

ANALISIS DAN INTERPRETASI ANOMALI GRAVITASI UNTUK IDENTIFIKASI POTENSI SUMBER PANAS BUMI DI GUNUNG ARJUNO-WELIRANG

^{1*)}Eni Novianti, ^{2*)}Arie Realita, ^{3*)}Tjipto Prastowo

^{1*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: eni.20016@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: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Gunung Arjuno-Welirang menyimpan potensi sumber panas Bumi yang melimpah. Hal ini ditandai dengan eksistensi mata air panas Coban, Cangar dan Padusan sepanjang lereng kompleks Arjuno-Welirang serta emisi gas fumarol dan solfatara di sekitar puncak Welirang. Dalam konteks inilah, penelitian ini dilaksanakan untuk identifikasi sumber panas Bumi kompleks Arjuno-Welirang melalui analisis dan interpretasi pengukuran anomali gravitasi. Data penelitian diperoleh dari satelit TOPEX. *Data enhancement* dilakukan secara berjenjang melalui dekomposisi data CBA menjadi anomali residual dan anomali regional dengan bantuan filter *upward continuation*, teknik *derivative* (FHD dan SVD) untuk identifikasi dan interpretasi peta anomali yang lebih akurat, serta analisis spektrum daya sinyal anomali residual untuk estimasi kedalaman sumber panas Bumi. Hasil citra resolusi tinggi dalam bentuk peta kontur SVD berbasis anomali residual memberikan gambaran sebaran pola anomali rendah di sekitar puncak dan lereng Arjuno-Welirang dan Penanggungan, serta arah barat dan barat daya Arjuno-Welirang. Anomali rendah tersebut menunjukkan keberadaan fluida panas sebagai produk aktivitas sumber panas Bumi bawah permukaan. Analisis lebih lanjut dengan bantuan spektrum radiasi anomali residual memberikan estimasi kedalaman sumber panas Bumi Arjuno-Welirang adalah 1650 m di bawah permukaan. Identifikasi sumber panas Bumi khususnya potensi sumber panas Bumi Arjuno-Welirang adalah penting sebagai bagian dari kegiatan eksplorasi sumber panas Bumi nusantara untuk mencari sumber energi alternatif yang ramah lingkungan (*green energy*).

Kata Kunci: Gunung Arjuno-Welirang, potensi panas Bumi, anomali gravitasi, TOPEX, anomali residual

Abstract

Mount Arjuno-Welirang is home for geothermal potential, characterized by the presence of hot springs such as Coban, Cangar, and Padusan along its slopes, as well as fumarole and solfatara gas emissions around the peak of Welirang. In this context, this research was conducted to identify the source in the Arjuno-Welirang through analysis and interpretation of gravity measurements. The data were collected from TOPEX satellite. *Data enhancement* was carried out through the CBA decomposition into residual and regional anomalies using an upward continuation filter. Derivative techniques (FHD and SVD) were employed for accurately identifying and interpreting anomaly maps, along with analysis of the power spectrum of residual anomaly signals to estimate the source depth. High-resolution image results in the form of SVD-based residual anomaly contour maps provided an overview of the distribution pattern of low anomalies around the peaks and slopes of Arjuno-Welirang and Penanggungan, as well as to the west and southwest directions. These low anomalies indicate the presence of hot fluids as a product of subsurface geothermal activities. A further analysis using the power spectrum of residual anomaly radiation estimated the depth of the Arjuno-Welirang geothermal source to be 1650 meters below the surface. Identification of the geothermal source, particularly the potential of the Arjuno-Welirang geothermal source, is crucial as part of geothermal exploration activities in Indonesia to search for environmentally friendly alternative energy (*green energy*).

Keywords: Mount Arjuno-Welirang, geothermal potential, gravity anomaly, TOPEX, residual anomaly

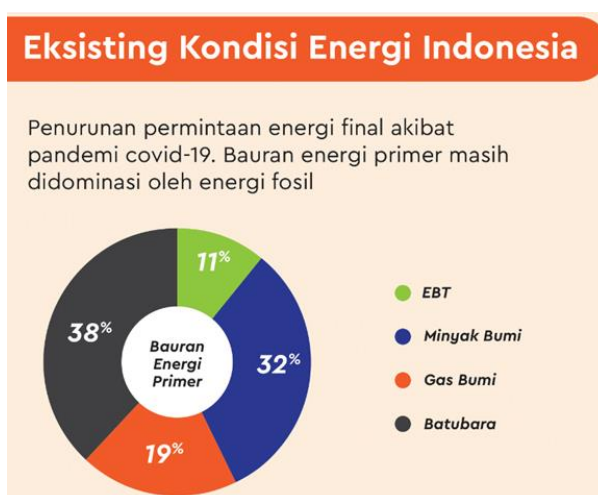
I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Berdasarkan tinjauan geologis dan geografis, wilayah Indonesia dilintasi oleh dua jalur pegunungan yaitu jalur Sirkum Pasifik dan Mediterania (Hermon *et al.*, 2019). Lintasan kedua jalur pegunungan tersebut menyebabkan Indonesia memiliki banyak gunung api aktif (Hall and Smyth, 2008; Simpson *et al.*, 2011; Cummins, 2017) yang berkorelasi dengan sumber panas Bumi (*geothermal*) sebagai energi alternatif terbarukan yang ramah lingkungan (Setiawan, 2014; Daud *et al.*, 2019; Darma *et al.*, 2021). Salah satu wilayah dengan cadangan panas Bumi melimpah adalah Pulau Jawa. Pulau Jawa memiliki aktivitas vulkanik yang tinggi (Setijadji *et al.*, 2006; Špičák *et al.*, 2007; Setijadji, 2010) karena kehadiran rangkaian gunung api aktif yang berasosiasi dengan sistem panas Bumi (Setijadji, 2010; Maryanto, 2017). Salah satu potensi sumber panas Bumi di Jawa, khususnya Provinsi Jawa Timur adalah kawasan sekitar Gunung Arjuno-Welirang.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai sumber panas Bumi Arjuno-Welirang dilakukan menggunakan berbagai metode, baik metode lapangan maupun non-lapangan (Wardana *et al.*, 2016; Martadiastuti *et al.*, 2017; Maryanto, 2017; Sumotarto, 2018; Daud *et al.*, 2019). Namun demikian, belum ada satupun yang melakukan pengukuran anomali gravitasi berbasis kolektivitas data gravitasi dari pengamatam satelit. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan metode geofisika berbasis pengukuran anomali gravitasi untuk menentukan potensi energi panas Bumi sistem Arjuno-Welirang dengan bantuan satelit TOPography EXperiment (TOPEX) yang dapat diakses secara bebas (Realita *et al.*, 2022). Keunggulan *data collection* via satelit adalah relatif mudah dalam pelaksanaan dan tidak bersifat invasif terhadap bentang alam lokal (Okpoli and Akingboye, 2019). Informasi yang diperoleh dapat digunakan untuk menduga potensi cadangan energi panas Bumi sistem Gunung Arjuno-Welirang sebagai bagian dari pengembangan dan eksplorasi energi panas Bumi di Indonesia (Darma *et al.*, 2021).

Pembatasan konsumsi energi atau bahan bakar berbasis fosil untuk mereduksi peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer telah menjadi isu global dan menjadi perhatian dunia. Pencarian sumber energi alternatif yang ramah lingkungan melalui penerapan 'teknologi hijau' berbasis *zero carbon emission* merupakan salah satu poin rujukan yang tertulis dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs). Dalam konteks ini, eksplorasi panas Bumi sebagai energi alternatif di Indonesia mulai dikembangkan sejalan dengan potensi panas Bumi yang melimpah, yaitu 40% total energi panas Bumi dunia (Setiawan, 2014; Darma *et al.*, 2021). Sebagai bagian dari Energi Baru dan Terbarukan (EBT), keunggulan energi panas Bumi adalah pada reduksi emisi gas karbon. Namun demikian, konsumsi energi panas Bumi di Indonesia (11%) masih jauh lebih rendah daripada energi konvensional berbasis pembakaran karbon (89%) (lihat Gambar 1).



Gambar 1. Variasi konsumsi energi dalam berbagai bentuk di Indonesia sampai dengan Juli 2021 (sumber: *The Physics of Volcanos* by Prastowo *et al.* (2022), halaman 48).

Metode gravitasi umumnya digunakan untuk delineasi struktur geologi bawah permukaan, misalnya kehadiran, tipe dan karakteristik patahan (Toushmalani, 2010; Saragih and Brotopuspito, 2018; Yanis *et al.*,

2019) dan ketebalan sedimen cekungan bawah permukaan (Ekpa *et al.*, 2018). Namun demikian, metode ini bisa juga digunakan untuk mempelajari karakteristik struktur geologi dekat permukaan atau deposit lahar (Gomez *et al.*, 2018; Realita *et al.*, 2022). Pengambilan data gravitasi dilaksanakan dengan bantuan satelit bersifat non-destruktif (Guo *et al.*, 2017; Julzarika *et al.*, 2020). Dengan mempertimbangkan keunggulan metode gravitasi dan pengumpulan data berbasis pengamatan satelit TOPEX, maka penelitian ini merencanakan identifikasi potensi sumber panas Bumi Arjuno-Welirang melalui pengukuran anomali gravitasi. Hasil-hasil penelitian diharapkan bisa berkontribusi terhadap pengembangan dan eksplorasi sumber panas Bumi di Indonesia.

B. Koreksi Anomali Gravitasi

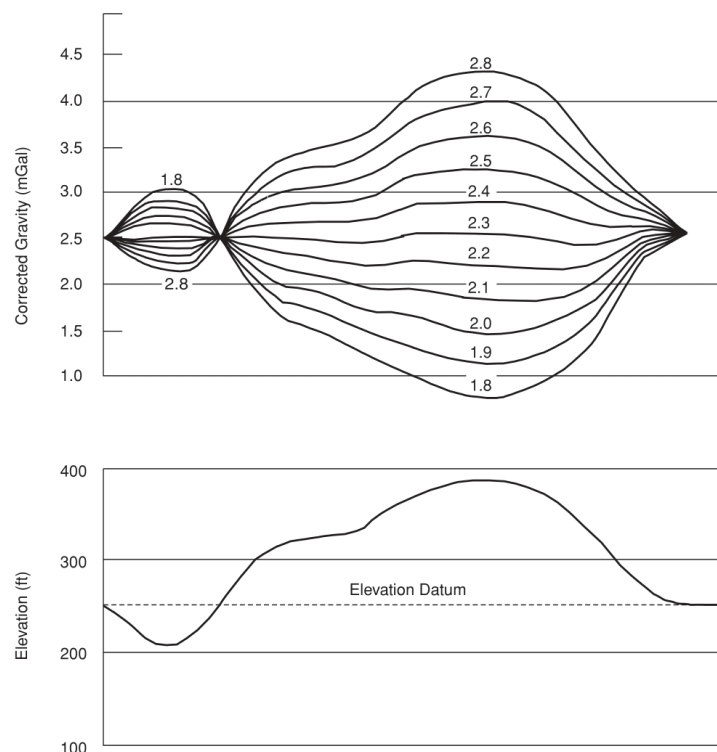
Berbagai jenis koreksi gravitasi atau anomali gravitasi diterapkan agar nilai akhir yang diperoleh valid dan reliabel untuk pengukuran gravitasi di lokasi saat itu. Beberapa contoh koreksi adalah koreksi terhadap fitur muka laut (bentuk *geoid*), ketinggian (*elevasi*) dan topografi wilayah.

1. Free-Air Correction (FAC)

Prinsip FAC adalah menentukan medan gravitasi di suatu titik yang terletak pada ketinggian tertentu di atas permukaan laut dengan tidak mempertimbangkan kehadiran dan jenis struktur batuan geologi bawah permukaan (Reynolds, 2011). Kuantitas yang diperoleh dari penerapan FAC dikenal sebagai FAA (*Free-Air Anomaly*). Dalam penelitian ini, nilai FAA diberikan secara otomatis oleh TOPEX.

2. Koreksi Bouguer

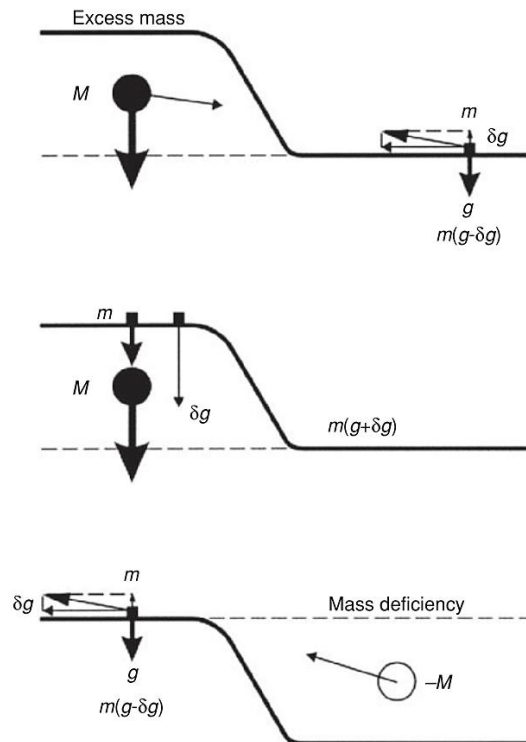
Berbeda dengan FAC, koreksi Bouguer menentukan medan gravitasi di lokasi pengukuran dengan mempertimbangkan struktur batuan geologi bawah permukaan dengan densitas batuan rata-rata yang memberikan efek gravitasi tambahan (Reynolds, 2011). Nettleton (1939) mengajukan teknik penentuan densitas batuan rata-rata dengan memanfaatkan metode grafis seperti terlihat pada Gambar 2. Menurut teknik ini, densitas batuan rata-rata diambil dari nilai densitas yang paling tidak berkorelasi dengan topografi lokal.



Gambar 2. Metode Nettleton untuk penentuan densitas batuan dekat permukaan dengan topografi kawasan. Densitas batuan rata-rata yang ditemukan cocok dengan kondisi geologi yang sedang dipelajari adalah $2,3 \text{ Mg m}^{-3}$ karena yang paling minim berkorelasi dengan topografi lokal (sumber: Reynolds, 2011).

3. Koreksi Terrain

Secara teoritis, koreksi *terrain* diperlukan karena topografi kawasan di lokasi survei gravitasi bisa memiliki variasi elevasi yang signifikan, misalnya kehadiran area perbukitan atau lembah (Gambar 3).



Gambar 3. Koreksi *terrain* diperlukan untuk mengantisipasi pengaruh struktur permukaan yang lebih tinggi (area perbukitan) dan/atau lebih rendah (area lembah) pada survei gravitasi (sumber: Reynolds, 2011).

C. Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Nilai CBA berkorelasi dengan variasi densitas batuan bawah permukaan (Reynolds, 2011). Jika densitas massa sumber medan 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 densitas massa objek di sekitar sumber, maka diperoleh anomali negatif. Hasil akhir pengolahan data gravitasi (*corrected gravity data*) berupa peta CBA yang masih mengandung anomali lokal (anomali residual) dan anomali regional.

D. Filter Upward Continuation

Pemisahan sinyal sumber berbasis pengelompokan panjang gelombang dilakukan dengan filter *upward continuation* yang efektif digunakan untuk memisahkan sinyal gelombang pendek (anomali residual) dari gelombang panjang (anomali regional) (Blakely, 1995; Ravat, 2007; Reynolds, 2011). Secara prinsip, proses *upward continuation* adalah memindahkan (vertikal ke atas) data gravitasi yang diperoleh dari lokasi pengukuran pada ketinggian tertentu sampai pada lokasi pengukuran dengan ketinggian di mana anomali residual sudah terpisah dengan anomali regional (Blakely, 1995; Ravat, 2007; Reynolds, 2011). Dalam penelitian ini, filter *upward continuation* secara efektif digunakan untuk mereduksi efek gravitasi dari sumber dekat dan di permukaan dengan mempertajam efek gravitasi dari sumber relatif dalam.

E. Teknik First Horizontal Derivative (FHD)

Teknik FHD digunakan dalam penelitian ini karena FHD bisa meningkatkan ketajaman pola anomali secara lateral (Hayatudeen *et al.*, 2021). Selain itu, teknik ini bisa mengoptimalkan variasi densitas dari data gravitasi sehingga secara efektif bisa digunakan untuk menentukan struktur batuan bawah permukaan, khususnya lokasi sumber panas Bumi (Rosid *et al.*, 2023; Daud *et al.*, 2019). Dalam pelaksanaannya, FHD mempertajam anomali rendah yang umumnya diasosiasikan dengan sumber anomali dangkal (Fairhead, 2007; Daud *et al.*, 2019; Hayatudeen *et al.*, 2021).

F. Teknik Second Vertical Derivative (SVD)

Secara prinsip, menurut Reynolds (2011) teknik ini berdasarkan pengaruh variasi elevasi (vertikal) terhadap gravitasi lokal. Dalam penelitian ini, teknik SVD diterapkan agar diperoleh hasil dan interpretasi anomali gravitasi yang lebih baik, terutama jika filter *upward continuation* gagal memberikan citra sumber

anomali yang berasal dari kedalaman tertentu di bawah permukaan dengan resolusi tinggi, misalnya kehadiran sumber panas Bumi.

G. Radially Averaged Power Spectrum (RAPS) dan Depth Estimate

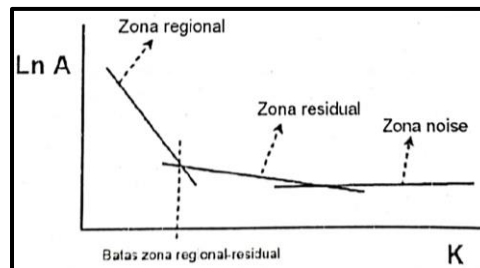
Teknik yang biasa digunakan untuk menduga kedalaman sumber anomali disebut sebagai *Radially Averaged Power Spectrum* (RAPS) (Nafian *et al.*, 2021; Nyaberi, 2023). Untuk menentukan kedalaman sumber anomali, maka digunakan persamaan yang diberikan oleh Nyaberi *et al.* (2023) sebagai berikut,

$$|d| = \frac{-1}{4\pi} \left(\frac{\log E_1 - \log E_2}{k_1 - k_2} \right) \quad (1)$$

di mana d adalah kedalaman sumber (berharga negatif), E adalah energi spektrum, dan k adalah bilangan gelombang. Menurut persamaan (1), kedalaman sumber anomali gravitasi bisa dihitung dari kemiringan (*slope*) spektrum energi dibagi dengan faktor pembagi 4π (Wahaab *et al.*, 2017; Nyaberi *et al.*, 2023):

$$d = \frac{-s}{4\pi} \quad (2)$$

Dengan demikian, kedalaman sumber anomali target adalah gradien dari *log power spektrum* terhadap k (Setiadi *et al.*, 2014; Nafian *et al.*, 2021; Nyaberi *et al.*, 2023).

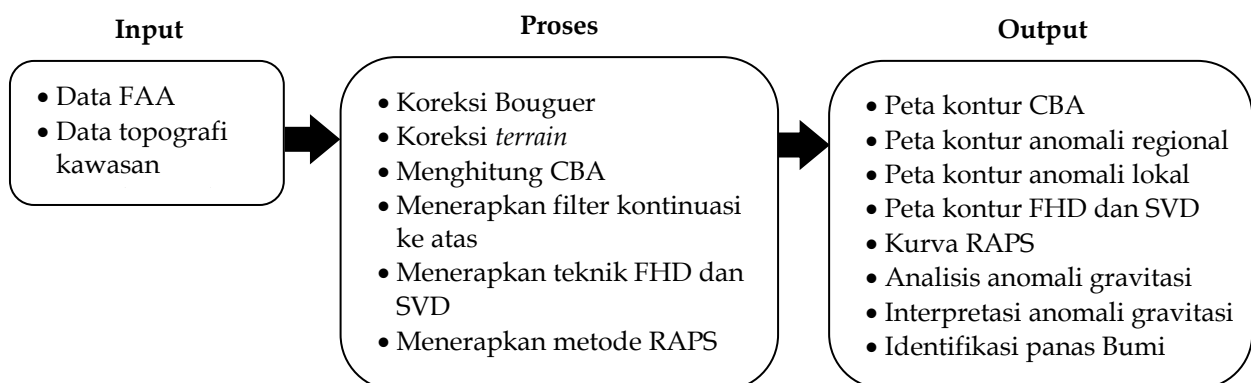


Gambar 4. Grafik hubungan bilangan gelombang (k) dan amplitudo (A) kurva RAPS (sumber: Sarkowi, 2011).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini memetakan anomali gravitasi di Gunung Arjuno-Welirang dan sekitarnya untuk identifikasi potensi sumber panas Bumi. Metode gravitasi dengan memanfaatkan satelit TOPEX sebagai instrumen digunakan dalam penelitian ini. Untuk keperluan *data enhancement* dan kemudahan interpretasi diterapkan koreksi Bouguer dan *terrain* kemudian diperoleh CBA. Pemisahan anomali regional dan lokal menggunakan filter *upward continuation*. Sesudah anomali residual-regional terpisah, diterapkan teknik *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Selain itu, untuk mengetahui kedalaman lokasi sumber panas Bumi (diukur dari permukaan), maka metode *Radially Averaged Power Spectrum* (RAPS) dan *estimate of source depth* diterapkan. Data sekunder yang dihasilkan meliputi peta kontur CBA, anomali regional, residual, FHD, SVD, serta kurva RAPS dan *source depth estimate*. Sistematika rancangan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Rancangan penelitian analisis anomali gravitasi untuk identifikasi potensi panas Bumi sistem Arjuno-Welirang.

B. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian merupakan data sekunder berupa data gravitasi yang didapatkan dari TOPEX (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi). Sebagaimana data terkumpul melalui metode geofisika pada

umumnya, data gravitasi yang meliputi data topografi dan gravitasi kawasan (FAA) yang dikoreksi melalui FAC (secara otomatis diberikan oleh TOPEX), koreksi Bouguer, koreksi *terrain*, filter *upward continuation* diterapkan untuk pemisahan anomali residual dari anomali regional dan filter SVD diterapkan untuk peningkatan kualitas data (*data enhancement*). Seluruh proses koreksi dan pemfilteran dilakukan dengan basis *study area* di Gunung Arjuno-Welirang dan sekitarnya.

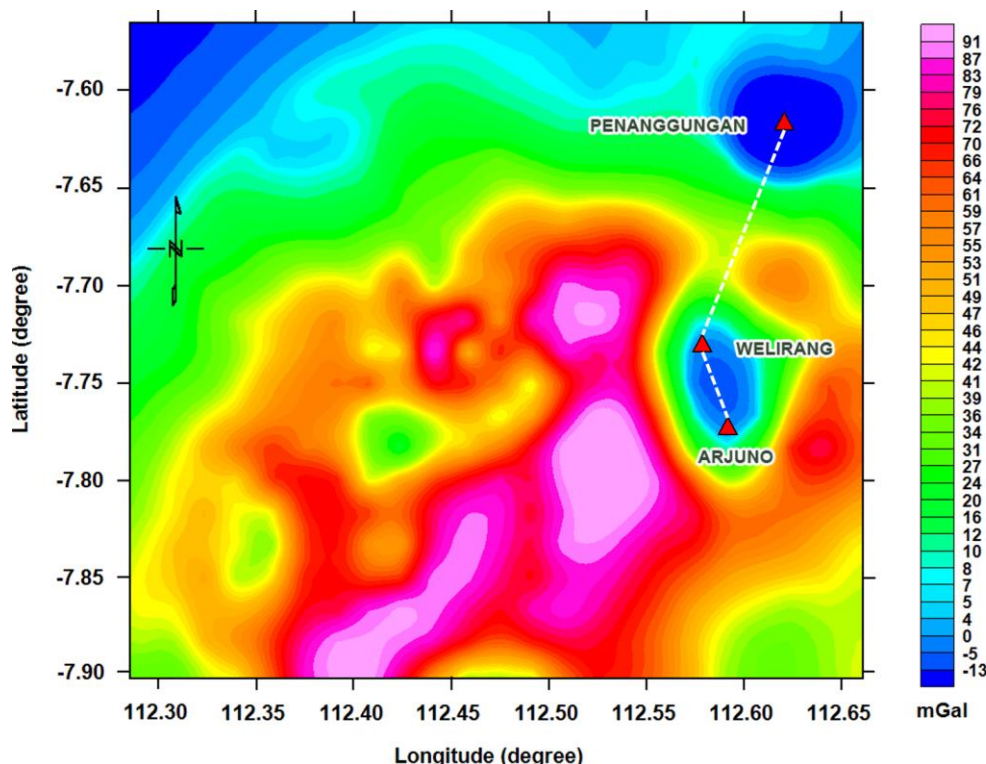
C. Teknik Pengolahan Data

Data FAA terkoreksi diperoleh dari TOPEX. Koreksi Bouguer dilakukan dengan memasukkan nilai densitas rata-rata batuan bawah permukaan di sekitar sistem Arjuno-Welirang sebesar $2,84 \text{ gcm}^{-3}$ yang diperoleh dari perhitungan Nettleton. Selanjutnya dilakukan koreksi *terrain* menggunakan *Digital Elevation Model-Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM) wilayah Jawa Timur. Aplikasi yang dibutuhkan adalah Excel, Global Mapper, Surfer dan Oasis Montaj. Global Mapper digunakan untuk mendapatkan data topografi wilayah penelitian dari data DEM-SRTM. Surfer digunakan untuk mengolah data posisi bujur, lintang dan topografi kawasan menjadi data gravitasi terkoreksi *terrain*. Oasis Montaj digunakan untuk memperoleh peta kontur CBA, peta kontur anomali residual-regional, peta kontur FHD dan SVD, serta kurva RAPS dan *source depth estimate*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Peta Kontur Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Hasil pengolahan data awal adalah nilai CBA. Dengan teknik pemodelan inversi (*forward modelling*), maka nilai CBA diubah menjadi peta kontur CBA (Gambar 6) yang merupakan kombinasi anomali regional dan residual. Kedua jenis anomali ini berkorelasi dengan sumber sinyal variasi densitas batuan bawah permukaan.



Gambar 6. Peta kontur CBA *study area* (wilayah Gunung Arjuno-Welirang dan sekitarnya). Kontur berwarna biru merepresentasikan daerah beranomali rendah sedangkan kontur berwarna merah merepresentasikan daerah beranomali tinggi.

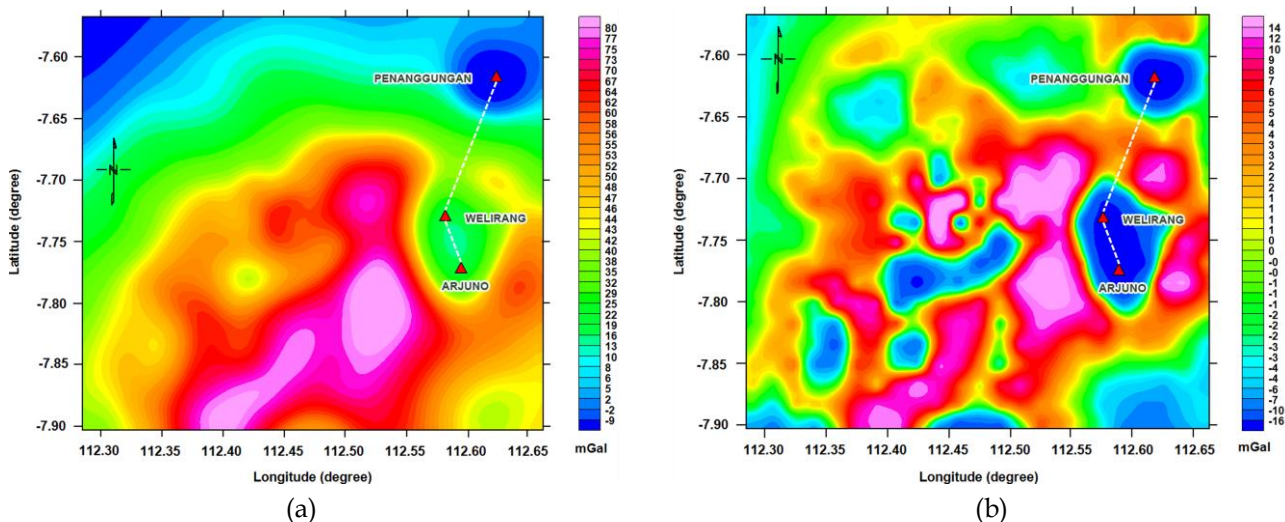
Gambar 6 memiliki anomali Bouguer dalam rentang $-13 \text{ mGal} - 91 \text{ mGal}$, di mana $1 \text{ Gal} = 0,01 \text{ ms}^{-2}$. Anomali rendah (kontur biru) terdapat di puncak dan lereng Arjuno-Welirang serta pada jarak 14,2 km arah timur laut kompleks Arjuno-Welirang. Kedua area tersebut, terutama puncak dan lereng Arjuno-Welirang memiliki anomali rendah diduga karena terdapat sumber panas Bumi yang terperangkap di bawah permukaan (Maryanto, 2017; Apriani *et al.*, 2018; Daud *et al.*, 2019; Pocasangre *et al.*, 2020; Nyaberi, 2023).

Anomali sedang (kontur hijau, kuning dan oranye) dengan rentang 10 mGal – 60 mGal dominan di kaki kompleks Arjuno-Welirang dan arah barat laut yang merupakan area pemukiman penduduk dan perbukitan. Sedangkan anomali tinggi (kontur merah dan merah muda) dengan rentang 60 mGal – 91 mGal terdapat pada arah barat dan barat daya hingga selatan kompleks Arjuno-Welirang. Hal ini diduga karena komposisi batuan penyusun struktur bawah permukaan yang lebih padat dan lebih tua dipengaruhi oleh deretan pegunungan selatan Pulau Jawa (Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; Setijadji, 2010; Setiadi *et al.*, 2014; van Gorsel, 2018).

B. Pemisahan Anomali Residual dari Anomali Regional

Anomali regional berasal dari sinyal gelombang panjang yang dihasilkan oleh sumber relatif dalam dari permukaan. Peta kontur anomali regional (Gambar 7(a)) terlihat lebih halus dengan batas-batas antara anomali rendah dan tinggi yang kabur. Hal itu karena lapisan batuan bawah permukaan yang relatif dalam cenderung memiliki densitas yang homogen (Setiadi *et al.*, 2014). Anomali regional di area sekitar puncak dan lereng Arjuno-Welirang didominasi kontur berwarna hijau dengan anomali 16 mGal – 40 mGal (anomali sedang) yang tidak sesuai dengan peta kontur CBA pada Gambar 6, di mana anomali rendah ditemukan di area sekitar puncak dan lereng kompleks Arjuno-Welirang.

Peta kontur anomali residual (Gambar 7(b)) memperlihatkan pola kontur anomali yang lebih kompleks dan kontras warna yang tajam. Anomali residual merepresentasikan sumber anomali yang relatif dangkal dengan rentang -16 mGal – 14 mGal. Pola anomali residual di area sekitar puncak dan lereng Arjuno-Welirang serta di sekitar Penanggungan didominasi kontur berwarna biru dengan anomali -16 mGal sampai -6 mGal (anomali rendah) yang sesuai dengan kontur CBA pada Gambar 6. Hal ini mengindikasikan bahwa batuan yang lebih dekat dengan permukaan memiliki densitas yang relatif rendah dan dugaan keberadaan sumber panas Bumi berada pada area dekat permukaan.

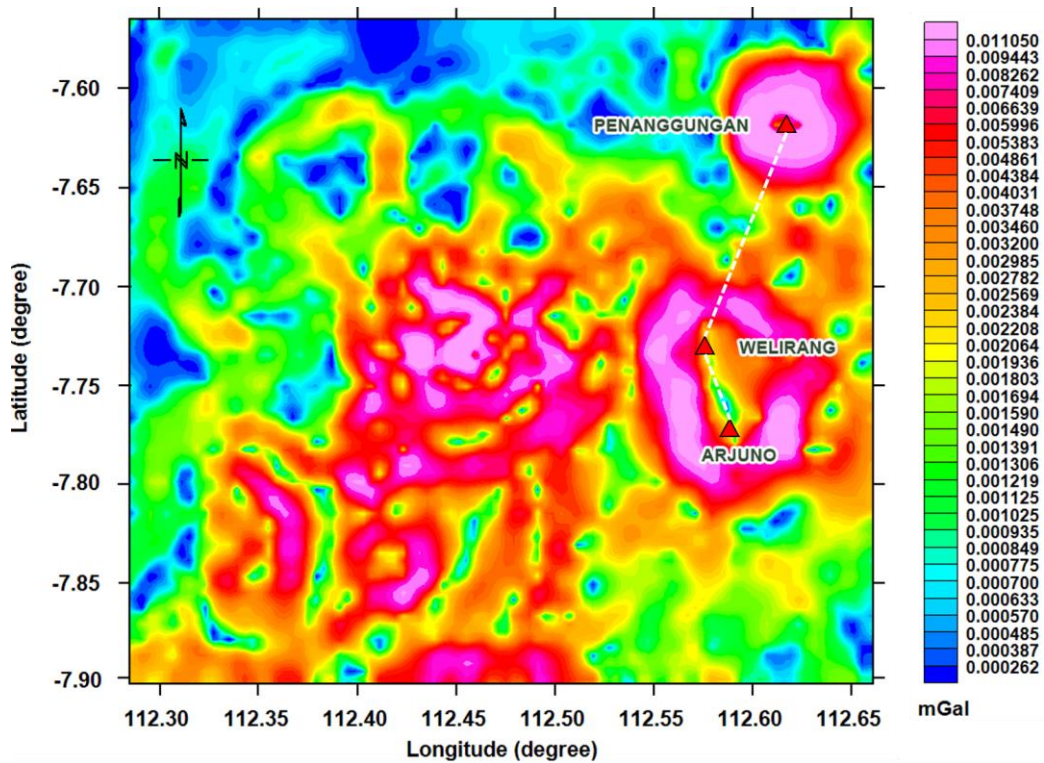


Gambar 7. Peta anomali setelah dekomposisi peta CBA: (a) peta anomali regional, (b) peta anomali residual.

C. Interpretasi Anomali Gravitasi

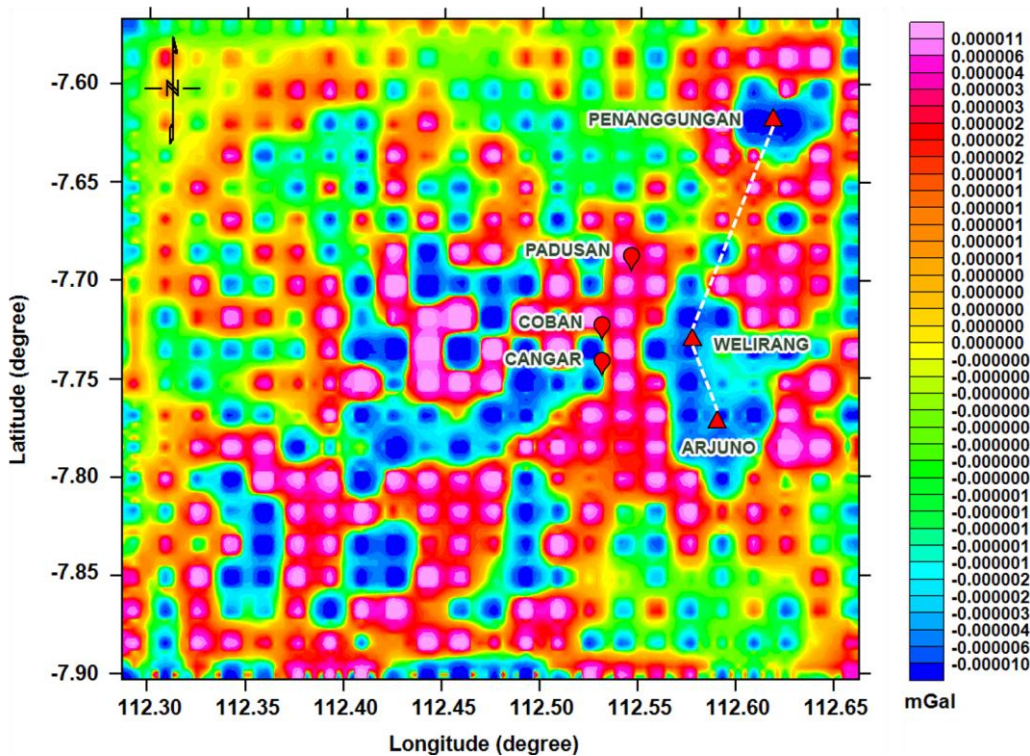
Sesudah citra kontur anomali yang lebih baik diperoleh dari anomali residual, maka dilakukan analisis *derivative*. Teknik *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) diterapkan pada data anomali residual. Dalam penelitian ini, teknik FHD dan SVD berperan dalam meningkatkan resolusi peta kontur anomali residual. Data anomali residual yang diproses menggunakan kedua teknik tersebut memberikan hasil yang dibandingkan satu sama lain untuk menentukan peta kontur anomali yang lebih mudah untuk diinterpretasikan.

Teknik FHD diterapkan terlebih dahulu berbasis data anomali residual dengan hasil pada Gambar 8. Sebaran pola anomali yang diperoleh berbeda dengan pola anomali residual pada Gambar 7(b). Terutama lokasi di sekitar puncak dan lereng Arjuno-Welirang sebagai *targetted area*, bukan anomali rendah yang diperoleh melainkan anomali tinggi. Hal ini karena teknik FHD menampilkan kontras densitas dengan mempertajam batas-batas lateral pola anomali (Fairhead, 2007; Daud *et al.*, 2019; Hayatudeen *et al.*, 2021). Dalam hal ini, peta kontur FHD tidak layak untuk diinterpretasikan. Oleh karena itu, peta kontur FHD tersebut tidak digunakan dalam proses interpretasi lebih lanjut.



Gambar 8. Peta kontur *First Horizontal Derivative* (FHD) diproses menggunakan basis data anomali residual.

Untuk interpretasi lebih lanjut yang lebih baik, teknik SVD diterapkan berbasis data anomali residual dengan peta SVD yang bisa dilihat pada Gambar 9. Pola anomali peta SVD memiliki kemiripan dengan pola anomali residual pada Gambar 7(b), terutama di area sekitar puncak dan lereng kompleks Arjuno-Welirang dan Penanggungan dengan dominasi kontur biru (anomali rendah). Nilai anomali peta SVD berada dalam rentang bilangan positif dan negatif (meski sama-sama merupakan bilangan yang kecil). Oleh karena itu, interpretasi Gambar 9 dilakukan dengan bantuan terminologi anomali positif dan negatif.



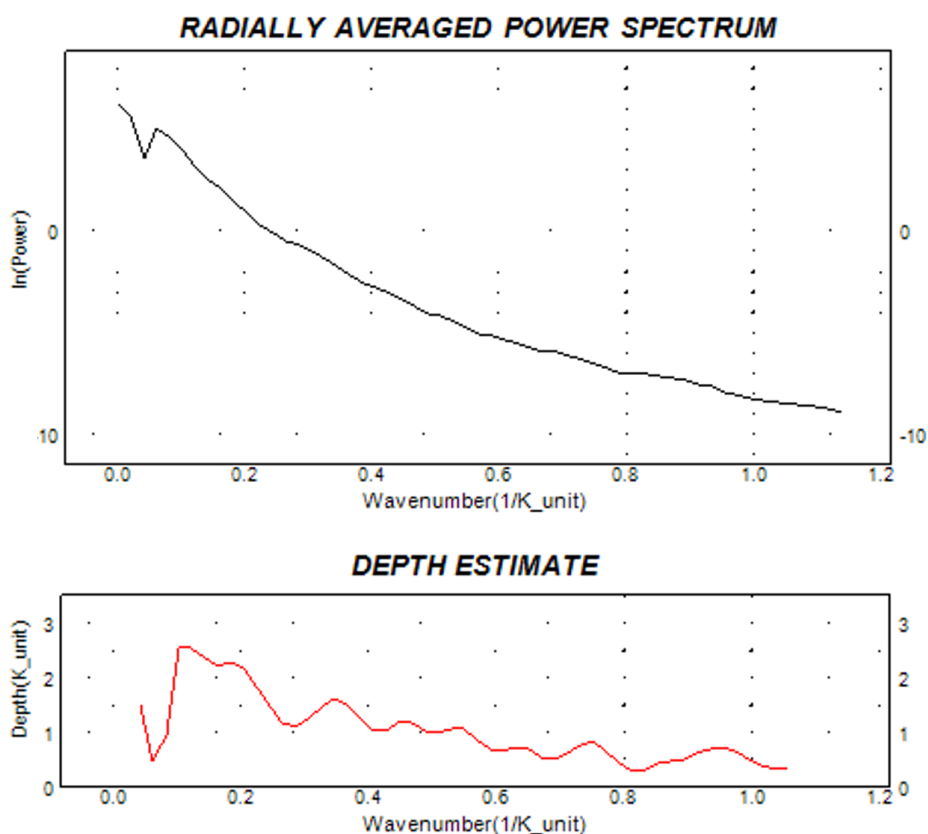
Gambar 9. Peta kontur *Second Vertical Derivative* (SVD) diproses menggunakan basis data anomali residual.

Anomali positif (kontur warna oranye hingga pink) diduga banyak mengandung batuan vulkanik dengan densitas relatif sedang sampai tinggi. Sedangkan anomali negatif (kontur warna biru tua hingga biru muda) diduga sebagai cadangan fluida panas atau batuan vulkanik dengan densitas rendah. Oleh karena itu, lokasi paling mungkin keberadaan potensi sumber panas Bumi adalah pada lokasi-lokasi yang bersesuaian dengan anomali negatif. Hal ini karena sumber panas Bumi berbentuk fluida panas (*liquid* dan/atau gas) yang terperangkap di antara lapisan batuan bawah permukaan dengan densitas tinggi.

Manifestasi sumber panas Bumi kompleks Gunung Arjuno-Welirang diamati melalui kemunculan gas fumarol dan solfatara di sekitar puncak Welirang sekaligus menandai zona *upflow*. Sedangkan zona *outflow* tersebar di lokasi sepanjang lereng Arjuno-Welirang. Zona ini ditandai dengan kemunculan sumber mata air panas bertipe bikarbonat, yaitu sumber mata air panas Cangar, Coban dan Padusan di sebelah barat dan barat daya kompleks Arjuno-Welirang.

D. Analisis Spektrum Daya dan Estimasi Kedalaman

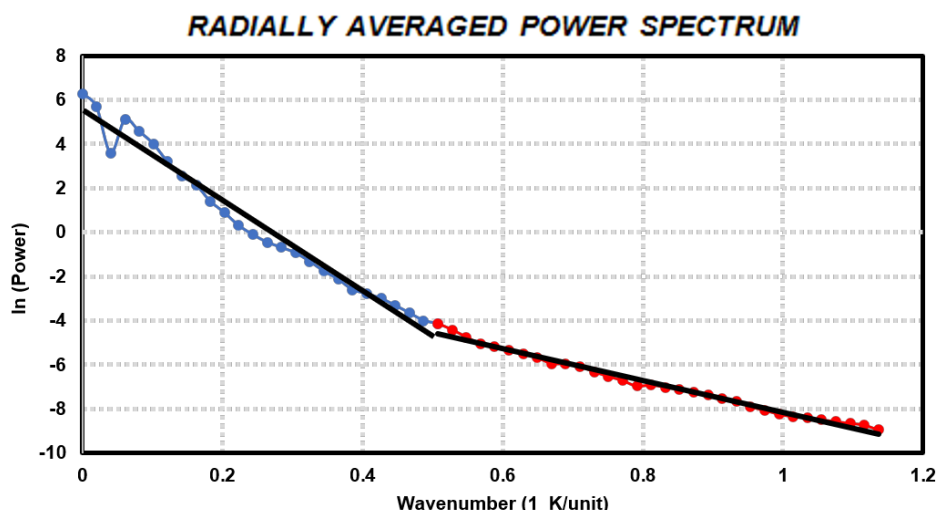
Hasil penerapan analisis spektrum daya dan estimasi kedalaman sumber adalah berupa kurva RAPS, seperti terlihat pada panel atas Gambar 10. Kurva ini mengilustrasikan relasi antara bilangan gelombang k dan logaritma daya sinyal, $\ln(\text{power})$, di mana k berkorespondensi dengan panjang gelombang sinyal anomali. Struktur bawah permukaan yang relatif lebih dalam berasosiasi dengan sinyal panjang gelombang yang relatif panjang dan sebaliknya. Dalam konteks ini pada kurva *depth estimate*, kedalaman sumber anomali residual dan *noise* ditentukan secara bersamaan dengan bantuan garis lurus regresi dengan kemiringan berbeda yang berfungsi sebagai *the best fitting lines* (Nyaberi, 2023). Hasil bagi antara kemiringan garis lurus dan faktor pembagi 4π merupakan estimasi kedalaman sumber target, sesuai persamaan (2).



Gambar 10. Logaritma spektrum daya sinyal anomali residual (panel atas) dan *corresponding depth estimate* berbasis anomali residual (panel bawah).

Oleh karena estimasi kedalaman sumber anomali target berbasis kurva pada panel bawah Gambar 10 masih sulit diinterpretasikan, maka untuk mempermudah perhitungan kedalaman sumber panas Bumi Arjuno-Welirang dilakukan konversi (dengan bantuan *excel*) kurva pada panel bawah Gambar 10 menjadi Gambar 11. Garis lurus pertama (lebih 'curam', melewati *blue dot points*) yang merepresentasikan *the best fitting line* untuk estimasi kedalaman sumber anomali target dalam penelitian ini memiliki gradien 20,67 km. Dengan bantuan persamaan (2), maka estimasi kedalaman sumber panas Bumi Arjuno-Welirang adalah 1650 m dari

permukaan, berbeda agak jauh dari temuan Daud *et al.* (2019) yang menyatakan kedalaman sumber panas Bumi Arjuno-Welirang adalah 1 km dari permukaan.



Gambar 11. Interpretasi kurva spektrum anomali residual untuk mendapatkan gradien dan kedalaman sumber anomali target yang diproses dalam *spreadsheets*.

Garis lurus kedua (lebih 'landai', melewati *red dot points*) berfungsi untuk estimasi kedalaman *noise* dari sumber selain anomali regional bergradien 7,14 km. Dengan bantuan persamaan (2), maka didapatkan *noise* tersebar pada kedalaman 570 m dari permukaan tanah, jauh lebih dangkal dari sumber anomali target. Temuan kedalaman sumber anomali target memberikan informasi penting bahwa sumber panas Bumi sistem Arjuno-Welirang berada pada lokasi relatif dangkal dibandingkan dengan lokasi umum ditemukannya patahan aktif dalam kerak Bumi (Irsyam *et al.*, 2020).

IV. KESIMPULAN

Pengukuran anomali gravitasi digunakan untuk identifikasi keberadaan dan kedalaman lokasi sumber panas Bumi Arjuno-Welirang dan sekitarnya. Potensi sumber panas Bumi Arjuno-Welirang bisa dikenali dari produk zona *upflow* (pelepasan gas fumarol dan solfatara di sekitar puncak Welirang) dan *outflow* (mata air panas Coban, Cangar dan Padusan). Pengolahan data dilakukan bertahap melalui penerapan filter *upward continuation* untuk memisahkan anomali residual dari anomali regional, penerapan teknik *derivative* (FHD dan SVD) untuk interpretasi peta anomali yang lebih baik, dan analisis spektrum daya untuk estimasi kedalaman sumber panas Bumi.

Temuan penelitian ini adalah sebaran pola anomali yang disajikan dalam bentuk peta kontur anomali (gravitasi) residual dan regional, di mana peta kontur anomali residual lebih cocok mendiskripsikan keadaan sesungguhnya di lapangan. Pemrosesan sinyal anomali residual lebih lanjut memberikan kontur anomali rendah berada di sekitar puncak dan lereng Arjuno-Welirang, Penanggungan, dan arah barat serta barat daya Arjuno-Welirang. Kontur anomali rendah pada beberapa area tersebut menunjukkan kehadiran fluida panas sebagai produk sumber panas Bumi. Analisis spektrum daya sinyal anomali target memberikan estimasi kedalaman sumber panas Bumi Arjuno-Welirang pada lokasi yang relatif dangkal, yaitu 1650 m di bawah permukaan, lebih dalam dari sebaran *noise* pada kedalaman hanya 570 m namun jauh lebih dangkal dari lokasi umum ditemukannya jalur patahan aktif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan 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 dalam menentukan posisi koordinat *study area*. Selain itu, ucapan terimakasih untuk pihak pembuat *software* Geosoft, Surfer dan Global Mapper yang bermanfaat dalam proses pengolahan data penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, L., Satriana, J., Chalik, C. A., Mulyana, R. S., Hafidz, M. and Suryantini. 2018. Topographic map analysis to determine Arjuno-Welirang volcanostratigraphy and implication for geothermal exploration. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 103, No. 012018.
- Blakely, R. J. 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge: Cambridge Uni Press, UK, pp. 1-441.
- Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction-introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, Issue 1.
- Darma, S., Imani, Y. L., Shidqi, M. N. A., Riyanto, T. D. and Daud, M. Y. 2021. Country update: the fast growth of geothermal energy development in Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*, pp. 1-9.
- Daud, Y., Nuqramadha, W. A., Fahmi, F., Sesesege, R. S., Fitrianita, Pratama, S. A. and Munandar, A. 2019. Resistivity characterization of the Arjuno-Welirang volcanic geothermal system (Indonesia) through 3-D magnetotelluric inverse modeling. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 174, pp. 352-363.
- Ekpa, M. M. M., Okeke, F. N., Ibuot, J. C., Obiora, D. N. and Abangwu, U. J. 2018. Investigation of gravity anomalies in parts of Niger Delta Region in Nigeria using aerogravity data. *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 13, Issue 4, pp. 54-65.
- Fairhead, J. D. 2007. *Gravity and magnetics in today's oil and mineral industry*. UK: GETECH group Plc. Kitson house, pp. 1-244.
- Gomez, C., Lavigne, F., Hadmoko, D. S. and Wassmer, P. 2018. Insights into lahar deposition processes in the Curah Lengkong (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.
- Hall, R. and Smyth, H. R. 2008. Cenozoic arc processes in Indonesia: Identification of the key influences on the stratigraphic record in active volcanic arcs. *The Geological Society of America, Special Paper 436: Formation and Application of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones*, pp. 27-54.
- Hayatudeen, M., Rasah, B., Abe, R. I. O. A. and Olumide, A. 2021. First horizontal and first vertical derivatives from high resolution aeromagnetic data over the Gongola basin upper benue trough Northeastern Nigeria. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, Vol. 27, pp. 181-192.
- Hermon, D., Ganefri, Erianjoni, Dewata, I., Iskarni, P. and Syam, A. 2019. A policy model of adaptation mitigation and social risks the volcano eruption disaster of Sinabung in Karo Regency-Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, Vol. 17, Issue 60, pp. 190-196.
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R. and Syahbana, A. J. 2020. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, Vol. 36, Issue 1, pp. 112-136.
- Martadiastuti, V., Harijoko, A., Warmada, I. W. and Yonezu, K. 2017. Hydrogeochemical characterization of geothermal water in Arjuno-Welirang, East Java, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, Vol. 2, Issue 2, pp. 59-69.
- Maryanto, S., Siombone, S. H., Prayoga, A., Yulia, T. and 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.
- Nafian, M., Permana, N. R., Anjani, A., Gunawan, B. and Sanjaya, A. 2021. Identification 2D modelling of subsurface structure geothermal prospect area by gravity method: case study in Tanuhi, South Kalimantan. *Journal of Physics: The 10th National Physics Seminar*, Vol. 1, No. 012081.
- Nettleton, L. L. 1939. Determination of density for reduction of gravimeter observations. *Geophysics*, Vol. 4, Issue 3, pp. 176-183.
- Nyaberi, D. M. 2023. Implications on gravity anomaly measurements associated with different lithologies in Turkana South Subcounty. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 11, No. 1, pp. 79-118.
- Okpoli, C. C. and Akingboye, A. S. 2019. Application of high-resolution gravity data for litho-structural and depth characterisation around Igabi area, Northwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 8, No. 1, pp. 231-241.
- Prastowo, T., Madlazim, Realita, A. and Fahmi, M. N. 2022. *The physics of volcanos*. Surabaya: Pondok Pesantren Jagad 'Alimussirry, pp. 1-60.

- 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.
- Sarkowi, M. 2011. *Eksplorasi gaya berat*. Lampung: Graha Ilmu, pp. 1-135.
- Setiadi, I., Diyanti, A., Ardi, N. D. 2014. Interpretasi struktur geologi bawah permukaan daerah Leuwidamar berdasarkan analisis spektral data gaya berat subsurface geological structures interpretation based on spectral analysis of gravity data. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, Vol. 15, No. 4, pp. 205-214.
- Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A. and Watanabe, K. 2006. Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization. *Resource Geology*, Vol. 56, Issue 3, pp. 267-292.
- Sumintadireja, P., Dahrin, D. and Grandis, H. 2018. A note on the use of the second vertical derivative (SVD) of gravity data with reference to Indonesian cases. *Journal English Technology Science*, Vol. 50, No. 1, pp. 127-139.
- Toushmalani, R. 2010. Application of gravity method in fault path detection. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 4, Issue 12, pp. 6450-6460.
- Van Gorsel, J. T. 2018. *Bibliography of the geology of Indonesia and surrounding areas*. Edition 7.0, Juni 2020, pp. 1-297.
- Wahyuningsih, N., Maryanto, S. and Wiyono. 2020. Gravity anomaly in Kelud, Kasinan-Songgoriti, and Arjuno-Welirang volcano hosted geothermal area, East Java, Indonesia. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, Vol. 9, Issue 3S, pp. 172-176.