



Pemodelan Tiga Dimensi Bawah Permukaan Batuan Marmer Berdasarkan Data Geolistrik Resistivitas 2D di Kabupaten Magelang

Nur Alfajrin Basrah^{1*}, Kristanto Jiwo Saputro¹

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3128>

Article Info

Received : August, 12th 2026

Revised : August, 31st 2026

Accepted: September, 11th 2026

Correspondence:

Phone: +62 813-4126-0858

Abstract: Batuan marmer merupakan komoditas bernilai ekonomi tinggi sehingga diperlukan informasi bawah permukaan yang akurat untuk mendukung kegiatan eksplorasi. Penelitian ini bertujuan memodelkan distribusi bawah permukaan batuan marmer berdasarkan data geolistrik resistivitas dua dimensi (2D) yang dikembangkan menjadi model tiga dimensi (3D) di Desa Selorejo, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang. Akuisisi data dilakukan menggunakan konfigurasi Wenner-Schlumberger pada empat lintasan, yaitu lintasan 1 sepanjang 250 m dengan spasi elektroda 10 m, sedangkan lintasan 2–4 masing-masing sepanjang 260 m dengan spasi elektroda 20 m. Data diolah menggunakan Res2DInv untuk memperoleh penampang resistivitas 2D, kemudian dimodelkan dalam bentuk voxel 3D menggunakan Oasis Montaj melalui interpolasi kriging. Hasil inversi menunjukkan rentang resistivitas 5,66–1964 Ωm . Zona resistivitas $\geq 500 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai batuan karbonat kompak yang berpotensi mengalami metamorfisme menjadi marmer berdasarkan korelasi dengan kondisi geologi regional, klasifikasi Telford, observasi singkapan, dan aktivitas penambangan. Model 3D menunjukkan zona resistivitas tinggi 500–1964 Ωm dengan volume sekitar 824.000 m³ dari total volume model 5.305.000 m³. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi resistivitas 2D dan pemodelan 3D dapat menggambarkan distribusi spasial zona prospek marmer sebagai dasar eksplorasi.

Keywords: Geolistrik resistivitas, Wenner-Schlumberger, pemodelan 3D, marmer, Oasis Montaj.

Citation: Basrah, N. A., & Saputro, K. J. (2026). Pemodelan Tiga Dimensi Bawah Permukaan Batuan Marmer Berdasarkan Data Geolistrik Resistivitas 2D di Kabupaten Magelang. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5817–5826. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3128>

Pendahuluan

Batuan marmer merupakan salah satu komoditas bahan galian industri yang memiliki nilai ekonomi tinggi karena dimanfaatkan secara luas sebagai bahan bangunan, batu ornamen, dekorasi interior, serta bahan baku berbagai industri. Meningkatnya kebutuhan terhadap batuan marmer mendorong pentingnya kegiatan eksplorasi untuk memperoleh informasi mengenai persebaran, geometri, ketebalan, dan kontinuitas tubuh batuan di bawah permukaan sebelum dilakukan kegiatan penambangan. Informasi tersebut menjadi dasar dalam estimasi sumber daya,

perencanaan penambangan, serta pengelolaan sumber daya mineral secara efektif dan berkelanjutan. Namun demikian, kondisi geologi bawah permukaan umumnya memiliki tingkat heterogenitas yang tinggi sehingga keberadaan singkapan di permukaan belum mampu menggambarkan secara menyeluruh distribusi batuan marmer pada kedalaman tertentu (Penna et al., 2024).

Metode eksplorasi langsung, seperti pemboran, mampu memberikan informasi litologi dengan tingkat akurasi yang tinggi, namun membutuhkan biaya operasional yang besar, waktu pelaksanaan yang relatif lama, serta hanya merepresentasikan kondisi bawah permukaan pada titik-titik tertentu. Keterbatasan

Email: fajrinbasrah01@gmail.com

tersebut menyebabkan interpretasi mengenai bentuk dan kontinuitas tubuh batuan masih memiliki tingkat ketidakpastian yang cukup tinggi apabila hanya didasarkan pada data pemboran. Oleh karena itu, diperlukan metode investigasi bawah permukaan yang mampu memberikan informasi secara kontinu, efisien, dan memiliki cakupan area yang lebih luas (Hasan et al., 2021; Penna et al., 2024).

Salah satu metode geofisika yang banyak digunakan untuk investigasi bawah permukaan adalah Electrical Resistivity Tomography (ERT) atau geolistrik resistivitas. Metode ini memanfaatkan perbedaan nilai tahanan jenis batuan melalui injeksi arus listrik dan pengukuran beda potensial. Variasi nilai resistivitas dipengaruhi oleh litologi, komposisi mineral, tingkat pelapukan, porositas, rekahan, dan kandungan fluida, sehingga efektif untuk mengidentifikasi kondisi geologi bawah permukaan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode ERT telah berhasil diterapkan pada eksplorasi mineral, karakterisasi batuan karbonat, evaluasi massa batuan, dan investigasi hidrogeologi (Hasan et al., 2021; Syamsuddin et al., 2025; Winarti & Misdiyanta, 2021).

Perkembangan teknologi pengolahan data geolistrik tidak hanya memungkinkan interpretasi penampang resistivitas dua dimensi, tetapi juga rekonstruksi model bawah permukaan tiga dimensi melalui integrasi beberapa lintasan pengukuran. Pemodelan tiga dimensi memberikan visualisasi distribusi batuan secara lebih komprehensif sehingga hubungan spasial antar lintasan dapat diamati dengan lebih jelas dibandingkan interpretasi setiap penampang secara terpisah. Pendekatan ini telah diterapkan pada berbagai penelitian untuk meningkatkan kualitas interpretasi kondisi bawah permukaan, baik pada eksplorasi sumber daya air maupun karakterisasi struktur geologi (Fitrianto et al., 2017; Ibrahim et al., 2026; Mazzini et al., 2021).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan keberhasilan penerapan ERT dalam eksplorasi batuan karbonat. Penna et al. berhasil mengintegrasikan metode resistivitas, Ground Penetrating Radar (GPR), Transient Electromagnetic (TEM), dan data pemboran untuk membangun model geologi endapan marmer sebagai dasar perencanaan penambangan berkelanjutan Syamsuddin et al. (2025). Syamsuddin et al. mengombinasikan metode ERT dengan analisis X-Ray Fluorescence (XRF) untuk meningkatkan karakterisasi batugamping berdasarkan hubungan antara nilai resistivitas dan komposisi geokimia batuan. Sementara itu, Fitrianto et al. menunjukkan bahwa hasil inversi beberapa lintasan geolistrik dua dimensi dapat direkonstruksi menjadi model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak RockWorks, sehingga menghasilkan visualisasi bawah

permukaan yang lebih representatif dibandingkan interpretasi penampang dua dimensi secara terpisah.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada karakterisasi litologi, evaluasi massa batuan, maupun pemodelan tiga dimensi pada objek penelitian selain batuan marmer. Penelitian yang secara khusus mengintegrasikan beberapa lintasan geolistrik resistivitas dua dimensi untuk membangun model tiga dimensi distribusi batuan marmer di Kabupaten Magelang masih sangat terbatas. Padahal, model tiga dimensi mampu memberikan informasi mengenai geometri dan kontinuitas tubuh marmer secara lebih representatif sehingga dapat mengurangi ketidakpastian interpretasi bawah permukaan serta mendukung estimasi sumber daya mineral (Fitrianto et al., 2017; Ibrahim et al., 2026; Penna et al., 2024).

Penelitian ini dilaksanakan di Desa Selorejo, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang, yang merupakan salah satu wilayah dengan potensi batuan marmer. Hingga saat ini, penelitian geolistrik di wilayah Magelang lebih banyak diarahkan pada identifikasi akuifer dan karakterisasi litologi bawah permukaan (Winarti & Misdiyanta, 2021) sedangkan kajian mengenai pemodelan tiga dimensi tubuh batuan marmer masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan membangun model tiga dimensi bawah permukaan batuan marmer melalui integrasi data geolistrik resistivitas dua dimensi menggunakan konfigurasi Wenner-Schlumberger. Model yang dihasilkan diharapkan mampu memberikan visualisasi geometri dan persebaran tubuh marmer secara lebih representatif sebagai dasar interpretasi geologi bawah permukaan serta mendukung kegiatan eksplorasi batuan marmer di Kabupaten Magelang.

Metode

Lokasi penelitian

Penelitian dilaksanakan di Desa Selorejo, Kecamatan Salaman, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah pada tanggal 18–20 Juli 2026. Lokasi penelitian dipilih berdasarkan keberadaan singkapan batuan marmer serta potensi persebaran batuan karbonat termetamorf di bawah permukaan. Posisi setiap lintasan pengukuran ditentukan menggunakan GPS handheld Garmin sehingga koordinat setiap titik pengamatan dapat direpresentasikan dalam sistem koordinat Universal Transverse Mercator (UTM) Zona 49 M sebagai dasar penyusunan model tiga dimensi

Akuisisi Data

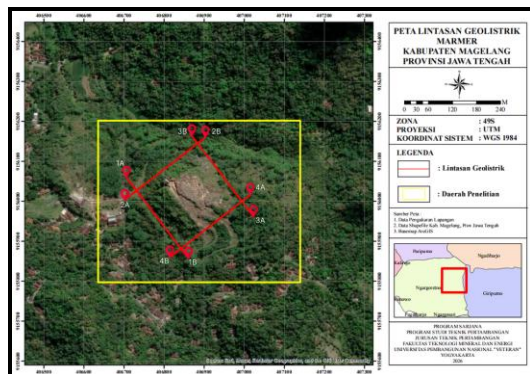
Pengambilan data dilakukan menggunakan metode geolistrik resistivitas dua dimensi dengan konfigurasi Wenner-Schlumberger. Konfigurasi ini

dipilih karena mampu memberikan keseimbangan antara resolusi lateral dan penetrasi kedalaman sehingga sesuai untuk mengidentifikasi variasi litologi bawah permukaan. Akuisisi data dilakukan menggunakan resistivity meter Naniura NRD 22 S yang dihubungkan dengan elektroda arus dan elektroda potensial melalui kabel multielektroda. Posisi lintasan ditentukan menggunakan GPS handheld Garmin, sedangkan sumber arus diperoleh dari aki 12 V yang terhubung dengan instrumen selama proses pengukuran. Pengukuran dilakukan pada empat lintasan dengan panjang lintasan dan spasi elektroda yang disesuaikan dengan kondisi lapangan. Lintasan pertama memiliki panjang 250 m dengan spasi elektroda 10 m, sedangkan lintasan kedua, ketiga, dan keempat masing-masing memiliki panjang 260 m dengan spasi elektroda 20 m. Selama proses pengukuran direkam nilai kuat arus (I), beda potensial (ΔV), faktor geometri (K), dan resistivitas semu sebagai data masukan pada proses inversi.

Tabel 1: Spesifikasi Survei Geolistrik

Lintasan	Azimuth	Panjang Lintasan (m)	Spasi Elektroda (m)	Konfigurasi
Line 1	142,65°	250	10	Wenner-Schlumberger
Line 2	52,11°	260	20	Wenner-Schlumberger
Line 3	322,65°	260	20	Wenner-Schlumberger
Line 4	232,11°	260	20	Wenner-Schlumberger

Konfigurasi keempat lintasan pengukuran dirancang untuk merepresentasikan distribusi resistivitas bawah permukaan pada area prospek marmer. Tata letak lintasan penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta lintasan pengukuran geolistrik

Pengolahan dan Pemodelan Data

Data hasil pengukuran lapangan terlebih dahulu diperiksa melalui proses quality control untuk memastikan tidak terdapat kesalahan pencatatan maupun data yang menyimpang akibat gangguan selama akuisisi. Selanjutnya, data dikonversi ke format masukan perangkat lunak Res2DInv untuk dilakukan proses inversi menggunakan pendekatan least-squares inversion. Proses inversi menghasilkan model distribusi resistivitas dua dimensi pada setiap lintasan yang digunakan sebagai dasar interpretasi kondisi bawah permukaan.

Hasil inversi setiap lintasan diekspor dalam format XYZ dan diintegrasikan ke dalam Oasis Montaj untuk membangun model resistivitas tiga dimensi melalui proses interpolasi, sehingga distribusi, geometri, dan kontinuitas tubuh batuan antar lintasan dapat divisualisasikan secara spasial.

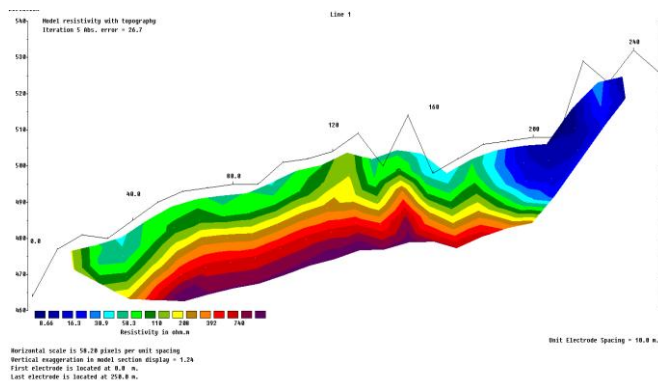
Interpretasi Data

Interpretasi dilakukan berdasarkan distribusi nilai resistivitas yang diperoleh dari hasil inversi dua dimensi dan model tiga dimensi. Analisis dilakukan dengan mengorelasikan pola distribusi resistivitas terhadap kondisi geologi lapangan, keberadaan singkapan batuan marmer, serta referensi nilai resistivitas batuan dari penelitian terdahulu. Model tiga dimensi digunakan untuk mengevaluasi geometri, kontinuitas, dan persebaran tubuh batuan marmer sehingga menghasilkan interpretasi bawah permukaan yang lebih representatif dibandingkan interpretasi setiap penampang dua dimensi secara terpisah.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Inversi Resistivitas 2D

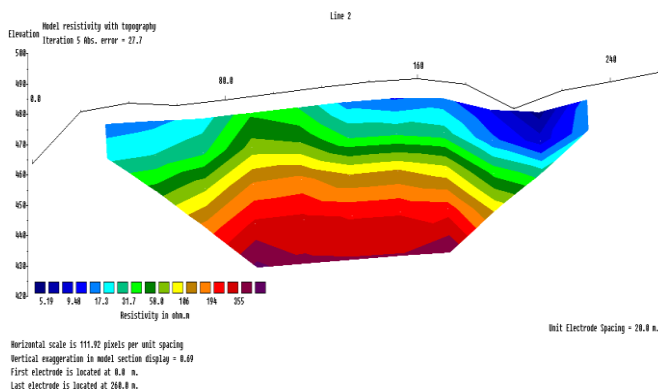
Hasil inversi data geolistrik resistivitas 2D menggunakan perangkat lunak Res2DInv menghasilkan penampang distribusi resistivitas bawah permukaan pada empat lintasan pengukuran. Inversi dilakukan hingga iterasi kelima pada masing-masing lintasan dengan mempertimbangkan kondisi topografi sepanjang lintasan. Hasil inversi menunjukkan adanya variasi resistivitas secara lateral dan vertikal pada seluruh lintasan, dengan rentang nilai resistivitas model antara 5,19–749 Ωm . Variasi tersebut menunjukkan adanya perubahan sifat kelistrikan material bawah permukaan yang berbeda pada setiap lintasan pengukuran. Hasil inversi dengan koreksi topografi pada keempat lintasan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Penampang Resistivitas 2D Line 1

Pada Line 1, hasil inversi menunjukkan rentang nilai resistivitas model sebesar 8,66–749 Ωm dengan panjang lintasan 250 m dan spasi elektroda 10 m. Distribusi resistivitas memperlihatkan zona dengan nilai resistivitas relatif rendah hingga menengah pada bagian dekat permukaan, sedangkan zona resistivitas lebih tinggi berkembang pada bagian bawah penampang. Zona resistivitas tinggi tampak lebih dominan pada bagian tengah lintasan, terutama sekitar posisi 70–180 m, dan menerus ke bagian yang lebih dalam. Pada bagian sekitar 180–250 m, terlihat perubahan menuju resistivitas yang lebih rendah hingga menengah pada bagian atas penampang.

Model inversi Line 1 memiliki error sebesar 26,7% setelah lima iterasi. Secara vertikal, penampang inversi menunjukkan kedalaman model hingga sekitar 28,6 m pada penampang tanpa topografi. Pola resistivitas yang dihasilkan menunjukkan adanya kontras yang cukup jelas antara lapisan bagian atas dan bagian bawah, sehingga Line 1 memberikan informasi awal mengenai perubahan sifat fisik bawah permukaan pada zona penelitian.

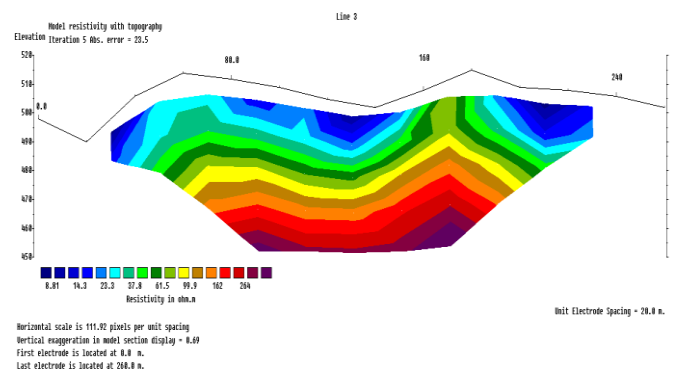


Gambar 3. Penampang Resistivitas 2D Line 2

Hasil inversi pada Line 2 menunjukkan rentang resistivitas model sebesar 5,19–355 Ωm dengan panjang lintasan 260 m dan spasi elektroda 20 m. Distribusi

resistivitas pada lintasan ini memperlihatkan pola berlapis dengan nilai resistivitas relatif rendah hingga menengah pada bagian atas dan peningkatan nilai resistivitas menuju bagian yang lebih dalam.

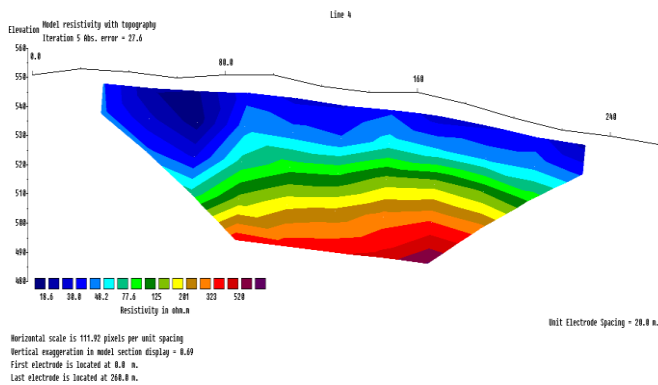
Zona resistivitas relatif tinggi terutama berkembang mulai sekitar posisi 80–190 m dan mencapai bagian bawah penampang, sedangkan bagian dekat permukaan didominasi oleh nilai resistivitas yang lebih rendah. Nilai error hasil inversi Line 2 sebesar 27,7% setelah lima iterasi. Kedalaman model pada penampang tanpa topografi mencapai sekitar 53,7 m. Dibandingkan Line 1, Line 2 menunjukkan pola distribusi resistivitas yang lebih menerus secara lateral pada bagian bawah penampang, dengan zona resistivitas tinggi yang berkembang cukup luas pada bagian tengah lintasan.



Gambar 4. Penampang Resistivitas 2D Line 3

Pada Line 3, hasil inversi menghasilkan rentang nilai resistivitas sebesar 8,81–264 Ωm dengan panjang lintasan 260 m dan spasi elektroda 20 m. Distribusi resistivitas menunjukkan zona resistivitas rendah hingga menengah pada bagian dekat permukaan, kemudian meningkat secara bertahap ke arah kedalaman. Zona resistivitas relatif tinggi berkembang terutama pada bagian tengah hingga bawah lintasan, dengan penyebaran yang cukup luas dari sekitar posisi 70–200 m.

Nilai error hasil inversi Line 3 sebesar 23,5% setelah lima iterasi, yang merupakan nilai error terendah dibandingkan tiga lintasan lainnya. Kedalaman model pada penampang tanpa topografi mencapai sekitar 53,7 m. Pola distribusi resistivitas pada Line 3 memperlihatkan kecenderungan peningkatan resistivitas secara vertikal dari bagian permukaan menuju bagian bawah penampang, meskipun terdapat variasi lateral pada bagian tengah lintasan.



Gambar 5. Penampang Resistivitas 2D Line 4

Hasil inversi pada Line 4 menunjukkan rentang resistivitas model sebesar 18,6–520 Ωm dengan panjang lintasan 260 m dan spasi elektroda 20 m. Penampang memperlihatkan zona resistivitas rendah hingga menengah pada bagian atas, sedangkan nilai resistivitas meningkat secara bertahap menuju bagian bawah penampang. Zona resistivitas relatif tinggi berkembang cukup luas pada bagian tengah hingga akhir lintasan, terutama sekitar posisi 80–220 m, dengan nilai maksimum mencapai sekitar 520 Ωm pada bagian bawah model. Hasil inversi Line 4 memiliki absolute error sebesar 27,6% setelah lima iterasi dengan kedalaman model sekitar 53,7 m pada penampang tanpa topografi. Distribusi resistivitas menunjukkan pola yang relatif menerus secara lateral pada bagian bawah lintasan, meskipun terdapat perubahan ketebalan dan posisi zona resistivitas dari bagian awal hingga akhir lintasan.

Secara keseluruhan, keempat lintasan menunjukkan pola distribusi resistivitas yang relatif konsisten berupa zona resistivitas lebih rendah pada bagian dekat permukaan dan peningkatan resistivitas pada bagian yang lebih dalam, meskipun rentang nilai dan bentuk distribusinya berbeda pada masing-masing lintasan. Zona resistivitas relatif tinggi berkembang pada bagian tengah hingga bawah beberapa lintasan dan menunjukkan kecenderungan persebaran lateral yang perlu dikaji lebih lanjut melalui korelasi antarpemampang.

Rentang resistivitas tertinggi diperoleh pada Line 1, yaitu hingga 749 Ωm , sedangkan rentang terendah terdapat pada Line 2, yaitu mulai dari 5,19 Ωm . Line 3 menghasilkan nilai error inversi terendah sebesar 23,5%, sedangkan Line 2 memiliki nilai error tertinggi sebesar 27,7%. Perbedaan distribusi dan rentang resistivitas tersebut menunjukkan adanya heterogenitas kondisi bawah permukaan pada daerah penelitian.

Berdasarkan hasil empat penampang tersebut, interpretasi litologi tidak dilakukan hanya berdasarkan satu nilai resistivitas tertentu, tetapi mempertimbangkan pola distribusi resistivitas, kontinuitas antar lintasan, kondisi topografi, serta informasi geologi daerah penelitian. Dengan demikian, hasil inversi dua dimensi selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk melakukan integrasi spasial dan pemodelan tiga dimensi sehingga persebaran zona resistivitas dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.

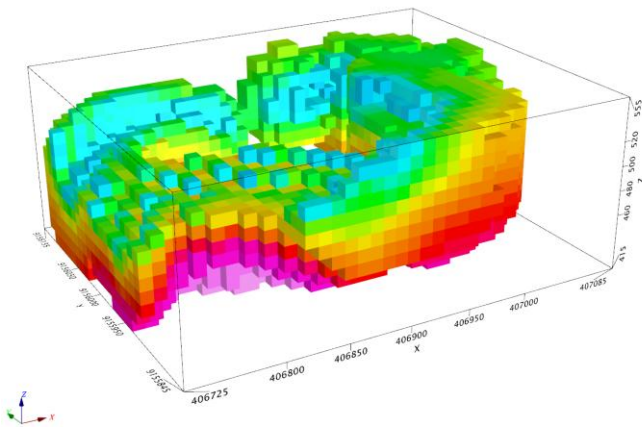
Tabel 2: Hasil Inversi Resistivitas 2D

Lintasan	Panjang Lintasan (m)	Spasi Elektroda (m)	Iterasi	Resistivitas (Ωm)	Ab. s. Error (%)	Kedalaman Model Maks. (m)
Line 1	250	10	5	8,66–749	26,7	28,6
Line 2	260	20	5	5,19–355	27,7	53,7
Line 3	260	20	5	8,81–264	23,5	53,7
Line 4	260	20	5	18,6–520	27,6	53,7

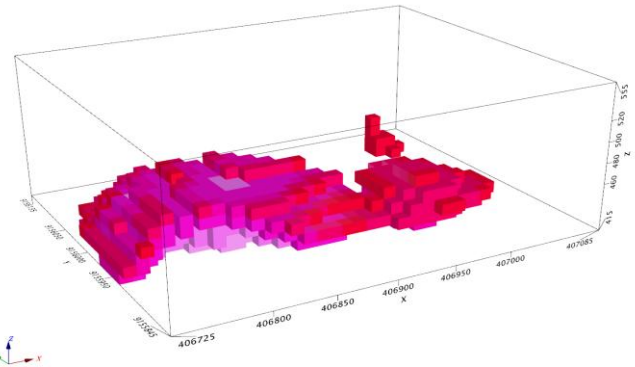
Pemodelan Tiga Dimensi

Hasil inversi resistivitas dua dimensi dari empat lintasan selanjutnya diintegrasikan berdasarkan posisi spasial masing-masing lintasan untuk memperoleh model distribusi resistivitas bawah permukaan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj. Data hasil inversi dari Line 1 hingga Line 4 diintegrasikan berdasarkan koordinat spasial dan nilai resistivitas sehingga distribusi resistivitas dapat direpresentasikan secara lateral dan vertikal dalam satu volume pemodelan. Pemodelan tiga dimensi dilakukan dengan ukuran *cell size* sebesar 10 m, sehingga setiap *voxel* memiliki dimensi 10 × 10 × 10 m atau volume sebesar 1.000 m³.

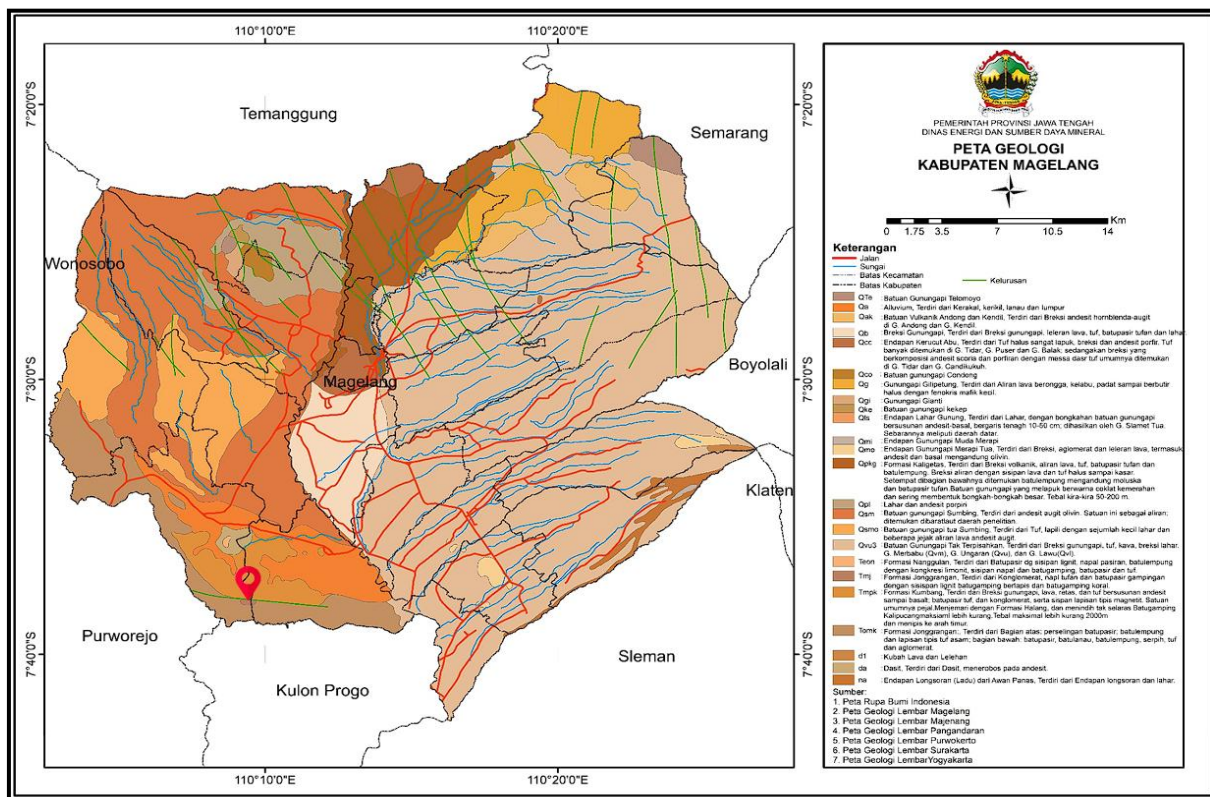
Model distribusi resistivitas keseluruhan memiliki rentang nilai 0,018–1963,84 Ωm . Berdasarkan statistik voxel pada Oasis Montaj, model tersebut terdiri atas 5.305 sel data valid dan 9.311 sel dummy. Nilai resistivitas minimum sebesar 0,018 Ωm , maksimum 1963,84 Ωm , dengan nilai rata-rata 277,83 Ωm dan standar deviasi 348,24 Ωm . Dengan ukuran cell 10 m pada masing-masing arah, sebanyak 5.305 sel valid tersebut merepresentasikan volume model sebesar 5.305.000 m³. Model keseluruhan ini digunakan untuk menggambarkan distribusi resistivitas bawah permukaan secara umum sebelum dilakukan pemisahan terhadap zona resistivitas tinggi.



Gambar 4. Model 3D Zona Resistivitas Tinggi Rentang 500,11–1963,84 Ωm



Perbandingan kedua model menunjukkan bahwa zona resistivitas $\geq 500 \text{ } \Omega\text{m}$ memiliki volume 824.000 m^3 , sedangkan keseluruhan model memiliki volume $5.305.000 \text{ m}^3$. Dengan demikian, zona resistivitas tinggi tersebut mencakup sekitar 15,5% dari volume model keseluruhan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa zona resistivitas tinggi hanya menempati sebagian volume bawah permukaan yang dimodelkan.



Gambar 5. Peta Geologi Regional Kabupaten Magelang

Interpretasi Persebaran Batuan Marmer Berdasarkan Model Resistivitas 3D

Interpretasi hasil penelitian dilakukan dengan mengintegrasikan model resistivitas dua dimensi, model tiga dimensi, kondisi geologi regional, serta informasi lapangan. Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Magelang, daerah penelitian berada pada satuan Formasi Jonggrangan (Tmj), Formasi Kumbing (Tm_{pk}), dan Formasi Jonggrangan bagian bawah (Tomk). Formasi Jonggrangan diketahui tersusun oleh konglomerat, napal tufan, batupasir gampingan, batugamping berlapis, dan batugamping koral, sedangkan Formasi Kumbing didominasi oleh breksi gunungapi, lava, tuf, konglomerat, dan batupasir tufan. Sementara itu, Formasi Jonggrangan bagian bawah tersusun atas perselingan batupasir, batulempung, batulanau, tuf, serta aglomerat. Perbedaan litologi tersebut menghasilkan variasi sifat kelistrikan bawah permukaan sehingga dapat dibedakan melalui metode geolistrik resistivitas.

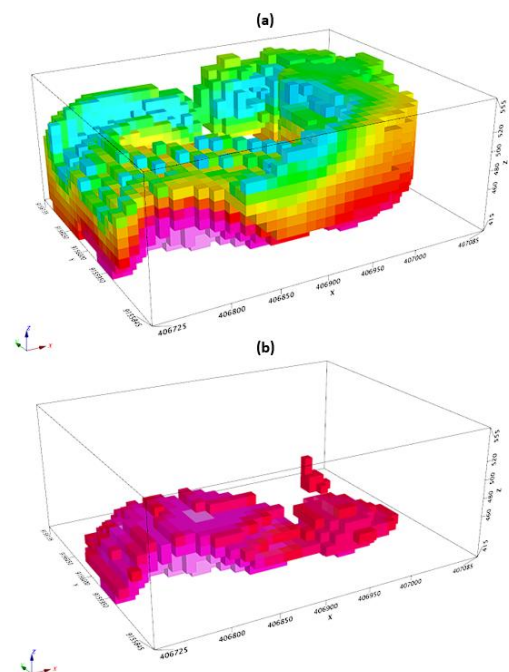
Berdasarkan hasil inversi resistivitas pada empat lintasan, diperoleh rentang nilai resistivitas sebesar 5,66–1964 Ωm . Mengacu pada klasifikasi resistivitas batuan menurut Telford et al. (1990), nilai resistivitas $\geq 500 \Omega\text{m}$ tidak hanya dimiliki oleh batu gamping (limestone), tetapi juga dapat dijumpai pada kuarsa (quartz) dan kerikil kering (dry gravel). Oleh karena itu, interpretasi zona resistivitas tinggi pada penelitian ini tidak dilakukan hanya berdasarkan nilai resistivitas, melainkan dikorelasikan dengan kondisi geologi regional, litologi penyusun daerah penelitian, hasil observasi lapangan, serta aktivitas penambangan marmer yang telah berlangsung di lokasi penelitian.

Nilai resistivitas sebesar $\geq 500 \Omega\text{m}$ tidak hanya dijadikan sebagai batas interpretasi berdasarkan klasifikasi resistivitas batuan oleh Telford et al. (1990), tetapi juga perlu dibandingkan dengan kemungkinan litologi lain yang memiliki rentang resistivitas serupa, seperti batupasir, kerikil kering (dry gravel), kuarsa, dan beberapa batuan beku yang bersifat kompak. Oleh karena itu, interpretasi litologi pada penelitian ini tidak dilakukan hanya berdasarkan nilai resistivitas, melainkan dikorelasikan dengan kondisi geologi regional daerah penelitian, keberadaan singkapan marmer di lapangan, serta aktivitas penambangan marmer yang masih berlangsung.

Tabel 3: Nilai Resistivitas Batuan dan Mineral (Telford, 1990)

Jenis Batuan	Resistivitas (Ωm)
Udara	-
Pirit (<i>pyrite</i>)	0,01 – 100
Kwarsa (<i>quartz</i>)	$500 - 8 \times 10^3$
Kalsit (<i>calcite</i>)	1×10^3
Garam batu (<i>rock salt</i>)	$30 - 1 \times 10^3$
Granit (<i>granite</i>)	$200 - 1 \times 10^4$
Andesit (<i>andesite</i>)	$1,7 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Basal	$10 - 13 \times 10^7$
Batu gamping (limestone)	$500 - 1 \times 10^4$
Batu pasir (sandstone)	200 – 8.000
Batu tulis (shales)	20 – 2.000
Pasir (<i>sand</i>)	1 – 100
Lempung (clay)	1 – 100
Lempung pasiran	30 – 215
Air tanah (groundwater)	0,5 – 300
Air laut (sea water)	0,2
Magnetit (<i>magnetite</i>)	0,01 – 1.000
Kerikil kering (dry gravel)	600 – 1.000
Aluvium (<i>alluvium</i>)	10 – 800
Pasir kerikil	100 – 1.000
Kerikil (<i>gravel</i>)	100 – 600

Model tiga dimensi hasil interpolasi voxel memperlihatkan distribusi resistivitas bawah permukaan secara spasial. Penyaringan pada nilai $\geq 500 \Omega\text{m}$ dari rentang 0–1964 Ωm digunakan untuk mengidentifikasi zona resistivitas tinggi yang sesuai dengan kisaran resistivitas batuan karbonat menurut Telford dkk. (1990).



Gambar 6. Model 3D Resistivitas Hasil Interpolasi Voxel Menggunakan Batas Resistivitas (a) 0–1964 Ωm Dan (b) 500–1964 Ωm .

Pada model tiga dimensi tanpa *clipping* (0–1964 Ωm), jumlah voxel valid mencapai 5.305 sel dengan volume sekitar 5.305.000 m^3 . Setelah dilakukan *clipping* menggunakan batas resistivitas $\geq 500 \Omega\text{m}$, jumlah voxel valid berkurang menjadi 824 sel dengan volume sekitar 824.000 m^3 . Penurunan volume tersebut menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil volume bawah permukaan yang memenuhi karakteristik resistivitas batugamping berdasarkan acuan Telford. Dengan demikian, zona resistivitas tinggi $>500 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai tubuh batuan marmer berdasarkan kesesuaian nilai resistivitas terhadap acuan Telford, korelasi dengan Formasi Jonggrangan yang mengandung batugamping sebagai batuan asal, serta didukung oleh keberadaan singkapan dan aktivitas penambangan marmer di lokasi penelitian.

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Magelang, lokasi penelitian tersusun oleh tiga satuan utama, yaitu Formasi Jonggrangan (Tmj), Formasi Kumbing (Tmjk), dan Formasi Jonggrangan bagian bawah (Tomk). Di antara ketiga satuan tersebut, Formasi Jonggrangan diketahui mengandung batugamping berlapis hingga batugamping koral yang secara geologi merupakan batuan asal (protolith) pembentuk marmer apabila mengalami proses metamorfisme. Sementara itu, Formasi Kumbing lebih didominasi oleh breksi gunungapi, lava, tuf, dan konglomerat, sedangkan Formasi Jonggrangan bagian bawah tersusun atas perselingan batupasir, batulempung, batulanau, tuf, dan serpih. Dengan demikian, zona resistivitas tinggi yang teridentifikasi memiliki kesesuaian paling kuat dengan penyebaran satuan batugamping Formasi Jonggrangan dibandingkan satuan batuan lainnya.

Apabila dibandingkan dengan klasifikasi resistivitas batuan menurut Telford et al. (1990), rentang resistivitas $\geq 500 \Omega\text{m}$ memang tidak bersifat unik untuk batugamping. Nilai resistivitas tersebut juga dapat dijumpai pada kuarsa (500–8000 Ωm), batupasir kompak (200–8000 Ωm), kerikil kering (600–1000 Ωm), serta beberapa batuan beku seperti granit maupun andesit yang memiliki resistivitas lebih tinggi. Namun berdasarkan kondisi geologi regional, litologi penyusun daerah penelitian tidak didominasi oleh satuan kuarsa masif ataupun granit. Nilai resistivitas tinggi tersebut lebih sesuai diinterpretasikan sebagai tubuh batugamping yang telah mengalami proses metamorfisme menjadi marmer karena didukung oleh data geologi, kondisi lapangan, serta aktivitas penambangan marmer yang telah lama berlangsung pada lokasi penelitian.

Interpretasi batuan marmer pada penelitian ini tidak dilakukan hanya berdasarkan nilai resistivitas, melainkan melalui integrasi beberapa parameter pendukung. Zona dengan resistivitas 500–1964 Ωm

terlebih dahulu diinterpretasikan sebagai batuan karbonat karena sesuai dengan rentang resistivitas batugamping menurut Telford et al. (1990). Interpretasi tersebut kemudian diperkuat oleh kondisi geologi regional yang menunjukkan keberadaan satuan batugamping Formasi Jonggrangan sebagai batuan asal (protolit), serta hasil observasi lapangan yang memperlihatkan adanya singkapan dan aktivitas penambangan marmer di sekitar lokasi penelitian. Pendekatan tersebut sejalan dengan Penna et al. (2024) yang menunjukkan bahwa metode geofisika berbasis resistivitas dapat digunakan untuk mengkarakterisasi endapan marmer dan membantu menggambarkan kondisi bawah permukaan pada daerah prospek marmer.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu mengenai penerapan Electrical Resistivity Tomography (ERT) untuk karakterisasi batuan karbonat. Aleardi et al. (2021) menjelaskan bahwa hasil inversi resistivitas mampu merepresentasikan distribusi sifat listrik bawah permukaan sehingga batas litologi dapat diinterpretasikan dengan lebih baik. Penelitian mengenai pemodelan tiga dimensi ERT juga menunjukkan bahwa integrasi beberapa lintasan dua dimensi ke dalam model tiga dimensi menghasilkan visualisasi kontinuitas tubuh batuan yang lebih representatif dibandingkan interpretasi setiap lintasan secara terpisah. Pasierb (2022) menerapkan metode ERT 2D/3D pada batuan karbonat untuk mengidentifikasi variasi kondisi bawah permukaan dan zona struktur, yang menunjukkan bahwa integrasi data resistivitas dapat digunakan untuk memperjelas distribusi spasial batuan karbonat. Pada penelitian ini, model tiga dimensi berhasil memperlihatkan kontinuitas zona resistivitas tinggi yang setelah dikorelasikan dengan geologi regional serta kondisi lapangan diinterpretasikan sebagai persebaran batuan marmer bawah permukaan. Hasil tersebut sejalan dengan Mazzini et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pemodelan Electrical Resistivity Tomography (ERT) tiga dimensi dapat memberikan gambaran distribusi sifat listrik bawah permukaan secara spasial sehingga hubungan antar-zona resistivitas dapat diamati secara lebih menyeluruh. Meskipun demikian, interpretasi ini masih memiliki keterbatasan karena belum diverifikasi menggunakan data pemboran atau analisis petrografi. Oleh sebab itu, hasil penelitian ini dipandang sebagai model awal yang dapat menjadi acuan eksplorasi lanjutan untuk menentukan batas dan volume tubuh marmer secara lebih akurat.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi Wenner-Schlumberger pada empat lintasan pengukuran, diperoleh distribusi nilai resistivitas bawah permukaan berkisar antara 5,66–1964 Ωm . Hasil inversi dua dimensi yang diintegrasikan ke dalam model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj mampu menggambarkan distribusi spasial resistivitas secara lebih utuh dibandingkan interpretasi setiap lintasan secara terpisah. Model tiga dimensi menunjukkan bahwa zona resistivitas tinggi dengan nilai $\geq 500 \Omega\text{m}$ memiliki volume sekitar 824.000 m^3 atau sekitar 15,5% dari total volume model sebesar 5.305.000 m^3 , sedangkan zona resistivitas lebih rendah mendominasi sekitar 84,5% volume bawah permukaan. Integrasi hasil inversi dua dimensi ke dalam model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj berhasil menggambarkan distribusi spasial resistivitas bawah permukaan secara lebih komprehensif. Model tiga dimensi keseluruhan memiliki rentang resistivitas 0,018–1963,84 Ωm dengan volume model valid sebesar 5.305.000 m^3 . Setelah dilakukan penyaringan menggunakan batas resistivitas 500 Ωm , diperoleh zona resistivitas tinggi dengan volume sekitar 824.000 m^3 atau sekitar 15,5% dari total volume model. Penyaringan tersebut mempermudah identifikasi zona resistivitas tinggi yang berpotensi berkaitan dengan batuan karbonat.

Interpretasi litologi pada penelitian ini dilakukan melalui integrasi antara nilai resistivitas, kondisi geologi regional, dan observasi lapangan. Zona resistivitas tinggi diinterpretasikan sebagai prospek penyebaran batuan karbonat yang telah mengalami metamorfisme menjadi marmer berdasarkan kesesuaiannya dengan rentang resistivitas batugamping menurut Telford et al. (1990), keberadaan Formasi Jonggrangan sebagai batuan asal (protolith), serta adanya singkapan dan aktivitas penambangan marmer di lokasi penelitian. Dengan demikian, pemodelan tiga dimensi berbasis data resistivitas dua dimensi terbukti mampu meningkatkan kualitas interpretasi geologi bawah permukaan dan memberikan informasi awal mengenai sebaran spasial batuan marmer yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar kegiatan eksplorasi lanjutan.

Daftar Pustaka

- Aleardi, M., Vinciguerra, A., & Hojat, A. (2021). Ensemble-Based Electrical Resistivity Tomography with Data and Model Space Compression. *Pure and Applied Geophysics*, 178(5), 1781–1803. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02730-1>
- Che, H., Hedblom, P., & Dahlin, T. (2026). Clipping Reconstruction of electrical resistivity tomography (ERT) data using different base measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 249(February), 106199. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2026.106199>
- Fitrianto, T. N., Supriyadi, S., & 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), 111. <https://doi.org/10.13057/ijap.v7i2.13952>
- Hasan, M., Shang, Y., Meng, H., Shao, P., & Yi, X. (2021). Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation. *Scientific Reports*, 11(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03217-8>
- Ibrahim, M. D., Hamit, A., Mahamat, A. L., -djazoul, O., Bourma, A. A., & Ahmat, D. (2026). Three-dimensional electrical resistivity tomography for groundwater mapping in the Abéché Basin, Chad. *Discover Water*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-026-00362-x>
- Mazzini, A., Carrier, A., Sciarra, A., Fischanger, F., Winarto-Putro, A., & Lupi, M. (2021). 3D Deep Electrical Resistivity Tomography of the Lusi Eruption Site in East Java. *Geophysical Research Letters*, 48(18). <https://doi.org/10.1029/2021GL092632>
- Penna, N. de S., Porsani, J. L., Rangel, R. C., Costa, V. H. H., de Oliveira, N. C., Stangari, M. C., & Sousa, C. de C. B. de F. (2024). Near-Surface Geophysical Characterization of a Marble Deposit to Promote a Sustainable Small-Scale Mining. *Remote Sensing*, 16(7), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs16071147>
- Rahmawati Fitrianingtyas, Amri, C., Khafidh Nur Aziz, Hilma Lutfiana, Rial Dwi Martasari, & Uli Ulfa. (2026). Identification Of Subsurface Lithological Units Using Electrical Resistivity Modelling In A Landslide-Prone Area Of Dlingo, Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Fisika Unand*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.25077/jfu.15.2.155-163.2026>
- Satiawan, S., Saragih, D., & Hadad, D. A. (2026). Engineering , Environment , and Technology Can Liquefaction Be Repeated ? An Electrical Resistivity Study at South Palu , Indonesia. 10(2), 259–264. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2026.11.02.25558>
- Syamsuddin, E., Maulana, A., Assegaf, A. H., & Irfan, U. R. (2025). Integrating electrical resistivity tomography and x-ray fluorescence for characterizing limestone in the Wapulaka formation, Central Buton, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(4), 5825

7871–7885.

<https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.124.7871>

- Winarti, & Misdiyanta, P. (2021). Electrical Resistivity Tomography Untuk Identifikasi Akuifer di Daerah Vulkanik (Studi Kasus: Kaliangkrik-Magelang). *ReTII*, 2021(November), 464–470. <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/2646/1234>
- Pasierb, B. (2022). The application of the 2D/3D electrical resistivity tomography (ERT) method in investigating the carbonate karst of the Zakrzówek Horst. *Geology, Geophysics and Environment*, 48(3), 319–327. <https://doi.org/10.7494/geol.2022.48.3.319>
- Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Jawa Tengah. (2022). *Peta Geologi Kabupaten Magelang*. Open Data Jawa Tengah. <https://data.jatengprov.go.id/en/dataset/peta-geologi-kabupaten-magelang>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 2). Cambridge: Cambridge university press. <https://www.cambridge.org/>