



Analisis Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Pacitan Berdasarkan Data Gravitasi GGMPPlus

Roma Widiyansari^{1,*}, Siti Fatimah¹, Fidel Risti¹, Nur Hikmah¹, Denny Darmawan¹, Khafidh Nur Aziz¹, Rahmawati Fitrianingtyas²

¹ Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta

Jalan Colombo No. 1, Karang Malang, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman 5528, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

² Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

Jl.SWK Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman 55281, Daerah Istimewa Yogyakarta

*E-mail korespondensi: romawidiyansari@uny.ac.id

Article Info:

Received: 22-07-2025

Revised: 09-08-2025

Accepted: 12-08-2025

Keywords:

Gravity Method, Complete Bouge Anomaly, Second Vertical Derivative, Pacitan Geothermal



Abstract

This study aims to identify the subsurface structure of the geothermal system in the Pacitan area, East Java, using gravity methods based on GGMPPlus data. The analysis procedures include terrain correction to obtain the Complete Bouguer Anomaly (CBA), separation of regional and local anomalies through upward continuation, as well as two-dimensional (2D) modeling and Second Vertical Derivative (SVD) analysis to identify fault structure. The CBA values in the study area range from 107 to 115.5 mGal, where high anomalies correlate with volcanic breccia rocks and highlands, while low anomalies indicate the presence of sandstone in lowland areas. Geothermal manifestations in the form of hot springs exhibit gravity anomalies of approximately 110.5–111.5 mGal and are situated in the north of the fault in a northwest–southeast direction. The 2D modeling results reveal the presence of reservoir rocks consisting of sandstone and clay with densities ranging from 1.79 to 2.20 g/cm³, and lava rocks with densities of 2.80–2.90 g/cm³ acting as cap rocks. SVD analysis indicates the existence of a normal fault directly associated with geothermal fluid pathways. This study demonstrates that the GGMPPlus gravity method is effective for preliminary exploration of geothermal systems in potential areas such as Pacitan.

PENDAHULUAN

Secara geologis, Indonesia berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik—yang membentuk zona subduksi aktif di sepanjang wilayah kepulauan ini. Proses subduksi ini menghasilkan busur gunung api yang membentang dari Sumatera hingga Maluku, yang menjadikan Indonesia sebagai negara dengan jumlah gunung api aktif terbanyak di dunia [1], [2], [3]. Aktivitas magmatis yang dihasilkan dari zona subduksi ini tidak hanya membentuk lanskap vulkanik yang khas, tetapi juga menghasilkan sistem panas bumi yang sangat besar dan tersebar luas, terutama di wilayah seperti Jawa dan Sumatra [4], [5]. Hal ini menjadikan keberadaan busur vulkanik sebagai faktor utama dalam potensi energi panas bumi Indonesia yang sangat besar dan strategis untuk dikembangkan.

Wilayah yang berada di jalur gunung api aktif dan pertemuan lempeng tektonik umumnya memiliki potensi besar untuk pengembangan sistem panas bumi. Aktivitas vulkanik

menciptakan kondisi geologi yang mendukung pembentukan reservoir geotermal, seperti keberadaan batuan panas, fluida hidrotermal, dan struktur permeabel [4], [6]. Selain itu, tumbukan dan pergerakan antar lempeng tektonik dapat mengangkat kerak samudra dan mendorong naiknya magma ke permukaan memperkuat sistem panas bumi di zona-zona aktif secara tektonik [7]. Di zona sesar dan patahan, struktur geologi ini membentuk jalur permeabel yang memungkinkan fluida panas bermigrasi dari reservoir dalam menuju permukaan. *Slip* pada sesar bahkan dapat menciptakan zona dilatasi bertekanan rendah yang mempercepat aliran fluida, bertindak seperti pompa hisap sementara [8]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pola kelurusan (*lineament*) dan struktur geologi memiliki pengaruh besar terhadap lokasi manifestasi permukaan, seperti mata air panas, geysir, rembesan fluida, dan zona alterasi hidrotermal [9], [10], [11]. Di Jawa Timur, khususnya Kabupaten Pacitan, manifestasi panas bumi ditemukan di daerah Karangrejo dan Tinatar, dengan estimasi potensi sumber daya mencapai 25 MW [12]. Penelitian geologi dan geofisika menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Pacitan dipengaruhi oleh aktivitas magmatis dan tektonik, dengan sesar oblique dan intrusi *dike* yang berfungsi sebagai jalur migrasi fluida panas [13]. Keberadaan mata air panas di Pacitan menjadi indikasi penting adanya sistem panas bumi aktif yang layak dikaji lebih lanjut.

Untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan di daerah panas bumi Pacitan, diperlukan pendekatan geofisika yang mampu merekonstruksi kondisi geologi bawah permukaan secara tidak langsung. Salah satu metode yang relevan untuk tujuan ini adalah metode gravitasi, karena mampu mendeteksi variasi densitas batuan berdasarkan perbedaan percepatan gravitasi yang terukur [14]. Metode ini sangat sensitif terhadap perubahan densitas lateral dan vertikal, sehingga efektif untuk mengidentifikasi struktur geologi seperti rekahan, sesar, atau zona alterasi yang berperan dalam sistem panas bumi [15]. Teknik pengolahan data gravitasi seperti turunan vertikal kedua (*Second Vertical Derivative/SVD*) dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi batas struktur geologi secara lebih jelas, karena teknik ini menekankan kontras anomali medan gravitasi yang berkaitan dengan perubahan densitas. Selain itu, kombinasi dengan teknik *upward continuation* dapat membantu memisahkan anomali regional dari anomali lokal, sehingga interpretasi menjadi lebih fokus pada fitur geologi dangkal yang relevan untuk eksplorasi panas bumi. Penggunaan metode ini telah terbukti menghasilkan delineasi struktur seperti sesar dan rekahan, yang berfungsi sebagai jalur migrasi fluida panas dalam sistem geotermal [16], [17].

Penelitian ini menggunakan data gravitasi satelit GGMplus, yang terdiri dari nilai *gravity disturbance* dan percepatan gravitasi. Data ini memiliki resolusi spasial tinggi dengan spasi grid sekitar 220 meter, mencakup wilayah daratan dan zona pesisir pada lintang $\pm 60^\circ$, sehingga memberikan cakupan global yang luas [18]. GGMplus dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan variasi medan gravitasi secara detail, yang sangat berguna dalam interpretasi struktur bawah permukaan di daerah prospek panas bumi [19], [20], [21]. Validitas dan ketepatan data gravitasi GGMplus dalam mendeteksi fitur geologi panas bumi juga telah diuji melalui perbandingan dengan data lapangan di Gunung Lawu, yang menunjukkan bahwa data GGMplus dapat digunakan sebagai alternatif awal yang andal untuk survei eksplorasi geotermal di wilayah terpencil [22]. Beberapa studi juga telah menunjukkan keberhasilan penggunaan GGMplus untuk memetakan struktur sesar, zona alterasi, serta batasan reservoir panas bumi melalui teknik seperti *upward continuation*, turunan vertikal kedua (*second vertical derivative/SVD*), dan *forward modeling* [23], [24], [25]. Dengan memanfaatkan teknik-teknik tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis struktur bawah permukaan daerah panas bumi Pacitan dan mengidentifikasi pola anomali densitas serta batas-batas struktur geologi yang mendukung sistem panas bumi.

METODE PENELITIAN

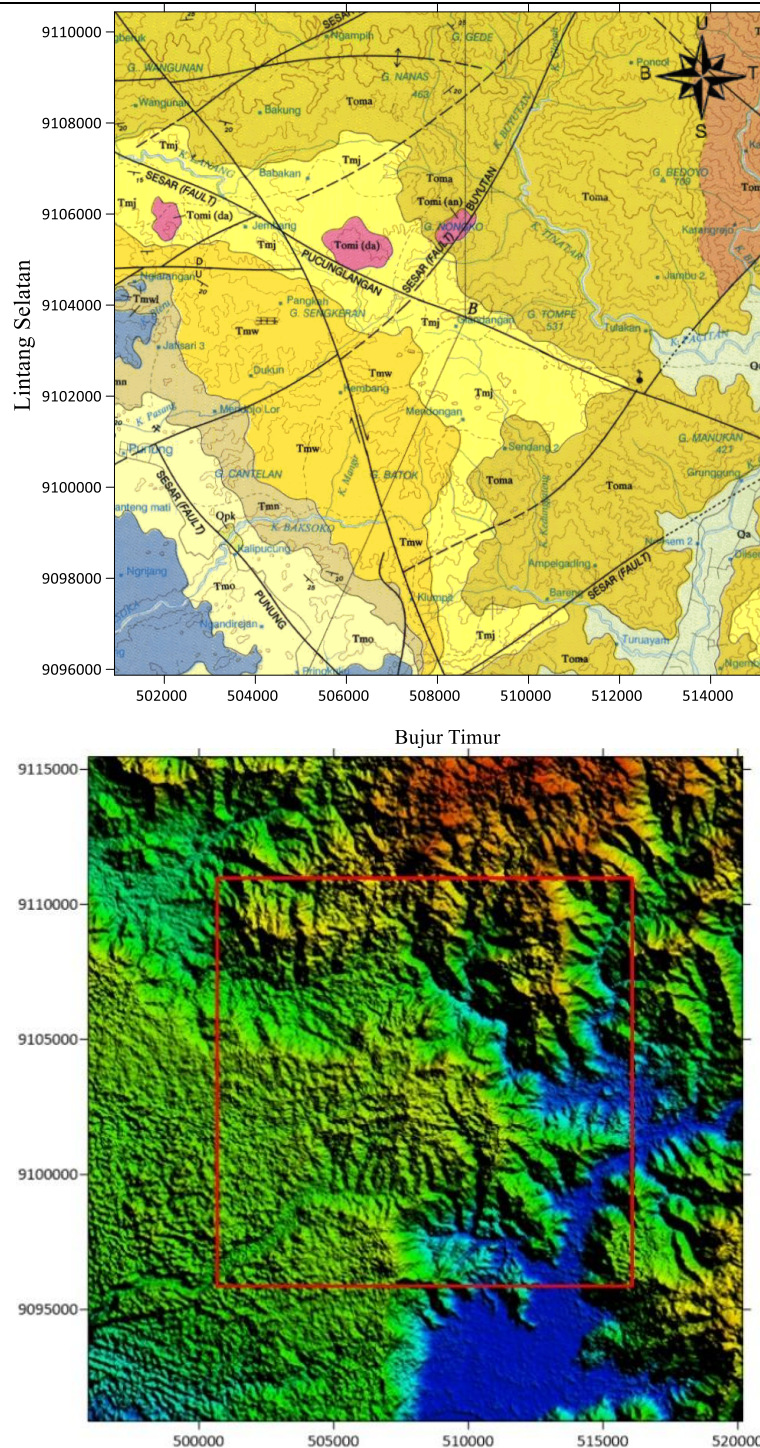
Data dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur, Indonesia, yang secara geologis terletak pada zona busur vulkanik Tersier dengan adanya sistem panas

bumi. Area studi mencakup luas sekitar $11 \times 15 \text{ km}^2$ dengan total 4.290 titik pengukuran gravitasi yang terdistribusi secara merata pada grid dengan spasi 200 meter. Batas koordinat wilayah penelitian secara kartesian adalah 500905 hingga 515152 meter Timur dan 9095874 hingga 9110440 meter Utara (koordinat UTM zona 49S). Peta Geologi dan area studi dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan data dan sumber data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data dan sumber data yang digunakan pada penelitian ini

| Data | Sumber Data |
|------------------------------------|---|
| Data Gravitasi GGMplus | http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/ |
| Data Topografi GGMplus | http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/data/ |
| Data Digital Elevation Model (DEM) | https://earthexplorer.usgs.gov/ . |



Gambar 1. Peta Geologi daerah penelitian [26] (atas) dan Peta DEM daerah penelitian (bawah). Kotak warna merah menunjukkan area penelitian

Pemrosesan Anomali Gravitasi

Tahapan awal pemrosesan data dilakukan untuk memperoleh nilai anomali gravitasi yang mencerminkan distribusi densitas bawah permukaan secara lokal. Data *gravity disturbance* dari GGMplus dikoreksi secara topografi menggunakan model elevasi ERTM2160, sehingga diperoleh nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Koreksi ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh gravitasi akibat topografi di atas geoid agar interpretasi anomali mencerminkan struktur bawah permukaan secara lebih akurat [27]. Metode ini sejalan dengan pendekatan klasik dalam geofisika eksplorasi sebagaimana dijelaskan oleh Telford [28], di mana koreksi Bouguer dilakukan untuk menghilangkan efek massa topografi terhadap pengukuran gravitasi [28]. Nilai ABL selanjutnya dianalisis secara spasial untuk mengamati pola anomali dan menduga keberadaan struktur geologi di bawah permukaan seperti sesar atau zona alterasi, yang penting dalam sistem panas bumi.

Upward Continuation

Metode *upward continuation* atau kontinuitas ke atas digunakan untuk memisahkan efek gravitasi yang berasal dari sumber anomali dangkal dan dalam. Teknik ini memproyeksikan data gravitasi ke permukaan teoritis yang lebih tinggi, sehingga anomali dari struktur dangkal akan teredam dan yang tersisa adalah respon dari struktur yang lebih dalam. Proses ini berguna dalam mengekstraksi tren regional dari medan gravitasi dan menjadi dasar dalam interpretasi anomali residual serta pembuatan model awal untuk keperluan *forward modelling*. Beberapa studi menunjukkan bahwa *upward continuation* sangat efektif dalam proses pemisahan anomali regional dan lokal, serta memberikan representasi yang lebih jelas terhadap fitur geologi dalam seperti sesar dan intrusi batuan [29], [30], [31]. Pemilihan ketinggian proyeksi juga menjadi faktor penting agar pemisahan anomali dapat dilakukan secara optimal dan menghindari hilangnya informasi penting dari sumber dangkal [32].

Forward Modelling

Forward modelling atau pemodelan ke depan dilakukan untuk menghasilkan model bawah permukaan berdasarkan respons gravitasi yang diukur. Proses ini bersifat iteratif, dimulai dengan penyusunan model awal berupa blok-blok dengan densitas tertentu yang kemudian disesuaikan hingga hasil sintetiknya mendekati nilai anomali pengamatan. Nilai densitas tiap lapisan mengacu pada litologi umum penyusun batuan di daerah Pacitan (Gambar 1a), dengan pendekatan numerik berbasis blok. Selain itu, pendekatan berbasis blok dengan model densitas residual juga terbukti efisien dalam menghitung anomali gravitasi dan meningkatkan akurasi pemodelan struktur semi-tak hingga [33]. Studi lain juga menunjukkan bahwa integrasi antara data anomali gravitasi dan metode SVD dapat mengidentifikasi batas lapisan bawah permukaan serta mengestimasi porositas reservoir secara lebih akurat [34]. Tujuan dari proses ini adalah memperoleh informasi kedalaman, bentuk geometri, dan sebaran densitas dari struktur bawah permukaan yang berkaitan dengan sistem panas bumi, serta memberikan dasar yang kuat dalam tahap eksplorasi lanjutan.

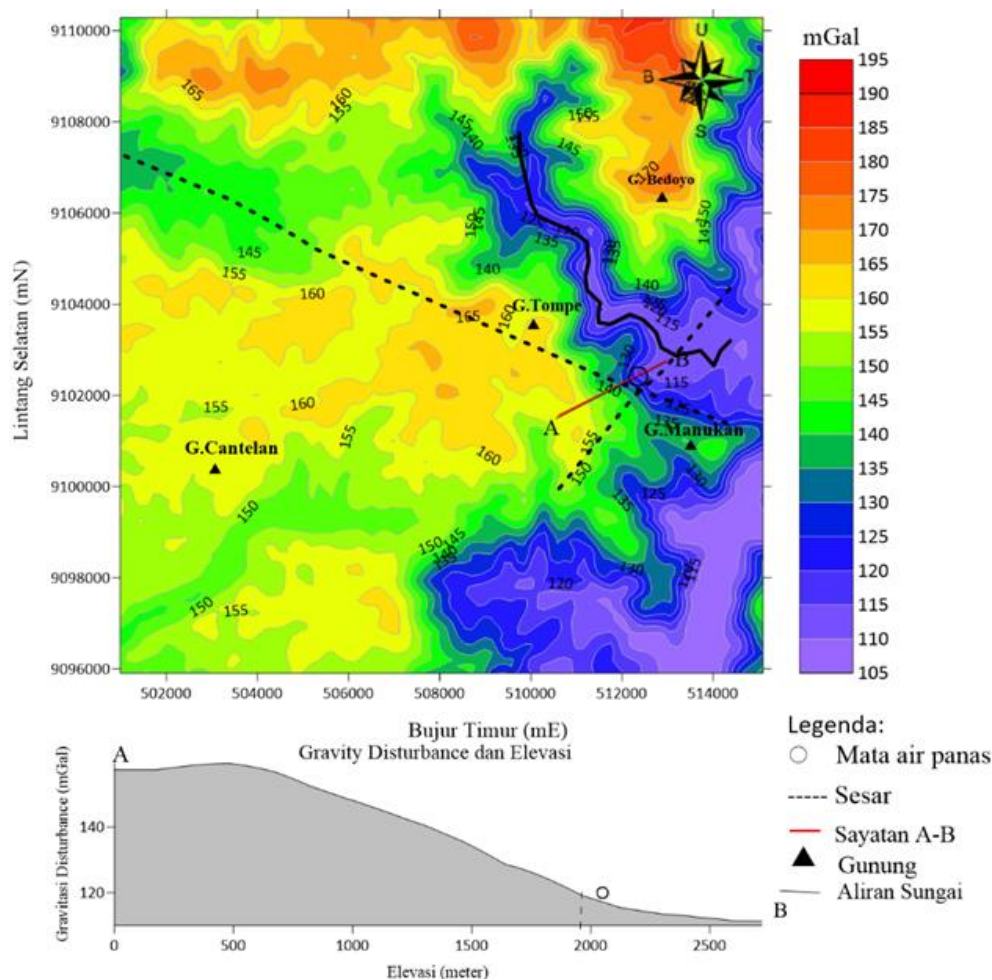
Second Vertical Derivative

Second Vertical Derivative (SVD) digunakan untuk menajamkan batas anomali dan mengidentifikasi struktur geologi seperti sesar dan rekahan. Teknik ini menghitung derivatif kedua dari medan gravitasi terhadap arah vertikal, yang menghasilkan nilai maksimum atau minimum pada perubahan densitas tajam. Peta hasil SVD mampu menunjukkan batas kontras densitas secara lebih jelas dan mengungkap arah struktur sesar yang menjadi jalur potensial migrasi fluida panas bumi. Validasi terhadap metode SVD telah dilakukan di berbagai lapangan panas bumi dan menunjukkan efektivitas dalam menginterpretasi struktur bawah permukaan yang relevan untuk eksplorasi geotermal [35], [36]. Dengan demikian, metode SVD menjadi alat

penting dalam pemetaan batas formasi geologi dan estimasi zona patahan yang relevan dalam sistem panas bumi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

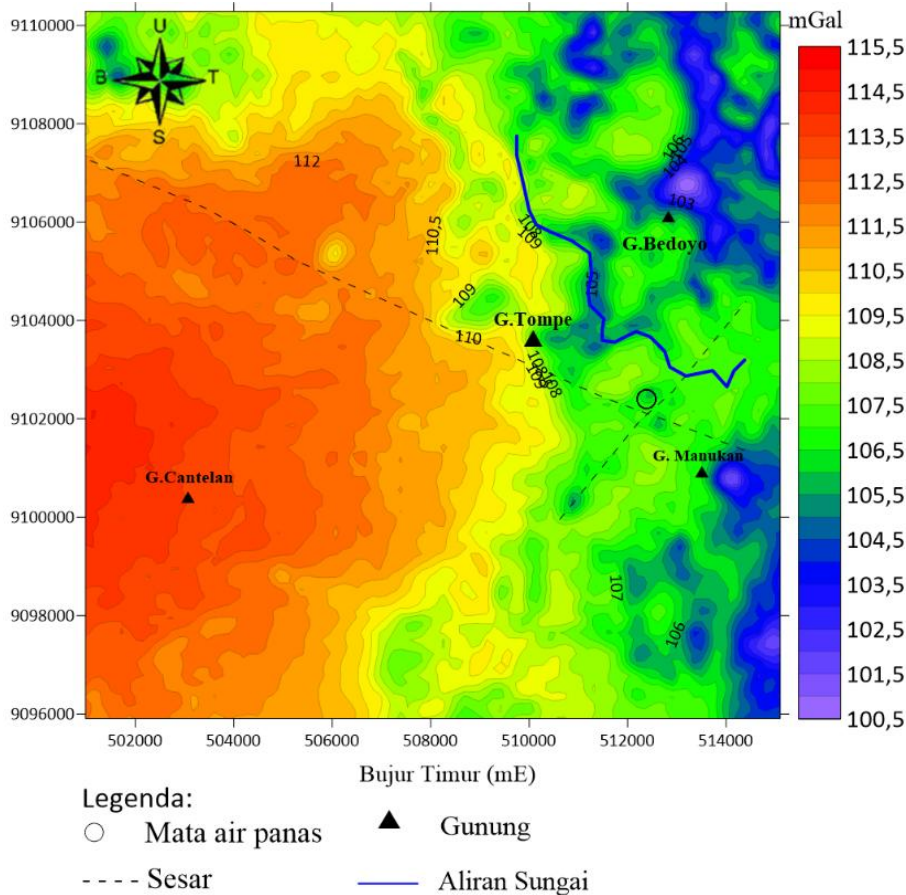
Hasil pemetaan nilai *gravity disturbance* dari data GGMplus di wilayah penelitian menunjukkan rentang nilai antara ± 105 mGal hingga ± 195 mGal (Gambar 2). Gambar 2 bawah menunjukkan grafik hubungan antara nilai *gravity disturbance* dengan elevasi pada sayatan A-B yang melalui mata air panas. Peta kontur menunjukkan bahwa zona dengan nilai *gravity disturbance* relatif tinggi direpresentasikan oleh warna merah hingga jingga, sedangkan zona dengan nilai rendah ditunjukkan oleh gradasi warna biru hingga ungu muda. Nilai *gravity disturbance* tertinggi, sekitar ± 155 – 160 mGal, teridentifikasi di bagian utara daerah penelitian, terutama di sekitar Gunung Bedoyo, yang memiliki elevasi ± 2.000 – 2.500 meter. Sementara itu, nilai rendah berkisar antara ± 105 – 135 mGal ditemukan di bagian timur dan tenggara, terutama di sekitar area Gunung Manukan dan titik-titik manifestasi panas bumi, dengan elevasi ± 500 – 800 meter. Pola kontur masih mencerminkan pengaruh topografi dan belum sepenuhnya mencerminkan distribusi densitas bawah permukaan.



Gambar 2. Peta kontur *gravity disturbance* GGMplus di daerah penelitian (atas) dan grafik *gravity disturbance* vs elevasi pada sayatan A-B yang melalui mata air panas (bawah).

Gambar 3 menunjukkan peta kontur Anomali Bouguer Sederhana (ABS) di wilayah penelitian, yang telah dikoreksi dari pengaruh topografi permukaan. Nilai ABS pada daerah penelitian berkisar antara $\pm 100,5$ mGal hingga $\pm 115,5$ mGal. Warna merah dan jingga merepresentasikan nilai anomali tinggi, sementara warna biru hingga ungu muda menunjukkan nilai anomali yang lebih rendah. Distribusi nilai anomali menunjukkan bahwa bagian barat

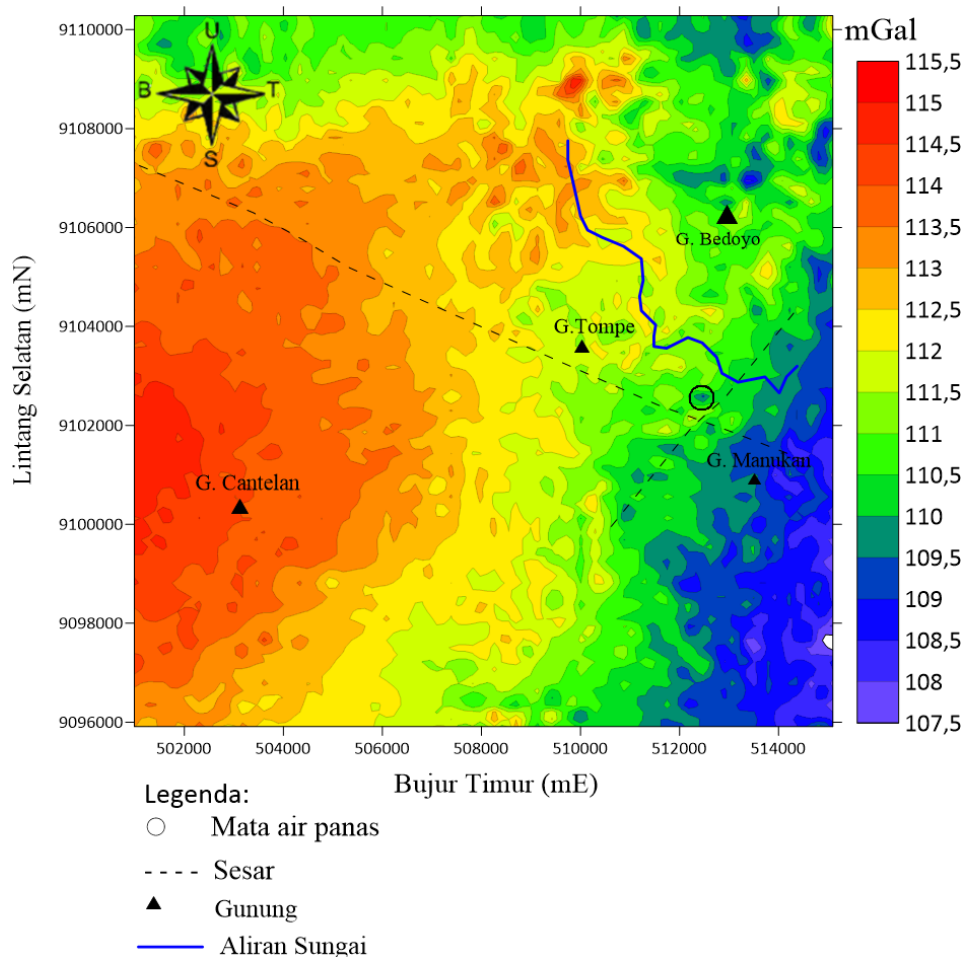
hingga barat laut wilayah studi memiliki nilai ABS yang lebih tinggi, sedangkan bagian timur laut dan tenggara didominasi oleh nilai ABS rendah. Pola kontur cenderung memanjang dari barat daya ke timur laut, dan memperlihatkan gradasi nilai yang cukup tajam di beberapa bagian, yang dapat menunjukkan adanya perubahan sifat fisik bawah permukaan.



Gambar 3. Peta kontur Anomali Bouguer Sederhana di daerah penelitian

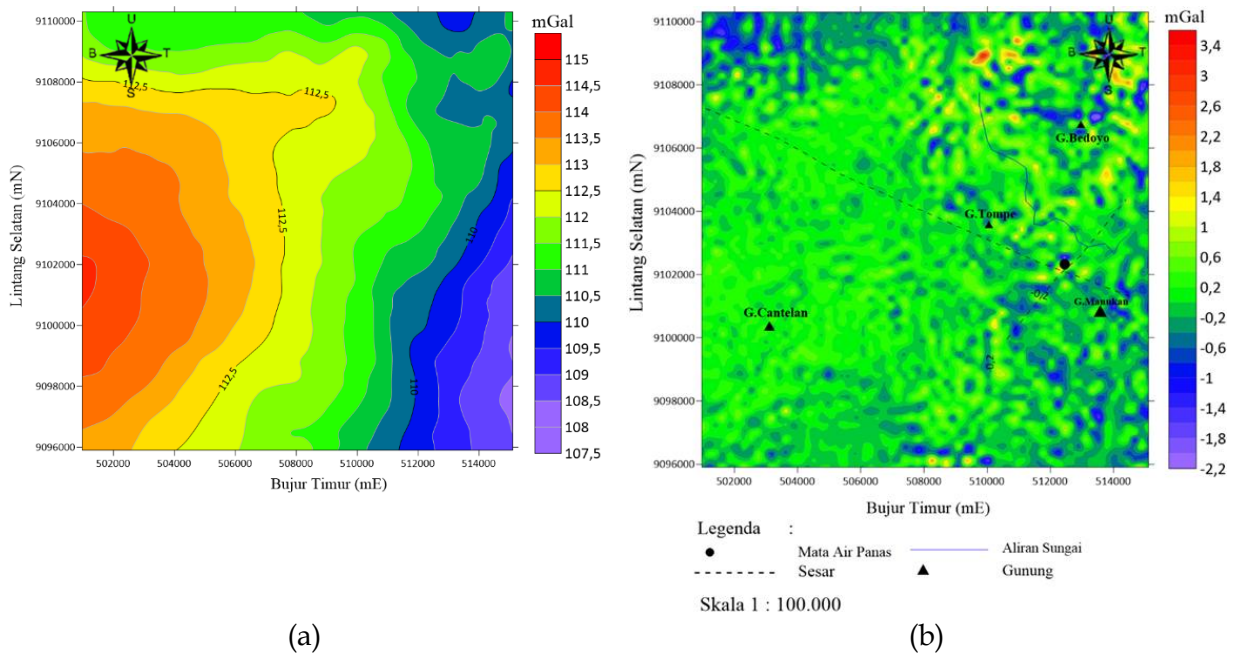
Gambar 4 menunjukkan peta kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) hasil koreksi penuh terhadap data gravitasi, yang mencerminkan distribusi densitas bawah permukaan tanpa pengaruh topografi. Nilai ABL di wilayah penelitian berkisar antara ± 107 mGal hingga $\pm 115,5$ mGal. Zona dengan nilai ABL tinggi ditunjukkan oleh warna merah hingga jingga, terkonsentrasi di bagian barat dan barat daya daerah penelitian, terutama di sekitar Gunung Candelan. Berdasarkan peta geologi, wilayah ini tersusun oleh batuan breksi gunung api yang memiliki densitas tinggi, sehingga menghasilkan nilai anomali yang besar. Sebaliknya, nilai ABL rendah yang ditandai oleh warna biru hingga hijau muda tersebar di bagian timur dan tenggara, mencakup wilayah di sekitar Gunung Manten dan Gunung Bedoyo. Berdasarkan informasi litologi, daerah ini didominasi oleh batuan sedimen seperti batupasir dan lempung, yang cenderung memiliki densitas lebih rendah.

Menariknya, terdapat beberapa klosur anomali rendah yang terletak di tengah-tengah zona dengan nilai ABL tinggi. Pola ini berasosiasi dengan keberadaan titik manifestasi panas bumi, seperti mata air panas di sekitar Gunung Manten. Manifestasi ini terletak di utara sesar berarah barat laut-tenggara, yang ditunjukkan dengan garis putus-putus pada peta. Pola ini mengindikasikan kemungkinan adanya zona alterasi hidrotermal atau rekahan sebagai jalur migrasi fluida panas dari kedalaman. Anomali Bouguer Lengkap mencakup kombinasi dari anomali regional dan lokal. Untuk memisahkan keduanya, analisis lanjutan dilakukan dengan metode *upward continuation* yang bertujuan menghasilkan anomali regional sebagai dasar interpretasi struktur dalam.



Gambar 4. Peta kontur Anomali Bouguer Lengkap di daerah penelitian

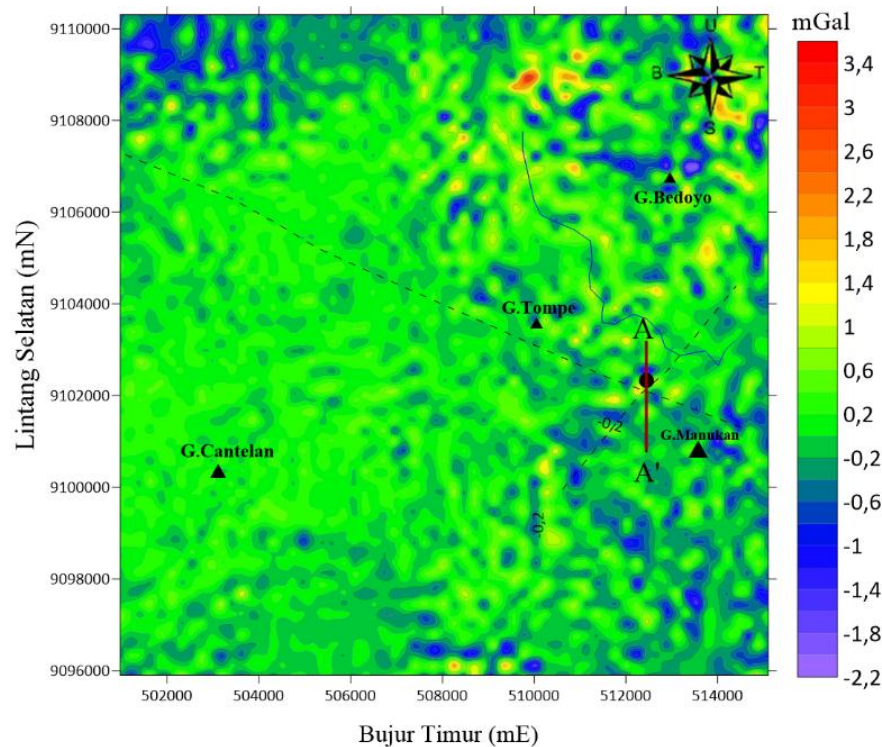
Gambar 5(a) menunjukkan peta kontur anomali regional yang diperoleh melalui proses *upward continuation* terhadap data Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Nilai anomali regional di wilayah penelitian berkisar antara $\pm 107,5$ mGal hingga ± 115 mGal, dengan pola gradasi yang cenderung halus dan kontinu dari barat ke timur. Zona dengan nilai anomali tinggi berada di bagian barat hingga barat daya wilayah studi, sedangkan nilai anomali yang lebih rendah berada di bagian timur laut. Pola ini mencerminkan tren regional distribusi densitas di bawah permukaan, yang umumnya diasosiasikan dengan struktur geologi berskala besar dan kedalaman menengah hingga dalam. Gambar 5(b) menampilkan peta kontur anomali lokal yang diperoleh dari hasil pengurangan anomali Bouguer Lengkap dengan anomali regional. Nilai anomali lokal di wilayah penelitian berkisar antara $\pm 2,2$ mGal hingga $\pm 3,4$ mGal. Anomali lokal merepresentasikan variasi densitas dangkal dan digunakan sebagai dasar untuk interpretasi struktur geologi permukaan dan pengolahan pemodelan 2D. Nilai anomali lokal tertinggi berada di bagian utara daerah penelitian, sedangkan anomali terendah tersebar luas di bagian timur hingga timur laut. Beberapa klosur anomali rendah berada di sekitar titik manifestasi panas bumi, khususnya di sekitar Gunung Manten. Pola ini dapat mengindikasikan zona batuan berpori, alterasi, atau rekahan yang menjadi jalur migrasi fluida panas dari kedalaman.



Gambar 5. (a) Peta kontur anomali regional dan (b) Peta kontur anomali lokal daerah penelitian

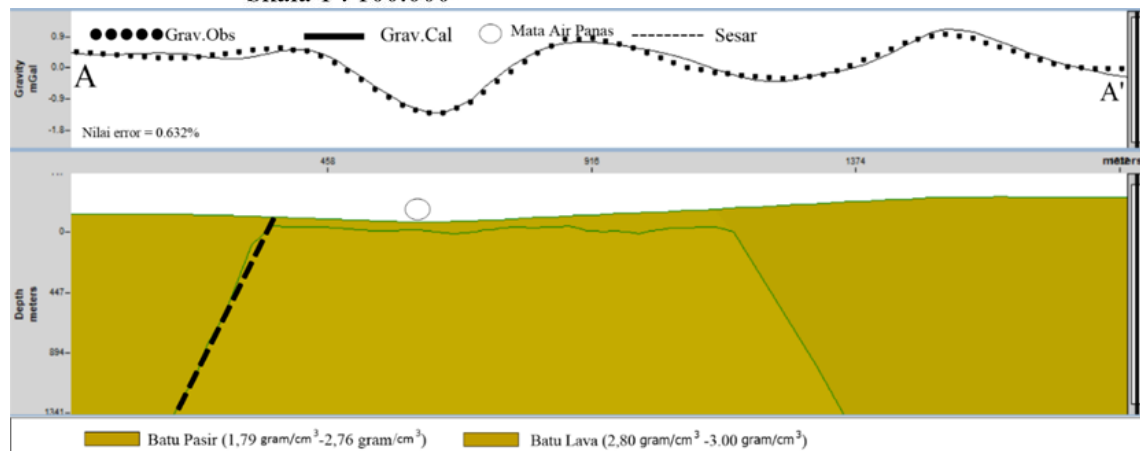
Pemodelan bawah permukaan pada daerah penelitian dilakukan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan sesuai jalur lintasan pada target penelitian. Pembuatan model geologi bawah permukaan dengan metode *forward modelling* 2D. Anomali lokal digunakan dalam pemrosesan ini sebagai sampel nilai anomali yang akan dimodelkan dengan cara dilakukan sayatan pada peta kontur anomali lokal. Pemodelan dilakukan sayatan sebanyak 2 lintasan yang diketahui memotong jalur sesar serta mata air panas yang berada di daerah penelitian. Sayatan yang dibuat yaitu sayatan A-A' yang memotong Formasi Arjosari, serta sayatan B-B' yang memotong Formasi Jaten, Formasi Arjosari serta aluvium.

Gambar 6 menunjukkan model bawah permukaan hasil pemodelan gravitasi pada penampang A-A', dengan panjang lintasan sekitar $\pm 1,9$ km dan kedalaman model mencapai ± 1.350 meter. Rentang nilai anomali gravitasi pada sayatan ini berkisar antara $-1,5$ mGal hingga $0,7$ mGal, dengan nilai galat pemodelan sekitar $0,0627\%$. Model menunjukkan keberadaan dua zona densitas berbeda dalam satu satuan geologi, yaitu Formasi Arjosari. Meskipun berasal dari formasi yang sama, nilai densitas yang teridentifikasi berbeda, yaitu $1,79$ gram/cm³ dan $2,80$ gram/cm³. Berdasarkan referensi [28], densitas sebesar $1,79$ gram/cm³ diinterpretasikan sebagai batuan berpori seperti batupasir, sedangkan densitas $2,80$ gram/cm³ diasosiasikan dengan batuan lava padat. Zona dengan densitas rendah ($1,79$ gram/cm³) diperkirakan merupakan batuan reservoir potensial, karena memiliki porositas tinggi yang memungkinkan akumulasi dan migrasi fluida panas bumi. Sementara itu, zona berdensitas tinggi ($2,80$ gram/cm³) berperan sebagai batuan penutup atau intrusi lava yang bersifat kompak dan impermeabel. Keberadaan sesar berarah miring dalam model ini juga mengindikasikan kemungkinan jalur migrasi fluida dari kedalaman menuju manifestasi permukaan.



- Legenda :
- Mata Air Panas
 - Aliran Sungai
 - Sesar
 - ▲ Gunung
 - Sayatan Pemodelan 2D

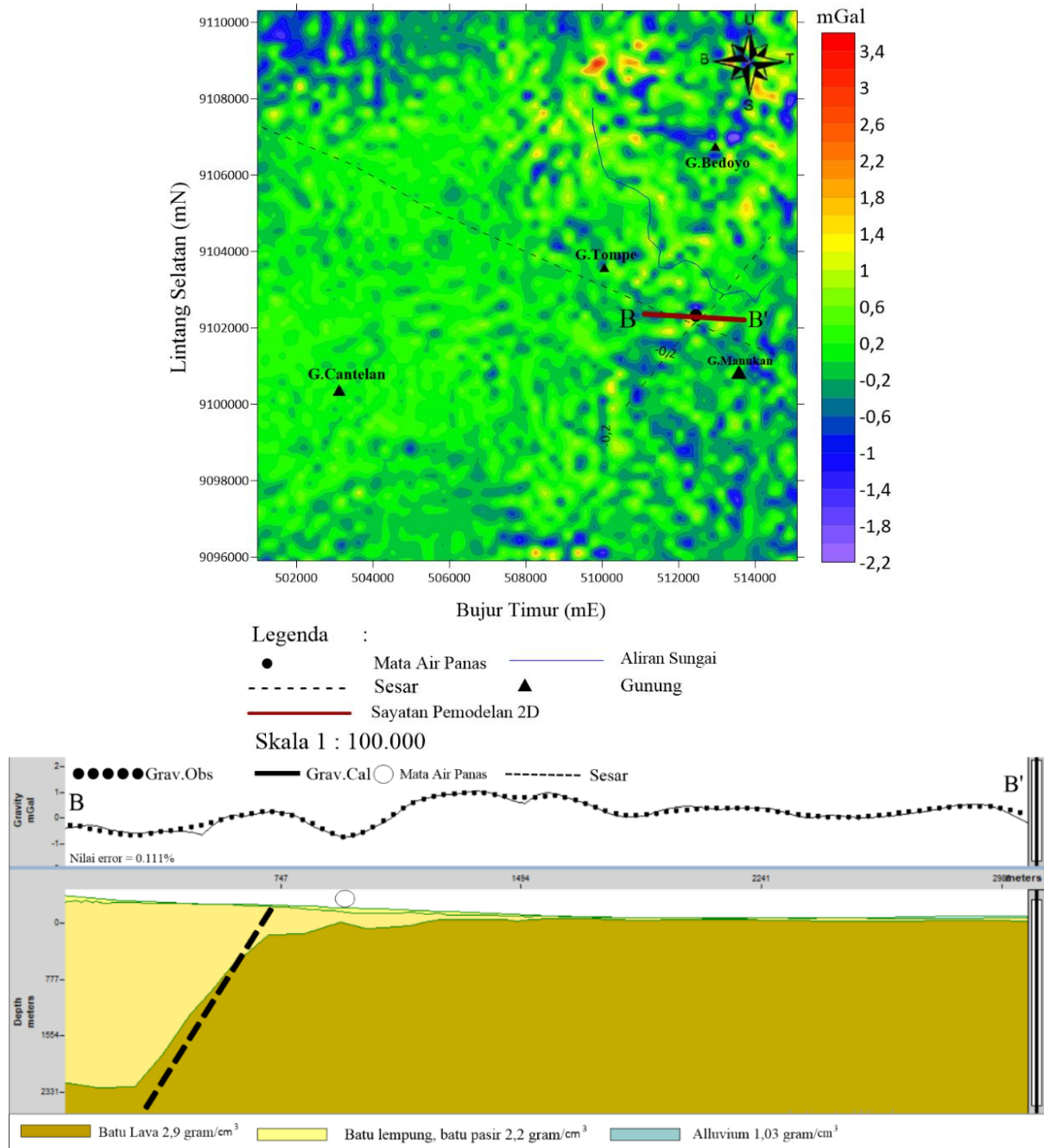
Skala 1 : 100.000



Gambar 6. Peta sayatan A-A' pada anomali lokal di daerah penelitian (atas) dan model bawah permukaan sayatan A-A' (bawah)

Gambar 7 memperlihatkan hasil pemodelan bawah permukaan pada penampang B-B', yang membentang dari barat ke timur sepanjang $\pm 2,1$ km. Sayatan ini melintasi dua jalur sesar: satu dengan orientasi barat laut-tenggara dan satu lagi dengan arah timur laut-barat daya, serta memotong lokasi manifestasi panas bumi. Kedalaman model mencapai sekitar ± 1.500 meter, dengan nilai anomali gravitasi yang dimodelkan berkisar antara $-0,5$ mGal hingga 1 mGal, dan nilai galat pemodelan sebesar $0,111\%$. Hasil model menunjukkan tiga lapisan utama berdasarkan nilai densitas. Lapisan paling atas merupakan endapan permukaan berumur Kuartar, yang diinterpretasikan sebagai aluvium, dengan densitas $1,03$ gram/cm³. Di bawahnya terdapat lapisan batuan sedimen berumur Tersier dengan nilai densitas antara $2,2$ hingga $2,9$ gram/cm³. Densitas $2,2$ gram/cm³ diasosiasikan dengan batu lempung dan batu pasir, sementara densitas $2,9$ gram/cm³ diinterpretasikan sebagai batuan lava atau batuan beku padat. Batuan sedimen

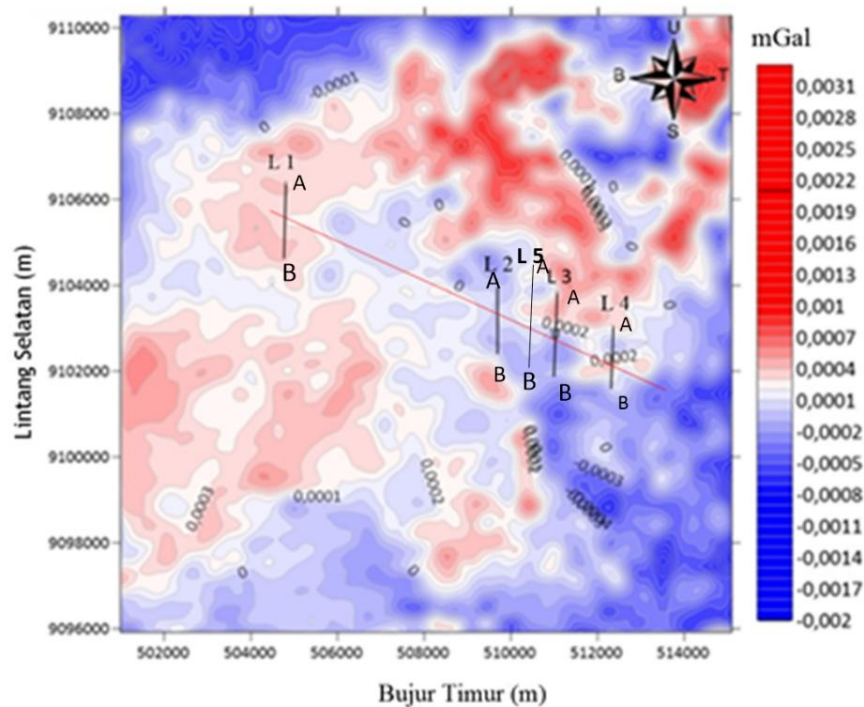
berpori dengan densitas 2,2 gram/cm³ berpotensi berperan sebagai reservoir panas bumi, karena sifatnya yang permeabel dan mampu menyimpan serta menghantarkan fluida panas. Sebaliknya, batuan lava berdensitas tinggi diinterpretasikan sebagai batuan penutup (*cap rock*) atau batuan dasar (*bedrock*), yang bersifat impermeabel dan berfungsi sebagai penghalang naiknya fluida panas ke permukaan. Keberadaan sesar dalam model ini menunjukkan kemungkinan jalur migrasi fluida dari zona panas menuju manifestasi permukaan.



Gambar 7. Peta sayatan B-B' pada anomali lokal di daerah penelitian (atas) dan model bawah permukaan sayatan B-B' (bawah)

Analisis *Second Vertical Derivative* (SVD) dilakukan untuk menajamkan batas-batas struktur geologi dangkal serta mereduksi efek dari sumber anomali yang lebih dalam. Peta kontur SVD hasil perhitungan terhadap anomali regional ditunjukkan pada Gambar 9. Warna merah mewakili nilai turunan positif (maksimum), sedangkan warna biru menunjukkan nilai negatif

(minimum), yang masing-masing mengindikasikan kontras densitas tinggi dan rendah di bawah permukaan.



Gambar 9. Peta kontur *Second Vertical Derivative* anomali regional di daerah penelitian

Dalam penelitian ini, lima sayatan SVD ditarik pada lintasan A–B, yaitu L1 hingga L5, yang berorientasi barat laut–tenggara, searah dengan pola umum sesar regional di daerah penelitian. Pemilihan lima sayatan ini dilakukan berdasarkan skema struktur anomali regional dan posisi relatif terhadap manifestasi panas bumi. Nilai SVD maksimum dan minimum dari masing-masing sayatan disajikan dalam Tabel 2.

Nilai maksimum SVD tertinggi ditemukan pada sayatan L1 (0,000563 mGal/m²) dan nilai minimum terendah pada sayatan yang sama (−0,00029 mGal/m²). Puncak-puncak ini menunjukkan kontras densitas tinggi yang kemungkinan mengindikasikan zona rekahan atau sesar. Perbandingan antara nilai maksimum dan minimum pada semua sayatan menunjukkan kecenderungan nilai |SVD Max| lebih besar dari |SVD Min|, yang menurut interpretasi geofisika (mengacu pada gradien medan potensial) dapat dikategorikan sebagai sesar normal atau sesar turun. Jalur sesar turun yang teridentifikasi pada sayatan-sayatan tersebut memiliki orientasi barat laut–tenggara dan berasosiasi langsung dengan lokasi manifestasi panas bumi, khususnya mata air panas di sekitar Gunung Manten. Keberadaan sesar ini diduga berperan sebagai jalur migrasi fluida dari sumber panas di kedalaman menuju permukaan, dan dengan demikian menjadi indikator penting dalam identifikasi sistem panas bumi.

Tabel 2. Hasil Analisis SVD

| Sayatan | Anomali SVD Max (mGal/m ²) | Anomali SVD Min (mGal/m ²) | Perbandingan Puncak SVD Max vs SVD Min | Jenis sesar |
|---------|--|--|--|-------------|
| 1 | 0,000563 | -0,00029 | SVD Max > SVD Min | Turun |
| 2 | 0,000429 | -0,000096 | SVD Max > SVD Min | Turun |
| 3 | 0,000362 | -0,0000167 | SVD Max > SVD Min | Turun |

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data gravitasi GGMPlus di daerah panas bumi Pacitan, diperoleh gambaran struktur bawah permukaan yang menunjukkan adanya potensi sistem geotermal. Nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL) berkisar antara 107 hingga 115,50 mGal, dengan anomali tinggi diasosiasikan dengan keberadaan batuan vulkanik padat seperti breksi gunung api, sedangkan anomali rendah berkaitan dengan batuan sedimen seperti batupasir dan lempung. Manifestasi panas bumi berupa mata air panas terletak di utara jalur sesar berorientasi barat laut-tenggara, dengan nilai anomali sekitar 110,50–111,50 mGal, yang menunjukkan hubungan erat antara struktur geologi dan jalur migrasi fluida panas. Hasil pemodelan dua dimensi (2D) pada penampang A-A' dan B-B' mengidentifikasi keberadaan batuan reservoir berupa batupasir dengan densitas 1,79–2,20 g/cm³, dan batuan lava sebagai lapisan penutup dengan densitas 2,80–2,90 g/cm³. Analisis turunan vertikal kedua (*Second Vertical Derivative/SVD*) berhasil mendeteksi sesar turun yang berasosiasi langsung dengan keberadaan manifestasi geotermal, memperkuat dugaan adanya jalur fluida aktif. Dengan demikian, metode gravitasi berbasis data GGMPlus terbukti efektif dalam mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan dan memberikan informasi awal yang penting dalam eksplorasi potensi panas bumi di wilayah Pacitan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih banyak kepada semua tim yang telah membantu, mengarahkan, memberi masukan, motivasi, dukungan dan perhatiannya dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Geothermal Power Plants of Indonesia," in *Geothermal Power Plants*, Elsevier, 2016, pp. 403–426. doi: 10.1016/b978-0-08-100879-9.00014-8.
- [2] K. D. Permadi and Y. Yuwono, "PEMETAAN POTENSI PANAS BUMI (GEOHERMAL) UNTUK Mendukung PROGRAM ENERGI NASIONAL JAWA TIMUR (STUDI KASUS : G. LAMONGAN, KAB. PROBOLINGGO)," *Geoid*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2013, doi: 10.12962/j24423998.v8i2.730.
- [3] "Volcanoes of Indonesia," in *The Illustrated History of Natural Disasters*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2010, pp. 103–105. doi: 10.1007/978-90-481-3325-3_19.
- [4] I. Setiawan *et al.*, "Geothermal and volcanism in west Java," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 118, p. 012074, Feb. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012074.
- [5] "Cenozoic arc processes in Indonesia: Identification of the key influences on the stratigraphic record in active volcanic arcs," in *Special Paper 436: Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones*, Geological Society of America, 2008, pp. 27–54. doi: 10.1130/2008.2436(03).
- [6] J. Andrifana, N. Sulaksana, D. Gentana, and M. Sulastri, "Geological Lineament Pattern and Geomorphic Indices Characteristic Related To Geothermal Manifestation Appearance: A Case Study from Gunung Talang District and Its Surroundings, Solok Regency, West Sumatra Province, Indonesia," *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, pp. 323–336, May 2021, doi: 10.32628/ijrst218358.
- [7] V. Soraya, "Identifikasi Patahan Kawasan Blawan-Ijen Berdasarkan Data Anomali Gravitas GGMplus dengan Analisa Second Vertical Derivative (SVD)," Thesis, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, 2020. Accessed: July 14, 2025. [Online]. Available: <https://repository.unej.ac.id/xmlui/handle/123456789/102557>
- [8] F. Sáez-Leiva, D. E. Hurtado, M. Gerbault, J. Ruz-Ginouves, P. Iturrieta, and J. Cembrano, "Fluid flow migration, rock stress and deformation due to a crustal fault slip in a geothermal system: A poro-elasto-plastic perspective," *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 604, p. 117994, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.epsl.2023.117994.

- [9] B. Adhitya, Y. R. Putra, and A. Ar, "MANIFESTASI PANAS BUMI SERTA REKOMENDASI PEMANFAATANNYA DI DESA KOTO SANI DAN SEKITARNYA, KECAMATAN X KOTO SINGKARAK, KABUPATEN SOLOK, PROVINSI SUMATRA BARAT," *J. ONLINE Phys.*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2023, doi: 10.22437/jop.v8i2.22184.
- [10] M. Hochstein and S. Sudarman, "History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000," *Geothermics*, vol. 37, pp. 220–266, June 2008, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.01.001.
- [11] M. Brehme, I. Moeck, Y. Kamah, G. Zimmermann, and M. Sauter, "A hydrotectonic model of a geothermal reservoir – A study in Lahendong, Indonesia," *Geothermics*, vol. 51, pp. 228–239, July 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.01.010.
- [12] M. B. Puspita, A. N. Aprilla, S. Maryanto, and R. P. H. Sari, "Preliminary Study of Subsurface Geological Setting Based on the Gravity Anomalies in Karangrejo-Tinatar Geothermal Area, Pacitan Regency, Indonesia," *Int. J. Geophys.*, vol. 2024, pp. 1–9, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/9976867.
- [13] S. Mulyaningsih, Y. R. S. Sukisman, and R. A. Hidayah, "Hydrothermal Alteration and Ore Metal Mineralisation at Temon, Pacitan, East Java, Indonesia.," *J. Geosci. Eng. Environ. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 24–33, Mar. 2021, doi: 10.25299/jgeet.2021.6.1.6368.
- [14] R. Lewerissa, N. Alzair, and L. Laponi, "Identification of Ransiki fault segment in South Manokwari Regency, West Papua Province, Indonesia based on analysis of a high-resolution of global gravity field: Implications on the Earthquake Source Parameters," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 873, no. 1, p. 012048, Oct. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/873/1/012048.
- [15] S. Koesuma, A. Salsabila Sanjaya, and N. Nuryani, "Identification of geothermal energy sources using gravity method (Satellite Gravimetry) in the Mount Lawu Area," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2945, no. 1, p. 012030, Jan. 2025, doi: 10.1088/1742-6596/2945/1/012030.
- [16] E. W. Sugiyo and Y. Daud, "Subsurface structure identification of 'X' geothermal prospect area based on gravity and magnetotelluric data," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 538, no. 1, p. 012056, July 2020, doi: 10.1088/1755-1315/538/1/012056.
- [17] J. d'Amour Uwiduhaye, H. Mizunaga, and H. Saibi, "A case history: 3-D gravity modeling using hexahedral element in Kinigi geothermal field, Rwanda," *Arab. J. Geosci.*, vol. 12, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.1007/s12517-019-4249-8.
- [18] C. Hirt, S. Claessens, T. Fecher, M. Kuhn, R. Pail, and M. Rexer, "New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, no. 16, pp. 4279–4283, Aug. 2013, doi: 10.1002/grl.50838.
- [19] A. Pascaning Setiahiwibowo, A. Setiawan, S. Husein, and S. Sismanto, "SUBSURFACE STRUCTURAL MODELLING USING THE GRAVITY METHOD IN THE PACITAN AREA, INDONESIA BASED ON DERIVATIVE ANALYSIS AND MODEL INVERSION," *Rud.-Geol.-Naft. Zb.*, vol. 40, no. 1, pp. 51–61, 2025, doi: 10.17794/rgn.2025.1.4.
- [20] I. Purwaningsih, K. N. Aziz, and R. Fitrianingtyas, "Identifikasi Patahan dan Struktur Bawah Permukaan Kawasan Potensi Panas Bumi Rawa Dano Provinsi Banten Menggunakan Data Gravitasi GGMPlus," *J. Geosains Dan Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 43–52, Aug. 2023, doi: 10.14710/jgt.6.1.2023.43-52.
- [21] K. N. Aziz, E. Hartantyo, and S. W. Niasari, "The Study of Fault Lineament Pattern of the Lamongan Volcanic Field Using Gravity Data," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1011, p. 012025, Apr. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1011/1/012025.
- [22] B. Sudrajad, "Analisis Deskriptif Perbandingan Data Sekunder Gravitasi GGMplus Terhadap Data Gravitasi Lapangan Panas Bumi Gunung Lawu dan Data Gravitasi Stasiun Referensi (gravity base station) di Pulau Papua," *J. Fis. Papua*, vol. 2, no. 1, pp. 25–34, Feb. 2023, doi: 10.31957/jfp.v2i1.22.
- [23] Laily Nur Hofi, S. Maryanto, A. Susilo, R. Andinisari, and Sri Dwi Wuryani, "Fault Detection and Subsurface Model Based on Gravity Data in Pronojiwo, Lumajang, Indonesia," *Evergreen*, vol. 11, no. 3, pp. 1666–1675, Sept. 2024, doi: 10.5109/7236820.

- [24] H. S. Yasmin *et al.*, "2D Geological Structure Identification in Mount Ciremai Geothermal Area using the GGMplus Data.," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1344, no. 1, p. 012017, May 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1344/1/012017.
- [25] M. A. Naufal and M. S. Rosid, "Structure identification of geothermal field 'X' using ML-SVD method of gravity data," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 854, no. 1, p. 012055, May 2020, doi: 10.1088/1757-899x/854/1/012055.
- [26] H. Samodra, S. Gafoer, and S. Tjokrosapoetro, "Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa," Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1992.
- [27] M. Goli, "Challenges in defining of Bouguer gravity anomaly," *J. Earth Space Phys.*, vol. 40, no. 2, pp. 97-111, June 2014, doi: 10.22059/jesphys.2014.50635.
- [28] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied geophysics*, 2. ed., [Repr.], Transferred to digital print. Cambridge: Cambridge Univ. Pr, 2004.
- [29] M. M. Ibrahim, P. Utami, and I. B. Raharjo, "Modeling and Interpretation of Geothermal System Components Using the Gravity Method at the 'X' Geothermal," *J. Geosci. Eng. Environ. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 180-187, June 2024, doi: 10.25299/jgeet.2024.9.2.13032.
- [30] H. Kebede, A. Alemu, and S. Fisseha, "Upward continuation and polynomial trend analysis as a gravity data decomposition, case study at Ziway-Shala basin, central Main Ethiopian rift," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03292, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03292.
- [31] H. Zeng, D. Xu, and H. Tan, "A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China," *GEOPHYSICS*, vol. 72, no. 4, pp. I45-I50, July 2007, doi: 10.1190/1.2719497.
- [32] X. Meng, L. Guo, Z. Chen, S. Li, and L. Shi, "A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application," *Appl. Geophys.*, vol. 6, no. 3, pp. 217-225, Sept. 2009, doi: 10.1007/s11770-009-0025-y.
- [33] Z. Sheng, M. Xiaohong, Z. Minghua, C. Zhaoxi, X. Chunxiao, and L. Yajie, "The improved residual node density based gravity forward method and its application," *J. Appl. Geophys.*, vol. 159, pp. 765-772, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.10.020.
- [34] S. Alawiyah *et al.*, "Vertical Gradient Modeling of Borehole Gravity and Its Application for Identifying the Subsurface Layer Boundaries and Estimating the Reservoir Porosity in the ABC Field," in *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013*, Yokohama, Japan: Society of Exploration Geophysicists of Japan, Nov. 2013, pp. 152-155. doi: 10.1190/segj112013-039.
- [35] S. M. Irawati, A. Y. Paembonan, I. A. Putri, and G. M. Ekawati, "A Comparative Study of Tilt Derivative (TDR) and Second Vertical Derivative (SVD) from Gravity Data, Case Study: Umbul Niti Geothermal Field," in *2023 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Dec. 2023, pp. 220-224. doi: 10.1109/agers61027.2023.10490709.
- [36] U. Gunadi Putra, W. Jhanesta, and Iskandarsyah, "Interpretation of Subsurface Fault Through Multi-Level Second Vertical Derivative Gravitational Data in Bittuang Geothermal Working Area, South Sulawesi, Indonesia," *J. Geosci. Eng. Environ. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 184-191, Dec. 2021, doi: 10.25299/jgeet.2021.6.4.7744.