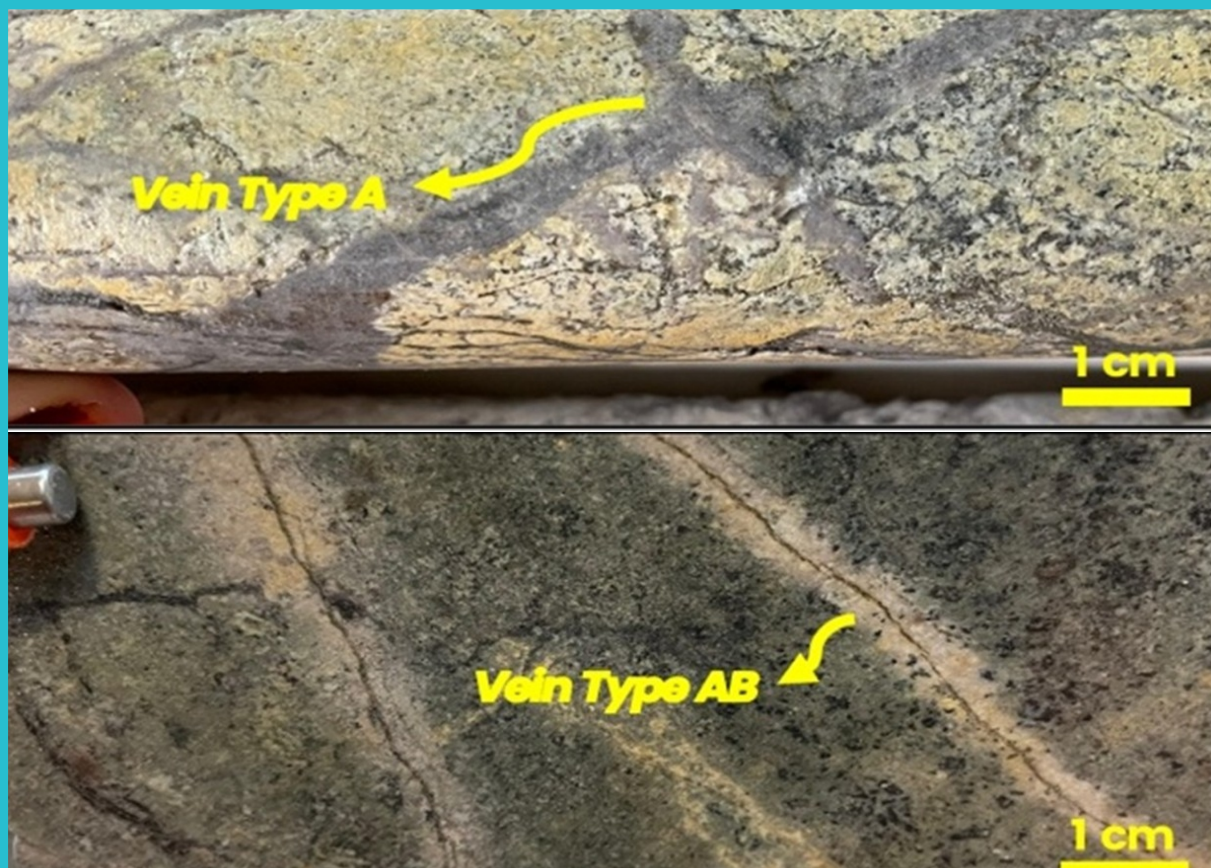


# buletin

# SUMBER DAYA GEOLOGI

ISSN 1907-5367  
eISSN 2580-1023

Volume 20 No. 3, November 2025



Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

**Badan Geologi**

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

|                                |         |       |                      |                          |                                                                                   |
|--------------------------------|---------|-------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Buletin<br>Sumber Daya Geologi | Vol. 20 | No. 3 | Halaman<br>147 - 214 | Bandung<br>November 2025 | Terakreditasi Kemenristekdikti<br>sebagai Jurnal Ilmiah<br>Nomor : 200/M/KPT/2020 |
|--------------------------------|---------|-------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|

**KETERANGAN SAMPUL DEPAN**

(atas) Kenampakan urat tipe A dalam batuan diorit kuarsa. (bawah) Kenampakan urat tipe AB dalam batupasir (Putri Rindu Bunga Kasih, dkk., 2025)

Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020

Buletin Sumber Daya Geologi merupakan jurnal ilmiah terakreditasi Kemenristekdikti bidang mineral, energi fosil, dan panas bumi yang berkaitan dengan kajian sumber daya. Majalah ini terbit tiga nomor dalam satu tahun pada bulan Mei, Agustus dan November.

### DEWAN REDAKSI

#### Editor In Chief

Ir. Denni Widhiyatna, M.T.

#### Managing Editor

Eko Suryanto, S.Kom.  
Resmi Novianti, S.Kom.  
Ernawati, S.I.Pust.  
Riad Bakti Padilah, S.AP.  
Bonny Wanda Nugraha, S.Kom  
Atep Kurnia, S.S.

#### Editorial Board

Ir. Agung Pribadi, M.Sc.  
Fitri Purnamasari Liveta, S.A.P.  
Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si.  
Ir. Prima Muharam Hilman, M.Sc.  
Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi  
Ir. Sri Widodo  
Ir. Teuku Ishlah  
Ir. Bambang Pardiarto  
Dr. Siti Sumilah Rita Susilawati, S.T., M.Sc.  
Ir. Rina Wahyuningsih  
Fatimah, S.T., M.Sc.  
Asep Sugianto, S.T., M.T.  
Irwan Muksin, S.T.  
Husin Setia Nugraha S.T., M.Sc.

#### Peer-Reviewer

Prof. Dr.Ir. Binarko Santoso, M.Sc  
Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D  
Prof. Euis Tintin Yuningsih, S.T., M.T., Ph.D  
Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA  
Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc.  
Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T.  
Ir. Sabtanta Joko Suprpto, M.T.  
Edi Suhanto, S.Si, M.T.  
Dr. Asep Kurnia Permana, S.T., M.Sc  
Dr. rer. nat. Ernowo, S.T., M.T.  
Dr. Ir. RM Basuki Rahmad, M.T.  
Dr. Ir. Dwi Fitri Yudiantoro, M.T.  
Dr. Ir. Sutarto, M.T.

#### Alamat sekretariat dan pengiriman naskah

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi  
Bagian Umum  
Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254  
Telepon : (022) 520 2698, 522 6270  
Fax : (022) 522 6270, 522 6263  
Email : [buletinsdg@gmail.com](mailto:buletinsdg@gmail.com)  
OJS : <https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>



## **PENGANTAR REDAKSI**

Buletin Sumber Daya Geologi Volume 20 Nomor 3 Tahun 2025 ini berisi lima makalah ilmiah yang mengulas tentang komoditas mineral, batubara dan panas bumi. Para penulis yang berkontribusi berasal dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Universitas Indonesia, Universitas Padjadjaran, Politeknik Energi dan Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, PT Bumi Suksesindo, dan PT GeoSensei Teknologi Indonesia.

Artikel pertama berupa penyelidikan yang dilakukan di Kabupaten Dairi, Sumatera Utara dengan tujuan untuk mengetahui korelasi antara resistivitas, chargeabilitas dan suseptibilitas. Tujuannya untuk menentukan zona mineralisasi logam sulfida dibawah permukaan yang berkaitan dengan komoditas emas dan logam dasar. Hasil penyelidikan menunjukkan karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam dengan rentang nilai resistivitas, chargeabilitas, dan suseptibilitas yang bervariasi.

Artikel kedua tentang penelitian yang mengidentifikasi kriteria geologi lapisan batubara seperti ketebalan lapisan, kedalaman, peringkat batubara, kemiringan lapisan, batuan pengapit, struktur geologi dan inventori batubara yang terletak di daerah Asam-asam. Data dikumpulkan melalui pengeboran inti dan analisis well logging pada 4 titik bor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah ini memiliki 9 lapisan batubara dengan ketebalan bervariasi.

Artikel ketiga berupa penelitian yang bertujuan mengetahui kondisi geologi, zona alterasi, mineralisasi dan tipe endapan bijih serta hubungannya dengan sebaran kadar Cu-Au. Hasil penelitian menunjukkan adanya enam satuan batuan dan lima zona alterasi. Tipe endapan bijihnya berupa porfiri Cu-Au yang di-overprint oleh epitermal sulfidasi tinggi.

Artikel keempat merupakan penelitian yang menganalisis data penginderaan jauh yang lebih rinci untuk menggambarkan karakteristik manifestasi termal di lapangan yang dapat menjadi acuan untuk observasi langsung dan mendukung analisis dalam kajian geosains rinci. Analisis penginderaan jauh yang dilakukan yaitu analisis visual citra, analisis temperatur permukaan, analisis cekaman vegetasi, dan analisis rasio band. Hasil kajian menunjukkan manifestasi termal dapat dijumpai di daerah Kawah Papandayan dan Tegal Alun.

Sedangkan artikel terakhir berupa hasil penelitian yang bertujuan untuk mengkarakterisasi reservoir dangkal dan mendelineasi area prospek di Banda Baru, Maluku Tengah, menggunakan integrasi data geosains terpadu. Integrasi model ini memberikan instrumen strategis bagi pengembangan energi panas bumi non-vulkanik yang efisien untuk mendukung ekonomi lokal melalui skema pemanfaatan langsung secara berkelanjutan.

Salam sehat dan tetap semangat,

Dewan Redaksi



### DAFTAR ISI

#### MAKALAH ILMIAH

- 147 - 157     **IDENTIFIKASI SEBARAN MINERALISASI LOGAM SULFIDA MENGGUNAKAN METODE POLARISASI TERINDUKSI DAN MAGNETIK DI KABUPATEN DAIRI, SUMATERA UTARA**  
*IDENTIFICATION OF METAL SULFIDE MINERALIZATION USING INDUCED POLARIZATION AND MAGNETIC METHODS IN DAIRI REGENCY, NORTH SUMATRA*  
Farizan Qurunulbahri, Dzil Mulki Heditama, Hartaja M. Hatta Wicaksono
- 159 - 169     **POTENSI PENGEMBANGAN GASIFIKASI BATUBARA BAWAH PERMUKAAN DI DAERAH ASAM-ASAM, KABUPATEN TANAH LAUT, KALIMANTAN SELATAN**  
*DEVELOPMENT POTENTIAL OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION IN ASAM-ASAM AREA, TANAH LAUT REGENCY, SOUTH KALIMANTAN*  
Muhammad Iqbal Ardiansyah, Ahmad Helman Hamdani, Nurdrajat
- 171 - 186     **HUBUNGAN KONDISI GEOLOGI TERHADAP SEBARAN KADAR CU-AU BERDASARKAN DATA INTI PENGEBORAN PROSPEK TUMPANGPITU, DAERAH SUMBERAGUNG, BANYUWANGI, JAWA TIMUR**  
*RELATIONSHIP GEOLOGICAL CONDITIONS, ALTERATION, AND MINERALIZATION TO WARD Cu-Au DISTRIBUTION BASED ON DRILL CORE DATA AT R PROSPECT, TUMPANGPITU AREA, BANYUWANGI, EAST JAVA*  
Putri Rindu Bunga Kasih Riyanto, Dadan Wildan, Achmad Djumarma Wirakusumah, Tatik Handayani, Riansyah Widisaputra
- 187 - 199     **KARAKTERISASI MANIFESTASI TERMAL MENGGUNAKAN METODE RASIO SALURAN, LAND SURFACE TEMPERATURE, DAN NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX DI LAPANGAN PANAS BUMI GUNUNG PAPANDAYAN, JAWA BARAT**  
*CHARACTERIZATION OF THERMAL MANIFESTATION USING BAND RATIO, LAND SURFACE TEMPERATURE, AND NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX METHODS IN PAPANDAYAN MOUNTAIN GEOTHERMAL FIELD, WEST JAVA*  
Muhammad Satriyo, Fadillah Azhar Deaudin Kurniawan, Tony Rahadinata, Santia Ardi Mustofa
- 201 - 214     **DELINEASI AREA PROSPEK DAN KARAKTERISASI RESERVOIR PANAS BUMI NON-VULKANIK UNTUK PEMANFAATAN LANGSUNG DI BANDA BARU, MALUKU TENGAH**  
*PROSPECT AREA DELINEATION AND CHARACTERIZATION OF NON-VOLCANIC GEOTHERMAL RESERVOIRS FOR DIRECT USE IN BANDA BARU, CENTRAL MALUKU*  
Erawan Melisano, Husin Setia Nugraha, Tonny Rahadinata, Muhammad Satriyo, Prihadi Sumintadireja

#### ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

#### GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

#### PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi



**IDENTIFIKASI SEBARAN MINERALISASI LOGAM SULFIDA MENGGUNAKAN  
METODE POLARISASI TERINDUKSI DAN MAGNETIK DI KABUPATEN DAIRI,  
SUMATERA UTARA**

***IDENTIFICATION OF METAL SULFIDE MINERALIZATION USING INDUCED  
POLARIZATION AND MAGNETIC METHODS IN DAIRI REGENCY, NORTH SUMATRA***

**Farizan Qurunulbahri<sup>1</sup>, Dzil Mulki Heditama<sup>2</sup>, dan Hartaja M. Hatta Wicaksono<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Prodi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara, dan Panas Bumi, Indonesia

Email korespondensi: [qfarizan24@gmail.com](mailto:qfarizan24@gmail.com)

Diterima: 20 Juni 2025; Direvisi: 15 November 2025; Disetujui: 30 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.510>

**ABSTRAK**

Eksplorasi bijih sulfida menjadi target penting dalam kegiatan usaha pertambangan karena menjadi sumber utama dari berbagai komoditas mineral logam yang dibutuhkan dalam industri pertambangan. Di Indonesia, potensi sumber daya bijih sulfida diperkirakan cukup besar, terutama dengan kondisi geologi yang kompleks sehingga menciptakan lingkungan ideal untuk pembentukan endapan bijih sulfida. Survei geofisika seperti metode geolistrik (resistivity dan polarisasi terinduksi) dan metode magnetik, telah terbukti efektif dalam mengevaluasi potensi mineralisasi logam sulfida di bawah permukaan. Penyelidikan ini dilakukan di Kabupaten Dairi, Sumatera Utara dengan tujuan untuk mengetahui korelasi antara resistivitas, chargeabilitas dan suseptibilitas. Tujuannya untuk menentukan zona mineralisasi logam sulfida dibawah permukaan yang berkaitan dengan komoditas emas dan logam dasar. Hasil penyelidikan menunjukkan karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam dengan rentang nilai resistivitas, chargeabilitas, dan suseptibilitas yang bervariasi. Karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam di lokasi penyelidikan menunjukkan nilai resistivitas rendah hingga tinggi (1 – 86910  $\Omega$ m), chargeabilitas sedang hingga tinggi (110 – 611 msec), dan suseptibilitas sedang-tinggi (-0.4 – 1  $\times 10^{-5}$  SI). Terdapat korelasi antara nilai-nilai ini, yakni zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi berkaitan dengan nilai resistivitas rendah hingga sedang dan suseptibilitas sedang, menunjukkan zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi argilik. Sementara itu, zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi berkaitan dengan nilai resistivitas sedang hingga tinggi dan suseptibilitas sedang hingga tinggi, menunjukkan zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi filik. Distribusi zona mineralisasi logam sulfida cenderung mengarah barat-timur searah urat kuarsa. Potensi zona mineralisasi logam sulfida diduga terdapat sampai kedalaman 150 m.

**Kata kunci:** alterasi, chargeabilitas, bijih sulfida, resistivitas, suseptibilitas

## ABSTRACT

*Exploration of sulfide ore deposits has become an important target in mining activities, as these deposits serve as the primary sources of various metallic mineral commodities essential to the mining industry. In Indonesia, the potential of sulfide ore resources is estimated to be quite large, particularly due to the country's complex geological conditions, which create an ideal environment for the formation of sulfide ore deposits. Geophysical surveys, such as the geoelectrical method (resistivity and induced polarization) and the magnetic method, have proven effective in evaluating the potential for subsurface sulfide mineralization. This study was conducted in Dairi Regency, North Sumatra, with the objective of determining the correlation between resistivity, chargeability, and susceptibility parameters. The goal is to delineate subsurface zones of sulfide mineralization associated with gold and base metal commodities. The results indicate that rock anomalies containing metallic mineral deposits exhibit varying ranges of resistivity, chargeability, and susceptibility values. The anomalous responses in the study area show resistivity values ranging from low to high (1 – 86,910  $\Omega\text{m}$ ), chargeability values from moderate to high (110 – 611 msec), and magnetic susceptibility values from moderate to high ( $-0.4 - 1 \times 10^{-5}$  SI). A correlation among these parameters is observed, where zones with moderate to high chargeability correspond to low to moderate resistivity and moderate susceptibility values, indicating sulfide mineralization zones associated with argillic alteration. Meanwhile, zones with moderate to high chargeability correspond to moderate to high resistivity and moderate to high susceptibility, indicating sulfide mineralization zones related to phyllic alteration. The distribution of sulfide mineralization zones tends to extend in an east–west direction, parallel to quartz veins. The potential sulfide mineralization zone is inferred to extend to a depth of approximately 150 meters.*

**Keywords:** alteration, chargeability, sulfide ore, resistivity, susceptibility

## PENDAHULUAN

Mineral sulfida adalah material yang terbentuk dari kombinasi unsur sulfur dengan satu atau lebih unsur logam lainnya dan umumnya ditemukan dalam bentuk endapan bijih sulfida. Mineral ini penting dalam industri pertambangan karena kandungan logam berharganya seperti tembaga, seng, timbal, dan emas (Mulyaningsih, 2018). Pembentukan endapan bijih sulfida terjadi melalui proses geologi seperti aktivitas hidrotermal. Pada proses ini, larutan panas yang kaya akan unsur sulfur dan unsur logam mengendap dalam celah-celah dan retakan batuan.

Indonesia dengan kondisi geologi dan tektonik yang kompleks memiliki potensi sumber daya bijih sulfida yang besar (Landi Pote & Nadut, 2023). Zona subduksi, pergeseran lempeng, dan aktivitas vulkanik menciptakan lingkungan ideal untuk pembentukan endapan bijih sulfida. Larutan kaya unsur logam sulfida ini bergerak ke atas melalui celah-celah

batuan dan mengendap akibat perubahan suhu dan tekanan, menyebabkan bijih sulfida terakumulasi di celah, rekahan, atau rongga dalam batuan, sehingga tersebar dan tidak terkonsentrasi di satu lokasi (Irvine & Smith, 1990). Kondisi ini tentunya akan mempersulit kegiatan eksplorasi untuk mengetahui sebaran bijih logam di bawah permukaan. Oleh karena itu, diperlukan metode geofisika yang efektif untuk mengetahui sebaran bijih logam di dalam batuan.

Metode geolistrik resistivitas dan *induced polarization* (IP)/polarisasi terinduksi merupakan metode geofisika yang dapat memberikan gambaran bawah permukaan terkait keberadaan zona mineralisasi (Arjuna dkk., 2016). Metode ini bekerja dengan mengukur respons listrik batuan bawah permukaan terhadap arus listrik yang diinduksi, di mana metode resistivitas mengukur resistivitas batuan dan metode IP mengukur tingkat polarisasi akibat arus listrik yang mengalir melaluinya (Yuniarto, 2020). Metode ini telah digunakan secara

luas untuk eksplorasi bijih sulfida, misalnya untuk mendeteksi indikasi (dugaan) zona alterasi dan mineralisasi yang ada di bawah permukaan. Sebagai contoh, metode resistivitas dan IP untuk mengidentifikasi zona alterasi dan mineralisasi logam sulfida di Mekar Jaya, Sukabumi, Jawa Barat (Yuwanto, 2016). Penyelidikan lainnya berhasil mengidentifikasi zona mineralisasi hidrotermal di Kasihan, Pacitan, Jawa Timur, yang menunjukkan keberhasilan metode IP dalam menentukan zona akumulasi bijih sulfida (Asrafil dkk., 2019).

Selain metode geolistrik resistivity dan IP, metode magnetik juga dapat memberikan informasi tambahan mengenai area yang teralterasi akibat naiknya larutan hidrotermal yang mengakibatkan hilangnya sifat kemagnetan pada batuan (Junaedy & Efendi, 2016). Metode ini mengamati variasi intensitas medan magnet bumi yang disebabkan oleh distribusi benda termagnetisasi di bawah permukaan (Reynolds, 2011). Penyelidikan di Wumbubangka, Bombana berhasil mengidentifikasi keterdapatan emas bawah permukaan melalui metode magnetik (Arlin dkk., 2023), sementara penyelidikan yang mengintegrasikan metode geolistrik dan magnetik berhasil mengidentifikasi zona mineralisasi logam mulia berupa emas di Ciparay, Cibaliung (Junian dkk., 2021). Metode magnetik dapat digunakan sebagai pendukung dalam eksplorasi mineral, terutama jika digabungkan dengan metode geolistrik resistivity dan IP untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang potensi mineralisasi di suatu daerah (Sidiq dkk., 2021).

Kabupaten Dairi, Sumatera Utara, merupakan salah satu daerah yang menunjukkan indikasi mineralisasi logam sulfida dan kemudian dijadikan lokasi penyelidikan. Potensi bijih sulfida yang berasosiasi dengan emas dan logam dasar di lokasi tersebut dengan kadar Au pada beberapa conto batuan mencapai hingga 343,25 ppm (Wicaksono dkk., 2017). Penyelidikan lebih lanjut terkait kondisi di

bawah permukaan sangat penting, sehingga diperlukan survei geofisika untuk dapat menentukan sebaran zona mineralisasi logam sulfida di lokasi tersebut. Penyelidikan ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui korelasi antara resistivitas, chargeabilitas dan suseptibilitas guna menentukan zona mineralisasi logam sulfida dibawah permukaan.

## METODOLOGI

Penyelidikan berada di Kecamatan Pegagan Hilir, Kabupaten Dairi, Sumatera Utara, menggunakan data geofisika sekunder hasil akuisisi Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi (PSDMBP) pada tahun 2023. Data tersebut berupa data geolistrik (resistivitas dan IP) dan magnetik. Pengukuran geolistrik menggunakan SuperSting R8 dengan 84 elektroda, konfigurasi dipole-dipole, arus 2 Ampere, dan jarak antar elektroda 10 meter, menghasilkan lintasan sepanjang 840 meter. Data diambil pada 6 lintasan sejajar arah selatan-utara dengan jarak antar lintasan 100 meter (Gambar 2).

Data magnetik diakuisisi menggunakan GEM System 19-T pada 110 titik dalam sistem grid pada area survei 900×1000 m<sup>2</sup>. Selama survei, cuaca sebagian besar cerah dengan sesekali gerimis ringan, sementara topografi daerah didominasi oleh dataran dengan beberapa perbukitan rendah. Pemilihan alat dan metode ini dirancang untuk memperoleh data resolusi tinggi guna memetakan zona alterasi dan mineralisasi bijih sulfida.

Tahapan penyelidikan diawali dengan pengumpulan data geolistrik (resistivitas dan IP) dan magnetik kemudian dilakukan pengolahan untuk mengidentifikasi dan memetakan potensi mineralisasi bijih sulfida di lokasi penyelidikan. Pengolahan data geolistrik (resistivitas dan IP) dengan proses inversi menggunakan software Res2Dinv untuk mengubah nilai resistivitas dan chargeabilitas semu menjadi nilai resistivitas dan chargeabilitas sebenarnya yang sesuai dengan kondisi bawah

permukaan. Hal ini dapat menunjukan distribusi resistivitas dan tingkat polarisasi yang mencerminkan keberadaan mineralisasi bijih sulfida di bawah permukaan. Sementara itu, pengolahan data magnetik dilakukan dengan beberapa proses diantaranya yaitu koreksi data, *reduce to equator*, dan inversi.

Data magnetik hasil pengukuran masih dipengaruhi oleh medan magnet utama bumi ( $H_0$ ) dan medan magnet luar ( $H_{var}$ ). Oleh karena itu, data terlebih dahulu dilakukan koreksi IGRF ( $H_0$ ) dan koreksi harian ( $H_{var}$ ) untuk mendapatkan anomali magnetik bawah permukaan, kemudian diproses dan ditampilkan menggunakan software Oasis Montaj. Anomali yang didapatkan masih dipengaruhi oleh efek *dipole* sehingga masih sulit untuk menentukan posisi sumber anomali di bawah permukaan. Proses reduksi ke ekuator dilakukan untuk mengubah arah magnetisasi dari medan magnet anomali yang terukur menjadi arah horizontal dengan cara membuat sudut inklinasi anomali menjadi  $0^\circ$  dan deklinasi menjadi  $0^\circ$ . Dari proses ini akan dihasilkan suatu anomali magnetik *monopole* sehingga mempermudah interpretasi karena anomali medan magnet tersebut sudah menunjukkan langsung posisi benda sebenarnya. Anomali magnetik selanjutnya dilakukan inversi sesuai dengan lintasan geolistrik. Hasil inversi dari data geolistrik (resistivitas dan IP) dan magnetik selanjutnya dibuat model 3D menggunakan software Voxler dan ZondGM3D untuk mengetahui arah dari penyebaran mineralisasi.

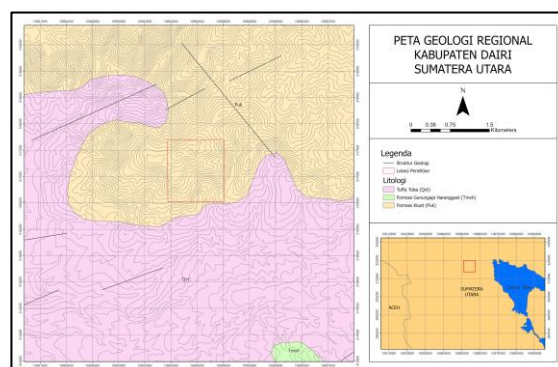
## GEOLOGI

Tektonik Sumatera terdiri dari empat blok tektonik yaitu Malaya Timur, Sibumasu (Sumatera Barat), Busur Woyla, dan dua zona suture (Zona Bentong-Raub dan Zona Tektonik Tengah Sumatera) (Barber dkk., 2005). Kabupaten Dairi sendiri terletak di Blok Sumatra Barat yang dulunya merupakan bagian dari Indochina *Super-terrane* (Barber & Crow, 2009). Di bagian barat Sumatera, pergerakan

tektonik didominasi oleh gerakan ke arah utara dari batas aktif antara lempeng Samudera Pasifik dan lempeng Benua Indo-Australia menuju lempeng Benua Eurasia. Gerakan yang tegak lurus terhadap batas lempeng ini cenderung menghasilkan sesar naik di sepanjang zona subduksi Sumatera dan Jawa. Sebaliknya, gerakan yang sejajar dengan batas lempeng cenderung menghasilkan sesar geser di zona sesar.

Menurut Peta Geologi Lembar Sidikalang dan (sebagian) Sinabang Sumatra (Gambar 1), daerah penyelidikan terdiri dari berbagai formasi batuan yang umurnya berkisar dari Permo-Karbon hingga Plistosen (Aldiss dkk., 1983). Sebagian besar formasi ini merupakan hasil dari aktivitas vulkanik dan metamorfisme dengan urutan formasi dari yang tertua hingga termuda sebagai berikut:

- Formasi Kluet (Puk), terdiri dari berbagai jenis batuan seperti arenit, metawake, serpih, filit, metabatugamping, dan batusabak yang berumur Karbon dan Perm
- Formasi Gunungapi Haranggol (Tmvh), terdiri dari batuan gunungapi andesit, dasit, dan piroklastik yang berumur Miosen Tengah
- Formasi Tufa Toba (Qvt), tersusun dari tufa riodasit, sebagian diantaranya terlitifikasi, berumur Pleistosen.

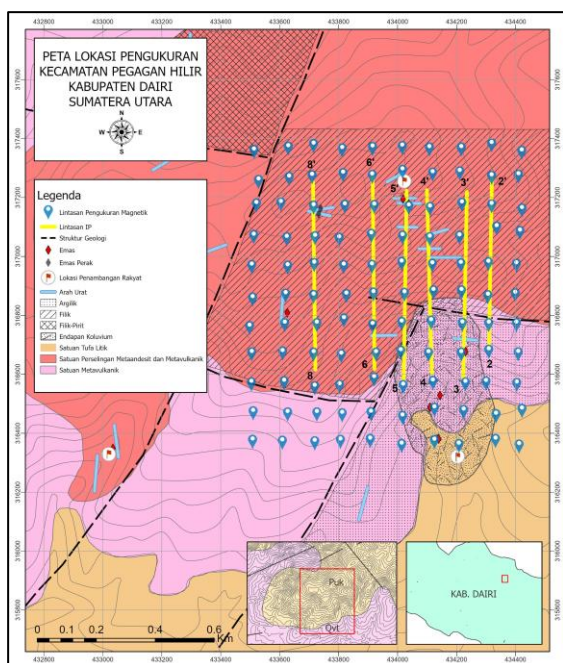


**Gambar 1.** Peta geologi regional daerah penyelidikan (Dimodifikasi dari Aldiss dkk., 1983)

Pada daerah penyelidikan, morfologi terdiri dari perbukitan curam dan bergelombang,

yang terlihat dari kerapatan kontur pada peta, kenampakan bentang alam di lapangan, serta pola batuan penyusunnya (Wicaksono dkk., 2017). Berdasarkan ciri-ciri litologi yang teramati di lapangan oleh tim akuisisi PSDMBP, terdapat tiga satuan batuan dengan urutan dari tua ke muda yaitu: Satuan metavulkanik, Satuan perselingan metavulkanik dan metaandesit, dan Satuan tufa litik.

Alterasi yang berkembang di lokasi penyelidikan meliputi alterasi filik, filik-pirit, dan argilik (Gambar 2). Alterasi filik ditandai oleh kehadiran mineral kuarsa kuarsa-ilit-serisit tanpa adanya pirit; alterasi filik-pirit memiliki asosiasi mineral kuarsa-ilit-serisit-pirit; sementara alterasi argilik ditandai oleh keberadaan mineral ilit dan kaolin dengan sedikit pirit. Temuan mengenai jenis-jenis alterasi yang berkembang di lokasi penyelidikan menunjukkan adanya variasi kondisi hidrotermal yang mempengaruhi batuan di area tersebut (Wicaksono dkk., 2017).



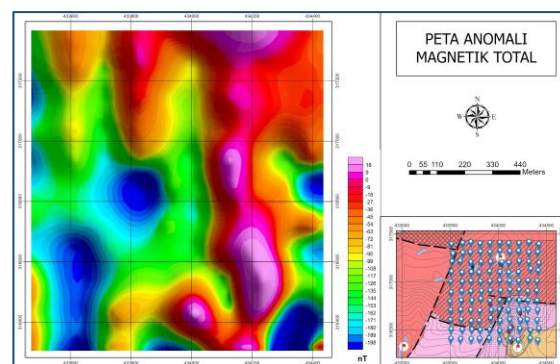
**Gambar 2.** Peta lokasi pengukuran (Dimodifikasi dari Wicaksono dkk., 2017)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data anomali magnetik total yang telah dikoreksi ditampilkan dalam bentuk *grid*

menggunakan metode *minimum curvature* dengan ukuran *grid cell* sebesar 23. Metode *minimum curvature* dipilih untuk *gridding* data di daerah penyelidikan karena metode ini sangat efektif ketika data relatif halus antara titik sampel atau garis survei. Metode ini dapat digunakan untuk data berbasis *grid line* dan menghasilkan permukaan yang mulus dengan meminimalkan kelengkungan, sehingga menghindari perubahan tajam antar titik dan menghasilkan kontur yang lebih akurat dan alami. Ukuran *grid cell* sebesar 23 dipilih karena dianggap mampu mengisi semua titik data dengan baik, sehingga representasi data yang dihasilkan akurat dan mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan. Ukuran *grid cell* tersebut diperoleh melalui proses *direct gridding* yang secara langsung memetakan data ke dalam *grid* berdasarkan posisi titik terhadap sel *grid* (Briggs, 1974).

Peta anomali magnetik total (Gambar 3) menunjukkan sebaran nilai magnetik batuan bawah permukaan di lokasi penyelidikan dalam satuan nanoTesla (nT) dengan nilai yang bervariasi antara -198 nT hingga 18 nT. Anomali magnetik rendah ini disebabkan oleh demagnetisasi batuan akibat proses hidrotermal, yang menunjukkan adanya deformasi dan alterasi batuan (Junian dkk., 2021).



**Gambar 3.** Peta anomali magnetik total

Untuk mempermudah interpretasi, nilai anomali magnetik dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan tingkat alterasi (Tabel 1). Klasifikasi ini dibuat berdasarkan analisis statistik rentang nilai anomali magnetik di lokasi penyelidikan (-198

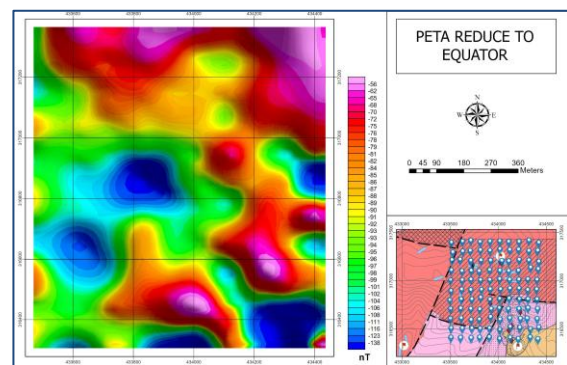
hingga 18 nT) dan disesuaikan dengan karakteristik geologi daerah tersebut, bertujuan untuk memetakan zona alterasi yang berasosiasi dengan proses hidrotermal dan mineralisasi sulfida. Namun, peta anomali magnetik total ini masih dipengaruhi oleh efek dua kutub (*dipole*), sehingga masih sulit menentukan posisi sumber anomali di bawah permukaan. Oleh karena itu dilakukan transformasi reduksi ke ekuator untuk mengubah anomali *dipole* menjadi *monopole* sehingga dapat lebih mudah untuk dilakukan interpretasi.

**Tabel 1.** Klasifikasi dan interpretasi nilai anomali magnetik daerah penyelidikan

| Kategori | Anomali (nT)     | Interpretasi       |
|----------|------------------|--------------------|
| Rendah   | -198 hingga -153 | Teralterasi kuat   |
| Sedang   | -154 hingga -63  | Teralterasi sedang |
| Tinggi   | -64 hingga 18    | Teralterasi lemah  |

Transformasi reduksi ke ekuator (RTE; *Reduction to Equator*) menghasilkan peta yang menunjukkan pola anomali magnetik lebih jelas dan terorganisir (Gambar 4), dengan pergeseran anomali merah dan biru ke arah utara. Anomali-anomali magnetik yang sebelumnya tampak melengkung atau terdistorsi karena inklinasi medan magnetik bumi terlihat menjadi lebih terorganisir dan mengikuti pola-pola tertentu. Hal ini dikarenakan anomali yang dihasilkan sudah menunjukan anomali yang tepat berada di bawah permukaan.

Proses RTE mengubah sudut inklinasi dan deklinasi dari  $-10.06^\circ$  dan  $-0.46^\circ$  menjadi masing-masing  $0^\circ$  yang menghasilkan anomali magnetik lebih representatif di bawah permukaan. Dampak dari transformasi ini adalah perubahan arah fluks magnetik batuan menjadi berlawanan dengan arah magnetisasi, sehingga nilai anomali pada peta RTE akan terbalik jika dibandingkan dengan nilai anomali pada peta Anomali Magnetik Total (AMT) (Sidiq dkk., 2021).



**Gambar 4.** Peta *reduce to equator*

Peta RTE menunjukkan nilai anomali bervariasi antara -138 nT hingga -56 nT, dengan zona anomali tinggi menunjukkan alterasi kuat, mineral magnetik telah diubah menjadi non-magnetik. Sebaliknya, zona dengan anomali lebih rendah mengalami alterasi lebih ringan yang mempertahankan sifat kemagnetan (Sidiq dkk., 2021). Alterasi filik, yang melibatkan serisit, kuarsa, dan pirit, terjadi pada temperatur yang lebih tinggi (Corbett & Leach, 1998), menyebabkan mineral magnetik asli berubah menjadi non-magnetik, dan menghasilkan anomali tinggi. Alterasi argilik, melibatkan kaolinit dan illit pada temperatur yang lebih rendah, menunjukkan anomali sedang karena mineral lempung yang terbentuk tidak memiliki sifat magnetik yang signifikan.

Inversi data geolistrik menghasilkan nilai *true resistivity* dan *true chargeability* yang menggambarkan kondisi bawah permukaan. Resistivitas memberikan informasi jenis batuan, sedangkan chargeabilitas menunjukkan adanya bijih sulfida yang berasosiasi dengan mineralisasi emas (Au). Analisis chargeabilitas membantu mengidentifikasi potensi mineral logam sulfida dan keberadaan logam berharga (Sidiq dkk., 2021).

Perbedaan resistivitas dan chargeabilitas dipengaruhi oleh jenis litologi, intensitas alterasi batuan, dan keberadaan mineral (Seizarsyah dkk., 2022). Data geolistrik diklasifikasikan (Tabel 2 dan 3) untuk mengetahui sebaran bijih sulfida yang berasosiasi dengan zona alterasi. Klasifikasi

ini mengacu pada hubungan empiris antara nilai resistivitas, chargeabilitas, serta jenis batuan dan mineral yang teridentifikasi di lapangan.

**Tabel 2.** Klasifikasi nilai resistivitas dan chargeabilitas di lokasi penyelidikan

| Kategori | Resistivitas ( $\Omega m$ ) | Chargeabilitas (msec) |
|----------|-----------------------------|-----------------------|
| Rendah   | <50                         | <100                  |
| Sedang   | 50 - 1500                   | 100 - 300             |
| Tinggi   | >1500                       | >300                  |

**Tabel 3.** Interpretasi berdasarkan nilai resistivitas dan chargeabilitas di lokasi penyelidikan

| Resistivitas  | Chargeabilitas | Interpretasi                   |
|---------------|----------------|--------------------------------|
| Rendah        | Rendah         | Clay/lempung                   |
| Tinggi        | Rendah         | Fresh rock/Andesit             |
| Rendah-Sedang | Sedang-Tinggi  | Zona mineralisasi pada Argilik |
| Tinggi        | Sedang-Tinggi  | Zona mineralisasi pada Filik   |

Penampang hasil inversi data resistivitas dan chargeabilitas diintegrasikan dengan penampang 2D hasil inversi anomali RTE residual, disesuaikan dengan lintasan pengukuran IP. Proses ini dilakukan untuk melihat persebaran mineralisasi di daerah penyelidikan dan memberikan gambaran komprehensif mengenai struktur bawah permukaan dan distribusi mineralisasi logam sulfida. *Slicing* pada anomali RTE residual dilakukan sesuai dengan lintasan pengukuran geolistrik untuk memastikan analisis sesuai dengan kedalaman dan posisi anomali magnetik yang memungkinkan evaluasi akurat tentang sebaran endapan mineral logam. Klasifikasi nilai anomali magnetik residual (Tabel 4 dan 5) mengacu pada analisis statistik dari data magnetik di lokasi penyelidikan dan studi literatur terkait untuk menginterpretasikan tingkat alterasi dan zona alterasi di lokasi penyelidikan.

Pada lintasan 4, hasil interpretasi penampang 2D menunjukkan keberadaan anomali yang diidentifikasi sebagai zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi filik (Gambar 5). Zona ini terletak pada jarak

elektroda 530-650 m dengan kedalaman 100-150 m, ditandai oleh nilai chargeabilitas sedang-tinggi (172-480 msec), nilai resistivitas sedang-tinggi (1200-14000  $\Omega m$ ) dan berasosiasi dengan anomali magnetik sedang-tinggi ( $0.2-1 \times 10^{-5}$  SI). Selain itu, lapisan dangkal sepanjang lintasan menunjukkan resistivitas tinggi yang mengindikasikan keberadaan batuan segar yang belum mengalami alterasi signifikan. Zona chargeabilitas sedang-tinggi menunjukkan keberadaan mineral sulfida seperti pirit, yang dapat menyimpan dan melepaskan muatan listrik. Resistivitas sedang-tinggi menunjukkan batuan yang kompak atau mengandung silika tinggi. Nilai suseptibilitas magnetik sedang-tinggi yang berasosiasi dengan zona resistivitas dan chargeabilitas ini menunjukkan bahwa terdapat endapan logam sulfida yang mungkin terbentuk di sekitar struktur sesar yang memungkinkan pergerakan fluida hidrotermal membawa dan mengendapkan logam-logam sulfida.

**Tabel 4.** Klasifikasi nilai anomali magnetik hasil RTE di lokasi penyelidikan

| Kategori | Anomali ( $10^{-5}$ SI) | Interpretasi       |
|----------|-------------------------|--------------------|
| Rendah   | < -0.4                  | Teralterasi lemah  |
| Sedang   | -0.4 < 0.4              | Teralterasi sedang |
| Tinggi   | 0.4 >                   | Teralterasi kuat   |

**Tabel 5.** Interpretasi zona alterasi berdasarkan kategori anomali magnetik RTE di lokasi penyelidikan

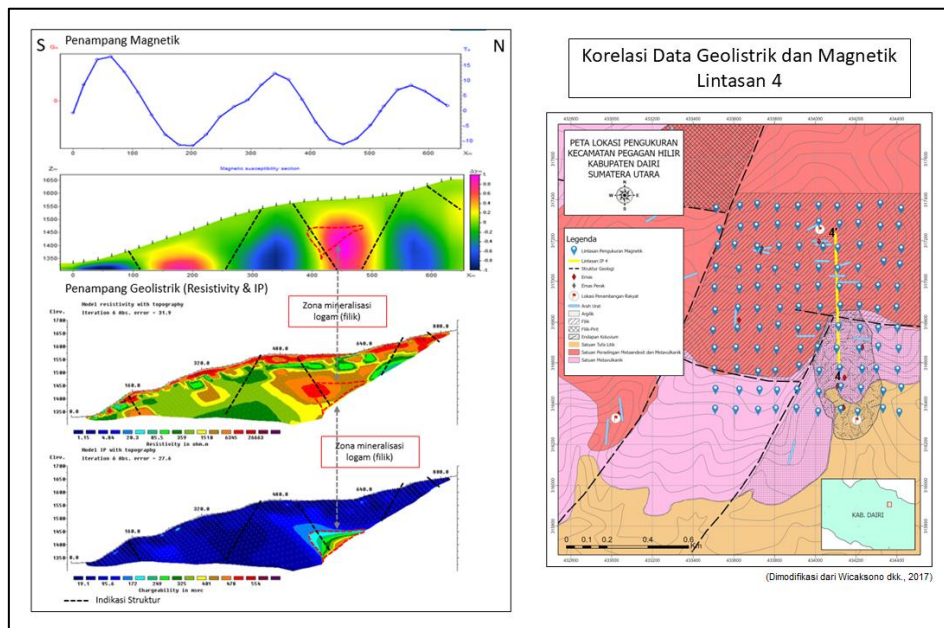
| Kategori      | Interpretasi          |
|---------------|-----------------------|
| Sedang        | Zona Alterasi Argilik |
| Sedang-Tinggi | Zona Alterasi Filik   |

Pada lintasan 6, penampang chargeabilitas cenderung homogen, namun terdapat anomali pada elektroda 150-210 m di kedalaman 60 m, dengan nilai chargeabilitas sedang-tinggi (200-420 msec), resistivitas tinggi (6200-14000  $\Omega m$ ), dan suseptibilitas magnetik sedang ( $0.18-0.22 \times 10^{-5}$  SI) (Gambar 6). Anomali ini diinterpretasikan sebagai zona mineralisasi logam sulfida yang berasosiasi dengan alterasi filik, yang dicirikan oleh kehadiran

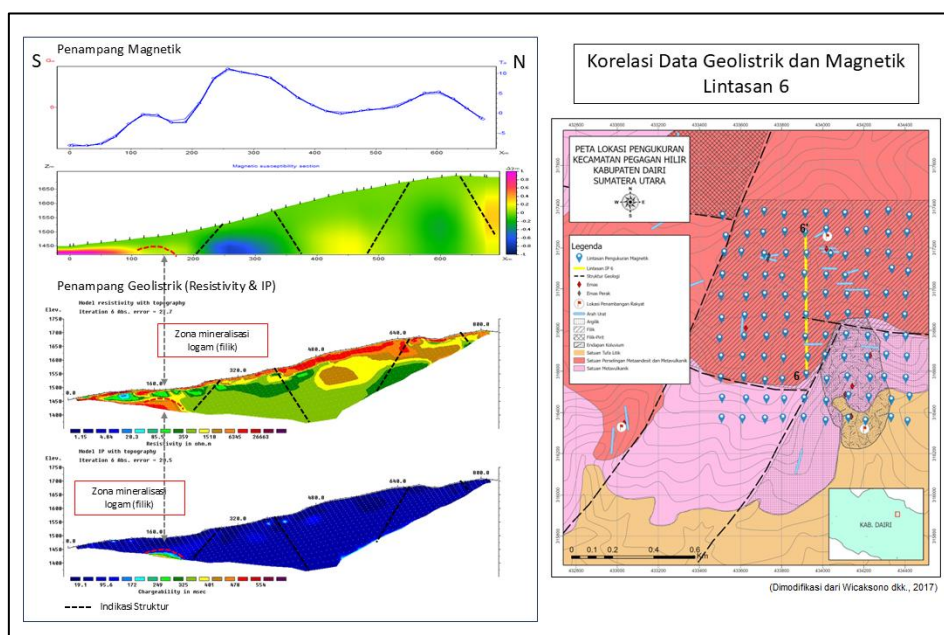
mineral kuarsa-illit-serisit yang menyebabkan nilai resistivitas tinggi. Kombinasi parameter chargeabilitas, resistivitas, dan suseptibilitas ini mengindikasikan adanya zona mineralisasi logam sulfida yang kemungkinan masih menerus hingga ke dalam.

Pada lintasan 8, terdapat anomali chargeabilitas sedang-tinggi (172-401 msec) yang diinterpretasikan sebagai

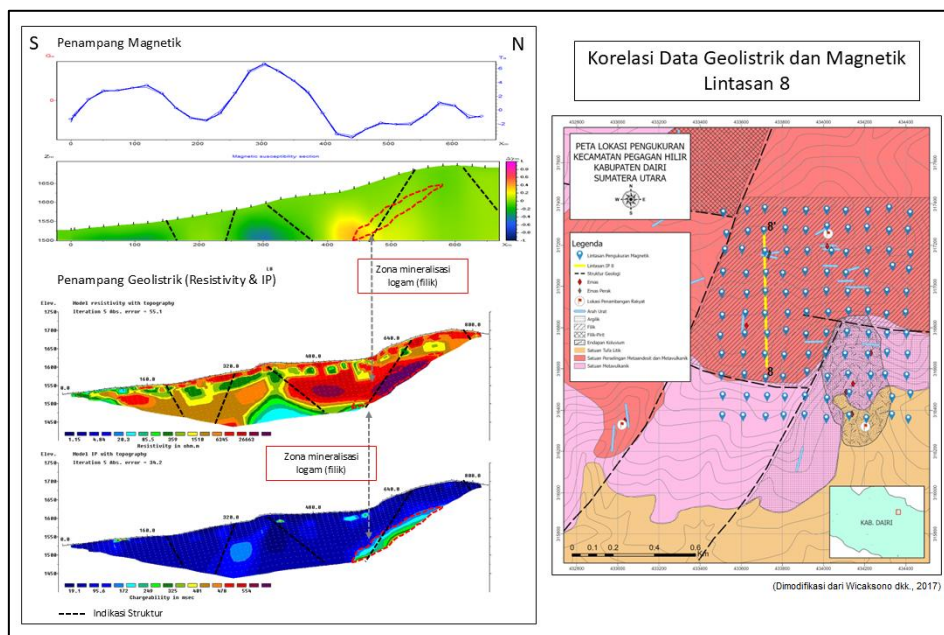
indikasi zona mineralisasi logam sulfida, terletak pada jarak 550-720 m di kedalaman 110 m dan diduga menerus ke bawah (Gambar 7). Anomali ini berasosiasi dengan resistivitas tinggi (6345-86910  $\Omega$ m) dan suseptibilitas magnetik sedang ( $0.1-0.3 \times 10^{-5}$  SI), menunjukkan bahwa zona mineralisasi terkait dengan alterasi filik, yang mungkin mengandung kuarsa sebagai mineral asosiasi pembawa emas.



**Gambar 5.** Korelasi penampang geolistrik dan magnetik lintasan 4

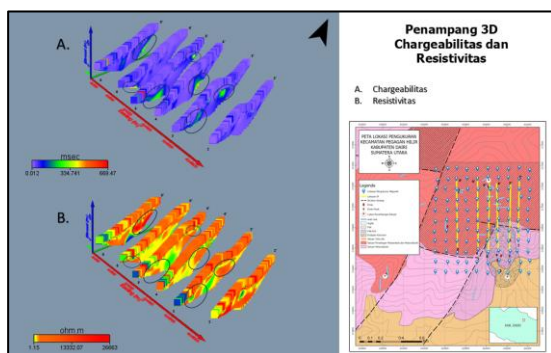


**Gambar 6.** Korelasi penampang geolistrik dan magnetik lintasan 6



**Gambar 7.** Korelasi penampang geolistrik dan magnetik lintasan 8

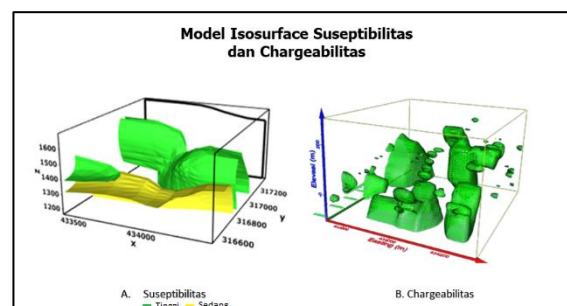
Penampang 3D chargeabilitas dan resistivitas (Gambar 8) menunjukkan arah sebaran anomali mineralisasi logam sulfida yang cenderung mengarah barat-timur. Zona ini ditandai oleh chargeabilitas sedang-tinggi dan resistivitas rendah-tinggi, sesuai dengan jenis alterasi yang mendasarinya. Di utara, zona mineralisasi (elips hitam) berasosiasi dengan alterasi filik pada lintasan 3, 4, dan 5, didukung keberadaan urat kuarsa. Di selatan, kemenerusan terlihat akan tetapi dengan resistivitas rendah-sedang, mengindikasikan keterkaitan dengan alterasi argilik.



**Gambar 8.** Penampang 3D chargeabilitas dan resistivitas

Interpretasi model 3D memberikan wawasan mendalam tentang distribusi

spasial dan karakteristik zona mineralisasi di bawah permukaan. Model ini menggabungkan hasil inversi magnetik dan penampang chargeabilitas, menghasilkan gambaran lebih jelas mengenai sebaran mineralisasi logam sulfida di lokasi penyelidikan. *Isosurface* dari model 3D magnetik (Gambar 9) menampilkan zona alterasi dengan suseptibilitas magnetik sedang-tinggi, yang diindikasikan sebagai area potensial mineralisasi. Zona dengan chargeabilitas sedang-tinggi, yang teridentifikasi sebagai indikator keberadaan mineral sulfida, menjadi fokus utama dalam menentukan potensi mineralisasi logam. Integrasi data ini dalam model 3D memungkinkan visualisasi distribusi spasial dari zona mineralisasi secara lebih jelas dan memperlihatkan arah penyebaran barat-timur.



**Gambar 9.** Model 3D *isosurface* suseptibilitas dan chargeabilitas

Penyebaran zona mineralisasi logam sulfida ini sejalan dengan arah urat kuarsa di lokasi penyelidikan, yang juga mengarah barat-timur, dan dikendalikan oleh struktur geologi setempat. Area yang menunjukkan anomali magnetik dan chargeabilitas sedang-tinggi merupakan target utama untuk eksplorasi lebih lanjut, karena memiliki potensi mineralisasi yang signifikan.

## KESIMPULAN

Karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam di lokasi penyelidikan menunjukkan nilai resistivitas yang bervariasi dari rendah hingga tinggi (1–86910  $\Omega$ m), chargeabilitas sedang hingga tinggi (110 – 611 msec), dan susceptibilitas sedang-tinggi ( $-0.4 - 1 \times 10^{-5}$  SI). Terdapat korelasi yang jelas antara nilai resistivitas, chargeabilitas, dan susceptibilitas di lokasi penyelidikan, di mana zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi berasosiasi dengan nilai resistivitas rendah hingga sedang dan susceptibilitas sedang, yang menunjukkan zona mineralisasi sulfida pada alterasi argilik. Sebaliknya, zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi yang berasosiasi dengan nilai resistivitas sedang hingga tinggi dan susceptibilitas sedang hingga tinggi menunjukkan zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi filik. Distribusi mineralisasi logam sulfida di lokasi penyelidikan cenderung mengarah barat-timur, dengan zona mineralisasi yang diidentifikasi melalui nilai resistivitas rendah-tinggi, chargeabilitas sedang-tinggi, dan susceptibilitas sedang-tinggi, yang sesuai dengan kecenderungan arah dari urat kuarsa yang relatif barat-timur. Potensi terdapatnya zona mineralisasi logam sulfida diduga sampai kedalaman 150 m dibawah permukaan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi atas dukungan dan penyediaan data

geofisika yang sangat berharga untuk penyelidikan ini. Kami juga berterimakasih kepada seluruh tim akuisisi data yang telah bekerja keras di lapangan untuk mengumpulkan data yang diperlukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aldiss, D. T., Whandoyo, R., Ghazali, S. A., & Kusyono., 1983. *Peta Geologi Lembar Sidikalang dan (sebagian) Sinabang Sumatra*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Arjuna, S., Susilo, A., & Sunaryo., 2016. *Distribution mapping of metal sediment using polarization data interpretation on the field "X" in PT Newmont Nusa Tenggara (PT NNT)*. Indonesian Journal Of Applied Physics, 4(01), 78. <https://doi.org/10.13057/ijap.v4i01.1174>
- Arlin, M., Jahidin, & Ngkoimani, L. O., 2023. *Identifikasi Keterdapatan Endapan Emas Menggunakan Metode Magnetik Di Daerah Wumbubangka Kecamatan Rarowatu Utara Kabupaten Bombana*. Einstein's: Research Journal of Applied Physics, 22–30. <https://journal.uho.ac.id/index.php/einsteins>
- Asrafil, Suyanto, I., & Rugayya, S., 2019. *Identification of hydrothermal deposit mineralized zones using the induced polarization method in Kasihan Area, Pacitan, East Java*. Journal of Physics: Conference Series, 1242(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1242/1/012046>
- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J., 2005. *Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution*. Geological Society, London, Memoirs 31.
- Barber, A. J., & Crow, M. J., 2009. *Structure of Sumatra and its implications for the tectonic assembly of Southeast Asia and the destruction of Paleotethys. Island Arc*, 18(1), 3–20. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2008.00631.x>

- Briggs, I. C., 1974. *Machine contouring using minimum curvature*. Geophysics, 39(1), 39–48. <https://doi.org/10.1190/1.1440410>
- Corbett, G. J., & Leach, T. M., 1997. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*. Short Course Manual. North Sydney.
- Heditama, D. M. dkk., 2023. *Laporan penyelidikan umum geologi, geokimia, geofisika (geomagnet dan IP) logam mulia di Kabupaten Dairi, Provinsi Sumatera Utara*. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi.
- Irvine, R. J., & Smith, M. J., 1990. *Geophysical exploration for epithermal gold deposits*. Journal of Geochemical Exploration, 36(1), 375–412. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90061-E](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90061-E)
- Junaedy, M., & Efendi, R., 2016. *Studi Zona Mineralisasi Emas Menggunakan Metode Magnetik Di Lokasi Tambang Emas Poboya*. Dalam Online Journal of Natural Science (Vol. 5, Nomor 2).
- Junian, W. E., Laesanpura, A., Paembonan, A. Y., & Wicaksono, M. A., 2021. *Identification of gold mineralization zones of low sulfidation epithermal systems using geoelectrical and magnetic methods in Ciparay area, Cibaliung*. Journal of Aceh Physics Society, 10(3), 70–79. <https://doi.org/10.24815/jacps.v10i3.18521>
- Landi Pote, L., & Nadut, A., 2023. *Karakterisasi Komposisi Kimia Bijih Sulfida Asal desa Wanggameti Kecamatan Matawai Lapawu Kabupaten Sumba Timur*. Indonesian Journal of Chemical Research, 7(2), 18–25.
- Mulyaningsih, S., 2018. *Kristalografi & Mineralogi* (1 ed.). Akprind Press.
- Reynolds, J. M., 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics (Second Edition)*. John Wiley & Sons, Ltd. [www.wiley.com/go/reynolds/introduction2e](http://www.wiley.com/go/reynolds/introduction2e)
- Seizarsyah, T., Setiahadiwibowo, A. P., Maskuri, F., & Sutarto, S., 2022. *Identification of Alteration-Mineralization in Skarn Deposit System based on Time-Domain Induced Polarization Method Approach in Kasihan Area, Pacitan, East Java*. Jurnal Geoelebes, 56–63. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v6i1.17558>
- Sidiq, M., Waluyo Jiwandono, T., & Pertiwi, P., 2021. *Integrasi Data Magnetik dan Induced Polarization untuk Mendelineasi Zona Gold-Bearing Vein di Lapangan Cibaliung, Kabupaten Pandeglang, Banten*. Bulletin of Geology, 5(1), 553. <https://doi.org/10.5614/bull.geol.2021.5.1.5>
- Wicaksono, H. M. H., Gunradi, R., Heditama, D. M., & Faisal, R. M., 2017. *Laporan Eksplorasi Umum Logam Mulia Dan Logam Dasar di Kecamatan Pegagan Hilir Kabupaten Dairi Provinsi Sumatera Utara*. (Tidak dipublikasikan).
- Yuniarto, A. H. P., 2020. *Aplikasi Time Domain Induced Polarization dalam Eksplorasi Emas di Blok “Cpy” Gunung Pongkor Kabupaten Bogor*. Jurnal Geosaintek, 6(3), 117. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v6i3.6867>
- Yuwanto, S. H., 2016. *Interpretasi Zona Alterasi dan Mineralisasi Berdasarkan Data Geolistrik Resistivitas dan Induksi Polarisasi di Daerah Mekar Jaya, Sukabumi, Jawa-Barat*. Jurnal Saintek, 13(2), 132–138. [www.kopertis7.go.id](http://www.kopertis7.go.id)



**POTENSI PENGEMBANGAN GASIFIKASI BATUBARA BAWAH PERMUKAAN  
DI DAERAH ASAM-ASAM, KABUPATEN TANAH LAUT, KALIMANTAN SELATAN*****DEVELOPMENT POTENTIAL OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION  
IN ASAM-ASAM AREA, TANAH LAUT REGENCY, SOUTH KALIMANTAN*****Muhammad Iqbal Ardiansyah, Ahmad Helman Hamdani, dan Nurdrajat**  
Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, IndonesiaEmail korespondensi: [iqbal17023@mail.unpad.ac.id](mailto:iqbal17023@mail.unpad.ac.id)

Diterima: 16 Juni 2025; Direvisi: 11 Juli 2025; Disetujui: 30 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.539>**ABSTRAK**

Potensi sumber daya batubara bawah permukaan belum dieksploitasi secara maksimal, sehingga dibutuhkan metode penambangan baru dan salah satunya adalah *underground coal gasification* (UCG). Cekungan Asam-asam merupakan salah satu cekungan penghasil batubara di Indonesia yang dapat dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi pengembangan UCG pada daerah tersebut. Penelitian ini mengidentifikasi kriteria geologi lapisan batubara seperti ketebalan lapisan, kedalaman, peringkat batubara, kemiringan lapisan, batuan pengapit, struktur geologi dan inventori batubara yang terletak di daerah Asam-asam. Data dikumpulkan melalui pengeboran inti dan analisis *well logging* pada 4 titik bor (MIA004– MIA007). Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah ini memiliki 9 lapisan batubara: A, B, C, D, E, F, G, H, dan I. Ketebalan lapisan batubara bervariasi antara 0,49 meter hingga 18,95 meter, dengan batuan pengapit yang didominasi oleh batulempung, serta beberapa lapisan yang diapit oleh batupasir dan batulanau. Peringkat batubara didominasi oleh bituminus zat terbang tinggi. Lapisan B, C, F, G dan H memenuhi kriteria inventori batubara. Evaluasi menggunakan metode *analytical hierarchy process* menunjukkan bahwa Lapisan F memiliki potensi tertinggi untuk pengembangan UCG dengan nilai rata-rata 0,78.

**Kata kunci:** UCG, Cekungan Asam-asam, Lapisan Batubara, Metode AHP, Sumber Daya Batubara

**ABSTRACT**

*The potential of underground coal resources in Indonesia has not been fully exploited yet, necessitating new mining methods, one of which is underground coal gasification (UCG). The Asam-asam Basin is one of Indonesia's coal-producing basins that warrants further research regarding the potential development of UCG in the area. This study identifies the geological criteria of coal seams, such as seam thickness, depth, rank, seam dip, surrounding rock types, geological structure, and coal inventory located in the Asam-asam area. Data were collected through core drilling and well logging analysis at 4 boreholes (MIA004–MIA007). The results indicate that the area contains 9 coal seams: A, B, C, D, E, F, G, H, and I. Coal seam thickness varies from 0.49 meter to 18.95 meters, with surrounding rocks predominantly consisting of*

claystone, and some seams interbedded by sandstone and siltstone. The coal rank is primarily high volatile bituminous. Seams B, C, F, G, and H meet the coal inventory criteria. Evaluation using analytical hierarchy process (AHP) method indicates that Seam F has the highest potential for UCG development, with an average score of 0.78.

**Keywords:** UCG, Asam-Asam Basin, Coal Seam, AHP Method, Coal Resources

## PENDAHULUAN

Potensi sumber daya batubara bawah permukaan belum dieksploitasi secara maksimal di Indonesia. Ada beberapa cara untuk mengeksploitasi sumber daya batubara, salah satunya adalah dengan metode *underground coal gasification* (UCG) (Anggara dkk., 2022; Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2021).

UCG dapat mengatasi banyak masalah dalam dunia pertambangan. Teknologi gasifikasi batubara bawah tanah yang dikombinasikan dengan pembangkit listrik memiliki potensi menghasilkan gas rumah kaca 25% lebih sedikit per MWh dibandingkan dengan pembangkit listrik batubara konvensional tanpa teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon setelah pembakaran. Manfaat lingkungan ini semakin optimal karena sebagian besar komponen jejak mudah menguap seperti merkuri, arsenik, selenium, dan sulfur tetap tersimpan di ruang bawah tanah, sementara pembakaran gas sintesis menghasilkan emisi NO<sub>2</sub> yang lebih rendah akibat suhu pembakaran yang lebih rendah dibandingkan pembakaran batubara langsung (Moorhouse dkk., 2010). Melalui metode tersebut, sumber daya batubara dapat dimanfaatkan secara maksimal di tambang-tambang tua dan lapisan batubara yang dalam secara signifikan meningkatkan pemanfaatan cadangan batubara (Ge, 2017).

Untuk tahapan awal mengetahui potensi pengembangan UCG ada beberapa hal yang perlu diketahui dari kondisi geologi batubara, yaitu peringkat, ketebalan, kedalaman, rasio ketebalan/kedalaman, kemiringan lapisan, batuan pengapit, ketebalan batuan pengapit, struktur geologi, sumber daya batubara dan jarak dari

bukaan tambang di area tersebut (Dwitama dkk., 2021).

Peringkat batubara yang disarankan adalah batubara dengan peringkat lignit hingga bituminus, dengan catatan batubara bernilai kalor <6.100 kal/gr *air dried basis* (adb) perlu dilakukan analisis pengokasan. Ketebalan batubara yang disarankan memiliki ketebalan >3,5 meter untuk lignit, dan >2 meter untuk bituminus. Posisi kedalaman batubara >120 meter dengan rasio kedalaman/ketebalan memiliki nilai variatif dari tiap kedalaman. Untuk kedalaman 120 - 200 meter rasio 22, 200 – 300 meter rasio 18, dan >300 meter rasio 15. Kemiringan lapisan <65°. Kondisi batuan pengapit tidak lolos air seperti batulempung dan batulanau dengan ketebalan *roof* 2 kali tebal batubara dan *floor* 1 kali tebal batubara. Kondisi struktur sederhana, tidak ada rekahan atau sesar yang memengaruhi. Sumber daya batubara yang tersedia, minimal 2,5 juta ton pada area 1 km<sup>2</sup> (Dwitama dkk., 2021).

Studi pendahuluan menunjukkan bahwa Indonesia memiliki 4 cekungan batubara yang potensial untuk pengembangan UCG, yaitu Sumatera Selatan, Barito, Asam-asam, dan Kutai. Sumber daya yang terhitung akan jauh lebih besar jika seluruh wilayah di setiap cekungan dieksplorasi (Purnama dan Huda, 2019). Berdasarkan semua cekungan yang telah disebutkan, Cekungan Asam-asam merupakan satu-satunya cekungan yang belum memiliki pembahasan khusus terkait pengembangan UCG.

Untuk mengevaluasi potensi UCG secara sistematis dan terukur, penelitian ini menerapkan metode *analytical hierarchy process* (AHP). AHP memungkinkan penentuan prioritas relatif dari suatu kriteria

melalui perbandingan berpasangan (Saaty, 1987). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait potensi UCG di Daerah Asam-asam, Kabupaten Tanah Laut, Kalimantan Selatan.

## METODOLOGI

Penelitian dilakukan di area seluas 1 km<sup>2</sup> pada Daerah Asam-asam, Kabupaten Tanah Laut, Kalimantan Selatan. Data dikumpulkan melalui pengeboran inti dan analisis *well logging* pada 4 titik bor (MIA004-MIA007). Pengeboran inti menghasilkan data litologi dan data kualitas

batubara, sementara analisis *well logging* digunakan untuk memverifikasi data litologi tersebut. Peringkat batubara ditentukan sesuai dengan klasifikasi *American Standard Testing and Material* (ASTM). Klasifikasi ini berdasarkan peringkat batubara atau berdasarkan derajat metamorfisme atau perubahan selama proses pembatubaraan (dari lignit hingga antrasit). Untuk menentukan peringkat batubara diperlukan data *fixed carbon*, *volatile matter* dan nilai kalori dalam *British Thermal Units/pound* (btu/lb). Pada Tabel 1 dapat dilihat cara klasifikasi peringkat batubara.

**Tabel 1.** Klasifikasi peringkat batubara

| Class/Group                     | Fixed Carbon Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), % |           | Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), % |                    | Gross Calorific Value Limits (Moist, Mineral-Matter-Free Basis) (Btu/lb) |           | Agglomerating Character |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------|
|                                 | Equal or Greater Than                                   | Less Than | Greater Than                                               | Equal or Less Than | Equal or Greater Than                                                    | Less Than |                         |
|                                 |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Anthracitic:                    |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Meta-anthracite                 | 98                                                      |           |                                                            | 2                  |                                                                          |           | nonagglomerating        |
| Anthracite                      | 92                                                      | 98        | 2                                                          | 8                  |                                                                          |           |                         |
| Semianthracite                  | 86                                                      | 92        | 8                                                          | 14                 |                                                                          |           |                         |
| Bituminous:                     |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Low volatile bituminous coal    | 78                                                      | 86        | 14                                                         | 22                 |                                                                          |           | commonly agglomerating  |
| Medium volatile bituminous coal | 69                                                      | 78        | 22                                                         | 31                 |                                                                          |           |                         |
| High volatile A bituminous coal |                                                         | 69        | 31                                                         |                    | 14000                                                                    |           |                         |
| High volatile B bituminous coal |                                                         |           |                                                            |                    | 13000                                                                    |           |                         |
| High volatile C bituminous coal |                                                         |           |                                                            |                    | 11500                                                                    |           |                         |
|                                 |                                                         |           |                                                            |                    | 10500                                                                    | 11500     | agglomerating           |
| Subbituminous:                  |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Subbituminous A coal            |                                                         |           |                                                            |                    | 10500                                                                    | 11500     | nonagglomerating        |
| Subbituminous B coal            |                                                         |           |                                                            |                    | 9500                                                                     | 10500     |                         |
| Subbituminous C coal            |                                                         |           |                                                            |                    | 8300                                                                     | 9500      |                         |
|                                 |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Lignitic                        |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          |           |                         |
| Lignite A                       |                                                         |           |                                                            |                    | 6300                                                                     | 8300      |                         |
| Lignite B                       |                                                         |           |                                                            |                    |                                                                          | 6300      |                         |

Sumber: ASTM (2004)

Pada penelitian ini digunakan estimasi inventori batubara untuk memperkirakan tonase batubara di daerah penelitian. Inventori batubara merupakan perkiraan batubara insitu yang tidak mempertimbangkan atau tidak lulus uji prospek beralasan (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Batas minimal inventori batubara mengacu pada batas minimal sumber daya batubara sebesar 2,5 juta ton. Inventori batubara dihitung menggunakan metode sirkular. Metode ini merupakan klasifikasi sumber daya dan cadangan batubara berdasarkan *United States Geological Survey* (USGS). Berikut adalah metode perhitungan menggunakan sirkular USGS (Wood dkk., 1983).

Kemiringan lapisan  $0^{\circ} - 10^{\circ}$

$$Q = S \times M \times D \dots\dots\dots(1)$$

Kemiringan lapisan  $10^{\circ} - 30^{\circ}$

$$Q = (S \times M \times D) / \cos \alpha \dots\dots\dots(2)$$

Kemiringan lapisan  $>30^{\circ}$

$$Q = (S \times M \times D) \times \cos \alpha \dots\dots\dots(3)$$

Q = sumber daya batubara yang dihitung (ton)

S = luas daerah pengaruh ( $m^2$ )

$\alpha$  = kemiringan lapisan batubara ( $^{\circ}$ )

M = ketebalan semu rata-rata (m)

D = densitas batubara ( $ton/m^3$ )

#### **Analytical Hierarchy Process (AHP)**

Untuk mengevaluasi potensi pengembangan UCG secara sistematis dan terukur, metode AHP akan digunakan. Langkah-langkah penerapan AHP dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penyusunan hierarki keputusan  
Terdapat kriteria, yaitu peringkat batubara, ketebalan batubara, posisi kedalaman batubara, rasio ketebalan/kedalaman batubara, kemiringan lapisan, batuan pengapit, ketebalan batuan pengapit, struktur geologi dan inventori batubara. Alternatifnya adalah lapisan batubara di daerah penelitian.
2. Pembentukan matriks perbandingan  
Membandingkan tiap kriteria menggunakan skala saaty. Sama penting bernilai 1, sedikit lebih penting bernilai 3, lebih penting bernilai 5,

sangat lebih penting bernilai 7, mutlak lebih penting bernilai 9.

3. Perhitungan bobot prioritas  
Nilai setiap kriteria dibagi dengan jumlah total nilai pada kriteria tersebut. Selanjutnya, masing-masing nilai yang telah dibagi akan ditambahkan lalu dihitung nilai rata-rata dari nilai tersebut.
4. Uji *Consistency Rasio* (CR)  
Jika nilai  $CR < 0,1$  maka hasil perhitungan dikatakan valid. CR dihitung dengan cara membagi nilai *Consistency Index* (CI) dibagi dengan *Random Index* (RI). Cara untuk mengetahui nilai CI terdapat pada rumus (4) dan RI pada Tabel 3.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \dots\dots\dots(4)$$

$\lambda_{max}$  = Penjumlahan nilai seluruh kriteria (bobot relatif dikalikan dengan jumlah nilai Skala Saaty setiap kriteria)

n = jumlah kriteria dalam matriks

**Tabel 2. Nilai Random Index**

| n | RI   |
|---|------|
| 1 | 0    |
| 2 | 0    |
| 3 | 0,58 |
| 4 | 0,90 |
| 5 | 1,12 |
| 6 | 1,24 |
| 7 | 1,32 |
| 8 | 1,41 |
| 9 | 1,45 |

Sumber: Saaty (1987)

5. Sintesis hasil  
Skor akhir untuk setiap lapisan batubara akan dihitung dengan mengalikan bobot kriteria dengan nilai kesesuaian masing-masing kriteria. Untuk kriteria yang sesuai dinilai 1 dan kriteria yang tidak sesuai dinilai 0. Kemudian, nilai seluruh lapisan tersebut akan dirata-ratakan per lapisan dan dijumlahkan untuk menentukan satu lapisan paling berpotensi pada daerah penelitian.

#### **GEOLOGI**

Kalimantan Selatan memiliki 2 cekungan, yaitu Barito dan Asam-asam. Kedua cekungan ini awalnya merupakan satu

cekungan yang sama, hingga pada Miosen Awal terjadi pengangkatan Pegunungan Meratus yang menyebabkan terpisahnya kedua cekungan tersebut (Satyana, 1995).

Struktur geologi yang terdapat di Kalimantan Selatan adalah antiklin, sinklin, sesar naik, sesar mendatar, dan sesar normal. Sumbu lipatan umumnya berarah timur laut - barat daya dan umumnya sejajar dengan arah sesar normal (Sikumbang dan Heryanto, 1994).

Kegiatan tektonik daerah ini diduga telah berlangsung sejak Zaman Jura, yang menyebabkan bercampurnya batuan ultramafik dan batuan malihan. Zaman Kapur Awal atau sebelumnya terjadi penerobosan granit dan diorit yang menerobos batuan ultramafik dan batuan malihan. Pada akhir Kapur Awal terbentuk Kelompok Alino yang sebagian merupakan olistostrome, diselingi dengan kegiatan gunung api (Sikumbang dan Heryanto, 1994).

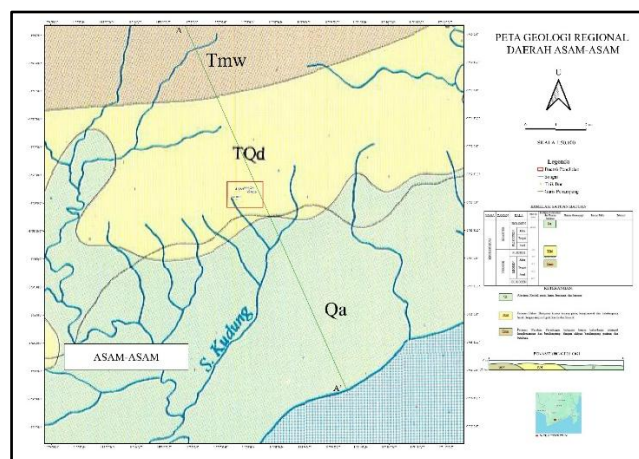
Pada Kala Oligosen terjadi genang laut yang membentuk Formasi Berai. Kemudian pada Kala Miosen terjadi susut laut yang membentuk Formasi Warukin. Gerakan tektonik terakhir terjadi pada Kala Miosen yang menyebabkan batuan tua terangkat membentuk Pegunungan Meratus dan melipat kuat batuan Tersier dan Pre-Tersier. Sejalan dengan itu terjadi deformasi berupa sesar naik dan mendatar

yang diikuti sesar normal dan pembentukan Formasi Dahor pada Kala Pliosen (Sikumbang dan Heryanto, 1994).

Daerah penelitian berada pada formasi pembawa batubara, yaitu Formasi Dahor. Selain itu, terdapat Formasi Warukin yang berada di sekitar daerah penelitian. Formasi Dahor, terdiri dari litologi batupasir kuarsa, mudah hancur, setempat bersisipan batulempung, lignit, limonit, kerakal kuarsa asap dan basal. Formasi ini terendapkan di lingkungan paralik dan ketebalan satuan  $\pm 750$  meter. Formasi ini berumur Pliosen – Plistosen dan menindih tidak selaras Formasi Warukin (Sikumbang dan Heryanto, 1994).

Formasi Warukin, terdiri dari litologi perselingan batupasir kuarsa dan batulempung, bersisipan serpih, batubara dan batugamping. Batupasir dan batulempung karbonatan setempat mengandung konkresi besi. Formasi ini terendapkan di lingkungan litoral hingga paralik dan memiliki ketebalan 250 – 750 meter. Formasi ini berumur Miosen Tengah - Miosen Akhir serta menindih selaras Formasi Berai (Sikumbang dan Heryanto, 1994).

Daerah penelitian berada pada suatu daerah yang tidak terpengaruh secara langsung oleh lipatan maupun patahan. Peta geologi regional daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Peta geologi regional daerah penelitian  
Sumber: Google, Sikumbang dan Heryanto (2025,1994)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Korelasi Lapisan Batubara

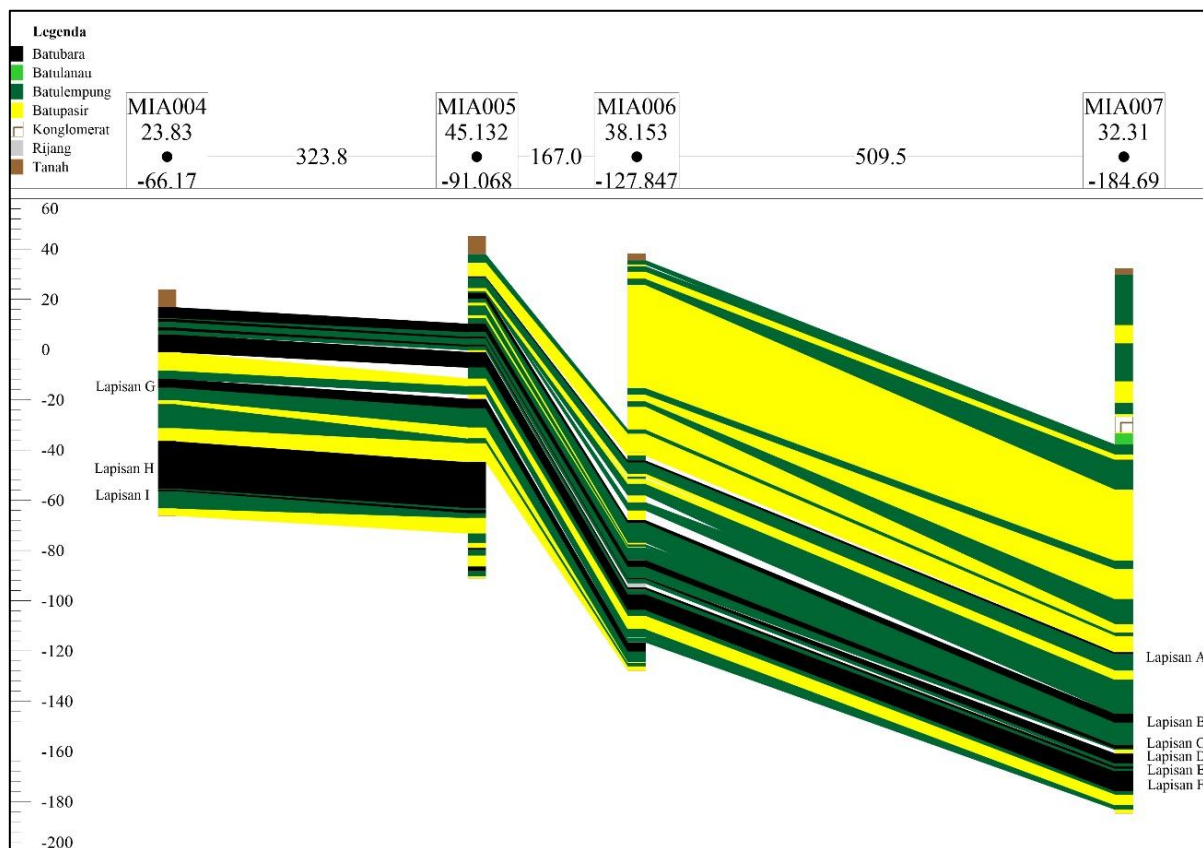
Daerah penelitian memiliki kemiringan lapisan 30-35° ke arah tenggara. Selain itu, daerah penelitian tidak terkena pengaruh struktur sehingga daerah ini dapat dikatakan memenuhi kriteria pengembangan UCG berdasarkan kemiringan lapisan dan kondisi struktur geologi (Bielowicz dan Kasinski, 2015). Pada daerah penelitian, terdapat 9 lapisan batubara dengan kode nama lapisan A, B, C, D, E, F, G, H, dan I. Daerah penelitian memiliki 4 lapisan yang menerus pada masing-masing titik bor yaitu lapisan C, D, E, dan F. Berbeda kondisinya dengan lapisan A dan B yang tidak terdapat pada titik bor MIA004, lapisan G yang tidak

terdapat pada titik bor MIA007, dan lapisan H dan I yang hanya terdapat pada titik bor MIA004 dan MIA005. Kondisi geologi lapisan batubara dapat dilihat pada Tabel 3 dan korelasi lapisan dapat dilihat pada Gambar 2.

Meninjau kondisi lapisan batubara pada area penelitian, litologi yang mengapit batubara didominasi oleh batulempung. Hal ini selaras dengan kriteria pengembangan UCG. UCG membutuhkan batuan pengapit yang tak lolos air untuk mencegah terjadinya kebocoran gas saat proses pengambilan gas dari lapisan batubara. Untuk melihat kemenerusan lapisan secara rinci, diperlukan eksplorasi lebih lanjut agar pengembangan UCG dapat dilakukan secara maksimal.

**Tabel 3.** Kondisi lapisan batubara daerah penelitian

| Lapisan Batubara | Titik Bor | Tebal Batubara (meter) | Elevasi (meter di atas permukaan laut) | Rasio (Tebal Batubara/ Elevasi) | Batuan pengapit |             | Ketebalan batuan pengapit (meter) |       |
|------------------|-----------|------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------|
|                  |           |                        |                                        |                                 | Roof            | Floor       | Roof                              | Floor |
| A                | MIA005    | 0,52                   | 29,08                                  | 41                              | Batupasir       | Batulempung | 4,13                              | 5,45  |
|                  | MIA006    | 0,77                   | -44,24                                 |                                 | Batulempung     | Batulempung | 4,52                              | 1,89  |
|                  | MIA007    | 0,7                    | -120,54                                |                                 | Batupasir       | Batulempung | 6,65                              | 6,45  |
| B                | MIA005    | 2,16                   | 22,34                                  | 41                              | Batulempung     | Batulempung | 1,65                              | 0,84  |
|                  | MIA006    | 1,15                   | -68,01                                 |                                 | Batupasir       | Batulempung | 7,82                              | 3,91  |
|                  | MIA007    | 3,55                   | -145,04                                |                                 | Batulempung     | Batulempung | 8,96                              | 13,55 |
| C                | MIA004    | 4,3                    | 16,73                                  | 21                              | Tanah           | Batulempung | 0,30                              | 7,10  |
|                  | MIA005    | 3,28                   | 10,21                                  |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,84                              | 2,22  |
|                  | MIA006    | 2,73                   | -83,85                                 |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,97                              | 5,01  |
|                  | MIA007    | 1,3                    | -157,55                                |                                 | Batulempung     | Batulempung | 0,54                              | 8,96  |
| D                | MIA004    | 1,2                    | 12,13                                  | 41                              | Batulempung     | Batulempung | 2,20                              | 0,30  |
|                  | MIA005    | 0,74                   | 5,092                                  |                                 | Batulempung     | Batulempung | 2,42                              | 1,84  |
|                  | MIA006    | 0,49                   | -91,00                                 |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,67                              | 1,95  |
|                  | MIA007    | 3,94                   | -160,89                                |                                 | Batupasir       | Batulempung | 3,22                              | 1,50  |
| E                | MIA004    | 1,2                    | 8,73                                   | 21                              | Batulempung     | Batulempung | 1,65                              | 2,20  |
|                  | MIA005    | 0,7                    | 1,93                                   |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,50                              | 2,42  |
|                  | MIA006    | 0,81                   | -94,73                                 |                                 | Rijang          | Batulempung | 0,26                              | 1,57  |
|                  | MIA007    | 0,88                   | -166,01                                |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,00                              | 3,22  |
| F                | MIA004    | 7,08                   | 5,93                                   | 21                              | Batulempung     | Batupasir   | 7,30                              | 1,65  |
|                  | MIA005    | 6,15                   | -1,07                                  |                                 | Batupasir       | Batulempung | 4,40                              | 0,80  |
|                  | MIA006    | 6,3                    | -97,45                                 |                                 | Batulempung     | Batulempung | 2,36                              | 1,53  |
|                  | MIA007    | 7,95                   | -167,89                                |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,45                              | 1,00  |
| G                | MIA004    | 3,45                   | -11,82                                 | 21                              | Batulempung     | Batulempung | 16,1                              | 3,35  |
|                  | MIA005    | 3,77                   | -19,68                                 |                                 | Batupasir       | Batulempung | 7,62                              | 1,73  |
|                  | MIA006    | 3,43                   | -116,62                                |                                 | Batulempung     | Batulempung | 4,30                              | 1,80  |
| H                | MIA004    | 18,95                  | -36,52                                 | 21                              | Batulanau       | Batulempung | 0,30                              | 0,35  |
|                  | MIA005    | 18,4                   | -44,82                                 |                                 | Batupasir       | Batulempung | 0,75                              | 7,45  |
| I                | MIA004    | 0,7                    | -55,77                                 | 21                              | Batulempung     | Batulempung | 6,80                              | 0,30  |
|                  | MIA005    | 1,26                   | -63,97                                 |                                 | Batulempung     | Batulempung | 1,84                              | 0,75  |



**Gambar 2.** Korelasi lapisan batuan daerah penelitian

### Peringkat Batubara

Berdasarkan sifat struktur organiknya, batubara dengan peringkat rendah menunjukkan tingkat reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan batubara peringkat tinggi, menjadikannya bahan yang sesuai untuk proses konversi kimia seperti gasifikasi (Odeh, 2017). Batubara berperingkat lignit hingga subbituminus dianggap optimal untuk UCG. Meskipun demikian, batubara peringkat tinggi seperti bituminus juga bisa dimanfaatkan untuk UCG, asalkan tidak bersifat mengokas atau *caking* (Dwitama dkk., 2021). Batubara bersifat kokas memiliki tingkat permeabilitas rendah yang dipengaruhi oleh kadar air alamnya (Meshram dkk., 2015), menjadi kendala dalam proses UCG karena menghambat kelancaran aliran gas. Batubara dengan sifat *caking* yang tinggi dapat menyebabkan ketidakstabilan proses (Huang dkk., 2019). Batubara daerah penelitian seluruhnya termasuk kelompok bituminus didominasi oleh jenis batubara bituminus zat terbang

tinggi C berdasarkan klasifikasi ASTM. Hal ini selaras dengan kondisi kompleksitas geologi sederhana yang kualitasnya hanya sedikit bervariasi. Hanya terdapat 1 jenis batubara yang berbeda pada lapisan A titik bor MIA007, yaitu bituminus zat terbang tinggi B. Meskipun berbeda peringkat batubara dengan yang lainnya, batubara ini tidak memerlukan analisis pengokasan lebih lanjut dikarenakan nilai uji kalor batubara tersebut masih kurang dari 6100 kal/gr dengan basis analisis air dried basis. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa peringkat batubara pada daerah ini memiliki potensi pengembangan UCG. Rincian peringkat batubara dapat dilihat pada Tabel 4. Nilai kalor batubara ditinjau dari basis analisis *air dried basis* (adb) untuk menilai kesesuaian dengan kriteria peringkat batubara, analisis *dry ash free* (daf) untuk menentukan lapisan batubara dapat dilakukan estimasi sumber daya, dan analisis moist, mineral matter free (mmmf) digunakan untuk menentukan peringkat batubara.

## Estimasi Inventori Batubara

Berdasarkan data yang digunakan pada penelitian, inventori batubara yang dihitung termasuk kedalam klasifikasi inventori batubara tereka. Inventori batubara tereka merupakan bagian dari estimasi inventori batubara total yang tonase, dan kualitas batubaranya hanya dapat diperkirakan dengan tingkat kepercayaan yang rendah. Titik pengamatan dan data pendukung tidak cukup untuk membuktikan kemenerusan

endapan batubara dan kualitasnya (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Inventori batubara dihitung menggunakan rumus (3) meninjau kondisi kemiringan lapisan sebesar  $35^\circ$ , sehingga  $\cos 35^\circ = 0,819$ . Nilai  $\cos$  dikalikan dengan ketebalan rata-rata, densitas, dan luas area untuk mengetahui inventori batubara. Terdapat 5 lapisan (B, C, F, G, dan H) yang memenuhi kriteria pengembangan UCG. Rincian estimasi inventori batubara tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 4.** Peringkat batubara daerah penelitian

| Lapisan | Titik Bor | Nilai Kalor (Kal/gr, adb) | Nilai Kalor (kal/gr, daf) | Nilai Kalor (btu/lb, mmmf) | Peringkat Batubara             |
|---------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| A       | MIA005    | 5125                      | 6701                      | 12787                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA006    | 4864                      | 6668                      | 12234                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA007    | 5078                      | 7126                      | 13277                      | Bituminus zat terbang tinggi B |
| B       | MIA005    | 5453                      | 6727                      | 12414                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA006    | 4832                      | 6775                      | 12387                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA007    | 4704                      | 6828                      | 12605                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| C       | MIA004    | 4947                      | 6772                      | 12612                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 5399                      | 6900                      | 12676                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA006    | 5329                      | 6983                      | 12730                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| D       | MIA007    | 4114                      | 6433                      | 12428                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA004    | 4831                      | 6714                      | 12389                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 4831                      | 6714                      | 12389                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| E       | MIA006    | 4980                      | 6767                      | 12342                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA007    | 4682                      | 6661                      | 12435                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA004    | 4825                      | 6718                      | 12410                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| F       | MIA005    | 5226                      | 6736                      | 12320                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA006    | 4637                      | 6721                      | 12458                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA007    | 4613                      | 6697                      | 12453                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| G       | MIA004    | 4988                      | 6857                      | 12528                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 4672                      | 6888                      | 12606                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA006    | 5057                      | 6769                      | 12357                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| H       | MIA007    | 5233                      | 6913                      | 12621                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA004    | 4618                      | 6651                      | 12207                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 4374                      | 6599                      | 12119                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
| I       | MIA006    | 4862                      | 6702                      | 12295                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA004    | 4542                      | 6668                      | 12191                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 4542                      | 6668                      | 12191                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA004    | 4408                      | 6645                      | 12390                      | Bituminus zat terbang tinggi C |
|         | MIA005    | 4408                      | 6645                      | 12390                      | Bituminus zat terbang tinggi C |

**Tabel 5.** Estimasi inventori batubara daerah penelitian

| Lapisan | Ketebalan rata-rata (m) | Densitas (ton/m <sup>3</sup> ) | Luas area (km <sup>2</sup> ) | Inventori batubara (juta ton) |
|---------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A       | 0,66                    | 1,38                           | 1,00                         | 0,75                          |
| B       | 2,29                    | 1,34                           | 1,00                         | 2,51                          |
| C       | 2,90                    | 1,35                           | 1,00                         | 3,21                          |
| D       | 1,59                    | 1,33                           | 1,00                         | 1,73                          |
| E       | 0,90                    | 1,33                           | 1,00                         | 0,98                          |
| F       | 6,87                    | 1,31                           | 1,00                         | 7,37                          |
| G       | 3,55                    | 1,33                           | 1,00                         | 3,87                          |
| H       | 18,63                   | 1,28                           | 1,00                         | 19,55                         |
| I       | 0,98                    | 1,28                           | 1,00                         | 1,03                          |

## Evaluasi Potensi Pengembangan UCG

Untuk menentukan area pengembangan UCG, disarankan untuk memilih satu lapisan pada area tersebut (Dwitama dkk., 2021). Berdasarkan 9 kriteria yang dinilai untuk pengembangan UCG, masing-masing dari kriteria tersebut diukur prioritasnya menggunakan Skala Saaty. Peringkat batubara merupakan kriteria paling penting, karena peringkat batubara akan memengaruhi produk gasifikasi tersebut. Kriteria berikutnya adalah ketebalan batubara. Kriteria tersebut berkaitan dengan kualitas gasifikasi batubara. Penelitian UCG di Uni Soviet, menunjukkan terjadi penurunan nilai panas yang menghasilkan gas pada ketebalan batubara di bawah 2 meter (Shafirofich dan Varma, 2009). Kriteria berikutnya adalah posisi kedalaman batubara, rasio kedalaman/ketebalan, batuan pengapit, ketebalan batuan pengapit, dan struktur geologi yang berkaitan dengan faktor keamanan untuk UCG. 5 kriteria tersebut menentukan keamanan dalam mencegah kebocoran gas pada proses UCG. Kriteria berikutnya adalah kemiringan lapisan yang berkaitan dengan faktor teknis dalam pembangunan UCG. Kriteria terakhir adalah inventori batubara yang berkaitan dengan keekonomisan proyek UCG. Nilai

kriteria UCG berdasarkan Skala Saaty dapat dilihat pada Tabel 6.

Berdasarkan nilai-nilai tersebut, masing-masing kriteria dapat dihitung bobot relatifnya hingga *consistency ratio*. Melihat *consistency ratio* yang kurang dari 0,1, pembobotan kriteria menggunakan Skala Saaty dapat dikatakan valid. Pada Tabel 7 dapat dilihat rincian dari bobot relatif, nilai *lambda max*, *consistency index*, dan *consistency ratio*.

Bobot relatif yang telah ditentukan dimasukkan nilainya pada tiap alternatif, yaitu lapisan batubara. Untuk lapisan batubara yang sesuai dengan kriteria mendapatkan bobot relatif yang telah disebutkan, sedangkan lapisan batubara yang tidak memenuhi kriteria memiliki nilai 0. Untuk melihat rincian dari nilai rata-rata setiap lapisan batubara dapat dilihat pada Tabel 8.

Nilai rata-rata lapisan batubara di Daerah Asam-asam bervariasi dari 0,55 hingga 0,78. Nilai rata-rata keseluruhan lapisan batubara sebesar 0,67. Lapisan yang memiliki potensi paling tinggi adalah lapisan F dengan nilai 0,78. Untuk pengembangan UCG lebih lanjut, penelitian dapat difokuskan pada lapisan F.

**Tabel 6.** Nilai kriteria UCG daerah penelitian

| Kriteria                      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| Peringkat Batubara            | 1   | 3   | 5   | 5   | 7   | 5   | 5   | 5   | 9 |
| Ketebalan batubara            | 1/3 | 1   | 3   | 3   | 5   | 3   | 3   | 3   | 7 |
| Posisi kedalaman batubara     | 1/5 | 1/3 | 1   | 1   | 3   | 1   | 1   | 1   | 5 |
| Rasio Kedalaman dan Ketebalan | 1/5 | 1/3 | 1   | 1   | 3   | 1   | 1   | 1   | 5 |
| Kemiringan lapisan            | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1   | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 3 |
| Batuan pengapit               | 1/5 | 1/3 | 1   | 1   | 3   | 1   | 1   | 1   | 5 |
| Ketebalan batuan pengapit     | 1/5 | 1/3 | 1   | 1   | 3   | 1   | 1   | 1   | 5 |
| Struktur Geologi              | 1/5 | 1/3 | 1   | 1   | 3   | 1   | 1   | 1   | 5 |
| Inventori batubara            | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 |

**Tabel 7.** Bobot relatif kriteria UCG, *Lambda Max*, *Consistency Index*, dan *Consistency Ratio* daerah penelitian

| Kriteria                      | Nilai |
|-------------------------------|-------|
| Peringkat Batubara            | 0,35  |
| Ketebalan batubara            | 0,19  |
| Posisi kedalaman batubara     | 0,08  |
| Rasio Kedalaman dan Ketebalan | 0,08  |
| Kemiringan lapisan            | 0,03  |
| Batuan pengapit               | 0,08  |
| Ketebalan batuan pengapit     | 0,08  |
| Struktur Geologi              | 0,08  |
| Inventori batubara            | 0,02  |
| $\lambda_{max}$               | 9,34  |
| Consistency Index             | 0,04  |
| Consistency Ratio             | 0,03  |

**Tabel 8.** Nilai lapisan batubara daerah penelitian

| No        | Lapisan batubara | Nilai rata-rata lapisan batubara |
|-----------|------------------|----------------------------------|
| 1         | A                | 0,55                             |
| 2         | B                | 0,75                             |
| 3         | C                | 0,71                             |
| 4         | D                | 0,64                             |
| 5         | E                | 0,57                             |
| 6         | F                | 0,78                             |
| 7         | G                | 0,73                             |
| 8         | H                | 0,72                             |
| 9         | I                | 0,55                             |
| Rata-rata |                  | 0,67                             |

## KESIMPULAN

Daerah penelitian memiliki 9 lapisan batubara dengan ketebalan antara 0,49 meter hingga 18,95 meter, didominasi oleh batuan pengapit berupa batulempung. Tidak terdapat indikasi rekahan atau sesar yang dapat memengaruhi proses UCG, dengan kemiringan lapisan  $30^{\circ}$  –  $35^{\circ}$  ke arah tenggara yang sesuai untuk pengembangan UCG. Peringkat batubara sebagian besar adalah bituminus zat terbang tinggi, yang bersifat reaktif tinggi dan sesuai untuk gasifikasi, dengan nilai kalor rata-rata di bawah 6.100 kal/gr (adb). Terdapat 5 lapisan (B, C, F, G, dan H) memiliki inventori batubara yang memenuhi kriteria pengembangan UCG.

Berdasarkan metode AHP, Lapisan F memiliki potensi tertinggi untuk pengembangan UCG dengan nilai rata-rata 0,78. Kombinasi faktor geologi, seperti ketebalan lapisan, batuan pengapit, dan struktur geologi yang sederhana menegaskan bahwa daerah ini sangat

potensial untuk pengembangan UCG guna mendukung produksi energi dengan emisi karbon rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga dan semua pihak yang telah membantu menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggara, F., Riasetiawan, M., Assamarqandi, F.R., Sartika, B.F., Rizaldi, I.J., Syahra, V., Ibrahim, M.A. dan Rahmat, S.B., 2022. Screening criteria of underground coal gasification (UCG): A case study from Mangunjaya Area, South Sumatra Basin, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1071(1), hal.1-12.
- ASTM International, 2004. *Standard classification of coals by rank (D388)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- Bielowicz, B. dan Kasiński, J.R., 2015. The possibility of underground gasification of lignite from Polish deposits. *International Journal of Coal Geology*, 139, hal.191-205.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019. *SN/ 5015:2019 Pedoman pelaporan hasil eksplorasi, sumber daya, dan cadangan batubara*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2021. *Road map pengembangan dan pemanfaatan batubara 2021-2045*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Dwitama, E.P., Ramdhani, M.R. dan Ulfa, R.M., 2021. Evaluasi pendahuluan potensi underground coal gasification di Cekungan Sumatra Selatan: Studi kasus batubara Formasi Muara Enim. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(2), hal.83-97.
- Ge, S., 2017. Underground coal gasification: A clean coal technology. *Journal of China University of Mining and Technology*, 46(4), hal.679-691.
- Google, 2025. *Kalimantan Selatan*. Available at: <https://www.google.com/maps/place/Kalimantan+Selatan> [Accessed 14 July 2025].
- Huang, W., Wang, Z., Xie, T. dan Du, X., 2019. Feasibility study on underground coal gasification of quality characteristics of 9 Chinese coal types. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(2), hal.745-761.
- Meshram, P., Purohit, B.K., Sinha, M.K., Sahu, S.K. dan Pandey, B.D., 2015. Environmental risks and benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, hal.745-761.
- Moorhouse, J., Huot, M. dan McCulloch, M., 2010. *Underground coal gasification: Environmental risks and benefits*. Calgary: Pembina Institute.
- Odeh, A.O., 2017. Pyrolysis: Pathway to coal clean technologies. In: *Coal Combustion*. IntechOpen, hal.1-20.
- Purnama, A.B. dan Huda, M., 2019. A preliminary study of Indonesian coal basins for underground coal gasification development. *Indonesian Mining Journal*, 22(1), hal.61-76.
- Saaty, T.L., 1987. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), hal.161-176.
- Satjana, A.H., 1995. Paleogene unconformities in the Barito Basin, S.E. Kalimantan: A concept for the solution of the “Barito Dilemma” and a key to the search for Paleogene structures. In: *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, 24th Annual Convention*. Jakarta: Indonesian Petroleum Association, hal.263-276.
- Sikumbang, N. dan Heryanto, R., 1994. *Peta geologi lembar Banjarmasin, Kalimantan*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Wood, G.H., Jr., Kehn, T.M., Carter, M.D. dan Culbertson, W.C., 1983. *Coal resource classification system of the U.S. Geological Survey*. Denver: U.S. Geological Survey



**HUBUNGAN KONDISI GEOLOGI TERHADAP SEBARAN KADAR CU-AU  
BERDASARKAN DATA INTI PENGEBORAN PROSPEK TUMPANGPITU,  
DAERAH SUMBERAGUNG, BANYUWANGI, JAWA TIMUR**

***RELATIONSHIP BETWEEN GEOLOGICAL CONDITIONS AND Cu-Au GRADE  
DISTRIBUTION BASED ON DRILL CORE DATA FROM TUMPANGPITU PROSPECT,  
SUMBERAGUNG AREA, BANYUWANGI, EAST JAVA***

**Putri Rindu Bunga Kasih<sup>1</sup>, Dadan Wildan<sup>1</sup>, Achmad Djumarma Wirakusumah<sup>1</sup>,  
Tatik Handayani<sup>2</sup>, Riansyah Widisaputra<sup>3</sup>,**

<sup>1</sup>Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral dan Panas Bumi, Indonesia

<sup>3</sup>PT Bumi Suksesindo, Indonesia

Email korespondensi: [putririndubungakasih01@gmail.com](mailto:putririndubungakasih01@gmail.com)

Diterima: 15 Juli 2025; Direvisi: 27 Oktober 2025; Disetujui: 30 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.549>

**ABSTRAK**

Daerah penelitian termasuk di wilayah Pesanggaran, Banyuwangi, Jawa Timur, berada pada bagian tengah busur magmatik Sunda-Banda yang berpotensi terbentuknya mineralisasi. Penelitian bertujuan mengetahui kondisi geologi, zona alterasi, mineralisasi dan tipe endapan bijih serta hubungannya dengan sebaran kadar Cu-Au. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan pada kegiatan eksplorasi lebih lanjut. Penelitian ini dilakukan berdasarkan pada data inti bor sebanyak enam titik lokasi pengeboran yang dilengkapi dengan analisis ASD, X-RD, petrografi, mineragrafi, dan statistik berupa *boxplot*. Litologi daerah penelitian terdiri dari enam satuan batuan, yaitu batupasir, dasit fase 1, diorit, diorit kuarsa, dasit fase 2, dan breksi freatomagmatik. Terdapat lima zona alterasi, yaitu zona *overprint* (alunit-klorit-mika-smektit±pirofilit±biotit±k-feldspar), zona argilik lanjut (pirofilit-mika-dikit-diaspor), zona argilik (kaolinit-mika±illit±diaspor), zona filik (serisit/mika-smektit±klorit±kalsit) dan zona propilitik (klorit-mika-smektit±epidot±kalsit). Mineralisasi sulfida yang dijumpai berupa mineral pirit, kalkopirit, enargit, dan kalkopirit dalam bentuk tersebar, masif dan urat yang hadir pada kedalaman <150 m dengan kadar berkisar antara 0,1 ppm s.d >1 ppm Au, dan <0,1% s.d. 0,5% Cu. Kehadiran mineral pirit, kalkopirit, bornit, dan kovelit, berasosiasi dengan urat-urat kuarsa yang intensif saling berpotongan hadir pada kedalaman >150 m dengan kadar berkisar antara 0,5 ppm s.d. >1 ppm Au, dan 0,3% s.d. >1% Cu. Zona sebaran kadar Cu-Au tinggi dikontrol oleh intrusi diorit kuarsa yang berhubungan dengan alterasi tipe argilik dan tipe filik dengan mineralisasi yang berhubungan kuat yaitu bornit-kalkopirit-pirit, enargit-kalkosit-pirit dan yang memiliki hubungan lemah yaitu mineral pirit. Tipe endapan bijih yaitu porfiri Cu-Au di-*overprint* oleh epitermal sulfidasi tinggi.

**Kata kunci:** Porfiri, sulfidasi tinggi, alterasi, mineralisasi, kadar Cu-Au

## ABSTRACT

*The research area is located in the Pesanggaran region, Banyuwangi, East Java, situated in the central part of the Sunda-Banda magmatic arc, which has potential for mineralization formation. This research aims to determine the geological conditions, alteration zones, mineralization and ore deposit types, as well as their relationship with Cu-Au grade distribution. The research results are expected to be utilized for further exploration activities. This study was conducted based on drill core data from six drilling locations, complemented by ASD analysis, X-RD, petrography, mineragraphy, and statistical analysis using boxplots. The lithology of the research area consists of six rock units: sandstone, dacite phase 1, diorite, quartz diorite, dacite phase 2, and phreatomagmatic breccia. Five alteration zones are identified: overprint zone (alunite-chlorite-mica-smectite±pyrophyllite±biotite±K-feldspar), advanced argillic zone (pyrophyllite-mica-dickite-diaspore), argillic zone (kaolinite-mica±illite±diaspore), phyllic zone (sericite/mica-smectite±chlorite±calcite), and propylitic zone (chlorite-mica-smectite±epidote±calcite). Sulfide mineralization encountered consists of pyrite, chalcocite, enargite, and chalcopyrite minerals in disseminated, massive, and vein forms present at depths <150 m with grades ranging from 0.1 ppm to >1 ppm Au and <0.1% to 0.5% Cu. The occurrence of pyrite, chalcopyrite, bornite, and covellite minerals, associated with intensively cross-cutting quartz veins, is present at depths >150 m with grades ranging from 0.5 ppm to >1 ppm Au and 0.3% to >1% Cu. The high Cu-Au grade distribution zone is controlled by quartz diorite intrusion related to argillic-type and phyllic-type alterations with strongly associated mineralization consisting of bornite-chalcopyrite-pyrite and enargite-chalcocite-pyrite, while weakly associated mineralization is represented by pyrite mineral. The ore deposit type is identified as Cu-Au porphyry overprinted by high-sulfidation epithermal mineralization.*

**Keywords:** *Porphyry, high-sulfidation, alteration, mineralization, Cu-Au grade*

## PENDAHULUAN

Daerah penelitian berada pada busur magmatik Sunda-Banda yang salah satunya berpotensi terbentuknya sistem mineralisasi. Tujuh Bukit terdapat mineralisasi sulfida yang merupakan endapan tipe porfiri kaya Au sistem Cu-Au-Mo dan endapan epitermal sulfidasi tinggi sistem Cu-Au-Ag (Hellman, 2011). Endapan porfiri dan epitermal berhubungan erat dengan proses magmatik dan hidrotermal, sehingga identifikasi jenis alterasi dan mineralisasi menjadi penting dalam pengembangan eksplorasi selanjutnya.

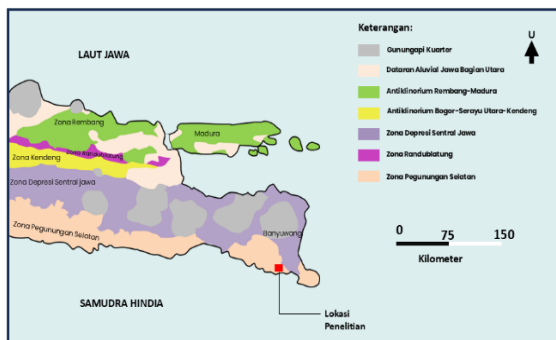
Secara administratif, daerah penelitian termasuk ke dalam wilayah Desa Sumberagung, Kecamatan Pesanggaran, Kabupaten Banyuwangi, Provinsi Jawa Timur, dengan luas area prospek 657.280 m<sup>2</sup>, yang merupakan salah satu temuan prospek di area IUP dari PT Bumi Suksesindo (BSI), terletak ±2 km di sebelah timur dari tambang emas Tumpangpitu dan

di sebelah timur Pulau Merah yang terdapat indikasi mineralisasi tembaga dan emas (Gambar 2) yang juga merupakan salah satu situs dari UNESCO *Global Geopark* Ijen.

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kondisi geologi, sebaran zona alterasi, mineralisasi dan pengaruhnya terhadap sebaran kadar Cu-Au serta tipe endapan bijih.

## GEOLOGI REGIONAL Fisiografi

Pulau Jawa bagian timur terbagi menjadi tujuh zona fisiografi yaitu: Zona Gunung Api Kuartar, Zona Dataran Aluvial Pantai Utara, Zona Antiklinorium Rembang-Madura, Zona Antiklinorium Bogor, Serayu Utara, dan Kendeng, Zona Depresi Sentral Jawa, Zona Randublatung, dan Zona Pegunungan Selatan. Daerah penelitian termasuk ke dalam Zona Pegunungan Selatan (Gambar 1).



**Gambar 1.** Peta fisiografi Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949; dimodifikasi dari Koesoemadinata, 2020)

### Struktur Geologi

Tumpangpitu dan sekitarnya, terdapat dua sesar utama yang membentang dari arah barat laut menuju tenggara, yakni Sesar Pasanggaran berarah  $140^{\circ}/70^{\circ}\text{SW}$ , Sesar Lampon-Salakan  $140^{\circ}/75^{\circ}\text{SW}$ , sebagai pengendali terbentuknya sesar-sesar kecil di kawasan tersebut. Periode kedua menghasilkan sesar dengan arah utara-selatan. Pola struktur ini berupa sesar “*metallogenetically fertile structure*”, menjadi lokasi terjadinya proses mineralisasi (Harrison, 2018).

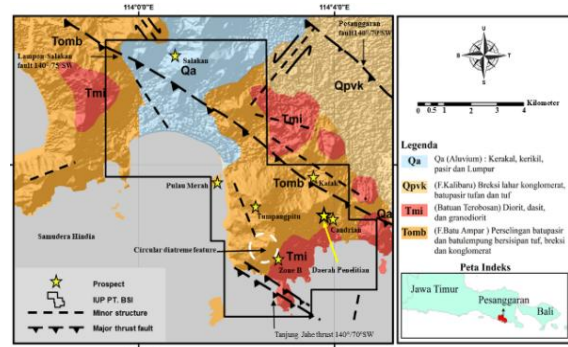
### Stratigrafi

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Blambangan, Jawa Timur (Achdan dan Bachri, 1993), daerah penelitian disusun oleh Formasi Batuampar berumur Oligosin yang terdiri atas perselingan batupasir dan batulempung sisipan tuf, breksi dan konglomerat. Kemudian diterobos oleh Batuan Intrusi berumur Miosin yang terdiri atas diorit, dasit, dan granodiorit. Paling muda ditempati endapan aluvium berumur Kuartir yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir dan lumpur (Gambar 2).

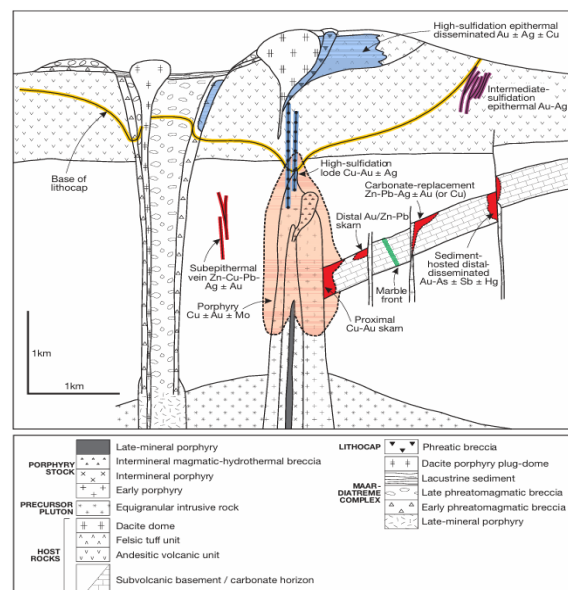
### Endapan Porfiri

Endapan porfiri adalah endapan mineral berkadar rendah hingga menengah, tonase besar, pembentukannya dipengaruhi struktur geologi dan berasosiasi dengan intrusi porfiri felsik hingga intermediet (Kirkham, 1972 dalam Sinclair, 2007). Sistem porfiri Cu memiliki hubungan spasial dan genetik dengan pluton awal (prekursor) berupa intrusi multifase, ekuigranular, umumnya berdimensi batolitik, dan

berkomposisi dioritik hingga granit (Gambar 3). Pluton ini terkait secara spasial, temporal, dan kemungkinan genetik dengan porfiri Cu dan pembentukan Au epitermal di atasnya (Sillitoe, 2010).



**Gambar 2.** Peta geologi dan pola struktur daerah Tumpangpitu (dimodifikasi dari Achdan dan Bachri, 1993; Hellman, 2010)



**Gambar 3.** Model konseptual sistem porfiri Cu± Au± Mo yang terletak di pusat dalam stok porfiri multifase dan mineralisasi epitermal Cu-Au± Ag (Sillitoe, 2010)

Proses *overprinting* pada intrusi dapat menghasilkan beberapa fase mineralisasi dan daur ulang mineral bijih lokal dengan kadar logam lebih tinggi, atau menurunkan kualitas sistem bijih. Tumpangpitu Cu-Au-Mo serta endapan Au-Ag±Cu epitermal sulfidasi tinggi yang merupakan salah satu endapan porfiri terbesar di busur magmatik Sunda-Banda Indonesia (Harrison, 2018).

## Endapan Epitermal

Tipe endapan epitermal terkait erat dengan aktivitas vulkanisme pada daerah tertentu. Endapan ini mengalami pendidihan (*boiling*) pada temperatur 200-300°C dan berhubungan erat dengan pusat-pusat magmatisme. Secara umum, endapan epitermal terbagi menjadi dua tipe berdasarkan tingkat sulfidasinya: tipe sulfidasi tinggi (tipe enargit atau tipe asam sulfat) dan sulfidasi rendah (tipe adularia). Tipe sulfidasi rendah umumnya berupa urat, sedangkan sulfidasi tinggi berbentuk tersebar dengan tekstur *vuggy* sebagai penciri dan biasanya berasosiasi dengan luzonit, enargit, pirit, barit, dan alunit (Corbett, 2013). Daerah penelitian merupakan sistem epitermal sulfidasi tinggi.

## METODOLOGI

Data yang digunakan untuk penelitian ini terdiri dari data sekunder yakni data geologi regional, data *Multy Elements Geochemistry* (MEG) Cu-Au, dan data primer yang diperoleh dari *logging* terperinci inti pengeboran, data *analytical spectral devices* (ASD) laboratorium PT Bumi Suksesindo, analisis *X-Ray Diffraction* (X-RD), petrografi, mineragrafi di laboratorium PSDMBP dan analisis statistik berupa *boxplot*. Sampel inti pengeboran dilakukan *logging* secara rinci untuk mendapatkan data litologi, alterasi, mineralisasi, tekstur dan struktur serta uji ASD.

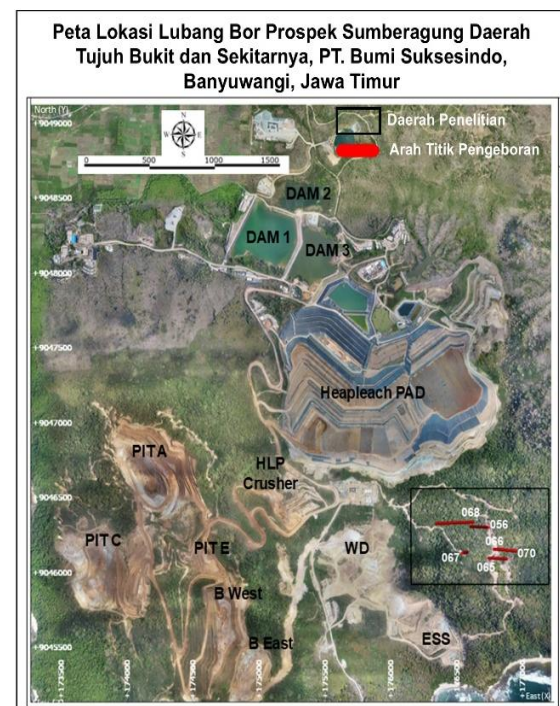
Pengambilan data ASD untuk mengidentifikasi kandungan mineral tanpa harus dipreparasi, dilakukan setiap interval 1 meter pada sampel batuan inti pengeboran dengan ASD tipe *terraspec 4*. Analisis ASD menggunakan *software* TSG 8, analisis mineral oksida dengan panjang gelombang (350-1100 nm), sedangkan pembacaan mineral lempung, mika, filosilikat, hidroksilat, silikat, sulfat, dan karbonat pada panjang gelombang (1100-2500 nm).

Sampel dilakukan analisis X-RD, sehingga dapat diketahui komposisi mineral, yang

tidak teridentifikasi dengan metode ASD. Preparasi sampel inti pengeboran menjadi -200 mesh sehingga homogen, *dirunning* pada perangkat alat X-RD MAXima. Data yang dihasilkan berupa nilai sudut dan nilai intensitas, sehingga membentuk *peak* kurva.

Sampel dianalisis petrografi, untuk melihat sifat optik mineral, sehingga dapat ditentukan jenis mineral, dan jenis batuan, dan mengetahui ubahan dari mineral primer menjadi mineral sekunder serta pola hubungan antar mineral. Pada analisis mineragrafi, untuk mengidentifikasi sifat fisik dan optik mineral bijih, sehingga dapat ditentukan tekstur, mineral bijih, mineral oksida, dan mengetahui genesa mineral bijih.

*Boxplot* adalah visualisasi grafis yang dapat merangkum informasi lebih terperinci mengenai distribusi nilai-nilai data hasil pengamatan. Analisis statistik ini untuk mengetahui hubungan kondisi geologi, alterasi dan mineralisasi dengan sebaran kadar Cu-Au.



Gambar 4. Peta lokasi titik pengeboran

Data pengeboran eksplorasi sebanyak enam titik dengan kedalaman antara 215

s.d 400 meter (Gambar 4), mempunyai azimuth dan dip masing-masing R-56 (N270°E/50°), R-65 (N90°E/65°), R-66 (N90°E/75°), R-67 (N90°E/83°), R-68 (N268°E/25°), R-70 (N90°E/55°).

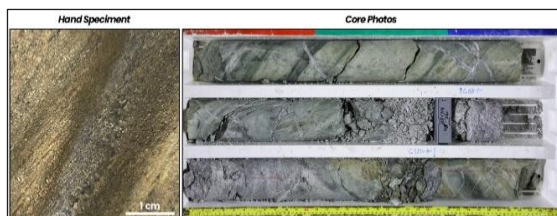
## HASIL

### Litologi - Geologi

Berdasarkan hasil pengamatan megaskopis ditemukan enam satuan batuan yang terdapat dalam lubang pengeboran daerah penelitian.

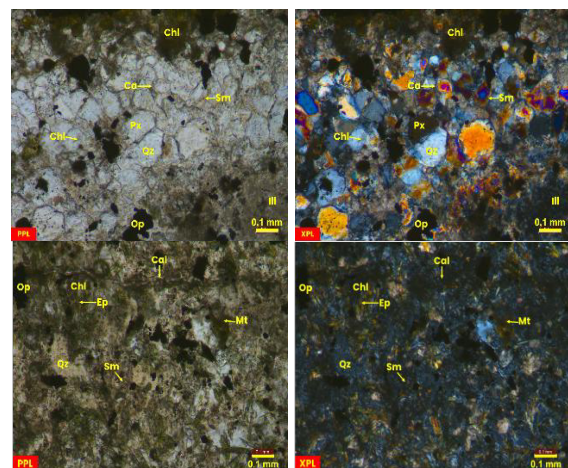
#### Satuan Batupasir

Batupasir secara megaskopis dijumpai pada lubang pengeboran R-56 (48,9-102 m), R-66 (245,2 - 273,6 m dan 392,4 - 400,6 m), R-68 (164,8-187 m), dan R-70 (59 - 115 m dan 158 - 286,05 m). Batuan klastik, laminasi, ukuran butir halus (1/4-1/8mm), subangular, pemilahan baik, terdiri dari butiran vulkanik, terdiri matriks pasir halus, dengan semen silika dan karbonat (Gambar 5).



**Gambar 5.** Kenampakan Batupasir pada inti pengeboran R-56 (91,54 -93,75 m)

Berdasarkan Thompson (1996), Adams (1984), dan MacKenzie (2017), hasil pengamatan petrografi sampel R1-056 berbutir sangat halus (0,080-0,172 mm), *sub angular - sub rounded*, pemilahan baik, kemas tertutup. Fragmen terdiri dari kuarsa dan piroksen dengan masa dasar kuarsa semen karbonat, struktur laminasi (Gambar 6). Batupasir ini, merupakan batupasir litik wackes (Pettijohn, 1975). Pada sampel ini batupasir berubah menjadi mineral alterasi, seperti klorit epidot, illit, smektit, kuarsa, kalsit, magnetit dan opak.

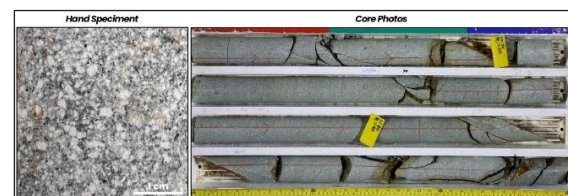


**Gambar 6.** Fotomikrograf sayatan tipis sampel batupasir (R1-056), PPL (kiri), XPL (kanan), Chl: klorit; Ep: epidot; Ill: illit; Sm: smektit; Qz: kuarsa; Cal: kalsit; Mt: magnetit; Px: piroksen dan Op: opak.

#### Satuan Dasit Fase 1

Dasit 1 merupakan batuan beku ekstrusif yang menerobos batuan yang lebih tua yaitu lapisan batupasir dan terbentuk sebelum masa porfiri Dasit fase 1 merupakan bagian dari Batuan Intrusi berumur (Achdan dan Bachri, 1993). Batuan koheren, masif, tekstur porfiritik-faneritik, granularitas halus-sedang (<0,1-5mm), hipokristalin, bentuk kristal euhedral-subhedral, inequigranular terdiri dari kristal halus-sedang (plagioklas-hornblend-kuarsa) (Gambar 7).

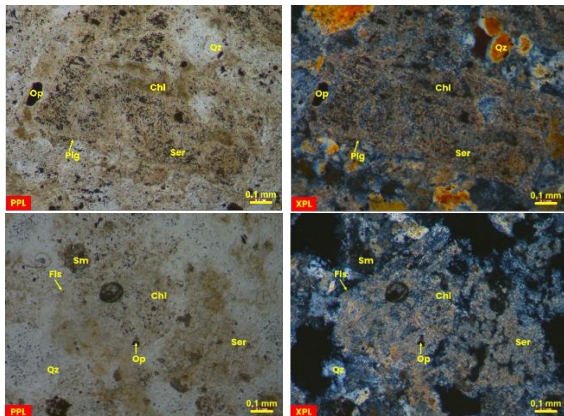
Dasit fase 1 dijumpai pada lubang bor R-56 (0-48,9 m), R-65 (41,3 – 65 m), R-66 (0 – 63,3 m), R-67 (0-80 m, 92,3 – 96,6 m, dan 145,2 – 156 m), R-68 (0 – 164,8 m) dan R-70 (0 – 59 m).



**Gambar 7.** Kenampakan Dasit fase 1 pada inti pengeboran R-68 (19,84 – 23,04 m)

Pengamatan petrografi pada sampel R2-24-056, holokristalin, granulitas (1->5mm), tekstur porfiritik-faneritik, kristal anhedral-subhedral, inequigranular dengan kristal

sedang-kasar. Mineral primer terdiri dari plagioklas, kuarsa, feldspar, dengan mineral ubahan serisit, smektit, kuarsa, klorit, dan opak. Berdasarkan klasifikasi QAPF (Streckeisen, 1978), sampel ini adalah dasit (Gambar 8).



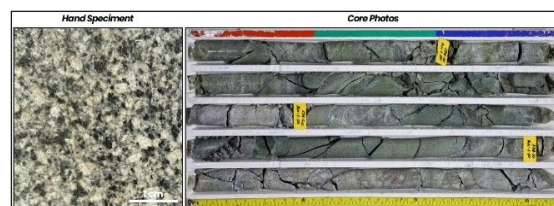
**Gambar 8.** Fotomikrograf sayatan tipis sampel dasit fase 1 (R-056), PPL (kiri), XPL (kanan), Ser: serisit; Sm: smektit; Qz: kuarsa; Chl: klorit; Plg: plagioklas; Fls: feldspar dan Op: opak

#### Satuan Diorit

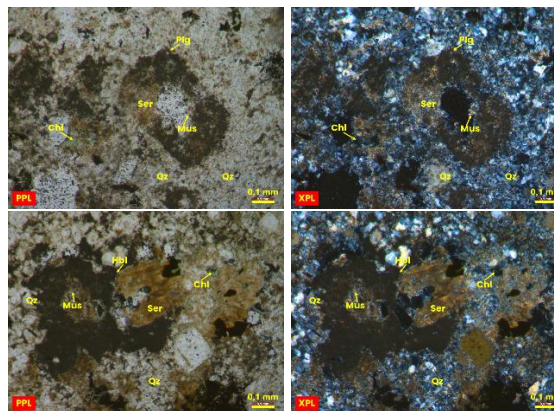
Diorit terbentuk sebelum masa porfiri, berperan sebagai pluton prekursor, menjadi dasar atau pemicu bagi aktivitas magmatik berikutnya, Diorit merupakan bagian dari Batuan Intrusi berumur Miosin (Achdan dan Bachri, 1993). Diorit dijumpai pada lubang bor R-66 (108,3 – 245,2 m), R-67 (170,2 – 328,2 m), dan R-68 (187 – 272 m dan 289,6 – 321,2 m). Batuan koheren, masif, tekstur porfiritik-faneritik, granularitas sedang-kasar (1->5mm), holokristalin, inequigranular terdiri dari kristal sedang-kasar (hornblend-plagioklas-kuarsa), bentuk kristal euhedral-subhedral (Gambar 9).

Pengamatan petrografi sampel R4-67, holokristalin, granulitas (1->5mm), tekstur porfiritik-faneritik, kristal anhedra-subhedral, inequigranular berbutir sedang-kasar. Mineral primer meliputi plagioklas, hornblend, kuarsa, feldspar, dengan mineral ubahan serisit, kuarsa sekunder, muskovit, klorit dan opak (Gambar 10). Berdasarkan klasifikasi QAPF

(Streckeisen, 1976), sampel ini adalah diorit.



**Gambar 9.** Kenampakan Diorit pada inti pengeboran R-67 (274,48 – 279,1 m)



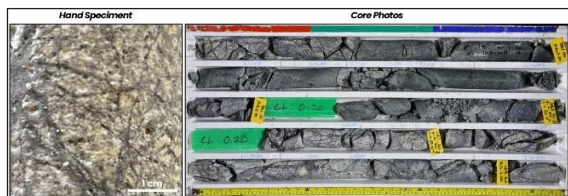
**Gambar 10.** Fotomikrograf sayatan tipis sampel diorit (R4-067), PPL (kiri), XPL (kanan), Ser: serisit; Qz: kuarsa; Mus: muskovit; Chl: klorit; Plg: plagioklas; Hbl: hornblend dan Op: opak

#### Satuan Diorit Kuarsa

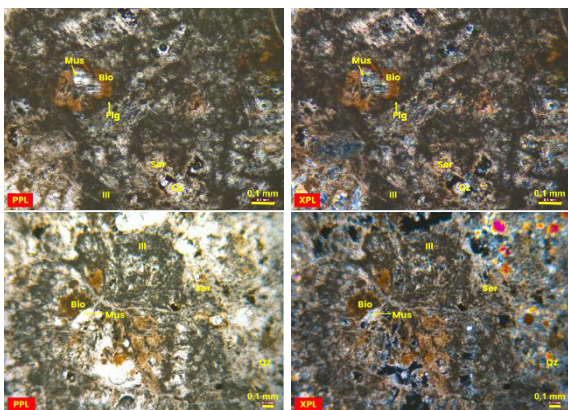
Diorit kuarsa ini membawa mineralisasi di daerah penelitian, Diorit kuarsa merupakan bagian dari Batuan Intrusi berumur Miosin (Achdan dan Bachri, 1993). Batuan koheren, masif, tekstur porfiritik-faneritik, granularitas sedang-kasar (1->5mm), holokristalin, inequigranular terdiri dari kristal sedang-kasar (hornblend-plagioklas-kuarsa), bentuk kristal euhedral-subhedral, terdapat *stockwork* yang berkembang intensif (Gambar 11). Diorit kuarsa dijumpai pada inti bor R-65 (131,3 – 194,8 m), R-66 (63,3 – 108,3 m), R-67 (328,2 – 400 m), dan R-68 (272 – 284 m).

Pengamatan petrografi sampel R5-67, holokristalin, granularitas sedang-kasar (1->5 mm), tekstur porfiritik-fanerik, kristal euhedral-subhedral, inequigranular, Mineral primer terdiri dari plagioklas, hornblend, kuarsa, dengan mineral ubahan serisit, kuarsa, muskovit, klorit, biotit

sekunder, illit dan opak. Terdapat mikrofraktur terisi kuarsa dan opak. Berdasarkan klasifikasi QAPF (Streckeisen, 1976), sampel ini adalah diorit kuarsa (Gambar 12).



**Gambar 11.** Kenampakan Diorit Kuarsa pada inti pengeboran R-67 (360 – 364,72 m)



**Gambar 12.** Fotomikrograf sayatan tipis sampel Diorit Kuarsa (R5-067), PPL (kiri), XPL (kanan), Ser: serisit; Qz: kuarsa; Mus: muskovit; Chl: klorit; Bio: biotit sekunder; Ill: illit; Plg: plagioklas dan Op: opak

### Satuan Dasit Fase 2

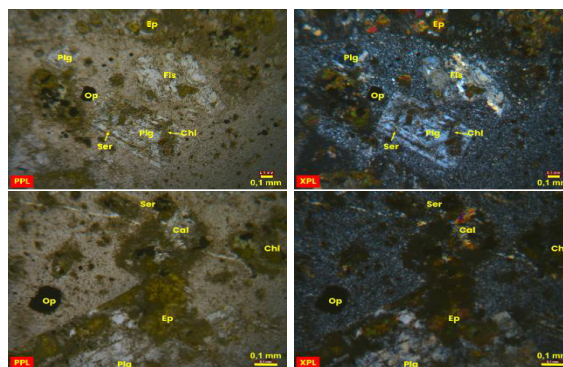
Dasit terbentuk setelah masa porfiri pada kedalaman menengah, pada zona transisi antara lingkungan plutonik, dan vulkanik, sering disebut dengan dasit hipabisal, bagian dari Batuan Intrusi berumur Miosin (Achdan dan Bachri, 1993). Dasit fase 2 dijumpai pada lubang bor R-56 (102 – 215,7 m). Batuan koheren, masif, tekstur porfiritik-faneritik, granularitas sedang-kasar (1->5mm), holokristalin, bentuk kristal euhedral-subhedral, inequigranular terdiri dari kristal sedang-kasar(plagioklas-hornblend-kuarsa) (Gambar 13).

Pengamatan petrografi sampel R2-68, hipokristalin, granulitas (<1-5mm), tekstur porfiritik-faneritik, kristal anhedral-

subhedral, inequigranular dengan kristal halus-sedang, massa dasar kristal dan gelas lebih kecil. Mineral primer terdiri dari plagioklas, kuarsa, feldspar, dengan mineral ubahan epidot, klorit, kuarsa, serisit, kalsit, magnetit, dan opak (Gambar 14). Berdasarkan klasifikasi QAPF batuan vulkanik (Streckeisen, 1978), adalah dasit.



**Gambar 13.** Kenampakan Dasit fase 2 pada inti pengeboran R-56 (101,95 – 105,05 m)

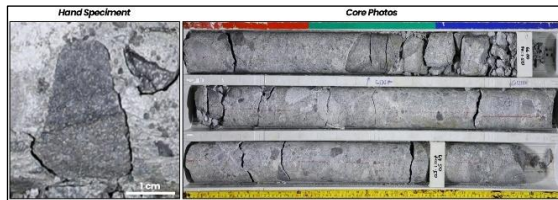


**Gambar 14,** Fotomikrograf sayatan tipis sampel Dasit fase 2 (R2-068), PPL (kiri), XPL (kanan), Ep: epidot; Chl: klorit; Ser: serisit; Cal: kalsit; Mt: magnetit; Plg: Plagioklas; Fls: feldspar dan Op: opak

### Satuan Breksi Freatomagmatik

Breksi ini terbentuk setelah masa porfiri, yang kemungkinan terbentuk akibat interaksi freatomagmatik eksplosif antara magma dan air, menandai fase aktivitas vulkanik yang lebih violent (vulkanik eksplosif), Breksi ini memiliki umur 2,7 juta tahun atau sekitar Pliosen Akhir (Harrison,, 2017). Batuan klastik, masif, memiliki fragmen berukuran 0,5-2 cm, pemilahan buruk, kebundaran angular-subangular, kemas terbuka, didukung oleh matriks, polimik yang terdiri dari lapili/*juvenile*, batupasir, dasit 1, diorit, dan diorit kuarsa (Gambar 15). Breksi freatomagmatik dijumpai pada lubang bor R-65 (0 – 41,3 m, 65 – 131,3 m, dan 194,8 – 319,4 m), R-66

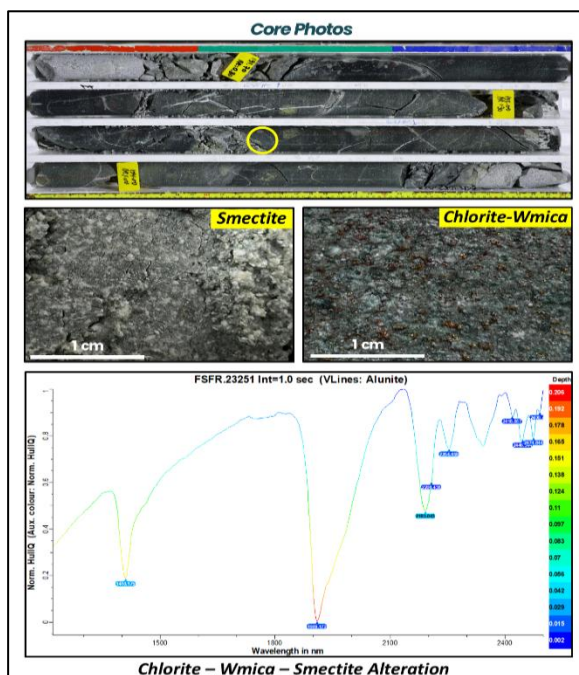
(273,6 – 392,4 m), R-67 (80 – 92,3 m, 96,6 – 145,2 m, dan 156 – 170,2 m), dan R-70 (115 – 158 m).



**Gambar 15.** Kenampakan Breksi pada inti pengeboran R-65 (65,3 – 67,8 m)

### Alterasi Batuan

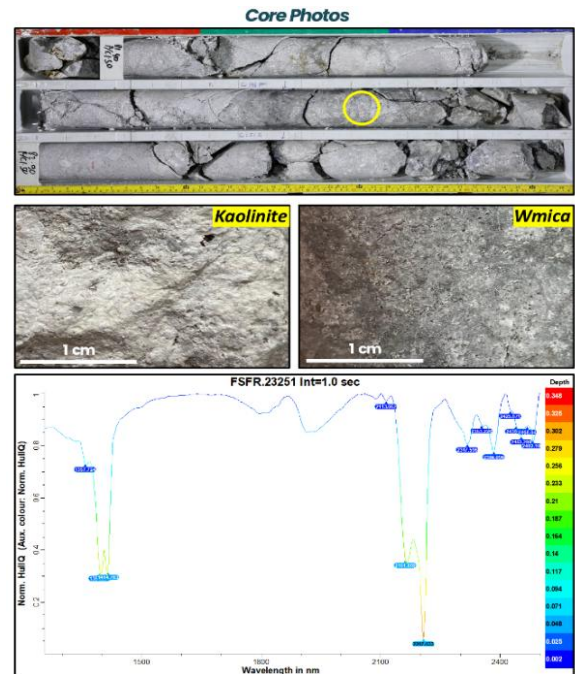
Jenis mineral alterasi yang terdapat dalam sampel batuan dari lubang pengeboran ditentukan menggunakan analisis ASD, XRD dan petrografi.



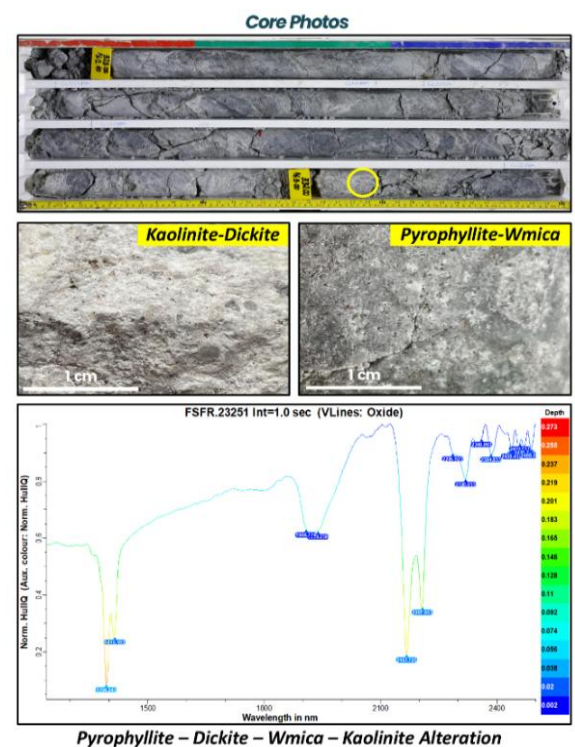
**Gambar 16.** Hasil analisis ASD sampel pengeboran R-56, kedalaman 193,40 meter

Analisis ASD untuk mengidentifikasi mineral berdasarkan karakteristik spektral unik yang dimiliki setiap mineral pada panjang gelombang tertentu VNIR/SWIR, mengacu pada (Hauff, 2005). Analisis ASD menunjukkan himpunan mineral alterasi klorit-mika putih-smektit (Gambar 16), kaolinit-mika putih (Gambar 17), pirofilit-kaolinit-mika putih-kaolinit (Gambar 18),

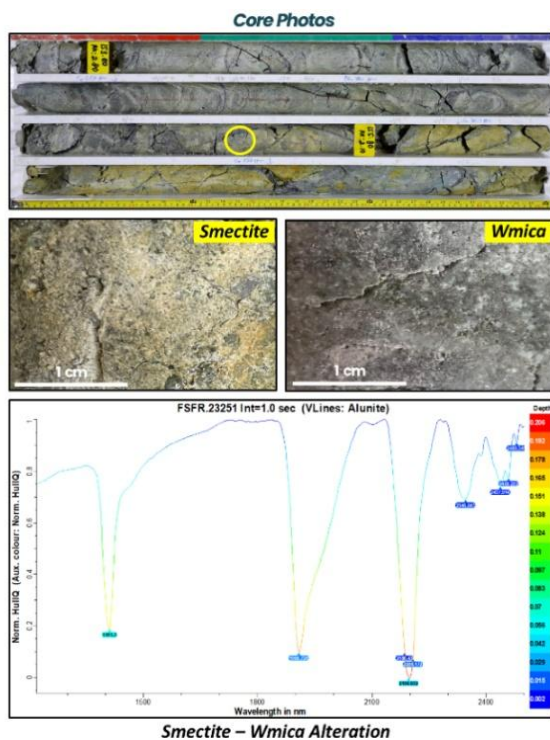
mineral smektit-mika putih (Gambar 19), dan mineral alunit-pirofilit-dikit-mika putih-klorit (Gambar 20).



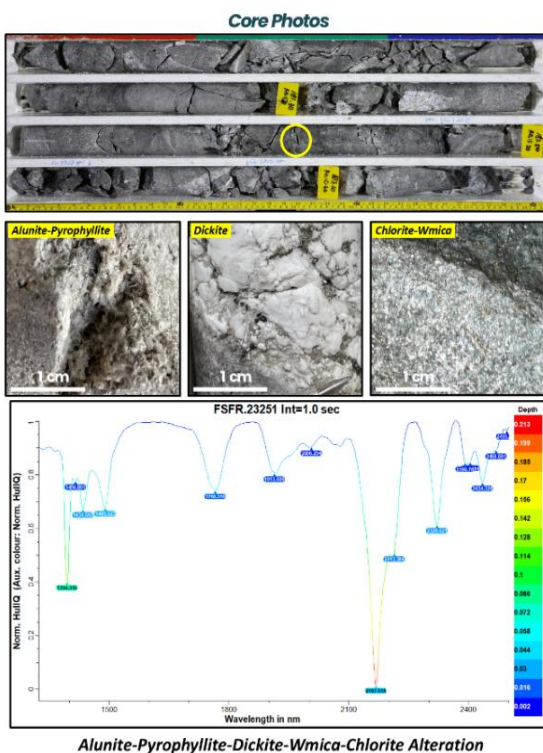
**Gambar 17.** Hasil analisis ASD sampel pengeboran R-70, kedalaman 82,62 meter



**Gambar 18.** Hasil analisis ASD sampel pengeboran R-66, kedalaman 332,90 meter

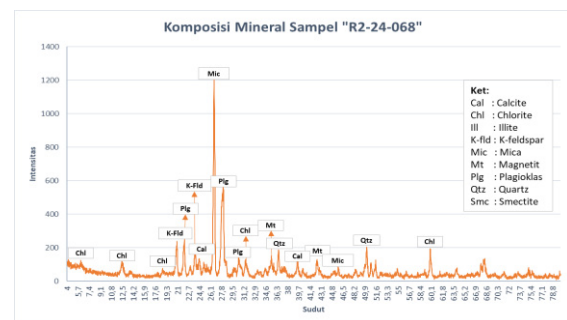


**Gambar 19.** Hasil analisis ASD sampel pengeboran R-65, kedalaman 155,70 meter

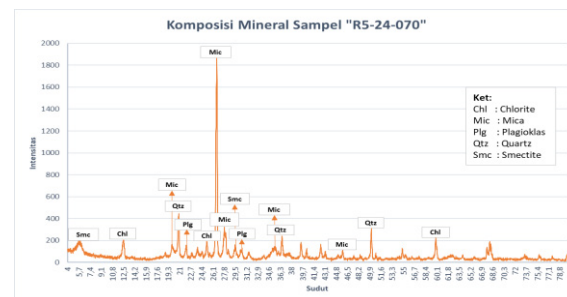


**Gambar 20.** Hasil analisis ASD sampel pengeboran R-67, kedalaman 178,00 meter

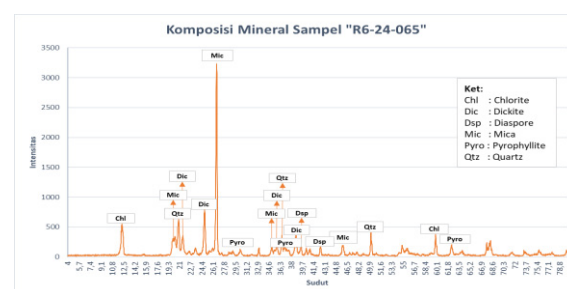
Analisis XRD mengacu pada referensi Chen, P, Y, (1977). Hasil analisis pada sampel R2-68, teridentifikasi mineral kalsit, klorit, illit, K-feldspar, mika, magnetit, plagioklas, kuarsa, dan smektit (Gambar 21). Pada sampel R5-70, teridentifikasi klorit, mika, plagioklas, kuarsa, dan smektit (Gambar 22). Pada sampel R6-65, teridentifikasi mineral klorit, dikit, diaspor, mika, piropilit, dan kuarsa (Gambar 23). Pada sampel R7-67, teridentifikasi mineral alunit, biotit, klorit, diaspor, k-feldspar, mika, pirit, piropilit, dan kuarsa (Gambar 24). Sedangkan pada sampel R12-065 mengandung mineral diaspor, illit, kaolinit, mika, dan kuarsa (Gambar 25).



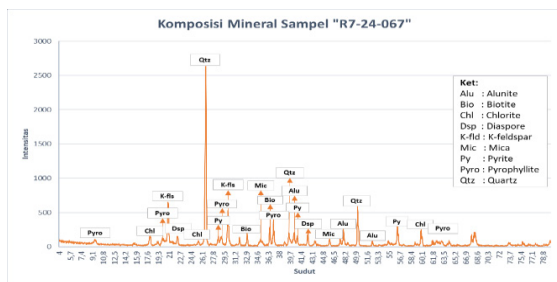
**Gambar 21.** Hasil analisis XRD sampel R2-68 (89,50-89,60 m)



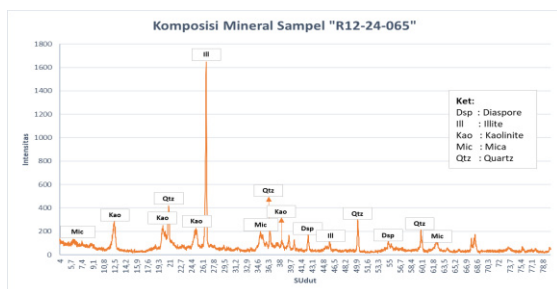
**Gambar 22.** Hasil analisis XRD sampel R5-70 (275,53-275,60 m)



**Gambar 23.** Hasil analisis XRD sampel R6-65 (70,50-70,60 m)



**Gambar 24.** Hasil analisis XRD sampel R7-67 (189,45-189,55 m)



**Gambar 25.** Hasil analisis XRD sampel R12-65 (150,55-150-60 m)

Dari hasil analisis ASD, XRD dan petrografi dijumpai lima tipe alterasi berdasarkan klasifikasi Corbett dan Leach (1997) yaitu: **Zona overprint** (Gambar 20 dan 24), yang dicirikan oleh mineral asam dan netral yaitu alunit, dikit, smektit, klorit, epidot, dan kalsit, pada lubang pengeboran R-67 (0 – 61,21 m dan 172,81 – 241,93 m). **Zona argilik lanjut** (Gambar 18 dan 23), yang dicirikan oleh mineral alunit, pirofilit, dikit, dan kaolinit, pada lubang pengeboran R-65 (71,95 – 111,6 m dan 303,85 – 319,4 m), R-66 (199,24 – 209,72 m dan 321,42 – 391,53 m), R-67 (95,73 – 118,6, 166,45 – 172,81, dan 373,13 – 400 m), R-68 (0-8,8 m, 178,33 – 198,36, dan 262,23 – 273,8 m), dan R-70 (83,3 – 111,2). **Zona argilik** (Gambar 17 dan 25), yang dicirikan oleh mineral kaolinit, illit, dan smektit, pada lubang bor R-56 (0 – 38,46 m), R-65 (33,35 – 156,72 m dan 201,85 – 231,32 m), R66 (0 – 15,5, 34,33 – 182,84 m, 242,41 – 261,64 m, 275,12 – 286,3 m, dan 301,6 – 320,81 m), R-67 (128,22 – 166,45 m dan 279,72 m – 373,13 m), R-68 (198,36 – 213,85 m dan 249,12 – 262,23 m), dan R-70 (0 – 83,3 m). **Zona filik** (Gambar 19 dan

21) yang dicirikan oleh mika±smektit±klorit± kalsit, pada lubang bor R-056 (50,3 – 86,6 m), R-65 (0 – 33,35 m, 156,72 – 201,85 m), R-66 (15,5 – 34,33 m), R-67 (250,65 – 251,32 m), R-68 (274,08 – 291,48 m). **Zona propilitik** (Gambar 16 dan 22) yang dicirikan oleh klorit-mika-smektit±epidot±kalsit, pada lubang bor R-56 (38,46 – 50,3 m, 86,6 – 215,7 m), R-65 (231,32 – 303,85 m), R-66 (182,84 – 199,24 m, 209,72 – 242,41 m, 261,64 – 275,12 m), 286,3 - 301,6 m), dan (391,53 – 400,6 m).

### Mineralisasi

Hasil pengamatan secara rinci mineralisasi sulfida berasosiasi dengan urat kuarsa yang berkembang didaerah penelitian. Klasifikasi tipe urat pada sistem porfiri dikemukakan oleh beberapa ahli seperti: (Gustafson dan Hunt, 1975; Corbett, 2008; dalam Sillitoe, 2010), Sebagian besar mineralisasi berkaitan dengan kehadiran urat kuarsa yang saling berpotongan membentuk *stockwork*.

Tipe urat A (kuarsa±magnetit±pirit± kalkopirit), masif-granular, bentuk tidak teratur, tidak menerus, bergelombang, biasanya kuarsa transparan masif, *stockwork*, terkadang terisi pirit±kalkopirit± bornit dan magnetit hadir tersebar diurat (Gambar 26).



**Gambar 26.** Kenampakan urat tipe A dalam batuan diorit kuarsa

Pada urat tipe AB (kuarsa-bornit-kalkopirit), peralihan antara tipe A dan B, batas dengan batuan sampling masih terlihat, bergelombang, kehadiran bornit dan kalkopirit di tengah urat kuarsa, membentuk garis putus (*center line*) (Gambar 27).



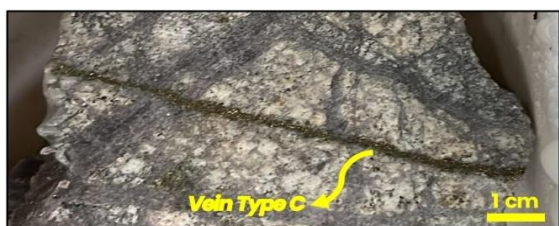
**Gambar 27.** Kenampakan urat tipe AB dalam batupasir

Urat tipe B (kuarsa-kalkopirit-bornit), batas tegas dan jelas terhadap batuan sampling, *center line* menerus ditempati oleh mineral kalkopirit, bornit, dan sedikit pirit (Gambar 28).



**Gambar 28.** Kenampakan urat tipe B dalam batuan diorit kuarsa

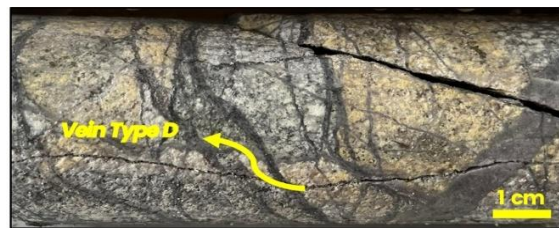
Tipe urat C (kalkopirit±kuarsa), terisi kalkopirit dominan, sedikit kuarsa, batas tegas dengan batuan sampingnya, umumnya berukuran kecil (Gambar 29).



**Gambar 29.** Kenampakan urat tipe C dalam batuan diorit kuarsa

Urat tipe D (pirit±kuarsa), kehadiran kuarsa dengan mineral pirit yang mendominasi atau keseluruhan dengan sedikit kuarsa, biasanya pembentukan *salvage* atau *halos* (serisit) pada tepi urat (Gambar 30).

Sedangkan urat tipe M (magnetit±kuarsa), terdapat mineral magnetit dan biasanya terdapat sedikit kuarsa (Gambar 31), Magnetit hadir dalam tersebar (*disseminated*) atau *veinlets*, berasosiasi dengan urat tipe A.

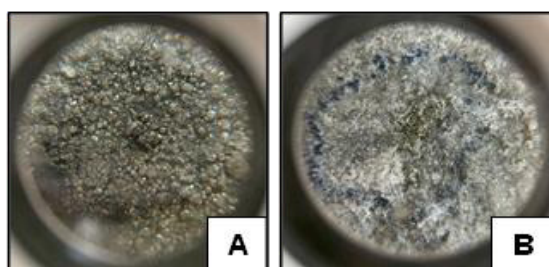


**Gambar 30.** Kenampakan urat tipe D dalam batuan diorit kuarsa

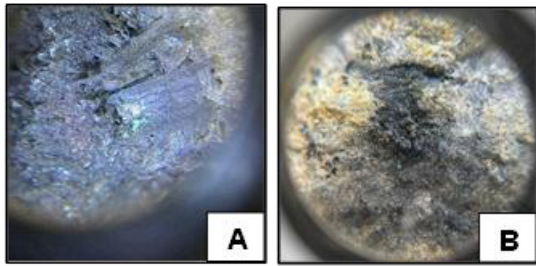


**Gambar 31.** Kenampakan urat tipe M dalam batuan diorit kuarsa

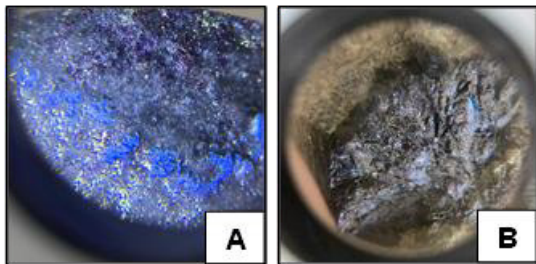
Dari hasil pengamatan inti pengeboran mineralisasi sulfida yang dijumpai berupa pirit mengandung Fe>15% yang tersebar hampir di seluruh batuan teralterasi dan kalkopirit mengandung Cu 0,8617% dari analisis XRF (Gambar 32), kenampakan enargit dengan kandungan Cu>10%, As 1,29% dari analisis XRF dan kalkosit dengan kandungan Cu 4,60% dari analisis XRF (Gambar 33), yang banyak dijumpai tersebar dan mengisi *vuggy* pada batuan dengan alterasi argilik-argilik lanjut, pada kedalaman dekat dengan permukaan (<150 meter). Mineral bornit mengandung Cu>10% dan kovelit mengandung Cu>10% dari analisis XRF (Gambar 34). Mineral kalkopirit, bornit dan kovelit banyak dijumpai tersebar, umumnya mengisi urat-urat yang membentuk *stockwork* dengan alterasi filik, kedalaman relatif dalam (>150 meter).



**Gambar 32.** Kenampakan mineral pirit (A) dan kalkopirit (B) dalam pembesaran 10X

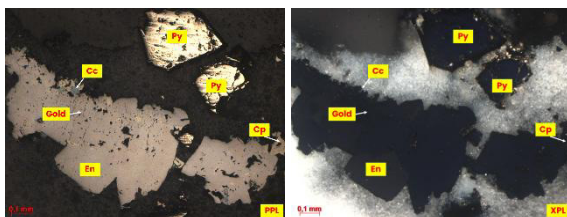


**Gambar 33.** Kenampakan mineral enargit (A) dan kalkosit (B) dalam pembesaran 20X



**Gambar 34.** Kenampakan mineral bornit (A) dan kovelit (B) dalam pembesaran 20X

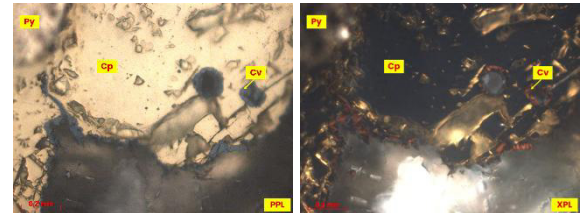
Hasil analisis mineragrafi memperlihatkan mineral pirit, enargit menggantikan kalkopirit, kalkosit menggantikan sedikit enargit dan emas (Au) tertanam pada mineral enargit (Gambar 35). Mineral pirit dan kalkopirit tumbuh bersama tertanam pada urat kuarsa dan sebagian kalkopirit tergantikan oleh mineral kovelit (Gambar 36). Mineral bornit (Gambar 37) tertanam pada urat kuarsa, dan kovelit menggantikan sebagian bornit (Parcejus. B, 2015, dan Uytenbogaardt, 1971).



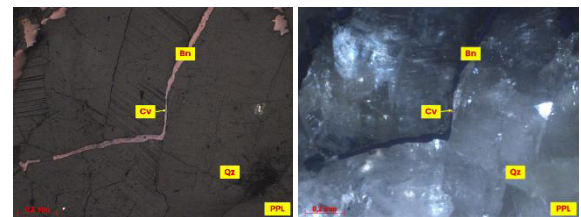
**Gambar 35.** Fotomikrograf sayatan poles sampel R7-67 (70,50-70,60m), PPL (kiri), XPL (kanan), En: Enargit; Cc: kalkosit; Cp: kalkopirit; Py: pirit dan Gold: emas.

Berdasarkan analisis sayatan poles dapat menggambarkan dua episode aktivitas hidrotermal yang berbeda. Fase awal sistem didominasi oleh larutan hidrotermal yang menghasilkan sulfidasi menengah (kuarsa-bornit-kalkopirit-pirit) tertanam

pada urat kuarsa. Fase berikutnya sistem sulfidasi asam (enargit dan emas terkonsentrasi di dalamnya) menggantikan mineralisasi yang telah ada sebelumnya. Fase akhir terjadi perubahan komposisi fluida dan penurunan temperatur terbentuk mineral kovelit dan kalkosit yang menggantikan mineral sebelumnya.



**Gambar 36.** Fotomikrograf sayatan poles sampel R10-67 (359,36-359,46m), PPL (kiri), XPL (kanan), Cp: kalkopirit; Cv: kovelit dan Py: pirit



**Gambar 37.** Fotomikrograf sayatan poles sampel R11-67 (363,4-363,5m), PPL (kiri), XPL (kanan), Bn: bornit; Cv: kovelit dan Qz: kuarsa

## PEMBAHASAN

### Geologi, Alterasi dan Mineralisasi

Berdasarkan pengamatan inti pengeboran litologi yang menyusun daerah penelitian yang mengikuti penamaan susunan batuan/ litostratigrafi tidak resmi (SSI, 1996), terdiri atas enam satuan batuan berurutan dari tertua hingga termuda, yaitu batupasir, dasit fase 1, diorit, diorit kuarsa, dasit fase 2, dan breksi freatomagmatik.

Zona alterasi yang berkembang dapat diklasifikasikan dalam lima jenis alterasi (Corbett dan Leach, 1997), **Zona overprint** (alunit-klorit-mika-smektit±pirofilit ±biotit±k-feldspar) pada lubang pengeboran R-67 kedalaman 0-59,36 m, berdasarkan hasil analisis petrografi (Gambar 12), ASD (Gambar 20) dan X-RD (Gambar 24) terdapat jejak mineral biotit dan K-feldspar

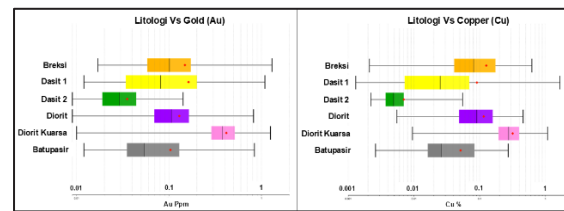
yang menunjukkan bahwa sebelumnya merupakan zona potasik, kemudian hidrotermal bersifat asam mengubah kembali zona potasik yang terbentuk sebelumnya, Kondisi tersebut menunjukkan indikasi zona *overprint*. **Zona argilik lanjut** (pirofilit-mika-dikit-diaspor) ditemukan pada lubang pengeboran R-66 pada kedalaman 321-390 m. **Zona argilik** (kaolinit-mika±illit±diaspor) ditemukan pada lubang pengeboran R-70 kedalaman 0-121 m. **Zona filik** (serisit/mika-smektit±klorit± kalsit) pada lubang pengeboran R-56 kedalaman 50-88 m. **Zona propilitik** (klorit-mika-smektit±epidot±kalsit) pada lubang pengeboran R-56 kedalaman 110-215 m.

Mineralisasi di daerah penelitian terbagi menjadi dua zona yaitu Zona dangkal (<150 m) didominasi oleh mineral pirit, enargit, dan kalkosit yang tersebar dalam bentuk massif, *vein-veinlet* dan mengisi *vuggy*, Zona lebih dalam (>150 m) didominasi oleh mineral kalkopirit, bornit, pirit, dan kovelit yang mengisi urat-urat berpotongan membentuk *stockwork* dan tersebar dalam batuan (Hedenquist, 2000).

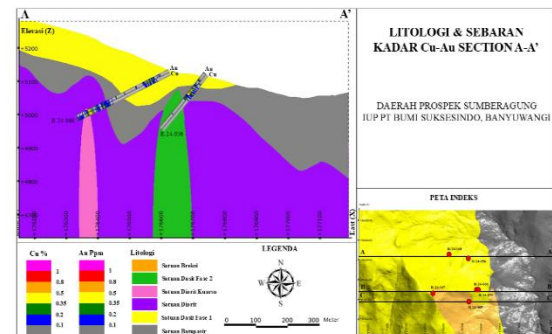
### Hubungan Satuan Batuan dan Sebaran Kadar Cu-Au

Proses zonasi Cu-Au menggunakan data MEG dari sampel inti pengeboran, diambil dengan interval 2 meter pada batuan inti, Sampel yang dianalisa mulai dari permukaan sampai *end of hole* (EOH) dengan total 6 lubang pengeboran.

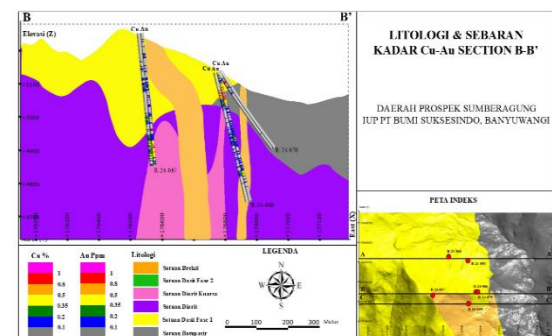
Berdasarkan analisis diagram *boxplot* menunjukkan kandungan emas (Au) dan tembaga (Cu) berkorelasi kuat dengan litologi diorit kuarsa, sedangkan dengan dasit fase 2 berkorelasi sangat lemah (Gambar 38). Jika melihat dari penampang, dasit fase 2 memiliki kadar Cu-Au yang sangat rendah, karena dasit ini terbentuk setelah fase mineralisasi porfiri berlangsung (Gambar 39). Diorit kuarsa berperan sebagai batuan intrusi pembawa mineralisasi Cu-Au yang signifikan (Gambar 40, 41 dan 44).



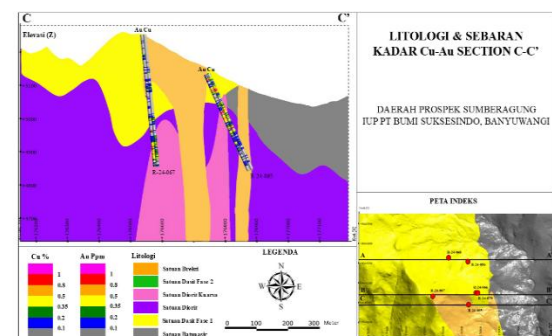
**Gambar 38.** *Boxplot* litologi vs Au (kiri) & litologi vs Cu (kanan)



**Gambar 39.** Litologi & sebaran kadar Cu-Au pada penampang A-A'



**Gambar 40.** Litologi & sebaran kadar Cu-Au pada penampang B-B'

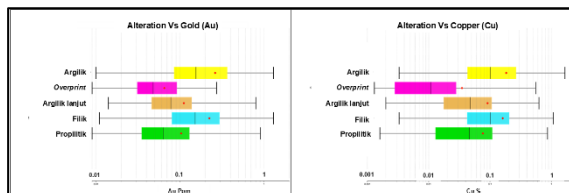


**Gambar 41.** Litologi & sebaran kadar Cu-Au pada penampang C-C'

### Hubungan Alterasi dan Kadar Cu-Au

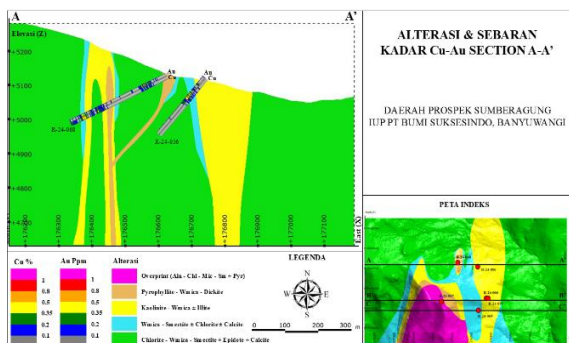
Berdasarkan analisis *boxplot* kadar Cu-Au berhubungan kuat dengan alterasi tipe argilik (kaolinit-mika±illit±diaspor) dan tipe

filik (serisit/mika-smektit±klorit±kalsit). Sedangkan zona *overprint* (alunit-klorit-mika-smektit±pirofilit±biotit±k-feldspar) memiliki hubungan yang lemah (Gambar 42).

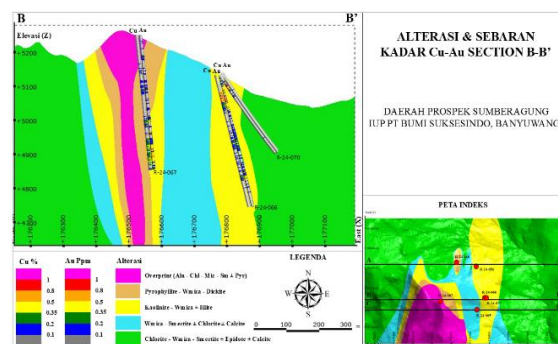


**Gambar 42.** Boxplot alterasi vs Au (kiri) & alterasi vs Cu (kanan)

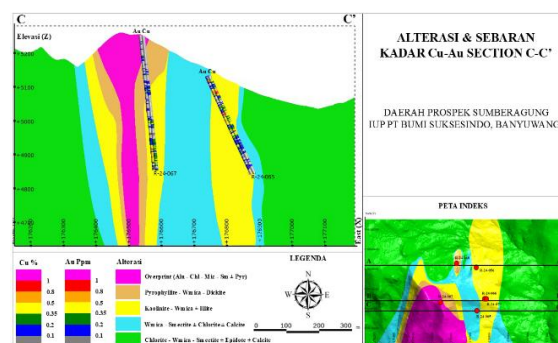
Jika melihat pada penampang A,B dan C, kadar Cu-Au yang tinggi hampir tersebar pada seluruh zona alterasi. Tetapi pada alterasi propilitik paling luar, kadar Cu-Au cenderung menurun dan tidak menunjukkan kadar tinggi (Gambar 43 dan 44). Alterasi argilik dan filik memiliki kadar Cu-Au yang signifikan. Akan tetapi pada zona *overprint*, memiliki kadar Cu-Au yang sangat rendah. Proses *overprinting* ini justru menurunkan kadar Cu-Au (Gambar 45 dan 46). Larutan dengan pH sangat rendah memiliki daya larut yang tinggi terhadap mineral sulfida primer seperti kalkopirit dan bornit yang telah terbentuk pada tahap alterasi potasik sebelumnya. Perubahan lingkungan dari kondisi netral-basa ke kondisi sangat asam menyebabkan mineral-mineral tersebut menjadi tidak stabil dan terlarut kembali. tembaga dan emas menjadi sangat mobil dan mudah bermigrasi keluar dari zona yang mengalami *overprinting*.



**Gambar 43.** Alterasi & sebaran kadar Cu-Au pada penampang A-A'



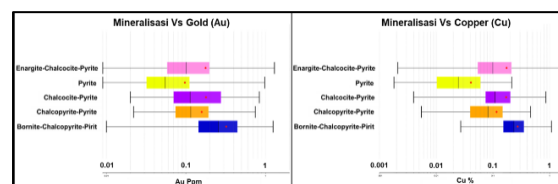
**Gambar 44.** Alterasi & sebaran kadar Cu pada penampang B-B'



**Gambar 45.** Alterasi & sebaran kadar Cu pada penampang C-C'

### Hubungan Mineralisasi dan Kadar Cu-Au

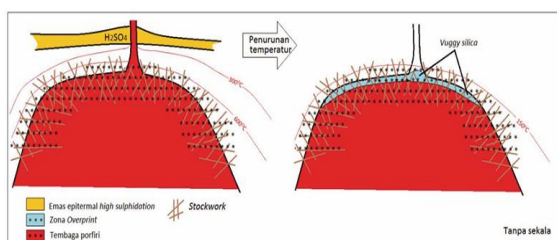
Visualisasi *boxplot* menunjukkan variasi signifikan kandungan Cu dan Au pada tiap asosiasi mineral. Bornit-kalkopirit-pirit berhubungan kuat memiliki kandungan tertinggi (rata-rata 0,273% Cu dan 0,322 ppm Au), dengan kisaran hingga 1% Cu dan 1 ppm Au. Enargit-kalkosit-pirit dan kalkosit-pirit menunjukkan (rata-rata 0,177 ppm Au dan 0,174% Cu) dengan kisaran mendekati 1% Cu dan 1 ppm Au. Kalkopirit-pirit memiliki nilai lebih rendah (rata-rata 0,158 ppm Au dan 0,116% Cu). Sedangkan pirit tanpa mineral Cu menunjukkan hubungan yang lemah dengan kadar terendah (rata-rata 0,097 ppm Au dan 0,041% Cu) (Gambar 46).



**Gambar 46.** Boxplot mineralisasi vs Au (kiri) & mineralisasi vs Cu (kanan)

### Tipe Endapan

Prospek daerah penelitian menunjukkan adanya *overprinting*, berdasarkan data yang dikumpulkan meliputi karakteristik alterasi dan mineralisasi. Terdapat dua tipe endapan yaitu porfiri Cu-Au dan emas epitermal sulfidasi tinggi. Hasil interpretasi karakteristik epitermal sulfidasi tinggi dijumpai pada kedalaman dangkal (<150 meter) dan porfiri Cu-Au yang terkait erat dengan intrusi batuan diorit kuarsa yang lebih dalam (>150 meter). Pembentukan zona *overprint*, ketika bijih tembaga porfiri yang terbentuk pada suhu >600°C mengalami pendinginan magma hingga <300°C, kemudian berubah kembali akibat aktivitas hidrotermal dalam lingkungan asam sulfat pada suhu <300°C (Suprpto, 2018) (Gambar 47).



**Gambar 47.** Diagram overprint, endapan epitermal sulfidasi tinggi dan endapan porfiri (Suprpto, 2018).

### KESIMPULAN

Litologi yang menyusun daerah penelitian terdiri satuan batuan dari tua ke muda yaitu; batupasir, dasit fase 1, diorit, diorit kuarsa, dasit fase 2, dan breksi freatomagmatik, Zona alterasi yang berkembang yaitu; Zona *overprint* (alunit-klorit-mika-smektit±pirofilit±biotit±kfeldspar), Zona argilik lanjut (pirofilit-mika-dikit-diaspor), Zona argilik (kaolinit-mika±illit±diaspor), Zona filik (serisit/mika-smektit±klorit±kalsit) dan Zona propilitik (klorit-mika-smektit±epidot±kalsit).

Mineralisasi sulfida yang dijumpai berupa mineral pirit, kalkosit, enargit, dan kalkopirit, ditemukan dalam bentuk tersebar, masif dan urat yang hadir pada kedalaman dangkal (<150 m) dengan kadar Au 0,1 ppm s.d, >1 ppm, dan Cu

<0,1% s.d, 0,5%. Kehadiran mineral pirit, kalkopirit, bornit, dan kovelit, ditemukan berupa urat-urat kuarsa yang intensif saling berpotongan (*stockwork*) hadir pada kedalaman >150 m, dengan kadar Au 0,5 ppm s.d, >1 ppm, dan Cu 0,3% s.d, >1%. Tipe endapan bijih, berdasarkan aspek geologi, alterasi dan mineralisasi, yaitu Porfiri Cu-Au di-*overprint* oleh epitermal sulfidasi tinggi.

Zona sebaran kadar Cu dengan Au memiliki pola yang mirip, yakni dikontrol oleh kemunculan intrusi diorit kuarsa, berhubungan dengan alterasi tipe argilik dan tipe filik. Sedangkan mineralisasi yang berhubungan kuat adalah himpunan mineral bornit-kalkopirit-pirit, enargit-kalkosit-pirit dan yang memiliki hubungan lemah yaitu mineral pirit tanpa Cu.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Bumi Suksesindo yang memberikan izin untuk melakukan penelitian dan memublikasikan hasil penelitian, kepada Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang memberikan preparasi dan analisis sampel, serta kepada Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung yang telah memberikan dukungan dalam penulisan karya ilmiah ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Achdan, A.Bachri, S.. (1993). Peta Geologi Lembar Blambangan, Jawa Timur.
- Adams, A. E., Mackenzie, W. S., & Guildford, C. (1984). *Atlas of sedimentary rocks under the microscope*. Longman.
- Chen, P.Y., 1977, *Table of Key Lines in X-Ray Diffraction Patterns of Minerals in Clay and Associated Rocks: Indiana*, Geological Survey Occasional paper 21, Departmen of Natural Resources, p. 11-39.
- Corbett, G. 2013. World Gold: *Pacific Rim Epithermal Au-Ag*. World Gold.

- Corbett, G. J., & Leach, T. M. 1997. *Short Course Manual: Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*. Chapter, 1, 12-21.
- Harrison, R. L., et al. (2018): *Geochronology of the Tumpangpitu porphyry Au-Cu Mo and high-sulfidation epithermal Au-Ag-Cu deposit: evidence for pre- and postmineralization diatremes in the Tujuh Bukit district, Southeast Java, Indonesia*, *Economic Geology*.
- Harrison, R.L., et al. (2017): *Geochronology of the Tumpangpitu porphyry gold-copper-molybdenum and high-sulfidation epithermal gold-silver-copper deposit - Evidence for pre and post-mineralization diatremes in the Tujuh Bukit district, Southeast Java, Indonesia: Economic Geology* (in press).
- Hauff, P.L., 2005. *Applied reflectance spectroscopy. Spectral International Incorporated, technical document to accompany spectral libraries and identification softwares*.
- Hellman, P.L. 2011. *"Tujuh Bukit Project Report on Mineral Resources, Technical Report for Interprid Mines Limited"*.
- Hellman, P. L. (2010). *Tujuh Bukit Project Report on Mineral Resources, Located in East Java, Indonesia*.
- Koesoemadinata, R. P. (2020). *An Introduction Into The Geology of Indonesia: Volume I (General Introduction and Part I Western Indonesia)*.
- MacKenzie W. S, A. E. Adams, and K. H. Brodie. 2017. *Rocks and Minerals in Thin Section*.
- Parcejus. B. 2015. *The Ore Minerals under The Microscope*. Second Edition. Elsevier, Amsterdam.
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary Rocks* (3rd ed.). New York: Harper & Row Publishing Co.
- Sillitoe, R. H. (2010). *Porphyry copper systems. Economic geology*.
- Streckeisen, A., 1978. *IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks*. Recommendations and suggestions. *Neues*
- Streckeisen, A. 1976. *To each plutonic rock its proper name*. *Earth-science reviews*, 12(1), 1-33.
- Suprpto, S. J., Murdohardono, D., Suparno, S., Abdurahman, O., & Subekti, A. T. (2018). *Alterasi dan Mineralisasi di Pulau Merah, Kecamatan Pesanggaran, Kabupaten Banyuwangi, Provinsi Jawa Timur*. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 13(2), 70-83.
- Thompson, A.J.B. dan Thompson, J.F.H., 1996, *Atlas of Alteration A Field And Petrographic Guide To Hydrothermal Alteration Minerals, Mineral Deposits Division*. Canada.
- Uytenbogaardt, W. dan Burke, E.A.J. 1971. *Table for the Microscopic Identification of Ore Minerals*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York
- Van Bemmelen, R. V. 1949. *The Geology of Indonesia. Vol. IA: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*. US Government Printing Office.
- Sinclair, W.D., 2007, *Porphyry deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 223-243*.

**KARAKTERISASI MANIFESTASI TERMAL MENGGUNAKAN METODE RASIO  
SALURAN, *LAND SURFACE TEMPERATURE*, DAN *NORMALIZED DIFFERENCE  
VEGETATION INDEX* DI LAPANGAN PANAS BUMI GUNUNG PAPANDAYAN,  
JAWA BARAT**

***CHARACTERIZATION OF THERMAL MANIFESTATION USING BAND RATIO, LAND  
SURFACE TEMPERATURE, AND NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX  
METHODS IN PAPANDAYAN MOUNTAIN GEOTHERMAL FIELD, WEST JAVA***

**Muhammad Satriyo<sup>1</sup>, Fadillah Azhar Deaudin Kurniawan<sup>2</sup>, Santia Ardi Mustofa<sup>1</sup>  
dan Tony Rahadinata<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Indonesia

<sup>2</sup>PT Geosensei Teknologi Indonesia

Email korespondensi: [msatriyo70@gmail.com](mailto:msatriyo70@gmail.com)

Diterima: 28 Oktober 2024; Direvisi: 13 Juni 2025; Disetujui: 30 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.515>

**ABSTRAK**

Daerah penelitian berada di Lapangan Panas Bumi Gunung Papandayan yang menarik untuk dikaji lebih lanjut dikarenakan adanya beberapa manifestasi termal yang dijumpai di permukaan. Akan tetapi, kajian penginderaan jauh secara terperinci yang disertai dengan validasi di lapangan belum pernah dilakukan di lapangan ini. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis penginderaan jauh yang lebih rinci untuk menggambarkan karakteristik manifestasi termal di lapangan yang dapat menjadi acuan untuk observasi langsung dan mendukung analisis dalam kajian geosain rinci. Analisis penginderaan jauh yang dilakukan adalah analisis visual citra, analisis temperatur permukaan, analisis cekaman vegetasi, dan analisis rasio *band*. Hasil kajian menunjukkan manifestasi termal dapat dijumpai di daerah Kawah Papandayan dan Tegal Alun. Keberadaan manifestasi dicirikan dengan adanya area yang memiliki sedikit hingga tidak adanya vegetasi pada pengamatan visual citra, anomali *land surface temperature* (LST) yang tinggi, dan nilai *normalized difference vegetation index* (NDVI) kurang dari 0,3. Sementara itu, mineral-mineral alterasi teridentifikasi dari analisis rasio *band* yang dilakukan.

**Kata kunci:** panas bumi, Gunung Papandayan, manifestasi termal, penginderaan jauh

**ABSTRACT**

*The research area is located in the Gunung Papandayan Geothermal Field, which is interesting to study further due to several thermal manifestations found on the surface. However, a detailed remote sensing study accompanied by field validation has never been conducted in this field. Thus, this study aims to conduct a more detailed remote sensing*

*analysis to describe the characteristics of thermal manifestations in the field that can be a reference for direct observation and support analysis in detailed geoscience studies. The remote sensing analysis performed is visual image analysis, surface temperature analysis, vegetation stress analysis, and band ratio analysis. The results showed that thermal manifestations can be found in the Papandayan Crater and Tegal Alun areas. The presence of manifestations is characterized by areas that have little to no vegetation in visual image observations, high land surface temperature (LST) anomalies, and normalized difference vegetation index (NDVI) values less than 0.3. Meanwhile, alteration minerals were identified from band ratio analyses conducted.*

**Keywords:** *geothermal, Mount Papandayan, geothermal manifestation, remote sensing*

## PENDAHULUAN

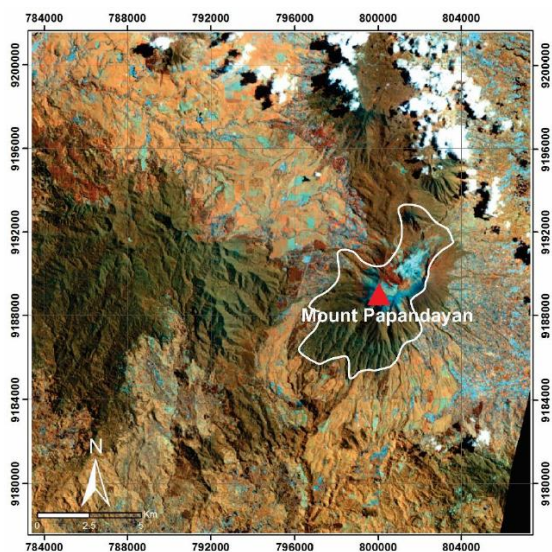
Lapangan Panas Bumi Gunung Papandayan ditandai oleh keberadaan gunung api strato dan beberapa pusat erupsi. Sistem panas bumi di area ini teridentifikasi melalui manifestasi termal di permukaan, termasuk danau kawah; solfatara; mata air panas dan hangat; tanah beruap; serta batuan-batuan teralterasi. Dengan demikian, daerah ini menjadi hal yang menarik untuk dikaji.

Observasi lapangan dan penginderaan jauh dapat digunakan untuk mengidentifikasi manifestasi ini. Akan tetapi, kajian penginderaan jauh secara terperinci yang disertai dengan validasi di lapangan belum pernah dilakukan. Beberapa peneliti sudah pernah melakukan beberapa kajian geosain lainnya secara tersendiri atau belum diintegrasikan. Mazot dkk. (2008) melakukan kajian mengenai evolusi kimia dari fluida termal di Gunung Papandayan. Sementara itu, kajian geofisika di lapangan ini pernah dilakukan oleh Nasution dkk. (2008). Nurohman dkk. (2016) menggunakan gas radon dan thoron untuk mengidentifikasi zona permeabel di lapangan ini.

Rizdiant dan Jhanesta (2021) serta Kurniawahidayati dkk. (2018) melakukan kajian penginderaan jauh untuk mengidentifikasi daerah yang berpotensi dijumpai manifestasi termal dan persebaran mineral alterasi di Lapangan Gunung Papandayan. Namun, kajian

tersebut bersifat regional dan kurang fokus pada area sekitar gunung. Selain itu, hasilnya belum divalidasi dengan observasi lapangan sehingga kajian tersebut dapat diperbaiki. Penelitian ini menggunakan analisis penginderaan jauh secara lebih rinci di lapangan panas bumi ini untuk mengidentifikasi karakteristik manifestasi termal. Metode yang digunakan adalah integrasi dari analisis rasio *band*, *land surface temperature* (LST), dan *normalized difference vegetation index* (NDVI). Analisis penginderaan jauh yang lebih rinci dapat digunakan untuk mengidentifikasi manifestasi termal, seperti solfatara, mata air panas, dan batuan teralterasi, di lapangan yang dapat menjadi acuan untuk observasi langsung dan mendukung analisis dalam kajian geosain rinci mengenai sistem panas bumi di lokasi ini. Dengan kajian ini, diharapkan survei lapangan atau survei panas bumi yang akan dilaksanakan dapat lebih terfokuskan dan lebih rinci.

Penelitian ini fokus mengkaji daerah yang didelineasi oleh Kurniawahidayati dkk. (2018) sebagai daerah yang memiliki prospek panas bumi dan berpotensi dijumpai manifestasi termal (**Gambar 1**). Daerah ini berada pada rentang koordinat 805277–796045 mU dan 9195000–9185136 mT dengan zona UTM 48S. Secara administratif, Gunung Papandayan terletak di perbatasan antara Kabupaten Garut dan Kabupaten Bandung, Jawa Barat (**Gambar 2**).



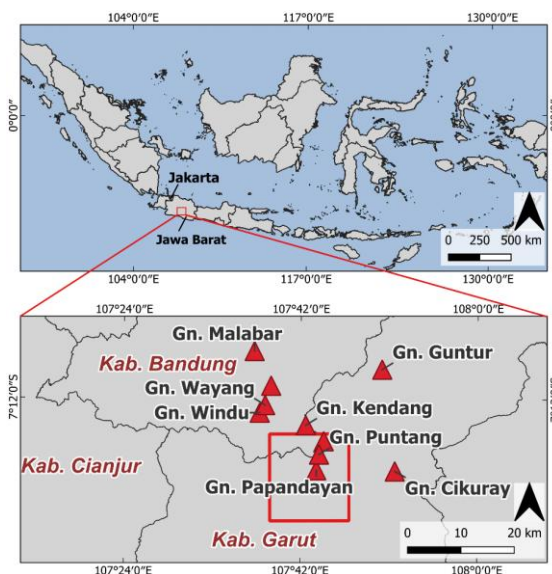
**Gambar 1.** Daerah yang berpotensi dijumpai manifestasi termal di Gunung Papandayan (Kurniawahidayati dkk., 2018)

## GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

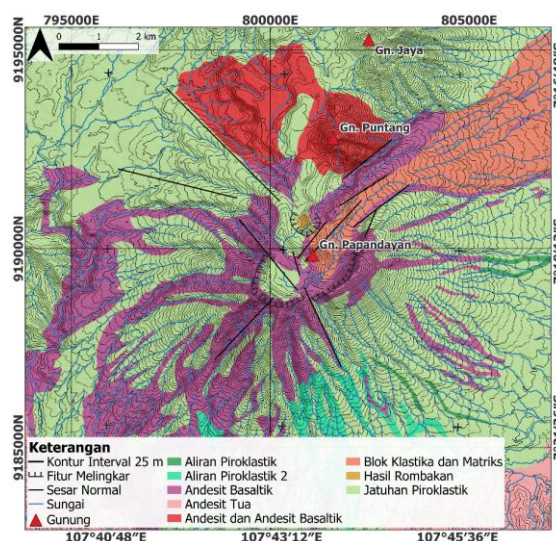
Berdasarkan analisis menggunakan data Citra Landsat 8, *digital elevation model* (DEM), dan Peta Geologi Lembar Garut-Pamengpeuk (Alzwar dkk., 1992), teridentifikasi adanya fitur melingkar dengan diameter sekitar 0,63 km yang diinterpretasikan sebagai kawah kecil serta bentuk setengah lingkaran yang merupakan sebagai batas kawah Gunung Papandayan (**Gambar 3**). Di sekitar kawah tersebut, terdapat dua struktur geologi yang ditandai dengan garis putih berorientasi barat daya–timur laut dengan jarak antara kedua struktur tersebut sekitar 0,8 km. Dua struktur tersebut memotong kawah Gunung Papandayan dan berarah sejalan dengan endapan vulkanik yang dihasilkan dari aktivitas letusan. Di utara struktur geologi yang memotong kawah tersebut, terdapat punggungan yang memanjang sejajar dengan struktur geologi, dengan panjang sekitar 3,96 km (Nurohman dkk., 2016).

Aktivitas vulkanik terakhir pada Gunung Papandayan terjadi pada 1998 dan 2002 (BVGN, 1998; BVGN, 2002). Aktivitas hidrotermal berpusat pada kawah yang

terletak di bagian timur laut hingga erupsi 2002. Aktivitas hidrotermal pada periode tersebut dicirikan dengan keberadaan manifestasi termal berupa fumarola, kolam lumpur, dan mata air panas. Kemunculan manifestasi termal tersebut diperkirakan berasosiasi dengan keberadaan struktur geologi di sekitar kawah. Erupsi pada tahun 2002 terjadi di kawah bagian barat daya. Erupsi freatik tersebut mengakibatkan longsor yang berubah menjadi lahar (Mazot dkk., 2008).



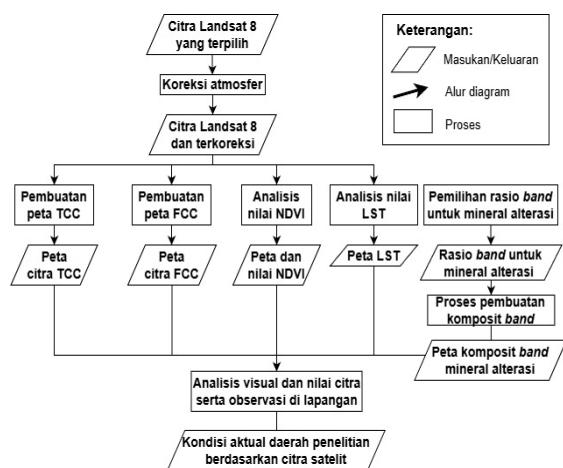
**Gambar 2.** Peta lokasi Gunung Papandayan



**Gambar 3.** Peta geologi Gunung Papandayan (Alzwar dkk., 1992)

## METODOLOGI

Alur pengolahan data dan metode yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah citra Landsat 8 *Collection 2 Level-1* dengan kriteria tutupan awan kurang dari 10% serta tidak ada awan yang menutupi area di sekitar Gunung Papandayan. Selain itu, waktu akuisisi citra yang dipilih adalah pada kondisi siang hari dan cuaca yang cerah. Berdasarkan kriteria-kriteria tersebut, citra yang diunduh merupakan citra yang diakuisisi pada tanggal 6 September 2023.



**Gambar 4.** Diagram alir penelitian

Selanjutnya, dilakukan koreksi atmosfer untuk menghilangkan efek dari atmosfer. Proses koreksi atmosfer dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ENVI 5.3 yang disertai dengan *toolbox radiometric calibration* dan *FLAASH Atmospheric Correction*. Metode FLAASH mengurangi efek dari keberadaan partikel-partikel dan aerosol di atmosfer (Felde dkk., 2003). Setelah dilakukan koreksi atmosfer, data citra tersebut diolah pada perangkat lunak QGIS. Beberapa metode analisis yang digunakan adalah analisis visual citra, analisis panas permukaan, analisis cekaman vegetasi, dan analisis rasio *band*.

Analisis visual citra digunakan dengan mengganti kombinasi komposit warna RGB untuk mengidentifikasi fitur-fitur permukaan, khususnya fitur-fitur yang berkaitan dengan kondisi geologi dan

manifestasi termal di permukaan. Kombinasi komposit yang digunakan untuk mengidentifikasi fitur-fitur permukaan adalah komposit *band* 4-3-2, 5-6-7, 5-6-2, 5-4-3, dan 6-5-4. Sementara itu, analisis panas permukaan atau *land surface temperature* (LST) dilakukan dengan menggunakan *band thermal infrared* (TIR) pada citra Landsat 8, yaitu *band* 10 dan 11. Pemrosesan panas permukaan ini dilakukan dengan menggunakan *plugin RS&GIS* pada perangkat lunak QGIS. *Plugin* ini menggunakan Python dan PyQt4 sebagai GUI. Tahapan proses analisis LST pada *plugin* ini meliputi perhitungan *top of atmosphere radiance*, *top of atmosphere reflectance*, *at-satellite brightness temperature*, *emissivity*, dan LST. Tahapan tersebut dilakukan secara otomatis sekaligus pada *plugin* ini.

Analisis cekaman vegetasi dilakukan dengan metode *normalized difference vegetation index* (NDVI). Metode NDVI merupakan salah satu indeks yang sering digunakan untuk menguantifikasi tingkat kehijauan tanaman (Rouse dkk., 1973). Analisis cekaman vegetasi dilakukan untuk mengidentifikasi daerah yang tidak ditumbuhi vegetasi dan diasumsikan berkorelasi dengan kemunculan manifestasi termal. dilakukan dengan menggunakan *band near infrared* (NIR) dan merah (RED), seperti pada persamaan (1). Pada penelitian ini, nilai NDVI diklasifikasikan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Laksono dkk. (2020) (**Tabel 1**). Nilai NDVI kurang dari 0,3 menunjukkan daerah yang tidak dijumpai vegetasi hingga hanya sedikit vegetasi yang dijumpai. Sementara itu, nilai NDVI sebesar 0,3-0,6 menunjukkan daerah dengan vegetasi yang cukup banyak, tetapi tidak terlalu lebat. Nilai NDVI lebih dari 0,6 menunjukkan daerah dengan vegetasi yang sangat lebat.

$$NDVI = \frac{band\ 5 - band\ 4}{band\ 5 + band\ 4} \dots \dots \dots (1)$$

Selanjutnya, analisis rasio *band* digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan mineral-mineral alterasi berdasarkan karakteristik

spektra mineral yang akan diidentifikasi (Nurrochman dkk., 2020). Pada kajian ini, rasio *band* yang digunakan adalah rasio *band* 6/7, 4/2, 6/2, 6/5, dan 4/1. Rasio *band* tersebut digunakan masing-masing untuk mengidentifikasi mineral hidroksil, oksida besi, klorit dan epidot, mineral besi, dan sulfur (Sabins, 1997; Salamba dkk., 2019).

**Tabel 1.** Klasifikasi nilai NDVI berdasarkan kondisi vegetasinya (Laksono dkk., 2020)

| No | Nilai NDVI | Kelas Vegetasi     |
|----|------------|--------------------|
| 1  | -1–0       | Tidak ada vegetasi |
| 2  | 0,01–0,3   | Densitas rendah    |
| 3  | 0,31–0,6   | Densitas menengah  |
| 4  | 0,61–1     | Densitas tinggi    |

Kaufmann (1988) dan Sabins (1999) membuat komposit *band* dari rasio-rasio dari mineral-mineral alterasi yang umum dijumpai. Kaufmann (1988) memiliki komposit *band* RGB 7/5-5/4-6/7. Rasio *band* 7/5 digunakan untuk mengidentifikasi mineral besi. Rasio *band* 6/7 digunakan untuk mengidentifikasi mineral hidroksil. Rasio 5/4 digunakan untuk mengidentifikasi vegetasi. Sementara itu, Sabins (1999) membuat komposit *band* RGB 4/2-6/7-6/5. Rasio *band* RGB 4/2 dan 6/5 digunakan untuk mengidentifikasi oksida besi dan mineral besi. Dua rasio tersebut digunakan untuk membantu interpretasi keberadaan mineral-mineral alterasi di lapangan ini.

Validasi lapangan dilakukan dengan observasi sekilas di lapangan pada tanggal 1 Desember 2022. Observasi di lapangan hanya dibatasi dengan melakukan pengamatan visual kenampakan vegetasi dan morfologi. Observasi di lapangan juga meliputi pengamatan visual batuan teralterasi dan manifestasi termal di sekitar Kawah Papandayan dan Tegal Alun. Hasil observasi di lapangan pada penelitian ini hanya berupa foto yang diambil langsung di lapangan. Jumlah dan titik observasi yang didapatkan tidak tercatat pada penelitian ini.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

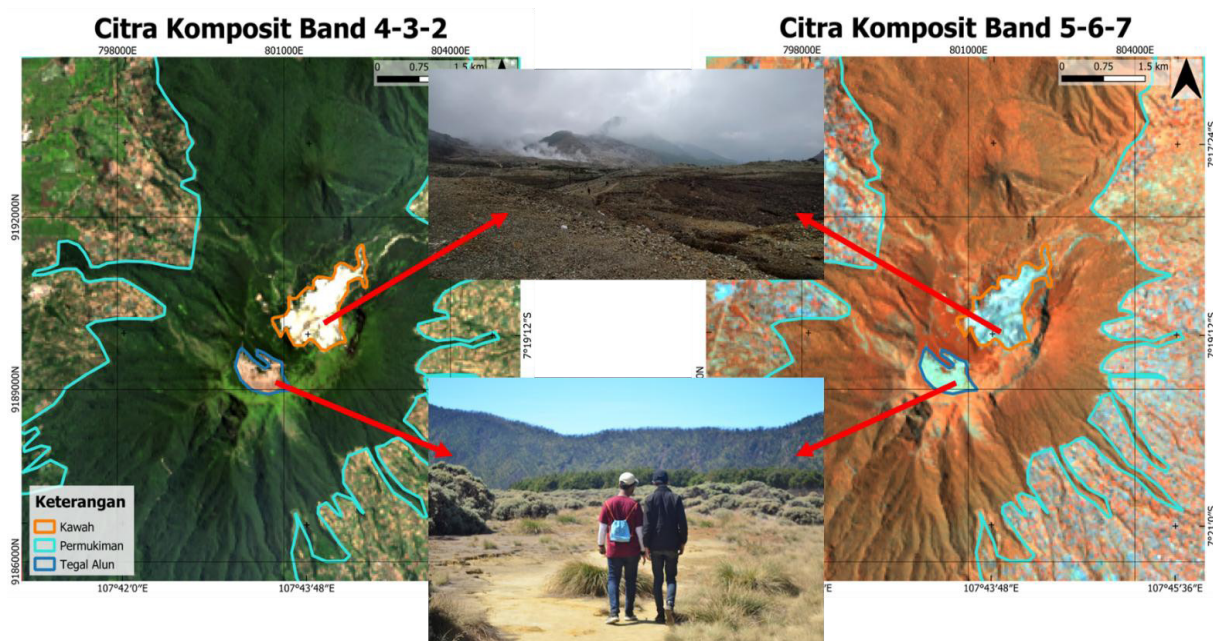
Hasil analisis visual menghasilkan dua jenis citra, yaitu citra *true color composite* (TCC) menggunakan komposit band RGB 4-3-2 dan citra *false color composite* (FCC) dengan komposit band RGB 5-6-7 (**Gambar 5**). Citra TCC menunjukkan daerah permukiman yang jelas dengan warna beragam dan vegetasi yang jarang, terutama di bagian barat dan timur area kajian. Di citra FCC, daerah permukiman juga terlihat dengan tona beragam. Daerah hutan teridentifikasi dengan tona hijau dan tekstur kasar pada citra TCC, sedangkan pada citra FCC ditunjukkan dengan tona jingga kecoklatan. Tona putih kecoklatan di bagian tengah citra TCC mengindikasikan vegetasi yang sedikit. Hal tersebut juga terlihat pada citra FCC dengan komposit *band* 5-6-7. Validasi lapangan menunjukkan bahwa area pertama adalah kawah luas Gunung Papandayan, sedangkan area kedua adalah kawasan Tegal Alun. Kawasan tersebut memiliki vegetasi yang tidak terlalu lebat dan didominasi oleh tanaman edelweiss.

Analisis secara visual juga dilakukan dengan kombinasi komposit *band* RGB yang berbeda. Citra yang menggunakan komposit *band* RGB 5-6-2 menunjukkan kesamaan dengan citra komposit *band* RGB 5-6-7. Pada citra tersebut, hutan yang tidak terlalu lebat tampak dengan warna jingga cerah. Citra komposit *band* RGB 5-4-3 dan 6-5-4 memperlihatkan vegetasi tidak lebat dengan tona merah muda dan hijau muda. Kondisi ini teridentifikasi jelas di daerah permukiman dan di dinding kawah Gunung Papandayan, seperti yang terlihat dalam foto lapangan. Tiga citra menunjukkan bahwa area kawah dan Tegal Alun memiliki rona berbeda dibandingkan sekitarnya. Hal tersebut mengindikasikan potensi keberadaan manifestasi termal dan nilai anomali pada analisis selanjutnya. Observasi visual pada citra ini juga menunjukkan adanya fitur melingkar, seperti kawah serta fitur punggungan dan lembahan (**Gambar 6**).

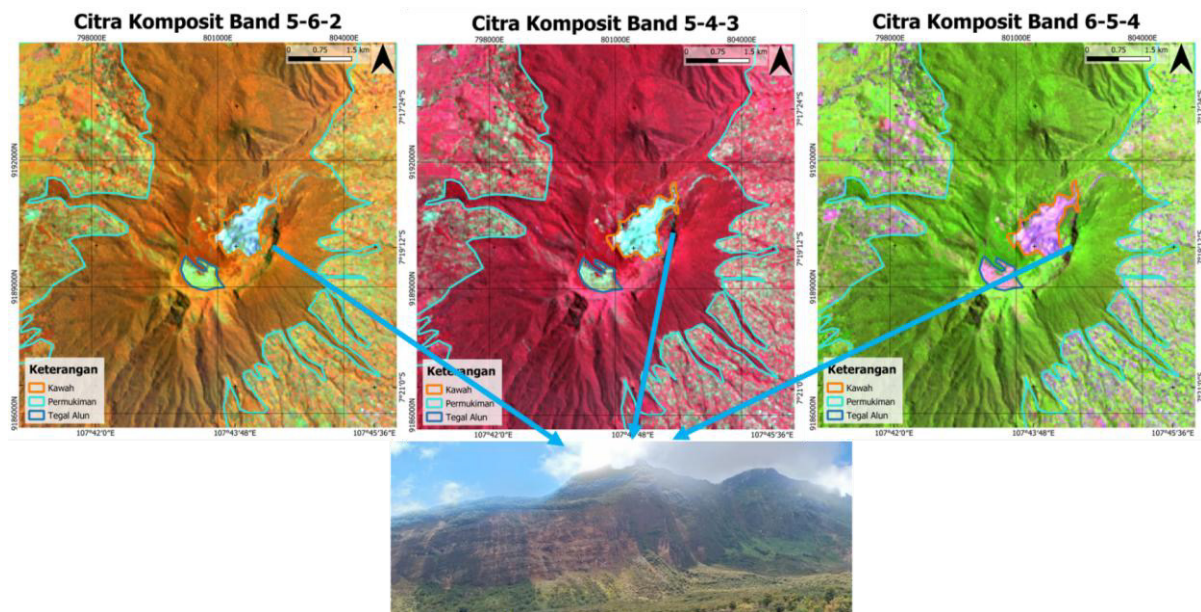
Berdasarkan citra LST yang diperoleh, terdeteksi nilai anomali LST yang tinggi di bagian tengah yang dikelilingi oleh nilai LST relatif rendah. Nilai LST yang tinggi tersebut berada di Kawah Papandayan. Nilai LST yang relatif tinggi juga dijumpai di Daerah Tegal Alun. Akan tetapi, nilai LST di Daerah Tegal Alun tersebut masih lebih rendah dibandingkan dengan nilai LST di Kawah Papandayan. Anomali ini diduga terkait dengan keberadaan manifestasi termal pada Kawah Papandayan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Byrdina dkk. (2018), dijumpai fumarola di Daerah Tegal Alun. Adanya manifestasi termal, seperti solfatara, di Kawah Papandayan mengakibatkan nilai anomali LST yang tinggi (**Gambar 7**). Meskipun citra LST mencatat suhu maksimum sekitar 38°C, temperatur solfatara dapat melebihi 100°C berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Mazot dkk. (2008). Oleh karena itu, analisis citra LST tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi suhu sesungguhnya dari manifestasi tersebut, tetapi dapat digunakan untuk

mengindikasikan kemungkinan keberadaan manifestasi termal. Anomali LST sebaiknya diintegrasikan dengan citra TCC karena nilai LST tinggi juga dapat menunjukkan keberadaan area permukiman yang teridentifikasi seperti di bagian barat dan timur daerah kajian. Aktivitas manusia, seperti penggunaan kendaraan, dapat mengakibatkan nilai LST menjadi tinggi (Mostafa dkk., 2023).

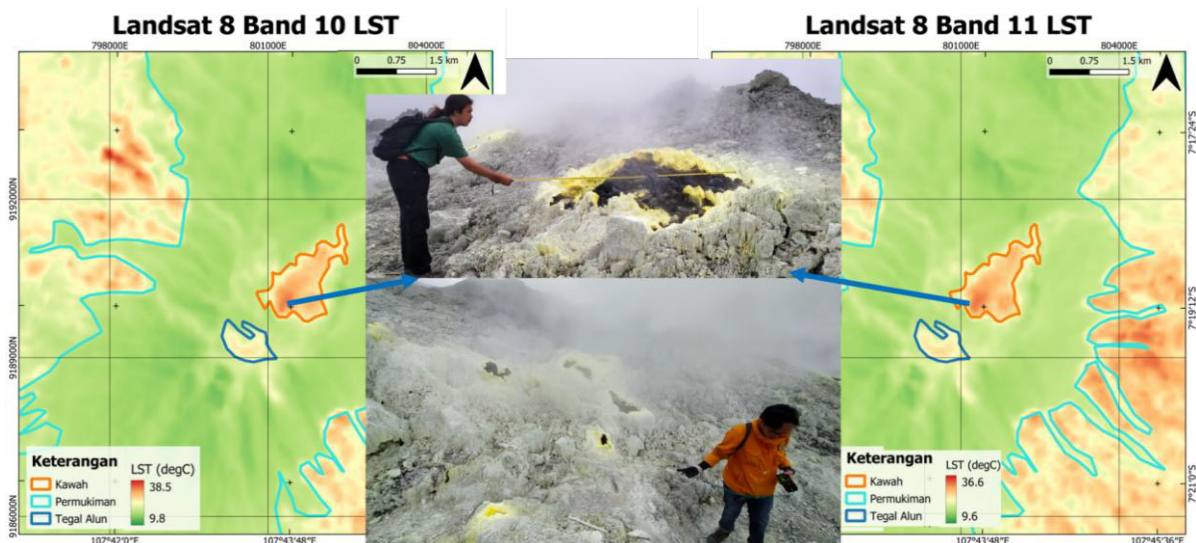
Sementara itu, pada daerah Tegal Alun, sebagian besar dijumpai nilai NDVI sebesar 0,3-0,6. Nilai NDVI yang relatif rendah pada daerah tersebut dikonfirmasi dengan kenampakan visual dan aktual yang terdapat pada daerah tersebut (**Gambar 5**). Kurang lebatnya vegetasi pada daerah Tegal Alun diperkirakan karena daerah tersebut dulunya adalah pusat erupsi dari Gunung Papandayan yang berumur relatif lebih tua dibandingkan Kawah Papandayan. Selain itu, pada daerah tersebut, kemungkinan dijumpai manifestasi termal sehingga nilai NDVI pada daerah tersebut relatif lebih rendah.



**Gambar 5.** Citra dari komposit *band* RGB 4-3-2 dan komposit *band* RGB 5-6-7. Tona yang berbeda pada bagian puncak dari Gunung Papandayan merupakan kawah dan padang tumbuhan edelweiss



**Gambar 6.** Citra dari komposit *band* RGB 5-6-2, 5-4-3, dan 6-5-4. Rona yang agak terang mengindikasikan vegetasi yang tidak terlalu lebat seperti di dinding kawah Gunung Papandayan yang memiliki kemiringan yang terjal. Vegetasi cenderung akan sulit tumbuh dengan baik pada kemiringan yang terjal



**Gambar 7.** Citra LST dari *band* 10 dan 11. Anomali nilai LST yang tinggi di Kawah Papandayan diperkirakan berasosiasi dengan keberadaan solfatra pada daerah tersebut

Berdasarkan peta citra hasil analisis NDVI (**Gambar 8**), daerah dengan nilai NDVI kurang dari 0,3 banyak dijumpai di Kawah Papandayan. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis citra secara visual serta hasil observasi lapangan secara langsung di Kawah Papandayan (**Gambar 5**). Sangat sedikitnya vegetasi pada daerah tersebut merupakan akibat dari banyaknya manifestasi termal pada daerah tersebut. Selain itu, daerah tersebut merupakan

pusat erupsi dari Gunung Papandayan sehingga tanaman akan sulit tumbuh pada daerah tersebut.

Berdasarkan citra yang dihasilkan dari rasio *band* 6/7, Kawah Papandayan memiliki nilai rasio yang relatif tinggi sehingga daerah tersebut kemungkinan besar banyak dijumpai mineral-mineral hidroksil. Selain itu, pada daerah Tegal Alun dijumpai beberapa area yang memiliki

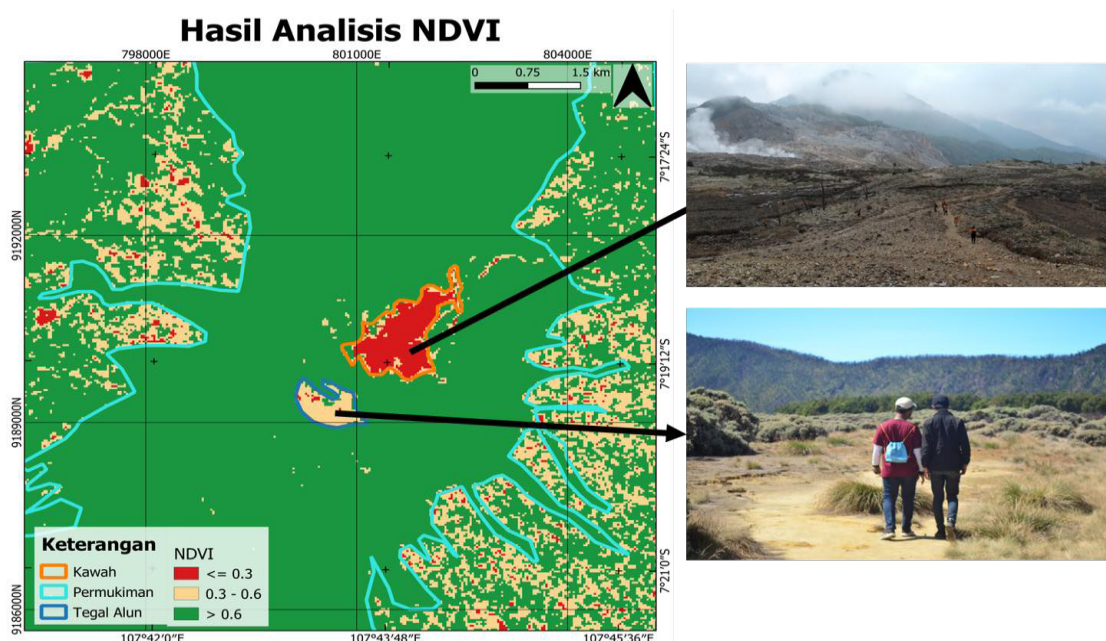
nilai rasio yang relatif tinggi juga. Berdasarkan pengamatan di lapangan, pada Kawah Papandayan banyak dijumpai mineral-mineral lempung yang berwarna putih (**Gambar 9**). Selain itu, keberadaan mineral lempung teridentifikasi pada batuan *ejecta* di kawah ini (Mazot dkk., 2008). Sementara itu, hasil rasio *band* 4/1 yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan sulfur menunjukkan hasil yang kurang representatif. Hal tersebut diperkirakan karena kurva spektra sulfur yang sulit untuk menentukan pembilang dan pembagi pada rasio *band*. Keberadaan sulfur yang hanya dijumpai di sekitar solfatera, seperti pada **Gambar 9**, juga dapat mengakibatkan hasil rasio *band* menjadi kurang representatif.

Hasil yang hampir sama juga ditunjukkan pada citra yang didapatkan dari kalkulasi rasio *band* 6/2. Berdasarkan citra yang dihasilkan, daerah Kawah Papandayan memiliki nilai rasio yang relatif tinggi dibandingkan daerah di sekitarnya (**Gambar 10**). Oleh karena itu, pada Kawah Papandayan, terdapat kemungkinan dijumpainya mineral epidot dan klorit. Berbeda halnya dengan di Kawah Papandayan, Daerah Tegal Alun tidak memiliki nilai rasio *band* 6/2 yang tinggi sehingga daerah ini kemungkinan tidak

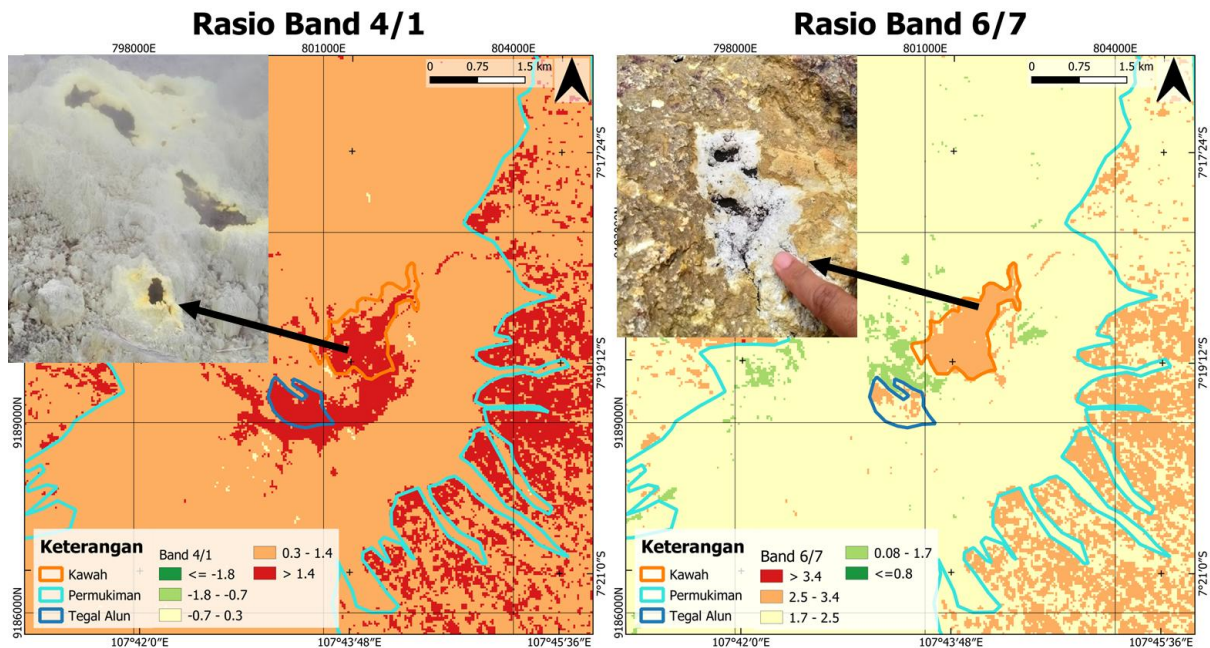
akan dijumpai mineral epidot dan klorit. Selanjutnya, hasil analisis dengan rasio *band* 6/5 menunjukkan bahwa Daerah Tegal Alun dan Kawah Papandayan memiliki nilai rasio yang tinggi (**Gambar 10**). Oleh karena itu, pada dua daerah ini, kemungkinan dijumpai mineral besi yang cukup banyak.

Rasio *band* yang digunakan selanjutnya adalah rasio *band* 4/2. Citra yang dihasilkan dari rasio *band* ini kurang representatif. Citra yang dihasilkan memiliki nilai yang relatif tinggi di seluruh area kajian. Berdasarkan observasi di lapangan, dijumpai banyak oksida besi di Kawah Papandayan. Hal tersebut berbanding lurus dengan hasil yang didapatkan dari citra hasil rasio *band* 4/2 (**Gambar 11**).

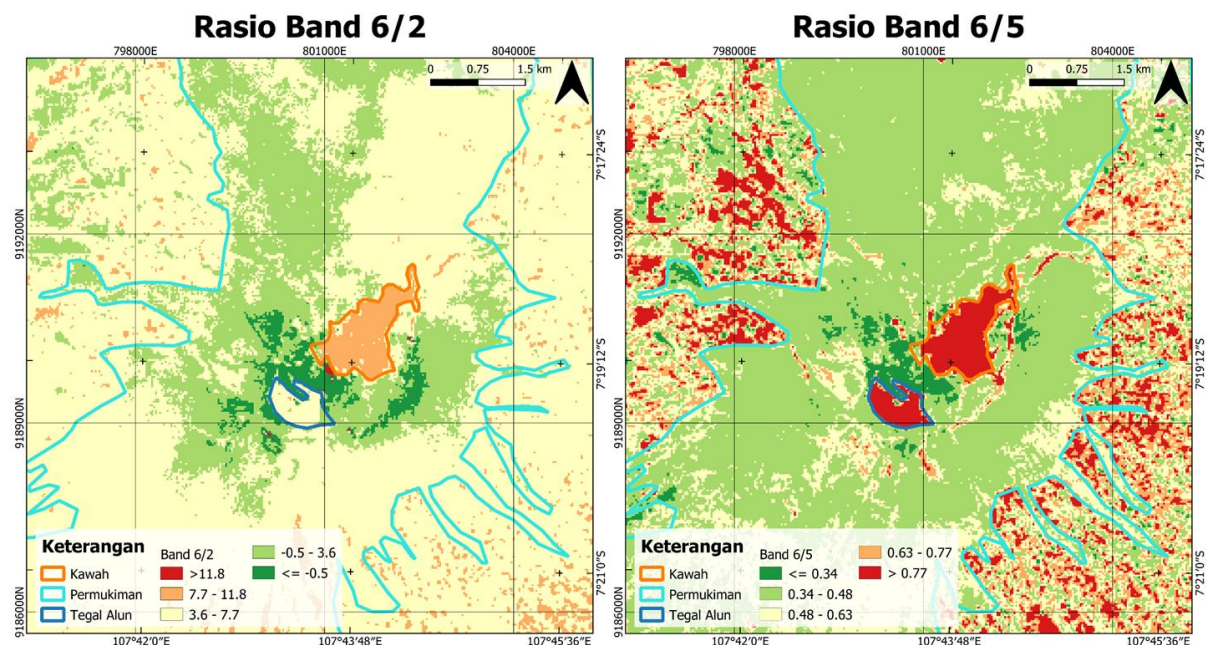
Selanjutnya, beberapa rasio *band* tersebut digunakan untuk membuat komposit *band* berdasarkan rasio Kaufmann (1988) dan Sabins (1999). Dari kedua citra tersebut, didapatkan bahwa daerah Tegal Alun dan Kawah Papandayan memiliki tona warna yang mencirikan keberadaan mineral hidroksil, oksida besi, dan mineral besi (**Gambar 12**). Akan tetapi, hasil analisis ini masih harus divalidasi dengan pengamatan langsung di lapangan dan kajian yang lebih komprehensif.



**Gambar 8.** Citra hasil analisis NDVI dan kenampakan di lapangan

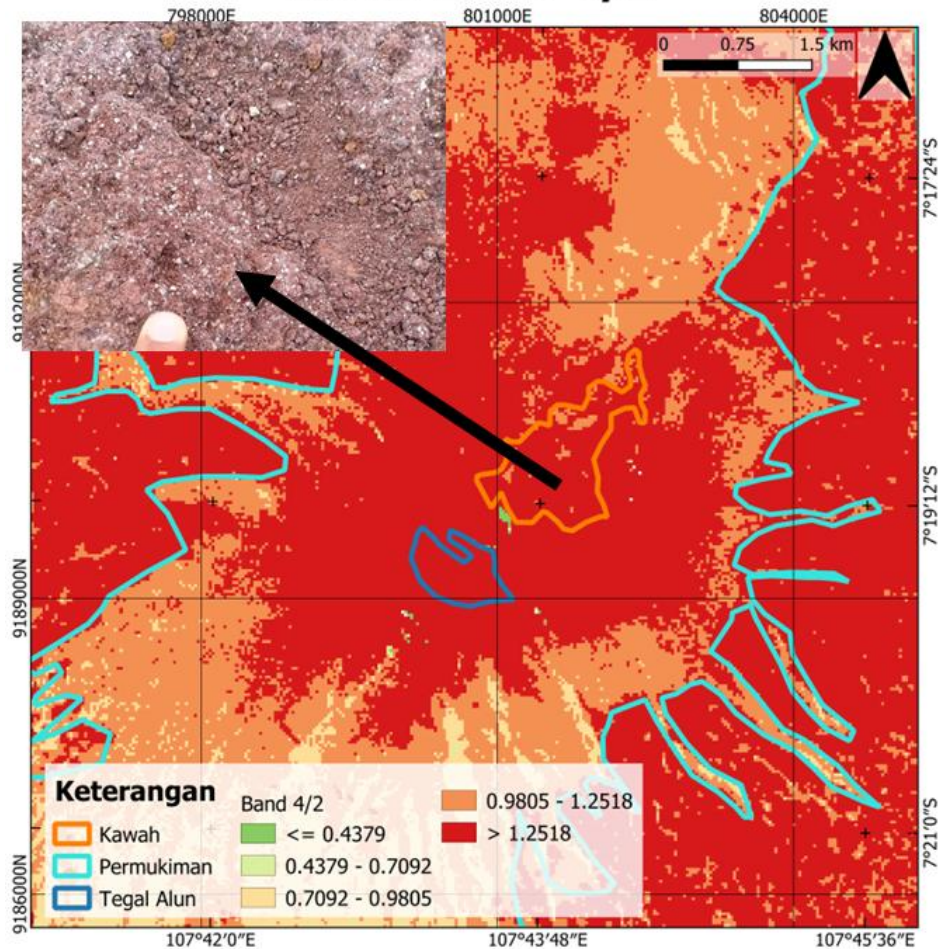


**Gambar 9.** Citra rasio *band* 4/1 dengan kenampakan sulfur yang teramati langsung dan citra rasio *band* 6/7 dengan kenampakan mineral lempung (kanan)

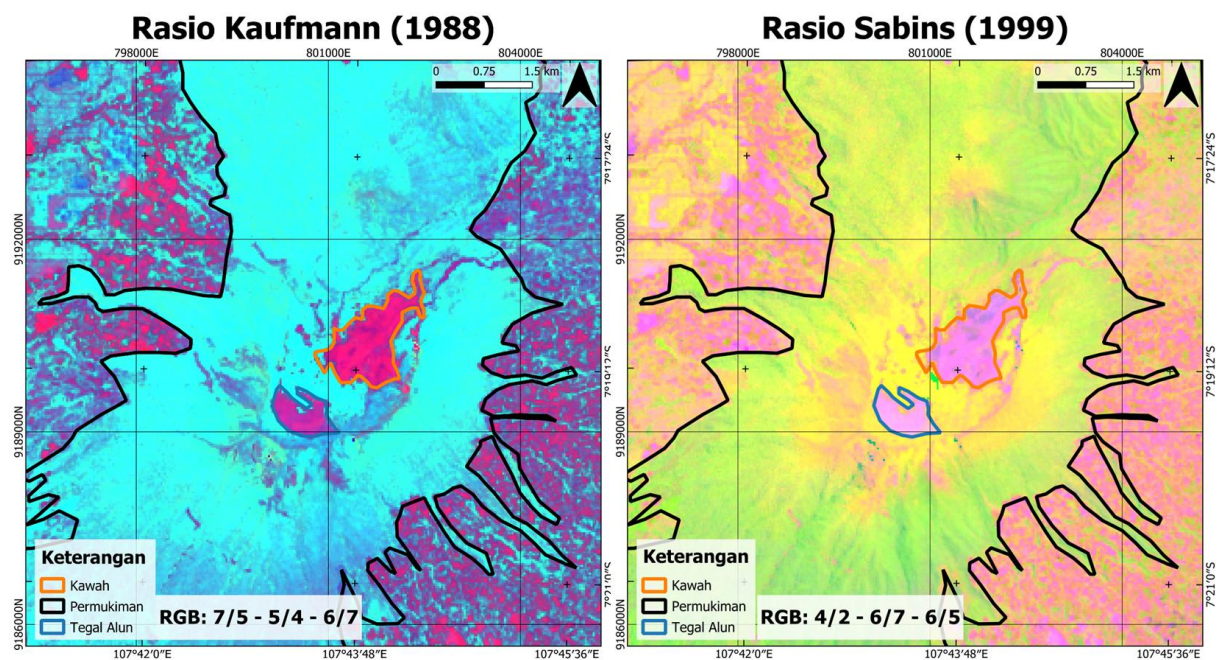


**Gambar 10.** Citra rasio *band* 6/2 (kiri) dan citra rasio *band* 6/5 (kanan)

## Rasio Band 4/2



**Gambar 11.** Citra rasio *band* 4/2 dengan kenampakan oksida besi yang teramati di lapangan



**Gambar 12.** Citra rasio Kaufmann (1988) (kiri) dan citra rasio Sabins (1999) (kanan)

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, didapatkan bahwa area yang menarik untuk dikaji lebih detil adalah area Kawah Papandayan dan Tegal Alun. Dua daerah tersebut menunjukkan adanya keberadaan manifestasi termal berdasarkan hasil analisis penginderaan jauh dan observasi lapangan. Pada dua daerah tersebut, ditunjukkan keberadaan mineral lempung, epidot, klorit, sulfur, dan oksida besi. Umumnya, Nilai NDVI di Kawah Papandayan adalah kurang dari 0,3, sedangkan di Tegal Alun adalah 0,3–0,6. Nilai LST pada dua daerah tersebut berkisar antara 20–38,5 °C. Sementara itu, di luar daerah Kawah Papandayan dan Tegal Alun serta bukan daerah permukiman cenderung memiliki nilai LST kurang dari 20 °C dan nilai NDVI lebih dari 0,6.

Apabila dibandingkan dengan penelitian dari Rizdinant dan Jhanesta (2021) serta Kurniawahidayati dkk. (2018), penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih terfokus pada area Gunung Papandayan, khususnya area Tegal Alun dan Kawah Papandayan. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan berbagai metode seperti rasio *band*, LST, dan NDVI. Akan tetapi, citra yang digunakan pada penelitian ini adalah citra Landsat 8 yang masih memiliki resolusi sebesar 30 x 30 meter. Resolusi tersebut masih kurang detil sehingga disarankan melakukan kajian lanjutan dengan citra yang memiliki resolusi yang lebih detil. Selain itu, kegiatan observasi dan validasi lapangan yang dilakukan pada penelitian ini masih sangat terbatas. Oleh karena itu, kegiatan observasi yang lebih panjang sangat seperti survei panas bumi atau survei geosain di lapangan sangat disarankan untuk dilakukan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan kajian yang berbeda dibandingkan penelitian penginderaan jauh lainnya. Penelitian ini mengintergrasikan hasil penginderaan jauh dan kegiatan validasi di lapangan. Selain

itu, penelitian ini juga diaplikasikan pada salah satu lapangan panas bumi yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia.

Berdasarkan kajian yang dilakukan pada penelitian ini, manifestasi termal di Lapangan Panas bumi Gunung Papandayan dapat teridentifikasi dengan berbagai macam metode penginderaan jauh, seperti analisis visual, panas permukaan, cekaman vegetasi, dan rasio *band*. Daerah yang dijumpai manifestasi termal umumnya dijumpai di Kawah Papandayan dan Tegal Alun berdasarkan sedikit hingga tidak adanya vegetasi pada pengamatan visual citra, anomali LST yang tinggi, dan nilai NDVI kurang dari 0,3. Sementara itu, keberadaan mineral-mineral alterasi dapat teridentifikasi dengan menggunakan analisis rasio *band*. Mineral-mineral alterasi yang teridentifikasi adalah grup mineral oksida besi, mineral besi (*ferrous mineral*), mineral-mineral dengan gugus hidroksil seperti mineral lempung, klorit, epidot, dan sulfur.

Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memfokuskan target area kegiatan eksplorasi atau survei lapangan, khususnya terkait panas bumi, yang akan dilakukan. Untuk mendapatkan hasil yang lebih detil, dapat dilakukan analisis pada citra yang memiliki resolusi yang lebih kecil, seperti ASTER dan Sentinel-2. Analisis lainnya yang dapat dilakukan adalah mempertajam resolusi citra Landsat 8 yang sudah dianalisis ini untuk mendapatkan hasil yang lebih detil. Survei lapangan seperti survei geologi dan geokimia dapat dilakukan untuk memvalidasi hasil analisis penginderaan jauh.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak USGS yang sudah menyediakan citra Landsat 8 yang dapat diunduh secara gratis oleh penulis. Penyusunan penelitian ini juga didukung oleh Kelompok Kerja Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Mineral,

## DAFTAR PUSTAKA

- Alzwar, M., Akbar, N., dan Bachri, S. (1992). Peta Geologi Lembar Garut dan Pamengpeuk, Jawa. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Bulletin of the Global Volcanism Network (BVGN). (1998). *Bulletin of Global Volcanism Network* 23(7). [Online]. Tersedia di <http://volcano.si.edu/reports/usgs> (Diakses: 25 Oktober 2024).
- Bulletin of the Global Volcanism Network (BVGN). (2002). *Bulletin of Global Volcanism Network* 27(11). [Online]. Tersedia di <http://volcano.si.edu/reports/usgs> (Diakses: 25 Oktober 2024).
- Byrdina, S., Grandis, H., Sumintadireja, P., Caudron, C., Syahbana, D. K., Naffrechoux, E., Gunawan, H., Suantika, G., dan Vandemeulebrouck, J. (2018). Structure of the acid hydrothermal system of Papandayan volcano, Indonesia, investigated by geophysical methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, pp.77–86.
- Felde, G. W., Anderson, G. P., Cooley, T. W., Matthew, M. W., Berk, A., dan Lee, J. (2003). Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (21–25 Juli 2003, Toulouse), pp. 90–92.
- Kaufmann, H. (1988). Concepts, processing and results. *International Journal of Remote Sensing*, 9(10–11), pp. 1639–1658.
- Kurniawahidayati, B., Nugroho, I. A., Mulyana, R. S., dan Saepuloh, A. (2017). Preliminary study of near surface detections at geothermal field using optic and SAR imageries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 103(1).
- Laksono, A., Saputri, A. A., Pratiwi, C. I. B., Arkan, M. Z., dan Putri, R. F. (2020). Vegetation cover change and its impact on barchan dune morphology in Parangtritis Coast, Indonesia. *E3S Web of Conferences* (7–8 September 2020, Yogyakarta).
- Mazot, A., Bernard, A., Fischer, T., Inguaggiato, S., dan Sutawidjaja, I. S. (2008). Chemical evolution of thermal waters and changes in the hydrothermal system of Papandayan volcano (West Java, Indonesia) after the November 2002 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), pp. 276–286.
- Mostafa, W., Magd, Z., Abo Khashaba, S. M., Abdelaziz, B., Hendawy, E., Elfadaly, A., Nabil, M., Kucher, D. E., Chen, S., dan Mohamed, E. S. (2023). Impacts of human activities on urban sprawl and land surface temperature in rural areas: A case study of El-Reyad District, Kafrelsheikh Governorate, Egypt. *Sustainability*, 15(18).
- Nasution, A., Widarto, D. S., Hutasoit, L., Yuliani, D., dan Hadisoemarto, S. (2008). Geothermal geophysical study of Mt. Papandayan, Garut District, West Java, Indonesia. *Proceedings of the 8th Asian Geothermal Symposium* (9–10 Desember 2008, Hanoi), pp. 47–54.
- Nurrochman, A., Febriani, R., dan Yuliatama, V. P. (2020). Aplikasi citra Landsat 8 OLI/TIRS dalam mengidentifikasi alterasi hidrotermal skala regional: Studi kasus Kecamatan Suoh dan Bandar Negeri Suoh. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(2), pp. 89–96.
- Nurohman, H., Bakti, H., Indarto, S., Yuliyanti, A., Abdulah, A. A. K., Permana, H., dan Gaffar, E. Z. (2016). Zona permeabel di Kawah Gunung Papandayan berdasarkan gas radon dan thoron. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 26, pp.131–140.

- Rizdinant, D. A. K., dan Jhanesta, W. (2021). Identification of hydrothermal alteration distribution with composite band Landsat 8 OLI TIRS: Case study of Mount Papandayan, Garut, Indonesia. *Prosiding SNAST 2021* (20 Maret 2021, Yogyakarta).
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., dan Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. [Laporan Teknis]. Texas: Texas A&M University Remote Sensing Center.
- Sabins, F. F. (1997). *Remote sensing: Principles and interpretation 3<sup>rd</sup> edition*. W. H. Freeman.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4), pp. 157–183.
- Salamba, K. E., Hede, A. N. H., dan Heriawan, M. N. (2019). Identification of alteration zones using a Landsat 8 image of densely vegetated areas of the Wayang Windu Geothermal Field, West Java, Indonesia. Dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 254(1).



## **DELINEASI AREA PROSPEK DAN KARAKTERISASI RESERVOIR PANAS BUMI NON-VULKANIK UNTUK PEMANFAATAN LANGSUNG DI BANDA BARU, MALUKU TENGAH**

### ***PROSPECT AREA DELINEATION AND CHARACTERIZATION OF NON-VOLCANIC GEOTHERMAL RESERVOIRS FOR DIRECT USE IN BANDA BARU, CENTRAL MALUKU***

**Erawan Melisano<sup>1,2</sup>, Husin Setia Nugraha<sup>2</sup>, Tonny Rahadinata<sup>2</sup>, Muhammad Satriyo<sup>2</sup>,  
dan Prihadi Sumintadireja<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institut Teknologi Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Indonesia

Email korespondensi: [erawanmelisanos@gmail.com](mailto:erawanmelisanos@gmail.com)

Diterima: 11 Juli 2025; Direvisi: 5 Agustus 2025; Disetujui: 30 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.548>

#### **ABSTRAK**

Kesenjangan antara potensi pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia (230 MW<sub>t</sub>) dengan realisasi utilitasnya (8 MW<sub>t</sub>) menuntut metode delineasi yang presisi pada sistem non-vulkanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi reservoir dangkal dan mendelineasi area prospek di Banda Baru, Maluku Tengah, menggunakan integrasi data geosains terpadu. Metode *Multi-Influencing Factor* (MIF) berbasis SIG diaplikasikan untuk memetakan potensi air tanah, yang kemudian disintesis dengan anomali gas tanah CO<sub>2</sub> dan pemodelan gradien resistivitas Magnetotellurik (MT). Hasil penelitian mengidentifikasi area prospek seluas 6,49 km<sup>2</sup> yang dikontrol oleh struktur sesar pada batuan metamorf. Validasi melalui pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 menunjukkan keberhasilan signifikan dengan ditemukannya fluida bersuhu 95°C pada kedalaman 164 meter. Temuan ini memicu re-evaluasi interpretasi geofisika, di mana nilai resistivitas rendah (<50 ohm-m) terbukti merepresentasikan akuifer panas aktif, bukan lapisan penudung (caprock) konvensional. Berdasarkan hasil uji produksi, total potensi sumber daya terukur di wilayah ini diestimasi sebesar 6,3 MW<sub>t</sub>. Integrasi model ini memberikan instrumen strategis bagi pengembangan energi panas bumi non-vulkanik yang efisien untuk mendukung ekonomi lokal melalui skema pemanfaatan langsung secara berkelanjutan.

**Kata kunci:** Banda Baru, delineasi prospek, MIF, panas bumi non-vulkanik, pemanfaatan langsung

#### **ABSTRACT**

*The significant disparity between Indonesia's geothermal direct-use potential (230 MW<sub>t</sub>) and its current utilization (8 MW<sub>t</sub>) necessitates precise delineation methods for non-volcanic systems. This study aims to characterize the shallow reservoir and delineate the prospect area in Banda Baru, Central Maluku, using integrated geoscience data. A GIS-based Multi-Influencing Factor (MIF) method was applied to map groundwater potential, which was then*

*synthesized with surface CO<sub>2</sub> gas anomalies and Magnetotelluric (MT) resistivity gradient modeling. The results identified a 6.49 km<sup>2</sup> prospect area controlled by fracture structures within metamorphic rocks. Validation through the BBR-1 temperature gradient well drilling showed significant success, encountering 95°C fluid at a depth of 164 meters. This finding prompted a re-evaluation of geophysical interpretations, proving that low resistivity values (<50 ohm-m) represent active thermal aquifers rather than conventional clay caps. Based on production tests, the total measured resource potential in this region is estimated at 6.3 MW<sub>t</sub>. This integrated modeling provides a strategic instrument for efficient non-volcanic geothermal development to support the local economy through sustainable direct-use schemes.*

**Keywords:** *Banda Baru, direct use, MIF, non-volcanic geothermal, prospect delineation*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung (*direct use*) telah menjadi instrumen strategis dalam upaya global menuju transisi energi bersih dan pencapaian target emisi nol bersih (Lund & Toth, 2021). Hal ini sejalan dengan urgensi global untuk menjaga ambang batas pemanasan global di bawah 1,5°C melalui optimalisasi sumber daya energi terbarukan (Gutiérrez-Negrín, 2024). Pengembangan sumber daya dari reservoir panas bumi dangkal (*shallow geothermal reservoirs*) menawarkan efisiensi teknis dan nilai ekonomis yang kompetitif dibandingkan dengan sistem hidrotermal dalam, terutama karena risiko pengeboran yang lebih rendah, kedalaman yang lebih terjangkau, serta kebutuhan infrastruktur yang lebih sederhana (Lund et al., 2022). Di Indonesia, estimasi potensi pemanfaatan langsung mencapai sekitar 230 MW<sub>t</sub> yang tersebar di lebih dari 971 lokasi manifestasi, namun kapasitas terpasang saat ini baru mencapai angka sekitar 8 MW<sub>t</sub> (PSDMBP, 2025). Disparitas yang signifikan antara potensi dan utilisasi ini menegaskan perlunya metodologi delineasi yang lebih presisi guna mengoptimalkan pemanfaatan fluida bersuhu rendah hingga menengah, terutama untuk mendukung sektor industri, pertanian, dan pariwisata secara berkelanjutan (Lund et al., 2022).

Karakterisasi sistem panas bumi non-vulkanik, khususnya tipe *fracture-hosted* di batuan metamorf, menghadirkan kompleksitas eksplorasi yang jauh lebih

tinggi dibandingkan sistem vulkanik konvensional karena ketergantungannya pada kontrol struktural yang spesifik (Moeck, 2014). Permeabilitas sekunder yang dikontrol oleh struktur rekahan dan sesar menjadi faktor penentu utama keberadaan reservoir, namun seringkali indikasi manifestasi di permukaan tidak mencolok atau bersifat campuran antara air reservoir dalam dengan air tanah dangkal (Moeck, 2014). Ketidakpastian dalam mengidentifikasi interaksi spasial antara aliran panas konvektif bawah permukaan dengan akuifer air tanah dangkal seringkali menjadi hambatan utama dalam menentukan batas-batas area prospek secara akurat pada tahap eksplorasi awal, mengingat banyak dari sumber daya ini bersifat tersembunyi (*concealed*) tanpa ekspresi permukaan yang jelas (Moeck, 2014).

Implementasi pemodelan Sistem Informasi Geografis (SIG) melalui metode *Multi-Influencing Factor* (MIF) atau analisis keputusan multikriteria merupakan solusi optimasi untuk mengintegrasikan berbagai parameter geosains yang heterogen secara objektif. Metode ini memungkinkan pembobotan kriteria secara terstruktur guna mengurangi ambiguitas dan meminimalkan faktor kesalahan manusia (*human error*) dalam prosedur pengambilan keputusan spasial yang kompleks. Pendekatan integratif yang menggabungkan data geologi, geofisika, dan geokimia (3G) sangat krusial, terutama dalam karakterisasi sistem non-vulkanik, untuk mendeteksi zona akumulasi fluida yang terpanaskan melalui jaringan patahan aktif serta mengidentifikasi area prospek

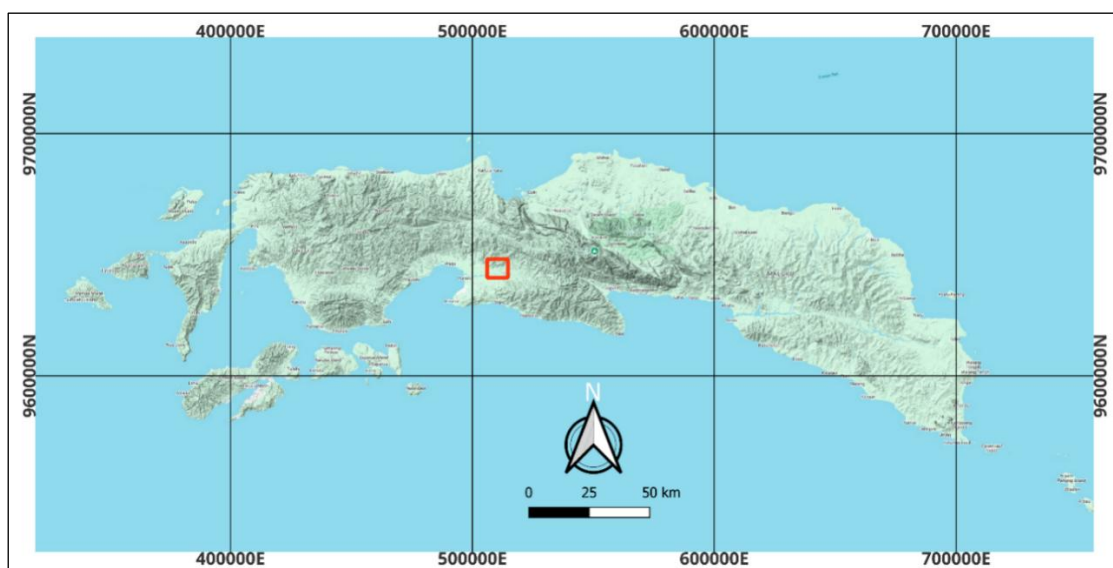
yang tidak memiliki ekspresi permukaan yang jelas.

Daerah Banda Baru di Pulau Seram, Maluku Tengah, merupakan salah satu lapangan panas bumi non-vulkanik yang unik di Indonesia, terletak pada zona imbrikasi Neogen yang dipengaruhi oleh tatanan tektonik kompleks Busur Banda Luar. Hasil survei pendahuluan menunjukkan adanya anomali emisi CO<sub>2</sub> permukaan yang signifikan ( $>4,2\%$ ) serta zona tahanan jenis semu rendah ( $<50 \text{ ohm-m}$ ) yang berkorelasi dengan jalur migrasi fluida hidrotermal. Urgensi studi di wilayah ini diperkuat oleh hasil pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 yang berhasil mengeluarkan air panas mencapai suhu 95°C pada kedalaman dangkal 164 meter, memberikan bukti empiris keberadaan sistem *shallow reservoir* yang aktif.

Penelitian ini bertujuan untuk mendelineasi area prospek reservoir dangkal di daerah Banda Baru dan mengestimasi potensi sumber daya terukur menggunakan standar perhitungan teknis terbaru. Metodologi yang digunakan mengintegrasikan zonasi potensi air tanah berbasis MIF dengan analisis sebaran temperatur bawah permukaan yang divalidasi oleh data pengeboran aktual. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi luas area prospek yang

akurat (sekitar 6,49 km<sup>2</sup>) serta memberikan model eksplorasi yang efisien untuk pengembangan lapangan panas bumi non-vulkanik serupa di Indonesia.

Area penelitian secara administratif terletak di daerah Banda Baru, Maluku Tengah, Indonesia, yang secara regional merupakan bagian dari tatanan tektonostratigrafi Busur Banda Luar pada zona imbrikasi Neogen. Secara geodinamik, wilayah ini berada pada zona tumbukan aktif antara Lempeng Australia dan Blok Banda, yang membentuk arsitektur geologi kompleks dengan dominasi batuan metamorf dari Kompleks Kobipoto, Taunusa, dan Tehoru yang ditutupi oleh endapan sedimen Seri Australia (Gambar 1). Morfologi Pulau Seram di lokasi studi dicirikan oleh bentang alam pegunungan yang ekstrem dengan puncak Gunung Binaiya (3.027 mdpl) serta sistem drainase permanen berarah utara-selatan yang mengontrol sirkulasi hidrogeologi regional. Fokus pengumpulan data teknis dan pengeboran eksplorasi dangkal dilakukan pada kluster sumur landaian suhu BBR-1 (509480 mE; 9644272 mN) dan BBR-2 (510001 mE; 9643651 mN), yang terletak pada zona transisi dataran rendah pesisir dengan pengaruh signifikan dari aktivitas fluida termal terkontrol rekahan (*fracture-hosted*).



**Gambar 1.** Peta Lokasi Daerah Panas Bumi Banda Baru. Diambil dari Peta Google

## METODOLOGI

Penentuan zona potensi air tanah dalam studi ini dilakukan menggunakan *metode Multi-Influencing Factor (MIF)*, sebuah teknik penilaian multikriteria berbasis spasial yang mengevaluasi interaksi antar-parameter hidrogeologis (Kisiki dkk., 2022; Shaban dkk., 2001). Metode ini telah diadaptasi secara luas untuk pemetaan kawasan prospektif air tanah karena kemampuannya dalam mengintegrasikan berbagai parameter geosains yang heterogen secara objektif (Akter dkk., 2020; Thapa dkk., 2020). Dalam penelitian ini, tujuh kriteria utama diintegrasikan: litologi, jarak dari sesar permeabel, kemiringan lereng, densitas drainase, densitas kelurusan, tutupan lahan, dan curah hujan (Kisiki dkk., 2022). Setiap kriteria diberikan bobot spesifik berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap kriteria lain, baik berupa dampak besar maupun kecil, sebagaimana diilustrasikan dalam bagan alir hubungan antar-faktor (Kisiki dkk., 2022; Thapa dkk., 2020). Proses pembobotan dilakukan melalui penjumlahan skor dampak relatif yang dinormalisasi untuk menghasilkan indeks potensi air tanah yang akurat (Subramani dkk., 2024; Thapa dkk., 2020).

### Integrasi Data Geosains dan Pemodelan Spasial Terpadu

Strategi delineasi naskah *shallow geothermal reservoir* menggunakan pendekatan pemodelan Sistem Informasi Geografis (SIG) yang objektif untuk meminimalkan *human error* (Nugraha dkk., 2022). Metodologi ini melibatkan operasional parameter input melalui teknik *weighted sum*. Integrasi data dilakukan dengan metode *anomaly stacking* yang mensintesis empat parameter kunci: (i) zona potensi air tanah kelas sangat tinggi hasil analisis MIF, (ii) nilai tahanan jenis semu  $< 50$  ohm-m dari data geolistrik Schlumberger, (iii) estimasi temperatur bawah permukaan  $> 150^{\circ}\text{C}$  pada kedalaman 200 meter, dan (iv) anomali emisi gas  $\text{CO}_2$  tanah  $> 4,2\%$ . Penggunaan operasi vector overlaying memungkinkan identifikasi presisi terhadap area akumulasi

fluida termal yang terperangkap pada kedalaman dangkal.

### Pemodelan Termal Bawah Permukaan dan Validasi

Estimasi sebaran temperatur isothermal dihitung melalui analisis korelasi antara gradien resistivitas dari data Magnetotellurik (MT) dan gradien panas bumi (Rahadinata, 2024). Hubungan ini didasarkan pada prinsip bahwa peningkatan temperatur secara eksponensial menyebabkan penurunan resistivitas batuan, sesuai dengan persamaan Arrhenius (Rahadinata, 2024). Hasil pemodelan termal secara spasial kemudian divalidasi silang menggunakan data logging suhu dari sumur landaian suhu BBR-1 dan BBR-2 yang dibor hingga kedalaman 164 meter. Kehadiran zona partial loss circulation (PLC) dan discharge fluida aktif pada kedalaman 164,45-meter digunakan sebagai indikator utama keberadaan akuifer panas aktif.

### Estimasi Potensi Sumber Daya Terukur

Perhitungan potensi energi panas bumi untuk pemanfaatan langsung mengacu pada standar teknis yang ditetapkan oleh Badan Geologi (2024). Klasifikasi potensi pada daerah Banda Baru dikategorikan sebagai sumber daya terukur (*measured resources*) karena ketersediaan data suhu dan debit dari hasil pengeboran sumur eksplorasi dangkal. Estimasi kuantitatif dilakukan menggunakan formula sebagaimana tercantum dalam Badan Geologi (2024).

## KERANGKA GEOSAINS DAN SISTEM PANAS BUMI

### Geologi Regional dan Tatanan Tektonik

Secara regional, Pulau Seram merupakan bagian dari sistem Busur Banda Luar (*Outer Banda Arc*) yang terletak pada zona tektonik kompleks akibat interaksi antara Lempeng Australia dan Blok Banda. Wilayah ini terletak pada zona imbrikasi Neogen dan telah dikaji secara regional terkait inventarisasi manifestasi panas buminya oleh Tjokrosapoetro dkk. (1993). Pulau Seram dicirikan oleh morfologi

pegunungan yang didominasi oleh puncak Gunung Binaiya (3.027 mdpl) dengan kerangka geologi yang ditandai oleh kehadiran batuan metamorf tua dari Kompleks Kobipoto, Taunusa, dan Tehoru. Tataan tektonik aktif ini menciptakan jaringan struktur rekahan yang menjadi kontrol utama bagi sirkulasi fluida panas bumi dalam sistem non-vulkanik di daerah ini.

### **Geologi Lokal: Morfologi, Litologi, dan Struktur**

Daerah prospek Banda Baru memiliki karakteristik geomorfologi perbukitan dengan sistem sungai permanen berarah utara-selatan. Berdasarkan survei rinci geologi, litologi penyusun wilayah studi terdiri atas satuan metamorf (filit dan sekis), granit intrusif, serta endapan konglomerat dan aluvial di bagian permukaan. Batuan metamorf di daerah ini memiliki porositas primer yang rendah, namun kehadiran permeabilitas sekunder berupa rekahan aktif meningkatkan kapasitasnya untuk bertindak sebagai host rock reservoir dangkal. Struktur geologi di daerah penyelidikan didominasi oleh sesar mendatar dan sesar normal yang berorientasi baratlaut-tenggara serta baratdaya-timurlaut. Sesar Noonnaano, Sesar Banda Baru, dan Sesar Banda Lama diidentifikasi sebagai struktur permeabel utama yang mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan.

### **Karakteristik Geokimia Fluida dan Gas**

Sistem panas bumi Banda Baru diklasifikasikan sebagai sistem satu fasa cair (*liquid-dominated system*) berdasarkan karakteristik manifestasi permukaannya yang dicirikan oleh debit rendah dan emisi gas yang lemah. Analisis kimia air menunjukkan bahwa fluida termasuk dalam tipe bikarbonat dengan kandungan  $\text{HCO}_3$  yang tinggi, mencerminkan interaksi intensif antara fluida panas bumi dengan batuan karbonatan serta pembentukan travertin. Data gas tanah mengidentifikasi anomali emisi  $\text{CO}_2$  yang signifikan ( $>4,2\%$ ) di sekitar mata air panas, yang menjadi indikator adanya aliran panas konvektif

bawah permukaan melalui zona permeabel. Selain itu, analisis isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta\text{D}$  yang mendekati garis air meteorik menandakan kontribusi dominan dari air tanah dangkal dalam sistem reservoir tersebut.

### **Pemodelan Geofisika dan Karakteristik Termal**

Estimasi sebaran temperatur isothermal dihitung melalui analisis korelasi antara gradien resistivitas dari data Magnetotellurik (MT) dan gradien panas bumi (Rahadinata, 2024). Hubungan ini didasarkan pada prinsip bahwa peningkatan temperatur secara eksponensial menyebabkan penurunan resistivitas batuan, sesuai dengan persamaan Arrhenius (Rahadinata, 2024). Hasil pemodelan termal secara spasial kemudian divalidasi silang menggunakan data logging suhu dari sumur landaian suhu BBR-1 dan BBR-2 yang dibor hingga kedalaman 164 meter. Kehadiran zona *partial loss circulation* (PLC) dan discharge fluida aktif pada kedalaman 164,45 meter digunakan sebagai indikator utama keberadaan akuifer panas aktif.

### **Hasil Pengeboran dan Validasi Reservoir Dangkal**

Validasi terhadap model geosains dilakukan melalui pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 dan BBR-2. Sumur BBR-1 yang dibor hingga kedalaman 164 meter berhasil menembus formasi filit dan sekis yang mengalami rekahan aktif. Bukti empiris keberadaan *shallow geothermal reservoir* ditunjukkan dengan munculnya semburan air panas mencapai suhu  $95^\circ\text{C}$  pada kedalaman 164,45 meter. Kehadiran zona *partial loss circulation* (PLC) pada interval kedalaman 130-165 meter mengonfirmasi permeabilitas sekunder yang signifikan di dalam batuan metamorf. Hasil logging temperatur menunjukkan suhu dasar lubang sebesar  $130^\circ\text{C}$  pada kedalaman 160 meter di sumur BBR-1, yang secara langsung memvalidasi anomali termal dan model spasial area prospek.

## HASIL

### Zonasi Potensi Air Tanah Berbasis *Multi-Influencing Factor* (MIF)

Pemetaan spasial menggunakan metode *Multi-Influencing Factor* (MIF) terhadap tujuh parameter hidrogeologi menghasilkan indeks potensi akumulasi air tanah yang berkisar antara 2,97 hingga 7,32 dengan nilai rata-rata 5. Berdasarkan distribusi statistik tersebut, wilayah studi diklasifikasikan menjadi empat kategori: sangat rendah (9%), rendah (35%), tinggi

(53%), dan sangat tinggi (4%). Analisis integratif menunjukkan bahwa zona dengan potensi tinggi hingga sangat tinggi didominasi oleh satuan litologi endapan aluvial dan konglomerat yang memiliki tingkat infiltrasi lebih baik dibandingkan batuan metamorf di sekitarnya. Konsentrasi tertinggi dari zona potensi ditemukan di sepanjang koridor Sesar Noonnaano, yang mengindikasikan peran struktur geologi tersebut sebagai pengontrol utama sirkulasi fluida dalam sistem panas bumi dangkal ini (Gambar 2).

**Tabel 1.** Rangkuman Bobot Kriteria, Bobot Kelas, dan Referensi Bobot Kelas

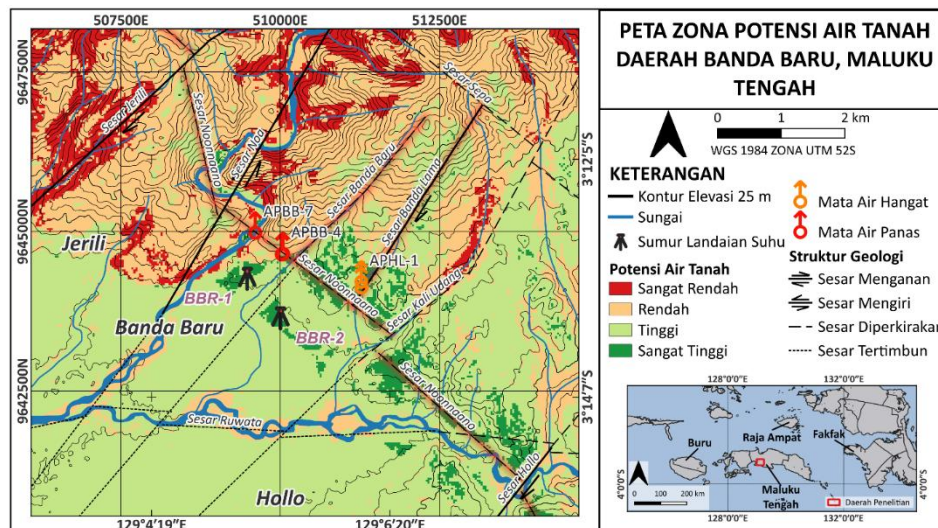
| No | Kriteria                        | Bobot Kriteria | Kelas                          | Bobot Kelas | Referensi Bobot Kelas                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|---------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Litologi                        | 0,25           | Aluvial                        | 8           | Yeh dkk. (2008), Pinto dkk. (2017), Etikala dkk. (2019), Raju dkk. (2019), Mukherjee dan Singh (2020), serta Noori dan Singh (2024)                                                                                                                             |
|    |                                 |                | Konglomerat                    | 6           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | Granit                         | 2           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | Metamorf                       | 2           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 2  | Jarak dari Sesar yang Permeabel | 0,13           | 0-100 m                        | 9           | Ampuero dan Mao (2017), Wu dkk. (2019), dan Wu dkk. (2020), Satriyo (2025)                                                                                                                                                                                      |
|    |                                 |                | 100-250 m                      | 7           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 250-500 m                      | 5           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 500-1000 m                     | 3           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | > 1000 m                       | 1           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 3  | Kemiringan Lereng               | 0,16           | < 5°                           | 6           | Pinto dkk. (2017)                                                                                                                                                                                                                                               |
|    |                                 |                | 5–10°                          | 4           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 10–45°                         | 2           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | > 45°                          | 1           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4  | Densitas Drainase               | 0,13           | < 0,53 km/km <sup>2</sup>      | 9           | Abate dkk. (2022), Ivana dkk. (2022), dan Padmanagara (2023), Satriyo (2025)                                                                                                                                                                                    |
|    |                                 |                | 0,53–1,47 km/km <sup>2</sup>   | 7           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 1,47–2,23 km/km <sup>2</sup>   | 5           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 2,23–3,46 km/km <sup>2</sup>   | 4           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | >3,46 km/km <sup>2</sup>       | 2           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 5  | Densitas Kelurusan              | 0,13           | < 3,8 km/km <sup>2</sup>       | 2           | Abate dkk. (2022), Ivana dkk. (2022), Sandoval dkk. (2022), dan Padmanagara (2023), Satriyo (2025)                                                                                                                                                              |
|    |                                 |                | 3,8–10,11 km/km <sup>2</sup>   | 4           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 10,11–15,49 km/km <sup>2</sup> | 5           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 15,49–20,48 km/km <sup>2</sup> | 7           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 6  | Tutupan Lahan                   | 0,16           | Hutan                          | 7           | Yeh dkk. (2009), Magesh dkk. (2012), Pinto dkk. (2017), Etikala dkk. (2019), Ivana dkk. (2019), Sandoval dan Tiburan Jr (2019), Mukherjee dan Singh (2020), Owolabi dkk. (2020), Zghibi dkk. (2020), Doke dkk. (2021), Abate dkk. (2022), dan Thanh dkk. (2022) |
|    |                                 |                | Padang Rumput                  | 6           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | Perkebunan                     | 7           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | Permukiman                     | 2           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | Vegetasi Gundul/Hamparan       | 3           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 7  | Curah Hujan                     | 0,06           | 1535–1677 mm/tahun             | 3           | Pinto dkk. (2017), BMKG                                                                                                                                                                                                                                         |
|    |                                 |                | 1678–1764 mm/tahun             | 4           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 1765–1846 mm/tahun             | 5           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    |                                 |                | 1847– 1989 mm/tahun            | 6           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |

### Integrasi Anomali Geosains (3G) dan Pemodelan Termal

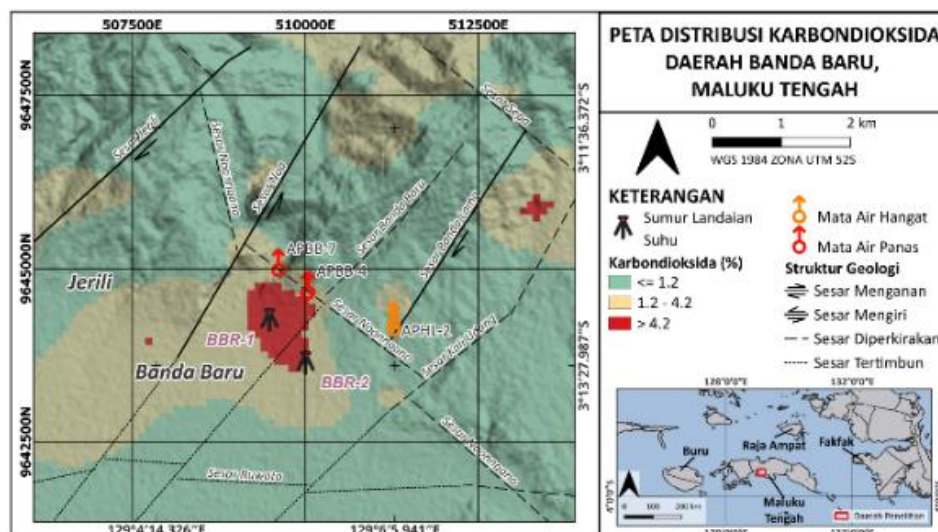
Survei geokimia tanah menunjukkan adanya anomali emisi gas CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi signifikan (>4,2%) yang terpusat di sekitar manifestasi mata air panas dan meluas secara struktural ke arah selatan. Kehadiran anomali gas ini menjadi indikator kuat adanya aliran panas konvektif bawah permukaan yang mencapai permukaan melalui zona rekahan. Sejalan dengan data geokimia, hasil pemetaan tahanan jenis semu menggunakan konfigurasi Schlumberger mengidentifikasi zona resistivitas rendah (<50 ohm-m) yang melingkupi area

manifestasi utama. Berbeda dengan sistem hidrotermal dalam, zona resistivitas rendah pada kedalaman dangkal ini dikonfirmasi sebagai representasi dari akuifer air panas aktif (Gambar 3).

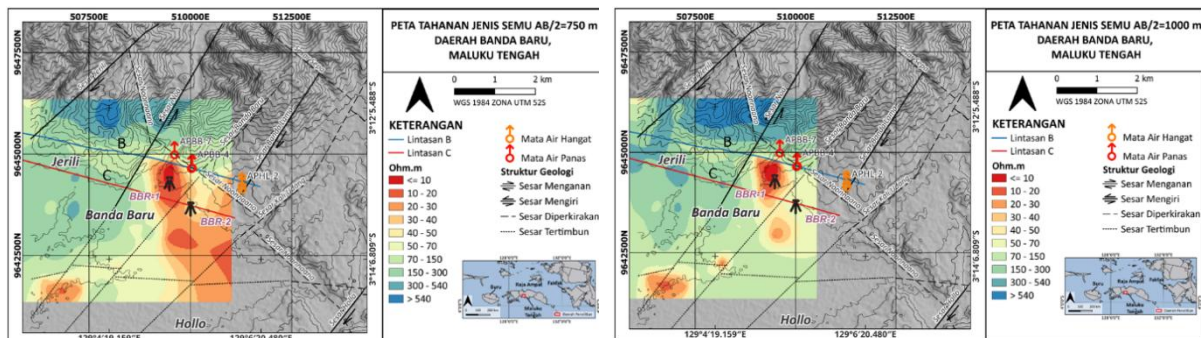
Estimasi temperatur bawah permukaan berdasarkan korelasi gradien resistivitas Magnetotellurik (MT) menunjukkan bahwa pada kedalaman 200-meter, area dengan suhu melebihi 150°C telah terbentuk secara luas, melingkupi titik-titik sumur landaian suhu. Hubungan negatif eksponensial antara resistivitas dan temperatur ini menjadi dasar dalam mendelineasi luasan spasial area prospek.



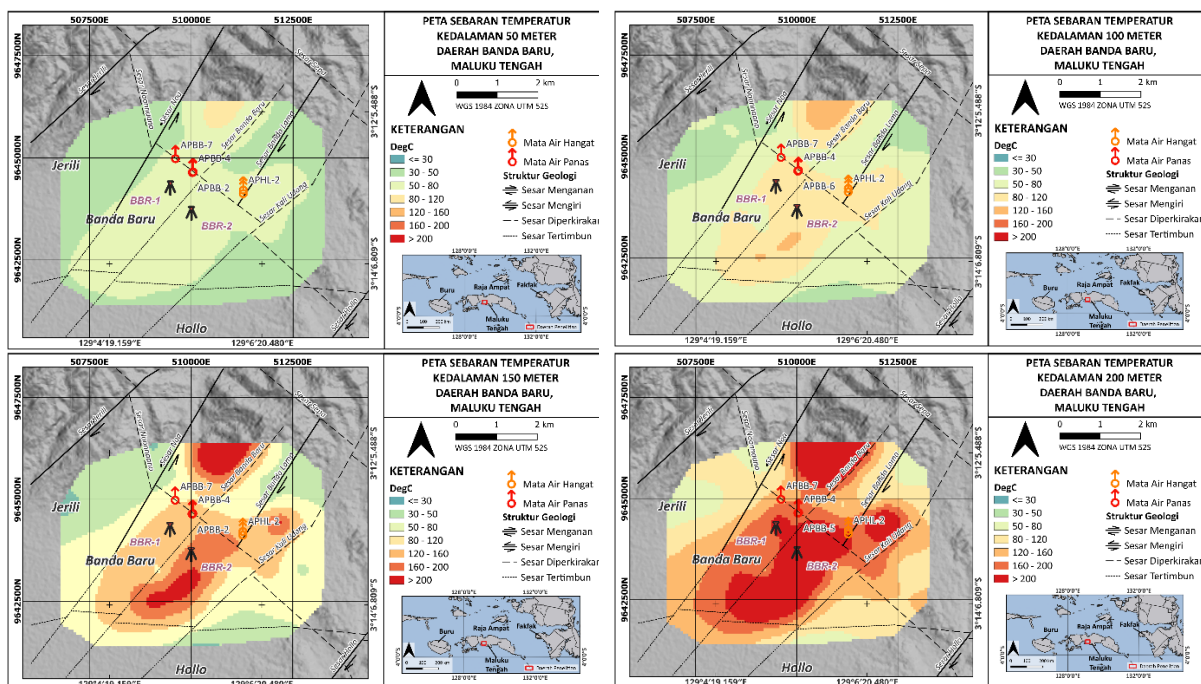
Gambar 2. Peta zona potensi air tanah Daerah Panas Bumi Banda Baru



Gambar 3. Peta Distribusi CO<sub>2</sub> di lokasi penelitian Panas Bumi Daerah Banda Baru Digambar ulang dari Anonim (2022)



**Gambar 4.** Peta Tahanan Jenis Semu AB/2 = 250 m, AB/2=500 m, AB/2=750 m, AB/2=1000 m, daerah Panas Bumi Banda Baru Digambar Ulang dari Laporan Survei Geofisika Terpadu Oleh PSDMBP (2011)



**Gambar 5.** Peta Sebaran Temperatur Daerah Panas Bumi Banda Baru

### Delineasi Area Prospek dan Validasi Sumur Eksplorasi Dangkal

Melalui teknik anomaly stacking yang mensintesis zona potensi air tanah sangat tinggi, resistivitas semu <50 ohm-m, anomali CO<sub>2</sub>, serta estimasi temperatur isothermal >150°C pada kedalaman 200 meter, berhasil ditetapkan area prospek pemanfaatan langsung seluas 6,49 km<sup>2</sup>. Model prospek ini divalidasi secara langsung melalui hasil pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 dan BBR-2. Sumur BBR-1 berhasil memotong zona fluida aktif pada kedalaman 164,45-meter dengan temperatur mencapai 95°C dan menyembur setinggi 6 meter. Penemuan

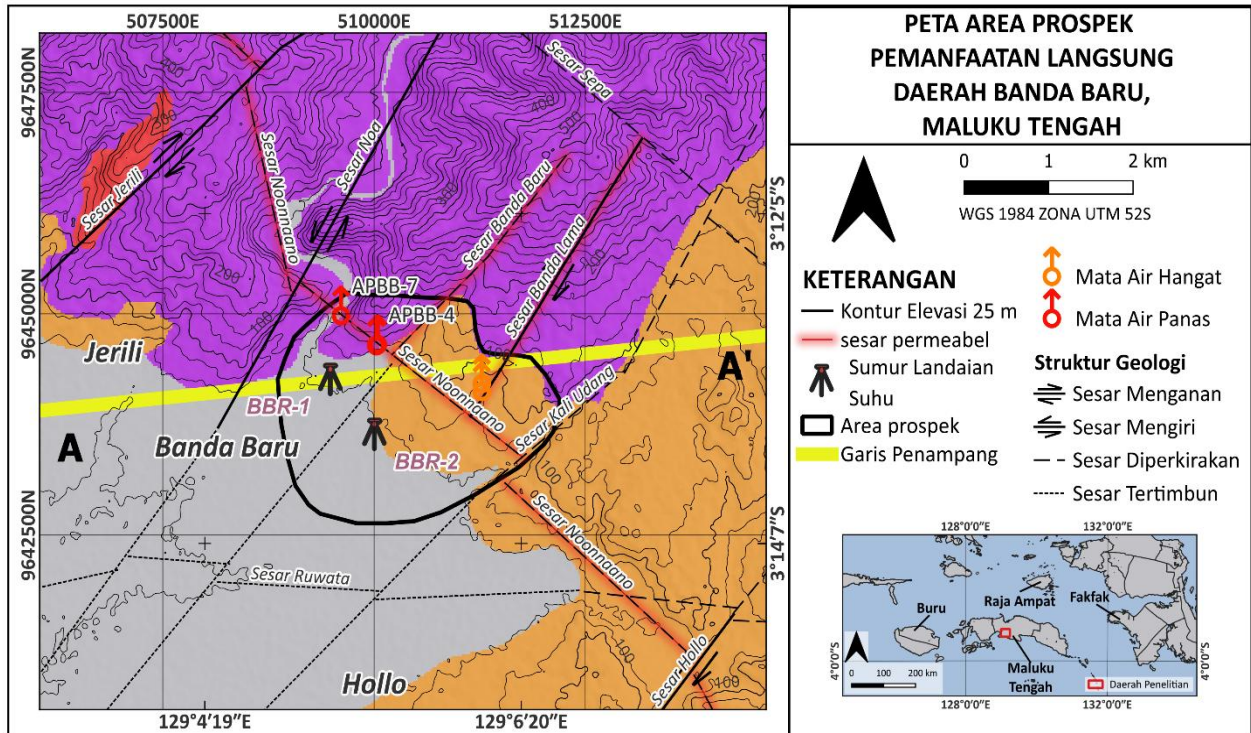
zona partial loss circulation (PLC) pada interval kedalaman 130 - 165-meter memperkuat bukti adanya permeabilitas sekunder yang signifikan pada formasi batuan metamorf (filit dan sekis) yang bertindak sebagai reservoir dangkal.

### Estimasi Potensi Cadangan Terukur

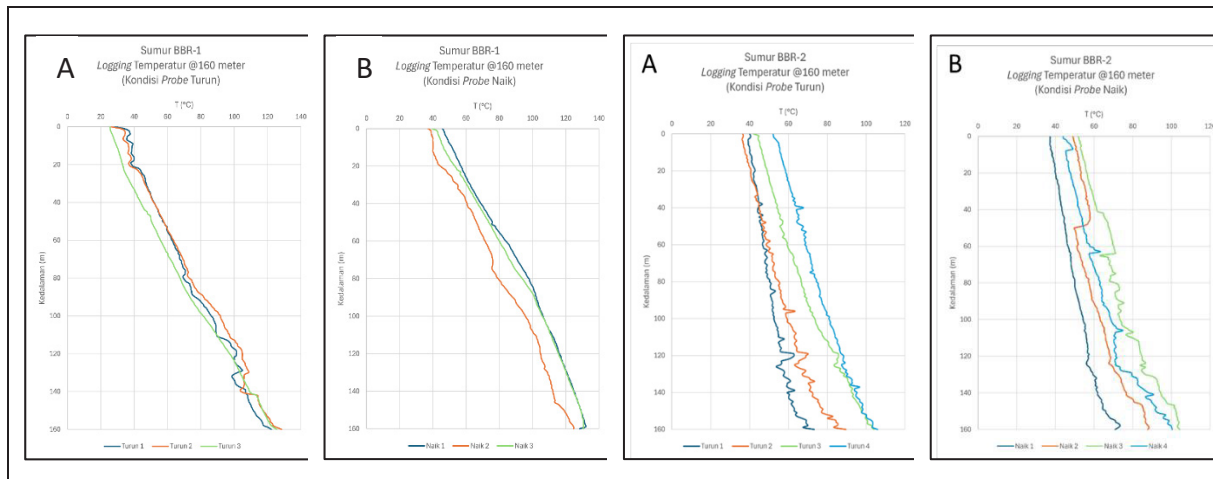
Berdasarkan debit aktual yang terukur pada sumur BBR-1 sebesar 25 liter/detik dan akumulasi debit dari sembilan manifestasi permukaan sebesar 2,4 liter/detik, dilakukan perhitungan potensi energi untuk pemanfaatan langsung sesuai dengan petunjuk teknis Badan Geologi (2024). Hasil perhitungan menunjukkan

bahwa lapangan panas bumi Banda Baru memiliki total sumber daya terukur sebesar 6,3 MW<sub>t</sub>. Potensi ini didominasi oleh kontribusi sumur BBR-1 sebesar 6,15 MW<sub>t</sub>,

yang menegaskan kelayakan daerah ini untuk pengembangan utilisasi termal secara berkelanjutan (Tabel 2).



**Gambar 6.** Peta Area Prospek Pemanfaatan Langsung Panas Bumi Di Daerah Banda Baru



**Gambar 7.** Grafik Logging Temperatur Sumur BBR-1 dan BBR-2. (A) Kondisi Probe Turun Dan (B) Kondisi Probe Naik Diambil dari PSDMBP (2024)

**Tabel 2.** Data Lapangan Karakteristik Mata Air Panas Daerah Panas Bumi Banda Baru

| NO | NAMA                            | LOKASI                            | KOORDINAT<br>(UTM) |         | ELEVASI | TEMPERATUR |      | pH  | DEBIT |       |
|----|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------|---------|------------|------|-----|-------|-------|
|    |                                 |                                   | X (m)              | Y (m)   |         | (mdpl)     | AIR  |     |       | UDARA |
|    |                                 |                                   |                    |         |         |            | (°C) |     |       | (°C)  |
| 1  | Air Panas Banda Baru-1 (APBB-1) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510024             | 9644643 | 137     | 59,3       | 30,9 | 6,7 | 0,5   |       |
| 2  | Air Panas Banda Baru-2 (APBB-2) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510027             | 9644639 | 135     | 63,1       | 33,8 | 6,7 | 0,3   |       |
| 3  | Air Panas Banda Baru-3 (APBB-3) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510039             | 9644646 | 138     | 60,2       | 33,4 | 6,6 | 0,4   |       |
| 4  | Air Panas Banda Baru-4 (APBB-4) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510045             | 9644653 | 139     | 61,8       | 33,2 | 6,9 | 0,1   |       |
| 5  | Air Panas Banda Baru-5 (APBB-5) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510036             | 9644646 | 138     | 59,6       | 32,9 | 6,6 | 0,2   |       |
| 6  | Air Panas Banda Baru-6 (APBB-6) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 510031             | 9644649 | 138     | 60,1       | 30,8 | 6,8 | 0,7   |       |
| 7  | Air Panas Banda Baru-7 (APBB-7) | Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai | 509609             | 9644979 | 90      | 58,1       | 29,9 | 7,4 | 0,07  |       |
| 8  | Air Panas Hollo-1 (APHL-1)      | Kelurahan Hollo, Kecamatan Amahai | 511274             | 9644211 | 104     | 35,5       | 28,4 | 6,1 | 0,04  |       |
| 9  | Air Panas Hollo-2 (APHL-2)      | Kelurahan Hollo, Kecamatan Amahai | 511273             | 9644123 | 107     | 37,1       | 29,2 | 6,4 | 0,1   |       |

## PEMBAHASAN

### Karakteristik Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik Banda Baru

Sistem panas bumi Banda Baru diidentifikasi sebagai sistem non-vulkanik yang dikontrol sepenuhnya oleh zona rekahan (*fracture zone-hosted*) pada batuan metamorf. Karakteristik fluida yang didominasi fase cair (*liquid-dominated*) dengan temperatur manifestasi rata-rata 55°C dan tipe air bikarbonat mencerminkan interaksi fluida-batuan yang kuat dengan formasi karbonatan serta pengaruh pencampuran air meteorik yang intensif. Hal ini didukung oleh analisis isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta\text{D}$  yang memplot sampel mendekati garis air meteorik, mengindikasikan bahwa sistem reservoir dangkal di wilayah ini sangat bergantung pada sirkulasi air tanah dangkal sebagai media pembawa panas. Fenomena ini mempertegas pentingnya integrasi pemodelan air tanah dalam delineasi prospek panas bumi non-vulkanik.

### Evaluasi Akurasi dan Success Rate Model Spasial

Keandalan model spasial terintegrasi dalam mengidentifikasi *shallow geothermal reservoir* di Banda Baru ditunjukkan oleh tingkat keberhasilan (*success rate*) yang tinggi pada tahap validasi. Model ini tidak hanya berhasil memprediksi lokasi sumur landaian suhu BBR-1 dan BBR-2, tetapi juga mencakup seluruh titik manifestasi utama (APBB 1-7 dan APLH 1-2) di dalam zona tumpang tindih (*overlay*) anomali utama.

Bukti konkret efektivitas model ini terlihat dari fakta bahwa sumur BBR-1, yang ditempatkan pada zona potensi air tanah sangat tinggi dan anomali  $\text{CO}_2$  tinggi, berhasil mengeluarkan fluida panas 95°C pada kedalaman 164 meter. Selain itu, sumur BBR-2 yang berada di dalam area sebaran temperatur >200°C hasil estimasi MT divalidasi oleh data logging yang menunjukkan gradien suhu aktif. Keberhasilan model dalam mendeteksi reservoir aktif pada seluruh titik pengeboran (2 dari 2 sumur atau 100%

*success rate* untuk target dangkal) memberikan indikasi kuat bahwa integrasi metode MIF dan *anomaly stacking* memiliki presisi yang sangat baik untuk sistem fracture-hosted.

### Re-evaluasi Interpretasi Geofisika: Akuifer Panas vs Caprock

Salah satu kontribusi ilmiah penting dalam studi ini adalah re-evaluasi terhadap anomali resistivitas rendah (<50 ohm-m). Berdasarkan interpretasi konvensional pada sistem hidrotermal vulkanik, zona resistivitas rendah sering dianggap sebagai lapisan penudung (*caprock*) yang kaya lempung ubahan (Cumming, 2016). Namun, integrasi data pengeboran BBR-1 menunjukkan adanya partial loss circulation (PLC) pada kedalaman 130 meter dan semburan fluida aktif pada 164 meter di dalam formasi batuan metamorf (filit dan sekis). Hal ini membuktikan bahwa pada reservoir panas bumi dangkal Banda Baru, nilai tahanan jenis rendah tersebut mewakili zona akuifer panas aktif yang jenuh fluida, bukan lapisan penudung statis. Fenomena ini sejalan dengan prinsip bahwa anomali data resistivitas dapat menyesatkan jika tidak didukung oleh pemodelan konseptual yang mengintegrasikan data geologi, hidrologi, dan struktur (Cumming, 2009). Pada karakteristik reservoir basement, permeabilitas sekunder sering kali menjadi faktor yang lebih dominan dalam menurunkan resistivitas batuan dibandingkan dengan keberadaan lapisan lempung ubahan konvensional (Cumming, 2016).

### Analisis Komparatif dengan Sistem Panas Bumi Lain

Dibandingkan dengan sistem panas bumi vulkanik di Jawa Barat, seperti Prospek Leles yang memiliki total potensi 3,3 MW<sub>t</sub>, lapangan Banda Baru menunjukkan potensi sumber daya terukur yang lebih signifikan sebesar 6,3 MW<sub>t</sub>. Namun, jika dibandingkan dengan sistem temperatur tinggi seperti Cisolok-Cisukarama (30-45 MW), sistem Banda Baru lebih terfokus pada utilisasi skala menengah untuk pemanfaatan langsung. Keunggulan model

yang diterapkan di Banda Baru terletak pada penggunaan parameter MIF yang secara spesifik dirancang untuk menangani sistem non-vulkanik, berbeda dengan pemodelan Boolean murni yang sering digunakan pada lapangan vulkanik untuk penentuan tapak sumur (Nugraha dkk., 2023).

## Keterbatasan Penelitian dan Analisis Ketidakpastian

Meskipun menunjukkan akurasi validasi yang tinggi, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan teknis yang perlu dipertimbangkan. Pertama, penentuan batas spasial area prospek sebesar 6,49 km<sup>2</sup> masih bersifat kualitatif dikarenakan belum adanya standar global yang baku untuk delimitasi spasial pemanfaatan langsung. Kedua, estimasi sebaran temperatur sangat bergantung pada gradien resistivitas MT yang secara inheren memiliki keterbatasan resolusi pada kedalaman sangat dangkal di bawah 50 meter. Terakhir, pemodelan saat ini masih terbatas pada evaluasi hingga kedalaman 200 meter; oleh karena itu, karakteristik reservoir di bawah interval tersebut masih memerlukan validasi melalui pengeboran sumur yang lebih dalam untuk memahami kapasitas sistem secara menyeluruh.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendelineasi area prospek panas bumi untuk pemanfaatan langsung di daerah Banda Baru, Maluku Tengah, dengan mengintegrasikan model potensi air tanah dan data geosains terpadu. Implementasi metode *Multi-Influencing Factor* (MIF) menggunakan tujuh parameter fisik lahan terbukti efektif dalam memetakan zona akumulasi air tanah dangkal yang menjadi komponen vital dalam sistem panas bumi non-vulkanik. Hasil integrasi melalui teknik anomaly stacking mengidentifikasi area prospek seluas 6,49 km<sup>2</sup>. Area ini dicirikan oleh zona potensi air tanah sangat tinggi, nilai tahanan jenis semu < 50 ohm-m, anomali emisi CO<sub>2</sub> permukaan > 4,2%, serta estimasi temperatur isothermal > 150°C pada kedalaman 200 meter.

Sistem panas bumi Banda Baru diklasifikasikan sebagai sistem satu fasa cair (*liquid-dominated*) yang dikontrol oleh zona rekahan (*fracture-hosted*) pada batuan metamorf. Validasi model melalui pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 menunjukkan akurasi prediksi yang tinggi dengan ditemukannya fluida panas bersuhu 95°C pada kedalaman dangkal 164 meter. Temuan ini sekaligus mengonfirmasi re-evaluasi interpretasi geofisika bahwa zona resistivitas rendah di daerah ini merepresentasikan akuifer air panas aktif, bukan lapisan penudung (*caprock*). Berdasarkan debit aktual sumur sebesar 25 liter/detik dan karakteristik manifestasi permukaan, total potensi sumber daya terukur (measured resources) di wilayah ini diestimasi sebesar 6,3 MW<sub>t</sub>.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. Prihadi Soemintadiredja, MS selaku pembimbing tesis, kepada LPDP atas beasiswa yang telah diberikan hingga penulis lulus, kemudian kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi c.q. Koordinator Panas Bumi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) atas izin penggunaan data untuk penulisan artikel ini, dan juga semua pihak yang berkontribusi atas penerbitan tulisan ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada tim editor yang telah memberikan koreksi serta saran dalam perbaikan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Geologi. (2024). Keputusan Kepala Badan Geologi Nomor 145.K/GL.04/BGL/2024 tentang Petunjuk Teknis Tata Cara Perhitungan Potensi Pemanfaatan Langsung Panas Bumi pada PSDMBP. Bandung: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Akter, A., Uddin, A. M. H., dkk. (2020). Predicting groundwater recharge potential zones using geospatial technique. *Sustainable Water*

- Resources Management, 6(24).  
<https://doi.org/10.1007/s40899-020-00384-w>
- Chiodini, G., Caliro, S., dkk. (2021). The Carbon Dioxide Emission as Indicator of the Geothermal Heat Flow—Review of Local and Regional Applications with a Special Focus on Italy. *Energies*, 14(21), 7416.  
<https://doi.org/10.3390/en14217416>
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. *Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Cumming, W. (2016). Geophysics and resource conceptual models in geothermal exploration and development. In *Geothermal Power Generation* (pp. 37-105). Woodhead Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100337-4.00003-6>
- Gaillard, F. (2004). Laboratory measurements of electrical conductivity of hydrous and dry silicic melts under pressure. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 218(1/2), 215–228.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00652-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00652-5)
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023. *Geothermal Energy*, 12(1), 14.  
<https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- Kisiki, C. P., Bekele, T. W., dkk. (2022). Geospatial application on mapping groundwater recharge zones in Makutupora basin, Tanzania. *Heliyon*, 8(10), e10760.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10760>
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Lund, J. W., Huttner, G. W., & Toth, A. N. (2022). Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020. *Geothermics*, 105, 102522.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102522>
- Maryadi, M. & Mizunaga, H. (2016). Correlation Analysis between Audio-Magnetotelluric and Borehole Thermograms Data for Developing Electromagnetic Geothermometry. *International Symposium on Earth Science and Technology*.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Springer-Verlag.
- Noorollahi, Y., Ghasempour, R., & Jalilinasrabady, S. (2015). A GIS based integration method for geothermal resources exploration and site selection. *Energy Exploration & Exploitation*, 33(2), 243–258.  
<https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.2.243>
- Nugraha, H. S., Wahyuningsih, R., dkk. (2024). Prakiraan Potensi dan Utilisasi Energi Panas Bumi untuk Pemanfaatan Langsung di Prospek Leles, Cianjur, Jawa Barat. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 19(3), 209–222.  
<https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i3.435>
- Nugraha, H. S., Wildan, D., dkk. (2023). Rekomendasi Area Lokasi Tapak Sumur Eksplorasi Panas Bumi Menggunakan Pemodelan Sistem Informasi Geografis di Daerah Prospek Cisolak-Cisukarame, Sukabumi, Jawa Barat. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 18(3), 197–215.  
<https://doi.org/10.47599/bsdg.v18i3.407>
- Nwaiwu, U., Leach, M., & Liu, L. (2023). Development of an Improved Decision Support Tool for

- Geothermal Site Selection in Nigeria Based on Comprehensive Criteria. *Energies*, 16(22), 7602. <https://doi.org/10.3390/en16227602>
- PSDMBP. (2011). Laporan akhir survei geofisika terpadu, gaya berat, geomagnet, dan geolistrik, daerah panas bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- PSDMBP. (2021). Laporan Integrasi Data Akuisisi Geosains Daerah Panas Bumi Bittuang, Cisolok-Cisukarame, Nage, Gunung Endut, Sembalun, Gunung Tampomas, Gunung Ciremai, dan Daerah Panas Bumi Marana. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- PSDMBP. (2022). Laporan Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- PSDMBP. (2022). Laporan Survei Rinci Geokimia Daerah Panas Bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- PSDMBP. (2022). Laporan akhir survei rinci magnetotelurik (MT) dan time domain electromagnetic (TDEM) daerah panas bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- PSDMBP. (2025). Laporan survei pengeboran landaian suhu BBR-1 daerah panas bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- Rahadinata, T. (2024). Analisis gradien resistivitas dari data magnetotellurik untuk deliniasi area prospek di Lapangan Panas Bumi Nage, Nusa Tenggara Timur, Indonesia (Tesis magister). Institut Teknologi Bandung.
- Shaban, A., Khawlie, M., dkk. (2001). Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon—eastern Mediterranean. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 93–101. <https://doi.org/10.1007/s100640000088>
- Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2001). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14, 433–443.
- Subramani, D., Kamaraj, P., dkk. (2024). Mapping of Groundwater Recharge Zones in Hard Rock Aquifer through Analytic Hierarchy Process in Geospatial Platform. *Water*, 16(11), 1484. <https://doi.org/10.3390/w16111484>
- Tende, A. W., Iliya, M. M., dkk. (2025). GIS-based multi-criteria predictive modelling for geothermal energy exploration. *Energy Geoscience*, 6(1), 100409. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2025.100409>
- Thapa, R., Gupta, S., dkk. (2020). Application of geospatial modeling in deciphering groundwater recharge site and structures in Paschim Medinipur district, India. *Sustainable Water Resources Management*, 6(79). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00442-3>
- Tjokrosapoetro, S., Achdan, A., & Rusmana, E. (1993). Peta Geologi Lembar Ambon, Maluku. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- 6Zghibi, A., Mirchi, A., dkk. (2020). Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid Mediterranean coastal aquifer. *Water*, 12(9), 2525. <https://doi.org/10.3390/w12092525>

### UCAPAN TERIMA KASIH

Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para editor dan mitra bestari atas kerjasamanya dalam proses review lima makalah untuk edisi kedua Buletin Sumber Daya Geologi tahun 2025. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya, antara lain Prof. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D, Prof. Euis Tintin Yuningsih, M.Sc, Ph.D, Prof. Binarko Santoso, M.Sc, Dr.Eng, Ir. Agus Didit Haryanto, M.T, Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA, Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T, Ir. Bambang Pardiarto, Ir. Teuku Ishlah, Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi dan Dr.rer.nat. Ernowo, ST, MT.

Kami mengucapkan terima kasih kepada para penulis yang telah mengirimkan makalah ilmiahnya kepada sekretariat Buletin Sumber Daya Geologi. Selain itu, ucapan terimakasih diucapkan kepada para kontributor foto yang telah berpartisipasi untuk mengisi Galeri Foto.

Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada semua unsur Dewan Redaksi dalam proses penyusunan dan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.20 Nomor.2, Tahun 2025. Semoga hadirnya Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bentuk cetakan maupun digital secara *online* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

Salam sehat dan tetap semangat.



**BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI**

Volume 20 Nomor 3 Tahun 2025

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

**INDEKS PENULIS**

Achmad Djumarma Wirakusumah  
Politeknik Energi dan Pertambangan  
Bandung, Indonesia  
Email: ade.wirakusumah@gmail.com

Ahmad Helman Hamdani  
Universitas Padjadjaran, Indonesia  
Email: ahmad.helman@unpad.ac.id

Dadan Wildan  
Politeknik Energi dan Pertambangan  
Bandung, Indonesia  
Email: Dadanwildan2000@yahoo.com

Dzil Mulki Heditama  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: dzil.mulki@gmail.com

Erawan Melisano  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: erawanmelisanos@gmail.com

Fadillah Azhar Deaudin Kurniawan  
PT Geosensei Teknologi Indonesia  
Email: fadillahazhar74@gmail.com

Farizan Qurunulbahri  
Universitas Indonesia  
Email: qfarizan24@gmail.com

Hartaja M. Hatta Wicaksono  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: hartajawicaksono@gmail.com

Husin Setia Nugraha  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: husin.nugraha@esdm.go.id

Muhammad Iqbal Ardiansyah  
Universitas Padjadjaran, Indonesia  
Email: iqbal17023@mail.unpad.ac.id

Muhammad Satriyo  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: msatriyo70@gmail.com

Nurdrajat  
Universitas Padjadjaran, Indonesia  
Email: nurdrajat@unpad.ac.id

Prihadi Sumintadireja  
Institut Teknologi Bandung, Indonesia  
Email:

Putri Rindu Bunga Kasih  
Politeknik Energi dan Pertambangan  
Bandung, Indonesia  
Email:  
putririndubungakasih01@gmail.com

Riansyah Widisaputra  
PT Bumi Suksesindo, Indonesia  
Email: rianwidis@gmail.com

Santia Ardi Mustofa  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: santia.ardi@gmail.com

Tatik Handayani  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: hanitatik@gmail.com

Tony Rahadinata  
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan  
Panas Bumi, Indonesia  
Email: tony.rahadinata@gmail.com



**BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI**

Volume 20 Nomor 3 Tahun 2025

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

**INDEKS KATA KUNCI**

Alterasi 147, 149, 151-157, 171, 172, 174,  
175, 178, 180-188, 190, 191, 197,  
198  
Banda Baru 201-205, 207-212, 214  
Bijih sulfida 147-150, 152, 157  
Cekungan Asam-asam 159, 160  
Chargeabilitas 147, 149, 152-156  
Delineasi prospek 201, 211  
Gunung Papandayan 187-193, 197, 198  
Kadar Cu–Au 171-175, 179, 181, 183-185  
Lapisan Batubara 159, 160, 162, 164, 165,  
167, 168  
Manifestasi termal 187-193, 195, 197, 199  
Metode AHP 159, 162, 168  
MIF 201-204, 206, 211, 212

Mineralisasi 147-157, 171-174, 176, 180-  
186  
Panas bumi 147, 149, 156, 157, 159, 171,  
185, 187, 188, 197, 198, 201-214  
Panas bumi non-vulkanik 201, 203, 205,  
207, 209, 211-213  
Pemanfaatan langsung 201, 202, 204,  
208, 209, 211-213  
Penginderaan jauh 187, 188, 197  
Porfiri 171-173, 175-177, 180, 183, 185  
Resistivitas 147-150, 152-157, 201, 204,  
205, 207, 208, 211, 212, 214  
Sumber Daya Batubara 159, 160, 162  
Sulfidasi tinggi 171-174, 185  
Suseptibilitas 147–149, 153-156  
UCG 159-162, 164-168



## BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : November 2025

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Farizan Qurunulbahri<sup>1</sup>, Dzil Mulki Heditama<sup>2</sup>, dan Hartaja M. Hatta Wicaksono<sup>2</sup><sup>1</sup>Prodi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, <sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara, dan Panas Bumi, Indonesia)**IDENTIFIKASI SEBARAN MINERALISASI LOGAM SULFIDA MENGGUNAKAN METODE POLARISASI TERINDUKSI DAN MAGNETIK DI KABUPATEN DAIRI, SUMATERA UTARA**

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2025 Vol. 20 No. 3 Hal. 147-157

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.510>

Eksplorasi bijih sulfida menjadi target penting dalam kegiatan usaha pertambangan karena menjadi sumber utama dari berbagai komoditas mineral logam yang dibutuhkan dalam industri pertambangan. Di Indonesia, potensi sumber daya bijih sulfida diperkirakan cukup besar, terutama dengan kondisi geologi yang kompleks sehingga menciptakan lingkungan ideal untuk pembentukan endapan bijih sulfida. Survei geofisika seperti metode geolistrik (resistivity dan polarisasi terinduksi) dan metode magnetik, telah terbukti efektif dalam mengevaluasi potensi mineralisasi logam sulfida di bawah permukaan. Penyelidikan ini dilakukan di Kabupaten Dairi, Sumatera Utara dengan tujuan untuk mengetahui korelasi antara resistivitas, chargeabilitas dan suseptibilitas. Tujuannya untuk menentukan zona mineralisasi logam sulfida dibawah permukaan yang berkaitan dengan komoditas emas dan logam dasar. Hasil penyelidikan menunjukkan karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam dengan rentang nilai resistivitas, chargeabilitas, dan suseptibilitas yang bervariasi. Karakteristik respon anomali batuan yang mengandung endapan mineral logam di lokasi penyelidikan menunjukan nilai resistivitas rendah hingga tinggi (1 – 86910  $\Omega$ m), chargeabilitas sedang hingga tinggi (110 – 611 msec), dan suseptibilitas sedang-tinggi ( $-0.4 - 1 \times 10^{-5}$  SI). Terdapat korelasi antara nilai-nilai ini, yakni zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi berkaitan dengan nilai resistivitas rendah hingga sedang dan suseptibilitas sedang, menunjukkan zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi argilik. Sementara itu, zona dengan chargeabilitas sedang hingga tinggi berkaitan dengan nilai resistivitas sedang hingga tinggi dan suseptibilitas sedang hingga tinggi, menunjukkan zona mineralisasi logam sulfida pada alterasi filik. Distribusi zona mineralisasi logam sulfida cenderung mengarah barat-timur searah urat kuarsa. Potensi zona mineralisasi logam sulfida diduga terdapat sampai kedalaman 150 m.

**Kata kunci:** alterasi, chargeabilitas, bijih sulfida, resistivitas, suseptibilitas

Muhammad Iqbal Ardiansyah, Ahmad Helman Hamdani, dan Nurdrajat (Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Indonesia)

**POTENSI PENGEMBANGAN GASIFIKASI BATUBARA BAWAH PERMUKAAN DI DAERAH ASAM-ASAM, KABUPATEN TANAH LAUT, KALIMANTAN SELATAN**

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2025 Vol. 20 No. 3 Hal. 159-169

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.539>

Potensi sumber daya batubara bawah permukaan belum dieksploitasi secara maksimal, sehingga dibutuhkan metode penambangan baru dan salah satunya adalah *underground coal gasification* (UCG). Cekungan Asam-asam merupakan salah satu cekungan penghasil batubara di Indonesia yang dapat dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi pengembangan UCG pada daerah tersebut. Penelitian ini mengidentifikasi kriteria geologi lapisan batubara seperti ketebalan lapisan, kedalaman, peringkat batubara, kemiringan lapisan, batuan pengapit, struktur geologi dan inventori batubara yang terletak di daerah Asam-asam. Data dikumpulkan melalui pengeboran inti dan analisis *well logging* pada 4 titik bor (MIA004–MIA007). Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah ini memiliki 9 lapisan batubara: A, B, C, D, E, F, G, H, dan I. Ketebalan lapisan batubara bervariasi antara 0,49 meter hingga 18,95 meter, dengan batuan pengapit yang didominasi oleh batulempung, serta beberapa lapisan yang diapit oleh batupasir dan batulanau. Peringkat batubara didominasi oleh bituminus zat terbang tinggi. Lapisan B, C, F, G dan H memenuhi kriteria inventori batubara. Evaluasi menggunakan metode *analytical hierarchy process* menunjukkan bahwa Lapisan F memiliki potensi tertinggi untuk pengembangan UCG dengan nilai rata-rata 0,78.

**Kata kunci:** UCG, Cekungan Asam-asam, Lapisan Batubara, Metode AHP, Sumber Daya BatubaraPutri Rindu Bunga Kasih<sup>1</sup>, Dadan Wildan<sup>1</sup>, Achmad Djumarma Wirakusumah<sup>1</sup>, Tatik Handayani<sup>2</sup>, Riansyah Widiasaputra<sup>3</sup><sup>1</sup>Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Indonesia, <sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral dan Panas Bumi, Indonesia, <sup>3</sup>PT Bumi Suksesindo, Indonesia)**HUBUNGAN KONDISI GEOLOGI TERHADAP SEBARAN KADAR CU-AU BERDASARKAN DATA INTI PENGEBORAN PROSPEK TUMPANGPITU, DAERAH SUMBERAGUNG, BANYUWANGI, JAWA TIMUR**

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2025 Vol. 20 No. 3 Hal. 171-186

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.549>

Daerah penelitian termasuk di wilayah Pesanggaran, Banyuwangi, Jawa Timur, berada pada bagian tengah busur magmatik Sunda-Banda yang berpotensi terbentuknya mineralisasi. Penelitian bertujuan mengetahui kondisi geologi, zona alterasi, mineralisasi dan tipe endapan bijih serta hubungannya dengan sebaran kadar Cu-Au. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan pada kegiatan eksplorasi lebih lanjut. Penelitian ini dilakukan berdasarkan pada data inti bor sebanyak enam titik lokasi pengeboran yang dilengkapi dengan analisis ASD, X-RD, petrografi, mineragrafi, dan statistik berupa *boxplot*. Litologi daerah penelitian terdiri dari enam satuan batuan, yaitu batupasir, dasit fase 1, diorit, diorit kuarsa, dasit fase 2, dan breksi freatomagmatik. Terdapat lima zona alterasi, yaitu zona *overprint* (alunit-klorit-mika-smektit±pirofilit±biotit±feldspar), zona argilik lanjut (pirofilit-mika-dikit-diaspor), zona argilik (kaolinit-mika±illit±diaspor), zona filik (serisit/mika-smektit±klorit±kalsit) dan zona propilitik (klorit-

mika-smektit±epidot±kalsit). Mineralisasi sulfida yang dijumpai berupa mineral pirit, kalkosit, enargit, dan kalkopirit dalam bentuk tersebar, masif dan urat yang hadir pada kedalaman <150 m dengan kadar berkisar antara 0,1 ppm s.d >1 ppm Au, dan <0,1% s.d. 0,5% Cu. Kehadiran mineral pirit, kalkopirit, bornit, dan kovelit, berasosiasi dengan urat-urat kuarsa yang intensif saling berpotongan hadir pada kedalaman >150 m dengan kadar berkisar antara 0,5 ppm s.d. >1 ppm Au, dan 0,3% s.d. >1% Cu. Zona sebaran kadar Cu-Au tinggi dikontrol oleh intrusi diorit kuarsa yang berhubungan dengan alterasi tipe argilik dan tipe filik dengan mineralisasi yang berhubungan kuat yaitu bornit-kalkopirit-pirit, enargit-kalkosit-pirit dan yang memiliki hubungan lemah yaitu mineral pirit. Tipe endapan bijih yaitu porfiri Cu-Au di-overprint oleh epitermal sulfidasi tinggi.

**Keywords:** Porfiri, sulfidasi tinggi, alterasi, mineralisasi, kadar Cu-Au

**Muhammad Satriyo<sup>1</sup>, Fadillah Azhar Deaudin Kurniawan<sup>2</sup>, Santia Ardi Mustofa<sup>1</sup> dan Tony Rahadinata<sup>1</sup>**  
(<sup>1</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Indonesia, <sup>2</sup>PT Geosense Teknologi Indonesia)

**KARAKTERISASI MANIFESTASI TERMAL MENGGUNAKAN METODE RASIO SALURAN, LAND SURFACE TEMPERATURE, DAN NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX DI LAPANGAN PANAS BUMI GUNUNG PAPANDAYAN, JAWA BARAT**

**Buletin Sumber Daya Geologi**

**BSDG November 2025 Vol. 20 No. 3 Hal. 187-199**

**DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.515>**

Daerah penelitian berada di Lapangan Panas Bumi Gunung Papandayan yang menarik untuk dikaji lebih lanjut dikarenakan adanya beberapa manifestasi termal yang dijumpai di permukaan. Akan tetapi, kajian penginderaan jauh secara terperinci yang disertai dengan validasi di lapangan belum pernah dilakukan di lapangan ini. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis penginderaan jauh yang lebih rinci untuk menggambarkan karakteristik manifestasi termal di lapangan yang dapat menjadi acuan untuk observasi langsung dan mendukung analisis dalam kajian geosain rinci. Analisis penginderaan jauh yang dilakukan adalah analisis visual citra, analisis temperatur permukaan, analisis cekaman vegetasi, dan analisis rasio band. Hasil kajian menunjukkan manifestasi termal dapat dijumpai di daerah Kawah Papandayan dan Tegal Alun. Keberadaan manifestasi dicirikan dengan adanya area yang memiliki sedikit hingga tidak adanya vegetasi pada pengamatan visual citra, anomali land surface temperature (LST) yang tinggi, dan nilai normalized difference vegetation index (NDVI) kurang dari 0,3. Sementara itu, mineral-mineral alterasi teridentifikasi dari analisis rasio band yang dilakukan.

**Kata kunci:** panas bumi, Gunung Papandayan, manifestasi termal, penginderaan jauh

**Erawan Melisano<sup>1,2</sup>, Husin Setia Nugraha<sup>2</sup>, Tonny Rahadinata<sup>2</sup>, Muhammad Satriyo<sup>2</sup>, dan Prihadi Sumintadireja<sup>1</sup>**  
(<sup>1</sup>Institut Teknologi Bandung, Indonesia, <sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Indonesia)

**DELINEASI AREA PROSPEK DAN KARAKTERISASI RESERVOIR PANAS BUMI NON-VULKANIK UNTUK PEMANFAATAN LANGSUNG DI BANDA BARU, MALUKU TENGAH**

**Buletin Sumber Daya Geologi**

**BSDG November 2025 Vol. 20 No. 3 Hal. 201-214**

**DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v20i3.548>**

Kesenjangan antara potensi pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia (230 MWt) dengan realisasi utilitasnya (8 MWt) menuntut metode delineasi yang presisi pada sistem non-vulkanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi reservoir dangkal dan mendelineasi area prospek di Banda Baru, Maluku Tengah, menggunakan integrasi data geosains terpadu. Metode Multi-Influencing Factor (MIF) berbasis SIG diaplikasikan untuk memetakan potensi air tanah, yang kemudian disintesis dengan anomali gas tanah CO<sub>2</sub> dan pemodelan gradien resistivitas Magnetotellurik (MT). Hasil penelitian mengidentifikasi area prospek seluas 6,49 km<sup>2</sup> yang dikontrol oleh struktur sesar pada batuan metamorf. Validasi melalui pengeboran sumur landaian suhu BBR-1 menunjukkan keberhasilan signifikan dengan ditemukannya fluida bersuhu 95°C pada kedalaman 164 meter. Temuan ini memicu re-evaluasi interpretasi geofisika, di mana nilai resistivitas rendah (<50 ohm-m) terbukti merepresentasikan akuifer panas aktif, bukan lapisan penudung (caprock) konvensional. Berdasarkan hasil uji produksi, total potensi sumber daya terukur di wilayah ini diestimasi sebesar 6,3 MWt. Integrasi model ini memberikan instrumen strategis bagi pengembangan energi panas bumi non-vulkanik yang efisien untuk mendukung ekonomi lokal melalui skema pemanfaatan langsung secara berkelanjutan.

**Kata kunci:** Banda Baru, delineasi prospek, MIF, panas bumi non-vulkanik, pemanfaatan langsung



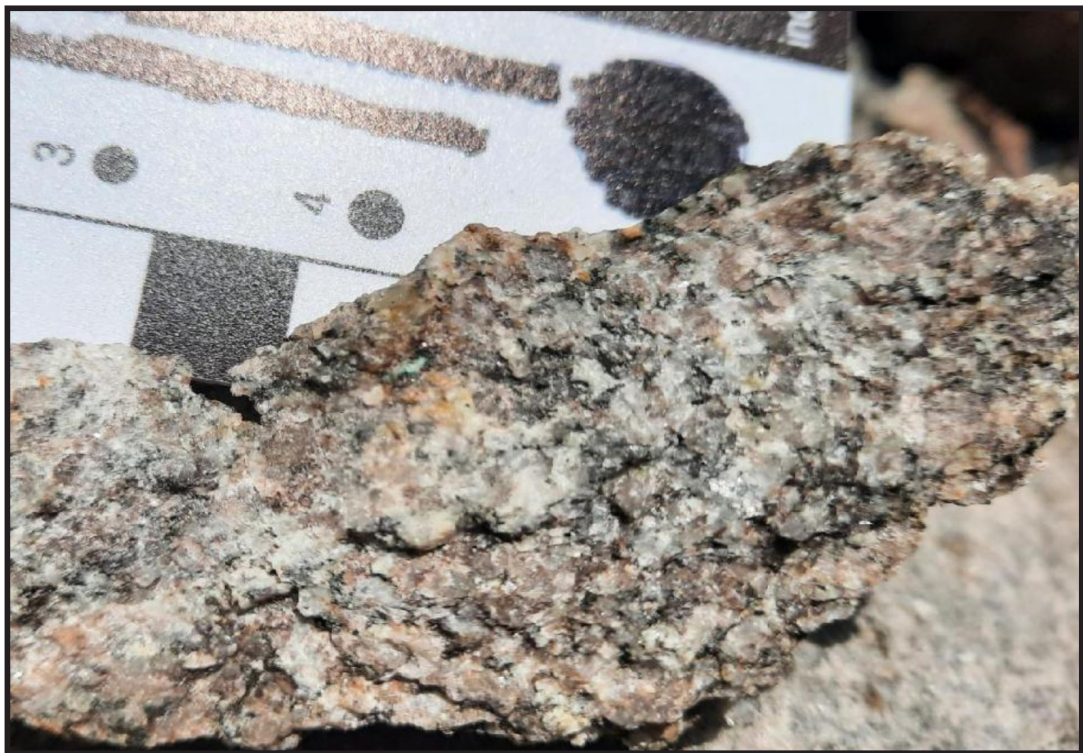
Kehadiran Mineral Bijih Kalkopirit, Bornit, Kalkosit, Kovelit, Azurit dan malakhit di Daerah Siron, Kecamatan Kuta Cot Glie, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Granit di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Batupasir Kuarsa di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung  
(Tim Mineral, 2024)



Singkapan Granit Mengandung Malakit dan Pirit di Kabupaten Lampung Tengah,  
Provinsi Lampung (Tim Mineral, 2024)



Urat Kuarsa pada Zona Ubahan Argilik di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung  
(Tim Mineral, 2024)



Molibdenit pada Urat Kuarsa di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung  
(Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Desa Ngujuran, Kecamatan Bancar, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Kecamatan Montong, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Kecamatan Soko, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur  
(Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Daerah Desa Tlogoagung, Kecamatan Bancar, Kabupaten Tuban,  
Provinsi Jawa Timur (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Daerah Latsari, Desa Ngepon, Kecamatan Jatirogo, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Daerah Ngujuran, Desa Ngujuran, Kecamatan Bancar, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur (Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Daerah Besowo, Desa Besowo Kecamatan Jatirogo,  
Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur  
(Tim Mineral, 2024)



Singkapan Pasir Kuarsa di Daerah Sembungin, Dusun Jombok, Desa Sembungin,  
Kecamatan Bancar, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur  
(Tim Mineral, 2024)



Singkapan Batubara MP-01 di Desa Muara Paiti, Kecamatan Kapur IX, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat (Tim Batubara, 2024)



Singkapan Batubara di Desa Koto Lamo, Kecamatan Kapur IX, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat (Tim Batubara, 2024)



Singkapan Batubara di Blok Kuala Kilan, Kecamatan Seberida dan Kecamatan Batang Cenaku, Kabupaten Indragiri Hulu, Provinsi Riau (Tim Batubara, 2024)



Singkapan Perselingan Batupasir-Batulempung, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten (Tim Panas Bumi, 2024)



Batupasir di Mata Air Panas Cibiuk, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten  
(Tim Panas Bumi, 2024)



Singkapan Andesit di Curug Peuteuy Daerah Panas Bumi Cigeulis, Kabupaten Pandeglang,  
Provinsi Banten (Tim Panas Bumi, 2024)

**PEDOMAN PENULISAN**  
Makalah/Karya Tulis Ilmiah  
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

**ISI DAN KRITERIA UMUM**

Naskah makalah/karya tulis ilmiah untuk publikasi di Buletin Sumber Daya Geologi dapat berupa artikel hasil penelitian, ulasan balik (*review*) dan ulasan/tinjauan (*feature*) tentang geologi baik sains maupun terapan terutama berkaitan dengan tugas pokok dan fungsi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi. Naskah yang diajukan belum pernah dipublikasikan atau tidak sedang diajukan pada publikasi lain.

Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris sesuai kaidah masing-masing bahasa yang digunakan. Judul naskah ditulis dengan huruf besar (*capital*) di tengah atas halaman dan di cetak tebal (*bold*). Naskah harus selalu dilengkapi dengan Sari dalam bahasa Indonesia dan *Abstract* dalam bahasa Inggris. Kata-kata bahasa asing yang tidak dapat dialih bahasa/disadur dicantumkan dalam bentuk asli dan ditulis dengan huruf miring (*italic font*).

**FORMAT****UMUM**

Seluruh bagian dari naskah termasuk Sari, *Abstract*, judul tabel dan gambar, catatan kaki tabel, keterangan gambar dan daftar acuan diketik satu spasi dalam bentuk *electronic file* dan dicetak pada kertas HVS A4; menggunakan huruf Arial berukuran 11 *point*. Setiap lembar tulisan dalam naskah diberi nomor halaman dengan jumlah maksimum 15 halaman termasuk tabel dan gambar. Susunan naskah dibuat sebagai berikut:

| NO | POKOK BAHASAN                      | POKOK PIKIRAN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I  | <b>Judul</b><br>( <i>Title</i> )   | Pada halaman judul makalah/karya tulis dicantumkan nama setiap penulis dengan jumlah penulis maksimum 5 orang, nama dan alamat institusi bagi masing-masing penulis; disarankan dibuat catatan kaki yang berisi nomor telepon, faxsimile serta email.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| II | <b>Abstrak dan <i>Abstract</i></b> | Berisi ringkasan pokok bahasan lengkap dari keseluruhan isi naskah seperti latar belakang (yaitu berupa alasan ilmiah ataupun alasan keperluan penting mengapa tulisan ini dipublikasikan), obyek yang diteliti, permasalahan riset, tujuan riset, kegunaan hasil riset, metode yang digunakan dalam mencapai solusi riset tanpa harus memberikan keterangan terlalu rinci dari setiap bab, dengan jumlah maksimum 250 kata. Abstrak dicantumkan terlebih dahulu apabila naskah berbahasa Indonesia, sementara <i>Abstract</i> tercantum di bawah Abstrak; dan berlaku sebaliknya apabila naskah ditulis dalam bahasa Inggris. Disarankan disertai kata kunci/ <i>keyword</i> yang ditulis di bawah Abstrak/ <i>Abstract</i> , terdiri dari 4 hingga 6 kata. <i>Abstract</i> atau abstrak yang ditulis di bawah abstrak atau <i>abstract</i> menggunakan <i>italic font</i> . |

|      |                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| III  | <b>Pendahuluan</b><br>( <i>Introduction</i> )                            | Bab ini dapat berisi latar belakang (alasan ilmiah dan maksud penelitian fenomena aktual bermasalah sebagai tema sentral penelitian), masalah aktual yang perlu solusi, pengantar tentang profil wilayah/lokasi kajian/riset, tujuan penelitian, spesifik, metode riset, hipotesis (kalau ada) dengan gaya bahasa lebih populer dengan bab dan sub-bab tidak perlu menggunakan nomor. Bab berisi pernyataan yang mencukupi sehingga pembaca dapat memahami dan mengevaluasi hasil penyelidikan/penelitian yang berkaitan dengan topik makalah/karya tulis.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| IV   | <b>Metodologi</b><br>( <i>Methodology</i> )                              | Metode yang digunakan harus spesifik dan jelas, mencakup uji-uji hipotesis atau model-model uji statistik, dapat menghimpun data primer/ <i>sampling</i> , cara pengukuran dan komputasi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| V    | <b>Hasil dan Pembahasan</b><br>( <i>Results and Discussion</i> )         | <p>Berisi hasil-hasil penyelidikan/penelitian yang disajikan dengan tulisan, tabel, grafik, gambar maupun foto diberi nomor secara berurutan. Hindarkan penggunaan grafik secara berlebihan apabila dapat disajikan dengan tulisan secara singkat. Pencantuman foto atau gambar tidak berlebihan dan hanya mewakili hasil penemuan. Semua tabel, grafik gambar dan foto yang disajikan harus diacu dalam tulisan dengan keterangan yang jelas dan dapat dibaca. <i>Font</i> huruf/angka untuk keterangan tabel, gambar dan foto berukuran minimum 6 <i>point</i>.</p> <p>Berisi tentang analisis/interpretasi dan bahasan singkat mengenai penjabaran hasil verifikasi/validasi yang ditekankan kepada kejelasan penelitian, keterlibatan aneka variabel dan peristiwa atau produk dari penelitian tersebut.</p> |
| VI   | <b>Kesimpulan dan Saran</b><br>( <i>Conclusions and Recommendation</i> ) | Berisi kesimpulan dan saran dari hasil uji hipotesis tentang penelitian, dan berisi segitiga konsistensi (masalah, tujuan dan kesimpulan).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| VII  | <b>Ucapan Terima Kasih</b><br>( <i>Acknowledgements</i> )                | Dapat digunakan untuk menyebutkan sumber dana penyelidikan/penelitian dan untuk pernyataan penghargaan kepada institusi atau orang yang membantu dalam pelaksanaan penyelidikan/penelitian dan penulisan makalah/karya tulis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| VIII | <b>Acuan</b> ( <i>References</i> )                                       | Acuan ditulis dengan menggunakan sistem nama penulis, tahun, judul, nama jurnal/buku/prosiding, penerbit, halaman, DOI (jika ada). Nama penulis/pengarang yang tercantum didahului oleh nama akhir ( <i>surname</i> ), disusun menurut abjad, dan judul makalah/karya tulis ditulis dengan huruf miring ( <i>italic font</i> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

### Jurnal

Haryanto, R. dan Lubis, J. (2023). Analisis kestabilan lereng menggunakan metode keseimbangan batas di wilayah perbukitan. *Bulletin of Engineering Geology*, 10(2), pp.140-155.

### Buku

Whitten, T. dan Soeriaatmadja, R.E. (1996). *The Ecology of Java and Bali*. Hong Kong: Periplus Editions.

### Bab dalam Buku

Simandjuntak, M. dan Silitonga, P.H. (2021). Struktur sesar aktif di zona subduksi Sumatera. In: Siregar, S. (ed.). (2021). *Geologi Struktur dan Kegempaan Indonesia*. Jakarta: LIPI Press, pp.55-80.

### Prosiding

Wibisono, Y. dan Setyawan, D. (2022). Analisis lingkungan pengendapan sedimen Formasi Rajamandala. *Proceedings of the 47th Annual Convention (25-28 September 2022, Bandung)*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), pp.405-415.

### Skripsi/Tesis/Disertasi

Hadi, F. (2022). *Karakteristik reservoir batupasir Formasi Talang Akar, Cekungan Sumatera Selatan*. [Tesis]. Institut Teknologi Bandung, Bandung.

### Laporan

Susilo, B. dan Handoko, A. (2023). Laporan Eksplorasi Geologi Daerah Palu, Provinsi Sulawesi Tengah. [Laporan Eksplorasi]. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara.

### Informasi dari Internet

Hadi, I. (2023). *Mengenai teknologi 6G dan potensinya*. [Online]. Tersedia di: <https://www.teknologiinfo.com/6g> (Diakses: 10 Maret 2025).

### Wewenang Redaksi

- Redaksi berwenang penuh melakukan penyuntingan atas naskah yang akan dipublikasikan tanpa mengubah substansi isi naskah.
- Redaksi mempunyai hak dan wewenang penuh untuk menolak naskah dengan isi dan format yang tidak sesuai dengan pedoman penulisan Buletin Sumber Daya Geologi dan tidak berkewajiban untuk mengembalikan naskah tersebut.

### Pengiriman Naskah

Penulis dimohon untuk mengirimkan naskah asli *softcopy* melalui *website* dan/atau email Buletin Sumber Daya Geologi pada tautan berikut:

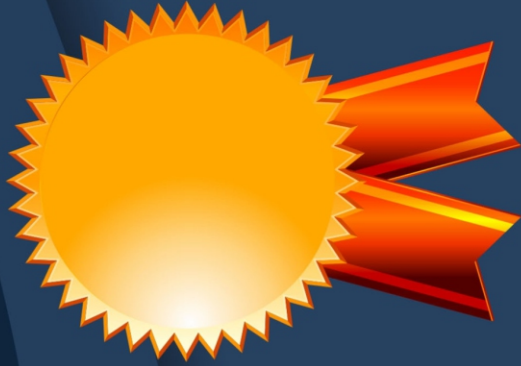
*website*: <https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>  
email: [buletinsdg@gmail.com](mailto:buletinsdg@gmail.com)

Semua tulisan yang ada dalam **Buletin Sumber Daya Geologi** bukan merupakan cerminan sikap dan atau pendapat **Dewan Redaksi Buletin Sumber Daya Geologi**.  
Tanggung jawab terhadap isi atau akibat dari tulisan tetap terletak pada penulis.



# SERTIFIKAT

Kementerian Riset dan Teknologi/  
Badan Riset dan Inovasi Nasional



Petikan dari Keputusan Menteri Riset dan Teknologi/  
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional

Nomor 200/M/KPT/2020

Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020

Nama Jurnal Ilmiah

**Buletin Sumber Daya Geologi**

E-ISSN: 25801023

Penerbit: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan  
Sumber Daya Mineral

Ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah

**TERAKREDITASI PERINGKAT 2**

Akreditasi Berlaku selama 5 (lima) Tahun, yaitu  
Volume 15 Nomor 2 Tahun 2020 sampai Volume 20 Nomor 1 Tahun 2025

Jakarta, 23 Desember 2020

Menteri Riset dan Teknologi/  
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Republik Indonesia,



Bambang P. S. Brodjonegoro

**Alamat Redaksi**

Buletin Sumber Daya Geologi  
Bagian Umum, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi  
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254  
Tel. (022) 522 6270, 520 2698, Fax: (022) 522 6263  
Website : <https://geologi.esdm.go.id/psdmbp>  
OJS: <https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>  
Email: [buletinpsdg@gmail.com](mailto:buletinpsdg@gmail.com)

