

Studi Komparatif *Triangular* dan *Quadrilateral Mesh* pada Inversi Geolistrik 2D Wenner-Schlumberger untuk Zona *High resistivity* di Terowongan 11 Padalarang

Rudi Cahyadi^{1*}, Widodo²

¹Departemen Fisika, Universitas Andalas, Padang, 25163, Indonesia

²Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 6 Agustus 2025

Direvisi: 10 September 2025

Diterima: 11 November 2025

Kata kunci:

Geolistrik 2D

Inversi Resistivitas

Quadrilateral Mesh

Triangular Mesh

Wenner-Schlumberger

Keywords:

2D Geoelectrical

Resistivity Inversion

Quadrilateral Mesh

Triangular Mesh

Wenner-Schlumberger

Penulis Korespondensi:

Rudi Cahyadi

Email: Rudi.cahyadi@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

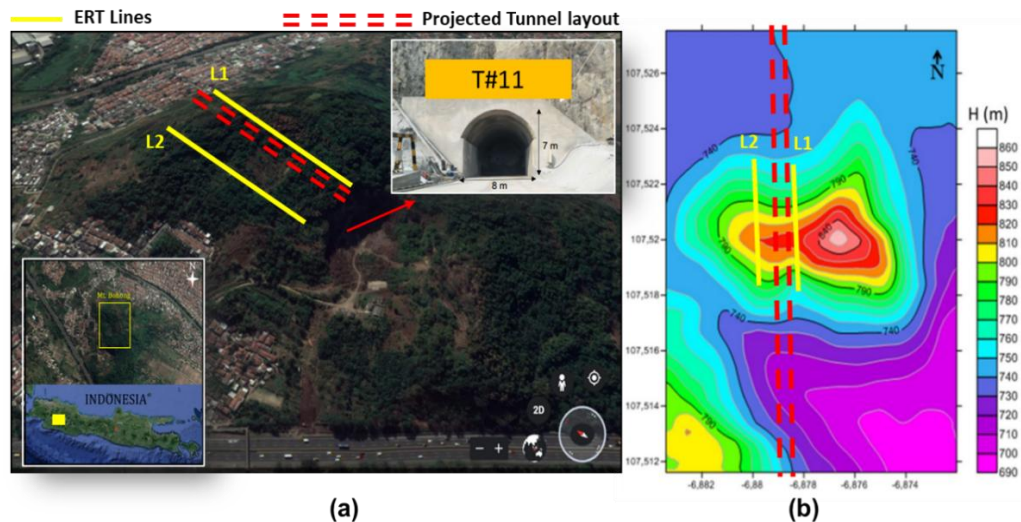
Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil inversi data geolistrik 2D menggunakan tipe *triangular mesh* dan *quadrilateral* pada konfigurasi Wenner-Schlumberger untuk mengidentifikasi zona resistivitas tinggi di Terowongan 11 Padalarang. Akuisisi data dilakukan dengan 48 elektroda dan spasi 10 m menggunakan alat resistivitymeter ARES II multichannel. Proses inversi dilakukan dengan perangkat lunak ResIPy menggunakan dua pendekatan *mesh* yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa *triangular mesh* menghasilkan model yang lebih halus, adaptif terhadap topografi, dan memiliki nilai *root mean square* (RMS) error lebih rendah (1,09–1,12%) dibandingkan *quadrilateral mesh* (4,67–4,72%). Zona resistivitas tinggi ($>60 \Omega\text{m}$) yang diinterpretasikan sebagai batuan *andesitic basalt* teridentifikasi pada kedalaman lebih dari 25 meter. Sebaran zona tersebut meningkat dari Lintasan 2 ke Lintasan 1, yang berimplikasi terhadap metode peledakan atau pengeboran pada konstruksi terowongan. Hasil ini menegaskan bahwa *triangular mesh* lebih efektif digunakan pada kondisi geologi kompleks.

This study aims to compare the results of 2D electrical resistivity inversion using triangular and quadrilateral mesh types in the Wenner-Schlumberger configuration to identify high-resistivity zones at Tunnel 11, Padalarang. Data acquisition was performed using 48 electrodes with a 10 m spacing and an ARES II multichannel resistivity meter. Data inversion was conducted with the ResIPy software employing two different mesh approaches. The results show that the triangular mesh produces smoother models, better adapts to topography, and achieves lower root mean square (RMS) errors (1.09–1.12%) compared to the quadrilateral mesh (4.67–4.72%). High-resistivity zones ($>60 \Omega\text{m}$), interpreted as andesitic basalt, were identified at depths greater than 25 meters. The extent of these zones increases from Line 2 to Line 1, which has implications for blasting or drilling strategies during tunnel construction. These findings indicate that triangular mesh is more effective for complex geological conditions.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

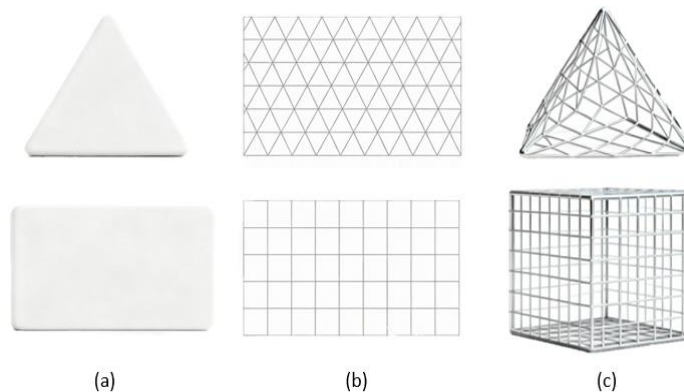
Kegiatan pembangunan infrastruktur bawah tanah seperti terowongan menuntut pemahaman yang mendalam terhadap kondisi geologi dan sifat fisis batuan bawah permukaan. Identifikasi karakteristik bawah permukaan sangat penting untuk menentukan zona yang aman dan stabil bagi kegiatan pengeboran maupun konstruksi. Dalam konteks proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung, beberapa terowongan dibangun melewati daerah dengan kondisi geologi yang kompleks, salah satunya adalah Terowongan 11 Padalarang (Gambar 1) yang tersusun atas batuan vulkanik dengan litologi bervariasi. Oleh karena itu, diperlukan metode investigasi non-destruktif yang mampu memberikan gambaran kondisi bawah permukaan secara detail dan efisien.



Gambar 1 (a) Lokasi Penelitian dan (b) Peta elevasi daerah penelitian.

Salah satu metode investigasi non-destruktif yang banyak digunakan adalah metode geolistrik resistivitas dua dimensi (2D). Metode ini telah banyak digunakan diberbagai bidang, seperti pemetaan geologi untuk struktur patahan dan permasalahan geoteknik (Giocoli et al. 2019; Lech et al. 2020; Li et al. 2017; Pazzi et al. 2018; Widodo et al., 2016); Zakaria et al. 2021). Metode ini menggunakan arus searah (arus DC) yang dipancarkan melalui dua buah elektroda dan mengukur perbedaan potensial listrik antara dua buah elektroda lainnya (Rubin dan Hubbard, 2005).

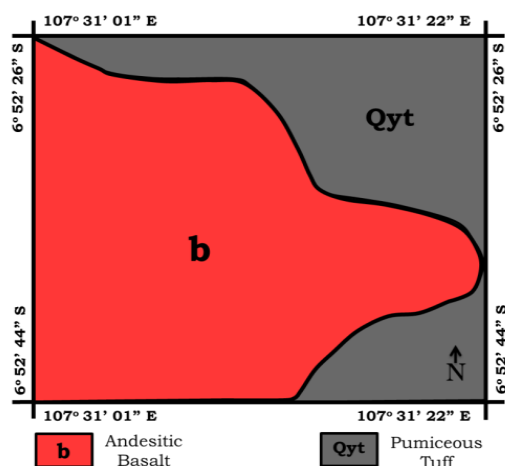
Konfigurasi atau susunan pemasangan elektroda pada metode geolistrik salah satunya adalah konfigurasi Wenner-Schlumberger. Distribusi lateral resistivitas semu yang dihasilkan dari titik data bawah permukaan mirip dengan konfigurasi Wenner, tetapi dengan resolusi vertikal yang dihasilkan lebih baik (Evangelista, et al., 2017), mirip konfigurasi Schlumberger. Untuk itu, konfigurasi ini mampu menyajikan variasi resistivitas vertikal dan lateral secara seimbang. Namun, hasil interpretasi nilai resistivitas sangat dipengaruhi oleh proses inversi data, yang menggunakan pendekatan numerik berbasis *mesh*.



Gambar 2 (a) *Triangular* (atas) dan *Quadrilateral mesh* (bawah) (b) model 2D dan (c) model 3

Pada umumnya, proses inversi geolistrik 2D menggunakan perangkat lunak Res2Dinv (Loke, 2009) dengan *rectangular mesh* karena stabil dan cepat secara komputasi. Namun, bentuk *mesh* ini kurang fleksibel untuk merepresentasikan topografi dan batas lapisan bawah permukaan yang tidak beraturan. Sebagai alternatif, dapat digunakan perangkat lunak ResIPy, yang menyediakan tipe *mesh* lain yaitu *triangular* dan *quadrilateral mesh* (Gambar 2). *Triangular mesh* mampu mengikuti geometri kompleks dengan hasil model yang lebih halus, sedangkan *quadrilateral mesh* juga unggul dalam efisiensi komputasi memiliki struktur grid yang teratur (Blanchy, et al., 2020). Oleh karena itu, analisis perbandingan kedua jenis *mesh* ini penting untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kualitas hasil inversi dan interpretasi geologi bawah permukaan.

Di daerah penelitian, telah dilakukan beberapa penelitian menggunakan metode geolistrik konfigurasi dipole–dipole dan VES (Phanjaya, et al., 2022; Widodo, et al., 2023; Cahyadi & Widodo, 2024), namun belum membahas pengaruh variasi tipe *mesh* terhadap hasil inversi dengan konfigurasi elektroda Wenner-Schlumberger. Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan hasil inversi geolistrik 2D antara *triangular* dan *quadrilateral mesh* dalam mengidentifikasi keberadaan zona *high resistivity* yang diduga berasosiasi dengan keberadaan batuan keras sebagai zona yang akan memerlukan teknik pengeboran/peledakan dalam proses pembuatan Terowongan 11. Lebih jauh, penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.



Gambar 3 Peta geologi daerah penelitian (dimodifikasi dari Silitonga, 1973, dalam Cahyadi dan Widodo, 2024)

II. METODE

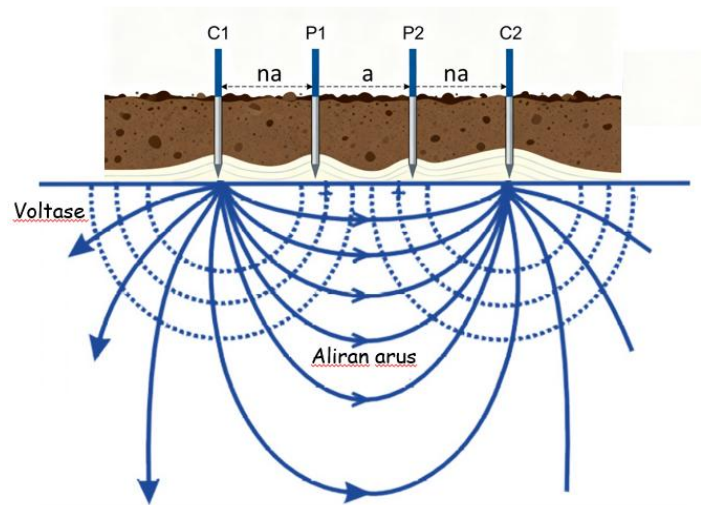
2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di area pembangunan Terowongan 11, Padalarang, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat (Gambar 1). Daerah ini termasuk dalam Zona Bandung dengan morfologi perbukitan berelief tinggi (Van Bemmelen, 1949) dan kemiringan rata-rata 22°, pada elevasi 650–870 mdpl (Gambar 1 (b)). Berdasarkan Peta Geologi Lembar Bandung (Silitonga, 1973), batuan penyusunnya terdiri atas *andesitic basalt* dan *pumiceous tuff* (Gambar 3) yang berumur Kuartar, dengan variasi topografi yang mempengaruhi kondisi resistivitas bawah permukaan.

2.2 Akuisi Data

Survei geolistrik 2D dilakukan sejajar dengan proyeksi Terowongan 11 menggunakan dua lintasan berarah utara–selatan. Pengukuran dilakukan dengan 48 elektroda berjarak 10 m menggunakan alat *resistivitymeter* ARES II *multichannel*. Total panjang lintasan tiap pengukuran adalah 470 m. Konfigurasi Wenner–Schlumberger digunakan karena memiliki sensitivitas baik terhadap variasi vertikal dan lateral resistivitas bawah permukaan. Metode ini bekerja dengan menginjeksikan arus listrik melalui dua elektroda arus (C1 dan C2) dan mengukur beda potensial antara dua elektroda potensial (P1 dan P2). Nilai resistivitas semu (ρ_a) dihitung berdasarkan arus terukur, beda potensial, serta faktor

geometri elektroda (Gambar 4). Nilai ini digunakan untuk membentuk distribusi resistivitas bawah permukaan sebelum proses inversi dilakukan.



Gambar 4 Konfigurasi elektroda Wenner-Schlumberger.

Beda potensial pada elektroda P1 yang disebabkan oleh elektroda arus C1 dan C2 yang berjarak R_1 dari elektroda pertama dan berjarak R_2 dari elektroda kedua, dan Potensial pada elektroda P2 yang disebabkan oleh elektroda arus C1 dan C2 yang berjarak R_3 dari elektroda pertama dan berjarak R_4 dari elektroda kedua (Loke, 2004), ditunjukkan pada persamaan (1), (2), (3) dan (4) dibawah ini. dengan K pada persamaan (4), (5), dan (6) merupakan faktor geometri pengukuran yang bergantung pada susunan atau konfigurasi elektroda, I merupakan besaran arus yang diinjeksikan, ΔV adalah beda potensial listrik yang terukur dan ρ merupakan nilai resistivitas semu dibawah permukaan. Berdasarkan Gambar 4, ketentuan spasi elektroda untuk konfigurasi Wenner-Schlumberger dapat ditentukan dengan R_1 dan $R_4 = na$ dan R_2 dan $R_3 = na + a$.

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi R_1} \quad V_2 = -\frac{I\rho}{2\pi R_2} \quad (1)$$

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

$$V_3 + V_4 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right] = \frac{I\rho}{K} \quad (4)$$

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)} \quad (6)$$

2.3 Pengolahan Data dan Inversi Data

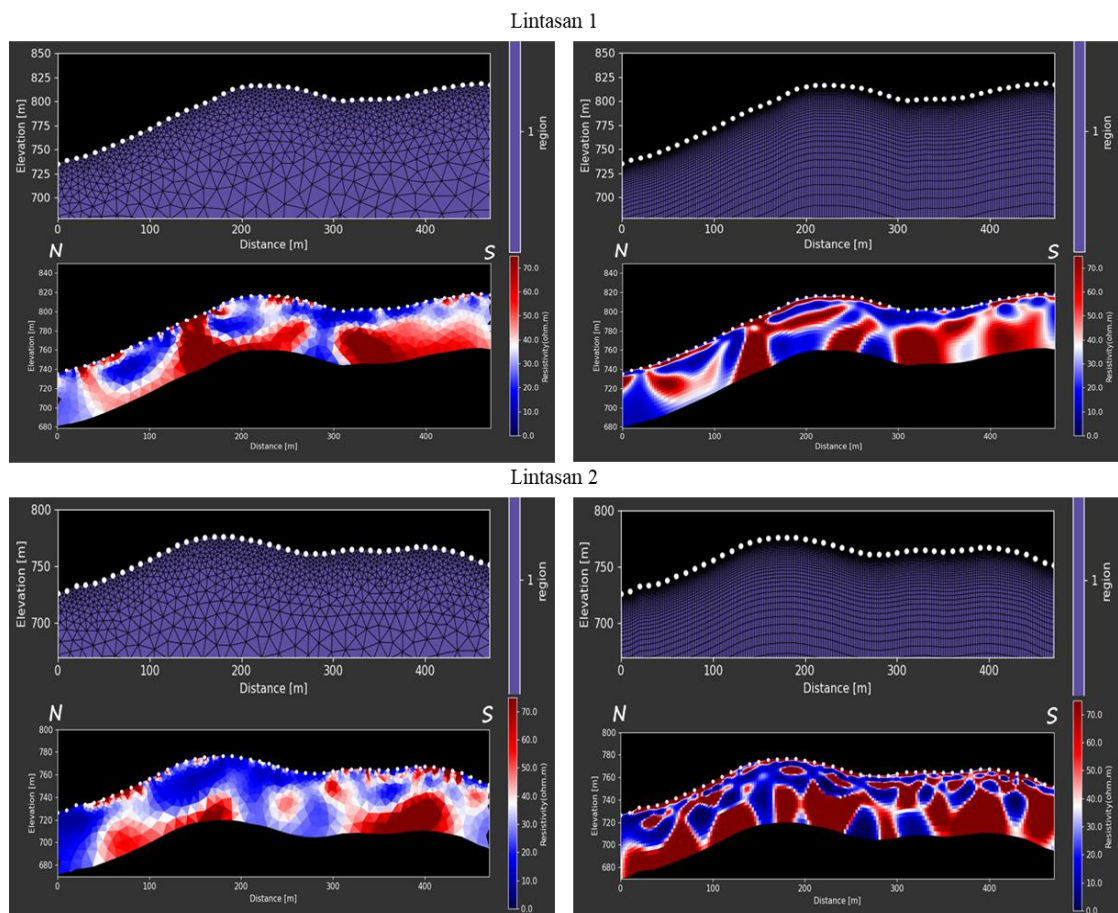
Pengolahan data geolistrik 2D dilakukan menggunakan perangkat lunak ResIPy, yang berfungsi untuk melakukan inversi data resistivitas bawah permukaan secara numerik. Data hasil akuisisi lapangan

diimpor dalam format teks (.dat atau .txt) sesuai konfigurasi elektroda yang digunakan. Selanjutnya dilakukan pendefinisian geometri Lintasan, penentuan parameter inversi seperti tipe model (smooth atau robust), jumlah iterasi, dan faktor regularisasi. Proses inversi dijalankan hingga nilai *root mean square error (RMS error)* mencapai konvergensi ($< 5\%$). Hasil inversi divisualisasikan dalam bentuk penampang dua dimensi distribusi resistivitas yang menggambarkan variasi lapisan bawah permukaan. Proses iterasi inversi 2D dilakukan dengan prinsip Gaussian Newton (Binley and Slater, 2020).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil Inversi *Triangular* dan *Quadrilateral Mesh*

Data hasil pengukuran konfigurasi Wenner-Schlumberger diolah menggunakan ResIPy dengan dua pendekatan *mesh*, yaitu *triangular* dan *quadrilateral*. Hasil inversi menampilkan distribusi resistivitas bawah permukaan sepanjang Lintasan pengukuran yang merepresentasikan variasi litologi di daerah penelitian. Secara umum, hasil inversi menunjukkan nilai resistivitas yang bervariasi, disajikan dengan tampilan dalam 3 skala warna agar mempermudah dalam menentukan mana area yang memiliki nilai resistivitas rendah (biru), sedang (putih), dan tinggi (merah). Berdasarkan Gambar 5, rentang nilai resistivitas yang ditampilkan antara 0–70 Ωm , yang dapat diinterpretasikan sebagai perbedaan jenis batuan dan tingkat kejenuhan air tanah. Zona dengan resistivitas rendah ($< 30 \Omega\text{m}$) cenderung menunjukkan keberadaan lapisan lempung berlanau (*silty clay*), resistivitas sedang menunjukkan keberadaan dari lempung berpasir (*gravelly clay*), sedangkan zona resistivitas tinggi ($> 60 \Omega\text{m}$) mengindikasikan keberadaan batuan keras atau batuan dasar yang relatif masif dan kering, diduga merupakan batuan *andesitic basalt*. Nilai resistivitas rendah dan sedang diduga merupakan hasil pelapukan atau redeposisi material vulkanik seperti *pumiceous tuff*, yang terpapar cuaca dan air hujan sehingga dapat teralterasi menjadi material halus, menghasilkan tanah lempung berpasir atau berlanau.



Gambar 5 Hasil inversi dengan menggunakan *triangular mesh* (kiri) dan *Quadrilateral* (kanan) pada Lintasan 1 dan 2

3.2 Analisis Komparatif

Berdasarkan Tabel 1, *triangular mesh* umumnya menghasilkan model inversi yang lebih halus, adaptif terhadap topografi, dan memiliki RMS lebih kecil dibanding *quadrilateral mesh*, sehingga lebih akurat untuk kondisi geologi kompleks. Namun, *triangular mesh* memerlukan memori komputasi lebih besar karena jumlah elemen dan node yang lebih banyak. Dari sisi iterasi, *triangular mesh* sering mencapai konvergensi lebih cepat dibandingkan dengan *quadrilateral mesh*, sementara ketidakhulusan atau *roughness* modelnya cenderung lebih rendah. Jumlah datum pengukuran yang digunakan tetap sama pada kedua tipe *mesh*, sehingga perbedaan utama terletak pada efisiensi dan kualitas hasil inversi.

Dari sisi kuantitatif, nilai *RMS error* inversi dengan *triangular mesh* berkisar antara 1,09–1,12%, sedikit lebih rendah dibanding *quadrilateral mesh* yang berada pada kisaran 4,67–4,72%. Perbedaan nilai RMS ini menunjukkan bahwa *triangular mesh* mampu memberikan konvergensi yang lebih baik terhadap data lapangan, karena distribusi elemen yang tidak beraturan membuat model lebih fleksibel menyesuaikan perubahan resistivitas lokal. Hasil ini sejalan dengan temuan Blanchy, et al., (2020) yang menyebutkan bahwa *unstructured mesh* memberikan kelebihan dalam representasi topografi kompleks serta peningkatan stabilitas inversi pada data dengan heterogenitas tinggi.

Perbedaan utama antara kedua tipe *mesh* terlihat pada ketajaman batas anomali resistivitas dan pola distribusi vertikal. Model inversi dengan *triangular mesh* memperlihatkan transisi yang lebih halus dan adaptif terhadap kontur topografi, terutama pada bagian permukaan dengan elevasi bervariasi. Hal ini karena elemen segitiga dapat menyesuaikan bentuk permukaan dengan lebih baik, dibandingkan *quadrilateral mesh* cenderung menghasilkan batas anomali yang lebih tegas karena bentuk elemen persegi empat yang kaku tidak sepenuhnya mengikuti kontur permukaan.

Tabel 1. Hubungan parameter inversi dengan kedua *mesh* pada Lintasan 1 dan 2

Parameters Inversi 2D Konfigurasi Wenner-Schlumberger	<i>Triangular mesh</i>		<i>Quadrilateral mesh</i>	
	L1	L2	L1	L2
Banyak iterasi	3	3	5	5
Ketidakhulusan	155,8	133,3	173,1	168,4
RMS Final	1,09	1,12	4,67	4,72
Banyak memori terpakai	0,061	0,062	0,032	0,033
Jumlah datum	634	633	633	634

3.3 Interpretasi Zona *High Resistivity*

Keberadaan zona *high resistivity* yang diduga merupakan manifestasi dari batuan keras ditemukan pada Lintasan 1 dan 2. Oleh karena hasil inversi *triangular mesh* lebih baik, maka interpretasi dilakukan berdasarkan hasil tersebut (Gambar 5 (kiri)). Pada Lintasan 1 dan 2, keberadaan zona *high resistivity* terlihat seperti dua buah blok batuan masif yang berdekatan. Pada Lintasan 2, blok tersebut sedikit berjarak namun pada Lintasan 1 kedua blok batuan tersebut semakin rapat. Keberadaan blok batuan tersebut ditemukan mulai pada kedalaman > 25 meter, pada jarak 50-200 m dan 320-450 m pada Lintasan 2, sedangkan pada Lintasan 1, keberadaan zona *high resistivity* ditemukan hampir disepanjang lintasan survei, kecuali pada jarak 270-310 m. Berdasarkan hasil tersebut, keberadaan batuan keras disimpulkan akan semakin bertambah rapat sebarannya dari Lintasan 2 menuju ke Lintasan 1. Oleh karena proyeksi pembuatan terowongan berada diantara kedua lintasan, lebih dekat ke Lintasan 1, maka untuk menerapkan teknik peledakan/pengeboran pada proses pembuatan terowongan 11 dapat mengacu kepada penampang hasil inversi Lintasan 1.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, konfigurasi Wenner-Schlumberger terbukti menghasilkan model inversi resistivitas 2D yang stabil dengan keseimbangan baik antara resolusi vertikal dan lateral, sehingga efektif untuk mengidentifikasi lapisan bawah permukaan pada daerah bertopografi bervariasi dan batuan heterogen. Melalui perangkat lunak ResIPy, *triangular mesh* memberikan hasil inversi yang lebih halus, adaptif terhadap kontur topografi, serta memiliki nilai *RMS error* lebih rendah dibanding *quadrilateral mesh*, sehingga penentuan kedalaman dan batas lapisan resistivitas menjadi lebih realistis. Berdasarkan hasil inversi tersebut, teridentifikasi zona *high resistivity* yang diduga sebagai batuan keras pada Lintasan 1 dan 2, dengan sebaran mulai kedalaman >25 meter. Zona ini menunjukkan bahwa sebaran batuan keras meningkat dari Lintasan 2 menuju Lintasan 1. Karena proyeksi terowongan berada

di antara kedua Lintasan dan lebih dekat ke Lintasan 1, maka desain dan metode peledakan atau pengeboran sebaiknya mengacu pada hasil penampang inversi Lintasan 1. Secara umum, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penerapan *triangular mesh* memberikan keunggulan dalam representasi model bawah permukaan, sehingga dapat menjadi referensi dalam pengembangan metode inversi geolistrik di berbagai studi geofisika terapan di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Blanchy, G., Saneiyani, S., Boyd, J., & McLachlan, P. (2020). ResIPy: An intuitive open-source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Computers & Geosciences*, 137, 104423. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104423>
- Binley, A., & Slater, L. (2020). *Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface Earth*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108685955>
- Cahyadi, R., & Widodo, W. (2024). Quasi-3D geoelectrical imaging as a new application for landslide investigations: A tunnel case induced by blasting activity. *Jurnal Ilmu Fisika*, 16(2), 177–186. <https://doi.org/10.25077/jif.16.2.177-186.2024>
- Evangelista, L., de Silva, F., d'Onofrio, A., Di Fiore, V., Silvestri, F., Scotto di Santolo, A., Cavuoto, G., Punzo, M., & Tarallo, D. (2017). Application of ERT and GPR geophysical testing to the subsoil characterization of cultural heritage sites in Napoli (Italy). *Measurement*, 104, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.034>
- Giocoli, A., Hailemichael, S., Bellanova, J., Calamita, G., Perrone, A., & Piscitelli, S. (2019). Site and building characterization of the Orvieto Cathedral (Umbria, Central Italy) by electrical resistivity tomography and single-station ambient vibration measurements. *Engineering Geology*, 260, 105195.
- Lech, M., Skutnik, Z., Bajda, M., & Markowska-Lech, K. (2020). Applications of electrical resistivity surveys in solving selected geotechnical and environmental problems. *Applied Sciences*, 10(7), 2263. <https://doi.org/10.3390/app10072263>
- Li, S., Liu, B., Xu, X., Nie, L., Liu, Z., Song, J., et al. (2017). An overview of ahead geological prospecting in tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 69–94. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.011>
- Loke, H. M. (2009). RES2DINV: Rapid 2D resistivity & IP inversion for Windows XP/Vista. Goetoma Software.
- Pazzi, V., Di Filippo, M., Di Nezza, M., Carlà, T., Bardi, F., Marini, F., et al. (2018). Integrated geophysical survey in a sinkhole-prone area: Microgravity, electrical resistivity tomographies, and seismic noise measurements to delimit its extension. *Engineering Geology*, 243, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.016>
- Phanjaya, H., Parnadi, W. W., & Santoso, D. (2022). Electrical resistivity survey for groundwater investigation in Padalarang, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1031(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012006>
- Rubin, Y., & Hubbard, S. (2005). *Hydrogeophysics*. Springer.
- Silitonga, P. H. (1973). Peta geologi lembar Bandung, skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (PPPG).
- Van Bemmelen, R. W. (1949). *The geology of Indonesia (Vol. 1A)*. Government Printing Office, Martinus Nijhoff.
- Widodo, W., Phanjaya, H., Prasetyo, S. H., Simangunsong, G. M., Rai, M. A., & Wattimena, R. K. (2023). Dynamic slope stability subject to blasting vibrations: A case study of the Jakarta–Bandung high-speed railway tunnel. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(5), 774–794. <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00242-6>
- Widodo, W., Gurk, M., & Tezkan, B. (2016). Multi-dimensional interpretation of radiomagnetotelluric and transient electromagnetic data to study active faults in the Mygdonian Basin, Northern Greece. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 21(3), 121–133. <https://doi.org/10.2113/JEEG21.3.121>

Zakaria, M. T., MohdMuztaza, N., Zabidi, H., Salleh, A. N., Mahmud, N., Samsudin, N., et al. (2021). 2-D crossplot model analysis using integrated geophysical methods for landslides assessment. *Applied Sciences*, 11(2), 747. <https://doi.org/10.3390/app11020747>