

Pemodelan inversi tiga dimensi struktur bawah permukaan kawasan panasbumi Dieng berdasarkan data anomali gravitasi citra satelit

Sehah*, Aviyatna Fikri Utami, Sunardi

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah Indonesia
*Email: sehah@unsoed.ac.id

Abstrak – Data gravitasi citra satelit GGMplus dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi, terutama untuk daerah yang sulit dijangkau seperti Dataran Tinggi Dieng. Pemodelan pada penelitian ini dilakukan secara 3D berdasarkan data anomali gravitasi residual. Tahapan penelitian yang telah dilakukan meliputi pengaksesan data, koreksi bougeur, koreksi terrain, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, pemodelan inversi, dan interpretasi. Data anomali gravitasi yang telah diakses adalah data GGMplus dengan batas koordinat geografis 109,8°–110,3° BT dan 7,12°–7,28° LS. Setelah pengaksesan data, selanjutnya koreksi bougeur dan terrain diterapkan, sehingga diperoleh data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) dengan nilai berkisar –56,6–65,7 mGal. Data ABL diproses sesuai tahapan penelitian hingga diperoleh data anomali residual yang berkisar –73,59–47,60 mGal. Data anomali ini terdistribusi pada ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian, yaitu 1.392,35 m. Pemodelan inversi 3D terhadap data anomali residual dilakukan sehingga diperoleh model anomali bawah permukaan dengan densitas berkisar 1,00–4,60 g/cm³ yang diinterpretasi sebagai struktur geologi bawah permukaan Dataran Tinggi Dieng. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa reservoir panasbumi terletak pada batuan lava andesit dengan densitas total berkisar 2,80 – 3,70 g/cm³.

Kata kunci: gravitasi citra satelit, pemodelan inversi 3D, panasbumi, Dataran Tinggi Dieng.

Abstract – GGMplus satellite gravity data can be used to determine subsurface structures and geothermal reservoirs, especially for hard-to-reach areas such as the Dieng Plateau. The modeling in the research was carried out in 3D based on residual gravity anomaly data. The research stages that have been carried out include data access, bougeur correction, terrain correction, data reduction to a horizontal surface, separation of regional and residual anomaly data, inversion modeling, and interpretation. The gravity anomaly data that has been accessed is GGM plus data with geographic position coordinates of 109.8°–110.3° E and 7.12°–7.28° S. After accessing the data, bougeur and terrain corrections were then applied, resulting in Complete Bouguer Anomalies data (CBA) with values ranging from –56.6–65.7 mGal. The CBA data was processed according to the research stages until residual anomaly data was obtained ranging from –73.59–47.60 mGal. These anomaly data are distributed over the average topographic elevations of the research area, i.e. 1,392.35 m. Then 3D inversion modeling of the residual anomaly data was carried out to obtain subsurface anomalous models with a density ranging from 1.00–4.60 g/cm³ which was interpreted as the subsurface geological structure of the Dieng Plateau. The interpretation results show that the geothermal reservoir is located in andesite lava rock with a total density ranging from 2.80–3.70 g/cm³.

Key words: satellite gravity, 3D inversion modeling, geothermal, Dieng Plateau.

PENDAHULUAN

Jalur gunungapi aktif mengakibatkan wilayah Indonesia memiliki potensi panasbumi yang besar terutama keberadaan sumber energi panas yang merupakan salah satu komponen sistem panasbumi [1]. Besarnya potensi energi panasbumi di Indonesia diperkirakan mencapai 40% dari cadangan dunia [2]. Salah satu daerah yang memiliki potensi panasbumi besar adalah Dieng Volcanic Complex (DVC). DVC

merupakan kompleks gunungapi kuarter yang terletak di Jawa Tengah, yang merupakan bagian dari Busur Vulkanik Sunda Kuarter. Busur vulkanik tersebut diperkirakan telah aktif sejak masa tersier sebagai akibat subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara menunjam di bawah Lempeng Eurasia. DVC terbentuk dari gunungapi sisi belakang sebagai bagian dari rantai vulkanik ganda yang terdiri dari tiga gunungapi, yaitu Sumbing, Sindoro, dan Dieng [3].

Magma pada kompleks gunungapi di kawasan Dieng yang berdiferensiasi dapat ditemukan pada batuan gunungapi yang tersusun atas basaltik (basa) hingga andesitik. Batuan-batuan beku seperti andesit sangat umum terbentuk ketika sebagian besar magma sudah terkristalisasi [4]. Ketika sebagian besar magma sudah terkristalisasi, gas-gas telah terpisah darinya dan berkumpul di leher gunungapi. Gas tersebut bertekanan tinggi, mengakibatkan letusan eksplosif serta menghasilkan batuan beku andesit dan kawah berbentuk melingkar dengan diameter puluhan hingga ribuan meter. Salah satu gunungapi di kawasan DVC adalah Gunungapi Pagerkandang di kawah bagian utara, dan terdapat beberapa manifestasi panasbumi dalam bentuk solfatara dan fumarol yang tersebar di bagian dalam dan luar kawah. Sebagian besar aktivitas hidrotermal berhubungan dengan kawah eksplosif dan zona rekahan di kawasan DVC seperti terlihat pada **Gambar 1** [5].

Sumber utama panas dari sistem hidrotermal adalah proses magmatisme. Oleh karena itu, tempat dimana terjadi proses magmatisme, umumnya terbentuk sistem hidrotermal, baik plutonisme maupun vulkanisme. Sistem hidrotermal adalah sistem tata aliran air dimana terjadi perpindahan panas secara konduksi dan konveksi akibat interaksi fluida (air meteorik) yang berada di bawah permukaan dengan suatu sumber panas (*heat reservoir*). Reservoir panasbumi adalah formasi batuan di bawah permukaan yang mampu menyimpan fluida termal (uap dan/atau air panas) dan mudah dialiri [6]. Dinding dan penutup reservoir panasbumi ini harus bersifat tidak mudah ditembus atau dilalui oleh air atau uap. Tidak adanya lapisan penutup menjadikan sistem panasbumi menjadi terbuka dan energi panas yang ada akan hilang (*heatloss*) [7]. Umumnya batuan ini merupakan hasil letusan gunungapi seperti batuan lava dan piroklastik.



Gambar 1. Salah satu kawah pada *Dieng Volcanic Complex*.

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir panasbumi di kawasan DVC adalah metode gravitasi citra satelit. Keberadaan dan karakteristik reservoir panasbumi perlu diteliti sebagai upaya memperkirakan cadangan energi panas yang terkandung di kawasan tersebut. Metode gravitasi citra satelit telah banyak dimanfaatkan untuk pencarian berbagai sumberdaya alam seperti bauksit, seng, batubara, dan bijih-bijih logam lainnya yang sulit dieksplorasi menggunakan metode geofisika akibat kendala alam yang ekstrim atau tidak memungkinkan. Dengan menggunakan data gravitasi citra satelit, proses akuisisi data dapat menjangkau kawasan yang sangat luas dengan durasi waktu yang singkat [8]. Pertimbangan lain pemanfaatan data anomali gravitasi citra satelit adalah biaya yang relatif murah daripada akuisisi data secara langsung dengan biaya puluhan hingga ratusan juta rupiah. Data anomali gravitasi citra satelit juga relatif cukup baik digunakan untuk memodelkan struktur geologi gunungapi, cekungan air tanah, dan sumberdaya alam lain [9]. Oleh karena itu metode gravitasi citra satelit cocok diterapkan untuk tujuan penelitian ini sebab kondisi topografi kawasan Dieng cukup ekstrim dan tidak semua bagian dapat dilalui oleh manusia. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi sumber informasi terkait sumber panasbumi di daerah Dieng bagi pemerintah dan instansi terkait sehingga dapat dikelola secara maksimal.

LANDASAN TEORI

A. Metode Gravitasi

Konsep dasar metode gravitasi yang mendasari eksplorasi geofisika adalah Hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara dua titik massa. Besar gaya antara dua titik massa m_1 dan m_2 yang terpisah pada jarak r dapat dinyatakan dengan persamaan [10]:

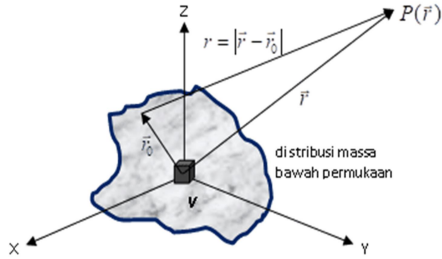
$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

G adalah konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$). Telford *et.al.* [10] telah menjabarkan Hukum Newton seperti persamaan (1) untuk mendapatkan nilai potensial gravitasi di suatu titik P yang berada di luar volume V seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** yang dapat dinyatakan sebagai [10]:

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

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 [10].

Jika integral volume persamaan (2) diterapkan untuk seluruh volume bumi, maka dapat diperoleh potensial gravitasi pada permukaan bumi. Sedangkan kuat medan gravitasi diperoleh dengan cara mendiferensialkan potensial gravitasi tersebut hingga menjadi [10]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = |-\nabla U_P(\vec{r})| \quad (3)$$

Nilai medan gravitasi bumi (E) pada persamaan (3) sering disebut sebagai percepatan gravitasi bumi (g). Berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (3), nilai percepatan gravitasi bumi dapat dinyatakan dengan persamaan [10]:

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

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

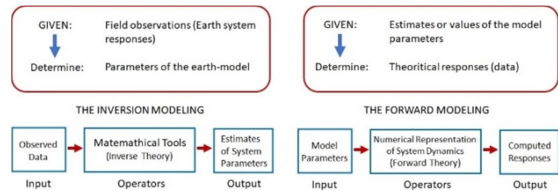
Persamaan (5) menunjukkan bahwa nilai medan gravitasi di permukaan bumi bervariasi. Variasi medan gravitasi bumi ini dipengaruhi oleh bujur, lintang, elevasi, dan distribusi massa bawah permukaan bumi yang dinyatakan sebagai fungsi rapat massa batuan bawah permukaan [10].

B. Pemodelan Inversi-3D

Umumnya peneliti mengharapkan agar data geofisika hasil akuisisi (akses) di lapangan memberikan informasi sebanyak mungkin, tidak hanya berkaitan sifat-sifat fisis batuan, namun juga kondisi geometri batuan bawah permukaan, posisi, dan kedalaman batuan itu. Informasi tersebut dapat diperoleh jika hubungan (*relation*) antara sifat-sifat fisis batuan dengan

data hasil observasi bisa diketahui. Relasi antara keduanya hampir selalu berbentuk persamaan matematis yang biasanya disebut sebagai model matematis. Berdasarkan model matematis ini, parameter-parameter fisis batuan bisa diekstrak dari data hasil observasi [11]. Proses ini disebut pemodelan inversi (*inverse modelling*), seperti dapat dilihat pada **Gambar 3**. Oleh sebab itu pemodelan inversi bisa digunakan untuk membuat model geologi akibat medan gravitasi di daerah penelitian.

Proses sebaliknya, dimana peneliti ingin mendapatkan data perkiraan hasil observasi berdasarkan parameter fisis yang sudah diketahui disebut sebagai pemodelan maju (*forward modelling*) [11]. Pemodelan maju digunakan untuk melihat respon medan gravitasi yang ditimbulkan dari model geologi yang dibuat. Oleh karena itu, pemodelan maju adalah suatu pemodelan untuk menjabarkan data dari model yang dibuat dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomali. Kedua jenis pemodelan tersebut mempunyai tujuan untuk memperkirakan model benda bawah permukaan berdasarkan data observasi seperti terlihat pada **Gambar 3**. Namun demikian pada penelitian ini metode pemodelan yang diterapkan adalah pemodelan inversi.



Gambar 3. Alur pengolahan data menggunakan pemodelan inversi (*inverse modeling*) dan pemodelan maju (*forward modeling*) [11].

C. Geologi Daerah Penelitian

Dalam pembentukan pegunungan Dieng, ada tiga episode yaitu formasi pra-kaldera, kaldera, dan aktivitas gunungapi. Pada episode pra-kaldera, material piroklastik Gunung Rogo Jembangan menutupi daerah utara dan selatan kompleks, yang kemungkinan terbentuk pada masa kuartar bawah. Kawah Tlrep yang berada di batas timur terbuka ke arah selatan membentuk struktur *dome* berkomposisi *hornblende* andesit. Sedangkan Kawah Prau terbuka ke arah utara dari Tlrep dan menghasilkan endapan piroklastik dan lava andesit basaltik. Pada fase awal ini terjadi letusan besar dari Gunungapi Dieng yang

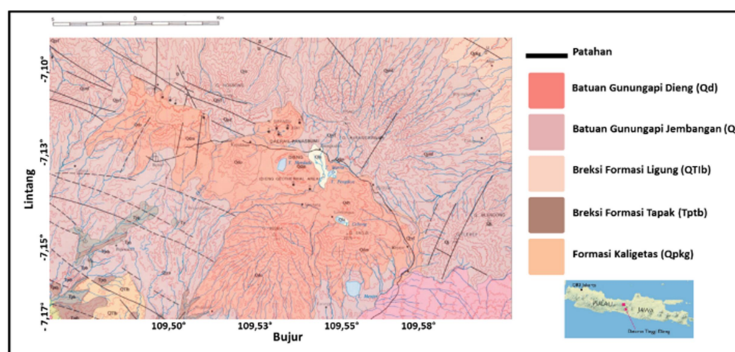
menimbulkan Depresi Batur sebagai kaldera raksasa Dataran Tinggi Dieng. Sisa morfologi yang paling terlihat adalah dengan adanya morfologi Gunung Prau sebagai salah satu dinding dari kaldera tersebut [12].

Sedangkan episode kedua merupakan aktivitas vulkanik yang berkembang di dalam kaldera tersebut. Di antaranya adalah munculnya Gunung Bisma, dengan kawah tertua yang terpotong membuka ke arah barat. Kemudian Gunung Seroja dengan umur yang lebih muda dengan tingkat erosi *selope* yang kurang kuat, serta Gunung Nagasari yang merupakan gunungapi komposit dan berkembang dari utara ke selatan di kawasan Dieng, Kecamatan Batur [12]. Adapun pada episode ketiga adalah fase aktivitas gunungapi yang menghasilkan lava andesit biotit, jatuhnya material piroklastik, dan aktivitas hidrotermal. Ada sembilan titik erupsi di Kaldera Dieng yang menghasilkan lava *dome* dan lava *flow* biotit andesit, seperti di Kawah Sikidang dan Legetang, Pakuwaja, Sikunang, *Dome* Perambanan dan lainnya [12].

Menurut Condon *dkk.* [13], stratigrafi Komplek Gunungapi Dieng dapat diurutkan sebagai berikut:

1. Batuan Gunungapi Dieng (Qd) berupa lava andesit dan andesit kuarsa, serta batuan klastik gunungapi.
2. Batuan Gunungapi Jembangan (Qj) berupa lava andesit dan batuan klastik gunungapi terutama andesit hipersten-augit setempat mengandung hornblende dan juga basalt olivin berupa aliran lava, breksi aliran dan piroklastik, lahar dan *alluvium*.
3. Breksi Formasi Ligung (QTlb) berupa breksi gunungapi (konglomerat) bersusun andesit, lava andesit hornblende dan tuff yang merupakan bagian atas Formasi Ligung.
4. Breksi Formasi Tapak (Tptb) berupa breksi gunungapi dan batu pasir tuff breksi bersusun andesit mengandung batupasir tumbuhan di beberapa tempat mengandung sisa tumbuhan.
5. Formasi Kaligetas (Qpkg) berupa breksi vulkanik, aliran lava, tuff, batupasir tuff dan batuan lempungan, breksi aliran dengan sisipan lava dan tuff halus sampai kasar, di bagian bawahnya ditemukan batu lempung.

Secara visual stratigrafi Komplek Gunungapi Dieng dapat dilihat pada peta geologi seperti **Gambar 4**.



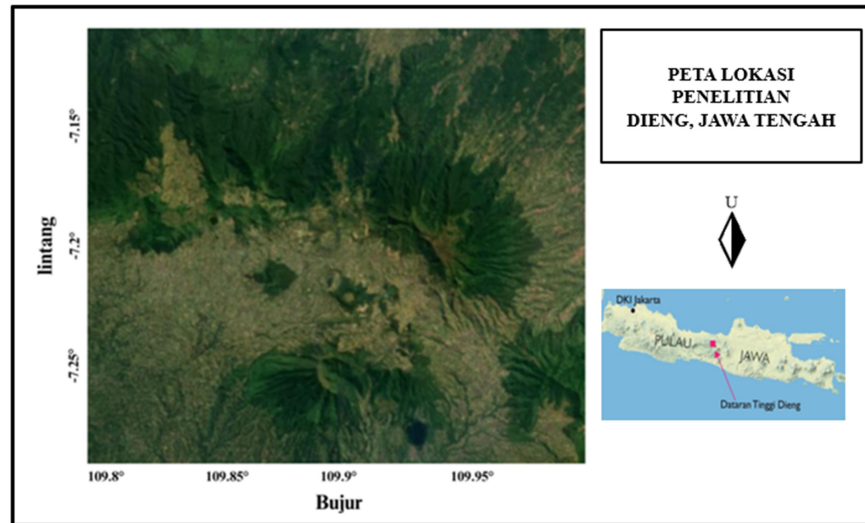
Gambar 4. Peta geologi Komplek Gunungapi Dieng (sumber: Peta Geologi Lembar Banjarnegara-Pekalongan) [13].

METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Purwokerto. Data penelitian merupakan data anomali gravitasi citra satelit GGMplus di kawasan manifestasi panasbumi Dieng Jawa Tengah dengan batas koordinat geografis $109,8^{\circ}$ – $110,3^{\circ}$ BT dan $7,12^{\circ}$ - $7,28^{\circ}$ LS seperti terlihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Peta lokasi Komplek Gunungapi Dieng (sumber: Google Earth).

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian meliputi laptop yang dilengkapi perangkat lunak seperti aplikasi Microsoft Excel 2019, Gravity 900, dan Fortran 77 untuk pengolahan data, Surfer 17 untuk membuat peta kontur daerah penelitian, Grablox 1.7 dan Bloxer 1.6e untuk pemodelan inversi 3D. Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gravity disturbance dari GGMplus yang diakses melalui website:

<https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/> yang dilengkapi dengan data posisi geografis (bujur, lintang, dan elevasi) serta geoid [14].

C. Prosedur Penelitian

Data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) diperoleh setelah diterapkan koreksi bouguer dan koreksi terrain terhadap data gravity disturbance yang nilainya setara dengan data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas atau free air anomaly (FAA) [15]. Data FAA yang diperoleh masih tersebar di permukaan topografi, yang secara matematis dapat dituliskan $\Delta g(\lambda, \vartheta, h)$. Untuk pengolahan data pada tahap berikutnya, data FAA ini harus direduksi menuju bidang datar. Metode yang digunakan untuk mereduksi data FAA adalah pendekatan Deret Taylor dengan persamaan [16]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i+1]} = \Delta g(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h-h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial h^n} \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i]} \quad (6)$$

Berdasarkan persamaan (6), $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang terdistribusi di bidang datar dapat diestimasi melalui pendekatan, yaitu nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari proses iterasi ke- i digunakan untuk memperoleh $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada iterasi ke $(i+1)$, demikian seterusnya. Proses iterasi dilakukan secukupnya, sedemikian hingga nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh telah konvergen [16]. Data $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari persamaan (6) belum bersih dari efek anomali regional. Oleh sebab itu data tersebut harus dibersihkan dari efek anomali regional. Data anomali regional dapat diperoleh melalui pengangkatan data (upward continuation) hingga ketinggian tertentu. Proses ini berfungsi sebagai filter tapis rendah (low pass filter), dimana data anomali diangkat sedemikian hingga perubahan closure anomali menunjukkan pola yang sangat halus dengan interval nilai yang sangat kecil. Persamaan upward continuation bisa dituliskan sebagai [16]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) = \frac{\Delta h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{[(\lambda - \lambda')^2 + (\vartheta - \vartheta')^2 + \Delta h^2]^3}} d\lambda' d\vartheta' \quad (7)$$

Data yang diperoleh, selanjutnya dikoreksikan terhadap data $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ dari persamaan (6), sehingga diperoleh data ABL residual dengan persamaan [17]:

$$\Delta g_{res}(\lambda, \vartheta, h_0) = \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0) - \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) \quad (8)$$

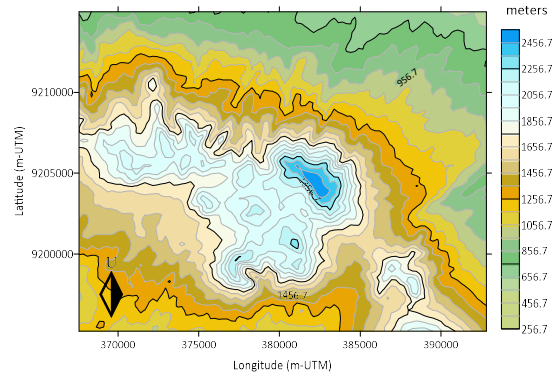
Data ABL residual merupakan data anomali gravitasi lokal yang telah bersih dari berbagai efek sumber anomali lain yang tidak menjadi target dalam penelitian dan diasumsikan hanya berasosiasi dengan sumber anomali lokal yang menjadi target penelitian. Data ABL residual yang diperoleh dapat langsung dimodelkan. Pada penelitian ini data ABL akan dimodelkan secara 3D untuk mengetahui lokasi dan kedalaman sumber panas bumi (geothermal reservoir) di Dataran Tinggi Dieng, Jawa Tengah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

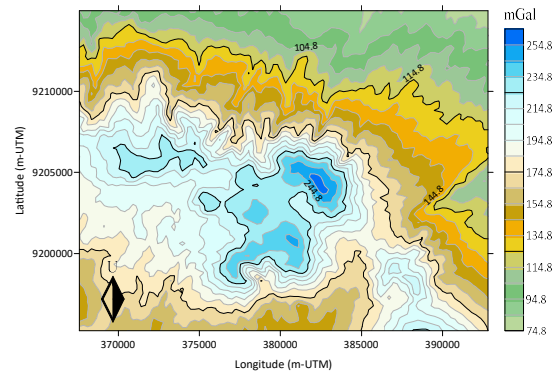
A. Hasil Pengaksesan dan Koreksi Data

Akuisisi data anomali gravitasi satelit telah diakses melalui website GGMplus berupa data posisi bujur, lintang, elevasi, *gravity disturbance* dan *geoid*. Hasil akuisisi data berjumlah 10.350 data dengan batas geografis seperti telah dijelaskan di bagian Metode Penelitian. Data anomali gravitasi yang telah terkoreksi udara bebas berkisar 74,8 – 258,3 mGal dan data elevasi daerah penelitian berkisar 256 – 2.548 m. Peta kontur topografi daerah penelitian dan peta anomali gravitasi *free-air* (FAA) ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**.

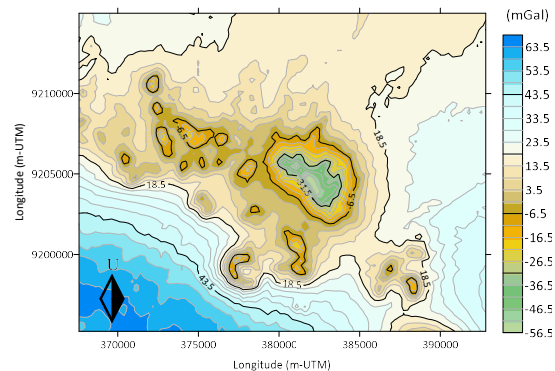
Data anomali gravitasi *free-air* ini, selanjutnya dikoreksi dengan koreksi *bouguer* dan *terrain* untuk mendapatkan data anomali *bouguer* lengkap (ABL). Koreksi *bouguer* ditujukan untuk memperhitungkan efek tarikan dari massa batuan yang terdapat pada bidang *datum* dengan asumsi memiliki jari-jari tak terhingga dengan ketebalan h (m) dan densitas ρ (g/cm^3), sehingga efek tarikan massa dari batuan dapat direduksi [18]. Perhitungan koreksi *bouguer* menggunakan Microsoft Excel. Sedangkan koreksi medan digunakan untuk mengurangi efek massa topografi di atas permukaan bumi yang relatif kasar akibat perbedaan elevasi yang besar seperti bukit dan lembah [18]. Perhitungan koreksi medan dilakukan dengan aplikasi Gravity 900. Data ABL daerah penelitian yang dihasilkan berkisar antara -56,6–65,7 mGal dengan peta kontur dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 6. Peta kontur topografi daerah penelitian.



Gambar 7. Peta kontur *free air anomaly* (FAA) daerah penelitian.

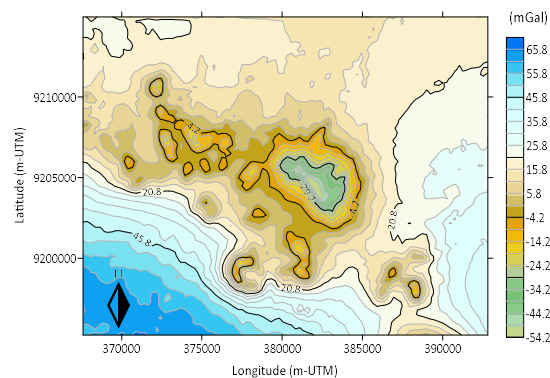


Gambar 7. Peta kontur ABL daerah penelitian.

B. Hasil Reduksi dan Pemisahan Data

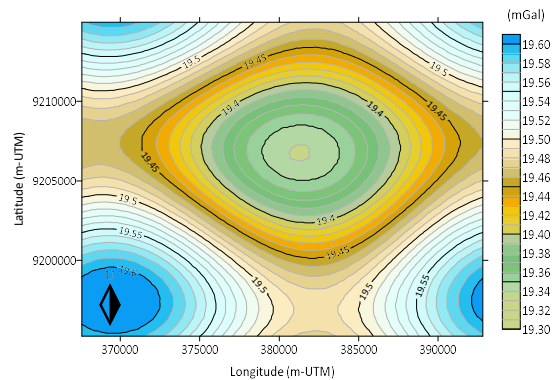
Data ABL yang masih tersebar di topografi (bidang tidak rata) harus direduksi menuju bidang datar. Reduksi ke bidang datar merupakan sebuah proses untuk mentransformasi data anomali gravitasi dari topografi ke suatu bidang datar dengan ketinggian yang sama. Reduksi data ke bidang datar bertujuan untuk mempermudah pengolahan data selanjutnya sebab data harus terdistribusi pada bidang datar [19]. Peta kontur

ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar (pada ketinggian rata-rata topografi; 1.392,35 m) ditunjukkan pada **Gambar 8** dengan nilai anomali berkisar -54,23 – 67,20 mGal.



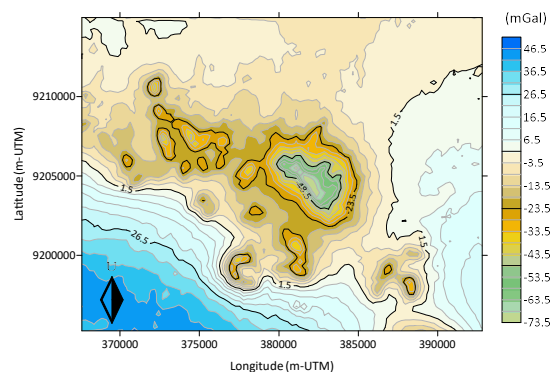
Gambar 8. Peta kontur ABL yang telah tereduksi ke bidang datar.

Data ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar masih merupakan superposisi antara data anomali regional dan data anomali lokal atau residual. Kedua anomali tersebut memiliki sifat yang berbeda dimana anomali regional bersifat halus dan bersumber atas batuan-batuan yang sangat dalam, adapun anomali residual bersifat kasar dan bersumber dari batuan-batuan yang dangkal. Pemisahan data anomali tersebut perlu dilakukan karena target penelitian ini adalah sumber anomali bawah permukaan yang bersifat lokal. Proses pemisahan data anomali regional - residual dilakukan menggunakan metode pengangkatan ke atas (*upward continuation*) terhadap data ABL [16]. Hasil analisis pola kontur anomali gravitasi setelah dilakukan pengangkatan data menunjukkan pada ketinggian 19.000 m pola kontur anomali telah relatif tetap dan halus, nilai anomali berkisar 19,339– 19,616 mGal dengan interval nilai anomali yang sangat kecil (0,2771 mGal). Pola kontur ini sudah tidak mengalami perubahan meskipun diangkat lagi pada ketinggian di atasnya, sehingga pada ketinggian tersebut dipilih sebagai data anomali gravitasi regional dengan peta kontur ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Peta kontur anomali gravitasi regional daerah penelitian.

Selanjutnya data ABL residual dapat diperoleh dari selisih data anomali gravitasi regional dengan data ABL yang telah terdistribusi pada bidang datar berdasarkan persamaan (8). Perhitungan menghasilkan data anomali residual dengan nilai berkisar -73,59 – 44,97 mGal dengan peta kontur residual ditunjukkan pada **Gambar 10**. Peta kontur ABL residual yang diperoleh memperlihatkan adanya kompleks anomali rendah (negatif) yang diperkirakan merupakan lokasi dapur magma Gunungapi Dieng. Sumber utama panasbumi di kawasan ini diperkirakan berasal dari proses magmatisme. Oleh sebab itu, lokasi dimana terjadi proses magmatisme, umumnya diikuti dengan terbentuknya sistem hidrotermal, dengan fluida utama adalah fluida magmatik dan meteorik.

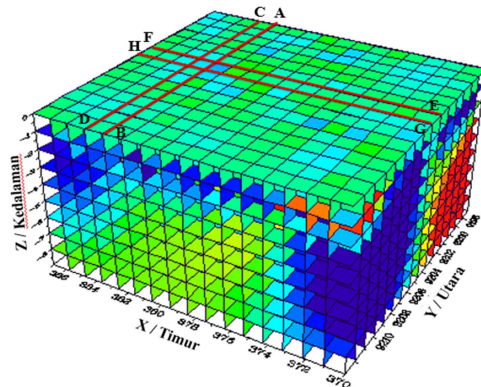


Gambar 10. Peta kontur ABL residual daerah penelitian.

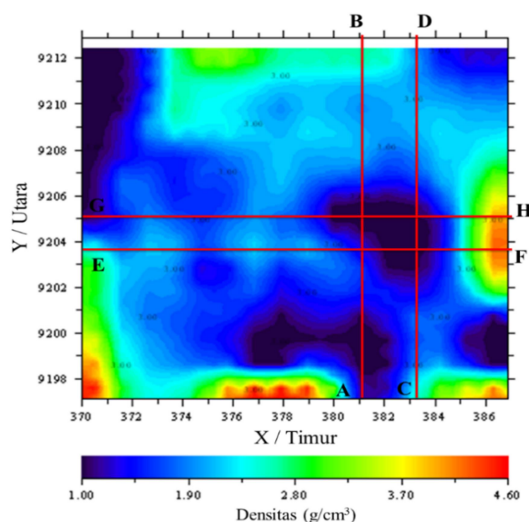
C. Hasil Pemodelan dan Interpretasi Data

Pemodelan inversi 3D struktur bawah permukaan daerah penelitian dilakukan menggunakan perangkat lunak *Grablox 1.7* dan *Bloxer 1.6* terhadap data ABL residual. Pemodelan ini menghasilkan bentuk anomali

bawah permukaan berupa susunan kubus-kubus kecil berdimensi $1 \times 1 \times 1 \text{ km}^3$ dengan ukuran $16 \times 15 \times 9 \text{ km}^3$. Luas wilayah pemodelan berkisar $16,86 \text{ km} \times 15,84 \text{ km}$ dengan kedalaman 9 km. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi daerah penelitian melalui nilai densitas hasil pemodelan berkisar $1,0 - 4,6 \text{ g/cm}^3$. Hasil pemodelan seperti **Gambar 11** menunjukkan bahwa daerah penelitian tersusun atas batuan dengan densitas dan kedalaman yang bervariasi. Nilai densitas rendah dengan kontur berwarna biru tua hingga kehijauan mendominasi kawasan ini dengan nilai berkisar $1,0 - 2,8 \text{ g/cm}^3$. Sayatan AB, CD, EF, dan GH pada model 3D dilakukan untuk tujuan interpretasi litologi. Posisi sayatan tersebut didasarkan atas lokasi sumber panasbumi (dapur magma) pada kedalaman 4 km seperti **Gambar 12**.



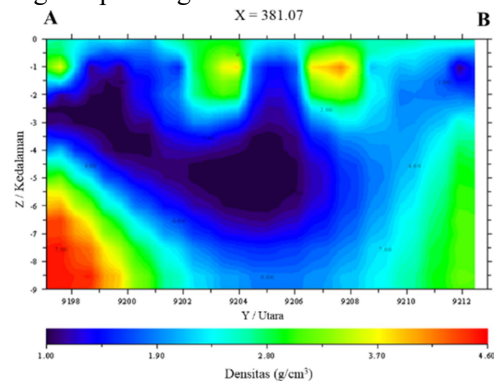
Gambar 11. Model 3D distribusi densitas batuan bawah permukaan di daerah penelitian.



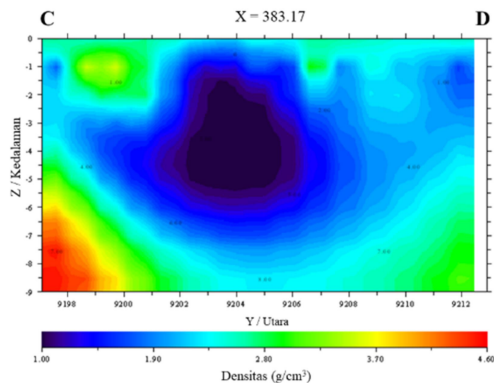
Gambar 12. Model 3D (dilihat dari atas) pada kedalaman 4 km; kontur berwarna biru tua dengan

nilai densitas kecil diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Dieng.

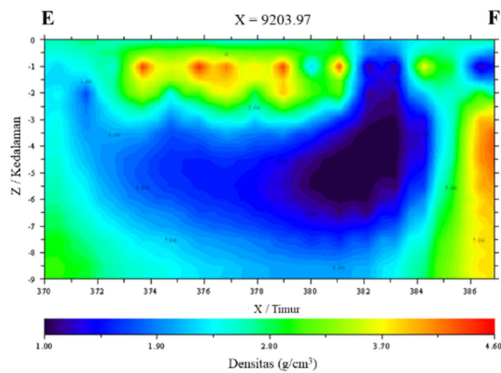
Sayatan-sayatan pada model 3D tersebut bertujuan untuk interpretasi litologi secara vertikal, sehingga lokasi dan posisi dapur magma serta reservoir panasbumi di daerah penelitian dapat diestimasi. Sayatan AB dan CD berupa sayatan sejajar dengan arah utara-selatan, sedangkan sayatan EF dan GH berupa sayatan yang sejajar dengan arah barat-timur. Seluruh sayatan melewati pusat *closure* anomali yang diperkirakan sebagai dapur magma Gunungapi Dieng seperti terlihat pada **Gambar 13** hingga **Gambar 16**. Blok batuan dengan nilai densitas paling rendah (warna biru tua) diinterpretasi sebagai dapur magma.



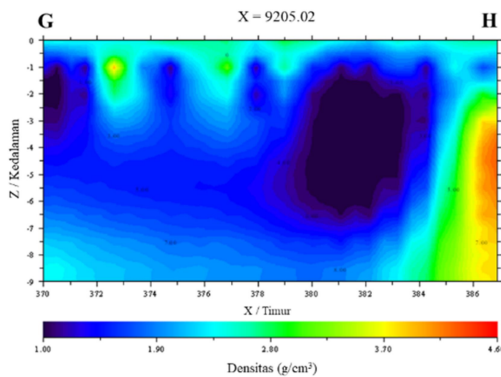
Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan AB.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan CD.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan EF.



Gambar 13. Model densitas batuan di sepanjang sayatan GH.

Hasil-hasil interpretasi struktur bawah permukaan daerah penelitian terhadap hasil-hasil pemodelan menunjukkan berbagai jenis batuan penyusun yang didominasi oleh batuan dengan densitas rendah. Batuan dengan densitas $1,00 - 1,90 \text{ g/cm}^3$ diperkirakan dalam fase cair dan diinterpretasi sebagai magma Gunungapi Dieng yang merupakan sumber panas dari sistem panasbumi (hidrotermal) di daerah ini. Batuan dengan densitas $1,90 - 2,80 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batuan lava andesit-basaltik hasil pembekuan lava masa lalu dan menjadi batas bagi dapur magma kompleks Gunungapi Dieng terhadap lingkungan sekitar. Sedangkan batuan dengan nilai densitas $2,80 - 3,70 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batuan dari Formasi Dieng dan Jembangan yang tersusun atas batuan lava andesit, batuan andesit kuarsa, batuan klastik gunungapi, *tuff*, batuan breksi gunungapi dan batuan lainnya [13].

D. Perkiraan Lokasi Reservoir Panasbumi

Sistem panasbumi di kawasan Dieng merupakan sistem panasbumi yang terbentuk pada lingkungan vulkanik dalam kaldera gunungapi.

Manifestasi panasbumi di kawasan Dieng muncul pada elevasi sekitar 2.000 m di atas permukaan laut yang didominasi oleh *steam-heated* seperti solfatera dengan endapan sulfur ekstensif, fumarol, *mud pots*, kolam lumpur, tanah teralterasi, dan tanah beruap. Berdasarkan data geologi, batuan bawah permukaan yang dijumpai di bawah permukaan didominasi oleh batuan lava andesitik-basaltik yang setempat terdapat perselingan dengan batuan piroklastik [5]. Batuan reservoir panasbumi diinterpretasi berada pada batuan lava andesit dan *tuff* yang menyusun produk vulkanik pada sistem panasbumi Dieng di bagian bawah. Batuan diorit dijumpai di bawah Gunung Pangonan-Merdada yang diperkirakan terkait dengan keberadaan sumber panas pada kedalaman yang lebih dalam [5].

Berdasarkan hasil-hasil pemodelan dan interpretasi yang didukung oleh informasi geologi, batuan dari Formasi Dieng dan Jembangan batuan lava andesit, batuan andesit kuarsa, batuan klastik gunungapi, *tuff*, batuan breksi gunungapi dan lainnya diperkirakan merupakan lokasi reservoir panasbumi. Sumber energi panas ini berasal dari magma yang berada di bawah lapisan batuan lava andesit-basaltik. Magma berperan sebagai sumber panasbumi, dimana panas dihantarkan secara konduksi menuju lapisan batuan di atasnya yang terisi fluida. Perpindahan panas secara konveksi juga terjadi pada fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan tersebut. Selanjutnya fluida hidrotermal ini bergerak ke atas, namun tidak sampai ke permukaan tanah akibat tertahan oleh lapisan batuan yang bersifat *impermeable*. Selama perjalanan, fluida hidrotermal dapat tersimpan pada suatu reservoir yang terletak di antara sumber panas (magma) dan kawasan tampungan panas [20]. Sebagian fluida termal muncul di permukaan dalam bentuk manifestasi panasbumi melalui struktur geologi seperti sesar yang banyak dijumpai di kawasan Dataran Tinggi Dieng [5].

Hasil-hasil pemodelan dan interpretasi terhadap data ABL residual mengindikasikan bahwa lapisan reservoir panasbumi di kawasan Dieng tersebar secara acak dan merata di dalam batuan lava andesit dan *tuff* di seluruh kaldera. Hal ini sesuai dengan hasil pemodelan 3D dapur magma di kawasan Dieng yang sangat luas dan dalam. Keberadaan magma yang masih aktif (ditandai dengan densitas yang sangat rendah) memicu terjadinya erupsi sehingga muncul banyak kawah vulkanik di kawasan Dieng.

Kawasan Dieng masih menyisakan belasan kawah aktif yang terbesar di tiga kabupaten. Pos Pengamatan Gunungapi Dieng mencatat, bahwa di Wonosobo ada kawah Pakuwaja dan Sikendang, di Batang terdapat Kawah Gerlang, Wanapriya, Wanasida, Sibanger dan Siglah. Adapun kawah paling banyak adalah di Banjarnegara, meliputi kawah Sinila, Timbang, Candradimuka, Sileri, Pager Kandang, Sikidang, Bitingan, dan Sibanteng [21]. Hasil penelitian juga didukung oleh data magnetotelurik (MT) yang menunjukkan kawasan Dieng merupakan suatu depresi yang di bawahnya terdapat sumber panasbumi [5].

KESIMPULAN

Penelitian dengan memanfaatkan data gravitasi citra satelit GGMplus untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan reservoir panasbumi di kawasan Dataran Tinggi Dieng telah berhasil dilakukan. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, meliputi pengaksesan data, koreksi *bougeur*, koreksi terrain, reduksi data ke bidang datar, pemisahan data anomali regional dan residual, pemodelan inversi, serta interpretasi. Data anomali gravitasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah data GGMplus dengan batas-batas koordinat geografis $109,8^{\circ}$ – $110,3^{\circ}$ BT dan $7,12^{\circ}$ – $7,28^{\circ}$ LS. Setelah diperoleh data, kemudian dilakukan koreksi *bougeur* dan *terrain* untuk mendapatkan data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) dengan nilai berkisar $-56,6$ – $65,7$ mGal. Reduksi ke bidang datar dan pemisahan data anomali regional-residual terhadap data ABL diterapkan sehingga diperoleh data ABL residual dengan nilai berkisar $-73,59$ – $47,60$ mGal. Data anomali ini tersebar pada ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian ($1.392,35$ m). Pemodelan pada penelitian ini dilakukan secara inversi 3D terhadap data ABL residual. Hasil pemodelan berupa model anomali bawah permukaan dengan densitas batuan berkisar $1,00$ – $4,60$ g/cm³ yang diinterpretasi sebagai struktur geologi bawah permukaan Dataran Tinggi Dieng. Hasil interpretasi menunjukkan bahwa reservoir panasbumi terletak pada batuan lava andesit dengan densitas total berkisar $2,80$ – $3,70$ g/cm³.

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 Saudari Aina Zahra Ikhwana, S.Si. yang berkenan membantu memberikan tutorial pemodelan inversi 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.B Hamilton, *Tectonics of The Indonesian Region*. US Government Printing Office. USA, 1979.
- [2] H. Meilani, dan W. Wuryandani, "Potensi Panasbumi sebagai Energi Alternatif Pengganti Bahan Bakar Fosil untuk Pembangkit Tenaga Listrik di Indonesia", *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, vol. 1 no. 1, pp. 47 – 74, 2010.
- [3] M.A.I. Wardoyo, R. Prayuda, Y. Susena, F.A.W. Baradi, A. Ashari, F. Imamah, 2020, "Geomorphological Hazard at Some Area of The Outer Dieng Volcanic Complex Post Explosive Eruption Era", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* **884** 012007, 2021.
- [4] T. Winarno, J. Marin, *Buku Ajar Mineralogi*. Lembaga Pengembangan dan Penjaminan Mutu Pendidikan, Universitas Diponegoro, Semarang, 2020.
- [5] I.P. Haty, D.F. Yudiantoro, S.U. Choiriah, A. Putri, E. Magdalena, *Geologi dan Potensi Panas Bumi di Kompleks Vulkanik Dieng*. Buku. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, 2021.
- [6] H. Haluk, "Pengaruh Permeabilitas Reservoir terhadap Pembentukan Lapangan Panasbumi", *Journal of Information Science and Thecnology*, vol. 6, no. 2, hal. 94 – 97, 2014.
- [7] T.M. Yudistian, F. Hendrasto, Y. Yunis, "Penentuan Top Reservoir Panas Bumi Daerah Tulehu Berdasarkan Pemodelan 3D Menggunakan Data Geokimia, Log Pada Sumur X dan Interpretasi Data Magnetotellurik (MT)", *Journal of*

- Geosciences Engineering & Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 104 – 115, 2023.
- [8] Sehah, 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. 7, no. 1, p. 01 – 07, 2023.
- [9] D.T. Sandwell and H.F. Smith, "Global Marine Gravity from Retracked Geosat and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation Versus Spreading Rate", *Journal of Geophysical Research*, vol. 114 (B1), p. 1 – 18, 2009.
- [10] W.M. Telford, L.P. Gedaart, R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*. Cambridge. New York, 1990.
- [11] Supriyanto, *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia. Depok. Indonesia, 2007.
- [12] Anonim, *Kajian Geopark Kawasan Dieng*. Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Wonosobo. Wonosobo. Indonesia, 2016.
- [13] W.H. Condon, L. Pardyanto, K.B. Ketner, T.C. Amin, S. Gafoer, dan H. Samodra, *Peta Geologi Lembar Banjarnegara dan Pekalongan*. Edisi kedua. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G). Bandung, 1996.
- [14] 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, no. 16, p. 4279 – 4283, 2013.
- [15] A.D. Maulana dan D.A. Prasetyo, "Analisa Matematis pada Koreksi Bouguer dan Koreksi Medan Data Gravitasi Satelit Topex dalam Penentuan Kondisi Geologi Studi Kasus Sesar Palu Koro Sulawesi Tengah", *Jurnal Geosaintek*, vol. 5, no. 3, p. 91 – 100, 2019.
- [16] Blakely RJ. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. USA.
- [17] Sehah, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, L. Ariska, "Power Spectrum Analysis of the Satellite Gravity Anomalies Data to Estimate the Thickness of Sediment Deposits in the Purwokerto-Purbalingga Groundwater Basin", *Advances in Physics Research*, vol. 5, p. 109-117, 2022.
- [18] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. USA, 1997.
- [19] Sehah, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, "Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit untuk Interpretasi Kualitatif Batas Cekungan Air Tanah Purwokerto-Purbalingga", *Prosiding Seminar Nasional dan Call for Papers: Pengembangan Sumber Daya Perdesaan dan Kearifan Lokal Berkelanjutan XI*, 12-14 Oktober 2021. Purwokerto, 2022.
- [20] A. Basid, N. Andriani, S. Arfiyaningsih, "Pendugaan Reservoir Sistem Panas Bumi dengan Menggunakan Survey Geolistrik Resistivitas dan Self Potensial", *Jurnal Neutrino*, vol. 7, no. 1 Oktober 2014, hal. 57 – 70, 2014.
- [21] L. Darmawan, *Menyibak Evolusi Geologi Dataran Tinggi Dieng*. Mongabay: Situs Berita Lingkungan, 2020. Website: <https://www.mongabay.co.id/2020/04/25/menyibak-evolusi-geologi-dataran-tinggi-dieng/> [Diakses: 22 April 2024]