

IDENTIFIKASI ALTERASI-MINERALISASI PADA SISTEM ENDAPAN SKARN BERBASIS PENDEKATAN METODE *TIME DOMAIN INDUCED POLARIZATION* DI DAERAH KASIHAN, PACITAN, JAWA TIMUR

Taufik Seizarsyah¹, Ajimas Pascaning Setiahadwibowo^{1*}, Firdaus Maskuri^{1,2}, Sutarto²

¹Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Indonesia

²Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author. Email: ajimas@upnyk.ac.id

Manuscript received: 22 August 2021; Received in revised form: 22 March 2022; Accepted: 20 April 2022

Abstrak

Penelitian ini dilakukan di Kasihan, Pacitan, Jawa Timur dengan tujuan untuk mengetahui zona alterasi dan mineralisasi bijih dari sistem endapan mineral berdasarkan konduktivitas dan resistivitas batuan bawah permukaan di daerah penelitian. Berdasarkan hal tersebut metode geofisika diperlukan untuk memetakan luasan area prospek endapan mineral serta model matematis pada daerah penelitian. Salah satu metode geofisika yang digunakan dalam studi kasus endapan mineral adalah *Time Domain Induced Polarization* (TDIP). Pengukuran Metode *Time Domain Induced Polarization* dilakukan dengan konfigurasi dipole-dipole yang disusun relatif menjurus timurlaut – baratdaya sebanyak 2 lintasan, dengan masing-masing lintasan memiliki panjang sejauh 260 m dengan spasi awal elektroda 20 m. Target dari Metode TDIP dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan sejauh 48 m. Kedudukan mineralisasi pada endapan skarn pada Metode *Time Domain Induced Polarization* berada pada kedalaman 25 m dibawah permukaan topografi yang ditunjukkan oleh nilai resistivitas tinggi $>2000 \Omega\text{m}$ dan chargeabilitas >500 msec pada batuan induk dasit dan batugamping.

Kata Kunci: chargeabilitas; dipole-dipole; resistivitas; *Time Domain Induced Polarization*.

Abstract

This research was conducted in Kasihan, Pacitan, East Java with the aim of knowing the alteration zone and ore mineralization from mineral sediment systems based on the conductivity and resistivity of subsurface rocks in the study area. A geophysical method is needed to map area area area of the prospect of mineral deposits as well as mathematical models in the area research. One of the geophysical methods used in studies of mineral sediment cases is *Time Domain Induced Polarization* (TDIP). Measurement of *Time Domain Induced Polarization* method done with configuration dipole-dipole which is arranged relatively straight northeast-southwest as much 2 tracks, with each track having the length of 260 m with an initial space of 20 m electrodes. Targets of the TDIP Method can describe subsurface conditions as far as 48 m. The position of mineralization in skarn deposits in the *Time Domain Induced Polarization* method at a depth of 25 m below the surface topography shown by high resistivity values $>2000 \Omega\text{m}$ and >500 msec chargeability in dacite and limestone.

Keywords: chargeability; dipole-dipole; resistivity; *Time Domain Induced Polarization*.

Pendahuluan

Di Indonesia secara tatanan geologi merupakan negara yang berada di batas

lempeng tektonik paling aktif di dunia, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Filipina. Dikarenakan hal tersebut, interaksi antar *margin* lempeng ini membentuk fenomena geologi antara lain produk magmatisme berupa gunung api. Serangkaian gunung api di Indonesia yang termasuk dalam jalur “*Ring of Fire*” ini tentunya menyebabkan adanya potensi sumber daya mineral berupa akumulasi mineral yang berkaitan dengan endapan mineral sistem vulkanik ataupun orogenik.

Merujuk pada genetika gunung api, umumnya diiringi oleh kompleksitas proses dari material magma atau disebut juga proses magmatisme yang kemudian menjadi faktor penting dalam pembentukan mineral logam. Pada bagian awal hingga akhir proses magmatisme (*Early – Post Magmatism*) yang melibatkan elemen vital seperti gas *volatile* (H_2S , SO_4 , CO_2), fluida panas (hidrotermal) bersuhu antara 50 °C-500 °C. Kemudian berinteraksi dengan batuan di sekitarnya melalui zona lemah berupa rekahan-rekahan yang terbentuk baik akibat intrusi maupun struktur yang sudah terbentuk sebelumnya (Lindgren, 1928). Hal ini mengakibatkan adanya proses asimilasi antar keduanya dan terbentuklah konsentrasi pengkayaan mineral sekunder dari *replacement* unsur kimia ataupun presipitasi mineral baru yaitu, mineral logam dasar berharga (*base precious metals*).

Tipe endapan yang hadir di Indonesia cukup beragam diantaranya *Volcanogenic Massive Sulfide*, *Porphyry Cu-Au-Mo*, *Skarn Intrusion Related CuAu-Zn-Pb*, *Epithermal Au-Ag*, *Granitic Sn-W-Mo*, *Post-Metamorphic Q-Au Shear Zones*, dan *Mississippi Valey Base Metals* (Prihatmoko et al., 2002). Endapan yang terbentuk memiliki tipe berbeda-beda tergantung oleh kandungan larutan magma, kondisi *host rocks*, struktur geologi, dan hadirnya pengaruh luar seperti penurunan suhu yang cepat oleh air meteorik (White and Hedenquist, 1995).

Daerah Kasihan, Kecamatan Tegalombo, Pacitan, Jawa Timur diperkirakan merupakan Endapan Porfiri-Skarn melihat dari kronostratigrafi daerah penelitian berdasarkan Tun (2007). Daerah Kasihan tersusun atas satuan litologi batuan dasit porfiri, breksi vulkanik, andesit, marmar, batugamping, dan riolit. Selain itu, prospek keterdapatan mineralisasi di Daerah Kasihan ditandai dengan kehadiran urat kuarsa dan sejumlah bijih sulfida (pirit, kalkopirit, sfalerit dan galena).

Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui zona alterasi dan mineralisasi bijih dari sistem endapan mineral berdasarkan konduktivitas dan resistivitas batuan bawah permukaan di daerah penelitian. Salah satu metode geofisika yang digunakan dalam studi kasus alterasi-mineralisasi pada sistem endapan skarn adalah *Time Domain Induced Polarization* (TDIP). Data TDIP untuk menentukan suatu karakter mineralisasi yang hadir pada suatu sistem endapan Porfiri-Skarn. Metode TDIP ini didasarkan pada pengukuran resistivitas dan chargeabilitas yang dimiliki oleh batuan ataupun material dimana kemampuan kedua besaran tersebut merupakan kemampuan mengalirkan arus listrik dalam metode elektromagnetik (Reynold, 2011).

Endapan mineral dapat didefinisikan sebagai tubuh batuan yang mengandung konsentrasi satu atau lebih elemen (atau mineral) dengan kelimpahan di atas rata-rata kerak pada umumnya dan memiliki nilai ekonomis (Ridley, 2013; Misra, 2000). Endapan mineral diklasifikasikan ke dalam dua kategori besar, yaitu endapan mineral logam (misalnya, endapan tembaga, timbal, seng, besi, emas), dan endapan mineral bukan logam (atau industri) (misalnya, endapan tanah liat, mika, fluorit, asbes, garnet), yang mengandung mineral yang berguna karena sifat fisik atau kimianya yang spesifik. Mineral-mineral yang memiliki ukuran yang cukup, *grade* dan aksesibilitas yang memungkinkan untuk

diekstrak menjadi suatu keuntungan secara ekonomi dalam suatu deposit disebut sebagai mineral bijih dan sisanya merupakan mineral pengotor (*gangue*) (Pirajno, 2009; Misra, 2000).

Sebuah sistem endapan mineral mencakup semua faktor geologi dan geodinamika, di semua skala, yang mengontrol diawal, evolusi dan pelestarian endapan bijih (Pirajno, 2009). Skarn biasanya dikategorikan berdasarkan zonasi berupa manifestasi urutan lapisan monomineral atau bimineralik relatif terhadap kontak, celah atau retakan pada sedimen atau beku. Pola zonasi umum ditandai dengan peningkatan rasio piroksen terhadap garnet dari kontak batuan beku dan terjadinya idokrase (atau piroksenoid seperti wollastonite, bustamite, atau rhodonite) pada kontak antara skarn dan marmer (Misra, 2000). Selain itu, mineral skarn secara individu dapat menampilkan warna yang bervariasi yang menunjukkan komposisi mineral dalam letak zonanya. Misalnya, garnet umumnya berwarna coklat merah tua di zona proksimal (dekat pluton), menjadi coklat muda di lokasi yang lebih distal (jauh dari pluton), dan berwarna hijau pucat di dekat bagian depan marmer (Misra, 2000). Piroksen tidak menunjukkan perubahan warna yang nyata, tetapi biasanya memiliki peningkatan progresif dalam kandungan besi dan/ atau mangan ke arah permukaan marmer (Misra, 2000).

Keberadaan mineral kaya akan oksida Cu merupakan bentuk retrograde mineral dari endapan skarn yang telah terkontaminasi oleh lingkungan atmosfer dan fluida meteorik dari permukaan (Meinert, 1993). Selain itu biasanya kelimpahan Cu pada skarn berada kontak batuan intrusi. Hal ini selaras sebagaimana yang ditemukan di lapangan yaitu adanya batugamping serta intrusi batuan dasit. Selain itu, mineral garnet yang memiliki warna merah kecoklatan cenderung berada relatif dekat pluton (zona proksimal). Hal ini merupakan

bentuk ikatan dengan kandungan mineral Fe yang tinggi (Misra, 2000).

Metodologi Penelitian

Metode Time Domain Induced Polarization

Polarisasi terinduksi (IP) adalah fenomena kelistrikan berupa respons tegangan tersisa (*delayed voltage*) pada material bumi yang dihasilkan dari stimulasi arus listrik. Ketika arus dimatikan secara tiba-tiba, tegangan antara elektroda potensial tidak langsung turun ke nol (Gambar 1). Tegangan yang tersimpan (ΔV) beberapa saat ini dipengaruhi oleh sifat kapasitansi material sebagai agen dalam proses polarisasi elektrik. Pada prakteknya induksi elektromagnetik di dalam tanah membutuhkan waktu singkat untuk mati dan ΔV tidak diukur sampai beberapa puluh milidetik setelah mematikan arus energi (Kearey et al., 2002; Sumner, 1976; Griffiths and King, 1981).

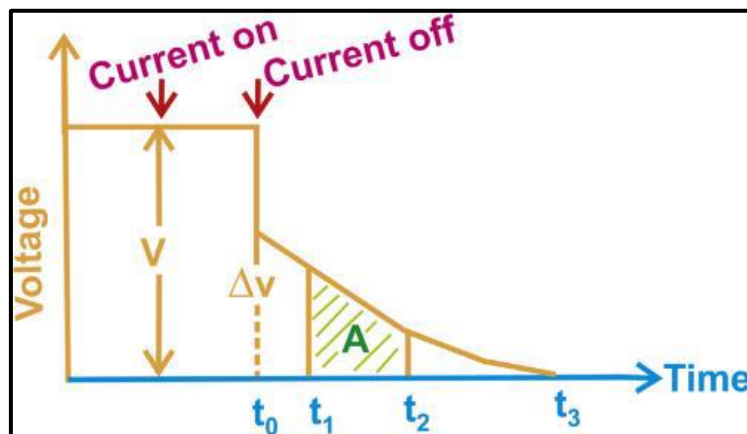
Metode IP secara praktis diaplikasikan dalam eksplorasi bawah permukaan untuk endapan mineral yang terkubur, khususnya sulfida logam, oksida, dan grafit yang merupakan konduktor yang baik. Metode ini membantu dalam mendeteksi mineral konduktif yang tidak teridentifikasi secara baik pada metode resistivitas. Besarnya polarisasi elektroda bergantung pada intensitas tegangan dan konsentrasi mineral konduktif. Badan bijih sulfida yang tersebar luas menyediakan pertukaran elektronik ionik secara maksimum, sehingga sangat cocok untuk survei polarisasi terinduksi (Haldar, 2018).

Merujuk pada Dentith and Mudge (2014) dan Kearey et al. (2002), sifat kapasitansi suatu material di bawah permukaan bumi dapat diukur dengan tiga cara, yaitu dengan mengukur peluruhan potensial setelah mematikan arus DC (*Direct Current*), membandingkan resistivitas semu yang diperoleh dengan arus AC (*Alternating Current*) menggunakan dua frekuensi yang

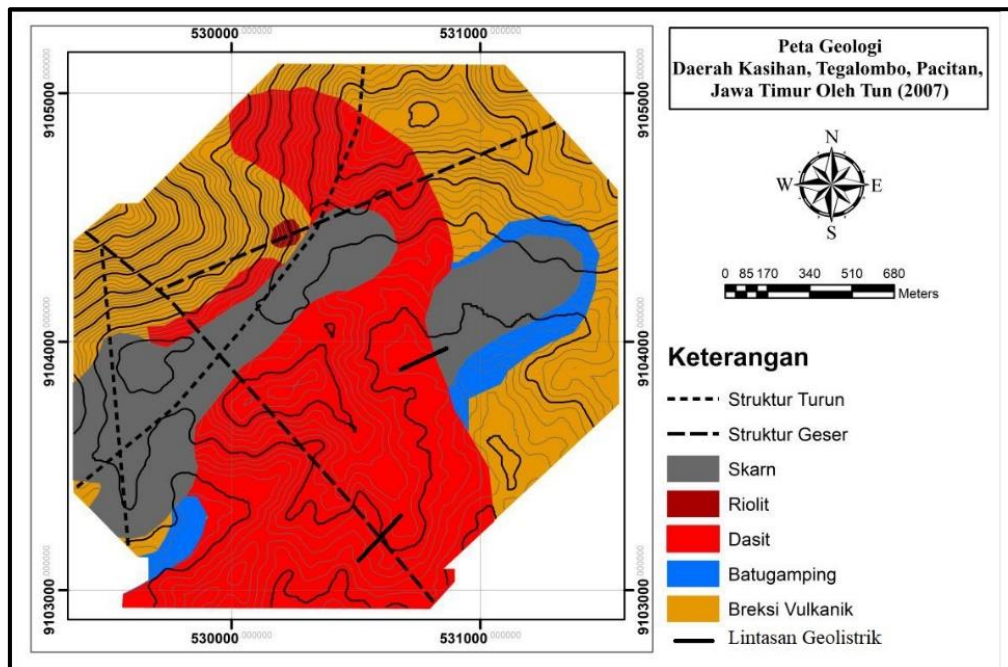
berbeda, dan akhirnya dengan membandingkan fasa antara arus AC dan perbedaan potensialnya.

Pada survei pengukuran horizontal *profiling/ mapping/ imaging* menggunakan konfigurasi dipole-dipole penempatan titik datum pengukuran secara horizontal ditempatkan pada titik tengah pengukuran (*mid-point*). Sedangkan penempatan titik datum secara vertikal dapat diestimasi melalui titik perpotongan yang dihasilkan

dari penarikan garis sebesar 45° terhadap horizontal. Pada cara lainnya, penempatan datum pengukuran secara vertikal dapat mengacu pada median *depth of investigation* atau *pseudodepth* dari jenis bentangan elektroda yang digunakan (Edward, 1977). Nilai *pseudodepth* ini didasari atas nilai sensitivitas atau *Freschet Derivative* dari hasil perhitungan matematis pada lapisan setengah homogen/*homogenous halfspace*.



Gambar 1. Diagram skematik yang menjelaskan prinsip-prinsip metode survei potensial terinduksi dengan menggunakan kurva tegangan versus waktu (Haldar, 2018).



Gambar 2. Peta geologi penelitian (Tun, 2007) dan desain survei penelitian.

Data yang telah dilakukan koreksi dengan menghilangkan *random noise* berupa anomali *spike* melalui analisis *scatterplot* maka kemudian data resistivitas dan

chargeabilitas semu dapat dilakukan proses selanjutnya, yaitu proses inversi untuk mendapatkan pola distribusi resistivitas dan chargeabilitas absolut. Proses inversi

dilakukan untuk meniadakan hipotesa sebelumnya yang menganggap lapisan bawah permukaan sebagai homogen isotropis sehingga dihasilkan suatu model response. Proses Inversi dilakukan dengan menggunakan jenis inversi—*Robust Inversion*. Hal ini merupakan jenis inversi yang dapat memberikan gambaran jelas mengenai suatu geometri material yang terbaca, dengan memberikan batas yang tegas pada bagian terluar dari objek (Loke, 2004).

Lokasi Penelitian dan Desain Survei

Lokasi penelitian berada di Daerah Kasihan, Kecamatan Tegalombo, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur (Gambar 2). Metode TDIP dilakukan dengan konfigurasi dipole-dipole sebanyak 2 lintasan. Masing-masing lintasan memiliki panjang sejauh 260 m dengan spasi antar elektroda 20 m. Target dari Metode TDIP dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan sejauh 48 m. Pada akuisisi data metode TDIP, proses akuisisi data menggunakan instrumen *Resistivitymeter Syscal* yang mengukur nilai resistivitas dan kemampuan kapasitansi dari objek geologi yang berasal dari fluida, mineral, ataupun batuan. Tahapan akuisisi diawali dengan mempersiapkan dan pengecekan *main unit resistivitymeter* dan peralatan pendukung seperti elektroda arus, *porous-pot*, kabel arus dan potensial, GPS terlebih dahulu agar saat di lapangan proses akuisisi data tidak terkendala.

Hasil dan Pembahasan

LS1-1

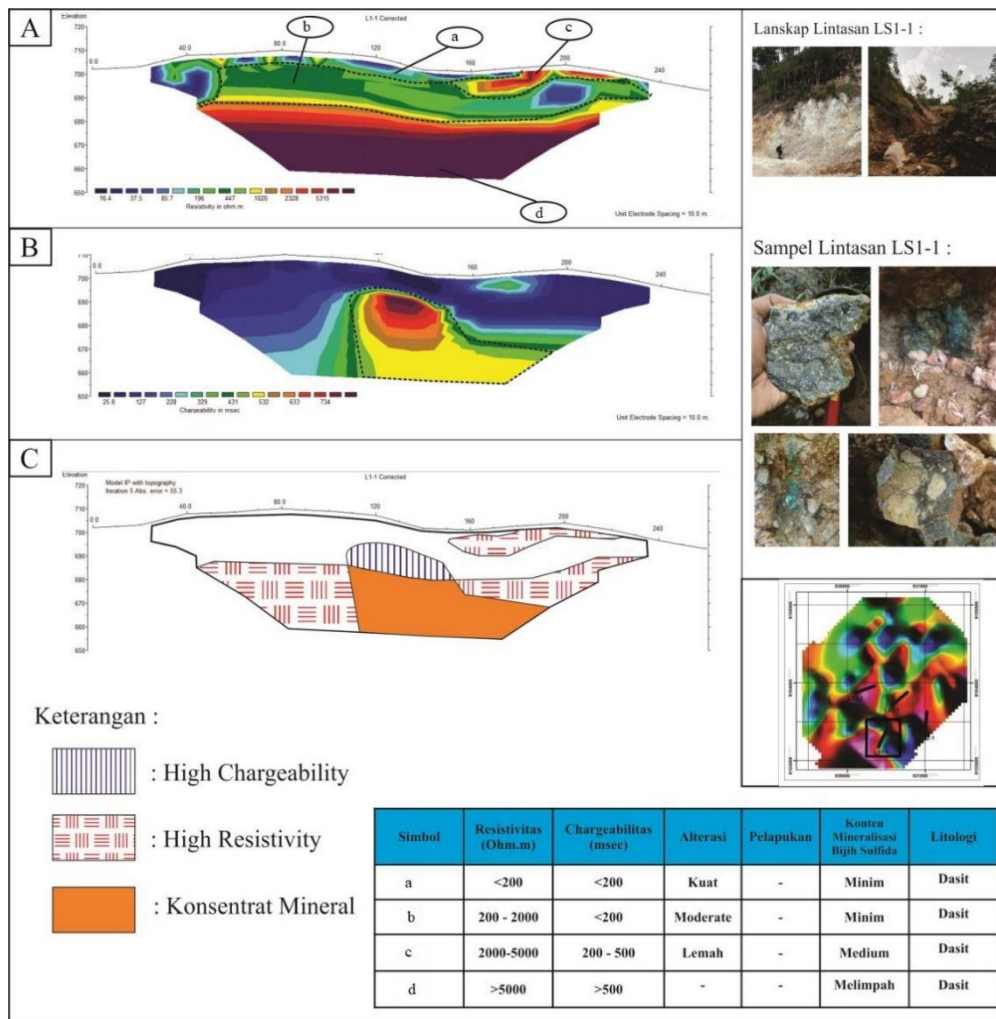
Setelah dilakukan pengolahan terhadap data observasi LS1-1 diperoleh distribusi penampang resistivitas bawah permukaan 2 dimensi, melingkupi area sepanjang 260 m dengan kedalaman 45 m. Penetrasi sumber arus listrik mencapai resolusi kedalaman tertentu ini sangat dipengaruhi oleh faktor bentangan. Berdasarkan model penampang resistivitas yang telah didapatkan,

menunjukkan adanya pola resistivitas dengan besaran nilai tertentu yang kemudian daerah pengukuran diklasifikasikan menjadi beberapa klaster berdasarkan nilai resistivitasnya yang direpresentasikan melalui indeks warna. Nilai resistivitas tinggi yaitu $>2000 \Omega\text{m}$ ditandai dengan warna jingga hingga merah, untuk nilai resistivitas menengah yaitu $200 \Omega\text{m} - 2000 \Omega\text{m}$ ditandai dengan warna hijau, dan nilai resistivitas rendah yaitu $<200 \Omega\text{m}$ ditandai dengan warna biru. Perbedaan tingkatan nilai resistivitas didasari atas pengaruh beberapa faktor, yaitu jenis litologi, intensitas alterasi, dan keberadaan jenis mineral.

Perubahan nilai resistivitas yang memiliki perbedaan signifikan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan jenis batuan. Diketahui lokasi di area pengukuran ditemukan aktivitas magmatisme masa lampau berupa intrusi dasit yang digambarkan dengan nilai resistivitas tinggi dan juga proses alterasi hidrotermal yang terjadi selepas pembentukan batuan beku dasit yang ditandai oleh nilai resistivitas rendah sampai menengah. Interaksi antara fluida hidrotermal sisa magmatisme pada batuan sampingnya (*wallrock*) pada media rekahan membuat kondisi batuan mengalami ubahan, sehingga unsur tidak stabil akan berinteraksi dengan unsur yang dibawa dan membentuk mineral sekunder yang menyebabkan adanya perubahan nilai resistivitas batuan. Pada lintasan ini yang diukur pada area sekitar ditemukan keterdapatan singkapan yang kaya akan mineral dengan kandungan tembaga yang cukup melimpah berupa oksida tembaga seperti malakit, azurite, kovelit, serta tembaga sulfida yaitu kalkopirit, dan digenit. Hal ini lah yang membentuk nilai chargeabilitas yang tinggi ($>500 \text{ msec}$) ditandai oleh gradasi warna dari kuning ke merah. Semakin tinggi nilai chargeabilitas pada rentang ini umumnya berimplikasi dengan kekayaan konten sulfida yang berikatan. Pada nilai chargeabilitas kurang

dari 300 msec, merupakan mineral lempung dan garnet yang cenderung menghasilkan

polarisasi membran melalui *control* fluida dalam pori.



Gambar 3. (A) Penampang resistivitas, (B) chargeabilitas, dan (C) Model konseptual geologi LS1-1.

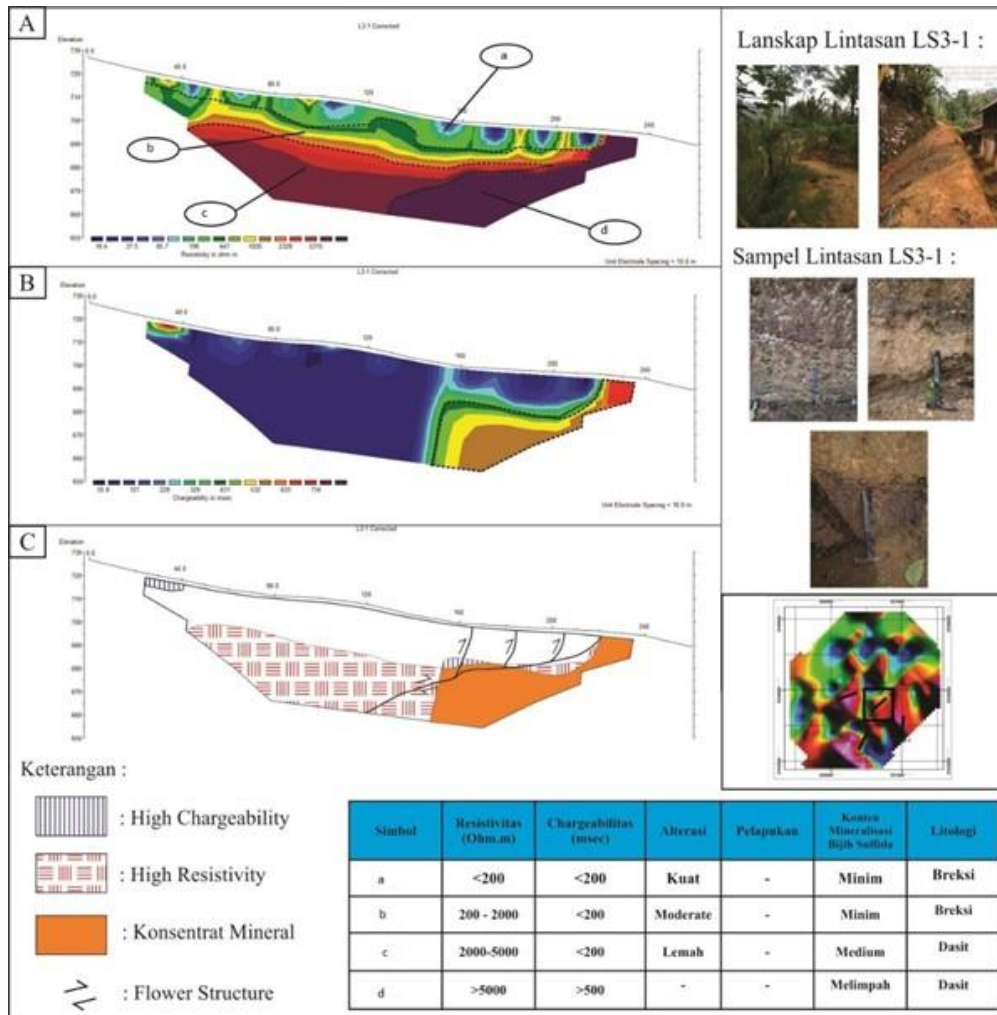
LS3-1

Pada model inversi/ model parameter LS3-1 diperoleh distribusi penampang resistivitas bawah permukaan 2 dimensi, melingkupi area sepanjang 260 m dengan kedalaman 45 m. Pola resistivitas dengan besaran nilai tertentu kemudian diklasifikasikan menjadi beberapa klaster berdasarkan nilai resistivitasnya yang direpresentasikan melalui indeks warna. Untuk nilai resistivitas tinggi yaitu >2000 Ω m ditandai dengan warna jingga hingga merah, untuk nilai resistivitas menengah yaitu 200 Ω m - 2000 Ω m ditandai dengan warna hijau, dan nilai resistivitas rendah yaitu <200 Ω m ditandai dengan warna biru. Perbedaan tingkatan nilai resistivitas pada lokasi terkait dipengaruhi oleh beberapa

faktor, yaitu jenis litologi, intensitas alterasi, tingkat pelapukan, dan keberadaan jenis mineral. Pada lokasi terkait hanya ditemukan singkapan berupa batuan dasit yang teralterasi dan terlapukan. Kondisi batuan dasit yang terlapukan sulit telah menyatu dengan *top soil* yang memiliki nilai resistivitas rendah. Sedangkan batuan dasit memiliki nilai medium sampai dengan tinggi tergantung pada tingkat atau intensitas alterasi yang terjadi. Pada batuan dasit yang intensitas alterasinya semakin kuat memiliki nilai resistivitas yang semakin rendah, begitu sebaliknya apabila batuan dasit semakin *fresh* maka nilai resistivitasnya semakin tinggi (Gambar 4). Pada penampang chargeabilitas, nilai yang berada di lintasan ini didominasi oleh nilai rendah (<200 msec), yang diakibatkan oleh

keberadaan *soil* dan aktivitas alterasi. Namun semakin ke arah timurlaut nilai chargeabilitas mengalami kenaikan (>500 msec). Hal ini dimungkinkan berkaitan dengan pusat intrusi dan mialisasinya. Ion

sulfida akan semakin kuat ke arah zona proksimal dari tubuh intrusi. Peningkatan nilai chargeabilitas juga ditandai oleh keberadaan pengkayaan mineral mangan dan besi oksida pada ujung lintasan.



Gambar 4. (A) Penampang resistivitas, (B) chargeabilitas, dan (C) Model konseptual geologi LS3-1.

Kesimpulan

Kedudukan mineralisasi pada endapan skarn pada metode *Time Domain Induced Polarization* berada pada kedalaman 25 m di bawah permukaan topografi yang ditunjukkan oleh nilai resistivitas tinggi >2000 Ωm dan chargeabilitas >500 msec pada batuan induk dasit dan batugamping. Adapun koreksi yang disarankan oleh penulis, seperti dilakukan akuisisi data TDIP dengan spasi yang lebih besar untuk mendapatkan kedalaman lebih dalam, selain itu akuisisi dilakukan dengan jarak antar lintasan lebih dekat dan *azimuth* yang

sama. Selain itu diperlukan analisis geologi dengan geokimia lebih detail dalam bentuk skala laboratorium untuk mengetahui kandungan mineral lebih spesifik dan kadar masing-masing.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta yang telah membantu penyelenggaraan penelitian ini. Juga kepada segenap pihak yang berperan banyak dalam proses akuisisi serta pengolahan data dan seluruh pihak yang

telah memberikan saran yang membangun dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Dentith, M. and Mudge, S.T. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139024358>
- Edwards, L.S. 1977. *A Modified Pseudosection for Resistivity and IP*. *Geophysics*. 42, pp.1020-1036.
<https://doi.org/10.1190/1.1440762>
- Griffiths, D.H. and King, R.F. 1981. *Applied Geophysics for Geologists and Engineers: The Elements of Geophysical Prospecting*. 2nd ed. Pergamon Press.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-10955-8>
- Haldar, S.K. 2018. *Mineral Exploration*. 2nd ed. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/C2017-0-00902-3>
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3rd ed. ix 262 pp. Oxford: Blackwell Science.
- Lindgren, W. 1928. *Mineral Deposits*. 3rd ed. London-New York: McGraw-Hill Publishing Co., Ltd. pp. xx+1049, with 317 figs.
- Loke, M.H. 2004. 2D and 3D Electrical Imaging Survey. United Kingdom: Birmingham University.
https://sites.ualberta.ca/~unsworth/UA/classes/223/loke_course_notes.pdf
- Meinert, L.D. 1993. *Igneous petrogenesis and skarn deposits*. Geological Association of Canada - Special Paper. 40, pp.569-583.
https://www.researchgate.net/publication/279618611_Igneous_petrogenesis_and_skarn_deposits
- Misra, K.C. 2000. *Understanding Mineral Deposits*. Knoxville: Springer-Science+Business Media, B.V.
<https://doi.org/10.1007/978-94-011-3925-0>
- Pirajno, F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Netherlands: Springer Science+Business Media B.V.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- Prihatmoko, S., Digidowirogo, S. and Kusumanto, D. 2002. Potensi Cebakan Mineral di Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. In: *Prosiding Seminar Geologi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta*, Ikatan Ahli Geologi Indonesia Pengda Yogyakarta, p. 87-108.
- Reynold, J.M. 2011. *An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics*. United Kingdom: Wiley-Blackwell.
- Ridley, J. 2013. *Ore Deposit Geology*. New York: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>
- Sumner, J.S. 1976. *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier.
- Tun, M.M., 2007. *An Investigation of Geology and Mineralization in the Kasihan Daerah, Pacitan Regency, East Java, Indonesia*. Master Thesis, Universitas Gadjah Mada.
- White, N.C. and Hedenquist, J.W. 1995. *Epithermal Gold Deposits: Styles, Characteristics and Exploration*. *SEG Discovery*. 23, pp.1–13.
<https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>