

Pendugaan Zona Alterasi Hidrotermal Menggunakan Data Geomagnetik EMM 2017 Di Wilayah Lubuk Sikaping

Fauzan Surya Nanda, Arif Budiman*

Laboratorium Fisika Bumi, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia.

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan:

Direvisi:

Diterima:

Kata kunci:

Alterasi hidrotermal

Geomagnetik

EMM 2017

Anomali magnetik

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona alterasi hidrotermal di Kecamatan Lubuk Sikaping, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat, menggunakan data geomagnetik *Enhanced Magnetic Model* (EMM) 2017 yang dikembangkan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Tahapan pengolahan data meliputi koreksi *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), pemisahan anomali regional dan residual menggunakan *Radial Average Power Spectrum* (RAPS), reduksi ke kutub, analisis nilai anomali magnetik dengan kondisi geologi daerah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa anomali magnetik residual berada pada rentang $-7,09582$ nT hingga $7,65333$ nT. Hasil analisis nilai anomali magnetik dan kondisi geologi menunjukkan bahwa zona anomali tinggi ($3,12460$ nT - $7,65333$ nT) tersebar di bagian selatan dan barat daya merupakan zona mineralisasi. Zona anomali sedang ($0,07503$ nT - $3,12460$) tersebar di bagian tengah hingga timur laut merupakan zona peralihan litologi antara batuan beku magnetik dan batuan sedimen non-magnetik. Zona anomali rendah ($-7,09582$ nT - $0,07503$ nT) terletak di bagian utara dan timur laut merupakan zona alterasi hidrotermal. Adanya zona mineralisasi, zona batas litologi dan zona alterasi hidrotermal menunjukkan pada daerah ini terdapat jalur migrasi fluida. Zona alterasi hidrotermal di Kecamatan Lubuk Sikaping berasosiasi dengan Formasi Sarik-Gajah yang terdiri dari batuan vulkanik mengalami teralterasi akibat keberadaan struktur aktif *Sumatra Fault System*.

Keywords:

Hydrothermal alteration

Geomagnetic

EMM 2017

Magnetic anomaly

This study aims to identify hydrothermal alteration zones in Lubuk Sikaping District, Pasaman Regency, West Sumatra, using Enhanced Magnetic Model (EMM) 2017 geomagnetic data developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The data processing stages include International Geomagnetic Reference Field (IGRF) correction, evaluation of regional and residual anomalies using Radial Average Power Spectrum (RAPS), reduction to the poles, analysis of magnetic anomaly values with the geological conditions of the study area. The results show that residual magnetic anomalies are in the range of -7.09582 nT to 7.65333 nT. The results of the analysis of magnetic anomaly values and geological conditions indicate that the high anomaly zone (3.12460 nT - 7.65333 nT) spread in the south and southwest is a mineralization zone. The moderate anomaly zone (0.07503 nT - 3.12460) spread in the central to northeast is a lithology preservation zone between magnetic igneous rocks and non-magnetic sedimentary rocks. The low anomaly zone (-7.09582 nT - 0.07503 nT) located in the north and northeast is a hydrothermal alteration zone. The presence of mineralization zones, lithology boundary zones and hydrothermal alteration zones indicates that there is a fluid migration path in this area. The hydrothermal alteration zone in Lubuk Sikaping District is associated with the Sarik-Gajah Formation which consists of volcanic rocks that have undergone alteration due to the presence of active structures of the Sumatran Fault System.

Penulis Korespondensi:

Arif Budiman

Email: arifbudiman@sci.unand.ac.id

Copyright © 2025 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara dengan populasi besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat memiliki kebutuhan energi yang terus meningkat. Namun, pasokan energi nasional masih sangat bergantung pada sumber fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam yang menyumbang sekitar 86,71% dari total pasokan, sedangkan kontribusi energi baru terbarukan (EBT) baru mencapai 13,29%. Ketergantungan pada energi fosil tidak hanya mengancam keberlanjutan pasokan energi, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, transisi menuju EBT menjadi langkah penting untuk mewujudkan sistem energi yang berkelanjutan. Salah satu sumber EBT yang menjanjikan adalah panas bumi (*geothermal*), di mana Indonesia memiliki cadangan hingga 23.592 MW per Desember 2023 dan menempati posisi kedua terbesar di dunia. Meski demikian, pemanfaatannya baru sekitar 11% dari total potensi yang tersedia (Kementrian ESDM dkk., 2023).

Potensi panas bumi tersebar di hampir seluruh wilayah Indonesia, termasuk di Provinsi Sumatera Barat yang dilalui jalur gunung api aktif, seperti Gunung Marapi, Tandikat, Talang, dan Kerinci. Kabupaten Pasaman merupakan salah satu daerah di provinsi ini yang memiliki prospek pemanfaatan panas bumi untuk pembangkit listrik, dengan total potensi sekitar 415 MW yang tersebar di tiga kecamatan, yaitu Bonjol (165 MW), Panti (150 MW), dan Lubuk Sikaping (100 MW) (Direktorat Panas Bumi, 2017). Eksplorasi di Kecamatan Bonjol telah memasuki tahap pengeboran sumur eksplorasi sejak November 2024 (Pemda Pasaman, 2024), sementara di Kecamatan Panti masih pada tahap survei geologi, geokimia, dan geofisika (Wibisono dan Herdianita, 2020). Adapun di Kecamatan Lubuk Sikaping, eksplorasi masih terbatas pada survei geologi dan geokimia, sehingga memerlukan dukungan metode geofisika agar proses eksplorasi dapat ditingkatkan ke tahap selanjutnya.

Metode geofisika, seperti seismik, gravitasi, geomagnetik, magnetotellurik, dan elektromagnetik, berperan penting dalam eksplorasi permukaan karena mampu memberikan gambaran mengenai kondisi bawah permukaan, terutama terkait keberadaan dan karakteristik reservoir panas bumi (Langel, 1998). Salah satu indikator penting keberadaan *reservoir* adalah zona alterasi, yaitu zona dimana terjadinya perubahan mineralogi dan komposisi kimia batuan akibat interaksi dengan fluida panas (Pirajno, 2009). Zona ini sering ditandai oleh berkurangnya sifat kemagnetan batuan, sehingga dapat dikenali melalui anomali magnetik (Lagat, 2007). Oleh karena itu metode geomagnetik merupakan metode yang sangat relevan untuk menduga keberadaan dan karakteristik reservoir panas bumi di suatu wilayah.

Pengukuran geomagnetik di lapangan umumnya dapat memberikan hasil akurat, tetapi pada wilayah yang luas, kegiatan ini hampir tidak mungkin dilakukan karena kendala berupa kondisi medan, waktu, dan biaya (Reynolds, 1990). Oleh karena itu diperlukan usaha untuk mengetahui zona prospektif terlebih dahulu sebelum melakukan pengukuran geomagnetik di lapangan. Untuk tujuan ini model-model geomagnetik seperti sangat layak untuk dimanfaatkan karena telah terbukti dapat mendukung berbagai aplikasi ilmiah maupun praktis (Chulliat dkk., 2020; Meyer dkk., 2017). Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa data geomagnetik sekunder efektif untuk mengidentifikasi zona alterasi dan struktur geologi tanpa sepenuhnya bergantung pada survei medan (Gabr dkk., 2022; Permana dkk., 2022; Vervelidou dkk., 2018). Model-model geomagnetik ini tidak hanya mampu memodelkan medan magnetik utama bumi tetapi juga anomali magnetik yang disebabkan mineral di kerak bumi, diantaranya *Enhanced Magnetic Model* (EMM) 2017 yang dikembangkan *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), CHAOS yang dikembangkan oleh Departemen Penelitian dan Teknologi Antariksa Denmark dan *British Geological Survey Global Geomagnetic Model* (BGGM) yang dikembangkan oleh Badan Geologi Inggris. Di antara model tersebut, EMM 2017 memiliki keunggulan resolusi spasial yang lebih tinggi karena memadukan data satelit *Swarm* (ESA), survei kelautan, aeromagnetik, dan pengukuran darat. Berdasarkan hal-hal tersebut, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi zona prospektif panas bumi dengan memanfaatkan data EMM 2017 di Kecamatan Lubuk Sikaping, Kabupaten Pasaman. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang diperlukan untuk kajian geofisika di lapangan terhadap potensi panas bumi di daerah tersebut yang hingga kini masih belum dilakukan.

II. METODE

II.1 Pengumpulan Data Magnetik Total

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Lubuk Sikaping, Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatera Barat, yang secara administratif memiliki luas wilayah sekitar 346,5 km². Secara geografis, area penelitian mencakup koordinat sekitar 0°3′–0°18′ LU dan 100°0′–100°18′ BT (WGS 84/UTM Zone 47N), dengan topografi berupa perbukitan dan lembah yang dipengaruhi aktivitas geologi regional. Pengumpulan data dimulai dengan menentukan titik-titik datum di daerah penelitian yang akan ditentukan nilai medan magnetik totalnya. Untuk memastikan keteraturan distribusi data, wilayah penelitian dibatasi berdasarkan batas administratif Kecamatan Sasak Ranah Pasisie yang diperoleh dari data *shapefile* (SHP) dengan *gridding* 1,0 km × 1,0 km. Pada masing-masing titik datum ditentukan parameter spasial berupa *latitude*, *longitude* dan elevasi yang diekstraksi dari *Digital Elevation Model Shuttle Radar Topography Mission* 30 meter (DEM SRTM 30m) berformat *GeoTIFF*, melalui pemrograman Python dalam lingkungan *Visual Studio Code*, dengan memanfaatkan pustaka seperti *rasterio*, *numpy*, dan *geopandas*. Data spasial *latitude*, *longitude* dan elevasi pada masing-masing titik datum merupakan data input yang diperlukan untuk akuisisi data medan magnetik total pada titik-titik tersebut. Selanjutnya data medan magnetik total pada masing-masing datum diperoleh dengan menggunakan *Magnetic Field Calculator* model EMM 2017 yang dapat diakses pada NCEI *Geomagnetic Calculators*. Data magnetik total yang diperoleh merupakan data magnetik total yang telah terkoreksi oleh variasi harian (*diurnal correction*).

II.1 Pengolahan Data

Setelah diperoleh data geomagnetik hasil ekstraksi dari model EMM 2017, tahap berikutnya adalah proses pengolahan data yang dimulai dengan melakukan koreksi IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) terhadap data medan magnetik total untuk memperoleh data anomali magnetik total dengan menggunakan Persamaan (1).

$$\Delta H_T = \Delta H_D - H_{IGRF} \quad (1)$$

dimana ΔH_T adalah anomali magnetik total, ΔH_D adalah medan magnetik total yang telah dikoreksi harian dan H_{IGRF} adalah medan magnetik utama bumi. Selanjutnya data anomali magnetik total disajikan dalam bentuk peta kontur anomali magnetik total.

Tahapan pengolahan data berikutnya adalah melakukan pemisahan anomali regional (sumber dalam) dan residual (sumber dangkal) terhadap medan anomali total. Proses ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *Oasis Montaj* dengan pendekatan *Radial Average Power Spectrum* (RAPS) untuk menganalisis distribusi energi spektral berdasarkan panjang gelombang (Mohamed dkk., 2022). Berdasarkan hasil spektrum, diterapkan *bandpass* filter yang membedakan sinyal frekuensi rendah dan tinggi. Anomali regional diekstraksi menggunakan *low-pass* filter, yang merepresentasikan respon dari struktur geologi berskala luas dan dalam, sedangkan anomali residual diperoleh melalui *high-pass* filter, yang menonjolkan kontribusi sumber dangkal atau lokal. Hasil pemisahan anomali ini juga ditampilkan dalam bentuk peta kontur anomali regional dan residual. Selanjutnya terhadap data anomali residual dilakukan proses reduksi ke kutub atau *Reduce to Pole* (RTP) yang bertujuan mentransformasikan medan magnetik pada suatu lokasi pengukuran seolah-olah data tersebut diperoleh di kutub magnetik bumi sehingga posisi anomali berada tepat di atas sumbernya. Proses ini melibatkan pengubahan sudut inklinasi medan magnetik bumi menjadi 90° dan deklinasi menjadi 0°. Proses reduksi ke kutub ini dilakukan dengan menggunakan *software Geosoft Oasis Montaj*.

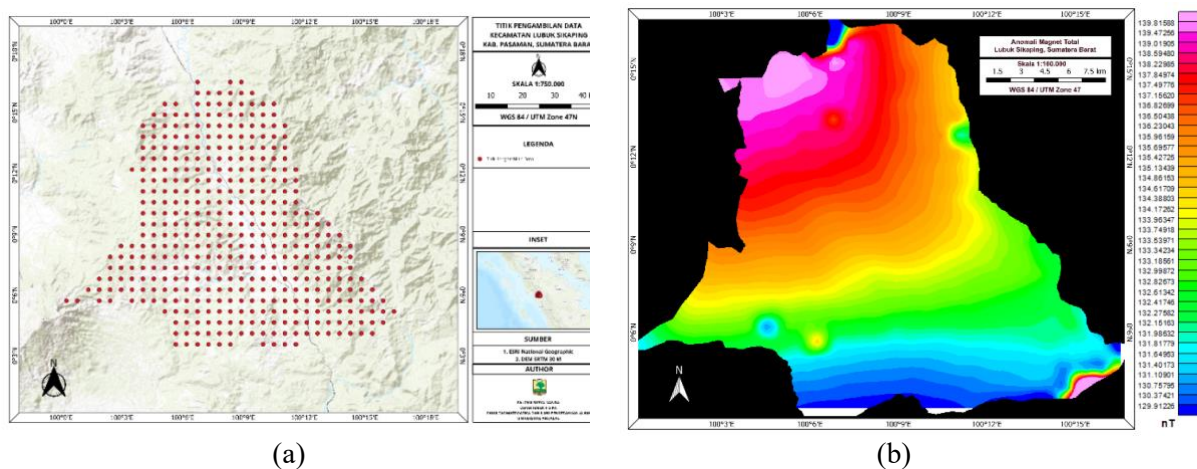
II.2 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menentukan zona prospektif panas bumi berdasarkan sebaran anomali magnetik yang telah dilakukan RTP. Selanjutnya hasil analisis akan divalidasi dengan kondisi geologi daerah penelitian. Untuk memudahkan proses validasi tersebut dilakukan *overlay* peta anomali residual RTP dan peta geologi regional daerah penelitian.

III. HASIL DAN DISKUSI

III.1 Anomali Magnetik Total

Dari hasil *gridding* daerah penelitian diperoleh 426 titik datum seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1a dan peta anomali magnetik total ditunjukkan oleh Gambar 1b. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Gambar 1b, nilai anomali magnetik total yang diperoleh untuk Kecamatan Lubuk Sikaping bervariasi dengan rentang nilai antara 129,91226 nT hingga 139,81588 nT. Distribusi anomali magnetik memperlihatkan pola zonasi yang jelas dari utara ke selatan peta. Bagian utara dan tengah peta didominasi oleh anomali magnetik tinggi yang ditunjukkan dengan warna merah hingga merah muda. Sementara itu, bagian selatan peta memperlihatkan anomali magnetik rendah, yang tergambarkan dalam warna hijau hingga biru. Anomali magnetik total ini merepresentasikan respon gabungan dari seluruh sumber anomali, baik yang dangkal maupun yang dalam, sehingga masih perlu dilakukan pemisahan untuk memperoleh informasi yang lebih spesifik.



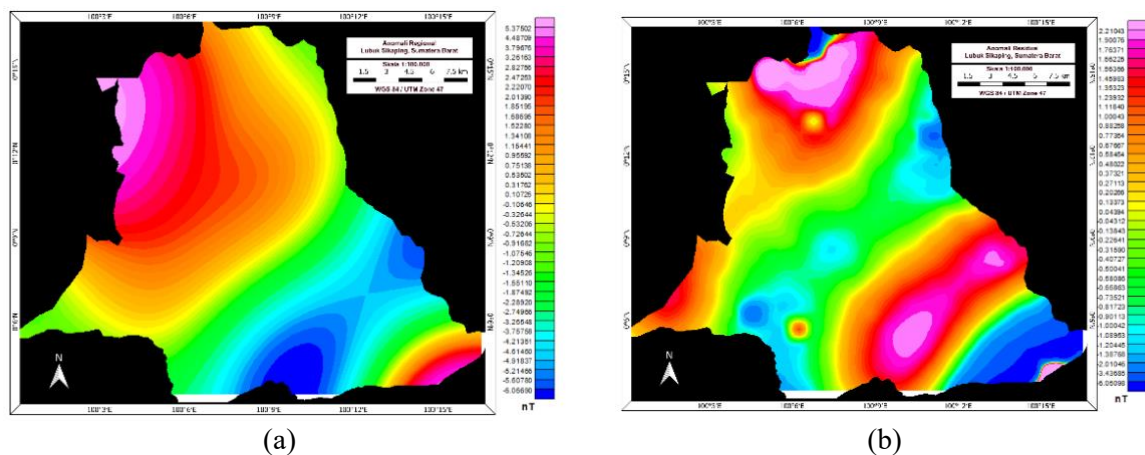
Gambar 1 (a) Titik datum hasil gridding dan (b) Peta anomali magnetik total

III.2 Anomali Regional dan Residual

Peta hasil pemisahan anomali magnetik ditunjukkan oleh Gambar 2. Gambar 2a menunjukkan distribusi anomali magnetik regional dengan rentang $-6,06690$ nT hingga $5,37502$ nT. Zona anomali paling tinggi (merah muda) teridentifikasi di barat laut peta lalu berkurang hingga ke bagian tengah peta menuju zona anomali paling rendah ke arah tenggara peta (biru) dan kembali meningkat di bagian tenggara peta. Dalam hal ini anomali magnetik terlihat memiliki pola yang menunjukkan perubahan nilai medan magnetik yang bertahap dari barat laut ke tenggara peta. Pola seperti ini merupakan ciri-ciri dari anomali magnetik regional karena disebabkan oleh struktur geologi skala besar yang terletak sangat dalam di bawah permukaan bumi, seperti perbedaan densitas batuan pada kerak atau mantel bagian bawah. Pengaruh dari massa yang dalam ini menyebar ke area yang luas di permukaan.

Pada Gambar 2b, anomali magnetik residual memperlihatkan variasi antara $-6,06098$ nT hingga $2,21043$ nT. Zona anomali magnetik tinggi (merah muda dan merah) terletak di bagian utara dan tenggara peta dan zona anomali magnetik rendah (hijau dan biru) terletak di bagian tengah-barat dan tengah-selatan peta. Berbeda dengan anomali magnetik regional, pola anomali magnetik residual terlihat lebih kompleks, terputus-putus, atau tidak beraturan. Hal ini disebabkan bahwa anomali magnetik residual sangat dipengaruhi oleh geologi di dekat permukaan (dangkal) yang memang sangat bervariasi dan tidak seragam.

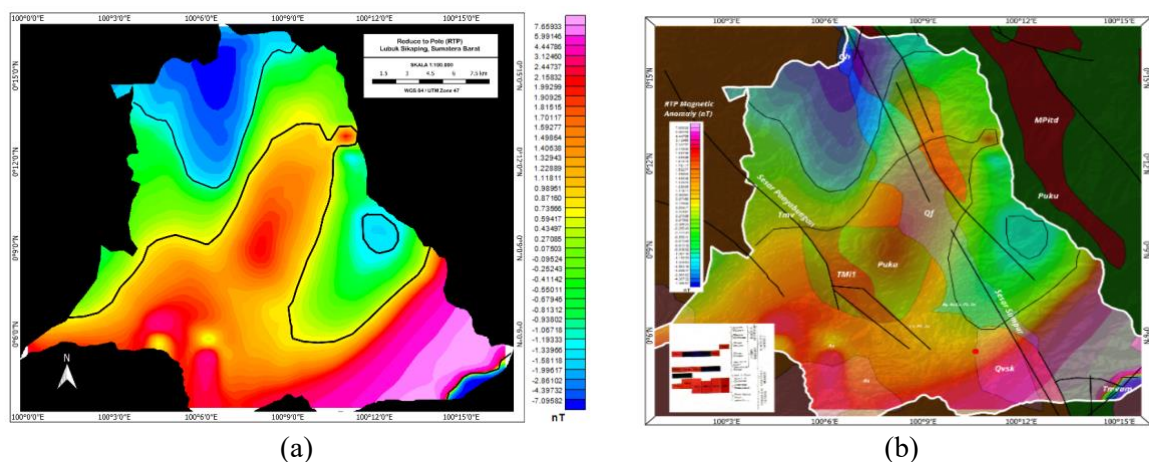
Dari hasil pemisahan anomali ini dapat dilihat bahwa gabungan nilai anomali regional dan residual relatif jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai anomali medan magnetik total. Hal ini menunjukkan data anomali magnetik total mengandung *noise* yang sangat besar. *Noise* merupakan hal-hal yang dapat mengganggu data pengukuran oleh magnetometer yang dapat berasal dari kondisi atmosfer atau ionosfer dan magnetosfer bumi yang fluktuatif akibat gangguan eksternal bumi atau gangguan sistem kelistrikan dan mekanis pada magnetometer satelit (Hoffmann dan Moldwin, 2022).



Gambar 2 (a) Peta anomali magnetik regional dan (b) Peta anomali magnetik residual

III.3 Anomali *Reduce to Pole* (RTP) dan Perbandingan dengan Geologi Regional

Peta anomali residual hasil proses *Reduce to Pole* (RTP) ditunjukkan oleh Gambar 3a dan peta hasil *overlay* peta anomali residual RTP dan peta geologi regional ditunjukkan oleh Gambar 3b. Dari Gambar 3a dapat dilihat bahwa variasi intensitas magnetik yang signifikan, dengan rentang nilai antara $-7,09582$ nT hingga $7,65333$ nT. Zona anomali magnetik tinggi dengan nilai medan magnetik dari $3,12460$ nT - $7,65333$ nT (merah dan merah muda) dominan di bagian selatan dan barat daya peta. Nilai ini menunjukkan berasal dari batuan dengan kemagnetan tinggi, biasanya batuan beku mafik (basalt, andesit, diorit, gabro) atau intrusi batuan beku atau struktur terangkat. Bisa juga berasosiasi dengan zona intrusi magma atau mineralisasi logam. Zona anomali magnetik sedang dengan medan nilai magnetik dari $0,07503$ nT hingga $3,12460$ nT (hijau dan kuning) tersebar di bagian tengah hingga timur laut peta. Nilai ini dapat menunjukkan peralihan litologi, kemungkinan antara batuan beku magnetik dan batuan sedimen non-magnetik. Dapat juga mencerminkan zona transisi struktur geologi, seperti batas sesar atau kontak intrusi atau perubahan ketebalan lapisan batuan atau variasi alterasi. Zona ini sering menjadi indikasi batas zona prospektif mineralisasi. Zona anomali magnetik rendah dengan nilai magnetik dari $-7,09582$ nT hingga $0,07503$ nT (biru tua dan biru muda) tersebar di bagian utara dan timur laut. Zona ini dapat dikaitkan dengan batuan berkemagnetan rendah, zona alterasi hidrotermal yang ekstensif, atau keberadaan magnetisasi remanen yang berlawanan arah dengan medan induksi. Secara keseluruhan, daerah penelitian memiliki pola heterogenitas magnetik dan kontras antara bagian utara dan selatan.



Gambar 3 (a) Peta anomali residual RTP dan (b) Peta hasil *overlay* peta anomali residual RTP dan peta geologi regional.

Berdasarkan Gambar 3b, distribusi anomali magnetik menunjukkan hubungan erat dengan kondisi geologi regional. Zona anomali magnetik tinggi (selatan dan barat daya peta) berada pada unit Tmil (warna hijau tua) dan Qvsk (warna merah muda), yang tersusun oleh batuan mafik seperti granodiorit, andesit, dan basal dengan kandungan mineral feromagnetik tinggi. Pada bagian barat unit Qvsk terdapat zona mineralisasi emas (Au). Sementara itu, anomali magnetik sedang (tengah hingga timur laut peta) teridentifikasi pada unit Tmv (warna coklat) yang merepresentasikan batuan vulkanik menengah yang merupakan peralihan litologi antara batuan beku magnetik dan batuan sedimen non-magnetik. Anomali magnetik rendah (utara dan timur laut peta) berada pada unit Qf (warna biru muda) dan Puku (warna hijau) yang bersifat non-magnetik akibat endapan aluvial maupun proses metamorfisme yang merupakan batuan teralterasi hidrotermal.

Adanya zona mineralisasi di bagian barat daya, zona batas litologi di bagian tengah hingga timur laut dan zona alterasi hidrotermal di bagian timur dan utara memperkuat dugaan bahwa di Kecamatan Lubuk Sikaping terdapat jalur migrasi fluida hidrotermal. Jalur migrasi fluida ini tidak hanya memicu mineralisasi epitermal tetapi juga menyebabkan zona alterasi dengan penurunan suseptibilitas magnetik (Gabr dkk., 2022; Pirajno, 2009). Menurut Corbett dan Leach (1997) jalur migrasi hidrotermal terjadi pada daerah yang dilewati sesar (Corbett dan Leach, 1997). Selain itu keberadaan sumber air panas di Kecamatan Lubuk Sikaping menegaskan adanya aktivitas hidrotermal aktif yang berhubungan dengan intrusi magma. Berdasarkan kondisi geologi daerah penelitian, zona alterasi hidrotermal di bagian utara dan timur terdapat pada Formasi Sarik–Gajah. Hal ini sangat bersesuaian karena batuan Formasi Sarik–Gajah terdiri dari batuan vulkanik teralterasi yang dipengaruhi oleh keberadaan struktur aktif *Sumatra Fault System*

IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis geomagnetik berbasis data EMM 2017 diketahui bahwa Kecamatan Lubuk Sikaping mempunyai nilai anomali magnetik antara $-7,09582$ hingga $7,65933$ nT. Hasil analisis nilai anomali magnetik dan kondisi geologi daerah penelitian menunjukkan bahwa zona anomali magnetik tinggi ($3,12460$ nT - $7,65333$ nT) tersebar di bagian selatan dan barat daya wilayah penelitian yang berkaitan dengan zona mineralisasi. Zona anomali magnetik sedang dengan medan nilai magnetik dari ($0,07503$ nT hingga $3,12460$) tersebar di bagian tengah hingga timur laut area penelitian merupakan zona peralihan litologi antara batuan beku magnetik dan batuan sedimen non-magnetik. Zona anomali rendah ($-7,09582$ nT hingga $0,07503$ nT) terletak di bagian utara dan timur laut merupakan zona alterasi hidrotermal. Adanya zona mineralisasi, zona batas litologi dan zona alterasi hidrotermal di Kecamatan Lubuk Sikaping menunjukkan pada daerah ini terdapat jalur migrasi fluida. Zona alterasi hidrotermal di Kecamatan Lubuk Sikaping berasosiasi dengan Formasi Sarik-Gajah yang terdiri dari batuan vulkanik mengalami teralterasi akibat keberadaan struktur aktif *Sumatra Fault System*.

DAFTAR PUSTAKA

- Baranov, V., 1957, A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies, *Geophysics*, 22(2), 359–382. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>.
- Baranov, V., & Naudy, H., 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole, *Geophysics*, 29(1), 67–79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>.
- Chulliat, A., Brown, W., Alken, P., Beggan, C., Nair, M., Cox, G., Woods, A., Macmillan, S., Meyer, B., Panizza, M., et al. (2020). The US/UK World Magnetic Model (2020–2025). <https://doi.org/10.25923/ytk1-yx35>.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1997). Southwest Pacific Rim gold-copper systems. *Society of Economic Geologists*. <https://doi.org/10.5382/sp.06>.
- Cox, M. E., & Browne, P. (1998). Hydrothermal alteration mineralogy as an indicator of hydrology at the Ngawha geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 27(2), 259–270. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(97\)10015-3](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(97)10015-3).
- Direktorat Panas Bumi. (2017). Buku panas bumi. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Gabr, S. S., Diab, H., Abdel Fattah, T. A., Sadek, M. F., Khalil, K. I., & Youssef, M. A. S. (2022). Aeromagnetic and Landsat-8 data interpretation for structural and hydrothermal alteration

- mapping along the Central and Southern Eastern Desert boundary, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.12.002>
- Gubbins, D., & Herrero-Bervera, E. (2007). *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Springer.
- Hunt, C. P., Moskowitz, B. M., & Banerjee, S. K. (1995). *Rock physics & phase relations: A handbook of physical constants*. American Geophysical Union.
- Joni, W., & Hermawan, D. (2020). Bonjol geothermal structure based on 2D inversion of magnetotelluric data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 417, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/417/1/012002>
- Kementerian ESDM, Kencono, A. W., Dwinugroho, M., Satra Baruna, E., & Ajiwihanto, N. (2023). *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2015* (p. 73).
- Lagat, J. (2007). Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria domes geothermal field, Kenya. *Short Course II on Surface Exploration for Geothermal Resources*, 1–24.
- Lumbanbatu, U. M. (2009). Morfogenetik daerah Lubuk Sikaping Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Geologi dan Sumber Daya Mineral*, 19(2), 79–93.
- Meyer, B., Chulliat, A., & Saltus, R. (2017). Derivation and error analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(12), 4522–4537. <https://doi.org/10.1002/2017GC007280>
- Permana, N. R., Gunawan, B., Primastika, A. A., Shafa, D., Fadrian, D. F., & Zani, F. R. (2022). Identification of alteration zone and gold mineralization based on magnetic anomaly and 3D model of geomagnetic satellite data inversion of Mount Pongkor Area, West Java. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 8(2), 94–102. <https://doi.org/10.21580/jnsmr.2022.8.2.13177>
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer.
- Langel, R. A., & Hinze, W. J. (1998). *The magnetic field of the Earth's lithosphere: The satellite perspective*. Cambridge University Press.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Vervelidou, F., Thébaud, E., & Korte, M. (2018). A high-resolution lithospheric magnetic field model over southern Africa based on a joint inversion of CHAMP, Swarm, WDMAM, and ground magnetic field data. *Solid Earth*, 9(3), 897–910. <https://doi.org/10.5194/se-9-897-2018>
- Wibisono, P. A., & Herdianita, N. R. (2020). Hydrothermal alteration and fluid characteristics study of Panti Geothermal Field, Pasaman Regency, West Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500(1), 012022.