

IDENTIFIKASI DAN INTERPRETASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN KAWASAN GUNUNG BROMO-SEMERU DENGAN METODE GRAVITASI

¹⁾Aisyah Salsabila, ²⁾Arie Realita, ³⁾Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: aisyahsalsabila.21026@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Gunung Bromo-Semeru merupakan wilayah vulkanik aktif di Jawa Timur yang memiliki sumber daya vulkanik tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menginterpretasi struktur bawah permukaan kawasan tersebut berdasarkan data anomali gravitasi. Data sekunder anomali gravitasi diperoleh dari satelit *TOPOgraphy EXperiment* (TOPEX) dan dianalisis melalui beberapa tahapan koreksi, meliputi *Free-Air Correction* (FAC), koreksi Bouguer dan koreksi *terrain*. Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang dihasilkan kemudian dipisahkan menjadi anomali regional dan anomali lokal (residual) menggunakan metode *Moving Average*. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa area sekitar kaldera Bromo didominasi oleh anomali negatif, yang mengindikasikan keberadaan batuan piroklastik lepas, zona rekahan dan potensi kantung magma dangkal. Sebaliknya, akibat intrusi magma berulang, wilayah selatan dan tenggara gunung semeru menunjukkan anomali positif yang diasosiasikan karena keberadaan batuan beku padat seperti andesit dan basalt. Temuan ini memberikan gambaran awal struktur geologi bawah permukaan dengan metode non-destruktif dan dapat mendukung eksplorasi sumber daya alam serta mitigasi bencana.

Kata Kunci: Gunung Bromo-Semeru, metode gravitasi, TOPEX

Abstract

Mount Bromo-Semeru is an active volcanic area in East Java that has high volcanic resources. This research aims to identify and interpret the subsurface structure of the area based on gravity anomaly data were obtained from *TOPOgraphy EXperiment* (TOPEX) satellite and analyzed through several correction stages, including *Free-Air Correction* (FAC), Bouguer correction and *terrain* correction. The resulting *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) map is then separated into regional anomalies and local (residual) anomalies using the *Moving Average* method. The result of interpretation show that the area around the Bromo caldera is dominated by negative anomalies, which indicate the presence of loose pyroclastic rocks, fracture zones and potential shallow magma pockets. In contrast, due to repeated magma intrusion, the south and southeast areas of Mount Semeru show positive anomalies associated with the presence of solid igneous rocks such as andesite and basalt. These findings provide an initial picture of the geological structure below the surface with non-destructive methods and can support the exploration of natural resources and disaster mitigation.

Keywords: Mount Bromo-Semeru, gravity method, TOPEX

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika pasif yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan berdasarkan variasi densitas batuan (Anggraeni and Sulistyorini, 2021). Dalam metode ini, perbedaan antara nilai gravitasi terukur dan nilai teoritis menghasilkan anomali gravitasi yang mencerminkan heterogenitas massa batuan di bawah permukaan (Hinze et al., 2013). Anomali tersebut diklasifikasikan sebagai anomali positif dan negatif, yang masing-masing menunjukkan keberadaan batuan berdensitas tinggi maupun rendah (Liu et al., 2019). Interpretasi terhadap pola anomali ini sangat berguna untuk memahami kondisi geologi suatu wilayah seperti sesar, intrusi atau dapur magma yang tidak termatai secara langsung tanpa harus melakukan eksplorasi destruktif (Reynolds, 2011).

Kawasan Gunung Bromo-Semeru merupakan wilayah vulkanik aktif yang kompleks di Jawa Timur dengan potensi sumber daya pasir vulkanik yang tinggi (Realita et al., 2022). Proses erupsi yang berlangsung secara berkala telah menghasilkan beragam material geologi, mulai dari batuan piroklastik lepas, abu vulkanik, hingga lava yang membeku menjadi batuan padat (Balulu, 2011; Gomez et al., 2018). Struktur geologi yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik ini menyebabkan variasi densitas yang signifikan, sehingga dapat diamati melalui distribusi anomali gravitasi (Dewi et al., 2019; Hofi et al., 2024). Selain itu, informasi ini penting dalam mendukung mitigasi bencana dan eksplorasi sumber daya alam secara berkelanjutan, termasuk potensi panas bumi dan tambang pasir vulkanik (Maryanto et al., 2018; Permatasari et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menginterpretasi struktur bawah permukaan Gunung Bromo-Semeru berdasarkan peta anomali gravitasi dua dimensi. Data anomali gravitasi diperoleh dari satelit TOPography EXperiment (TOPEX) yang dikenal memiliki akurasi tinggi dalam pemetaan topografi dan gravitasi global (Guo et al., 2017). Data ini diolah melalui beberapa tahapan koreksi, seperti Free-Air Correction (FAC), koreksi Bouguer dan koreksi terrain guna mendapatkan nilai anomali gravitasi yang mempresentasikan struktur geologi bawah permukaan lebih akurat (Nettleton, 1939; Siombone et al., 2022). Setelah itu, peta Complete Bouguer Anomaly (CBA) dipisahkan menjadi anomali regional dan anomali lokal (residual) menggunakan metode Moving Average (Sehah et al., 2023; Adelyra et al., 2024). Interpretasi peta hasil pengolahan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman awal terhadap karakteristik geologi bawah permukaan dan distribusi batuan penyusun yang berkaitan dengan potensi vulkanik di kawasan studi.

B. Koreksi Anomali Gravitasi

1. Free-Air Correction (FAC)

Prinsip FAC adalah menentukan medan gravitasi di suatu titik yang terletak pada ketinggian tertentu di atas permukaan laut tanpa mempertimbangkan struktur batuan bawah permukaan (Reynolds, 2011). FAC bernilai positif untuk posisi titik di atas permukaan laut dan negatif untuk posisi titik di bawah laut. Kuantitas yang diperoleh dari penerapan FAC disebut FAA. Dalam penelitian ini, FAC diperoleh secara otomatis dari TOPEX.

2. Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer menentukan medan gravitasi di lokasi pengukuran dengan mempertimbangkan struktur batuan geologi bawah permukaan dengan ketebalan dan densitas batuan rata-rata yang memberikan efek gravitasi tambahan (Reynolds, 2011). Densitas rata-rata batuan krusial dalam koreksi Bouguer. Level akurasi densitas rata-rata batuan memengaruhi koreksi Bouguer dan pada akhirnya nilai anomali gravitasi yang seharusnya (Reynolds, 2011). Perbedaan kecil antara densitas rata-rata batuan yang terhitung dan sesungguhnya memberikan perbedaan signifikan pada koreksi Bouguer. Nettleton (1939) mengajukan teknik penentuan densitas rata-rata batuan dengan memanfaatkan metode grafis. Menurut teknik ini, densitas rata-rata batuan diambil dari nilai densitas yang paling tidak berkorelasi dengan topografi lokal.

3. Koreksi Terrain

Koreksi terrain diperlukan terutama pada wilayah dataran tinggi atau daerah dengan perbedaan elevasi yang cukup signifikan, karena variasi topografi dapat memengaruhi hasil pengukuran gravitasi. Menurut Reynolds (2011), perhitungan koreksi terrain biasanya dilakukan dengan menggunakan metode segmen silinder konsentris untuk memperhitungkan kontribusi massa dari tiap segmen. Dalam praktik lapangan modern, proses koreksi terrain ini umumnya telah dihitung secara otomatis oleh satelit TOPEX, sehingga pengguna data tidak perlu lagi melakukan koreksi manual.

C. Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Nilai CBA berkorelasi dengan variasi densitas bawah permukaan (Reynolds, 2011). Jika densitas massa sumber gravitasi bawah permukaan relatif tinggi terhadap densitas massa objek di sekitar sumber, maka diperoleh anomali positif. Jika densitas massa sumber medan gravitasi bawah permukaan relatif rendah terhadap massa objek disekitar sumber, maka diperoleh anomali negatif. Hasil akhir pengolahan data gravitasi (corrected gravity data) berupa peta CBA yang masih mengandung anomali regional dan lokal (residual) beserta noise, sehingga pemisahan keduanya perlu dilakukan agar interpretasi struktur bawah permukaan menjadi lebih akurat.

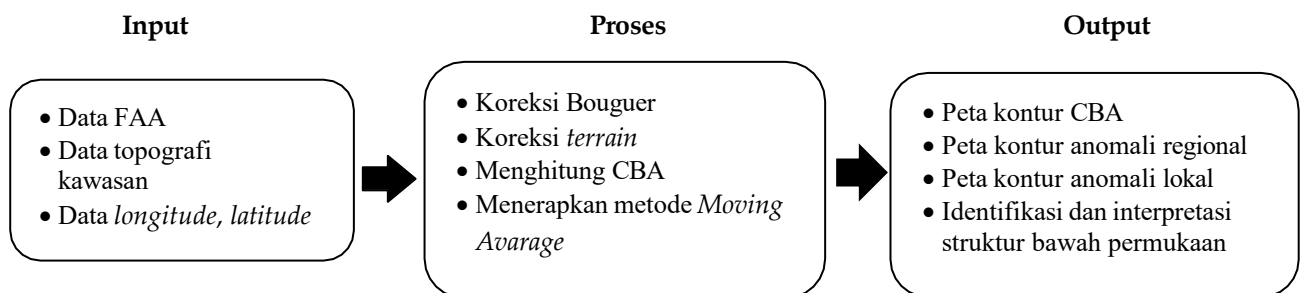
D. Metode Moving Average

Metode Moving Average bekerja dengan menghitung rata-rata nilai anomali pada rentang spasial tertentu dalam skala geologi yang diamati, sehingga menghasilkan anomali regional yang menunjukkan adanya frekuensi rendah pada anomali Bouguer dan mempresentasikan sumber anomali relatif dalam. Anomali lokal (residual) diperoleh dengan mengurangkan anomali regional dari anomali Bouguer lengkap (Cooper and Cowan, 2006; Zuhdi et al., 2019). Metode ini menyesuaikan analisis berdasarkan variasi karakteristik data untuk menyederhanakan data tanpa menghilangkan pola utama. Metode ini memberikan interpretasi yang lebih jelas mengenai struktur geologi bawah permukaan dan memberikan hasil yang konsisten untuk diterapkan dalam data gravitasi.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk identifikasi dan interpretasi struktur bawah permukaan Gunung Bromo-Semeru dengan bantuan metode gravitasi. Data sekunder berupa anomali gravitasi diperoleh dari satelit TOPEX yang meliputi posisi bujur, posisi lintang, topografi kawasan dan FAA (diperoleh otomatis dari FAC). Koreksi Bouguer dilakukan untuk mendapatkan nilai densitas rata-rata batuan bawah permukaan study area, sedangkan koreksi terrain dilakukan karena ketidakaturan topografi dan elevasi kedua kawasan gunung api. Peta kontur CBA dari koreksi Bouguer dan terrain tersebut menunjukkan anomali gravitasi yang dikonversi menjadi peta anomali gravitasi. Pemisahan anomali lokal dari anomali regional dilakukan dengan metode Moving Average untuk identifikasi dan interpretasi struktur bawah permukaan yang lebih akurat.



Gambar 1. Rancangan penelitian identifikasi dan interpretasi struktur bawah permukaan Gunung Bromo- Semeru.

B. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian didapatkan dari topex (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi). Sebagaimana lazimnya data yang dihimpun melalui metode geofisika, data gravitasi yang digunakan mencakup informasi topografi kawasan, nilai Free Air Anomaly (FAA) yang telah dikoreksi secara otomatis melalui Free Air Correction (FAC) oleh sistem TOPEX, serta dilengkapi dengan koreksi Bouguer dan koreksi terrain. Untuk keperluan analisis lebih lanjut, diterapkan metode moving average yang berfungsi dalam memisahkan anomali lokal dari anomali regional sehingga pola sebaran dapat diamati dengan lebih jelas..

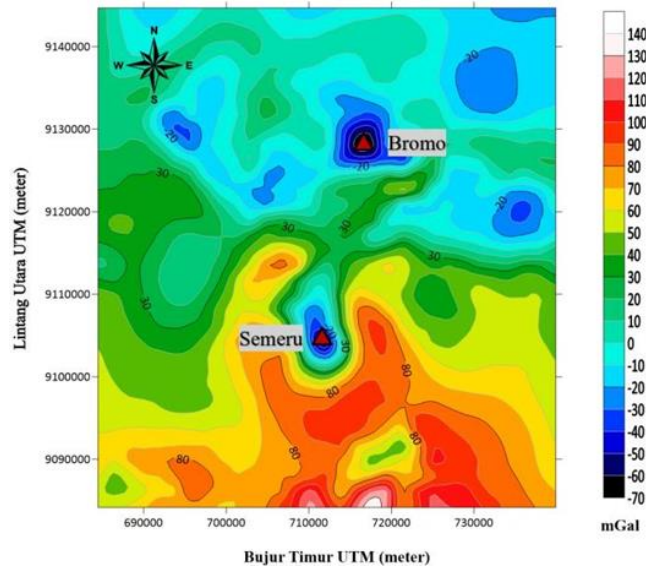
C. Teknik Pengolahan Data

Data FAA diperoleh otomatis dari TOPEX. Koreksi Bouguer dilakukan dengan memasukkan densitas rata-rata batuan bawah permukaan di Gunung Bromo-Semeru sebesar 3,9 gcm yang diperoleh dari perhitungan Nettleton. Selanjutnya dilakukan koreksi terrain menggunakan *Digital Elevation Model-Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM) untuk wilayah Jatim. Aplikasi yang dibutuhkan adalah Excel, Global

Mapper, Surfer dan Oasis Montaj. Global Mapper digunakan untuk memperoleh topografi kedua kawasan *study area* dari data DEM-SRTM. Oasis Montaj digunakan untuk mengolah data posisi bujur, lintang dan topografi kawasan *study area* menjadi data gravitasi terkoreksi *terrain*. Surfer digunakan untuk memperoleh peta kontur anomali gravitasi yang lengkap (CBA) dan peta kontur anomali lokal-regional terpisah.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data awal nilai CBA. Dengan teknik invers modelling, nilai CBA dapat diubah menjadi peta kontur CBA (Gambar 1) untuk menggambarkan distribusi anomali gravitasi yang mencerminkan variasi densitas struktur bawah permukaan. Peta kontur CBA dapat menggambarkan perbedaan komposisi dan sifat fisik batuan bawah permukaan. Namun, Peta CBA ini masih merupakan kombinasi antara anomali regional dan anomali lokal.



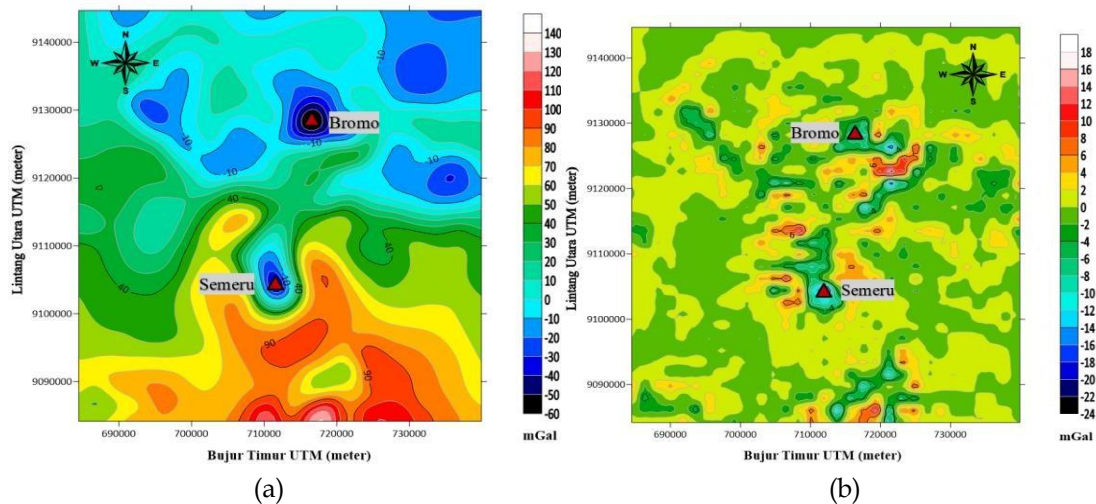
Gambar 1. Peta kontur CBA (wilayah Gunung Bromo-Semeru dan sekitarnya). Kontur berwarna biru merepresentasikan daerah beranomali rendah sedangkan kontur berwarna merah merepresentasikan daerah beranomali tinggi.

Gambar 1 merupakan peta kontur CBA di wilayah Gunung Bromo-Semeru dan sekitarnya yang memiliki nilai anomali Bouguer -70 mGal hingga 140 mGal, dimana 1 Gal = 0,01 ms⁻². Kontur berwarna biru di kedua puncak dan lereng Gunung Bromo dan Gunung Semeru mempresentasikan daerah dengan anomali Bouguer rendah, dimana anomali ini berhubungan dengan cairan magma yang terkonsentrasi dalam dapur magma (Realita *et al.*, 2022; Hofi *et al.*, 2024). Gunung Bromo dan sekitarnya menunjukkan anomali Bouguer rendah dengan dominasi warna biru muda hingga biru tua yang mengindikasikan keberadaan material piroklastik yang bersifat ringan dan berpori tinggi. Morfologi kaldera Bromo yang terbentuk akibat proses erupsi eksplosif menghasilkan endapan vulkanik dengan karakteristik serupa (Gunawan *et al.*, 2021; Fajar *et al.*, 2024). Sedangkan area sekitar Gunung Semeru menunjukkan anomali Bouguer tinggi dengan dominasi warna merah hingga kuning. Semeru sebagai gunung bertipe strato vulkanik tersusun dari akumulasi lava yang mengalami pembekuan magma berulang, sehingga menghasilkan jenis batuan yang lebih padat (Utama *et al.*, 2023; Hariyono *et al.*, 2023). Keberadaan intrusi magma ini memungkinkan peningkatan densitas pada area yang tersebar di arah selatan dan tenggara dari arah puncak semeru (Thouert *et al.*, 2011; Realita *et al.*, 2022).

Pemisahan anomali gravitasi menjadi anomali regional dan lokal (residual) bertujuan membedakan antara area permukaan yang relatif dangkal dan area yang lebih dalam. Dalam penelitian ini, pemisahan dilakukan menggunakan metode Moving Average, yang menghitung nilai rata-rata dari sejumlah titik data dalam rentang tertentu secara bertahap. Metode ini memungkinkan pemisahan anomali lokal dari anomali regional, dimana anomali regional mempresentasikan sumber anomali relatif dalam, sedangkan anomali lokal mempresentasikan sumber anomali relatif dangkal (Cooper and Cowan, 2006; Zuhdi *et al.*, 2019). Berdasarkan Gambar 2(a), skala anomali regional berada pada rentang -60 mGal hingga 140 mGal. Nilai anomali negatif mengindikasikan keberadaan batuan berdensitas rendah seperti batuan lapuk, zona alterasi hidrotermal, ruang magma atau struktur rekahan, sedangkan nilai anomali positif menunjukkan batuan berdensitas tinggi

seperti batuan beku padat. Karena anomali regional mempresentasikan sstruktur geologi relatif dalam, data ini lebih akurat untuk menginterpretasikan jenis batuan bawah permukaan.

Setelah anomali regional disubstraksi dari peta kontur CBA lengkap, diperoleh peta anomali lokal (residual) yang menggambarkan variasi densitas pada kedalaman relatif dangkal. Tujuan pemetaan ini untuk menonjolkan struktur geologi lokal dengan mengurangi pengaruh anomali regional yang lebih luas dan dalam. Interpretasi pola anomali lokal penting dalam memahami dinamika bawah permukaan yang berhubungan dengan aktivitas vulknaik dan sistem hidrotermal. Gambar 2(b) menunjukkan peta anomali lokal didominasi oleh warna kuning-hijau (anomali rendah), berbeda dengan peta anomali regional yang didominasi merah-oranye dan biru-hijau. Rentang nilai anomali lokal berada antara -24 mGal hingga 18 mGal, menunjukkan zona berdensitas rendah yang kemungkinan berkaitan dengan batuan lapuk, rekahan atau sistem hidrotermal. Sebaliknya, warna kuning hingga merah pada peta anomali lokal mengindikasikan keberadaan batuan beku padat atau intrusi dangkal yang memiliki densitas lebih tinggi.



Gambar 2. Peta anomali setelah dekomposisi peta CBA: (a) anomali regional (b) anomali lokal (residual).

Interpretasi anomali gravitasi dilakukan berdasarkan analisis peta kontur CBA, anomali regional dan anomali lokal (residual) untuk mengidentifikasi sebaran densitas batuan bawah permukaan di kawasan Gunung Bromo-Semeru. Anomali negatif yang ditunjukkan oleh kontur berwarna biru hingga hijau mengindikasikan keberadaan batuan berdensitas rendah, seperti material piroklastik lepas, zona rekahan, alterasi hidrotermal atau kantung magma dangkal. Pola ini banyak ditemukan di puncak dan lereng Gunung Bromo serta sebagian lereng Gunung Semeru, yang mencerminkan kondisi geologi hasil erupsi eksplosif. Sementara itu, anomali positif (merah-oranye) menunjukkan batuan berdensitas tinggi, yang diduga sebagai batuan beku andesit dan basalt, terutama di bagian selatan dan tenggara semeru. Zona ini mengindikasikan adanya intrusi magma atau akumulasi lava yang telah membeku, yang berkaitan erat dengan aktivitas vulkanik berulang. Pemisahan anomali regional dan lokal menggunakan metode moving average memberikan informasi tambahan untuk memahami kedalaman relatif sumber anomali. Anomali dalam mencerminkan struktur geologi dalam yang berskala besar, sedangkan anomali lokal menampilkan fitur geologi dangkal seperti rekahan permukaan atau intrusi kecil. Pola-pola ini memperjelas distribusi lateral densitas batuan tanpa memerlukan pemodelan kedalaman, sehingga cukup representatif untuk studi berbasis peta dua dimensi.

Pola-pola anomali yang terlihat pada **Gambar 2** memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai distribusi lateral, bahkan tanpa harus dilakukan pemodelan kedalaman secara rinci. Interpretasi ini sejalan dengan hasil penelitian Reynolds (2011) mengenai hubungan antara jenis batuan gunung api dengan densitas batuan, yang menjelaskan bahwa anomali gravitasi bernilai tinggi (ditunjukkan dengan warna merah hingga oranye) merupakan indikator adanya batuan dengan densitas tinggi. Kondisi tersebut umumnya berkorelasi dengan keberadaan intrusi magma yang sudah membeku serta tubuh batuan beku padat, seperti rhyolite, granite, andesit, maupun basalt sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**. Sebaliknya, nilai anomali gravitasi yang rendah (negatif) justru mengindikasikan keberadaan batuan dengan densitas rendah atau batuan sedimen, misalnya alluvium, clay, serta sandstone, sebagaimana juga dijelaskan dalam penelitian Nishiyama et al. (2014).

Tabel 1. Jenis batuan kawasan gunung api dengan jangkauan densitas dan densitas rata-rata yang biasa ditemui di lapangan (sumber: Reynolds, 2011).

No	Jenis Batuan Gunung Api	Densitas (g/cm ³)	Densitas rata-rata (g/cm ³)
1	alluvium	1,96–2,00	1,98
2	clay	1,63–2,63	2,21
3	sandstone	1,61–2,76	2,35
4	rhyolite	2,35–2,70	2,52
5	granite	2,50–2,81	2,64
6	andesite	2,40–2,80	2,61
7	basalt	2,70–3,30	2,99

Zona anomali negatif di sekitar kaldera Bromo, yang mengindikasikan kantung magma dangkal dan zona rekahan, dapat menjadi acuan penentuan Kawasan Rawan Bencana (KRB). Data ini dapat digunakan oleh BPBD dan PVMBG untuk pemetaan jalur evakuasi serta penentuan titik pemantauan aktivitas vulkanik. Penerapan serupa telah dilakukan di Gunung Merapi untuk mengidentifikasi zona lemah yang rawan pelepasan gas bertekanan tinggi (Anggraeni *and* Sulistyorini, 2021). Zona anomali positif di daerah selatan hingga tenggara Gunung Semeru menunjukkan indikasi intrusi magma (batuan padat) yang bernilai ekonomi sebagai bahan bangunan. Selain itu, intrusi magma juga dapat menjadi indikasi potensi panas bumi (Dewi *et al.*, 2019).

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan menginterpretasi struktur bawah permukaan Gunung Bromo-Semeru berdasarkan peta kontur anomaligravitasi dua dimensi. Hasil analisis peta CBA menunjukkan adanya variasi densitas yang signifikan antara wilayah Gunung Bromo dan Gunung Semeru. Anomali rendah terdistribusi di sekitar kaldera Bromo yang diinterpretasikan sebagai zona batuan lapuk, material piroklastik dan potensi keberadaan kantung magma dangkal. Sebaliknya, anomali tinggi mendominasi wilayah selatan dan tenggara Gunung Semeru, yang diasosiasikan dengan keberadaan batuan beku padat seperti andesit dan basalt akibat intrusi magma berulang. Pemisahan anomali lokal dan regional memperjelas perbedaan struktur geologi dalam dan dangkal. Informasi ini penting untuk memahami hubungan antara densitas batuan bawah permukaan dan potensi kualitas pasir vulkanik kawasan studi. Dengan pendekatan 2D berbasis data gravitasi, penelitian ini memberikan gambaran awal yang kuat untuk mendukung eksplorasi sumber daya geologi secara berkelanjutan tanpa memerlukan metode invasif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada reviewers yang telah memberikan masukan bermanfaat terhadap artikel ini. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada pihak pengelola data satelit TOPEX (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi) atas ketersediaan data sekunder penelitian berupa data gravitasi dan pihak pengelola laman IRIS (https://ds.iris.edu/wilber3/find_event) atas ketersediaan informasi koordinat lintang dan bujur untuk menentukan posisi koordinat study area, selain itu, ucapan terimakasih untuk pihak pembuat software Surfer, Global Mapper, dan Oasis Montaj yang bermanfaat dalam proses pengolahan data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Adelyra, S., Arianto, K.W., Haerudin, N., Mulyasari, R. dan Karyanto, R.C.W. 2024. Pemisahan anomali residual dan regional menggunakan metode moving average pada zona panasbumi Gunung Api Papandayan, Jawa Barat. BASIN: Jurnal Teknik Geologi, Vol. 7, No. 2.

- Ahmady, F.N. & Santoso, D. 2024. The Interpretation of Subsurface Structure Beneath Banda Api Volcano Inferred from Gravity Data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1437, No. 1, pp. 1–8.
- Anggraeni, F.K.A. and Sulistyorini. 2021. Two-dimensional modeling (2D) gravity method for interpreting subsurface structure of mount Merapi. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1832, No. 012002.
- Balulu, N. 2011. Interpretasi struktur bawah permukaan Gunung Muria menggunakan analisa data gravitasi. Jurnal Neutrino, Vol. 3, No. 2, pp. 104–107.
- Cooper, G.R.J. & Cowan, D.R. 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. Computers & Geosciences, Vol. 32, No. 10, pp. 1585–1591.
- Dewi, I.R., Maryanto, S., Wiyono, dan Pinilihin, S.T. 2019. Interpretation of subsurface structure to determine the geothermal system based on gravitation data from Mount Pandan, East Java Indonesia. Quest Journals Journal of Research in Environmental and Earth Science, Vol. 5, No. 1, pp. 1–9.
- Fajar, M.H.M., Santoso, E.B., Ulumuddin, F., Rahayu, H.K., Wirayudhatama, M., Alfany, M.K., Rafi, M.E.D., & Zukhrufah, S.Z. 2024. Geodiversity Assessment of Widodaren Spring: A Treasure Trove Site for Bromo Tengger Volcano's Future Geopark. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1418, No. 1, pp. 1–13.
- Gunawan, R.M.P.P., Ikhwanushova, G., Harijoko, A., Wibowo, H.E. and Setianto, A. 2021. Re-interpretation of distribution of Lautan Pasir caldera-forming eruption products, Bromo-Tengger Caldera Complex, East Java. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 851, No. 1, pp. 1–10.
- Gomez, C., Lavigne, F., Hadmoko, D.S. and Wassmer, P. 2018. Insights into lahar deposition processes in the Curah Lengcong (Semeru Volcano, Indonesia) using photogrammetry-based geospatial analysis, near- surface geophysics and CFD modelling. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 353, pp. 102–113.
- Guo, X., Ditmar, P., Zhao, Q., Klees, R. and Farahani, H.H. 2017. Earth's gravity field modelling based on satellite accelerations derived from onboard GPS phase measurements. Journal of Geodesy, Vol. 91, Issue 9, pp. 1049–1068.
- Hariyono, E., Fahmi, M.N., & Wulandari, A. 2023. Morphological Identification of Rocks around Ranupani Village, Mount Semeru, Lumajang, East Java. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2623, No. 1, pp. 1–7.
- Hinze, W.J., von Frese, R.R.B. and Saad, A.H. 2013. Gravity and magnetic exploration: principles, practices, and applications. Cambridge: Cambridge Uni Press, UK, pp. 1–515.
- Hofi, L.N., Maryanto, S., Susilo, A. dan Wuryani, S.D. 2024. Derivative analysis of gravity data in revealing the subsurface fault structure model in Semeru Volcano, East Java and its surrounding. Trends in Sciences, Vol. 21, No. 9
- Liu, J., Zhang, J., Jiang, L., Lin, Q. and Wan, L. 2019. Polynomial-based density inversion of gravity anomalies for concealed iron-deposit exploration in North China. Geophysics, Vol. 84, Issue 5, pp. 1–44.
- Nettleton, L.L. 1939. Determination of density for reduction of gravimeter observations. Geophysics, Vol. 4, Issue 3, pp. 176–183.
- Nishiyama, R., Tanaka, Y., Okubo, S., Oshima, H., Tanaka, H.K.M. & Maekawa, T., 2014. Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3-D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(1), pp.699–710.
- Maryanto, S., Siombone, S.H., Prayogo, A., Yulia, T., & Sari, R.P.H. 2018. Preliminary Study: Density Layer Values Estimation of Volcano Hosted Geothermal Area at Tiris Village, Probolinggo Regency, East Java, Indonesia. International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 13, No. 6, pp. 4385–4390.
- Permatasari, A.W., Santoso, D. dan Setianingsih. 2019. Subsurface modeling based on gravity data of Rendingan–Ulubelu–Waypanas (RUW) geothermal field, Lampung, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 318, No. 1, 012002
- Realita, A., Fahmi, M.N., Prastowo, T. and Madlazim. 2022. Detection of lahar flow direction from Semeru eruption on 4 December 2021 using gravity method. Journal of Physical Science and Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 75–85.
- Reynolds, J.M. 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley-Blackwell: West Sussex, UK, pp. 1–750.
- Sehah, U., Prabowo, U.N., Raharjo, S.A. dan Kurniati, R. 2023. Utilization of satellite gravity anomaly data for two-dimensional modeling of subsurface structure of Slamet Volcano, Central Java, Indonesia. Malaysian Journal of Geosciences, Vol. 7, No. 1, pp. 1–7.
- Siombone, S.H., Susilo, A., & Maryanto, S. 2022. Integration of Topex Satellite Gravity and Digital Elevation Model Shuttle Radar Topography Mission (DEM SRTM) Imagery for Subsurface Structure Identification at Tiris Geothermal Area. POSITRON, Vol. 12, No. 2, pp. 98–111.
- Utama, W., Putra, D.P.N., Garini, S.A., & Indriani, R.F. 2023. Optimizing Surface Lithology Interpretation from Global Gravity Model and Landsat 8 Satellite Imagery in Semeru Mountain, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1276, No. 1, pp. 1–9.
- Zuhdi, M., Ayub, S., Taufik, M., & Sukrisna, B. 2019. Moving Average Filter untuk Memisahkan Efek Dangkal Anomali Gravitasi Time Lapse. Prisma Sains: Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA IKIP Mataram, Vol. 7, No. 2, pp. 121.