

Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Bajawa dan Sekitarnya Menggunakan Metode Gravitasi

Teti Amalia Novianti, Radhitya Perdhana*, Zulfian

*Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura
Jl. Prof. Dr. Hadari Nawawi, Bansir Laut, Pontianak Tenggara, Kalimantan Barat*

**email:radhitya.perdhana@physics.untan.ac.id*

Abstrak – Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan sistem panas bumi di daerah Bajawa, Nusa Tenggara Timur, menggunakan metode gravitasi berbasis data satelit GGMplus 2013. Analisis dilakukan terhadap data anomali Bouguer lengkap yang telah dikoreksi dan dipisahkan menjadi komponen regional dan residual menggunakan filter Butterworth. Pemodelan 3D dan sayatan penampang 2D dilakukan pada anomali regional, memiliki variasi densitas antara $1,9 - 3,5 \text{ g/cm}^3$, rentang nilai anomali regional $92-138 \text{ mGal}$ dan kedalaman hingga $4,43 \text{ km}$. Berdasarkan hasil analisis sebaran nilai densitas batuan, teridentifikasi dugaan formasi-formasi batuan sebagai sistem panas bumi seperti keberadaan reservoir dari formasi Nangapanda (Np) dengan densitas berkisar antara $1,9 - 2,66 \text{ g/cm}^3$, batuan penudung dari formasi Aimere Scoria (As), Andesit Sasa (Ss), Andesit Inie Lika (Ik), Andesit Mataloko (Mk), Andesit Bobo (Bb) dan Andesit Siutoro (Si), Inerie Basalt (Ie), Wabela Basalt (Wa), Deposit Lahar (Lh) dan Tuf Welas (Wt) dengan densitas berkisar antara $2,49 - 2,8 \text{ g/cm}^3$ dan sumber panas dari Basal Maumbawa (Mb) dengan densitas berkisar antara $2,7 - 3,5 \text{ g/cm}^3$ dan Andesit Wangka (Wn) dengan densitas berkisar antara $1,9 - 2,9 \text{ g/cm}^3$. Temuan ini memperkuat indikasi wilayah Bajawa dan sekitarnya dapat menjadi wilayah prospek potensi sistem panas bumi.

Kata kunci: Gravitasi, Panas bumi, Bajawa, Struktur bawah permukaan, Anomali Bouguer, Grablox

Abstract – This study aims to identify the subsurface structure of geothermal systems in the Bajawa area, East Nusa Tenggara, using gravity methods based on GGMplus 2013 satellite data. The analysis was conducted on complete Bouguer anomaly data that had been corrected and separated into regional and residual components using Butterworth filters. 3D modeling and 2D cross-section incisions were performed on regional anomalies, having density variations between $1.9 - 3.5 \text{ g/cm}^3$, a range of regional anomaly values of $92-138 \text{ mGal}$ and depths up to 4.43 km . Based on the results of the analysis of the distribution of rock density values, suspected rock formations as geothermal systems such as the presence of reservoirs from the Nangapanda formation (Np) with densities ranging from $1.9 - 2.66 \text{ g/cm}^3$, host rocks from the Aimere Scoria formation (As), Andesite Sasa (Ss), Andesite Inie Lika (Ik), Andesite Mataloko (Mk), Andesite Bobo (Bb) and Andesite Siutoro (Si), Inerie Basalt (Ie), Wabela Basalt (Wa), Lahar Deposit (Lh) and Tuf Welas (Wt) with densities ranging from $2.49 - 2.8 \text{ g/cm}^3$ and heat sources from Maumbawa Basalt (Mb) with densities ranging from $2.7 - 3.5 \text{ g/cm}^3$ and Andesite Wangka (Wn) with densities ranging from $1.9 - 2.9 \text{ g/cm}^3$. This finding strengthens the indication that the Bajawa area and its surroundings could be a potential prospect area for geothermal systems.

Key words: Gravity, Geothermal, Bajawa, Subsurface structure, Bouguer anomaly, Grablox

PENDAHULUAN

Indonesia, melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, telah menetapkan target porsi energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 23% dalam bauran energi primer nasional pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 31% pada tahun 2050 [1]. Target ini sejalan dengan komitmen Indonesia

dalam mengurangi emisi karbon dan mendorong transisi menuju energi bersih dan ramah lingkungan sesuai dengan tujuan Pembangunan Berkelanjutan Sustainable Development Goals (SDGs) No. 7, yaitu “Energi Bersih dan Terjangkau” [2]. Undang-Undang No. 21 Tahun 2014, panas bumi merupakan sumber daya alam terbarukan, energi ramah lingkungan, sehingga

dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil [3].

Beberapa penelitian terdahulu mendukung potensi panas bumi di Bajawa yang dikontrol oleh sesar dan aktivitas vulkanik Kuartar. Wilayah ini berada di jalur busur vulkanik Sunda–Banda yang aktif secara tektonik maupun magmatik. Manifestasi panas bumi di Bajawa berupa mata air panas, fumarol, tanah hangat, dan endapan belerang yang menunjukkan adanya sistem hidrotermal aktif. Secara geologi, daerah Bajawa tersusun oleh satuan batuan vulkanik Kuartar seperti andesit, basalt, tuf, serta produk vulkanik gunung api Inelika dan Inerie. Struktur geologi berupa sesar dan rekahan berperan penting dalam migrasi fluida panas bumi dari kedalaman menuju permukaan [4].

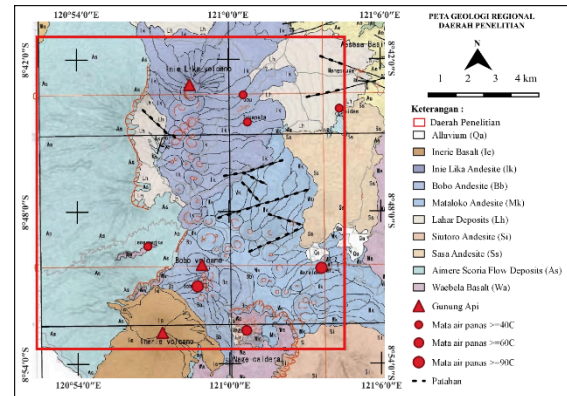
Identifikasi zona alterasi hidrotermal yang berasosiasi dengan manifestasi panas bumi telah dilakukan menggunakan penginderaan jauh [5]. Hasil survei Badan Geologi juga menunjukkan adanya indikasi reservoir yang cukup signifikan di wilayah ini. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada aspek permukaan, sehingga informasi struktur bawah permukaan masih terbatas.

Metode geofisika, khususnya gravitasi, telah banyak digunakan pada eksplorasi panas bumi. Prinsip metode ini adalah mengukur variasi percepatan gravitasi akibat perbedaan densitas batuan bawah permukaan. Variasi tersebut terekam sebagai anomali Bouguer, yang diperoleh setelah melakukan koreksi terhadap topografi dan densitas rata-rata batuan [6]. Pemisahan anomali menjadi komponen regional dan residual penting dilakukan untuk membedakan struktur dalam dan struktur dangkal yang berhubungan dengan sistem panas bumi. Metode filter, seperti Butterworth filter, umum digunakan dalam proses ini.

Pemodelan gravitasi 2D dan 3D selanjutnya dilakukan untuk memperkirakan distribusi densitas bawah permukaan. Pemodelan 2D menggambarkan penampang densitas sepanjang lintasan, sementara pemodelan 3D menyajikan gambaran volumetrik distribusi densitas secara keseluruhan. Hasil pemodelan ini kemudian dikorelasikan dengan data geologi untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir, batuan penudung, maupun sumber panas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan daerah prospek panas bumi

Bajawa dan sekitarnya menggunakan analisis anomali regional serta pemodelan gravitasi 2D dan 3D. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai sistem panas bumi Bajawa sekaligus mendukung upaya eksplorasi energi baru terbarukan di Nusa Tenggara Timur.



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian [4]

LANDASAN TEORI

A. Teori Gravitasi Newton

Dasar yang mendasari metode gravitasi diringkas dalam dua hukum yang diturunkan oleh Sir Isaac Newton, yang ia jelaskan dalam *Principia Mathematica* (1687) yaitu Hukum Gravitasi Universal dan Hukum Gerak Kedua. Hukum pertama dari kedua hukum ini menyatakan bahwa gaya tarik-menarik antara dua benda bermassa yang diketahui berbanding lurus dengan perkalian kedua massa tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat massanya (Persamaan 1). Akibatnya, semakin besar jarak yang memisahkan pusat-pusat massa, semakin kecil gaya tarik-menarik diantara keduanya.

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

Hukum gerak Newton menyatakan bahwa gaya ($\mathbf{F}$) sama dengan massa (m) dikali percepatan ($\mathbf{a}$). Jika percepatan dalam arah vertikal, maka percepatannya dikarenakan gravitasi sehingga menjadi percepatan gravitasi ($\mathbf{a}_G$).

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_G$$

samaan (1) dan (2) dapat digabungkan untuk mendapatkan hubungan sederhana lainnya:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} = m \times a_G; \quad a_G = G \frac{M}{r^2}$$

Dimana konstanta gravitasi (G) = $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$. Pada persamaan (3) menunjukkan bahwa besarnya percepatan gravitasi bumi (a_G) berbanding lurus dengan massa bumi (M) dan berbanding terbalik dengan kuadrat jari-jari bumi (r).

Satuan percepatan gravitasi dalam sistem MKS adalah m/s^2 dan dalam sistem CGS adalah cm/s^2 . Pengukuran percepatan gravitasi pertama dilakukan oleh Galileo dalam eksperimennya di Pisa Italia, sehingga untuk menghormati Galileo satuan percepatan gravitasi didefinisikan sebagai berikut [7]:

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-3} \text{ cm/s}^2$$

B. Pemodelan Gravitasi (2D dan 3D)

Dalam pemodelan gaya berat secara umum dibedakan ke dalam dua cara, yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*). Prinsip umum dari kedua pemodelan ini adalah meminimalkan selisih anomali perhitungan dengan anomali pengamatan, melalui metode kuadrat terkecil (*least square*), teknik matematika tertentu, baik linier atau non linier dan menerapkan batasan-batasan untuk mengurangi ambiguitas.

Proses inversi pada Grablox dilakukan dengan metode optimasi. Terdapat tiga jenis optimasi utama [8], yaitu:

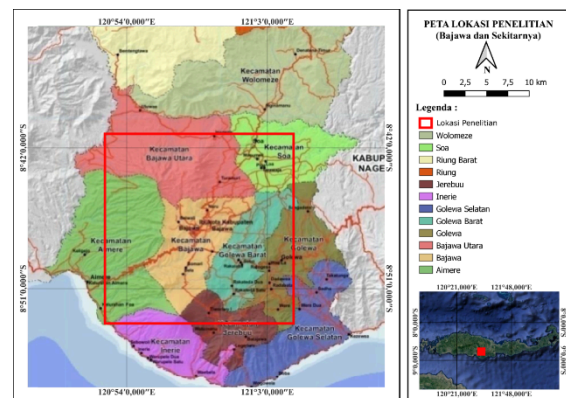
1. *Base optimization*, mengoptimalkan koefisien anomali dasar.
2. *Density optimization*, mengoptimalkan nilai densitas blok menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD).
3. *Occam density optimization*, menyeimbangkan antara ketidakcocokan data (misfit) dengan kekasaran model, sehingga dihasilkan model yang halus dan realistis.

Hasil akhir pemodelan gravitasi berupa distribusi densitas bawah permukaan yang dapat dikorelasikan dengan geologi regional. Dalam konteks panas bumi, densitas rendah umumnya mengindikasikan keberadaan reservoir, densitas menengah-tinggi sebagai lapisan penudung, dan densitas tinggi mengarah pada intrusi magma yang berperan sebagai sumber panas.

METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Daerah penelitian berada di Kabupaten Ngada, Nusa Tenggara Timur tepatnya pada daerah Bajawa dan sekitarnya. Identifikasi struktur bawah permukaan daerah potensi panas bumi Bajawa dan sekitarnya menggunakan data gravitasi terletak pada batas koordinat $8^{\circ}41,313' \text{ LS} - 8^{\circ}53,313' \text{ LS}$ dan $120^{\circ}52.39602' \text{ BT} - 121^{\circ}4.39602' \text{ BT}$, dengan cakupan luas lokasi penelitian $\pm 483,69 \text{ km}^2$.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

B. Data dan Peralatan Penelitian

Tabel 1. Data dan peralatan

No	Data dan Peralatan
1	Data <i>gravity disturbance</i> (.dg) yang diunduh dari https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/data/ , diperoleh 10.000 data [9].
2	Data <i>Digital Elevation Model</i> (DEM) diunduh dari https://curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/data/ , diperoleh 10.000 data [10].
3	<i>Geological map and geological cross sections of the Bajawa, central Flores, Indonesia</i> [4].
4	Laptop
5	Software (MATLAB, Ms. Excel, Ms. Word, Notepad, Quantum GIS (QGIS), Global Mapper, Geosoft Oasis Montaj, Surfer, Grablox dan Bloxer).

C. Prosedur penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Tahap awal adalah studi literatur yang bertujuan mengumpulkan informasi mengenai kondisi geologi regional, aktivitas tektonik, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan daerah

penelitian. Informasi ini menjadi dasar dalam interpretasi hasil analisis geofisika.

Selanjutnya dilakukan pengumpulan data berupa:

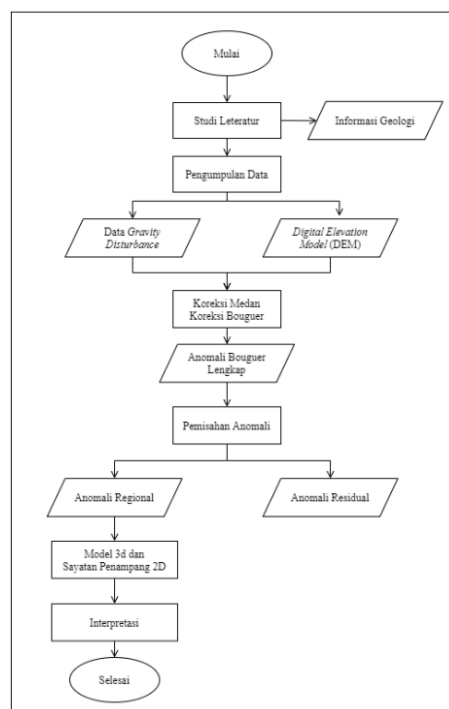
1. Data *gravity disturbance* yang diperoleh dari *Global Gravity Model Plus* (GGMplus) sekitar 220 m. Data ini dipilih karena memiliki cakupan global dengan ketelitian yang baik untuk studi regional.
2. Data *Digital Elevation Model* (DEM) yang digunakan untuk koreksi topografi serta pembuatan peta morfologi daerah penelitian.
3. Informasi geologi dari peta geologi lembar Bajawa dan publikasi terdahulu sebagai pendukung interpretasi.

Tahap berikutnya adalah koreksi data gravitasi yang meliputi koreksi medan dan koreksi bouguer. Hasil dari tahap ini berupa anomali bouguer lengkap yang merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan setelah mempertimbangkan pengaruh topografi dan densitas rata-rata batuan.

Kemudian dilakukan pemisahan anomali menjadi anomali regional dan anomali residual. Pemisahan dilakukan dengan metode analisis spektrum menggunakan *Butterworth filter*. Anomali regional menggambarkan struktur geologi dalam, sedangkan anomali residual merepresentasikan struktur dangkal yang berhubungan dengan sistem panas bumi.

Hasil anomali regional kemudian digunakan sebagai input untuk pemodelan gravitasi 3D. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak Grablox, yang menggunakan metode inversi untuk meminimalkan selisih antara data hasil observasi dan respon model. Dari model 3D ini dihasilkan sayatan penampang 2D untuk melihat variasi densitas secara lateral maupun vertikal.

Tahap akhir adalah interpretasi, yaitu mengintegrasikan hasil pemodelan gravitasi dengan informasi geologi regional. Interpretasi difokuskan pada identifikasi zona dengan densitas rendah sebagai indikasi reservoir panas bumi, densitas menengah sebagai batuan penudung, serta densitas tinggi sebagai intrusi magma yang berperan sebagai sumber panas.



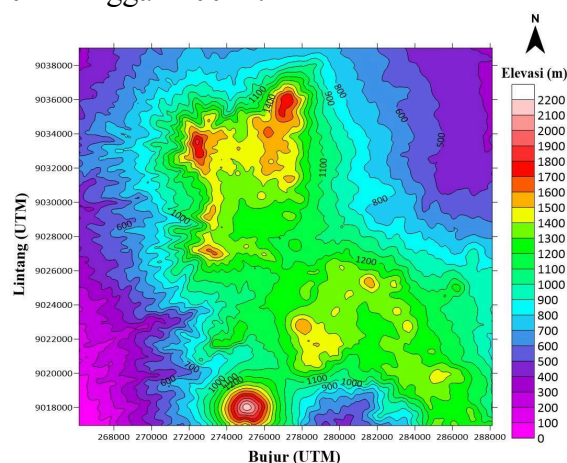
Gambar 3. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengaksesan Data

1. Topografi Daerah Penelitian

Topografi wilayah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 4**. Topografi wilayah penelitian merupakan ketinggian daratan pada satuan meter di atas permukaan laut (mdpl). Nilai dari topografi elevasi ini akan digunakan untuk melakukan koreksi bouguer dan koreksi medan. Daerah penelitian memiliki rentang nilai ketinggian mulai dari 0 m hingga 2200 m.

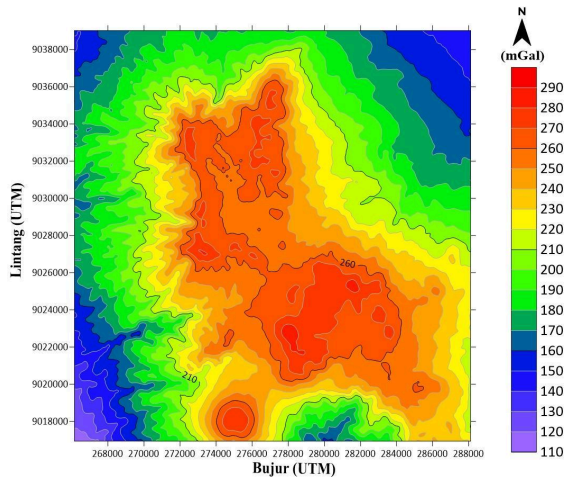


Gambar 4. Topografi Daerah Penelitian

2. Free Air Anomaly (FAA)

Anomali gaya berat pada level data anomali udara bebas yang diperoleh dari GGMPlus atau

disebut juga dengan disturbance gravity dalam GGMPlus ditunjukkan pada **Gambar 5**. Nilai anomali udara bebas ini perlu dilakukan koreksi bouguer dan koreksi medan sebelum menjadi ABL (Anomali Bouguer Lengkap). Nilai anomali udara bebas pada daerah penelitian berada pada rentang nilai 110 mGal hingga 290 mGal.

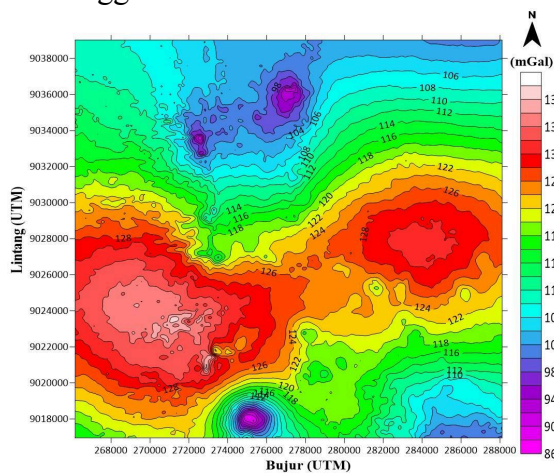


Gambar 5. Free Air Anomaly (FAA)

B. Hasil Pengolahan Data

1. Anomali Bouguer Lengkap

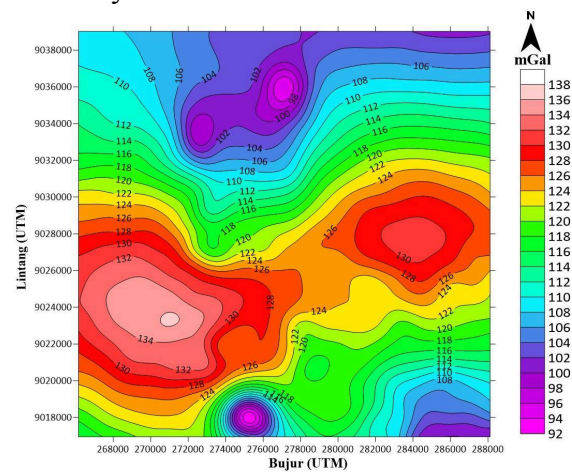
Sebaran nilai anomali bouguer lengkap pada daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 6**. Nilai anomali yang ditunjukkan berada pada rentang antara 86 mGal hingga 138 mGal. Anomali tinggi ditunjukkan warna jingga hingga merah mudah dengan rentang nilai 126 mGal hingga 138 mGal. Anomali sedang ditunjukkan oleh warna biru muda hingga kuning tua dengan rentang nilai antara 106 mGal hingga 122 mGal. Anomali rendah ditunjukkan warna ungu muda hingga biru tua dengan rentang nilai antara 86 mGal hingga 102 mGal.



Gambar 6. Distribusi Anomali Bouguer Lengkap (ABL)

2. Anomali Regional

Anomali regional merupakan anomali yang menunjukkan nilai densitas batuan-batuan superposisi dan dapat menunjukkan struktur bawah permukaan pada kedalaman yang dalam. Berdasarkan analisis spektrum kedalaman optimum pada model regional ini ada 4.43 km. Anomali regional ditunjukkan pada **Gambar 7**. Anomali tinggi berada pada daerah barat dan timur, sementara anomali rendah berada pada daerah utara dan selatan. Nilai anomali regional sendiri berada pada rentang 92 mGal hingga 138 mGal. Anomali regional ini yang akan dimodelkan untuk memperoleh hasil penampang model bawah permukaan daerah Bajawa dan sekitarnya.



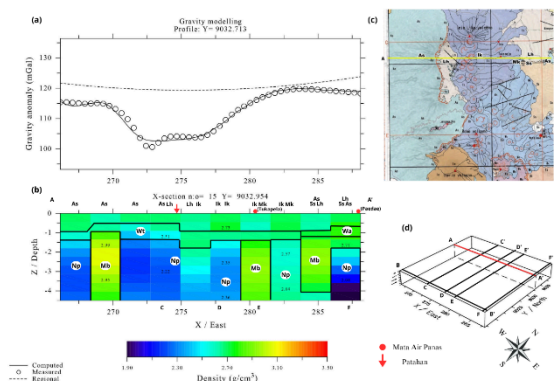
Gambar 7. Anomali Regional

C. Sayatan Penampang 2D

Penampang 2D merupakan hasil inversi pada data anomali gravitasi regional, dengan panjang sayatan keenam penampang adalah 22 km dan kedalaman model yang diperoleh sebesar 4,5 km. Penampang tersebut saling berpotongan yakni dua penampang barat ke timur (horizontal) terdiri dari sayatan penampang A-A' pada $y = 9032,954$ m dan sayatan penampang B-B' pada $y = 9017,502$ m serta empat penampang selatan ke utara (vertikal) terdiri dari sayatan penampang C-C' pada $x = 273,834$ m, sayatan penampang D-D' pada $x = 278.227$ m, sayatan penampang E-E' pada $x = 280.424$ m dan sayatan penampang F-F' pada $x = 287.013$ m.

1. Sayatan Penampang A-A'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan A-A' memiliki rentang nilai densitas $1,90 \text{ g/cm}^3$ hingga 3 g/cm^3 .

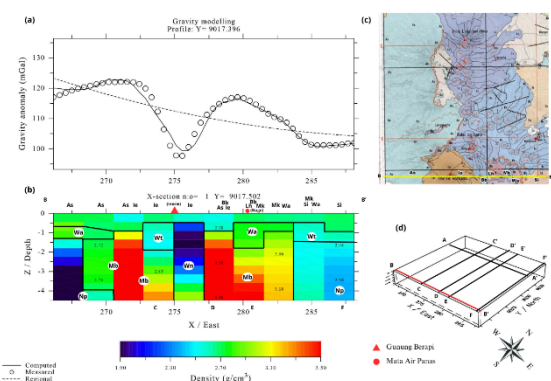


Gambar 8. Sayatan A-A'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas A-A', (b) Penampang 2D densitas lintasan A-A', (c) Posisi sayatan A-A' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan A-A' pada model 3D.

Pada penampang A-A' terdapat empat formasi batuan dalam diantaranya Formasi Tuff Welas (Wt), Basal Waebela (Wa), Basal Maumbawa (Mb) dan Formasi Nangapanda (Np). Pada jarak 0 km hingga 19,8 km ke arah timur terlihat keberadaan penampang Formasi Tuff Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen dengan perkiraan kedalamannya berada di 0,5 km hingga 1,7 km. Pada jarak 19,8 km hingga 22 km ke arah timur terlihat keberadaan penampang Formasi Basal Waebela (Wa) yang terbentuk di kala pliosen dengan perkiraan kedalaman di bawah 0,6 km hingga 1,3 km. Pada jarak 2,2 km hingga 4,4 km, 11 km hingga 15,5 km dan 19,8 km hingga 22 km ke arah timur terlihat keberadaan penampang Formasi Basal Maumbawa (Mb) yang terbentuk di kala pliosen dengan perkiraan kedalaman 1 km hingga 4,5 km. Pada jarak 0 hingga 2,2 km, 4,4 km hingga 11 km dan 15,5 km hingga 22 km ke arah timur diduga terdapat keberadaan Formasi Nangapanda (Np) yang terbentuk di kala miosen dengan perkiraan kedalaman 1,4 km hingga 4,5 km.

2. Sayatan Penampang B-B'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan B-B', memiliki rentang nilai densitas antara 1,90 g/cm³ hingga 3,50 g/cm³.

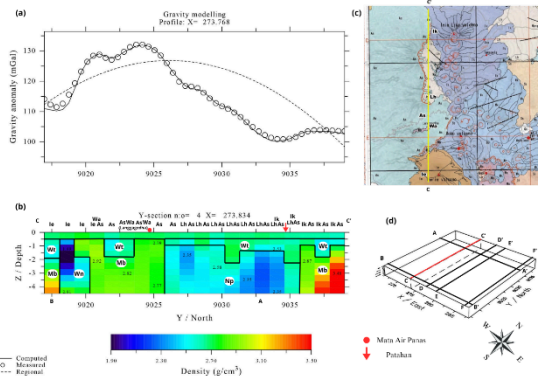


Gambar 9. Sayatan B-B'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas B-B', (b) Penampang 2D densitas lintasan B-B', (c) Posisi sayatan B-B' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan B-B' pada model 3D.

Pada penampang B-B' terdapat lima formasi batuan dalam yang terdiri dari Formasi Tuff Welas (Wt), Formasi Basal Waebela (Wa), Formasi Basal Maumbawa (Mb), Formasi Andesit Wangka (Wn), dan Formasi Nangapanda (Np). Terdapat tiga Formasi Tuff Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen pada jarak 0 hingga 1,1 km, 8,8 km hingga 18,7 km, dan 8,8 hingga 22 km dengan perkiraan rentang kedalaman 0,5 hingga 2,1 km. Terdapat dua Formasi Basal Waebela (Wa) pada 0 hingga 4,2 km, 13,2 km hingga 17,6 km dengan rentang kedalaman yang pertama 0,7 km hingga 1,4 km dan yang kedua 0,5 km hingga 1,9 km. Terdapat tiga Formasi Basal Maumbawa (Mb) terbentuk di kala pliosen Pada jarak 0 hingga 1,1 km, 2,2 hingga 8,8 km, dan 17,6 hingga 22 km dengan rentang kedalaman 0,5 hingga 4,5 km. Terdapat Formasi Andesit Wangka (Wn) terbentuk di kala pliosen pada jarak 1,1 hingga 2,2 km dengan rentang kedalaman 0,5 km hingga 4,5 km. Terdapat Formasi Nangapanda (Np) terbentuk di kala miosen pada jarak 8,8 hingga 17,6 km dengan kedalaman 1 hingga 4,5 km.

3. Sayatan Penampang C-C'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan C-C', memiliki rentang nilai densitas antara 2,13 g/cm³ hingga 3,50 g/cm³.

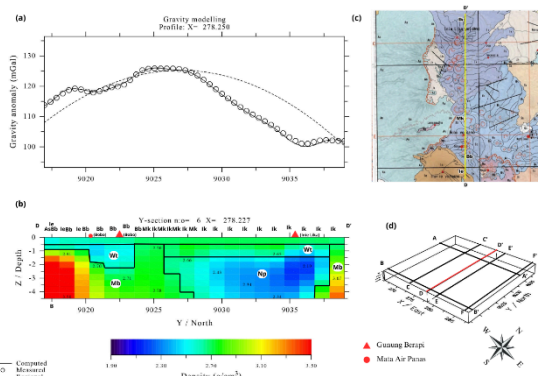


Gambar 10. Sayatan C-C'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas C-C', (b) Penampang 2D densitas lintasan C-C', (c) Posisi sayatan C-C' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan C-C' pada model 3D.

Pada penampang C-C' terdapat empat formasi batuan dalam yang terdiri dari Formasi Tuf Welas (Wt), Formasi Basal Maumbawa (Mb), Formasi Andesit Wangka (Wn), dan Formasi Nangapanda (Np). Terdapat tiga Formasi Tuf Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen pada jarak 0 km hingga 1,1 km, 8,8 km hingga 18,7 km, dan 8,8 hingga 22 km dengan perkiraan rentang kedalaman 0,5 - 2,1 km. Terdapat tiga Formasi Basal Maumbawa (Mb) terbentuk di kala pliosen Pada jarak 0 hingga 1,1 km, 2,2 hingga 8,8 km, dan 17,6 hingga 22 km dengan rentang kedalaman 0,5 km hingga 4,5 km. Terdapat Formasi Andesit Wangka (Wn) terbentuk di kala pliosen pada jarak 1,1 km hingga 2,2 km dengan rentang kedalaman 0,5 km hingga 4,5 km. Terdapat Formasi Nangapanda (Np) terbentuk di kala miosen pada jarak 8,8 km hingga 17,6 km dengan kedalaman 1 km hingga 4,5 km.

4. Sayatan Penampang D-D'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan D-D', memiliki rentang nilai densitas antara 2,19 g/cm³ hingga 3,50 g/cm³.



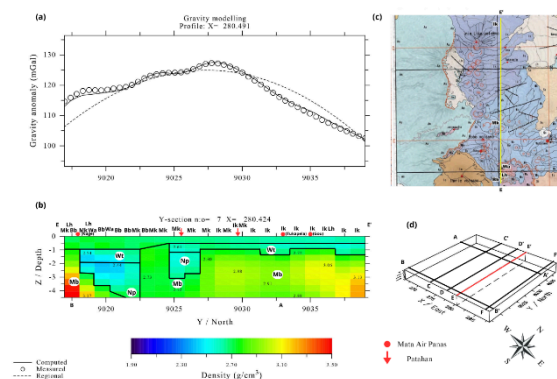
Gambar 11. Sayatan D-D'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas D-D', (b) Penampang 2D densitas lintasan D-D', (c) Posisi sayatan D-D' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan D-D' pada model 3D.

D-D', (c) Posisi sayatan D-D' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan D-D' pada model 3D.

Pada penampang D-D' terdapat tiga formasi batuan yang terdiri dari Formasi Tuf Welas (Wt), Formasi Basal Maumbawa (Mb), dan Formasi Nangapanda (Np). Terdapat dua Formasi Tuf Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen pada jarak 0 km hingga 7,75 km, dan 10,25 km hingga 21,7 km, dengan perkiraan rentang kedalaman 0,5 km hingga 2,2 km. Terdapat dua Formasi Basal Maumbawa (Mb) terbentuk di kala pliosen Pada jarak 0 km hingga 11,7 km, dan 20,2 km hingga 22 km, dengan rentang kedalaman 0,5 km hingga 4,5 km. Terdapat Formasi Nangapanda (Np) terbentuk di kala miosen pada jarak 10,25 km hingga 21,3 km dengan rentang kedalaman 1,5 km hingga 4,5 km.

5. Sayatan Penampang E-E'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan E-E', memiliki rentang nilai densitas antara 2,44 g/cm³ hingga 3,50 g/cm³.



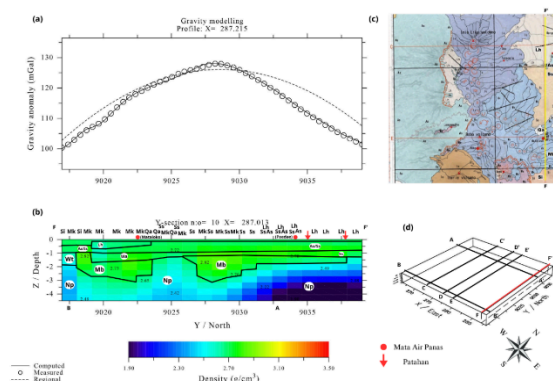
Gambar 12. Sayatan E-E'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas E-E', (b) Penampang 2D densitas lintasan E-E', (c) Posisi sayatan E-E' pada peta geologi, (d) Posisi sayatan E-E' pada model 3D.

Pada penampang E-E' terdapat tiga formasi batuan yang terdiri dari Formasi Tuf Welas (Wt), Formasi Basal Maumbawa (Mb) dan Formasi Nangapanda (Np). Terdapat 2 Formasi Tuf Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen pada jarak 1,6 km hingga 6,5 km, dan 8 km hingga 22 km, dengan perkiraan rentang kedalaman 0,5 km hingga 1,9 km. Terdapat dua Formasi Basal Maumbawa (Mb) terbentuk di kala pliosen Pada jarak 1,6 km hingga 5,25 km, dan 6,5 km hingga 22 km, dengan rentang kedalaman 0,5 km hingga 4,5 km. Terdapat dua Formasi Nangapanda (Np) terbentuk di kala miosen pada jarak 1,6 km hingga

6,5 km dan 8 km hingga 11 km, dengan rentang kedalaman 1,1 km hingga 4,5 km.

6. Sayatan Penampang F-F'

Hasil inversi diperoleh penampang densitas sayatan penampang F-F', memiliki rentang nilai densitas antara 1,90 g/cm³ hingga 2,82 g/cm³.

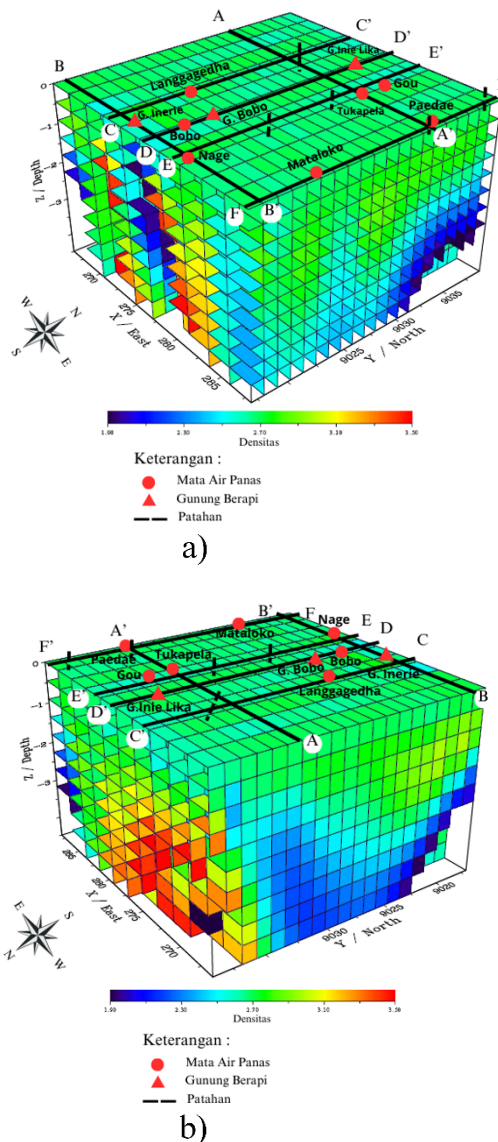


Gambar 13. Sayatan F-F'; (a) Grafik data observasi dan kalkulasi densitas F-F', (b) Penampang 2D densitas lintasan F-F'. (c) Posisi sayatan F-F' pada peta geologi. (d) Posisi sayatan F-F' pada model 3D.

Pada penampang F-F' terdapat enam formasi batuan dalam yang terdiri dari Formasi lahar deposits (Lh), Formasi Endapan Aliran Aimere Scoria (As) dan Andesit Sasa (Ss), Formasi Basal Waebela (Wa), Formasi Tuf Welas (Wt), Formasi Basal Maumbawa (Mb), dan Formasi Nangapanda (Np). Terdapat Formasi lahar deposits (Lh) yang terbentuk kala pleistosen pada jarak 3- 7,75 km dengan rentang kedalaman 0,1 km hingga 0,9 km. Terdapat Formasi Endapan Aliran Aimere Scoria (As) dan Andesit Sasa (Ss) terbentuk kala pleistosen pada jarak 0 hingga 22 km dengan rentang kedalaman 0,7 km hingga 1 km. Terdapat Formasi Basal Waebela (Wa) terbentuk kala pliosen pada jarak 3 km hingga 22 km dengan rentang kedalaman 0,7 km hingga 1,6 km. Terdapat Formasi Tuf Welas (Wt) yang terbentuk di kala pliosen pada jarak 0 hingga 2 km dengan perkiraan rentang kedalaman 1 km hingga 2 km. Terdapat dua Formasi Basal Maumbawa (Mb) terbentuk di kala pliosen Pada jarak 2 km hingga 7,75 km, dan 10,25 km hingga 21,5 km dengan rentang kedalaman 1 km hingga 3 km. Terdapat Formasi Nangapanda (Np) terbentuk di kala miosen pada jarak 0 hingga 22 km dengan rentang kedalaman 1,5 km hingga 4,5 km.

D. Model 3D dan Interpretasi Struktur Sistem Panas Bumi

Hasil pemodelan gaya berat divisualisasikan dalam bentuk 3D sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 14**. Proses inversi menghasilkan nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,02 yang menunjukkan kecocokan model dengan data pengamatan yang baik. Rentang nilai densitas pada model ini berada antara 1,90–3,50 g/cm³.



Gambar 14. Model 3D densitas, (a) Tampak sisi Selatan dan Timur, (b) Tampak sisi Utara dan Barat.

Blok berwarna biru tua pada sudut barat dan timur laut dengan kedalaman 3,5–4,5 km di bawah permukaan diinterpretasikan sebagai batuan sedimen yang menempati bagian bawah batuan beku muda. Interpretasi ini konsisten dengan keberadaan Formasi Nangapanda (Np) yang terdiri atas batupasir, serpih, dan batugamping.

Sementara itu, blok berwarna merah di bagian barat laut pada kedalaman 2–4,5 km merepresentasikan batuan dasar yang terangkat akibat intrusi magma, kemungkinan berkaitan

dengan Formasi Maumbawa Basal (Mb). Anomali densitas tinggi ini diperkirakan berasal dari batuan basal bawah permukaan dan dapur magma. Zona densitas tinggi tersebut diduga berfungsi sebagai area intrusi yang berperan sebagai sumber panas sistem panas bumi di wilayah penelitian.

Interpretasi hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Bajawa terdiri atas tiga komponen utama. Pertama, lapisan reservoir berada pada Formasi Nangapanda (Np) dengan kedalaman 1,4–4,5 km. Litologi berupa batupasir, serpih, dan batugamping memiliki porositas serta permeabilitas yang relatif tinggi sehingga mendukung akumulasi fluida panas bumi.

Kedua, lapisan penutup (*cap rock*) berada pada kedalaman kurang dari 1,5 km. Lapisan ini terdiri atas formasi vulkanik muda, meliputi Aimere Scoria (As), Andesit Sasa (Ss), Andesit Inie Lika (Ik), Andesit Mataloko (Mk), Andesit Bobo (Bb), Andesit Siutoro (Si), Inerie Basalt (Ie), Basalt Waebela (Wa), Deposit Lahar (Lh), dan Tuff Welas (Wt). Karakter batuan beku muda dan endapan piroklastik yang masif menyebabkan permeabilitas rendah, sehingga efektif berfungsi sebagai penutup reservoir.

Ketiga, sumber panas diperkirakan berasal dari aktivitas magmatik Gunung Inerie dan Inie Lika. Intrusi magma pada Formasi Maumbawa Basal (Mb) berupa aliran lava basal serta Wangka Andesit (Wn) berupa kubah lava dan aliran lava andesit–riolit berperan sebagai sumber panas melalui mekanisme konduksi dan konveksi ke reservoir.

Manifestasi panas bumi berupa mata air panas Bobo, Nage, Mataloko, Langagedha, Tukapela, Paidae, dan Gou ditemukan di sekitar jalur patahan. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur geologi berfungsi sebagai jalur migrasi fluida dari reservoir menuju permukaan. Dengan demikian, integrasi model 3D gaya berat dengan data geologi memperlihatkan sistem panas bumi Bajawa yang dikontrol oleh keberadaan reservoir sedimen Formasi Nangapanda, lapisan penutup vulkanik muda, serta sumber panas dari intrusi magma di Formasi Maumbawa Basal dan Wangka Andesit

KESIMPULAN

Struktur bawah permukaan bawah permukaan daerah potensi panas bumi Bajawa dan sekitarnya dianalisis dari sebaran nilai densitas anomali

regional pada model 3D dan sayatan penampang 2D daerah penelitian. Anomali regional memiliki rentang nilai 92 mGal hingga 138 mGal dengan estimasi kedalamannya 4,43 km. Variasi rentang densitas bawah permukaan untuk daerah penelitian memiliki rentang nilai 1,9 g/cm³ hingga 3,5 g/cm³ yang merepresentasikan keberadaan berbagai formasi batuan. Zona reservoir diduga merupakan Formasi Nangapanda (1,9–2,66 g/cm³), sedangkan lapisan penutup (*cap rock*) terdiri dari batuan beku muda (andesit dan endapan aliran batuan beku) seperti formasi Aimere Scoria (As), Andesit Sasa (Ss), Andesit Inie Lika (Ik), Andesit Mataloko (Mk), Andesit Bobo (Bb) dan Andesit Siutoro (Si), Inerie Basalt (Ie), Wabela Basal (Wa), Deposit Lahar (Lh) dan Tuff Welas (Wt) dengan densitas berkisar antara 2,49–2,8 g/cm³. Sumber panas diasosiasikan dengan formasi Basal Maumbawa (Mb) yang merupakan *lava massive* memiliki kandungan basal (2,7–3,5 g/cm³) dan Andesit Wangka (Wn) yang juga merupakan *lava massive* berupa lava andesit dengan kandungan riolitik (1,9–2,9 g/cm³). Patahan yang tampak pada peta geologi diduga sebagai jalur migrasi fluida panas menuju ke permukaan sebagai manifestasi panas bumi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, penguji, serta pihak-pihak yang telah mendukung penelitian ini, baik secara akademik maupun teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pemerintah Indonesia, *Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional*, 2014.
- [2] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (DJBETKE), "Statistik EBTKE 2021", Kementrian ESDM, 2021.
- [3] Republik Indonesia, *Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang Panas Bumi*, Jakarta: Sekretariat Negara, 2014.
- [4] H. Muraoka et al., "Geologi Tektonik, Vulkanik Dan Stratigrafi Lapangan Panas Bumi Bajawa, Flores Tengah, Indonesia", *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 2002.
- [5] D. Mardiaty, A. Hartono dan R. M. Ramadhan, "Hydrothermal alteration zone

- identification using remote sensing in Bajawa geothermal field, Flores, Indonesia”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 500, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/500/1/012036.
- [6] R. J. Blakely, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. doi: 10.1017/CBO9780511549816.
- [7] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed., Chichester: Wiley-Blackwell, 2011. doi: 10.1002/9781119950583.
- [8] H. Pirttijarvi, ”Grablox and Bloxer: 3D forward and inverse modeling programs for gravity and magnetic anomalies”, *Geophysica*, vol. 50, no.2, pp. 79-100, 2014.
- [9] Curtin University, ”Global Gravity Model Plus (GGMplus)”, [Online]. Available: <https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/data/>.