 1, secara umum, hasil penelitian pada lintasan didominasi oleh lempung dan aluvial hingga kedalaman 36,9 meter di bawah permukaan tanah. Menurut Marjuni (2015), lempung memiliki nilai resistivitas 1,5 – 3 Ωm , sedangkan aluvial 2,15 – 20,5 Ωm . Lapisan kedua diduga merupakan air laut atau air asin, hal ini dapat dilihat dari nilai resistivitasnya yang rendah. Berdasarkan hasil pengukuran dari penyelidikan ini, dihipotesiskan bahwa batupasir dapat ditemukan hingga kedalaman 26,2 meter di bawah permukaan tanah dalam lapisan yang sangat padat dan keras. Penelitian sebelumnya oleh Syamsuddin et al. (2021) menunjukkan bahwa intrusi air laut dapat menyebabkan nilai resistivitas yang sangat rendah pada lapisan tanah, yang konsisten dengan temuan dalam penelitian ini.

Menurut Erviana et al. (2020), pasir yang ditemukan pada kedalaman ini dipandang mampu dimanfaatkan sebagai dasar untuk membangun pondasi bangunan bertingkat. Oleh karena itu, disarankan untuk membuat pondasi pada kedalaman 26,2 meter di bawah permukaan. Disarankan untuk menggunakan pondasi tiang pancang beton karena kokoh dan memiliki banyak manfaat dibandingkan jenis pondasi lainnya. Manfaat pondasi ini termasuk kemampuannya untuk secara efektif menahan beban konstruksi, menekan tanah pondasi, meningkatkan keamanan bangunan, dan mengurangi getaran. Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) juga menunjukkan bahwa penggunaan pondasi tiang pancang pada kondisi tanah serupa memberikan stabilitas dan keamanan yang lebih baik untuk struktur bangunan di daerah pesisir.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode geolistrik efektif dalam menentukan struktur bawah permukaan dan karakteristik fisik tanah. Proses inversi yang dilakukan dengan iterasi berulang menghasilkan model resistivitas bawah permukaan yang lebih akurat, dengan nilai RMS error yang menurun hingga 32,9% pada kedalaman hingga 36,9 meter. Penurunan nilai RMS *error* menunjukkan bahwa model resistivitas yang dihasilkan semakin mendekati kondisi sebenarnya, mengindikasikan stabilitas dan konvergensi model inversi menuju solusi yang representatif. Penelitian ini mengidentifikasi tiga lapisan utama berdasarkan nilai resistivitas. Lapisan pertama, dengan nilai resistivitas 2,15 – 20,5 Ωm , didominasi oleh pasir hingga pasir berlempung pada kedalaman 1,25 – 36,9 meter. Lapisan kedua, pada kedalaman 18 – 30 meter dengan nilai resistivitas 0,00760 – 0,072 Ωm , diinterpretasikan terdapat air asin atau air laut akibat intrusi langsung dari laut yang cukup dekat dengan area stadion. Lapisan ketiga, mulai dari kedalaman 31,3 – 36,9 meter, memiliki nilai resistivitas 2,15 – 20,5 Ωm dan diidentifikasi sebagai lapisan padat yang lumayan keras. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mendukung penggunaan metode geolistrik untuk evaluasi karakteristik fisik lapisan tanah. Untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan korelasi hasil geolistrik dengan hasil uji *Standard Penetration Test* (N-SPT). Uji N-SPT dapat memberikan informasi tambahan mengenai kekuatan dan densitas tanah pada berbagai kedalaman yang dapat dibandingkan dengan hasil resistivitas dari metode geolistrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Altmann, J. (1974). Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour*, 49(3), 227-267.
- ASTM International. (Various years). Standards and Publications.
- Damayanti, T., Supriyadi, & Khumaedi. (2011). Aplikasi metode geolistrik skala model untuk menentukan nilai resistivitas lapisan tanah yang mengalami pencemaran. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 7(2009): 138-144.
- Dahlin, T. (2001). The development of electrical imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9), 1019-1029.
- Das, B. M. (1985). *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford: Cengage Learning.
- deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.
- Erviana, O., Tanjungpura, F. U., Prof, J., & Nawawi, H. (2020). Identifikasi struktur lapisan bawah permukaan menggunakan metode geolistrik tahanan jenis sebagai informasi awal rancang bangun pondasi bangunan. *Prisma Fisika*, 8(3), 196-202
- Erviana, D. et al. (2020). Pemanfaatan *Batupasir sebagai Dasar Pondasi Bangunan di Wilayah Makassar*.
- Farihanum, A., Nasution, N., & Daulay, A. H. (2020). Metode geolistrik konfigurasi Wenner untuk interpretasi struktur bawah permukaan desa panungkiran. *FISITEK: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, 4(2), 18-26.
- Fitrianto, T. N., Supriyadi, & Mukromin, T. M. (2017). Pencitraan 3D data geolistrik resistivitas dengan *rockworks* berdasarkan hasil inversi Res2DInv untuk mengetahui persebaran batuan konglomerat di Desa Surodadi, Kecamatan Gringsing, Kabupaten Batang. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 7(2), 107-113.
- Hakim, H., & Manrulu, R. H. (2016). Aplikasi konfigurasi Wenner dalam menganalisis jenis material bawah permukaan. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika 'Al-BiRuNi'*, 5(1), 95-103.
- Irwan, I. (2020). Three-dimensional resistivity model for ground water exploration in volcanic zone of Tidar Plateau, Malang, East Java. *Indonesian Physical Review*, 3(1), 30-37. <https://doi.org/10.29303/ipr.v3i1.39>.
- Pamungkas, A. (2013). *Desain Pondasi Tahan Gempa*. Yogyakarta: ANDI.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1992). Approximate inversion of DC resistivity data over a 2-dimensional structure. *Geophysics*, 57(2), 290-305.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*. geolectrical.bizland.com.
- Marjuni, M., Wahyono, S. C., & Siregar, S. S. (2015). Identifikasi litologi bawah permukaan dengan

- metode geolistrik pada jalan trans kalimantan yang melewati daerah rawa di Kabupaten Banjar Kalimantan Selatan. *Jurnal Fisika FLUX*, 12(1), 53–62
- Mudral, H., & Malik, U. (2019). Pengukuran resistivitas lapisan tanah di Kelurahan Tuah Karya menggunakan konfigurasi Schlumberger. *Journal Online of Physics*, 4(2), 11–14. <https://doi.org/10.22437/jop.v4i2.7578>.
- Muhardi, M., Faurizal, F., & Widodo, W. (2020). Analisis pengaruh intrusi air laut terhadap keberadaan air tanah di Desa Nusapati, Kabupaten Mempawah menggunakan metode geolistrik resistivitas. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 10(2), 89-96.
- Nurdiniyanti, M. I. (2020). Kajian geolistrik dengan menggunakan metode resistivitas untuk perencanaan bangunan sipil di Krui, Pesisir Barat, Lampung. *Skripsi*. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.
- Siregar, J. (2006). Pendugaan geolistrik resistivitas sounding dalam penyelidikan akuifer air tanah di Kabupaten Sragen. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Supriyadi, S., Khumaedi, K., & Putro, A. S. P. (2016). Geophysical and hydrochemical approach for seawater intrusion in North Semarang, Central Java, Indonesia. *GEOMATE Journal*, 12(31), 134–140.
- Syamsuddin, S., Haryani, T., Riyadi, R., Ramli, M., & Aswad, S. (2021). Penentuan kedalaman lapisan *bedrock* di kawasan reklamasi Kota Makassar dengan metode geolistrik resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger. *Jurnal Geocelebes*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v5i1.11836>.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.