



## Identifikasi Mineralisasi Sulfida Menggunakan Metode Geolistrik 2D Resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) Daerah Vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah

Farah Dhiba<sup>1\*</sup>, Amelia Oryza Sativa<sup>1</sup>, Risky Martin Antosia<sup>1</sup>, Nur Hidayat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia.

<sup>2</sup> Pusat Lingkungan dan Teknologi Bersih, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1671>

### Article Info:

Received : 15 Desember 2025  
Revised : 22 Desember 2025  
Accepted : 10 Januari 2026  
Published : 20 Januari 2026

Correspondence:  
Farah Dhiba

Phone :

**Abstract:** This study was conducted to identify sulfide mineralisation in the volcanic area of Tolitoli, Central Sulawesi, based on subsurface electrical responses. The methods employed were two-dimensional (2D) geoelectrical resistivity and Induced Polarization (IP) surveys using the Wenner-Schlumberger configuration. Data acquisition was carried out along ten survey lines divided into two observation areas, and the data were processed using least-squares inversion to generate two-dimensional resistivity and chargeability sections. The results indicate that the study area is predominantly characterised by high resistivity values ( $>1000 \Omega\text{m}$ ), which are interpreted as massive and relatively fresh volcanic rocks, such as andesite and basalt. However, the IP data reveal the presence of moderate to high chargeability anomalies (40–60 ms) that are locally developed and associated with fracture zones and hydrothermal alteration. The combination of low to moderate resistivity values (10–100  $\Omega\text{m}$ ) and moderate chargeability is interpreted as an indication of disseminated sulfide mineralisation, particularly pyrite, with low to moderate intensity. The most prominent zones indicating mineralisation were identified along survey lines 3, 6, and 9, which are inferred to be structurally controlled and to represent pathways for hydrothermal fluid migration. Based on these results, it can be concluded that the integration of 2D geoelectrical resistivity and Induced Polarization (IP) methods is effective for identifying indications of sulfide mineralisation in complex volcanic environments.

**Keywords:** Geoelectrical Resistivity; Induced Polarization; Sulfide Mineralization; Volcanic Rocks; Tolitoli

**Citation:** Dhiba, F., Oryza Sativa, A., Martin Antosia, R., & Hidayat, N. (2026). Identifikasi Mineralisasi Sulfida Menggunakan Metode Geolistrik 2D Resistivitas dan Induced Polarization (IP) Daerah Vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(1), 14–22. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1671>

### Pendahuluan

Daerah vulkanik dikenal sebagai salah satu lingkungan geologi yang dikaitkan dengan potensi pembentukan mineral sulfida yang relatif tinggi. Aktivitas magmatik tidak hanya berperan sebagai sumber panas, tetapi juga memicu terbentuknya sistem hidrotermal yang berperan penting dalam melarutkan dan mentransport unsur-unsur logam sebelum akhirnya terendapkan. Pada kondisi tertentu, fluida hidrotermal yang bergerak melalui rekahan dan zona lemah batuan akan mengalami perubahan temperatur dan kimia, sehingga logam-logam terlarut tersebut dapat mengendap sebagai mineral sulfida. Proses ini

menyebabkan mineralisasi sulfida umumnya berkembang pada batuan vulkanik yang telah mengalami alterasi dan dikontrol oleh struktur geologi (Senduk & Abdurrachman, 2023). Eksplorasi mineral pada lingkungan vulkanik dihadapkan pada tingkat kompleksitas bawah permukaan yang tinggi. Proses alterasi hidrotermal pada batuan vulkanik dapat menghasilkan mineral lempung yang menurunkan resistivitas dan meningkatkan nilai IP, serta mineral sulfida yang juga menghasilkan respon kelistrikan serupa, sehingga interpretasi menjadi kurang pasti apabila hanya menggunakan satu metode eksplorasi geofisika (Sidiq dkk., 2021).

Email: [farahdhiba1004@gmail.com](mailto:farahdhiba1004@gmail.com)

Metode *Induced Polarization* (IP) menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap distribusi mineral logam karena parameter *chargeability* yang kuat, sehingga dapat digunakan untuk memetakan konsentrasi mineral bawah permukaan secara efektif bila dikombinasikan dengan data resistivitas (Nugraheni dkk., 2023). Beberapa studi terdahulu membuktikan bahwa penggabungan metode resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) efektif dalam meningkatkan akurasi identifikasi zona mineralisasi, karena mampu menampilkan respon kelistrikan yang lebih kontras dan informatif terhadap distribusi mineral logam (Amsah & Umar, 2020).

Mineralisasi logam, seperti emas dan mineral sulfida, pada umumnya berkaitan dengan aktivitas sistem hidrotermal yang ditandai oleh aliran fluida bersuhu tinggi yang bermigrasi melalui rekahan serta bidang lemah pada batuan. Selama proses tersebut, pengendapan mineral tidak berlangsung secara homogen, melainkan tersebar mengikuti pori, rongga, dan zona batuan yang memiliki permeabilitas tinggi. Kondisi ini menyebabkan akumulasi mineral cenderung terdiseminasi dan tidak membentuk konsentrasi yang terlokalisasi secara tunggal (Irvine, 1990). Kondisi ini menuntut pendekatan eksplorasi yang mampu menggambarkan karakter bawah permukaan secara detail dan berkesinambungan. Integrasi metode resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) telah terbukti meningkatkan kemampuan interpretasi geofisika dalam eksplorasi mineral, khususnya dalam mengidentifikasi zona mineralisasi dan alterasi hidrotermal melalui kontras respon kelistrikan bawah permukaan (Ali dkk., 2023). Amsah dan Umar (2020) melaporkan adanya keterkaitan antara nilai resistivitas rendah dan *chargeability* tinggi dengan mineralisasi emas pada sistem hidrotermal vulkanik di Sulawesi Tengah.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi data geolistrik resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) mampu menggambarkan sebaran zona alterasi hidrotermal yang berasosiasi dengan mineralisasi logam di bawah permukaan. Misalnya, penerapan resistivitas dan IP secara kombinasi meningkatkan ketepatan deteksi tubuh mineral karena parameter kelistrikan yang berbeda mencerminkan variasi litologi dan zona alterasi yang berpotensi mengandung mineral logam (Su dkk., 2024). Selain itu, studi kasus epithermal di mana IP *imaging* digunakan untuk mengidentifikasi batas zona mineralisasi dan alterasi hidrotermal memperkuat peran metode ini dalam mengevaluasi karakter bawah permukaan batuan vulkanik (Han dkk., 2016). Hasil-hasil tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan geofisika masih memiliki ruang pengembangan, terutama pada wilayah yang belum banyak dikaji secara detail.

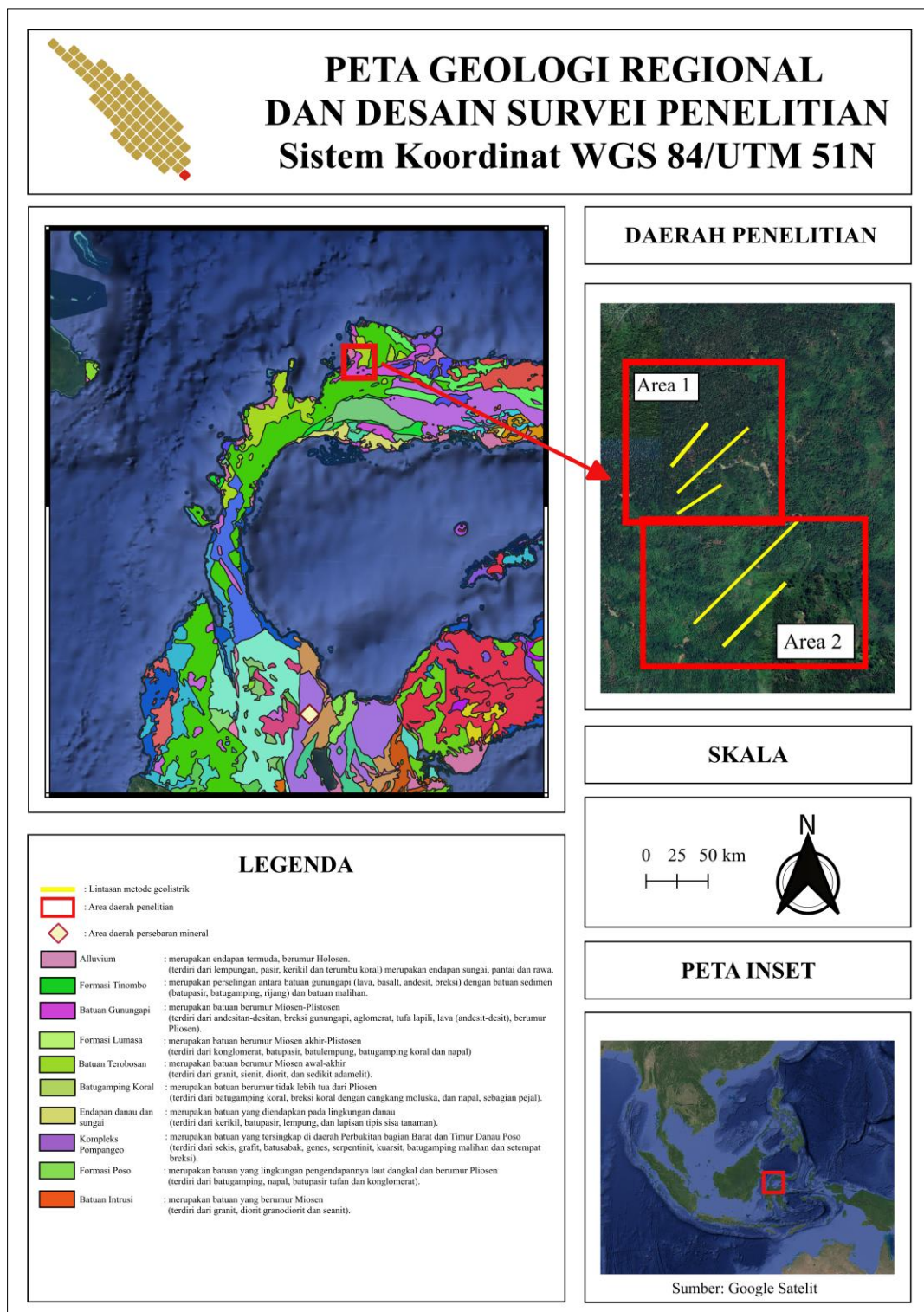
Wilayah Tolitoli di Sulawesi Tengah merupakan daerah yang disusun batuan vulkanik dan vulkanoklastik serta berada pada jalur magmatik aktif Indonesia. Secara geologi, kondisi ini memberikan peluang berkembangnya sistem hidrotermal yang berpotensi membentuk mineralisasi sulfida. Namun, hingga saat ini informasi mengenai karakteristik bawah permukaan dan potensi mineralisasi sulfida di daerah tersebut terbatas, khususnya yang didukung oleh data geofisika terintegrasi. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kesenjangan informasi yang perlu dijawab melalui penelitian yang lebih terarah.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi mineralisasi sulfida di daerah vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah, menggunakan metode geolistrik resistivitas 2D dan *Induced Polarization* (IP). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai karakter respon kelistrikan batuan yang berkaitan dengan mineralisasi sulfida serta menjadi acuan awal bagi kegiatan eksplorasi mineral di wilayah tersebut.

### Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian terletak di wilayah vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah, yang secara regional tersusun oleh batuan vulkanik berumur Miosen–Pliosen hingga endapan Kuartar. Berdasarkan peta geologi regional pada Gambar 1, litologi utama penyusun daerah ini meliputi lava andesit–basalt, breksi vulkanik, dan endapan piroklastik, yang berasosiasi dengan aktivitas magmatisme busur kepulauan Sulawesi. Secara struktural, wilayah penelitian dipengaruhi oleh sistem sesar dan rekahan yang berkembang sejajar dengan arah regional Sulawesi. Struktur geologi berupa sesar dan rekahan yang berkembang akibat aktivitas tektonik regional berperan sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal serta menjadi faktor pengontrol utama pembentukan alterasi dan mineralisasi sulfida di daerah penelitian (Kandora dkk., 2022; Kasim dkk., 2023).

Pada Gambar 1 lokasi penelitian berada pada satuan batuan vulkanik yang telah mengalami proses alterasi hidrotermal. Struktur geologi dan variasi litologi tersebut menjadi faktor pengontrol utama dalam pembentukan zona mineralisasi sulfida (Hasria dkk., 2020). Observasi geologi lapangan menunjukkan singkapan breksi vulkanik dan lava andesit yang tersebar di sepanjang lintasan survei geolistrik. Batuan umumnya berwarna abu-abu hingga coklat kemerahan, dengan kehadiran rekahan dan urat kuarsa yang berkembang mengikuti arah struktur utama. Kondisi ini mengindikasikan adanya pengaruh sistem hidrotermal yang intensif di daerah penelitian (Hasria dkk., 2020).



Gambar 1. Peta geologi Lembar Tolitoli yang menunjukkan struktur geologi regional utama di wilayah penelitian, serta peta desain penelitian (Ratman, 1976)

### Metode

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Tolitoli, Sulawesi Tengah, dengan fokus pada pemanfaatan data geolistrik untuk mengidentifikasi karakteristik bawah permukaan. Data utama yang digunakan berupa data geolistrik dua dimensi (2D) yang diperoleh melalui

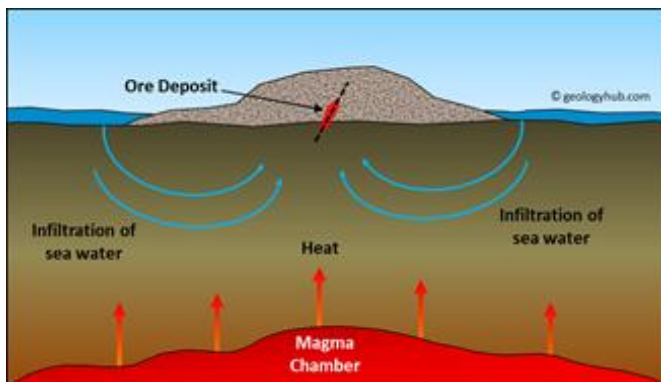
kombinasi metode resistivitas dan *Induced Polarization* (IP). Akuisisi data dilakukan menggunakan konfigurasi Wenner-Schlumberger, yang dipilih karena kemampuannya dalam memberikan resolusi lateral dan vertikal yang baik terhadap variasi resistivitas serta respon polarisasi bawah permukaan.

Sebanyak sepuluh lintasan pengukuran disusun pada daerah penelitian yang secara spasial dibagi ke dalam dua area pengamatan. Area 1 terdiri atas empat lintasan pengukuran, sedangkan Area 2 mencakup enam lintasan pengukuran. Pembagian area ini dilakukan karena lokasi lintasan pada Area 1 dan Area 2 berjauhan secara spasial, namun keduanya masih berada dalam satu kerangka geologi regional yang sama. Dengan demikian, pembagian tersebut bertujuan untuk mempermudah analisis dan interpretasi data tanpa mengabaikan keseragaman tatanan geologi regional daerah penelitian.

### Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal merupakan proses perubahan mineralogi dan kimia batuan akibat interaksi dengan fluida panas yang bermigrasi melalui rekahan, yang kemudian membentuk zona mineral tertentu di sekeliling sistem hidrotermal (Bakkar dkk., 2020). Proses alterasi hidrotermal terjadi akibat sirkulasi fluida panas yang bergerak melalui zona rekahan dan struktur geologi, membawa unsur-unsur logam yang kemudian terendapkan sebagai mineral sulfida ketika kondisi fisika-kimia fluida berubah (John dkk., 2010). Model konseptual sistem hidrotermal pada Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara sumber fluida, zona alterasi, dan pembentukan mineralisasi sulfida pada lingkungan vulkanik. Fluida hidrotermal membawa unsur-unsur logam dan bertindak sebagai media transport serta deposisi mineral.

Saat fluida mengalami pendinginan, penurunan tekanan, atau perubahan kimia, komponen logam yang terlarut mengalami presipitasi dan membentuk mineral sulfida seperti pirit, kalkopirit, sfalerit, serta galena di sepanjang struktur rekahan dan batuan induk (Sudarsono & Setiawan, 2012).



**Gambar 2.** Model konseptual sistem hidrotermal, dimodifikasi dari John dkk. (2010) dan Sudarsono & Setiawan (2012).

Secara geologi, daerah penelitian berkembang pada satuan yang dipengaruhi oleh aktivitas hidrotermal, yang berperan dalam pembentukan dan

redistribusi mineral melalui interaksi fluida panas dengan batuan induk.



**Gambar 3.** Singkapan urat kuarsa pada batuan granit

Proses alterasi hidrotermal tersebut menyebabkan perubahan mineralogi dan tekstur batuan, yang umum dijadikan indikator keberadaan sistem mineralisasi pada lingkungan vulkanik dan metamorf. Manifestasi proses ini terekam pada Gambar 3, yang merupakan alterasi sekunder akibat aktivitas hidrotermal. Singkapan tersebut berada pada zona persebaran mineral dalam satuan Kompleks Pompangeo, yang secara regional tersusun oleh batuan metamorf dan ofiolit terdeformasi serta berfungsi sebagai jalur sirkulasi fluida hidrotermal yang mengontrol pembentukan mineral sulfida di Sulawesi Tengah (Othman dkk., 2017).

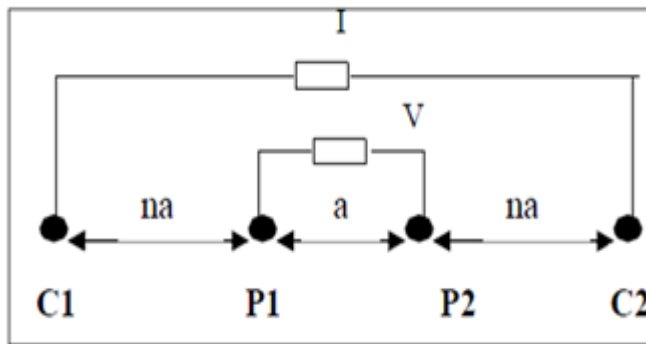
### Konfigurasi Elektroda dan Akuisisi Data

Akuisisi data geolistrik pada penelitian ini menggunakan konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, yang merupakan kombinasi antara konfigurasi *Wenner* dan *Schlumberger*. Konfigurasi ini dipilih karena mampu memberikan keseimbangan yang baik antara resolusi lateral dan kedalaman penetrasi, sehingga efektif untuk memetakan variasi resistivitas dan respon *Induced Polarization* (IP) pada lingkungan geologi vulkanik yang kompleks (Syamsuddin dkk., 2021).

Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dapat dilihat pada Gambar 4, susunan elektroda terdiri atas dua elektroda arus dan dua elektroda potensial yang ditempatkan secara linier dengan jarak antara elektroda sebesar  $a$ . Variasi kedalaman pengukuran diperoleh dengan meningkatkan faktor pengali  $n$ , sehingga memungkinkan identifikasi perubahan resistivitas pada berbagai kedalaman. Data lapangan yang diperoleh berupa nilai arus dan beda potensial, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung resistivitas semu.

Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Res2DInv* dengan metode inversi least squares. Proses inversi dilakukan secara iteratif hingga

diperoleh nilai kesalahan yang minimum, sehingga penampang resistivitas dua dimensi yang dihasilkan dapat merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan secara lebih akurat (Telford dkk., 1990).



Gambar 4. Susunan elektroda Konfigurasi Wenner-Schlumberger (Syamsuddin dkk., 2021)

**Metode Resistivitas**

Metode resistivitas merupakan metode geofisika aktif yang memanfaatkan aliran arus listrik searah (DC) ke dalam tanah untuk mengidentifikasi variasi sifat kelistrikan batuan bawah permukaan. Prinsip dasar metode ini didasarkan pada hukum Ohm, di mana perbedaan potensial yang terukur di permukaan digunakan untuk menghitung nilai resistivitas semu yang merepresentasikan respon gabungan litologi, porositas, kandungan fluida, serta tingkat alterasi batuan (Telford dkk., 1990).

Pada penelitian ini, metode resistivitas diaplikasikan untuk memetakan distribusi lateral dan vertikal batuan yang mengalami alterasi hidrotermal, yang umumnya ditandai oleh nilai resistivitas rendah akibat dominasi mineral lempung dan peningkatan kandungan fluida konduktif. Konfigurasi Wenner-Schlumberger dipilih karena memiliki kedalaman penetrasi yang baik, sehingga efektif dalam mendeteksi zona anomali yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal vulkanik (Amsah & Umar, 2020).

Secara matematis, nilai resistivitas semu ( $\rho_a$ ) dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

Dalam persamaan tersebut,  $\rho_a$  merupakan resistivitas semu yang dinyatakan dalam satuan ohm meter ( $\Omega m$ ),  $K$  adalah faktor geometrik elektroda yang ditentukan oleh konfigurasi pengukuran dan dinyatakan dalam meter,  $\Delta V$  menyatakan beda potensial listrik yang terukur dalam satuan volt (V), dan  $I$  merupakan kuat arus listrik yang dialirkan ke dalam tanah dengan satuan ampere (A). Faktor geometri atau  $K$  merupakan faktor yang bergantung pada susunan

elektroda yang diterapkan pada pengukuran lapangan. Nilai faktor geometri ditentukan oleh jarak spasi antar elektroda, sehingga untuk konfigurasi Wenner-Schlumberger, faktor geometri dapat dinyatakan sebagai berikut (Syamsuddin dkk., 2021):

$$K = \pi n(n + 1)\alpha \tag{2}$$

Berdasarkan faktor geometri tersebut, nilai resistivitas semu (*apparent resistivity*) pada konfigurasi Wenner-Schlumberger dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho_a = \pi n(n + 1)\alpha \frac{\Delta V}{I} \tag{3}$$

Dalam persamaan tersebut,  $\rho_a$  merupakan resistivitas semu (*apparent resistivity*) yang dinyatakan dalam satuan ohm meter ( $\Omega m$ ). Parameter  $\alpha$  merupakan jarak spasi antar elektroda yang digunakan dalam pengukuran dan dinyatakan dalam satuan meter (m). besaran  $I$  adalah kuat arus listrik yang diinjeksikan ke dalam medium bawah permukaan dengan satuan ampere (A), sedangkan  $\Delta V$  menyatakan beda potensial listrik yang terukur antara elektroda potensial dengan satuan volt (V).

**Metode Induced Polarization (IP)**

Metode *Induced Polarization* (IP) merupakan metode geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan mineral logam, khususnya mineral sulfida, berdasarkan respon polarisasi listrik batuan bawah permukaan. Metode ini telah banyak digunakan untuk eksplorasi mineral dan karakteristik bawah permukaan, dengan *chargeability* sebagai parameter utama yang menunjukkan kemampuan batuan menyimpan muatan listrik akibat adanya mineralisasi logam. Studi terdahulu menunjukkan bahwa IP dapat mendeteksi zona mineralisasi berbasis perbedaan *chargeability* dan resistivitas pada berbagai keadaan geologi (Santoso & Subagio, 2016).

Secara kuantitatif, nilai *chargeability* ( $M$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara integral tegangan peluruhan terhadap waktu dengan beda potensial primer, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \tag{4}$$

Pada persamaan tersebut,  $M$  merupakan nilai *chargeability* yang dinyatakan dalam satuan mV/V atau milidetik (ms). Parameter  $V_p$  merupakan beda potensial primer yang terukur sebelum arus listrik dihentikan, dengan satuan volt (V). fungsi  $V_s(t)$  menyatakan tegangan sekunder sebagai fungsi waktu setelah

pemutusan arus. Adapun  $t_1$  dan  $t_2$  merupakan batas awal dan batas akhir waktu integrasi yang digunakan dalam perhitungan nilai *chargeability*.

Nilai *chargeability* yang tinggi umumnya menunjukkan keberadaan mineral sulfida terdiseminasi seperti pirit, kalkopirit, dan sfalerit, sedangkan batuan non-logam atau batuan segar umumnya memiliki nilai *chargeability* yang rendah. Oleh karena itu, metode IP sangat efektif untuk mendeteksi yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal, terutama pada daerah vulkanik yang kompleks (Nugraheni dkk., 2023). Dalam penelitian ini, metode IP diaplikasikan bersamaan dengan metode resistivitas menggunakan konfigurasi *Wenner-Schlumberger*. Integrasi kedua metode tersebut bertujuan untuk membedakan zona alterasi lempungan yang bersifat konduktif dengan zona mineralisasi sulfida yang dicirikan oleh nilai *chargeability* tinggi, sehingga meningkatkan keakuratan interpretasi bawah permukaan (Amsah & Umar, 2020).

**Tabel 1.** Nilai referensi resistivitas batuan dan mineral (Muhammad dkk., 2017)

| Batuan/Mineral | Resistivitas ( $\Omega\text{m}$ ) |
|----------------|-----------------------------------|
| Shale          | 5 - 100                           |
| Batupasir      | 50 - 10 <sup>3</sup>              |
| Batugamping    | 100 - 10 <sup>4</sup>             |
| Dolomit        | 300 - 10 <sup>5</sup>             |
| Sekis          | 100 - 10 <sup>6</sup>             |
| Kuarsit        | 10 <sup>4</sup> - 10 <sup>6</sup> |
| Granit         | 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup> |
| Andesit        | 100 - 10 <sup>5</sup>             |
| Basal          | 100 - 10 <sup>4</sup>             |
| Pirit          | 1 - 10                            |
| Galena         | < 1                               |
| Batu Sabak     | 1 - 1,000                         |

Untuk mendukung interpretasi data resistivitas dan IP, digunakan nilai acuan yang bersumber dari penelitian terdahulu. Nilai-nilai tersebut dirangkum dalam Tabel 1 dan Tabel 2, yang digunakan sebagai pedoman dalam menginterpretasikan jenis batuan dan indikasi mineralisasi sulfida pada daerah penelitian.

**Tabel 2.** Nilai referensi *chargeability* batuan dan mineral (Muhammad dkk., 2017)

| Batuan/Mineral            | Chargeability (ms) |
|---------------------------|--------------------|
| Batugamping - Dolomit     | < 5                |
| Granit                    | 1 - 10             |
| Shale                     | 5 - 20             |
| Batupasir                 | 10 - 40            |
| Tuf vulkanik - tuf kompak | 20 - 60            |

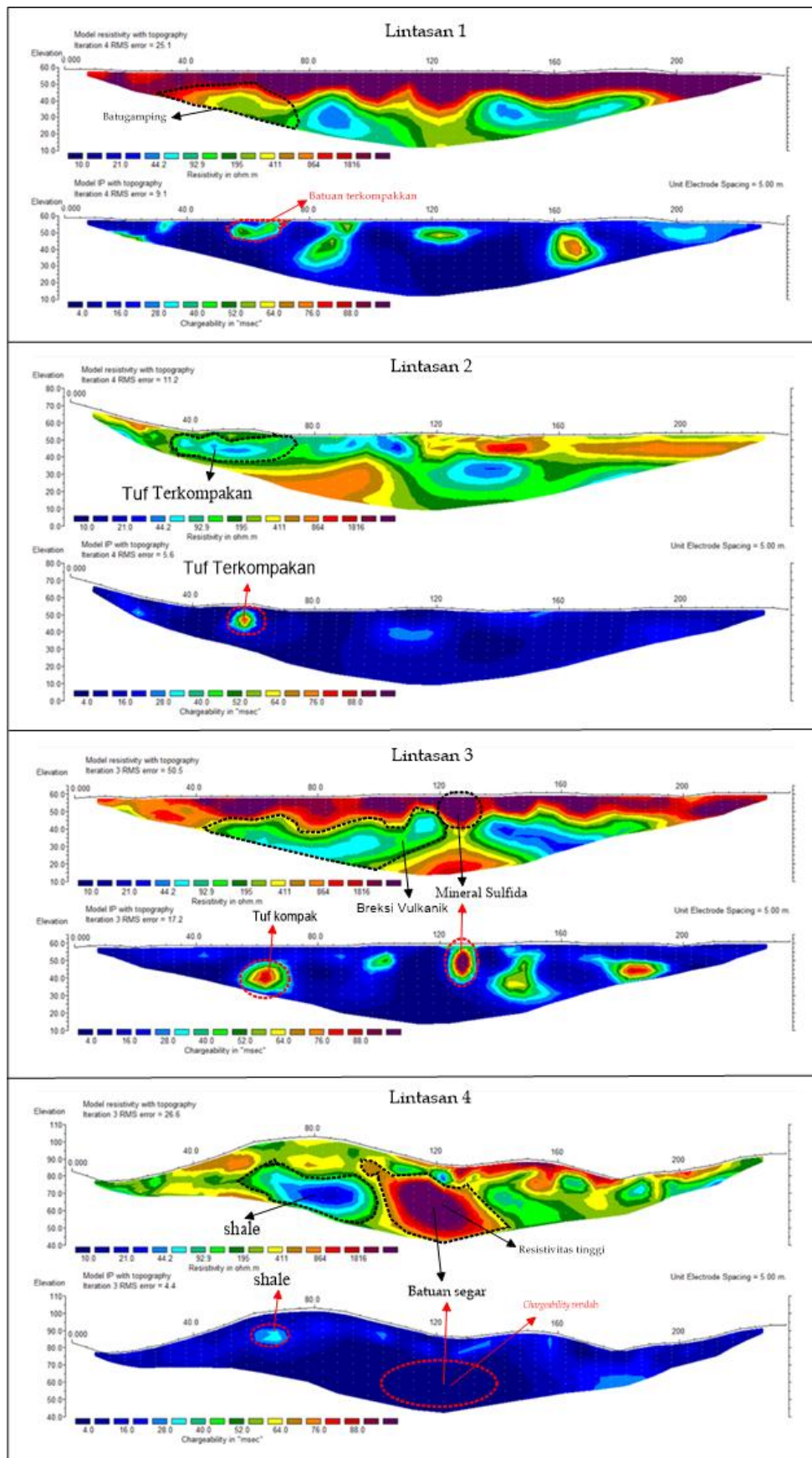
|   |           |
|---|-----------|
| Batuan termineralisasi ( $\pm 2-8\%$ sulfida) | 40 - 100  |
| Batuan termineralisasi (8-20% sulfida)        | 100 - 200 |
| Pirit   | >100      |
| Galena  | >150      |

### Hasil dan Diskusi

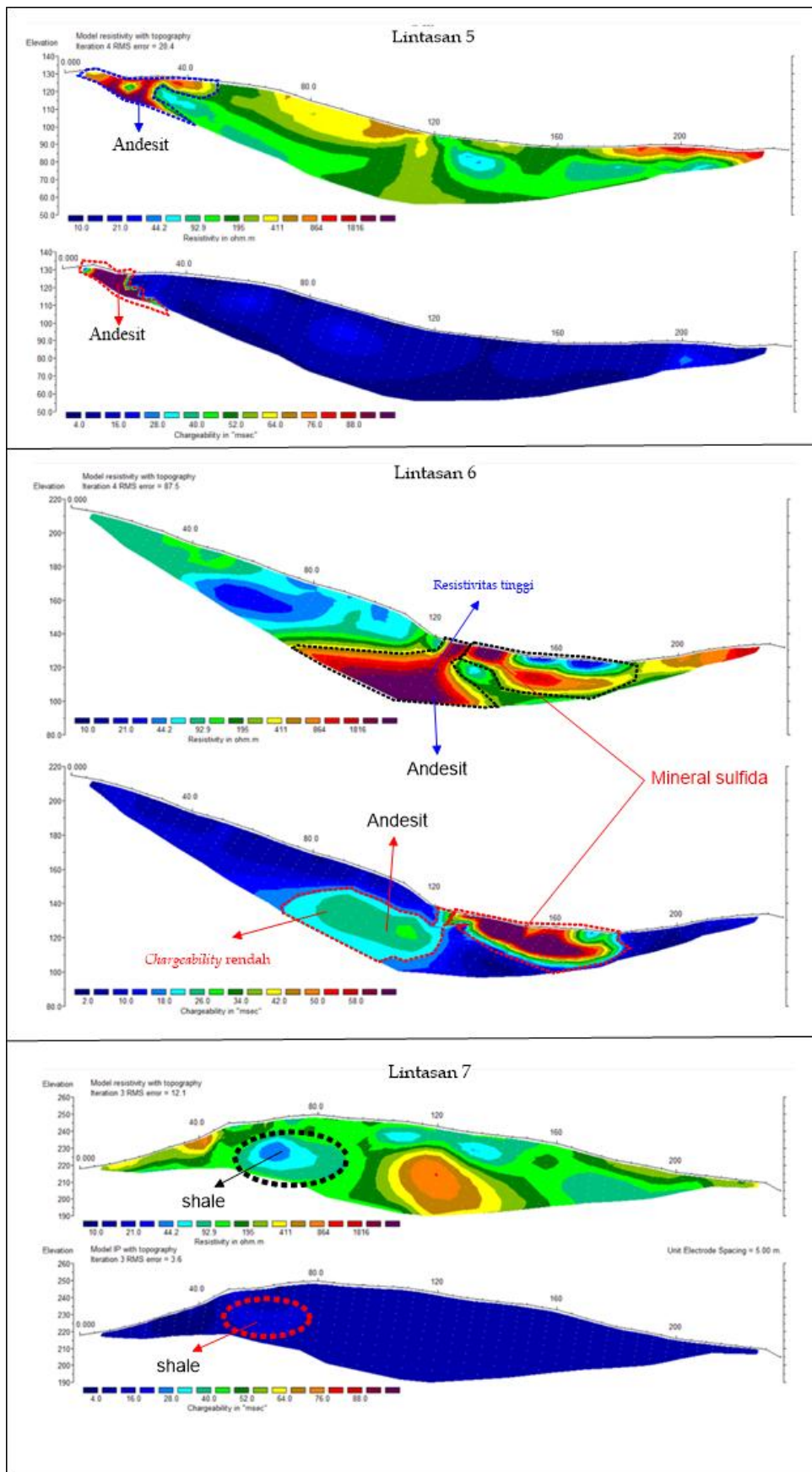
Hasil inversi dua dimensi metode geolistrik resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) memperlihatkan adanya variasi respon kelistrikan yang kontras baik secara lateral maupun vertikal. Variasi respon tersebut mencerminkan perbedaan sifat fisik batuan bawah permukaan yang dipengaruhi oleh faktor litologi, tingkat alterasi hidrotermal, serta keberadaan mineral sulfida terdiseminasi dalam lingkungan vulkanik daerah penelitian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 hingga Gambar 7. Pola anomali kelistrikan yang berkembang menunjukkan adanya heterogenitas batuan yang dipengaruhi oleh proses geologi berulang. Selain itu, sebaran nilai resistivitas dan *chargeability* yang tidak seragam mengindikasikan peran struktur geologi sebagai jalur utama migrasi fluida hidrotermal. Kondisi ini memperkuat interpretasi bahwa mineralisasi sulfida di daerah penelitian dikontrol oleh kombinasi litologi dan struktur bawah permukaan.

Penelitian ini dipilih karena daerah vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah, memiliki potensi tinggi terhadap pembentukan mineralisasi sulfida, namun hingga saat ini informasi bawah permukaan yang terintegrasi secara geofisika masih sangat terbatas. Lingkungan vulkanik merupakan zona yang ideal untuk berkembangnya sistem hidrotermal akibat aktivitas magmatik yang intens, yang berperan sebagai sumber panas dan fluida pembawa logam.

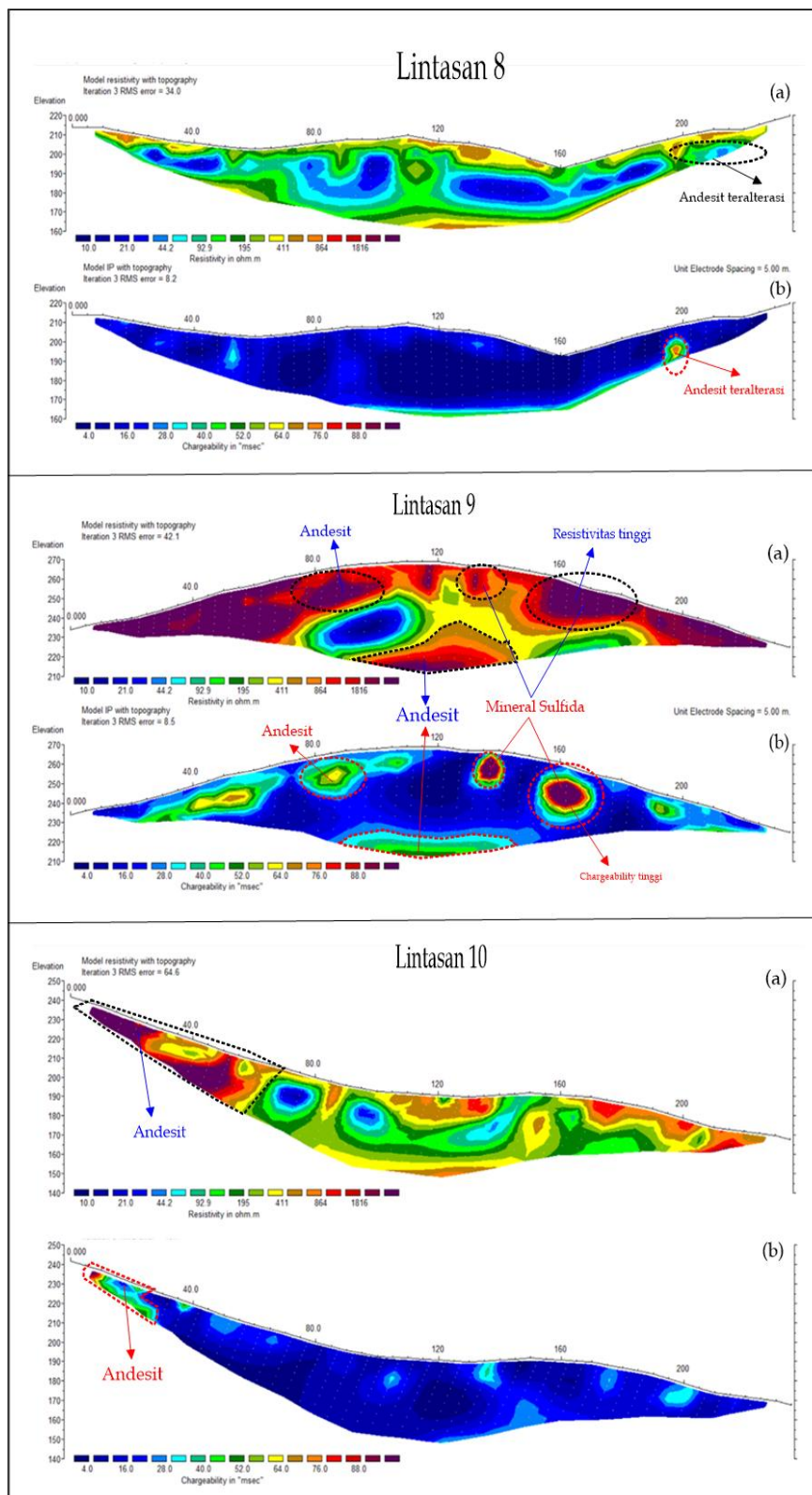
Berdasarkan literatur internasional, endapan sulfida hidrotermal umumnya terbentuk pada zona rekahan dan alterasi batuan vulkanik, yang sulit diidentifikasi hanya dengan observasi permukaan. Oleh karena itu, metode geofisika non-destruktif menjadi sangat penting sebagai tahap awal eksplorasi (Han dkk., 2016). Serta karakterisasi mineral sulfida yang bersifat konduktif dan mudah terpolarisasi, zona dengan resistivitas relatif rendah hingga menengah yang berasosiasi dengan nilai *chargeability* tinggi pada daerah penelitian diinterpretasikan sebagai indikasi keberadaan sulfida (Vaughan & Corkhill, 2017). Maka penelitian ini memilih integrasi metode geolistrik resistivitas 2D dan *Induced Polarization* (IP) untuk meningkatkan ketelitian identifikasi zona mineralisasi sulfida, sebagaimana telah direkomendasikan oleh Ali dkk. (2023) dan Su dkk. (2024).



Gambar 5. (a) Penampang resistivitas dan (b) penampang chargeability pada lintasan 1 hingga lintasan 4



Gambar 6. (a) Penampang resistivitas dan (b) penampang chargeability pada lintasan 5 hingga lintasan 7



Gambar 7. (a) Penampang resistivitas dan (b) penampang chargeability pada lintasan 8 hingga lintasan 10

Sebaran nilai resistivitas pada seluruh lintasan pengukuran menunjukkan rentang yang cukup lebar, yaitu sekitar 10 Ωm hingga lebih dari 10.000 Ωm. Zona dengan resistivitas tinggi (>1.000 Ωm) berkembang secara dominan dan relatif kontinu pada sebagian besar

penampang. Mengacu pada nilai acuan resistivitas pada Tabel 1, nilai tersebut berkorelasi dengan keberadaan batuan vulkanik masif seperti andesit dan basal yang masih relatif segar. Tingginya nilai resistivitas mengindikasikan batuan yang bersifat kompak,

memiliki porositas rendah, kandungan fluida konduktif yang terbatas, serta belum terpengaruh secara signifikan oleh proses alterasi hidrotermal.

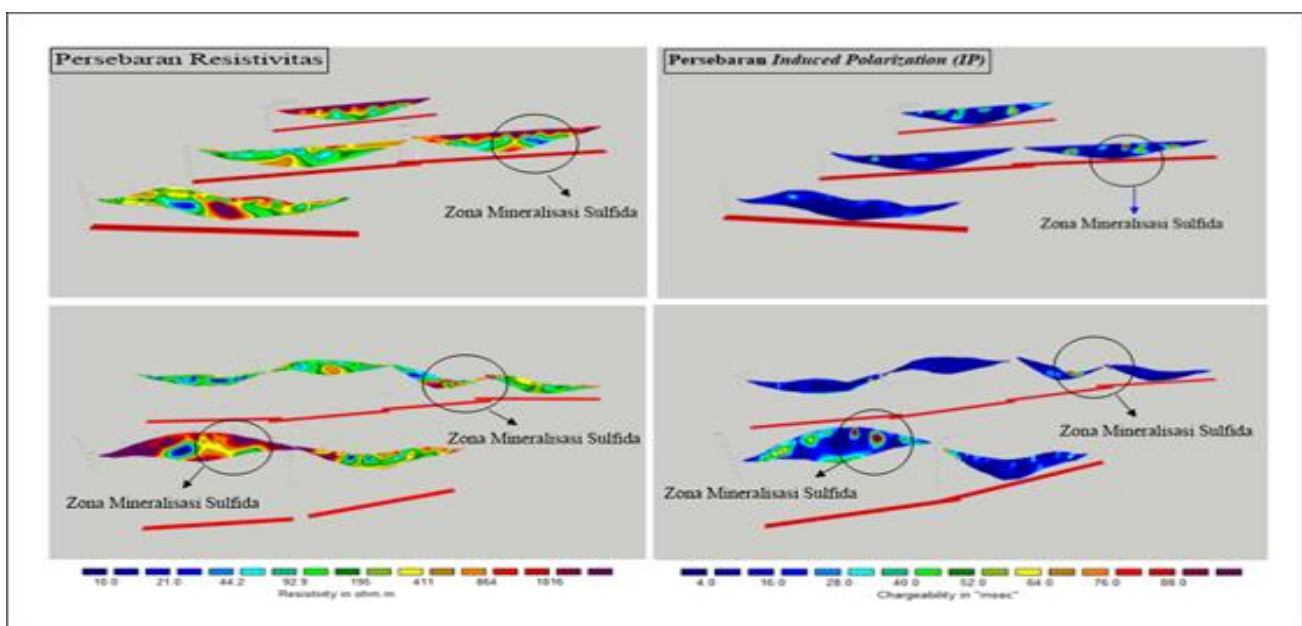
Sebaliknya, zona dengan resistivitas rendah hingga menengah pada kisaran 10–100  $\Omega\text{m}$  muncul secara lokal dan tidak merata pada beberapa lintasan. Berdasarkan nilai acuan, zona ini diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik yang telah mengalami alterasi hidrotermal, seperti tuf vulkanik atau andesit teralterasi. Penurunan resistivitas tersebut berkaitan dengan meningkatnya kandungan mineral lempung dan fluida hidrotermal yang bersifat lebih konduktif.

Hasil penampang *chargeability* menunjukkan adanya zona *chargeability* menengah dengan kisaran 40–60 ms yang berkembang secara diskontinu, terutama pada Lintasan 3, Lintasan 6, dan Lintasan 9, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Mengacu pada nilai acuan *chargeability* pada Tabel 2, kisaran tersebut diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik teralterasi yang mengandung mineral sulfida terdiseminasi, dengan pirit sebagai mineral sulfida yang paling memungkinkan. Nilai *chargeability* yang belum mencapai kategori sangat tinggi (>100 ms) mengindikasikan bahwa mineralisasi yang berkembang bersifat tidak masif dan memiliki intensitas rendah hingga menengah. Integrasi parameter resistivitas dan *chargeability* pada Gambar 5 hingga Gambar 7 memperlihatkan hubungan yang konsisten antara zona alterasi hidrotermal dan indikasi mineralisasi sulfida. Zona yang berpotensi mengandung mineralisasi sulfida dicirikan oleh kombinasi resistivitas rendah hingga menengah (10–100  $\Omega\text{m}$ ) dan *chargeability* menengah (40–60 ms). Namun demikian, hasil penampang menunjukkan bahwa karakteristik tersebut tidak

berkembang pada seluruh lintasan, melainkan hanya teramati secara jelas pada Lintasan 3, 6, dan 9. Pada lintasan lainnya, respon *chargeability* relatif rendah dan tidak menunjukkan pola anomali yang signifikan, sehingga diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik relatif segar atau zona alterasi lemah tanpa indikasi mineralisasi sulfida yang berarti.

Kombinasi resistivitas tinggi dan *chargeability* rendah diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik yang kompak dan relatif segar, serta tidak berasosiasi dengan proses mineralisasi, sebagaimana terlihat dominan pada Gambar 5. Secara geologi, keberadaan zona dengan resistivitas relatif tinggi yang masih disertai nilai *chargeability* menengah masih dapat dijumpai pada lingkungan vulkanik, seperti yang terlihat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Batuan gunungapi seperti andesit, basal, dan tuf vulkanik umumnya bersifat masif dan kompak, sehingga tetap menunjukkan resistivitas tinggi meskipun telah mengalami alterasi dan mengandung mineral sulfida terdiseminasi. Kondisi ini menegaskan bahwa interpretasi mineralisasi sulfida tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu parameter kelistrikan, melainkan harus mempertimbangkan hubungan antara resistivitas dan *chargeability* secara terpadu.

Berdasarkan keseluruhan hasil pemodelan dan acuan nilai kelistrikan, daerah penelitian diinterpretasikan memiliki indikasi mineralisasi sulfida terdiseminasi dengan intensitas rendah hingga menengah yang berkembang secara terlokalisasi, terutama pada Lintasan 3, 6, dan 9. Mineralisasi ini diperkirakan berasosiasi dengan sistem hidrotermal yang berkembang mengikuti jalur aliran fluida serta dikontrol oleh struktur geologi setempat.



Gambar 8. Persebaran mineral sulfida pada daerah penelitian

Berdasarkan analisis hasil lintasan 1 sampai 10 hasil pemodelan menunjukkan adanya korelasi kuat antara batuan vulkanik (seperti andesit dan tuf) dengan keberadaan zona mineralisasi sulfida yang dicirikan oleh nilai *chargeability* tinggi dan resistivitas yang bervariasi (tergantung tingkat alterasi dan jenis batuan induknya). Keberadaan Zona Mineralisasi Sulfida Teridentifikasi jelas pada Lintasan 3, 6, dan 9. Zona ini ditandai dengan nilai *chargeability* tinggi ( $> 50$  msec). Pada Lintasan 3 dan 6, mineralisasi muncul di dekat kontak batuan dengan resistivitas tinggi (andesit/batuan segar), yang mengindikasikan adanya kontrol struktur atau pengisian fluida hidrotermal pada rekahan batuan vulkanik.

Pola persebaran pada mineralisasi tidak tersebar merata secara masif, melainkan bersifat *spotty* (terlokalisasi). Hal ini terlihat dari anomali *chargeability* yang berbentuk kantong-kantong (lensa) pada kedalaman tertentu. Konsentrasi mineralisasi sulfida (seperti pirit atau kalkopirit) paling kuat terdeteksi pada Lintasan 3 dan Lintasan 6. Pada Lintasan 6, mineralisasi berada di bawah lapisan tuf vulkanik dan bersentuhan langsung dengan batuan andesit yang masif. Arah persebaran mengacu pada kemiringan topografi dan posisi anomali antar lintasan, zona mineralisasi cenderung mengikuti kelurusan Utara - Selatan hingga Barat Laut - Tenggara, mengikuti pola umum struktur geologi regional di Sulawesi Tengah.

Pada kedalaman mineralisasi kedalaman zona target bervariasi di setiap lintasan, pada permukaan dangkal terlihat di Lintasan 2 dan 3, di mana anomali *chargeability* muncul dekat dengan permukaan (topografi). Dan pada lintasan ke 4 dan 5 Menunjukkan keberadaan batuan segar (andesit) yang sangat masif di kedalaman  $>30$  meter, namun dengan indikasi mineralisasi yang lebih sedikit dibandingkan lintasan lainnya. Serta pada Lintasan 6 dan 7, zona mineralisasi (pirit/sulfida) berada lebih dalam, tertutup oleh lapisan batuan dasar atau material rombakan vulkanik.

## Kesimpulan

Hasil inversi dua dimensi metode geolistrik resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) di daerah vulkanik Tolitoli, Sulawesi Tengah, menunjukkan variasi respon kelistrikan yang mencerminkan perbedaan litologi, tingkat alterasi hidrotermal, dan keberadaan mineral sulfida terdiseminasi. Zona dengan resistivitas tinggi ( $>1.000 \Omega\text{m}$ ) diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik masif dan relatif segar, sedangkan zona resistivitas rendah hingga menengah ( $10\text{--}100 \Omega\text{m}$ ) berasosiasi dengan batuan vulkanik teralterasi. Indikasi mineralisasi sulfida teridentifikasi secara jelas dan terlokalisasi pada Lintasan 3, 6, dan 9, yang dicirikan oleh kombinasi nilai resistivitas rendah hingga menengah dan *chargeability* menengah hingga tinggi

( $40\text{--}60$  ms), serta diinterpretasikan sebagai mineral sulfida terdiseminasi dengan intensitas rendah hingga menengah, terutama pirit. Pola persebaran mineralisasi bersifat *spotty* dan dikontrol oleh sistem hidrotermal yang berkembang mengikuti rekahan serta struktur geologi regional. Hasil ini menegaskan bahwa integrasi metode resistivitas 2D dan IP efektif digunakan sebagai tahap awal eksplorasi mineral sulfida pada lingkungan vulkanik yang kompleks.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pembimbing akademik dari Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera dan kepada institusi pihak terkait yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian lapangan serta pengolahan data. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan-rekan yang telah memberikan masukan, diskusi ilmiah, dan bantuan teknis selama proses penelitian dan penulisan naskah. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada para peneliti terdahulu yang karyanya menjadi rujukan penting dalam penyusunan kerangka metodologi dan interpretasi hasil penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Ali, M. A. H., Mewafy, F. M., Qian, W., Alshehri, F., Ahmed, M. S., & Saleem, H. A. (2023). Integration of electrical resistivity tomography and induced polarization for characterization and mapping of (Pb-Zn-Ag) sulfide deposits. *Minerals*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/min13070986>
- Amsah, L. O. M. Y., & Umar, E. P. (2020). Identifikasi zona mineralisasi emas menggunakan metode resistivitas dan induksi polarisasi (IP) di Desa Lintidu Kabupaten Buol. *JURNAL GEOCELEBES*, 4(2), 144-149. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v4i2.11126>
- Bakkar, U. Z., Kasim, M., Akase, N., & Rompo, A. I. (2020). Karakteristik alterasi dan mineralisasi hidrotermal Daerah Hulawa, Gorontalo, Indonesia. *Jambura Geoscience Review*, 2(1), 1-15. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v2i1.2472>
- Ha, M. H., Shin, S. W., Park, S., Cho, S. J., & Kim, J. H. (2016). Induced polarization imaging applied to exploration for low-sulfidation epithermal Au-Ag deposits, Seongsan mineralized district, South Korea. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(5), 817-823. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/13/5/817>
- Hasria, Idrus, A., & Warmada, I. (2020). Perubahan komposisi batuan metamorf akibat proses

- alterasi hidrotermal pada endapan emas di Pegunungan Rumbia, pada Lengan Tenggara Pulau Sulawesi. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 17(3), 119-127. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.21.3.119-127p>
- Irvine, R. J. (1990). *Hydrothermal mineral deposits: Processes of formation and distribution*. London, UK: Chapman & Hall.
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., ... Seedorff, E. (2010). *Porphyry copper deposit model*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1760, 1-169.
- Kandora, T. A. H., Nur, I., & Irfan, U. R. (2022). Studi pendahuluan; alterasi hidrotermal pada endapan tembaga supergen di Daerah Tontra Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan. *JURNAL GEOCELEBES*, 6(2), 187-193. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v6i2.20431>
- Kasim, D. N. P., Arifin, Y. I., Manyoe, I. N., Rompo, A. I., & Iswanto, D. (2023). Kompleksitas tatanan geologi dan hubungannya terhadap sebaran distribusi potensi mineralisasi di Prospek Gadung Sulawesi Tengah. *Jurnal GEOSAPTA*, 9(1), 63-70. <https://doi.org/10.20527/jg.v9i1.13667>
- Muhammad, A. G., Indrastomo, F. D., & Sukadana, I. G. (2017). Pola tahanan jenis dan konduktivitas batuan mengandung mineral radioaktif di Botteng dan Takandeang, Mamuju, Sulawesi Barat. *Eksplorium*, 38, 49-62.
- Nugraheni, E. S., Yatini, & Santoso, A. (2023). Application of induced polarization (IP) method for identifying metallic mineral distribution in the Leon area. *Indonesian Mining Journal*, 26(2), 61-72. <https://doi.org/10.30556/imj.Vol26.No2.2023.1344>
- Othman, O. E., Abd El-Kader, H. A. M., Alam, S. S., & Abd El-Aziem, S. H. (2017). Cytochrome b conservation between six camel breeds reared in Egypt. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.04.006>
- Ratman, N. (1976). *Peta geologi lembar Tolitoli, Sulawesi Utara* (Skala 1:250.000). Bandung, Indonesia: Direktorat Geologi.
- Santoso, B., & Subagio. (2016). Pendugaan mineral kromit menggunakan metode induced polarization (IP) di Daerah Kabaena Utara, Bombana Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 17(3), 179-192.
- Senduk, K. G., & Abdurrachman, M. (2023). Volcanostratigraphy in the Lokon volcano area and its surroundings, North Sulawesi. *BULLETIN OF GEOLOGY*, 7(2), 1144-1154. <https://doi.org/10.5614/bull.geol.2023.7.2.2>
- Su, Z., Revil, A., Ghorbani, A., Zhang, X., Zhao, X., & Richard, J. (2024). Combining electrical resistivity, induced polarization, and self-potential for a better detection of ore bodies. *Minerals*, 14(1), 1-22. <https://doi.org/10.3390/min14010012>
- Sudarsono, & Setiawan, I. (2012). Paragenesa mineral bijih sulfida hidrotermal di Daerah Kluwih Kabupaten Pacitan Jawa Timur: Pendekatan berdasarkan mineralogi dan inklusi fluida. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 22(1), 25-33. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i1.104>
- Syamsuddin, 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, 1-8. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v5i1.11836>
- Vaughan, D. J., & Corkhill, C. L. (2017). Mineralogy of sulfides. *Elements*, 13(2), 81-87. <https://doi.org/10.2113/gselements.13.2.81>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.