

IDENTIFIKASI MINERAL ALTERASI MENGGUNAKAN CITRA LANDSAT 9 (STUDI KASUS: KECAMATAN BONJOL, SUMATRA BARAT)

Wahyu Azhari^{1a}, Erlangga Ibrahim Fattah¹, Purwaditya Nugraha¹, Harnanti Yogaputri Hutami¹, Risky Martin Antosia¹, Mokhammad Puput Erlangga¹, Nugroho Prasetyo¹, Wahyu Eko Junian¹, Reza Rizki¹

¹Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Bandar Lampung

^a*email korespondensi:* wahyualazharr@gmail.com

ABSTRAK

Wilayah Bonjol, Sumatra Barat termasuk dalam zona Pegunungan Barisan, diketahui memiliki potensi mineralisasi emas yang berasosiasi dengan aktivitas hidrotermal. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi persebaran mineral alterasi serta pengaruh struktur geologi terhadap sistem mineralisasi di wilayah tersebut. Metode yang digunakan meliputi analisis multispektral citra satelit Landsat 9 Level 2 untuk pemetaan zona alterasi, dengan integrasi data gaya berat (GGMPlus) guna menafsirkan struktur bawah permukaan, serta validasi hasil melalui observasi lapangan. Analisis citra hillshade dan linement density menunjukkan adanya pola struktur geologi dominan berarah barat laut - tenggara (NW - SE) dan timur laut-barat daya (NE - SW) yang berkaitan dengan sistem Sesar Besar Sumatra. Citra komposit RGB (rasio Band 4/2, 6/7, dan Band 5) memperlihatkan indikasi zona alterasi oksidatif dan lempung di sekitar manifestasi panas bumi. Selain itu, hasil *Land Surface Temperature* (LST) menunjukkan anomali suhu hingga 44 °C dengan nilai NDVI dan NDMI yang relatif rendah, mengindikasikan aktivitas hidrotermal aktif dan kondisi permukaan teroksidasi. Integrasi antara data penginderaan jauh dan gaya berat memberikan kebaruan dalam pemetaan indikasi sistem hidrotermal secara efisien tanpa memerlukan survei geofisika langsung yang intensif.

Kata kunci: *alterasi mineral, gaya berat Kecamatan Bonjol, landsat 9, struktur geologi*

PENDAHULUAN

Kecamatan Bonjol, yang terletak di zona Pegunungan Barisan, Sumatra Barat, merupakan bagian dari busur Sunda-Banda yang memiliki potensi mineralisasi emas (Westerveld, 1952). Berdasarkan survei magnetotellurik (MT) oleh Sugianto dkk. (2015), teridentifikasi lapisan konduktif di sekitar manifestasi Padang Baru, Sungai Limau, dan Takis yang diduga sebagai zona alterasi hidrotermal dengan top reservoir pada kedalaman sekitar 800 meter.

Hasil pembaruan gradien termal dangkal oleh Permatasari (2023) menunjukkan bahwa lapisan tersebut berasosiasi dengan zona alterasi tipe argilik pada kedalaman sekitar 250 meter. Mineralisasi di Bonjol didominasi oleh emas, dengan keberadaan pirit, magnetit, kalkopirit, serta mineral supergen seperti kovelit, hematit, dan jarosit yang umum pada sistem epitermal sulfida rendah (Abidin & Harahap, 2007).

Secara regional, wilayah Bonjol termasuk dalam cakupan Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping dan Padang. Daerah ini terbentuk di zona vulkanik yang sebagian besar ditutupi oleh batuan sedimen serta lava Tersier dan Kuartar (Joni & Hermawan, 2020).

Stratigrafi daerah Bonjol didominasi oleh batuan vulkanik berumur Kuartar, terutama berupa lava dan batuan piroklastik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Keberadaan sesar ini dicirikan oleh zona batuan terhancurkan, kekar-kekar, serta manifestasi permukaan berupa mata air panas dan singkapan batuan alterasi. Struktur geologi tersebut berperan penting dalam proses migrasi fluida hidrotermal yang membentuk zona alterasi dan mineralisasi emas di wilayah ini.

Penginderaan jauh menjadi salah satu metode yang efektif untuk mendeteksi zona alterasi di permukaan. Sensor OLI-2 pada satelit Landsat 9 memiliki sembilan band spektral utama yang mencakup pita biru, hijau, merah, inframerah dekat (NIR), dan inframerah gelombang pendek (SWIR) dengan resolusi spasial 30 meter, kecuali band pankromatik yang memiliki resolusi 15 meter (USGS, 2020). Data multispektral dari sensor ini telah terbukti efektif dalam pemetaan zona alterasi hidrotermal untuk keperluan eksplorasi mineral (Pour & Hashim, 2022). Band SWIR, khususnya band 6 dan 7, sangat penting dalam mendeteksi mineral seperti kaolinit, muskovit, dan kalsit yang umum terbentuk dalam proses alterasi hidrotermal.

Citra komposit RGB dengan kombinasi Band 4/2, 6/7, dan 5 digunakan untuk mengidentifikasi persebaran mineral alterasi hidrotermal (Nurrochman dkk., 2020). Mineral lempung dan karbonat memiliki ciri spektral berupa serapan pada panjang gelombang 2,1–2,4 μm serta reflektansi pada 1,55–1,75 μm (Chen, 2000), sehingga band 7 dipilih karena mewakili wilayah SWIR yang berasosiasi dengan gugus AIOH, Fe, MgOH, SiOH, dan CO₂. Oksida besi dapat dipetakan menggunakan band 2 dan band 4, karena hematit, jarosit, dan limonit menunjukkan reflektansi tinggi pada panjang gelombang 0,63–0,69 μm serta serapan kuat pada 0,45–0,52 μm . Dengan demikian, penggunaan citra komposit RGB mampu memberikan informasi spektral yang rinci dalam identifikasi vegetasi, oksida besi dan hidroksida, serta mineral lempung dan karbonat (Pour & Hashim, 2015).

Selain analisis spektral, indeks vegetasi juga digunakan untuk menilai kondisi kelembapan dan kerapatan vegetasi di daerah penelitian. Vegetasi lembap menunjukkan kandungan air daun yang tinggi sehingga reflektansi NIR meningkat dan reflektansi SWIR menurun akibat penyerapan air. Area dengan vegetasi rapat cenderung memiliki suhu permukaan lebih rendah, sedangkan area dengan vegetasi jarang memiliki suhu lebih tinggi (Effendi dkk., 2023). Hubungan antara kondisi vegetasi dan suhu permukaan ini dapat dipantau melalui *Land Surface Temperature* (LST) yang dihasilkan oleh sensor TIRS pada satelit Landsat 9 dengan resolusi spasial 100 meter (Izah dkk., 2023).

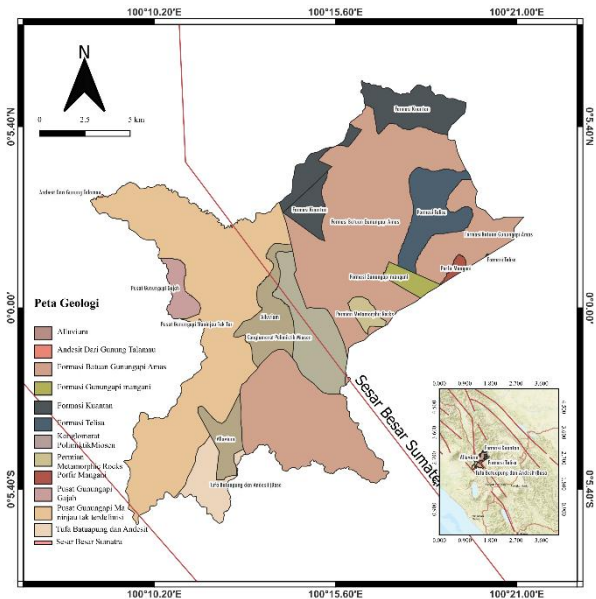
Untuk memperkuat analisis permukaan, metode gaya berat digunakan guna memperoleh gambaran bawah permukaan melalui analisis variasi densitas batuan. Data satelit GGMPlus yang diolah menjadi *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) kemudian difilter menggunakan *Improved Logistic* (IL) filter. Metode IL terbukti lebih unggul dibandingkan metode klasik karena mampu menampilkan batas lateral anomali dengan lebih tajam, mengurangi bias antara sumber dangkal dan dalam, serta memperlihatkan jalur patahan yang lebih jelas (Alvandi dkk., 2023); (Pham dkk., 2021).

Integrasi antara penginderaan jauh dan metode gaya berat memberikan keuntungan signifikan karena menggabungkan data permukaan dan bawah permukaan secara komplementer. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi keterkaitan antara zona alterasi hidrotermal dan struktur geologi secara lebih menyeluruh, sehingga hasilnya dapat mendukung upaya eksplorasi sumber daya mineral di wilayah Bonjol (Wambo dkk., 2020).

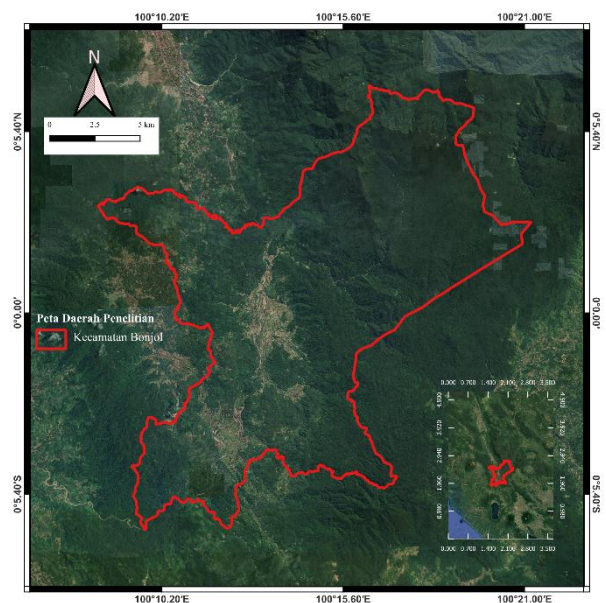
METODE PENELITIAN

Secara geografis, wilayah penelitian terletak pada koordinat 0°00'00" LS hingga 0°12'00" LS dan 100°10'12" BT hingga 100°18'36" BT sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 Kegiatan survei lapangan dilakukan untuk memperoleh data primer berupa observasi langsung terhadap fenomena alam yang teridentifikasi di lokasi penelitian. Seluruh tahapan

pengolahan dan analisis data dilaksanakan di laboratorium dan lingkungan kampus Institut Teknologi Sumatera, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung.



Gambar 1. Peta geologi area penelitian



Gambar 2. Peta daerah penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data citra satelit, data gravitasi satelit, dan data topografi. Citra satelit yang digunakan adalah produk Landsat 9 dengan kode "LC09_L2SP_127060_20220626_20230409_02_T1". Kode tersebut mengikuti sistem penamaan standar dari USGS yang memuat informasi mengenai jenis satelit, produk, lokasi perekaman, tanggal akuisisi, pemrosesan, serta tingkat kualitas data, yang dapat diunduh melalui laman di <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Data ini digunakan untuk menganalisis karakteristik spektral

mineral alterasi melalui kombinasi rasio band serta perhitungan indeks vegetasi.

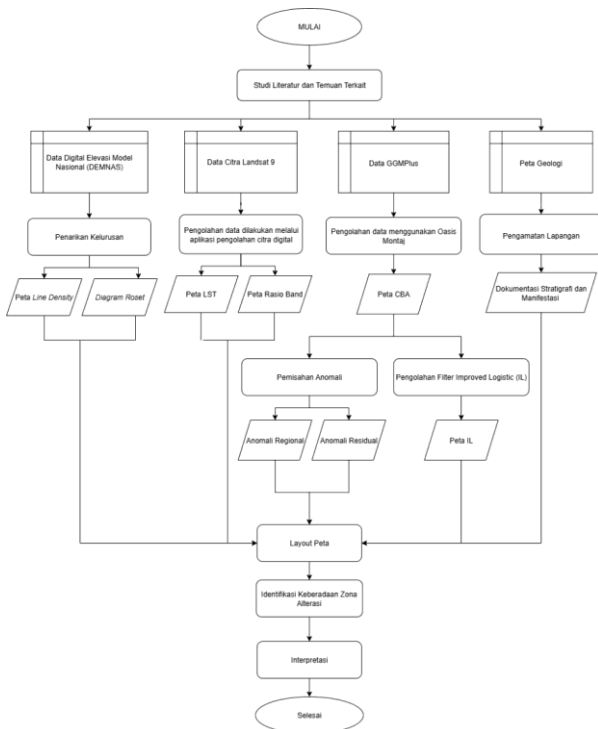
Selain itu, digunakan data anomali udara bebas (*gravity disturbance*) dari model satelit GGMPlus dengan resolusi spasial 1 kilometer yang mencakup area seluas 59 km × 59 km. Data ini terdiri atas 3.433 titik pengamatan dan diunduh melalui laman resmi GGMPlus

<http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>.

Data topografi tambahan dari model ERTM2160 juga digunakan untuk melengkapi analisis morfologi permukaan dan diperoleh melalui tautan <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/>.

Untuk mendukung analisis bentuk lahan, digunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) dengan resolusi spasial 30 meter yang diunduh melalui situs <https://www.indonesia-geospasial.com/>.

Tahapan penelitian pada Gambar 3 dimulai dengan kegiatan pengamatan lapangan yang bertujuan untuk menganalisis manifestasi hidrotermal berdasarkan persebaran mineral alterasi di permukaan. Sebelum survei dilakukan, disusun terlebih dahulu peta kontur dan peta aliran sungai (*Topographic Wetness Index / TWI*) sebagai dasar pertimbangan dalam menentukan jalur akses dan lokasi pengamatan yang aman dari potensi erosi. Selanjutnya, dilakukan proses penarikan kelurusan (*lineament extraction*) menggunakan data DEMNAS guna mengidentifikasi pola struktur geologi yang mengontrol sistem hidrotermal di wilayah Bonjol. Hasil penarikan kelurusan kemudian dianalisis dalam bentuk diagram roset untuk memperoleh arah dominan struktur geologi.



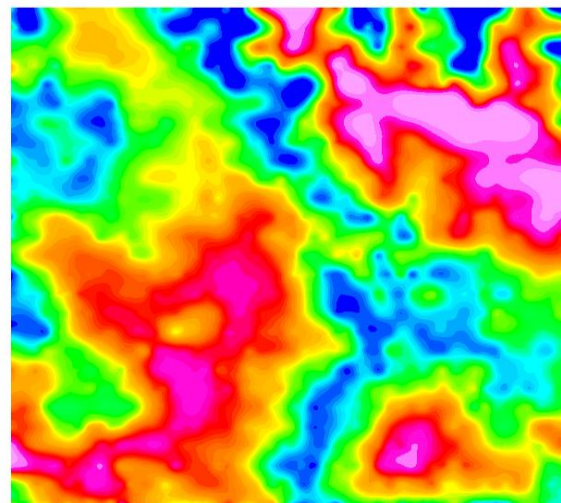
Gambar 3. Diagram alir penelitian

Analisis citra Landsat 9 dilakukan untuk mengidentifikasi persebaran mineral alterasi berdasarkan karakteristik spektral mineral dengan

memanfaatkan rasio band tertentu dan analisis kerapatan vegetasi. Proses ini melibatkan koreksi radiometrik dan atmosferik untuk memastikan kualitas data yang optimal. Rasio band digunakan untuk menonjolkan perbedaan spektral antara mineral lempung, karbonat, dan oksida besi, sedangkan indeks vegetasi digunakan untuk menilai tingkat kelembapan dan penutupan vegetasi pada area alterasi

Selanjutnya, pengolahan data gaya berat dilakukan untuk memvalidasi interpretasi kondisi bawah permukaan yang diperoleh dari analisis citra. Data gaya berat GGMPlus diolah untuk menghasilkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) seperti Gambar 4, kemudian dipisahkan menjadi komponen regional dan residual menggunakan metode *bandpass filter*. Komponen anomali residual diperoleh melalui pengurangan CBA terhadap anomali regional, sehingga dapat menampilkan struktur bawah permukaan seperti sesar dan zona rekahan yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal.

Metode penelitian ini secara umum mencakup tahapan pengumpulan data, analisis citra multispektral, interpretasi struktur geologi, serta validasi bawah permukaan melalui analisis gaya berat. Metode yang telah terpublikasi digunakan dengan mengacu pada pustaka yang relevan, sedangkan modifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini dijelaskan secara rinci agar dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.



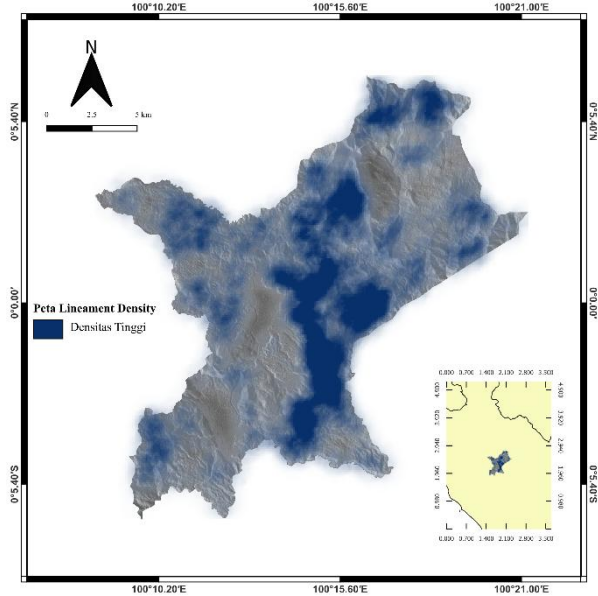
Gambar 4. Peta CBA

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. IDENTIFIKASI SESAR

Identifikasi struktur sesar di wilayah Bonjol dilakukan melalui analisis fitur topografi berbasis *hillshade* yang diperoleh dari data *Digital Elevation Model* (DEM). Hasil interpretasi ini menunjukkan bahwa pola struktur geologi regional di wilayah Bonjol didominasi oleh orientasi barat laut - tenggara (NW -SE) dan timur laut - barat daya (NE - SW). Pola ini mengindikasikan adanya sistem struktur geologi regional yang berperan penting sebagai zona lemah tempat keluarnya fluida hidrotermal, yang selanjutnya

berpotensi menjadi jalur utama persebaran mineral alterasi di wilayah Bonjol.



Gambar 5. Peta linement density

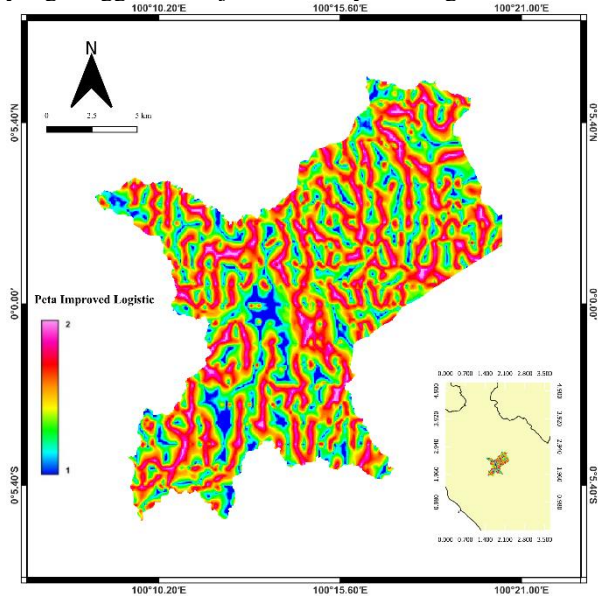
Pada Gambar 5 merupakan pemetaan tingkat kerapatan kelurusan (*lineament density*) guna mengetahui distribusi spasial dan intensitas keterdapatan struktur geologi. Peta *lineament density* merupakan representasi spasial dari konsentrasi garis kelurusan hasil interpretasi topografi. Nilai densitas yang tinggi menunjukkan wilayah dengan kelurusan

yang lebih besar, yang ditandai dengan warna biru pada peta. Zona dengan densitas tinggi tersebut diidentifikasi sebagai daerah dengan struktur tektonik yang kompleksitas geologi lebih tinggi.

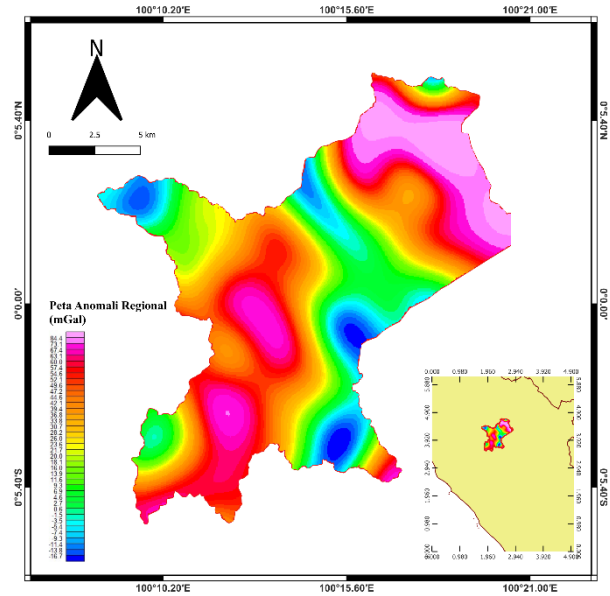
Selain analisis morfologi permukaan dilakukan interpretasi Peta *Complete Bouger Anomaly* (CBA) Hasil menunjukkan bahwa anomali gravitasi tinggi terletak pada bagian barat Kecamatan Bonjol. Secara keseluruhan, pola anomali Bouguer membentuk kelurusan yang sejajar dengan arah Sesar Besar Sumatra, dengan orientasi dominan berarah barat laut - tenggara.

Pemisahan anomali yang dilakukan menghasilkan Gambar 6 berupa komponen anomali regional dan residual. Nilai anomali regional berkisar antara -16,7 hingga 84,4 mGal sedangkan anomali residual berkisar antara -17,7 hingga 17,3 mGal Peta anomali ini memperlihatkan variasi anomali lokal yang diduga berasosiasi dengan struktur geodinamika maupun jalur migrasi fluida magma yang berhubungan dengan formasi batuan vulkanik di wilayah Bonjol

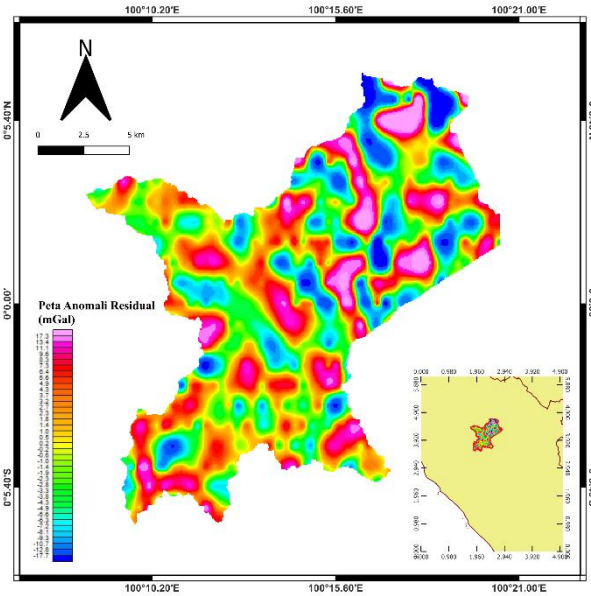
Hasil pemrosesan lebih lanjut menggunakan *Improved Logistic Filter* (IL) mampu mendeteksi tepi dan menonjolkan batas lateral struktur geologi bawah permukaan dengan lebih jelas. Pola IL di wilayah Bonjol menunjukkan kesesuaian dengan arah struktur regional yang dilintasi oleh Sesar Besar Sumatra, serta menampilkan beberapa struktur lokal di bagian barat wilayah yang kemungkinan berperan sebagai jalur sirkulasi fluida hidrotermal.



(a) Peta Filter IL



(b) Peta Anomali Regional



(c) Peta Anomali Residual

Gambar 6. Peta hasil pemrosesan gaya berat, filter *improve logistic* (a), anomaly regional (b) dan residual (c).

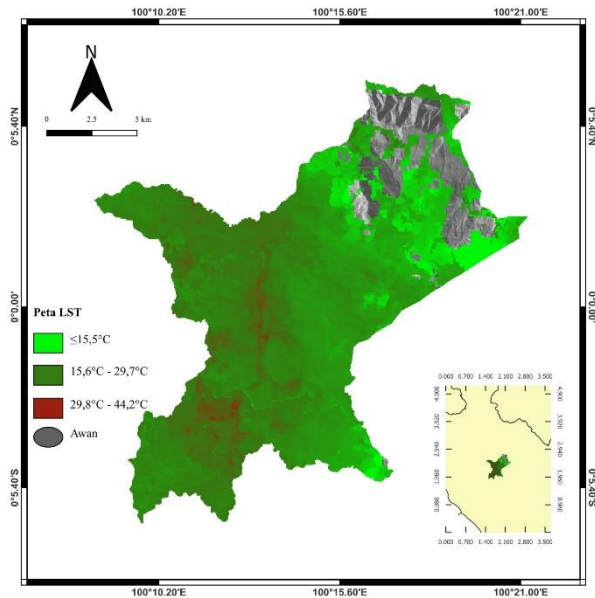
Analisis kelurusan dan anomali gaya berat mengungkapkan bahwa struktur geologi di Bonjol memiliki kompleksitas yang cukup tinggi. Formasi batuan didominasi oleh batuan gunung api dengan densitas rendah, yang mengindikasikan kemungkinan jalur pergerakan fluida hidrotermal di bawah permukaan. Interpretasi ini diperkuat melalui pendekatan penginderaan jauh, yang memungkinkan pemetaan identifikasi permukaan secara lebih luas.

2. PERSEBARAN MINERAL

Peta *Land Surface Temperature* (LST) pada Gambar 7 menunjukkan bahwa suhu permukaan di wilayah Bonjol, dari warna hijau (temperature rendah) hingga merah temperature tinggi (29° – 40°C). Temperatur yang tinggi dapat mengindikasikan area perkotaan dan keberadaan manifestasi termal berupa alterasi. Investigasi nilai temperatur dilakukan dengan mengidentifikasi klasifikasi lahan di area penelitian menggunakan metode NDVI atau NDRE.

Pada Gambar 8 menunjukan analisis rasio Band 4/2 bahwa pada bagian tengah area penelitian, khususnya di sekitar Nagari Ganggo Mudiak dan Nagari Koto Limo, kawasan permukiman tampak berwarna kekuningan hingga merah dengan nilai rasio berkisar antara 1 hingga 2. Pola warna tersebut mengindikasikan bahwa reflektansi pada Band 4 relatif lebih tinggi dibandingkan Band 2. Area dengan nilai rasio Band 6/7 yang rendah umumnya berhubungan dengan nilai rasio Band 4/2 yang tinggi, mencerminkan karakteristik permukaan kering dan teroksidasi dengan dominasi mineral non-lempung, seperti oksida besi (Fe³⁺) atau laterit yang sangat kering sehingga banyak menyerap gelombang pada kanal SWIR1 maupun SWIR2. Kondisi ini banyak

dijumpai di bagian barat Kecamatan Bonjol, yang terdapat wilayah permukiman terbuka, sehingga mempertimbangkan faktor bangunan dengan pantulan pada kanal merah (0,64–0,67 μm) menjadi lebih dominan.

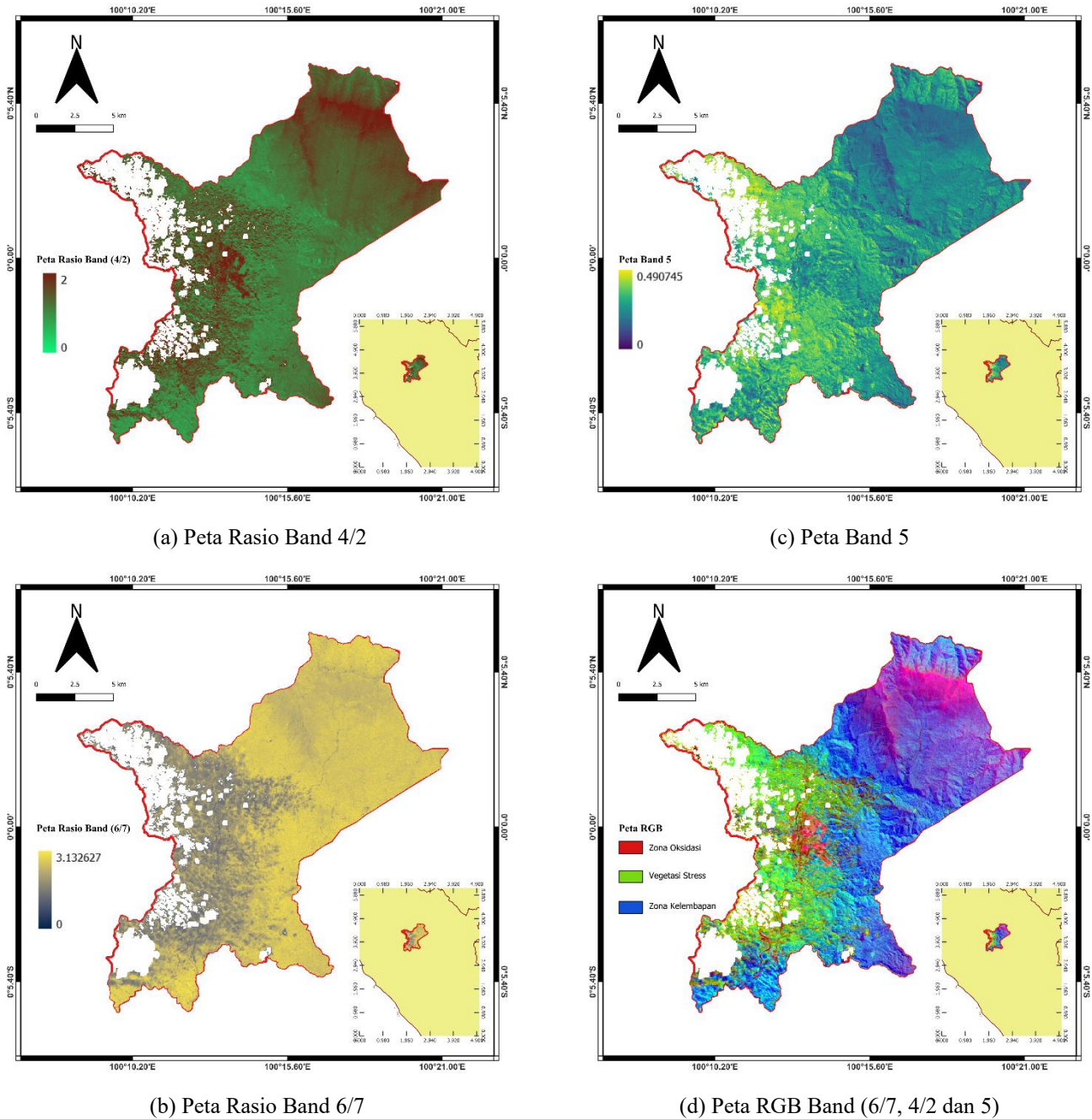


Gambar 7. Peta LST

Citra komposit RGB memperoleh persebaran mineral alterasi secara lebih detail digunakan dengan kombinasi dua rasio band dan satu band tunggal, yaitu rasio Band 6/Band 7 pada saluran merah (R), rasio Band 4/Band 2 pada saluran hijau (G), dan Band 5 pada saluran biru (B). Nilai reflektansi Band 5 (NIR, 0,85–

0,88 μm) di wilayah Bonjol berkisar antara 0 hingga 0,4, tergolong rendah hingga sedang. Secara spektral, hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan wilayah penelitian tidak sepenuhnya lembap, melainkan cenderung agak kering dengan pantulan yang masih dipengaruhi oleh vegetasi tipis serta campuran area terbuka dan permukiman. Warna merah pada komposit RGB merepresentasikan zona oksidasi yang berasosiasi

dengan permukaan kering dan teroksidasi kuat, seperti laterit dan oksida besi, yang banyak ditemukan di bagian barat Bonjol. Warna hijau menggambarkan vegetasi yang mengalami stres, yaitu daerah dengan tutupan tumbuhan tipis atau kondisi tanah yang terpengaruh proses oksidasi, sedangkan warna biru menandakan zona lembap yang mengindikasikan keberadaan mineral lempung (*clay*) serta vegetasi yang relatif rapat.



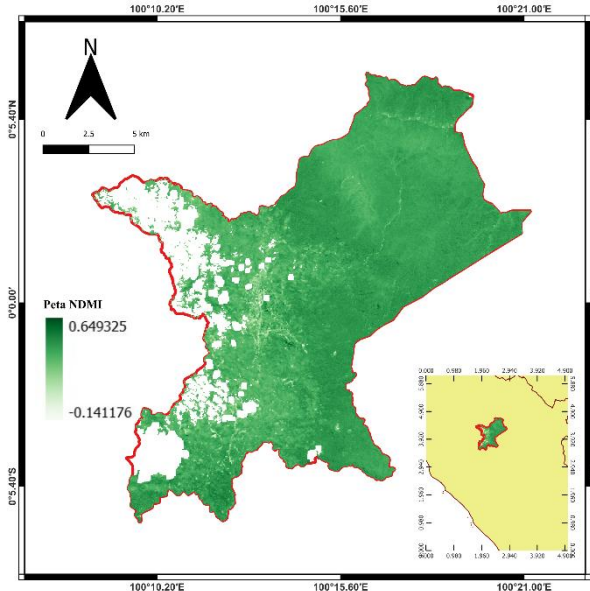
Gambar 8. Peta Citra Landsat 9

Dalam penelitian ini indeks vegetasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerapatan vegetasi di wilayah Bonjol. NDVI memanfaatkan perbedaan pantulan spektral antara pita merah (Red) dan *Near Infrared* (NIR) dengan rentang nilai antara -1 hingga 1. Hasil

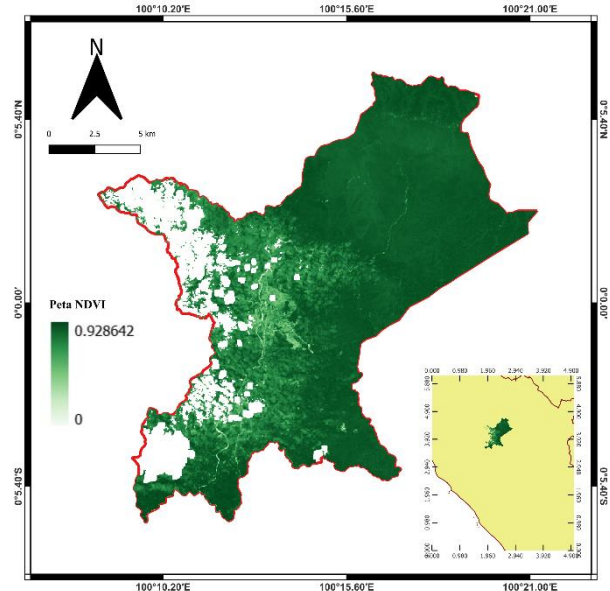
analisis pada Gambar 9 menunjukkan variasi nilai NDVI yang cukup beragam, di mana nilai sangat rendah (0–0,1) umumnya berasosiasi dengan area terbuka atau permukiman dengan vegetasi minim. Area dengan vegetasi jarang, seperti semak belukar dan padang rumput, menunjukkan nilai sedang (0,2–0,5), sedangkan

bagian timur Bonjol memiliki nilai tinggi (0,6–0,9) yang menandakan vegetasi lebat, meskipun secara fisiologis tidak seluruhnya dalam kondisi optimal. Hal ini didukung oleh hasil *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI), yang mencerminkan kadar kelembapan vegetasi. Indeks NDMI memiliki rentang nilai antara -1 hingga 1, di mana nilai -0,1 hingga 0,2 menunjukkan tanah terbuka atau tanaman pada tahap awal

pertumbuhan, nilai 0,2 hingga 0,4 mengindikasikan vegetasi kurang sehat atau belum matang, dan nilai 0,4 hingga 0,6 menggambarkan vegetasi yang mulai matang. Di wilayah Bonjol, nilai NDMI umumnya tidak melebihi 0,6, sehingga fase vegetasi matang jarang dijumpai, yang menegaskan kondisi vegetasi kering dan lingkungan permukaan yang mendukung terbentuknya mineral alterasi.



(a) Peta NDMI



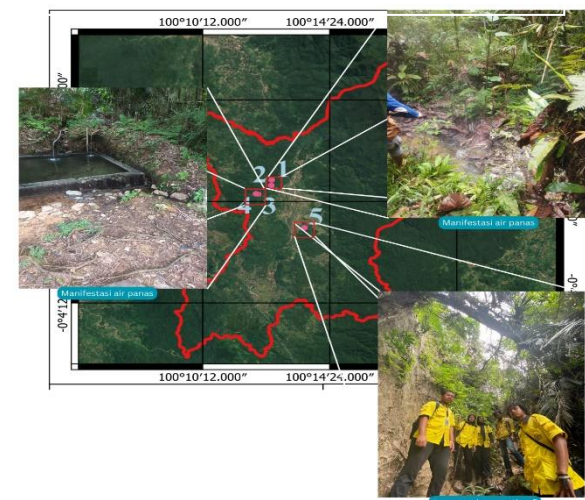
(b) Peta NDVI

Gambar 9. Peta Indeks Vegetasi

3. PENGAMATAN LAPANGAN

Adanya beberapa endapan yang diduga sebagai mineral alterasi yang tersebar di sekitar area aktivitas pertambangan tradisional masyarakat setempat. Selain itu, teridentifikasi dua titik manifestasi air panas, masing-masing pada titik 3 dan 4 yang sudah dilakukan penataan serta 1 dan 2 dalam masa pengembangan. Pada titik 5, ditemukan penampang geologi dengan ditemukan yang memperlihatkan indikasi keberadaan struktur bawah permukaan yaitu sesar padang baru, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.

Hasil pengamatan lapangan tersebut digunakan untuk memvalidasi interpretasi citra Landsat 9 yang diperoleh secara sekunder. Secara umum, hasil analisis citra menunjukkan kesesuaian dengan kondisi lapangan. Zona hidrotermal teridentifikasi sebagai area dengan nilai rasio Band 4/2 tinggi dan Band 6/7 rendah, yang mengindikasikan zona alterasi oksidatif dengan dominasi mineral non-lempung. Analisis suhu permukaan (LST) menunjukkan anomali suhu relatif tinggi 30°C sampai 32°C yang mendukung dugaan adanya aktivitas hidrotermal. Sementara itu, nilai NDVI cenderung rendah hingga sedang, menunjukkan kondisi vegetasi jarang atau mengalami stres, sedangkan nilai NDMI yang rendah menggambarkan kadar kelembapan yang minim akibat proses oksidasi dan pengaruh panas bawah permukaan.



Gambar 10. Peta pengamatan lapangan

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini integrasi analisis citra satelit, data gaya berat, dan verifikasi lapangan berhasil mengidentifikasi struktur geologi serta indikasi zona alterasi mineral di wilayah Bonjol. Interpretasi citra hillshade dan linement density mengungkap pola struktur dominan berarah barat laut–tenggara (NW–SE) dan timur laut–barat daya (NE–SW) yang berasosiasi

dengan sistem Sesar Besar Sumatra, yang juga terkonfirmasi pada anomali Bouguer lengkap dan peta IL melalui kelurusan anomali searah dengan struktur regional. Analisis spektral citra Landsat 9 menggunakan rasio Band 4/2 dan Band 6/7 mengindikasikan keberadaan zona oksidasi dan alterasi mineral, didukung oleh nilai LST tinggi serta NDVI dan NDMI rendah di sekitar manifestasi panas bumi. Kombinasi metode penginderaan jauh dan analisis gaya berat ini menghadirkan pendekatan efisien untuk pemetaan indikasi sistem hidrotermal Bonjol, menawarkan alternatif eksplorasi awal yang efektif tanpa memerlukan survei geofisika langsung yang intensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada orang atau lembaga yang berkaitan langsung atau mendanai penelitian.

REFERENSI

- Abidin, H. Z. & Harahap, B. H., 2007. Indikasi mineralisasi epitermal emas bersulfida rendah. *Jurnal Geologi Indonesia*, Maret, Volume 2, pp. 55-67.
- Alvandi, A., Toktay, H. D. & Ardestani, V. E. Z., 2023. Edge detection of geological structures based on a logistic function: a case study for gravity data of the Western Carpathians. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, Volume Volume 57, p. 267–274.
- Chen, C., 2000. Comparison of principal component analysis and minimum noise fraction transformation for reducing the dimensionality of hyperspectral imagery. *Geographical Research*, p. 163–178.
- Effendi, A. F., Prabawa, S. E. & Mahardianti, M., 2023. Analisis pengaruh kerapatan vegetasi terhadap suhu permukaan tanah menggunakan citra satelit Landsat-8 (Studi Kasus: Kabupaten Gresik Wilayah Daratan). *Jurnal Geodesi Undip*, 12(4), p. 406–414.
- Izah, A., Shafarani, F. K., Afrianto, F. & Permana, M., 2023. Hubungan antara Kerapatan Vegetasi dan Land Surface Temperature di Kabupaten Pasuruan. *Jurnal Plano Buana*, pp. 12-21.
- Joni, W. & Hermawan, D., 2020. Bonjol geothermal structure based on 2D inversion of magnetotelluric data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 417(1), p. 012002.
- Nurrochman, A., Febriani, R. & Yuliatama, V. P., 2020. Aplikasi Citra Landsat 8 OLI/TIRS Dalam Mengidentifikasi Alterasi. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing (JGRS)*, pp. 89-96.
- Permatasari, A. C., 2023. Studi karakteristik mineral ubahan pada sumur BJJL-1 didaerah panas bumi Bonjol, Pasaman, Sumatra Barat. *Tesis, Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung. digilib ITB*.
- Pham, L. T. et al., 2021. Mapping subsurface structural lineaments using the edge filters of. *Journal of King Saud University – Science*.
- Pour, A. B. & Hashim, M., 2014. Integrating PALSAR and ASTER data for mineral deposits exploration in tropical environments: A case study from Central Belt, Peninsular Malaysia. *International Journal of Image and Data Fusion*, 6(2), p. 170–188.
- Sugianto, A. et al., 2015. Resistivity Structures Of Bonjol Geothermal Prospect, Indonesia, Derived From Magnetotelluric Data. *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*.
- USGS, 2020. *Landsat 9*, Reston: Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, U.S. Geological Survey.
- Wambo, J. D. T. et al., 2020. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon. *Ore Geology Reviews*, p. Volume 122.
- Westerveld, J., 1952. Quaternary volcanism on Sumatra. *GSA Bulletin*, 63(6), p. 561–594.