



Analisis Potensi Sistem Geotermal Mata Air Panas Kampung Mosso Papua Melalui Pemodelan 3D Struktur Bawah Permukaan Menggunakan Metode Gravitasi

Bangkit Sudrajat¹, Tatang Sutarman¹, Abdul Rhofiq¹, Andrew Worembai¹, dan Alex Martinus Mamun Auparai¹

¹*Prodi Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Cenderawasih, Kota Jayapura, Papua*

Email: bangkitsudrajad@gmail.com

*Corresponding Author

Abstrak

Panas bumi atau geotermal adalah salah satu sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik di Indonesia. Pembangkit listrik di wilayah Papua masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil. Kedepannya kebutuhan energi listrik di Papua setelah pemekaran daerah akan menjadi semakin besar. Keberadaan potensi geotermal di wilayah Papua salah satunya terdapat di Kampung Mosso, Distrik Muara Tami, Kota Jayapura. Potensi geotermal di Kampung Mosso ditunjukkan oleh adanya keberadaan manifestasi mata air panas (*hot spring*). Berkaitan dengan hal tersebut, penulis melakukan penelitian geofisika dengan tujuan mengidentifikasi sistem geotermal di Kampung Mosso. Identifikasi dilakukan berdasarkan hasil pemodelan 3D struktur bawah permukaan menggunakan metode gravitasi. Pada penelitian ini data yang digunakan terdiri dari data sekunder dan data primer. Data sekunder yang digunakan adalah data gravitasi GGMplus; data model elevasi digital (DEM); dan informasi dari peta geologi. Sedangkan data primer yang digunakan dalam penelitian adalah data sampel densitas batuan yang mewakili densitas permukaan pada setiap satuan geologi di wilayah penelitian. Data gravitasi GGMplus merupakan data utama yang diolah, dikoreksi, dan dimodelkan berdasarkan data penjang. Berdasarkan hasil pemodelan 3D yang telah dilakukan, pada kedalaman 1200 m di bawah titik lokasi sumber mata air panas diperoleh adanya distribusi batuan berdensitas tinggi yang diinterpretasi sebagai batuan panas atau intrusi magma yang menjadi sumber panas (*heat source*) pada sistem geotermal. Selain itu dari model 3D juga teridentifikasi keberadaan distribusi densitas rendah di sekitar titik sumber mata air panas yang diinterpretasi sebagai zona sedimen cekungan air tanah pada sistem geotermal Kampung Mosso.

Kata Kunci: GGMplus, Metode Gravitasi, Pemodelan 3D, Sistem Geotermal.

Abstract

Geothermal energy presents a promising alternative for electrical power in Indonesia, especially in regions like Papua, where current power plants heavily rely on fossil fuels. As Papua anticipates an increase in energy demand due to regional expansion, exploring renewable energy sources becomes crucial. Mosso Village in the Muara Tami District of Jayapura City is known for its geothermal potential, evidenced by the presence of hot springs in the area. To assess this potential, a geophysical study was conducted focusing on the geothermal system in Mosso Village. This study utilized 3D modeling of subsurface structures through the gravity method. It incorporated both primary and

secondary data, with secondary sources including GGMplus gravity model data, digital elevation model (DEM) data, and geological maps. Primary data comprised rock density samples representing surface densities of geological units in the study area. The GGMplus gravity data was central to the analysis, which involved processing, correcting, and modeling these data to identify geothermal features. The 3D modeling revealed a high-density zone at a depth of 1200 m beneath the hot spring source, interpreted as an indication of hot rock or magma intrusion, suggesting it as the geothermal heat source. Additionally, the model identified a low-density area around the hot spring, interpreted as a sedimentary groundwater basin in the geothermal system of Mosso Village. This study highlights the potential for utilizing geothermal energy in the region and provides valuable insights into the geothermal system's structure.

Keywords: 3D Modeling, Geothermal System, GGMplus, Gravity Method.

1. PENDAHULUAN

Salah satu wilayah Indonesia yang memiliki potensi sumber daya alam melimpah adalah Provinsi Papua. Wilayah Provinsi Papua memiliki potensi sumber daya geologi yang besar, tidak hanya terbatas pada sumber daya mineral tetapi juga sumber daya geotermal atau panas bumi. Geotermal merupakan salah satu alternatif sumber energi pengganti sumber energi fosil terutama sebagai pembangkit listrik. Sampai saat ini, pembangkit listrik di Papua masih bergantung pada bahan bakar fosil. Namun dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik setelah pemekaran Daerah Otonomi Baru (DOB) dan dengan diterapkannya kebijakan transisi energi, maka eksplorasi sumber daya alam untuk pembangkit listrik seperti geotermal menjadi sangat penting untuk dilakukan di Indonesia, termasuk di Wilayah Papua.

Potensi geotermal di Wilayah Papua salah satunya terletak di Kampung Mosso, Distrik Muara Tami, Kota Jayapura. Keberadaan potensi geotermal atau panas bumi di wilayah ini ditunjukkan oleh adanya manifestasi mata air panas (*hot spring*). Berdasarkan kajian oleh Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), wilayah Jayapura bukan merupakan lingkungan vulkanik sehingga kemungkinan besar mata air panas tersebut disebabkan oleh sistem panasbumi non-vulkanik. Dengan mempertimbangkan parameter sesuai penelitian sistem geotermal di dunia yang dilakukan oleh Lund (2007), Hochstein dan Browne (2000), beberapa jenis sistem panas bumi non-vulkanik di Indonesia dikelompokkan menjadi 4 antara lain: (1) Sistem panasbumi sesar-tektunik; (2) Sistem panasbumi vulkanik tua; (3) Sistem panasbumi intrusi-radiogenik; dan (4) Sistem panas bumi pada lingkungan sedimen (Badan Geologi ESDM, 2023).

Menurut Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, sistem panasbumi non-vulkanik di Pulau Papua kemungkinan termasuk dalam kategori sistem panasbumi sesar-tektunik atau sistem panasbumi vulkanik tua (Badan Geologi ESDM, 2023). Kedua sistem tersebut berhubungan dengan zona sesar naik, subduksi, dan rekahan pada kedalaman di wilayah yang memiliki aliran panas tinggi, umumnya terjadi pada area tumbukan antar lempeng, seperti di Pulau Papua. Sumber panas dari kedua jenis sistem ini biasanya berasal dari kerak bumi yang mengalami deformasi, sejalan dengan evolusi tatanan tektonik di Pulau Papua yang kemudian terbagi menjadi tiga madala geologi yang meliputi mandala kerak samudera, jalur peralihan, dan mandala kerak benua (Dow dkk., 1990).

Manifestasi mata air panas (*hot spring*) di Kampung Mosso belum banyak diteliti oleh ahli ilmu kebumian sehingga informasi tentang lingkungan geotermal di wilayah tersebut masih sangat sedikit. Berkaitan dengan hal tersebut, maka perlu dilakukan kajian dan penelitian geofisika guna mengidentifikasi sistem panasbumi di lokasi tersebut sehingga dapat diketahui apakah manifestasi panasbumi tersebut masuk pada zona yang jauh dari batuan sumber panas (zona *outflow*) atau masuk pada zona yang dekat dengan sumber panas (zona *upflow*). Teridentifikasinya zona *upflow* pada lingkungan panasbumi akan mempermudah menemukan titik bor yang berpotensi mendapatkan akuifer atau reservoir air panas dengan gradien peningkatan suhu yang lebih tinggi lagi. Berkaitan dengan uraian potensi dan kebutuhan sumber daya geotermal tersebut maka dibutuhkan penelitian kebumian khususnya penelitian geofisika untuk mengidentifikasi komponen sistem geotermal di lingkungan manifestasi mata air panas di Kampung Mosso.

Dalam eksplorasi geotermal, sistem panasbumi berkaitan erat dengan anomali geofisika, karena perubahan gradien suhu dapat memengaruhi sifat fisik litologi di bawah permukaan, seperti konduktivitas, resistivitas, kecepatan gelombang elastis, densitas, dan suseptibilitas magnetik (Kana dkk., 2015). Metode geofisika yang biasa digunakan dalam eksplorasi panasbumi meliputi Gravitasi, Magnetik, Magnetotelurik, Seismik, dan Geolistrik (Ochieng, 2013). Berdasarkan uraian tentang potensi geotermal di lokasi sumber air panas Kampung Mosso di atas, penulis berinisiatif melakukan penelitian geofisika dengan metode gravitasi dengan judul “Identifikasi Sistem Geotermal Mata Air Panas Kampung Mosso Papua Melalui Pemodelan 3D Struktur Bawah Permukaan”. Penelitian geofisika ini memilih metode gravitasi dengan tujuan untuk mencari tahu kondisi struktur bawah permukaan dan mengidentifikasi komponen sistem panasbumi di area tersebut melalui variasi densitas batuan yang diperoleh dari pemodelan anomali gravitasi. Data anomali gravitasi sangat sensitif dalam mendeteksi perbedaan densitas bawah permukaan yang disebabkan oleh intrusi batuan beku, sesar naik, sesar normal, dan sesar obligate. Selain itu, penelitian dengan metode gravitasi bisa dikerjakan dengan memanfaatkan data primer dari pengukuran di lapangan maupun data sekunder dari satelit atau model gravitasi global (Sudrajad, 2022). Oleh karena itu, metode gravitasi sangat sesuai untuk survei awal sistem panasbumi di Kampung Mosso, yang memiliki area luas dan sulit diakses akibat keterbatasan alat transportasi.

Dengan kemajuan teknologi saat ini, data sekunder gravitasi yang dapat diakses publik secara terbuka semakin banyak seperti data gravitasi BGI, data satelit Topex, EGM2008, SRTM2 2018 dan GGMplus 2013. Data gravitasi GGMplus 2013 adalah model gravitasi global dengan resolusi sangat tinggi dengan spasi ~200 m pada arah utara-selatan (Hirt, dkk., 2013). yang dihasilkan dari kombinasi data gravitasi satelit GRACE dan GOCE; EGM2008; dan *forward modeling* gravitasi topografi melalui ekspansi harmonik bola (*spherical harmonic expansion*) (Hirt, 2012). Oleh karena tingginya resolusi data yang dimiliki, GGMplus mampu memberikan secara detail kondisi medan gravitasi di suatu tempat. Dengan demikian, hasil pengolahan atau pemodelan anomali gravitasi dari data model gravitasi global GGMplus dapat membantu memprediksi densitas, kedalaman, dan bentuk geometri struktur bawah permukaan penyebab anomali (Sudrajad, 2018).

Sebelumnya sudah ada beberapa penelitian eksplorasi sumber daya geotermal di Indonesia dengan menggunakan metode gravitasi dengan memanfaatkan data model gravitasi global GGMplus. Salah dua di antara penelitian Geotermal yang menggunakan data gravitasi GGMplus adalah penelitian oleh Wangsa dan kawan-kawan (Wangsa dkk, 2018) tentang interpretasi kuantitatif anomali gravitasi pada lokasi geotermal seulawah agam, Aceh Besar dan penelitian metode gravitasi oleh Khafid Nur Aziz (Aziz dkk, 2018) yang mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan di lapangan geotermal lamongan dari analisis data gravitasi. Disamping itu berdasarkan hasil validasi melalui analisis deskriptif perbandingan data gravitasi lapangan terhadap data gravitasi GGMplus diperoleh bahwa data sekunder gravitasi GGMplus pada wilayah panasbumi dengan kontur topografi yang tidak kasar dapat memberikan hasil yang bersesuaian dengan data gravitasi hasil akuisisi di lapangan (Sudrajad, 2023). Dengan demikian pemodelan 3D struktur bawah permukaan yang dilakukan dalam rangka mengidentifikasi komponen sistem panasbumi atau geotermal mata air panas Kampung Mosso dilakukan dengan memanfaatkan data gravitasi GGMplus.

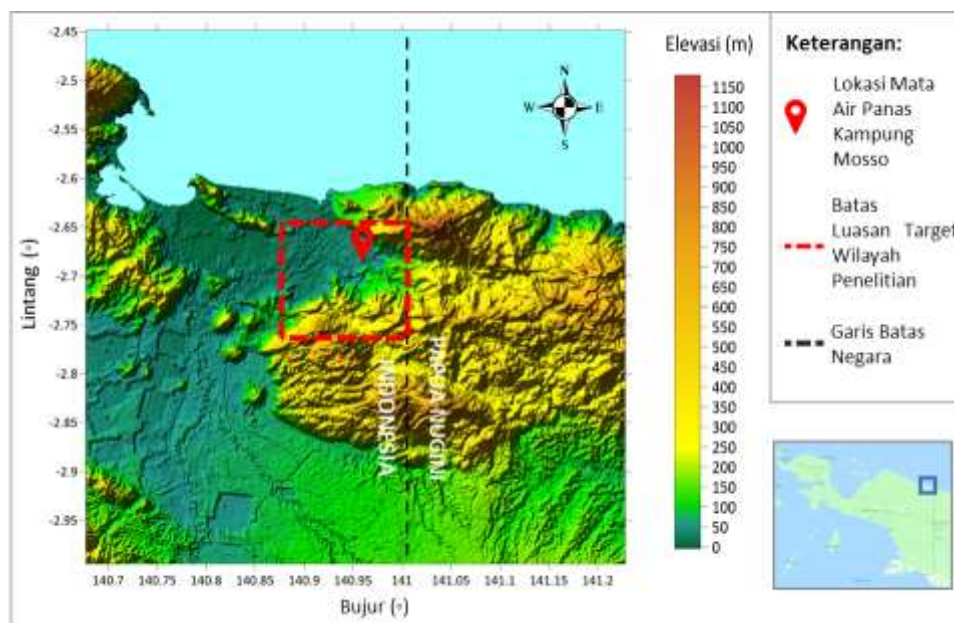
2.METODE PENELITIAN

2.1. Luas Wilayah Target Penelitian dan Pengambilan Data

Wilayah target penelitian geotermal atau panasbumi kampung Mosso berada di Distrik Muara Tami, Kota Jayapura Provinsi Papua. Wilayah target penelitian ini berada di dekat perbatasan Negara Indonesia-Papua Nugini. Wilayah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Luas daerah penelitian yang menjadi target adalah $\pm 462,25 \text{ km}^2$ (berbentuk persegi dengan panjang sisi $\pm 21,15 \text{ km}$) yang berada diantara $2,42^\circ$ - $2,61^\circ$ LS dan 140.61° - 140.80° BT. Adapun lokasi mata air panas berada pada koordinat geografis $140,957316^\circ$ BT dan $2,676717^\circ$ LS. Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri dari data sekunder dan data primer yang diperoleh dari lokasi penelitian. Data sekunder meliputi model gravitasi GGMplus (Hirt dkk, 2023), model elevasi digital (DEM), data elevasi, dan informasi geologi dari peta geologi (Suwarna dan Noya, 1995). Sementara itu, data primer mencakup densitas sampel batuan yang diambil dari beberapa titik di lapangan yang mewakili satuan geologi atau formasi batuan, serta data pH dan suhu air panas di lokasi manifestasi mata air panas.

2.2. Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini, pengolahan data medan gravitasi GGMplus diawali dengan perhitungan nilai gravitasi teoritik/ gravitasi normal untuk setiap datum. Setelah itu, nilai medan gravitasi observasi GGMplus dikurangi dengan nilai gravitasi teoritik/ gravitasi normal untuk mendapatkan anomali gravitasi (Δg). Nilai anomali gravitasi tersebut kemudian dikoreksi hingga diperoleh anomali gravitasi total atau anomali Bouguer Lengkap (ABL). Koreksi yang dilakukan meliputi koreksi udara bebas, koreksi Bouguer sederhana, dan koreksi *terrain* atau koreksi medan (Telford, 1990). Anomali Bouguer Lengkap (ABL) kemudian dipisahkan menjadi anomali gravitasi lokal dan regional. Anomali gravitasi lokal,



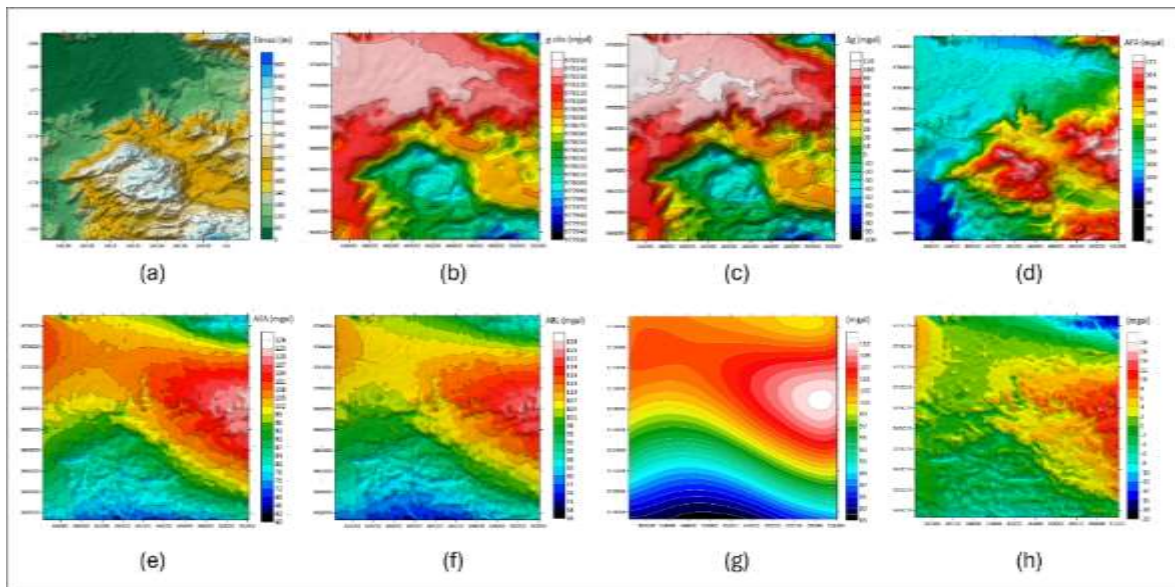
Gambar 1. Peta luas wilayah target penelitian dalam koordinat geografis.

data densitas sampel batuan, dan data tambahan seperti informasi geologi dari peta geologi yang diperoleh di lapangan yang kemudian digunakan untuk pemodelan 3D (Sudrajad dkk, 2024) dengan pendekatan pemodelan maju (*forward modeling*) dan pemodelan inversi (*inverse modeling*) dalam format model blok menggunakan bantuan *software* grablox dan bloxer (Pirttijarvi, 2008). Pemodelan maju digunakan untuk membuat model awal yang kemudian digunakan untuk pemodelan inversi sehingga diperoleh model densitas 3D akhir struktur bawah permukaan. Model densitas 3D akhir tersebut didukung dengan data suhu dan pH mata air panas di lapangan kemudian diinterpretasi untuk mengidentifikasi komponen sistem geotermal di wilayah tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

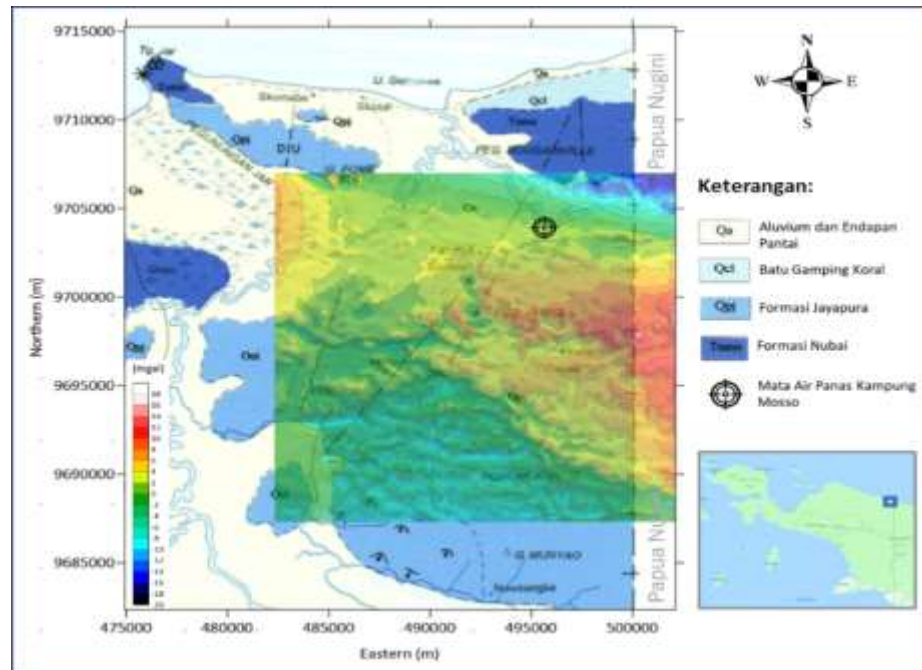
Penelitian “Identifikasi Sistem Geotermal Mata Air Panas Kampung Mosso Papua Melalui Pemodelan 3D Struktur Bawah Permukaan” ini diawali dengan pengolahan data medan gravitasi observasi GGMplus melalui beberapa tahap koreksi, penapisan atau *filtering*, dan pemodelan. Pengolahan data anomali gravitasi yang dilakukan meliputi pengurangan nilai medan gravitasi observasi GGMplus (g_{obs}) dengan nilai gravitasi normal/ teoritik (γ); koreksi *free air* (udara bebas); koreksi bouguer sederhana; dan koreksi *terrain* (koreksi medan). Dari setiap tahapan tersebut diperoleh beberapa peta kontur (Gambar 3) yang meliputi peta kontur medan gravitasi GGMplus, peta kontur anomali gravitasi, peta kontur anomali udara bebas/*free air* (AFA), peta kontur anomali bouguer sederhana (ABS), dan peta kontur anomali gravitasi total atau anomali bouguer lengkap (ABL). Selanjutnya melalui proses penapisan anomali total (ABL) dengan metode kontinuasi ke atas diperoleh peta kontur anomali regional. Nilai anomali gravitasi total (ABL) kemudian dikurangi dengan anomali

regional tersebut sehingga diperoleh anomali lokal/residual. Data anomali gravitasi lokal/residual ini yang kemudian dijadikan dasar data dalam pemodelan 3D bawah permukaan lokasi panasbumi Kampung Mosso berdasarkan data penunjang berupa data densitas sampel batuan di lapangan dan informasi geologi.



Gambar 2. (a) Peta kontur elevasi topografi; (b) Peta kontur medan gravitasi observasi GGMplus; (c) Peta kontur anomali gravitasi yang belum terkoreksi; (d) Peta kontur anomali udara bebas; (e) Peta kontur anomali bouguer sederhana; (f) Peta kontur anomali gravitasi total atau anomali bouguer lengkap; (g) Peta kontur anomali gravitasi regional hasil kontinuasi ke atas 2 km; (h) Peta kontur anomali gravitasi residual hasil pengurangan anomali total dengan anomali regional.

Peta kontur anomali gravitasi merupakan perbedaan medan gravitasi observasi GGMplus (g_{obs}) pada elevasi permukaan dengan medan gravitasi teoritik/normal (γ) pada elevasi spheroida referensi (geoid). Hasil peta kontur medan gravitasi observasi GGMplus, peta kontur anomali gravitasi yang belum terkoreksi, dan peta kontur topografi wilayah geotermal Kampung Mosso bisa dilihat pada gambar 2. Perbedaan elevasi titik datum antara gravitasi observasi dengan gravitasi normal tersebut dikoreksi dengan membawa nilai gravitasi normal ke ketinggian di permukaan sehingga dilakukan koreksi udara bebas/ *free air*. Anomali udara bebas (AFA) ini belum memperhitungkan massa antara geoid sampai dengan elevasi titik data sehingga dilakukan koreksi bouguer sederhana yang menghasilkan anomali bouguer sederhana (ABS) dan koreksi *terrain* yang menghasilkan anomali gravitasi total atau anomali bouguer lengkap (ABL) yang telah terkoreksi. Selanjutnya dalam melakukan interpretasi awal anomali gravitasi dan pemodelan 3D struktur bawah permukaan, anomali gravitasi total (ABL) yang telah diperoleh dilakukan penapisan dengan kontinuasi ke atas setinggi 2 km sehingga diperoleh anomali gravitasi lokal/residual dan regional (gambar 2).

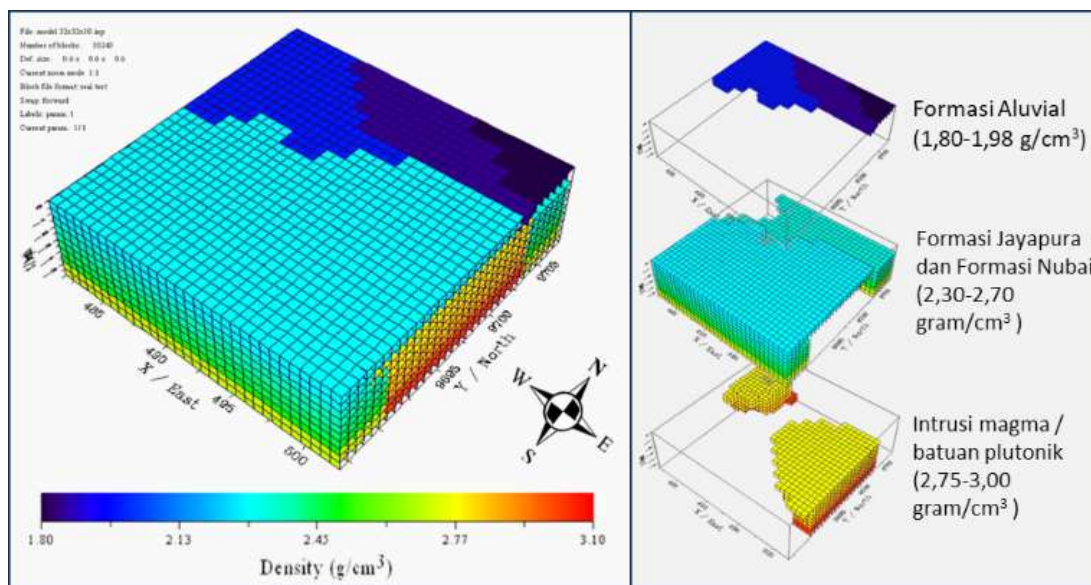


Gambar 3. Peta kontur anomali gravitasi lokal/residual di-*overlay* dengan peta geologi dan titik koordinat mata air panas Kampung Mosso dalam sistem koordinat UTM.

Berdasarkan gambar 6, nilai anomali gravitasi lokal/residual di daerah penelitian berkisar pada rentang -18,82 sampai 16,01 mGal. Peta Anomali Gravitasi Residual yang diperoleh kemudian di-*overlay* dengan peta geologi daerah penelitian dan dengan koordinat posisi mata air panas Kampung Mosso (Gambar 4). Hal ini dilakukan guna melakukan interpretasi awal berdasarkan pola kontur anomali gravitasi yang dikorelasi dengan data peta geologi. Dari hasil interpretasi gambar 3, diperoleh adanya dua klosur anomali tinggi di sebelah barat dan sebelah tenggara posisi mata air panas yang memanjang ke timur sampai ke wilayah Papua Nugini. Distribusi nilai kontras anomali gravitasi ini mengindikasikan kemungkinan adanya batuan panas berdensitas tinggi atau tubuh magma di bawah lokasi mata air panas. Mengingat luasan target penelitian secara geologi hanya terdiri dari Formasi aluvial; Formasi Nubai; dan Formasi Jayapura, sehingga nilai anomali tinggi tersebut mungkin disebabkan oleh batuan berdensitas tinggi di bawah permukaan. Selain itu berdasarkan peta geologi posisi mata air panas dekat dengan 2 patahan yang berorientasi baratdaya- timurlaut. Data anomali gravitasi residual ini kemudian diolah lebih lanjut dalam pemodelan 3D struktur bawah permukaan.

Pada tahap awal pemodelan 3D, terlebih dahulu dilakukan pengambilan sampel densitas batuan di sekitar lokasi Geotermal Kampung Mosso yang meliputi lokasi Formasi Aluvial dan Endapan Pantai (Qa); Formasi Jayapura (Qpj); Formasi Nubai (Tomn); dan Formasi Gamping Coral (Qcl) (Suwarna dan Noya, 1995). Adapun rata-rata nilai densitas batuan untuk Formasi Aluvial dan endapan pantai adalah sebesar 1,77 gram/cm³; Formasi Jayapura (Qpj) sebesar 2,78 gram/cm³; Gamping Coral (Qcl) sebesar 2,14 gram/cm³; dan

Formasi Nubai (Tomn) sebear $2,04 \text{ gram/cm}^3$. Sedangkan nilai minum dan maksimum densitas sampel batuan di lapangan berturut-turut adalah $1,77 \text{ gram/cm}^3$ dan $3,15 \text{ gram/cm}^3$. Hasil nilai densitas batuan ini selain digunakan dalam interpretasi model akhir juga digunakan sebagai syarat batas parameter densitas dalam membangun model awal (*intial model*) yang akan digunakan sebagai input dalam pemodelan inversi 3D (Gambar 5).

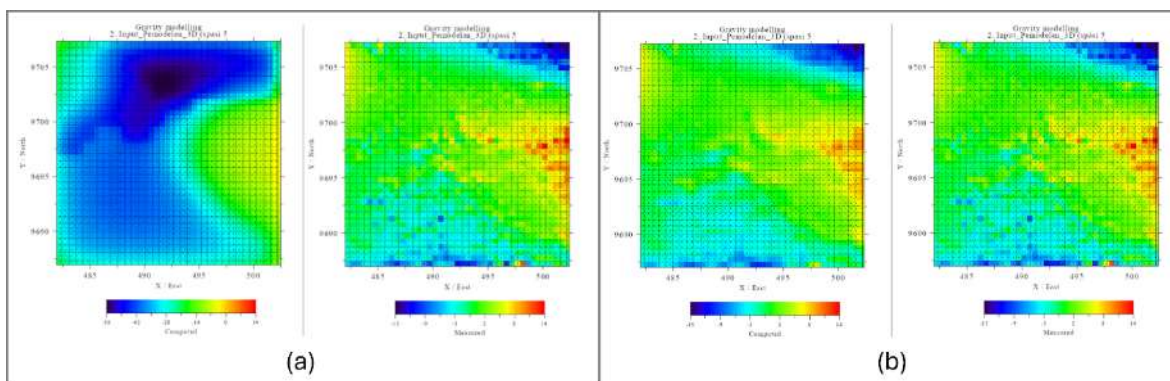


Gambar 4. Model awal densitas 3D bawah permukaan wilayah target penelitian berdasarkan data densitas sampel batuan dan informasi geologi.

Model awal (*initial model*) dalam pemodelan 3D penelitian ini (gambar 4) dibuat melalui pemodelan maju dalam bentuk blok mayor yang mewakili volum daerah penelitian dan susunan blok minor di dalamnya yang merepresentasikan struktur bawah permukaan. Model awal dibangun dengan ukuran blok mayor: panjang (X) = 20,4 km; lebar (Y) = 20,6 km; dan kedalaman (Z) = 6,00 km. Adapun ukuran blok minornya antara lain: panjang (x) = 0,6 km; lebar (y) = 0,6 km; dan kedalaman (z) = 0,6 km. Jumlah keseluruhan blok minor yang mengisi blok mayor adalah 10.240 blok dan rentang nilai parameter densitas blok minor adalah $1,80 - 3,10 \text{ gram/cm}^3$. Model awal 3D struktur bawah permukaan wilayah target penelitian yang dibuat sesuai data peta geologi, data densitas sampel batuan, dan data anomali gravitasi lokal/residual bisa dilihat pada gambar 9 sedangkan data anomali gravitasi lokal/residual hasil kalkulasi (*computed*) model awal dan perbandingannya dengan anomali gravitasi lokal hasil observasi dapat dilihat pada gambar 5a). Adapun misfit atau *error* data (RMS data) model awal ini sebesar 1,224.

Model awal 3D struktur bawah permukaan (gambar 3) dan anomli gravitasi residual (gambar 3) di-inversi dengan menggunakan algoritma inversi *occam density* guna memperoleh nilai parameter model yang terdiri dari paramater densitas dan parameter geometris. Adapun proses optimasi dengan inversi *occam density* dilakukan sebanyak 55 kali iterasi. Dari hasil pemodelan inversi diperoleh model akhir dengan *misfit* atau *error* data

(RMS data) yang sangat kecil yaitu sebesar 0,0288 atau 2,88%. Perbandingan data anomali gravitasi residual hasil observasi dengan data anomali gravitasi residual hasil kalkulasi model akhir dapat dilihat pada gambar 5(b).

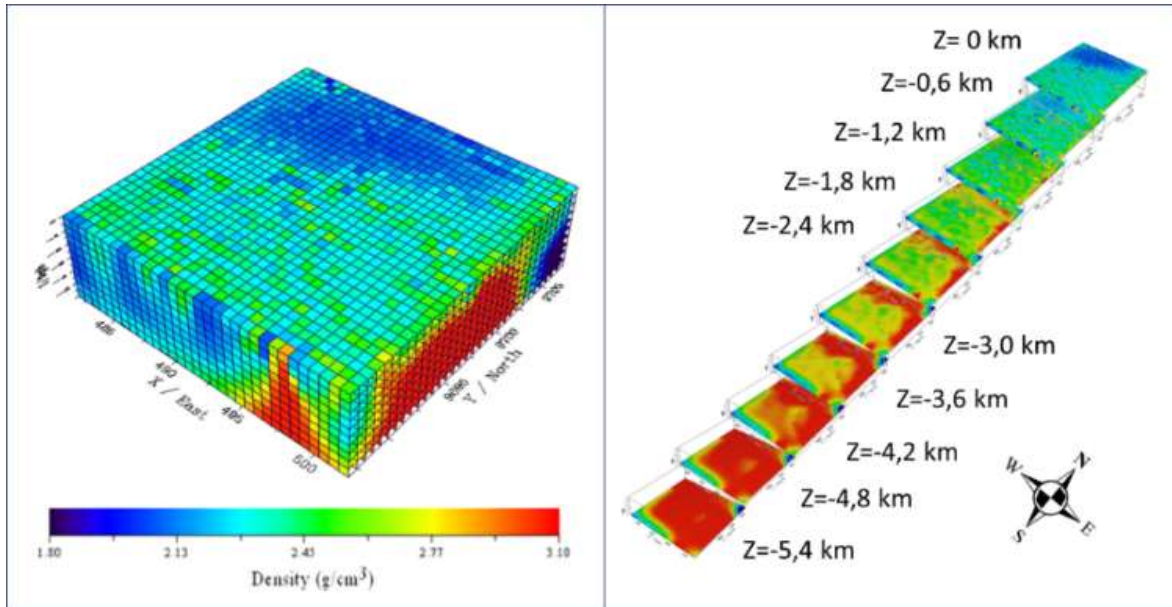


Gambar 5. (a) Perbandingan anomali gravitasi lokal hasil kalkulasi model awal (kiri) dan data anomali gravitasi lokal hasil observasi GGMplus (kanan) dalam satuan mGal; (b) Perbandingan data anomali gravitasi lokal hasil kalkulasi model akhir (kanan) dan anomali gravitasi lokal hasil observasi (kiri) dalam satuan mGal.

Berdasarkan gambar 5(b), terlihat bahwa anomali gravitasi hasil kalkulasi (*computed*) yang dihasilkan model akhir memiliki kecocokan yang tinggi dengan anomali gravitasi hasil observasi (*measured*). Dengan demikian model akhir 3D hasil pemodelan inversi bisa merepresentasikan kondisi bawah permukaan wilayah penelitian (Sudrajad, 2022). Model akhir ini selanjutnya diinterpretasi untuk mendapatkan informasi densitas, kedalaman, dan bentuk geometri struktur bawah permukaan lokasi panasbumi Kampung Mosso. Model akhir yang diperoleh bisa dilihat pada gambar 6.

Model akhir 3D struktur bawah geotermal bumi Kampung Mosso yang dihasilkan dari proses inversi memiliki distribusi nilai densitas yang cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman (gambar 6). Dari nilai kontras densitas model akhir (gambar 6) terlihat bahwa pada kedalaman 0-1,2 km (lapisan 1 dan 2), distribusi kontras densitas sesuai dengan formasi satuan geologi daerah penelitian. Dari model akhir pada kedalaman tersebut diperoleh nilai densitas batuan permukaan pada Formasi aluvial dan endapan pantai (Qa) berkisar pada nilai 1,90 - 2,23 gram/cm³ dan pada Formasi Jayapura berkisar pada nilai 2,21 - 2,65 gram/cm³. Sedangkan pada kedalaman 1,2-6,0 km pada model akhir diperoleh adanya distribusi batuan berdensitas tinggi berkisar 2,80-3,10 gram/cm³ yang kemungkinan berasal dari lapisan astenosfer. Hal ini diperkuat dengan pola distribusi densitas yang volumenya meningkat seiring bertambahnya kedalaman (gambar 6) dan diperkuat juga dengan pola klosur anomali tinggi pada peta kontur anomali gravitasi lokal dan regional (gambar 2) yang menunjukkan anomali tinggi menyambung karena berasal dari batuan yang paling dalam ke batuan yang lebih dangkal. Batuan densitas tinggi tersebut diinterpretasikan sebagai batuan panas (*hot rock*) atau intrusi tubuh magma yang berperan menjadi sumber panas (*heat source*) pada sistem geotermal mata air panas Kampung Mosso. Penampakan batuan panas (*heat*

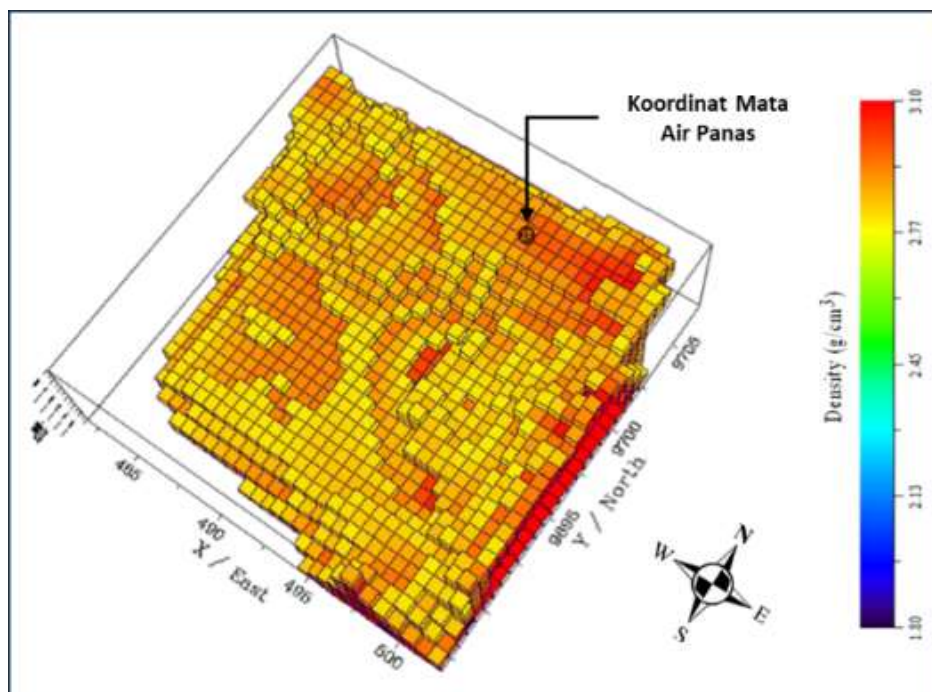
source) dalam model akhir 3D struktur bawah permukaan geothermal Kampung Mosso dari hasil pemodelan dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 6. Model akhir tiga dimensi (3D) struktur bawah permukaan daerah penelitian hasil inversi dengan iterasi 55 kali.

Model 3D struktur bawah permukaan kemudian diinterpretasi berdasarkan titik koordinat manifestasi mata air panas di permukaan. Adapun manifestasi mata air panas Kampung Mosso berdasarkan pengukuran GPS di lapangan berada pada koordinat geografis $140,957316^\circ$ BT dan $2,676717^\circ$ LS atau dalam koordinat UTM X= 495255,486 meter dan Y=9704140,104 meter dengan elevasi atau ketinggian permukaan 14 meter. Posisi titik koordinat manifestasi mata air panas pada model 3D bisa dilihat pada gambar 7 dan gambar 8. Dari gambar 7 terlihat bahwa titik lokasi mata air panas berada di atas geometri tubuh batuan panas (*hot rock*) yang paling dekat dengan permukaan (kedalaman 1,2 km). Selanjutnya guna mengidentifikasi lebih detail komponen sistem panasbumi Kampung Mosso, model akhir 3D diinterpretasi secara lateral atau perlapisan berdasarkan setiap penambahan kedalaman dengan patokan titik koordinat posisi manifestasi mata air panas (gambar 8). Dari hasil interpretasi model 3D secara lateral diperoleh bahwa titik koordinat panasbumi di permukaan sampai dengan kedalaman 0,9 km berada pada luasan batuan berdensitas rendah (gambar 8). Adapun batuan densitas rendah di permukaan berasosiasi dengan formasi aluvial dan endapan pantai (Qa) dan di kedalaman 0,6 - 0,9 km berasosiasi dengan endapan aluvial, batuan pasir, batuan gamping coral, batuan kapur, dan endapan laut dangkal dari formasi Jayapura (Qpj) dan formasi nubai (Tomn). Luasan wilayah berdensitas rendah di sekitar titik posisi mata air panas tersebut diinterpretasi sebagai lapisan dimana terdapat komponen reservoir atau akuifer air pada sistem geothermal Kampung Mosso. Hal ini berkaitan dengan nilai densitas rendah pada lapisan tersebut mengindikasikan bahwa

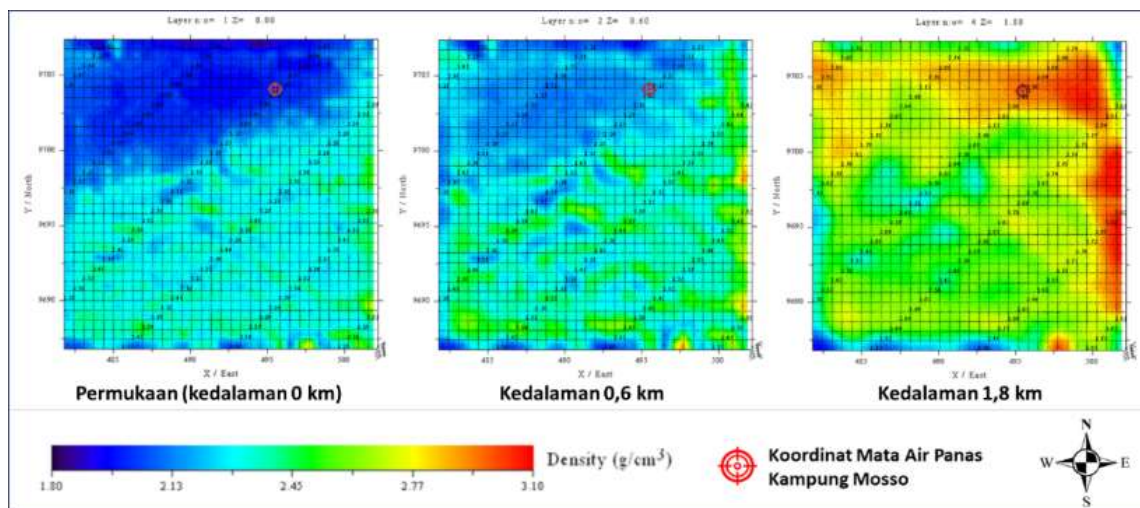
endapan atau batuan di lapisan tersebut memiliki porositas tinggi sehingga merupakan wilayah cekungan air tanah yang dapat menyimpan air dari zona resapan di sekitar jalur aliran Sungai Mosso dan Sungai Tami.



Gambar 7. Model densitas batuan panas (*hot rock*) atau intrusi tubuh magma sebagai komponen sumber panas (*heat source*) pada sistem geotermal Kampung Mosso.

Berdasarkan gambar 8, titik posisi mata air panas berada jelas di atas batuan panas (*hotrock*) yang lebih dekat ke permukaan dibandingkan di sebelah utara maupun sebelah selatan posisi manifestasi mata air panas tersebut. Berkaitan dengan hal tersebut, untuk mengidentifikasi secara lebih detail maka dilakukan interpretasi model akhir dalam bentuk penampang bawah permukaan secara melintang dan membujur melewati posisi manifestasi mata air panas Kampung Mosso. Adapun penampang bawah permukaan model 3D struktur bawah permukaan pada arah melintang (selatan-utara) dan arah membujur (barat-timur) dapat dilihat berturut-turut pada gambar 9. Berdasarkan penampang melintang bawah permukaan yang melalui titik posisi mata air panas di permukaan (gambar 9(a)) terlihat bahwa di bawah mata air panas terdapat lapisan potensial akuifer atau cekungan air tanah dan di bawahnya lagi terdapat lapisan berdensitas tinggi yang menjulang ke atas mendekati lapisan akuifer air tanah. Kemungkinan besar lapisan berdensitas tinggi tersebut merupakan sumber panas dari sistem panas bumi yang berupa tubuh intrusi batuan panas (*hot rock*). Adapun berdasarkan penampang melintang bawah permukaan, ketebalan lapisan densitas rendah yang berpotensi sebagai cekungan air tanah kurang lebih 0,8 km sedangkan batuan panas (*hot rock*) atau intrusi tubuh magma memiliki kedalaman 1,2 km di bawah permukaan tanah. Dengan demikian berdasarkan hasil tersebut maka manifestasi mata air panas di

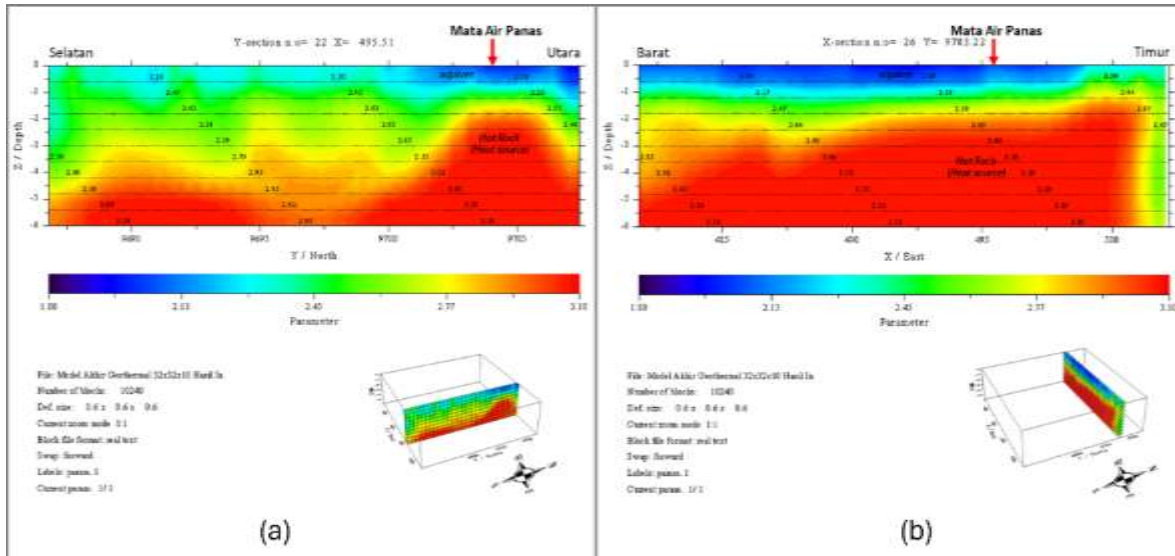
Kampung Mosso masuk dalam zona *upflow* karena dekat dengan posisi sumber panas. Adapun dari hasil interpretasi bentuk geometri batuan panas atau intrusi magma pada penampang model densitas 3D struktur bawah permukaan, sistem panasbumi di kampung Mosso kemungkinan merupakan sistem panasbumi vulkanik atau sesar tektonik.



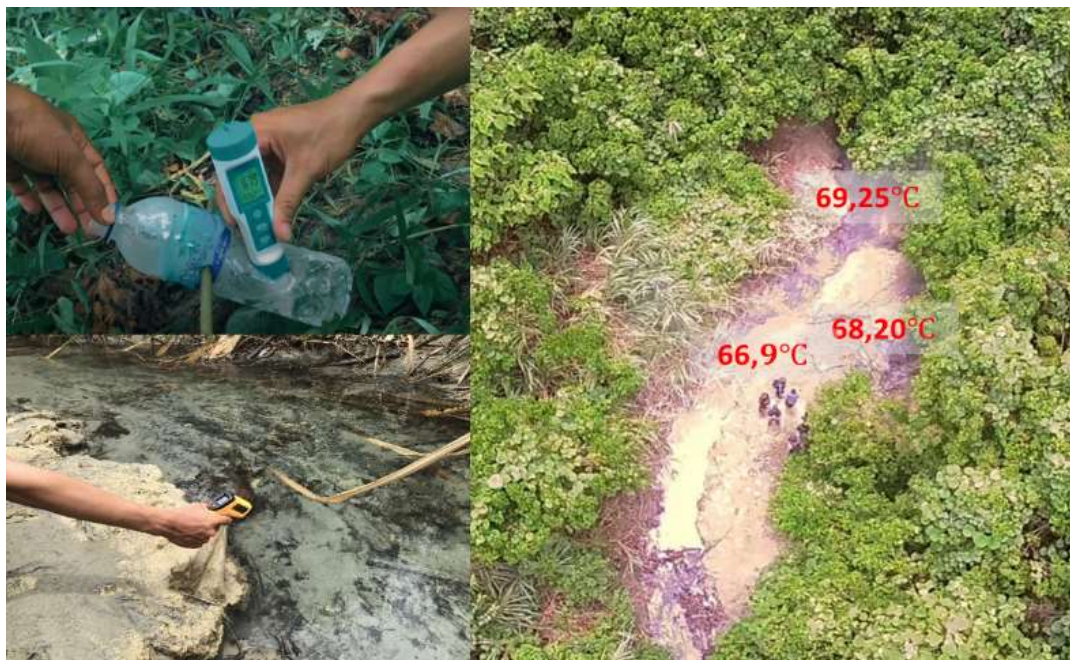
Gambar 8. Interpretasi secara lateral atau per lapisan, lapisan 1 kedalaman 0 km (kiri); lapisan 2 kedalaman 0,6 km (tengah); dan lapisan 4 kedalaman 1,8 km (kanan).

Berdasarkan penampang membujur model 3D struktur bawah permukaan (gambar 9(b)) terlihat bahwa lapisan potensial akuifer atau cekungan air tanah pada sistem geotermal Kampung Mosso memiliki cakupan yang melebar di sebelah barat dan lebih sempit di sebelah timur lokasi mata air panas. Dari penampang tersebut juga terlihat bahwa batuan berdensitas tinggi ($2,8\text{--}3,1 \text{ gram/cm}^3$) yang diinterpretasi sebagai batuan panas (*hotrock*) pada jarak 3,5 km di sebelah timur posisi mata air panas memiliki posisi yang lebih dangkal atau dekat ke permukaan. Namun batuan panas yang dekat dengan permukaan pada jarak 3,5 km dari titik manifestasi mata air panas Kampung Mosso tersebut di atasnya tidak terdapat lapisan berdensitas rendah yang potensial menjadi akuifer atau cekungan air pada sistem geotermal. Lebih lanjut berdasarkan gambar 9 juga teridentifikasi bahwa tepat pada lapisan potensial akuifer air tanah di bawah titik manifestasi mata air panas terdapat distribusi nilai densitas batuan yang sedikit lebih tinggi ($2,15 \text{ gram/cm}^3$) dibandingkan densitas lapisan potensial akuifer di sekitarnya ($1,97 \text{ gram/cm}^3$) pada kedalaman yang sama. Kontras densitas tersebut mengindikasikan bahwa kemungkinan ada struktur geologi yang membawa material batuan panas dari kedalaman 1,2 km menuju ke dekat permukaan sehingga suhu batuan tersebut dapat memanaskan air pada lapisan akuifer yang ada di atasnya. Berdasarkan hasil pengukuran suhu dan tingkat keasaman (pH) yang dilakukan di lokasi manifestasi mata air panas Kampung Mosso (gambar 10), nilai suhu air panas yang keluar di permukaan mencapai $69,25^\circ\text{C}$ sedangkan nilai pH air panas tersebut sebesar 6,7. Nilai pH air yang relatif netral tersebut menunjukkan bahwa air yang terkandung dalam akuifer air tanah pada sistem

panasbumi Kampung Mosso merupakan air meteorik yang masuk melalui zona resapan di sekitar aliran sungai yang dekat dengan mata air panas (Raharjo dkk, 2017).



Gambar 9. (a) Penampang melintang model 3D struktur bawah permukaan arah selatan-utara pada koordinat UTM X= 495,51 km; (b) Penampang membujur model 3D struktur bawah permukaan arah barat-timur pada koordinat UTM Y= 9703,22 km.



Gambar 10. Pengukuran suhu dan pH air pada manifestasi mata air panas Kampung Mosso.

Adapun nilai suhu air panas di permukaan sebesar $69,25^{\circ}\text{C}$ masuk kategori manifestasi panasbumi dengan suhu rendah (kurang dari 125°C). Namun apabila melihat hasil identifikasi komponen sumber panas (*heat source*) berdasarkan model 3D struktur bawah permukaan yang diperoleh, maka terdapat potensi untuk memperoleh suhu yang lebih tinggi dengan melakukan pemboran lebih dalam pada titik akuifer air tanah yang paling dekat dengan batuan panas yang menjulang mendekati permukaan (gambar 9). Dengan demikian sistem geotermal Kampung Mosso berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga geotermal dengan tipe siklus biner. Namun sebelum memasuki tahap pemboran untuk keperluan ekstraksi sumber daya geotermal, dibutuhkan penelitian lebih lanjut dengan metode survei geofisika lainnya seperti dengan menggunakan metode geolistrik, metode elektromagnetik, metode seismik, atau metode suhu guna lokasi potensial untuk melakukan pemboran serta untuk mengetahui kedalaman komponen lapisan tudung tidak permeabel (*claycap*) dan struktur yang mengontrol sistem geotermal secara lebih spesifik.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil interpretasi komponen sistem geotermal mata air panas Kampung Mosso dari model densitas 3D struktur bawah permukaan hasil pemodelan berdasarkan data gravitasi dan densitas sampel batuan, dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain: (1) Model akhir 3D struktur bawah permukaan menunjukkan bahwa sistem geotermal non-vulkanik di mata air panas Kampung Mosso kemungkinan merupakan kelompok sistem panasbumi vulkanik tua. (2) Sumber panas (*heat source*) pada sistem panasbumi Kampung Mosso merupakan batuan panas atau intrusi tubuh magma berdensitas tinggi ($2,8\text{-}3,1\text{ gram/cm}^3$) pada kedalaman sekitar 1200 meter di bawah manifestasi mata air panas. (3) Akuifer air pada sistem panasbumi Kampung Mosso berada pada lapisan dengan densitas rendah ($1,90\text{-}2,23\text{ gram/cm}^3$) yang membentuk cekungan air tanah di sekitar titik lokasi manifestasi air panas dan berasosiasi dengan keberadaan formasi aluvial dan endapan pantai, Sungai Mosso, dan Sungai Tami.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aziz, K., N. (2018). *Identifikasi Struktur Bawah Permukaan di Lapangan Panasbumi Lamongan Berdasarkan Analisis Data Gravitasi GGMplus*. Tesis, Universitas Gadjah Mada. Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [2] Badan Geologi Kementerian ESDM. (2019). Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik di Indonesia. Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: <https://geologi.esdm.go.id/en/media-center/arsip-berita/sistem-panas-bumi-non-vulkanik-di-indonesia>.
- [3] Dow, D.B., Harahap, B.H. dan Hakim A.S. (1990). Peta Geologi Lembar Enarotali Irian Jaya. Peta Geologi. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Departemen Pertambangan dan Energi, Bandung.
- [4] Hirt, C. (2012). Efficient and accurate high-degree spherical harmonic synthesis of gravity field functionals at the Earth's surface using the gradient approach. *J. Geod.* 86(9), 729-744. doi:78610.1007/ s00190-012-0550-y.

- [5] Hirt, C., S.J. Claessens, T. Fecher, M. Kuhn, R. Pail, M. Rexer. (2013). New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*. 40(16), 4279-4283. doi: 10.1002/grl.50838.
- [6] Hochstein, M.P., Browne, P.R.L. (2000). Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. Editors: Haraldur Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press. 835-855.
- [7] Kana, J.D., Djongyang, N., Raïdandi, D., Nouck, P.N. dan Dadjé, A. (2015). A Review of Geophysical Methods for Geothermal Exploration, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 44, 87-95.
- [8] Lund, J.W. (2007). Development and Utilization of Geothermal Resources, *GHC-Bulletin*. 1-9.
- [9] Ochieng, L. (2013). Overview of Geothermal Surface Exploration Methods, Short Course VIII on Exploration for Geothermal Resources, Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, 31 Oktober – 22 November 2013.
- [10] Pirttijarvi, M. (2008). *Grablox, Gravity in-terpretation and modeling software based on a 3-D Block Model*. User's Guide. University of Oulu.
- [11] Raharjo, A. D. U., dkk. (2017). Potensi Panas Bumi di Kabupaten Manokwari Selatan Provinsi Papua Barat Berdasarkan Analisa Geokimia. *Jurnal Konversi*. 6(2), 83-88.
- [12] Sudrajad, B. (2018). *Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Wilayah Kabupaten Nabire di Bagian Utara Leher Burung Pulau Papua Menggunakan Pemodelan Inversi Tiga Dimensi (3D) dan Analisis Horisontal Derivatif Berdasarkan Data Anomali Gravitasi GGMplus*. [Tesis, Universitas Gadjah Mada]. Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [13] Sudrajad, B., Sutarman, T., Sinaga, E. S., & Ngaderman, H. (2024). Identifikasi Patahan Seismo-Tektonik Jayapura Berdasarkan Pemodelan inversi 3D data gravitasi. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(1), 47–64. <https://doi.org/10.23960/jge.v10i1.372>
- [14] Sudrajad, B. (2022). Pemodelan Inversi Tiga Dimensi (3D) Struktur Bawah Permukaan Kelompok Batuan Ofiolit di Distrik Uwapa, Kabupaten Nabire, Papua Sebagai Referensi Potensi Sumber Daya Mineral Berdasarkan Data Anomali Gravitasi GGMplus. *Proseding Seminar Nasional MIPA UNIPA*. 17 Februari 2022, 109-116.
- [15] Sudrajad, B. (2023). Analisis Deskriptif Perbandingan Data Sekunder Gravitasi GGMplus Terhadap Data Gravitasi Lapangan Panas Bumi Gunung Lawu dan Data Gravitasi Stasiun Referensi (*Gravity Base Station*) di Pulau Papua, *Jurnal Fisika Papua* 2(1), 25-34. doi: 10.31957/jfp.v2i1.22.
- [16] Suwarna, N. dan Noya, Y. (1995). Peta Geologi Lembar Jayapura (Pegunungan Cycloops) skala 1:250.000. Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- [17] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherriif, R.E., dan Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, London.
- [18] Wangsa, A., Ismail, N., dan Marwan. (2018). Interpretasi Kuantitatif Data Anomali Gravitasi di Kawasan Panas Bumi Seulawah Agam, Aceh Besar. *Jurnal Aceh Phys.Soc*.7(1), 6-12.