

Pemodelan inversi data anomali gravitasi satelit untuk mengestimasi keberadaan dapur magma kompleks gunungapi Sindoro-Sumbing, Jawa Tengah, Indonesia

Insyahita Akmalia Mutaabidah, Sebah*, Zaroh Irayani

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman,

Jl. DR. Soeparno No.61, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Banyumas 53122

*email: sebah@unsoed.ac.id

Abstrak – Pemodelan inversi tiga dimensi (3D) telah dilakukan untuk memodelkan struktur geologi dapur magma pada kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing. Pemahaman struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini. Data yang digunakan adalah data anomali gravitasi satelit resolusi tinggi dari Global Gravity Model Plus (GGMplus) dengan resolusi spasial 220 m di daerah penelitian dengan luas 423,81 km². Hasil pengaksesan data GGMplus adalah data gravity disturbance dengan nilai yang berkisar 69,44–299,01 mGal. Data telah diolah dengan menerapkan koreksi Bouguer untuk memperoleh data Anomali Bouguer Sederhana (ABS) dan koreksi terrain untuk memperoleh data Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Selanjutnya reduksi data ke bidang datar dilakukan dengan menggunakan aproksimasi Deret Taylor. Langkah berikutnya adalah pemisahan data anomali regional dan residual dengan menggunakan metode upward continuation. Pemisahan data anomali tersebut menghasilkan data anomali residual dengan rentang nilai -74,96–29,05 mGal. Hasil pemodelan inversi 3D pada data anomali gravitasi residual menunjukkan blok anomali rendah dengan nilai densitas berkisar 1,50 ~ 1,59 g/cm³, yang terletak pada posisi geografis 109,989° BT dan -7,304° LS dengan kedalaman sekitar 1–5 km, diinterpretasikan sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro. Hasil pemodelan juga menunjukkan blok anomali rendah pada posisi geografis 110,071° BT dan -7,385° LS dengan kedalaman berkisar 1–6 km, yang diinterpretasikan sebagai dapur magma Gunung Sumbing

Kata Kunci: Komplek Gunungapi Sindoro-Sumbing, dapur magma, anomali gravitasi satelit, pemodelan inversi.

Abstract – Three-dimensional inversion modeling has been carried out to model the geological structure of the magma chamber in the Sindoro and Sumbing Volcanic complexes. Understanding the subsurface structure of volcanoes is important in disaster mitigation efforts and improving early warning systems. The data used is high-resolution satellite gravity anomaly data from the Global Gravity Model Plus (GGMplus) with a spatial resolution of 220 m in the research area with an area of 423.81 km². The results of accessing GGMplus data are gravity disturbance data with a value range of 69.44 – 299.01 mGal. Data has been processed by applying Bouguer correction to obtain Simple Bouguer Anomaly (SBA) data and terrain correction to obtain Complete Bouguer Anomaly (CBA) data. Furthermore, data reduction was carried out on a horizontal surface using the Taylor Series approximation. The next step is regional and residual anomaly data was separated using the upward continuation method. Separation of the anomaly data produces residual data with values ranging from -74.96 – 29.05 mGal. The results of 3D inversion modeling on residual anomaly data show a low anomaly block with density values ranging from 1.50 ~ 1.59 g/cm³, located at a geographical position of 109.989° E and -7.304° S with a depth of around 1 - 5 km, interpreted as the magma chamber of Sindoro Volcano. The modeling results also show a low anomaly block at a geographic position of 110.071° E and -7.385° S with a depth ranging from 1 – 6 km, interpreted as the magma chamber of Sumbing Volcano.

Key words: Sindoro-Sumbing Volcanic complexes, magma chamber, satellite gravity anomaly, inversion modelling.

PENDAHULUAN

Metode gravitasi merupakan salah satu metode eksplorasi geofisika yang memanfaatkan variasi nilai medan gravitasi yang terukur di permukaan bumi [1]. Nilai medan gravitasi dipengaruhi massa jenis, khususnya batuan yang terdapat di dalam kerak bumi [2]. Selain itu variasi nilai medan gravitasi juga dipengaruhi oleh struktur geologi bawah permukaan dan topografi pada permukaan bumi yang kasar, sehingga metode gravitasi dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis-jenis batuan dan struktur geologi bawah permukaan berdasarkan variasi nilai

medan gravitasi di permukaan bumi [3]. Metode gravitasi dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi model struktur geologi bawah permukaan seperti patahan (fault), lipatan (fold), cekungan air tanah (groundwater basin), dapur magma, batuan dasar (basement), dan sebagainya [3,4].

Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing merupakan dua gunungapi aktif yang terletak di Provinsi Jawa Tengah. Dua gunungapi ini terletak pada bagian utara zona tumbukan antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia [5]. Tumbukan dua lempeng tektonik mengakibatkan munculnya jalur

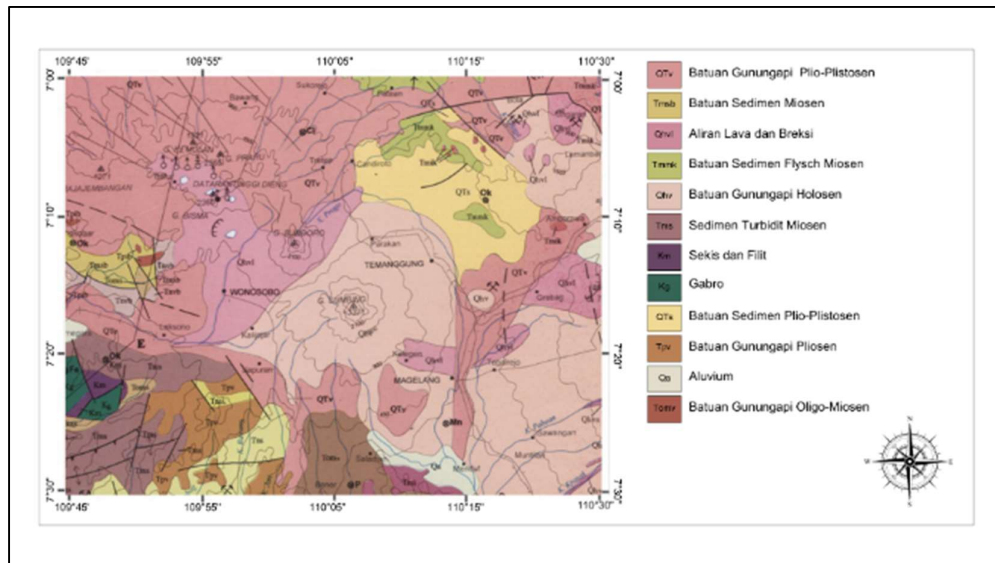
magmatisme yang memanjang di Pulau Jawa. Kemudian erupsi terjadi di sekitar jalur tersebut hingga tumbuh banyak gunungapi aktif di Pulau Jawa dan pulau-pulau lain di sekitar zona tumbukan. Daerah penelitian termasuk ke dalam Zona Gunungapi Kuartar yang memanjang dari barat hingga timur Pulau Jawa dan terbentuk dari hasil pengendapan material dan batuan gunungapi berumur kuartar [6]. Letusan gunung berapi dapat menghasilkan awan panas, aliran lava, lahar, dan gas beracun. Untuk itu, pemahaman terkait struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini.

Gunungapi Sindoro memiliki ketinggian ± 3150 mdpl, sedangkan Gunungapi Sumbing memiliki ketinggian ± 3371 mdpl [7]. Dua buah gunungapi tersebut terletak di lokasi yang relatif berdekatan, tetapi diperkirakan memiliki karakteristik letusan yang berbeda. Gunungapi Sindoro tertutup aliran lava dan breksi serta lahar dan kubah lava bersusunan andesit basaltik [8]. Sedangkan Gunungapi Sumbing tertutup batuan vulkanik Holosen berupa breksi gunungapi, aglomerat, lahar, lava, tuf, lapili, dan boulder lava [8]. Secara lengkap peta geologi kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan beberapa satuan stratigrafi dan litologinya ditunjukkan pada Tabel 1 [8].

Tabel 1. Satuan stratigrafi dan litologi batuan bawah permukaan kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing [8]

No.	Formasi Batuan	Satuan Litologi	Umur Batuan
1.	Aluvium (Qa)	Kerakal, pasir, lumpur, koral dan batuapung.	Holosen
2.	Aliran Lava dan Breksi (Qhvl)	Aliran lava dan breksi, lahar dan kubah lava, bersusunan andesit basal.	Holosen
3.	Batuan Gunungapi Holosen (Qhv)	Breksi gunungapi, aglomerat, lahar, lava, tuf, lapilli, dan bom.	Holosen
4.	Batuan	Breksi gunungapi	Pliosen

	Gunungapi Pliosen (Tpv)	bersisipan tuf dan batupasir tufan.	
5.	Batuan Gunungapi Plio-Plistosen (QTV)	Breksi gunungapi, aliran lava, tuf, breksi aliran, lahar, batupasir tufan dan batulempung tufan bersisipan tuf halus kasar.	Plio-Plistosen
6.	Batuan Sedimen Plio-Plistosen (QTS)	Perselingan breksi gunungapi, tuf kasar, konglomerat, tuf halus dan batulempung tufan.	Plio-Plistosen
7.	Batuan Sedimen Miosen (Tmsb)	Serpih, napal, batupasir gampingan.	Miosen
8.	Batuan Sedimen Flysch Miosen (Tmmk)	Bagian bawah berupa batuan sedimen tipe <i>flysch</i> berlapis, terdiri atas perselingan batulanau, batulempung, batupasir gampingan dan batugamping pasir.	Miosen
9.	Sedimen Turbidit Miosen (Tms)	Perselingan konglomerat, batupasir, batulempung, napal, tuf breksi dan riolit.	Miosen
10.	Batuan Gunungapi Oligo-Miosen (Tomv)	Breksi gunungapi, tuf, lava bersusun andesit-basal dan dasit, berselingan dengan batupasir sela, konglomerat dan setempat batugamping serta breksi batuapung, tuf dasit dengan retas diorit.	Miosen
11.	Sekis dan Filit (Km)	Sekis ambifol-mikaglokofan dan filit yang terdapat sebagai kepungan tektonik	Kapur
12.	Gabro (Kg)	Gabro yang terdapat sebagai kepungan tektonik	Kapur



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian; Kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing Jawa Tengah [8]

LANDASAN TEORI

A. Metode Gravitasi

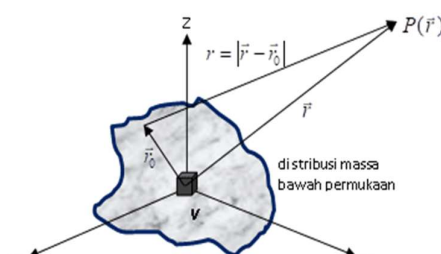
Prinsip dasar metode gravitasi dalam eksplorasi Geofisika adalah hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara dua massa, dimana besar gaya antara dua buah titik massa m_1 dan m_2 yang terpisah dengan jarak r dan dapat dinyatakan dengan persamaan [9]:

$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

F merupakan gaya tarik-menarik antara dua titik massa (N), G adalah konstanta gravitasi umum ($6,67428 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$), m_1 dan m_2 adalah massa dua titik yang berbeda (kg), r adalah jarak antar pusat massa (m), dan $\hat{r}$ adalah arah vektor. Telford et.al. [9] telah menjabarkan Persamaan (1) untuk memperoleh nilai potensial gravitasi pada suatu titik P di luar volume V seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** yang dapat dinyatakan dengan persamaan [9]:

$$U_P(\vec{r}) = - \int_V \frac{G}{|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2|} dm = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}_0)}{|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2|} d^3 \vec{r}_0 \quad (2)$$

dengan

$$|\vec{r}^2 - \vec{r}_0^2| = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r r_0 \cos \gamma}$$


Gambar 2. Potensial gravitasi pada titik P di permukaan bumi akibat distribusi massa yang kontinu di bawah permukaan [9].

Jika integral volume Persamaan (2) diterapkan untuk seluruh volume bumi, maka potensial gravitasi pada permukaan bumi dapat diperoleh. Adapun kuat medan gravitasi bisa diperoleh dengan cara mendiferensialkan potensial gravitasi tersebut sehingga menjadi [9]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = |-\nabla U_P(\vec{r})|$$

Nilai medan gravitasi bumi sering disebut sebagai percepatan gravitasi bumi (g). Berdasarkan Persamaan (2) dan (3), nilai

percepatan gravitasi bumi dinyatakan dengan persamaan [9]:

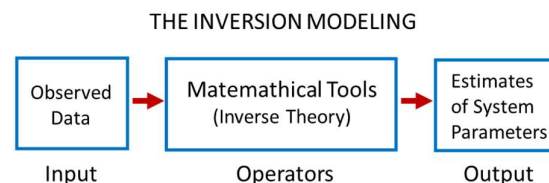
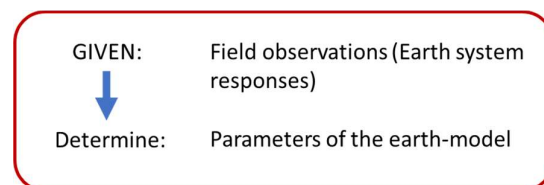
$$g(\vec{r}) = |-\vec{E}(\vec{r})| = |\nabla U_P(\vec{r})| \quad (4)$$

$$g(\vec{r}) = -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}_0)(z_0 - z) d^3 \vec{r}_0}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

Persamaan (4) menunjukkan bahwa nilai medan gravitasi di permukaan bumi bervariasi. Variasi medan gravitasi bumi ini dipengaruhi oleh posisi geografis (bujur dan lintang), elevasi, serta distribusi massa batuan bawah permukaan bumi yang dinyatakan sebagai fungsi densitas batuan bawah permukaan.

B. Pemodelan Inversi-3D

Secara umum data anomali medan gravitasi hasil observasi di lapangan diharapkan bisa memberikan informasi sebanyak mungkin, tidak hanya terkait sifat-sifat fisis batuan saja, tetapi juga kondisi geometri batuan bawah permukaan, posisi, dan kedalamannya. Informasi itu dapat diperoleh jika relasi antara sifat-sifat fisis batuan dan data observasinya dapat diketahui. Relasi antara keduanya hampir selalu berbentuk persamaan matematis yang umumnya disebut sebagai model matematis. Berdasarkan model matematis tersebut, parameter-parameter fisis batuan dapat diekstrak dari data observasi [10]. Proses ini disebut sebagai pemodelan inversi (*inverse modelling*), seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pemodelan inversi bisa diterapkan untuk membuat model geologi bawah permukaan dari pengaruh medan gravitasi daerah penelitian.



Gambar 3. Alur pemodelan data anomali gravitasi secara inversi (*inverse modeling*) [10].

Adapun proses sebaliknya, dimana kita ingin mendapatkan data prediksi hasil observasi berdasarkan parameter fisis yang sudah

diketahui disebut sebagai pemodelan maju (*forward modelling*) [10]. Permodelan maju digunakan untuk melihat respon medan gravitasi yang ditimbulkan dari model geologi yang dibuat. Dengan demikian *forward modelling* merupakan suatu proses pemodelan untuk menjabarkan data dari suatu permodelan dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomali. Dua jenis pemodelan ini memiliki tujuan untuk mengestimasi model geologi bawah permukaan berdasarkan data hasil observasi. Namun dalam penelitian ini pemodelan terhadap sumber anomali yang dilakukan adalah pemodelan inversi.

METODE PENELITIAN

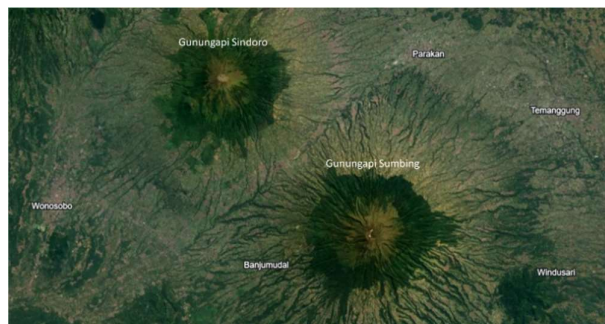
A. Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian ini telah dilaksanakan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto. Data penelitian merupakan data anomali medan gravitasi citra satelit untuk kawasan Gunungapi Sindoro dan Sumbing, dengan posisi koordinat $7^{\circ}15'00''$ LU – $7^{\circ}26'24''$ LS serta $109^{\circ}57'00''$ BT – $110^{\circ}7'48''$ BT. Lokasi daerah penelitian komplek Gunungapi Sindoro-Sumbing dapat dilihat dari **Gambar 3**.

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian meliputi laptop atau komputer yang dilengkapi dengan berbagai perangkat lunak dan program aplikasi seperti Microsoft Excel 2019, Surfer 17, Matlab 2015, Plato FTM95, Grablox 1.7, Bloxer 1.6e, dan Google Earth 7.3. Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gravitasi dari GGMplus yang dapat diperoleh secara lengkap melalui website atau laman: <http://ddf.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>.

Pengaksesan data ini menghasilkan data *gravity disturbance* yang nilainya setara dengan data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas, data posisi geografis (lintang dan bujur), data geoid, serta data elevasi.



Gambar 3. Peta lokasi Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing (sumber: Google Earth).

C. Pelaksanaan Penelitian

Akuisisi data telah dilakukan melalui website GGM Plus untuk memperoleh data *gravity disturbance*, posisi geografis, data geoid, dan data elevasi. Data *gravity disturbance* setara dengan data anomali medan gravitasi terkoreksi udara bebas [11]. Data ini memiliki resolusi spasial 220 m yang jauh lebih baik dibandingkan data Topex dengan resolusi 1,85 km [11]. Selanjutnya data anomali Bouguer lengkap (ABL) diperoleh setelah dilakukan koreksi Bouguer dan terrain terhadap data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas. Data ABL tersebut masih tersebar di permukaan topografi yang dapat dituliskan sebagai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h)$ [12]. Oleh karena itu, data ABL ini harus direduksi ke bidang datar pada ketinggian rata-rata topografi [13]. Reduksi data ke bidang datar dapat dilakukan dengan pendekatan Deret Taylor seperti persamaan [13]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i+1]} = \Delta g(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h - h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial h^n} \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i]} \quad (5)$$

Nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada persamaan (5) yang terdistribusi pada bidang datar dapat diestimasi melalui pendekatan, yaitu nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari proses iterasi ke- i digunakan untuk memperoleh nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada iterasi selanjutnya atau $(i+1)$. Proses iterasi dilakukan secukupnya, sedemikian hingga nilai yang diperoleh menunjukkan konvergen [13].

Data ABL yang diperoleh dari persamaan (5) belum bersih dari efek anomali regional. Oleh sebab itu data ABL ini harus dibersihkan dari efek regional. Data anomali regional dapat diperoleh melalui pengangkatan data ABL hingga ketinggian tertentu, sedemikian hingga pola anomalinnya cenderung tetap dengan interval nilai yang sangat kecil. Proses

pengangkatan ke atas dapat dilakukan menggunakan persamaan [13]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) = \frac{\Delta h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{[(\lambda - \lambda')^2 + (\vartheta - \vartheta')^2 + \Delta h^2]^3}} d\lambda' d\vartheta' \quad (6)$$

Data yang diperoleh, selanjutnya dikoreksikan terhadap data ABL yang dihasilkan persamaan (5), sehingga diperoleh data anomali magnetik residual menggunakan persamaan [14]:

$$\Delta g_{res}(\lambda, \vartheta, h_0) = \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0) - \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) \quad (7)$$

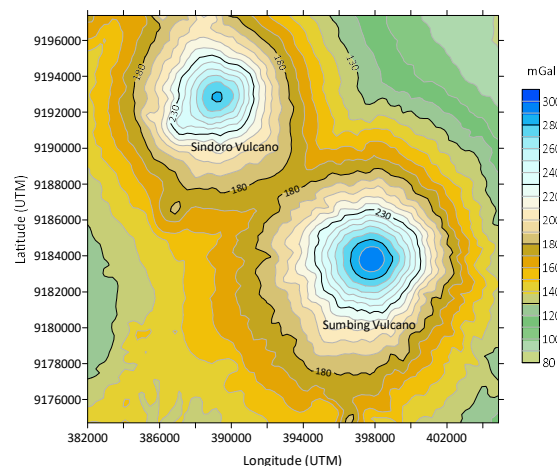
Data anomali gravitasi residual merupakan data anomali medan gravitasi yang telah bersih dari berbagai efek sumber anomali regional dan diasumsikan hanya berasosiasi dengan sumber anomali lokal yang menjadi target pada penelitian, yaitu struktur geologi bawah permukaan kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing [15]. Data anomali gravitasi residual yang diperoleh dapat langsung dimodelkan. Namun apabila masih terdapat efek dari sumber-sumber massa lokal yang kuat yang bersumber dari permukaan topografi, maka dilakukan proses pemfilteran lagi untuk menghilangkan noise-noise tersebut. Pemodelan inversi 3D dilakukan terhadap data ABL residual pada daerah penelitian [16]. Setelah mendapatkan hasil-hasil pemodelan, selanjutnya interpretasi litologi dilakukan untuk mengestimasi tipe-tipe batuan dan keberadaan dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengaksesan Data Anomali Gravitasi

Data anomali gravitasi citra satelit telah diakses melalui website GGMplus dan menghasilkan data gangguan gravitasi (*gravity disturbance*) berjumlah 15.504 data, dengan posisi geografis $7^{\circ}15'00'' - 7^{\circ}26'24''$ LS dan $109^{\circ}57'00'' - 110^{\circ}7'48''$ BT. Data *gravity disturbance* tersebut setara dengan anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (*Free Air Anomaly*, FAA) [17] dengan nilai berkisar 69,45–299,01 mGal. Sedangkan elevasi daerah penelitian berkisar 385,59–3.265,55 m. Secara visual, peta kontur FAA ditunjukkan pada **Gambar 4**. Berdasarkan peta kontur FAA tersebut, Gunungapi Sumbing memiliki nilai anomali gravitasi yang relatif lebih tinggi

daripada Gunungapi Sindoro. Kondisi ini diperkirakan terkait dengan ukuran tubuh gunung, dimana Gunungapi Sumbing lebih besar dibandingkan Gunungapi Sindoro, seperti dapat dilihat pada **Gambar 3**.



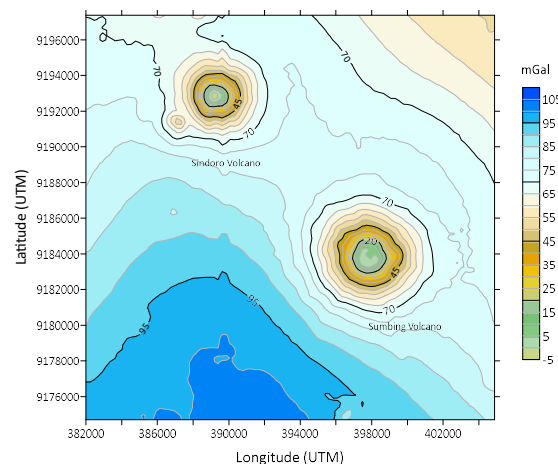
Gambar 4. Peta kontur anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (FAA) kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing.

B. Hasil Pengolahan Data Anomali Gravitasi

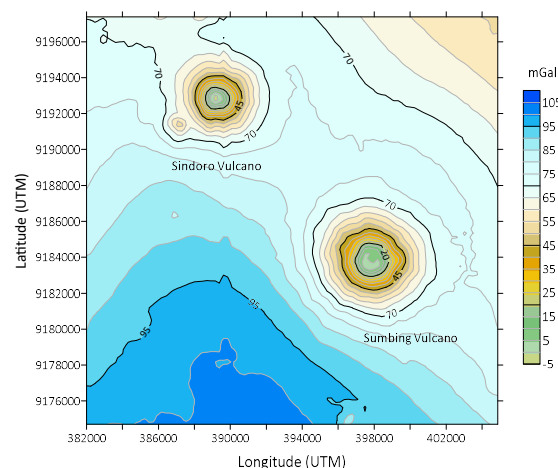
Data FAA yang telah diunduh dilakukan koreksi Bouguer dan *terrain* untuk mendapatkan data ABL. Koreksi Bouguer bertujuan untuk memperhitungkan efek tarikan massa batuan yang terdapat pada bidang *datum* dengan asumsi memiliki jari-jari tak terhingga, ketebalan h (m) dan densitas ρ (gr/cc), sehingga efek tarikan massa batuan tersebut dapat direduksi. Sedangkan koreksi *terrain* digunakan untuk mengurangi efek massa topografi di permukaan bumi yang relatif kasar akibat perbedaan elevasi yang besar seperti bukit dan lembah sekitar titik data. Setelah koreksi-koreksi diterapkan, diperoleh data ABL dengan nilai berkisar -66,71–63,298 mGal dan peta kontur seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Anomali rendah biasanya mengindikasikan keberadaan zona panas, yang kaya fluida atau batuan yang telah mengalami alterasi sehingga kehilangan sifat magnetiknya. Oleh sebab itu anomali rendah pada peta kontur tersebut diperkirakan sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing [18].

Data ABL yang masih tersebar di topografi harus direduksi ke bidang datar (*horizontal surface*). Reduksi ke bidang datar merupakan suatu proses untuk mentransformasi data anomali gravitasi di topografi menuju ke suatu bidang datar (dengan ketinggian yang sama).

Reduksi ke bidang datar merupakan syarat agar data ABL dapat diproses pada tahapan berikutnya, khususnya pemisahan data anomali regional-residual melalui pengangkatan ke atas (*upward continuation*) [13]. Reduksi data ke bidang datar dilakukan pada ketinggian rata-rata agar iterasi dapat segera mencapai konvergen [13]. Peta kontur ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar (ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian, 1.101,76 m) ditunjukkan pada **Gambar 6**. Secara visual, kedua kontur tersebut mirip, sebab perubahan nilainya tidak terlalu signifikan.



Gambar 5. Peta kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) daerah penelitian.

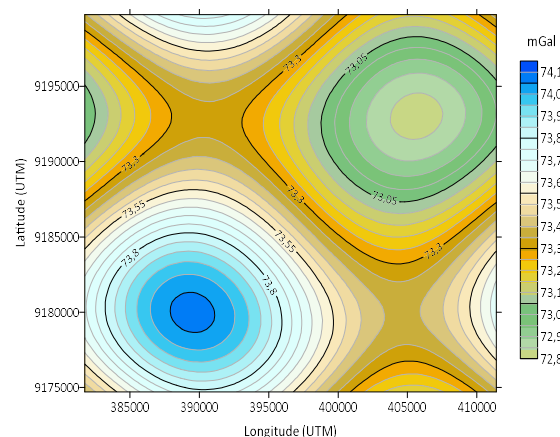


Gambar 6. Peta kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) daerah penelitian yang telah terdistribusi pada bidang datar.

C. Hasil Pemisahan Data Anomali Gravitasi

Data ABL pada bidang datar perlu dipisahkan dari anomali gravitasi regional untuk mendapatkan data anomali gravitasi residual (lokal) daerah penelitian [19]. Peta kontur

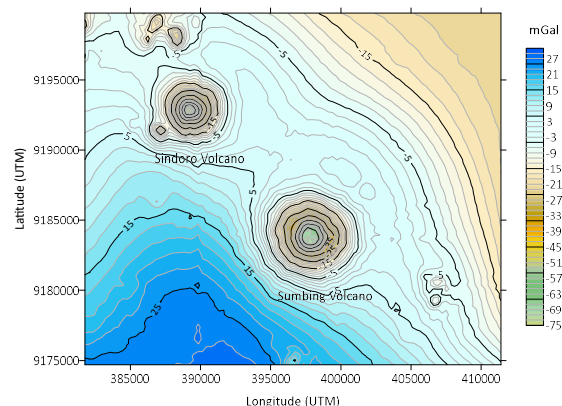
anomali gravitasi regional menunjukkan anomali yang berasosiasi dengan sumber-sumber yang sangat dalam dan luas. Adapun anomali residual menunjukkan struktur geologi atau batuan bawah permukaan yang relatif dangkal. Dalam penelitian ini data anomali regional diperoleh melalui proses pengangkatan ke atas (*upward continuation*). Pengangkatan data merupakan suatu proses transformasi data untuk membawa data anomali medan gravitasi dari bidang datar ke bidang datar lain yang berada di atasnya [13]. Peta kontur anomali regional memiliki pola halus dan tidak terdapat *closure* anomali lokal, dimana interval nilai anomali antara satu titik *grid* dengan titik-titik *grid* di sekitarnya sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi medan gravitasi yang berasal dari sumber-sumber lokal (dekat permukaan bumi) telah tereduksi, seperti terlihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Peta kontur anomali gravitasi regional daerah penelitian.

Hasil analisis terhadap pola kontur ABL setelah dilakukan pengangkatan ke atas menunjukan bahwa pada ketinggian 15.000 m di atas bidang sferoida referensi, pola kontur telah relatif tetap dan halus dengan interval nilai yang sangat kecil. Data anomali gravitasi regional yang diperoleh memiliki nilai yang berkisar 72,83 – 74,07 mGal. Pola kontur anomali ini sudah tidak mengalami perubahan atau relatif tetap sehingga ketinggian tersebut dipilih sebagai ketinggian data anomali regional daerah penelitian [20]. Selanjutnya data anomali gravitasi residual diperoleh dari selisih data anomali regional terhadap data ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar. Perhitungan ini menghasilkan data anomali gravitasi residual dengan nilai yang

berkisar $-74,96 - 29,05$ mGal. Peta anomali gravitasi residual ditunjukkan pada **Gambar 8**.



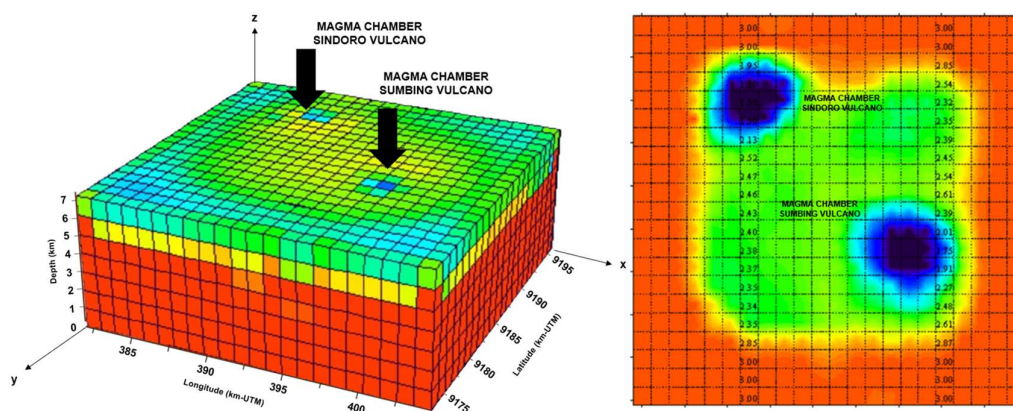
Gambar 8. Peta kontur ABL residual daerah penelitian.

D. Hasil Pemodelan dan Interpretasi Data

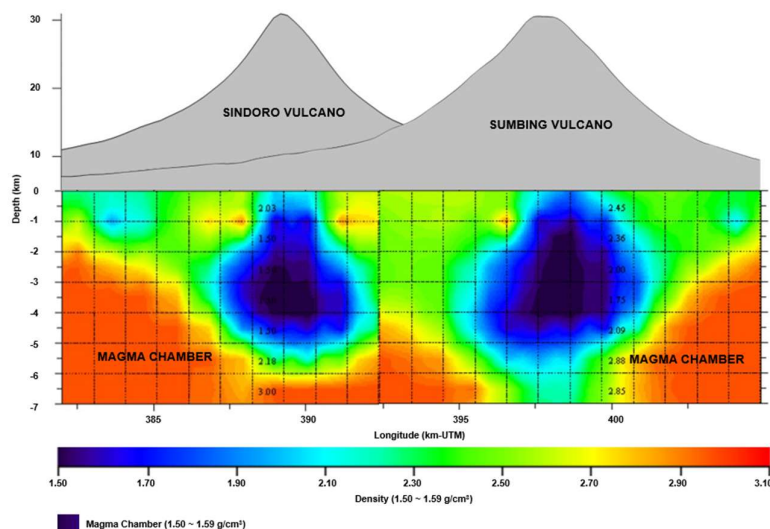
Data anomali gravitasi residual dimodelkan secara inversi 3D menggunakan aplikasi Grablox dan Bloxer. Luas wilayah pemodelan berkisar $22,9 \text{ km} \times 22,7 \text{ km}$ dengan kedalaman 7 km. Dimensi (volume) setiap blok pada pemodelan ini adalah $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan khususnya dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing. Hasil pemodelan inversi 3D menunjukkan bahwa nilai densitas batuan bawah permukaan di daerah

penelitian berkisar $1,50 - 3,10 \text{ g/cm}^3$. Selanjutnya model 3D yang diperoleh menunjukkan adanya blok batuan dengan densitas sangat rendah, berkisar $1,50 - 1,59 \text{ g/cm}^3$, yang terletak saling berdekatan dalam arah tenggara dan barat laut. Blok batuan dengan densitas rendah dapat diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro (di sebelah utara) dan Gunungapi Sumbing (di sebelah selatan).

Hasil pemodelan 3D juga menunjukkan bahwa kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing tersusun atas beberapa jenis batuan dengan litologi berupa batuan beku ($2,7 - 2,9 \text{ g/cm}^3$), batuan lava andesit ($2,6 \text{ g/cm}^3$), batuan lempung ($2,3 - 2,5 \text{ g/cm}^3$), tanah dan batupasir ($1,6 - 2,2 \text{ g/cm}^3$), serta dapur magma ($1,5 \text{ g/cm}^3$). Hasil pemodelan inversi 3D data anomali gravitasi residual menunjukkan bahwa model dapur magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing yang diperoleh memiliki bentuk tak beraturan dengan nilai densitas berkisar $1,5 - 1,59 \text{ g/cm}^3$ dengan kedalaman berkisar $1 - 5 \text{ km}$ untuk Gunungapi Sindoro dan $1 - 6 \text{ km}$ untuk Gunungapi Sumbing. Kedalaman tersebut diukur dari ketinggian topografi (rata-rata) daerah penelitian. Secara lateral posisi/lokasi dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan hasil pemodelan ditunjukkan pada **Gambar 9**. Sedangkan perlapisan batuan dan kedalamannya dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 9. Posisi dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing berdasarkan hasil pemodelan.



Gambar 10. Struktur bawah permukaan dan kedalaman dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan hasil pemodelan (dilihat dari arah selatan daerah penelitian).

E. Pembahasan

Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing diperkirakan terbentuk dari proses konstruktif pada kala Holosen [21] yang menghasilkan produk vulkanik berupa magma dan bentukan tubuh gunungapi. Peristiwa subduksi antar dua buah lempeng tektonik yaitu Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia telah berakibat melelehnya sebagian material batuan kerak bumi. Lelehan ini membentuk magma dan bergerak melalui celah dan rekahan ke permukaan bumi sebagai akibat tekanan dan temperatur yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa magma Gunungapi Sindoro dan Sumbing diestimasi berasal dari zona subduksi [21]. Model yang diperoleh menunjukkan tidak ada keterkaitan dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi Sumbing sehingga aktivitas vulkanik dua gunung tersebut berbeda. Namun untuk memantau aktivitas vulkanik secara lebih detail, metode seismik dapat direkomendasikan. Gunungapi Sindoro dan Sumbing termasuk gunungapi yang masih aktif. Berdasarkan pengamatan, Gunungapi Sindoro relatif lebih aktif daripada Gunungapi Sumbing. Gunungapi Sindoro telah mengalami peningkatan aktivitas vulkanik pada bulan Desember 2011, meliputi gempa vulkanik dalam dan gempa vulkanik dangkal. Gunung ini juga pernah mengalami letusan freatik pada tahun 2018 [22]. Peningkatan aktivitas vulkanik Gunungapi Sindoro terbanyak terjadi pada tanggal 10 Februari 2021, yaitu 48 kali kegempaan.

Sedangkan pada 11 dan 12 Februari 2021 terjadi sebanyak 38 kali [23].

KESIMPULAN

Penelitian metode gravitasi menggunakan data satelit telah dilakukan pada kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing, Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh struktur geologi dapur magma kompleks Gunungapi Sindoro-Sumbing berdasarkan model inversi 3D data anomali gravitasi satelit. Pemahaman terkait struktur bawah permukaan gunungapi penting dalam upaya mitigasi bencana dan peningkatan sistem peringatan dini. Penelitian telah dilaksanakan melalui beberapa tahap, yaitu pengaksesan data, koreksi data, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, serta pemodelan data anomali dan interpretasi. Data anomali gravitasi yang diakses adalah data GGMplus yang memiliki resolusi spasial 220 m. Setelah dilakukan koreksi Bouguer dan terrain, diperoleh data anomali Bouguer lengkap (ABL) dengan nilai berkisar -2,63–102,83 mGal. Setelah dilakukan reduksi data ke bidang datar dan pemisahan data anomali regional dan residual, maka diperoleh data ABL residual dengan nilai yang berkisar -74,96–29,05 mGal.

Hasil pemodelan inversi 3D terhadap data ABL residual menunjukkan blok anomali rendah dengan nilai densitas yang berkisar 1,50 – 1,59 g/cm³ yang dapat diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Sindoro dan Gunungapi

Sumbing. Model 3D yang diperoleh menunjukkan bahwa dapur magma Gunungapi Sindoro diestimasi terletak pada posisi geografis $109,989^{\circ}$ BT dan $-7,304^{\circ}$ LS serta kedalaman yang berkisar 1 – 5 km. Sedangkan Gunungapi Sumbing diestimasi terletak pada posisi geografis $110,071^{\circ}$ BT dan $-7,385^{\circ}$ LS dengan kedalaman berkisar 1 – 6 km. Selain dapur magma, kompleks Gunungapi Sindoro dan Sumbing tersusun atas beberapa jenis batuan dengan litologi berupa batuan beku ($2,7 - 2,9 \text{ g/cm}^3$), batuan lava andesit ($2,6 \text{ g/cm}^3$), batuan lempung ($2,3 - 2,5 \text{ g/cm}^3$), serta tanah dan batupasir ($1,6 - 2,2 \text{ g/cm}^3$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kepala Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman atas fasilitas ruangan untuk kegiatan penelitian. Terimakasih juga disampaikan kepada Sherina Cikal Buliyanti, S.Si. dan rekan-rekan lainnya yang telah berkenan membantu menyampaikan tutorial pemodelan data anomali gravitasi secara inversi 3D.

PUSTAKA

- [1] C. M. Lichoro, "Gravity and Magnetic Method", Presented at *SDG Short Course I on Exploration and Development of Geothermal Resources: Organized by UNU-GTP, GDC and KenGen*, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, p. 10–31, 2016.
- [2] W. J. Hinze, R. R. B. Von Frese, , & Saad, A. H. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- [3] Y.L. Ekinici and E. Yigitbas, "Interpretation of Gravity Anomalies to Delineate Some Structural Features of Biga and Gelibolu Peninsulas, and their Surroundings (North-West Turkey)", *Geodinamica Acta*, vol. 27, no.4, p. 300-319, 2015.
- [4] F. Frappart, and G. Ramillien, "Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review", *Remote Sensing*, vol. 10, No. 829, p. 1-25, 2018.
- [5] S. Bronto, "Fasies Gunungapi dan Aplikasinya", *Jurnal Geologi Indonesia*, vol. 1, no.2, p. 59–71, 2006.
- [6] J. A. Haqiqi, T. Winarno, dan J. Marin, "Pemetaan Fasies Vulkanik berdasarkan Geomorfologi dan Stratigrafi Batuan Gunungapi pada Gunungapi Sindoro, Jawa Tengah", *Jurnal Geosains dan Teknologi*, vol. 2, no.1, hal. 24-32.
- [7] Anonim, "Sindoro dan Sumbing, Gunung Kembar yang Menantang", 2023. Website. Tersedia pada alamat: [https://integrasi-opd.temanggungkab.go.id/frontend/d_informasi/170#:~:text=Tinggi%20Gunung%20Sumbing%20sekitar%203.340,Sindoro%20\(3.155%20m%20dpl\)](https://integrasi-opd.temanggungkab.go.id/frontend/d_informasi/170#:~:text=Tinggi%20Gunung%20Sumbing%20sekitar%203.340,Sindoro%20(3.155%20m%20dpl).). (Diakses: 15 Maret 2025).
- [8] T. C. Amin, N. Ratman, dan S. Gafoer, *Peta Geologi Lembar Jawa Bagian Tengah, Skala 1:500.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1999.
- [9] W.M. Telford, L.P. Gedaart, and R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge, New York. 770 pp. , 1990.
- [10] Supriyanto, *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*, Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia. Depok, 38pp., 2007.
- [11] C. Hirt, S. Claessens, T. Fecher, M. Kuhn, , R. Pail, M. Rexer, "New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field", *Geophysical Research Letters*, vol. 40, p. 4279-4283, 2013.
- [12] Seha, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, *Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit sebagai Data Utama Riset Geofisika untuk Mitigasi Bencana. Laporan Akhir Riset Dasar*, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 2021
- [13] R.J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, USA, 1995.
- [14] Seha, U. N. Prabowo, S. A. Raharjo, R. Kurniati, "Utilization of Satellite Gravity Anomaly Data for Two-Dimensional Modeling of Subsurface Structure of Slamet Volcano, Central Java, Indonesia", *Malaysian Journal of Geosciences*, vol. 07, no. 01, p. 01-07, 2023.

- [15] S. O. Eteje, O. F. Oduyebo, and P. D. Oluyori, "Modelling Local Gravity Anomalies from Processed Observed Gravity Measurements for Geodetic Applications", *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, vol. 6, no. 5, p. 144-162, 2019.
- [16] K. S. Essa, "A Fast Interpretation Method for Inverse Modeling of Residual Gravity Anomalies Caused by Simple Geometry", *Journal of Geological Research*, 327037, 2012.
- [17] F. Ulumuddin and S. C. Susanto, "Manfaatkan Data Gravitasi Resolusi Tinggi melalui GGMPPlus", 2021. Website. Tersedia pada URL: <https://www.its.ac.id/news/2021/06/11/manfaatkan-data-gravitasi-resolusi-tinggi-melalui-ggmplus/>. [Diakses 22 Nopember 2022].
- [18] Seha, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, and A.Z. Ikhwana, "Physical Modeling of Magma Chamber of Slamet Volcano by Means of Satellite Gravimetric Data", *Communications in Science and Technology*, vol.7, no.2, p.160-167, 2022.
- [19] L. Guo, X. Meng, Z. Chen, S. Li, and Y. Zheng, "Preferential Filtering for Gravity Anomaly Sparation", *Computers and Geosciences*, vol. 51, p.247-254, 2013.
- [20] S. A. Ganiyu, B. S. Badmus, M. O. Awoyemi, D. Akinyemi, O. T. Olurin, "Upward Continuation and Reduction to Pole Process on Aeromagnetic Data of Ibadan Area, South-Western Nigeria", *Earth Science Research*, vol. 2, no. 1, p. 66-73, 2013.
- [21] M. Ridho, A. Subandrio, S. Umiyatun, "Geologi dan Pengembangan Geowisata pada Daerah Temanggal dan Sekitarnya, Kecamatan Tempuran, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah", *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, vol. 6, no. 2, hal. 87-97, 2019.
- [22] Habibullah, A.D. Laksono, R.P. Dewa, dan W. Hidayat, "Pemodelan Spasial untuk Prediksi Daerah Bahaya Akibat Letusan Gunungapi Sindoro", *Seminar Nasional Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis 2012*, Surakarta, 2012.
- [23] A. Puspitoningrum, "Aktivitas Vulkanik Gunung Sindoro Temanggung Naik 86 Kali Kegempaan", 2021. Website. Tersedia di: <https://jateng.idntimes.com/news/jateng/angun-puspitoningrum-1/aktivitas-vulkanik-gunung-sindoro-temanggung-naik-86-kali-kegempaan>. Diakses: 15 Maret 2025.