JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)
Vol. 10 No. 01, Maret 2024 (47-64) https://doi.org/10.23960/jge.v9i2.372

IDENTIFIKASI PATAHAN SEISMO-TEKTONIK JAYAPURA BERDASARKAN PEMODELAN INVERSI 3D DATA GRAVITASI

IDENTIFICATION JAYAPURA SEISMO-TECTONIC FAULT BASED ON 3D INVERSE MODELING OF GRAVITY DATA

Bangkit Sudrajad[1*], Tatang Sutarman[2], Ego Srivajawaty Sinaga[3], Hubertus Ngaderman [4]

[1,2,3] Teknik Geofisika, Fakultas MIPA, Universitas Cenderawasih; Jl. Kamp. Wolker, Distrik Heram, Kota Jayapura, Indonesia, 99333.
[4] Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Cenderawasih; Jl. Kamp. Wolker, Distrik Heram, Kota Jayapura, Indonesia, 99333.

Received: 2023, November 17th
Accepted: 2024, March 1st

Keywords:
3D modeling;
Earthquake;
Fault structures;
GGMplus;
Gravity anomaly.

Corespondent Email:
bangkitsudrajad@gmail.com

How to cite this article:

Sudrajad, B., Sutarman, T., Sinaga, E.S., & Ngaderman, H. (2024). Identifikasi Patahan Seismo-Tektonik Jayapura Berdasarkan Pemodelan 3D Data Gravitasi. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi),* 10(01), 47-64.

Abstrak. Pada permulaan tahun 2023 Kota Jayapura dan sekitarnya mengalami peristiwa gempabumi dengan seismisitas yang tinggi dan terjadi terus menerus. Gempabumi tersebut termasuk '*Black Swan Earthquakes*' karena di luar prediksi para ahli; langka terjadi; dan sumber gempabumi belum terpetakan dengan baik. Berkaitan dengan hal tersebut maka dilakukan pemodelan 3D struktur bawah permukaan menggunakan metode gravitasi untuk mengidentifikasi struktur patahan pada sebaran episenter gempabumi Jayapura. Data yang digunakan adalah sebanyak 9021 titik data medan gravitasi GGMplus yang melingkupi wilayah darat dan laut; data model elevasi digital; data hiposenter gempabumi; data peta geologi; dan data densitas sampel batuan di lapangan. Dari hasil pengolahan peta anomali gravitasi dan pemodelan inversi 3D struktur bawah permukaan, ditemukan pola kontur anomali gravitasi dan distribusi densitas bawah permukaan yang mengindikasi keberadaan patahan di dasar laut sebelah utara Kota Jayapura pada koordinat 2,44092° LS (UTM Y=9730,20 km). Berdasarkan hasil interpretasi model akhir 3D dapat disimpulkan bahwa patahan gempabumi yang teridentifikasi tersebut merupakan patahan naik dengan orientasi membujur berarah Barat-Timur.

Abstract. *In early 2023, the Jayapura City and its surroundings experienced an earthquake with high seismicity that occurred continuously. This earthquake was included in the 'Black Swan Earthquakes' because it was beyond experts' predictions; rare; and the source of the earthquake has not been well mapped. In this regard, 3D modeling of subsurface structures was carried out using the gravity method to identify fault structures in the epicenter distribution of the Jayapura earthquake. The data used is 9021 GGMplus gravity field data points covering land and sea areas; digital elevation model data; earthquake hypocenter data; geological map data; and density data on rock samples in the field. From the results of processing the gravity anomaly map and 3D inversion modeling of subsurface structures, a contour pattern of gravity anomalies and subsurface density*

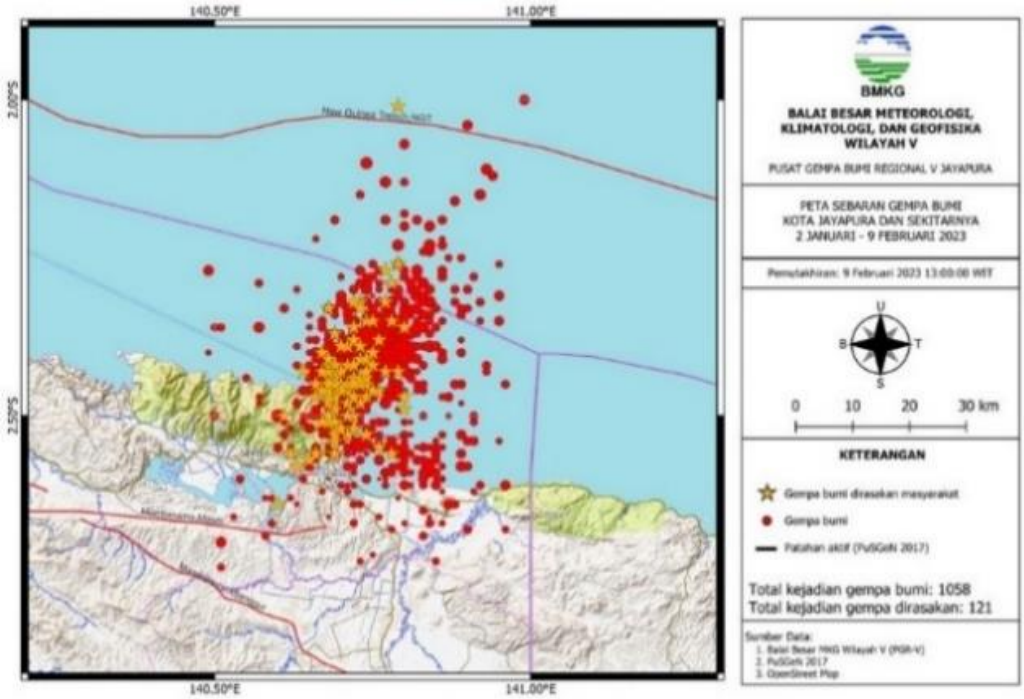
© 2024 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

distribution was found which indicates the presence of a fault on the seabed north of Jayapura City at coordinates 2.44092° South Latitude (UTM Y=9730.20 km). Based on the results of the final 3D model interpretation, it can be concluded that the identified earthquake fault is a thrust fault with a longitudinal orientation trending West-East.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah rawan bencana alam, seperti bencana gempabumi, tsunami, longsor dan letusan gunung api. Hal ini disebabkan oleh letak geografis Indonesia yang berada pada lokasi pertemuan lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Aktivitas lempeng-lempeng tektonik tersebut menyebabkan wilayah Indonesia banyak sekali terjadi bencana gempabumi dengan seismisitas yang sangat tinggi. Salah satu pulau di Indonesia yang mempunyai seismisitas tinggi adalah Pulau Papua yang terletak di bagian timur Indonesia. Pulau Papua merupakan wilayah yang mengalami zona tumbukan antar lempeng. Pulau Papua merupakan salah satu daerah di dunia yang dianggap memiliki kondisi tektonik yang kompleks (Irsyam dkk., 2010).

Wilayah Kota Jayapura dan sekitarnya pernah mengalami rentetan kejadian gempabumi secara terus menerus sepanjang bulan Januari-Februari tahun 2023 (**Gambar 1**). Gempabumi besar (*main shock*) yang pertama terjadi adalah pada tanggal 2 Januari 2023 yang kemudian disusul dengan banyak rentetan gempabumi setelahnya di sekitar wilayah Kota Jayapura. Peristiwa gempabumi tersebut tidak hanya menyebabkan kerugian secara materil tetapi juga menyebabkan korban jiwa dan kepanikan masyarakat di Jayapura.



Gambar 1. Peta sebaran gempabumi Jayapura Bulan Januari-Februari 2023 (BMKG, 2023).

Berdasarkan **Gambar 1** di atas dapat dilihat sebaran distribusi seismisitas episenter keseluruhan gempa bumi yang terjadi pada Bulan Januari. Lokasi distribusi episenter gempabumi mayoritas terletak di daerah pesisir pantai meskipun tidak mengakibatkan terjadinya tsunami tetapi perlu diwaspadai karena pantai utara

Jayapura termasuk wilayah rawan tsunami dengan potensi tinggi.

Berdasarkan informasi media daring Cenderawasih Pos, peristiwa gempabumi Jayapura mengakibatkan beberapa kerusakan bangunan, antara lain: Mall Jayapura, Swissbell Hotel, Rumah Sakit Provita, Dermaga DPRD, dan beberapa kompleks pertokoan di Bucend II Entrop. Selain itu peristiwa gempabumi tersebut juga sempat menimbulkan kepanikan warga yang memilih mengungsi dari tempat tinggalnya (Cenderawasih Pos, 2023). Berdasarkan data Badan Geologi, distribusi permukiman penduduk yang mengalami guncangan gempabumi berada pada kawasan rawan bencana gempabumi menengah hingga tinggi. Dari data yang dirilis oleh BMKG, total gempabumi yang terjadi sejak 2- 24 Januari adalah sebanyak 811 gempabumi. Dari total 811 gempabumi yang terjadi pada selang waktu tersebut, 69 gempabumi di antaranya dapat dirasakan guncangannya. Magnitudo gempabumi yang dapat dirasakan di Kota Jayapura dan Kabupaten Jayapura memiliki rentang nilai antara 2,6 hingga 5,4. Berdasarkan data mekanisme sumber (*focal mechanism*), posisi episenter, dan kedalaman hiposenter dari GFZ Jerman, gempabumi magnitudo 5,4 tersebut diperkirakan berasosiasi dengan aktivitas patahan atau sesar aktif berarah timurlaut-baratdaya, dan mekanisme patahan *oblique* dengan komponen normal serta patahan geser berarah timur-barat (Purnama & Fardaniah, 2023).

Gempabumi yang terjadi di Kota Jayapura menurut Kepala Pusat Gempabumi dan Tsunami Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) merupakan '*Black Swan Earthquak*e' atau fenomena gempabumi yang langka terjadi (Tim Detikcom, 2023). Istilah '*Black Swan'* atau angsa hitam sendiri mengacu pada kejadian langka, di luar perkiraan biasa dan sulit diprediksi (Taleb, 2007). Salah satu penyebab gempabumi Kota Jayapura sulit diprediksi potensi terjadinya karena masih sedikit informasi mengenai kondisi geologi khususnya informasi struktur bawah permukaan. Dengan demikian perlu upaya untuk mengetahui bentuk geometri dan densitas batuan pada struktur sesar-sesar aktif dan sesar-sesar prediksi yang belum teridentifikasi secara geologi di sekitar lokasi sebaran distribusi gempabumi Jayapura.

Pemodelan dalam geofisika merupakan salah satu cara yang bisa dipakai untuk identifikasi struktur geologi di bawah permukaan. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk memodelkan struktur bawah permukaan adalah metode gravitasi (Sudrajad, 2022; Sarkowi dkk., 2023). Medan gravitasi dari struktur patahan yang menjadi sumber gempabumi khususnya patahan naik, patahan turun, dan oblique dapat diolah untuk kemudian digunakan dalam pemodelan. Pemodelan dalam metode gravitasi dapat dikerjakan dalam bentuk tiga dimensi (3D). Pemodelan inversi 3D cocok untuk kasus struktur yang kompleks seperti pada daerah penelitian. Pemodelan dalam metode gravitasi dapat dikerjakan menggunakan data primer hasil pengukuran di lapangan maupun dengan menggunakan data sekunder seperti data gravitasi satelit dan model gravitasi global GGMplus (Curtin University & Technical University Munich, 2012). Data sekunder gravitasi tersebut bisa dimanfaatkan untuk mengidentifikasi target geologi seperti struktur patahan yang berukuran besar atau yang sulit dijangkau di lapangan oleh karena medan yang terjal atau akses transportasi yang terbatas (Sudrajad, 2018; Permana dkk., 2023). Dengan demikian maka struktur patahan aktif dengan mekanisme patahan *oblique* dengan komponen normal atau naik dan segmentasi sesar-sesar prediksi di sekitar lokasi distribusi dapat diteliti menggunakan pemodelan dengan metode gravitasi.

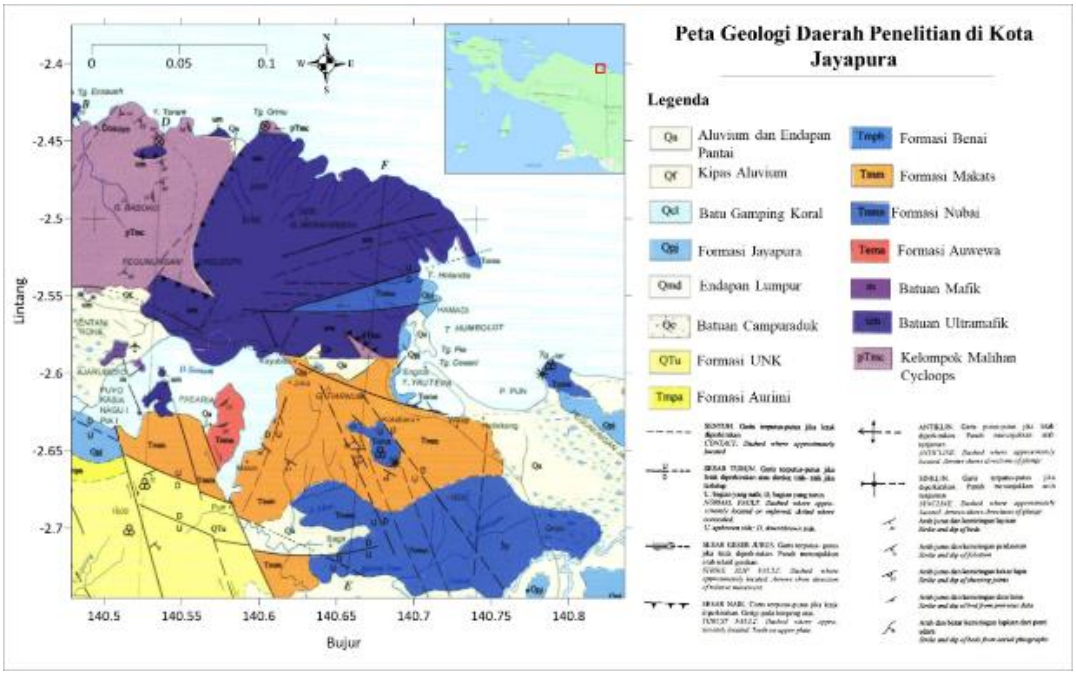
Berdasarkan uraian di atas, maka penulis berinisiatif melakukan penelitian yang berjudul "Identifikasi Patahan Seismo-Tektonik Jayapura Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Data Gravitasi". Penelitian ini dilakukan karena informasi struktur bawah permukaan khususnya struktur sesar di lokasi distribusi hiposenter gempabumi Kota Jayapura masih kurang. Selain itu penulis juga telah melakukan validasi terhadap data sekunder gravitasi GGMplus melalui analisis deskriptif perbandingan data gravitasi

GGMplus terhadap data medan gravitasi lapangan panas bumi Gunung Lawu dan data medan gravitasi referensi di wilayah Papua. Adapun hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa data gravitasi GGMplus layak untuk digunakan dalam penelitian metode gravitasi di Pulau Papua (Sudrajad, 2023). Di samping itu mengingat padatnya pemukiman di Kota Jayapura yang memiliki risiko tinggi bencana gempabumi sehingga semakin mendorong peneliti untuk melakukan upaya mitigasi bencana dengan penelitian geofisika melalui pemodelan tiga dimensi (3D) menggunakan metode gravitasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Lokal Wilayah Penelitian

Berdasarkan **Gambar 2**, di wilayah penelitian terdapat beberapa struktur geologi berupa sesar normal, sesar naik, sesar mendatar antiklin, dan sinklin. Orientasi arah struktur regional pada batuan metamorf dan ultrabasa adalah timur-timurlaut – barat-baratdaya. Pada batuan sedimen struktur geologi memiliki arah umum baratlaut-tenggara, beberapa hampir mendekati barat-baratlaut, timur-tenggara dan utara-baratlaut. Struktur berarah umum selatan-tenggara ada pada batuan berumur Tersier, sedangkan struktur yang arahnya hampir utara-selatan ada pada batugamping Kuarter dan juga batuan metamorf (Suwarna & Noya, 1995).



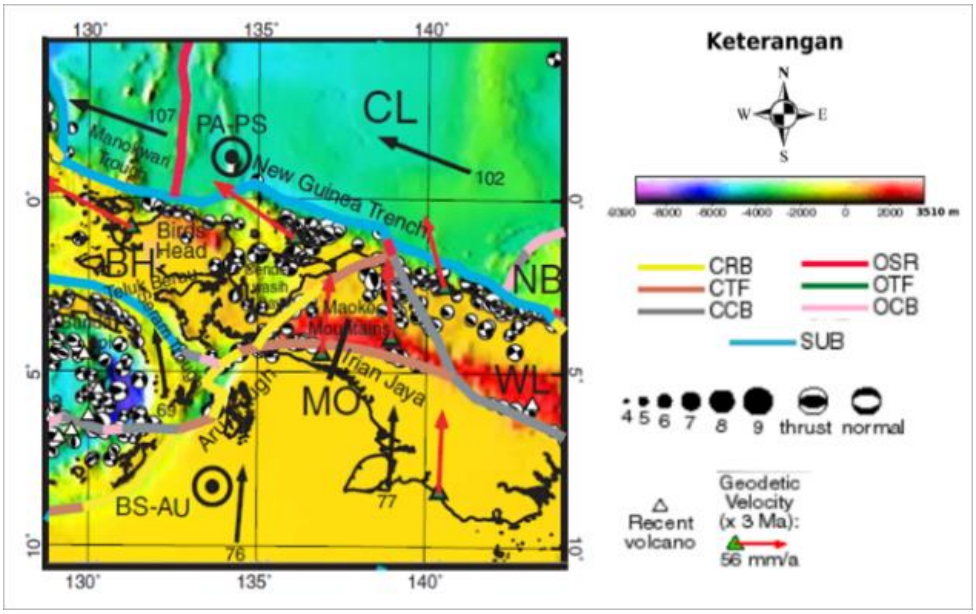
Gambar 2. Peta geologi wilayah penelitian (Suwarna & Noya, 1995).

2.2. Seismisitas Gempabumi Jayapura.

Berdasarkan data Pusat Gempa bumi dan Tsunami BMKG tercatat bahwa pernah terjadi beberapa gempa bumi yang merusak di wilayah Jayapura dan sekitarnya sejak tahun 1971 lalu tepatnya pada 10 Januari 1971 dengan kekuatan magnitudo mencapai magnitudo 7,3 (VI-VII MMI) di Jayapura yang mengakibatkan kerusakan banyak bangunan di Jayapura. Kemudian, pada 23 Juli 1979 gempabumi dengan magnitudo 5,3 (IV MMI) di Sentani. Selanjutnya, pada 19 Desember 1995 gempabumi dengan magnitudo 6,5 (IV MMI) di Jayapura. Gempabumi tersebut mengakibatkan 2 orang meninggal dunia akibat longsor di Wamena. Berikutnya gempabumi di Jayapura yang terjadi pada 28 Oktober 2017 dengan magnitudo 4,7 (IV MMI) di Jayapura mengakibatkan kerusakan bagunan yang meliputi kerusakan plafon gedung bioskop XXI ambruk dan plafon gedung lantai Mall Jayapura (Binti, 2023).

2.3. Mikro Lempeng di Wilayah Jayapura.

Seismisitas atau kegempaan di wilayah Kota Jayapura tidak lepas dari kondisi geologi Jayapura yang kompleks serta dekat dengan subduksi palung *NewGuinea* (NGT) dan batas lempeng samudera (COB) yang ada di sebelah utara Kota Jayapura (**Gambar 3**).



Gambar 3. Model digital batas antar lempeng Pulau Papua (Bird, 2003).

Palung NewGuinea dari sekitar garis bujur Pulau Biak ke arah timur merupakan daerah tektonik aktif (Puntodewo dkk., 1994), pergerakannya mengakomodasi deformasi konvergen sekitar 30 mm/tahun. Berdasarkan model digital batas lempeng (digital model of plate boundaries) berdasarkan data seismik gempabumi dan monitoring pergerakan GPS (Bird, 2003), wilayah Kota Jayapura dan pesisir utara Kota Jayapura terbentuk dari beberapa mikro lempeng yaitu Mikro Lempeng Woodlark (WL), Carroline (CL), dan Bismark Utara (NB) (**Gambar 3**). Setiap mikro lempeng-mikro lempeng tersebut memiliki vektor kecepatan geodetik yang berbeda sebagai akibat tekanan yang muncul pada zona deformasi aktif di wilayah tersebut (Müller dkk., 2019). Dengan demikian wilayah Jayapura menjadi wilayah deformasi aktif yang dapat menyebabkan aktivitas seismik yang tinggi di Jayapura.

3. METODE PENELITIAN

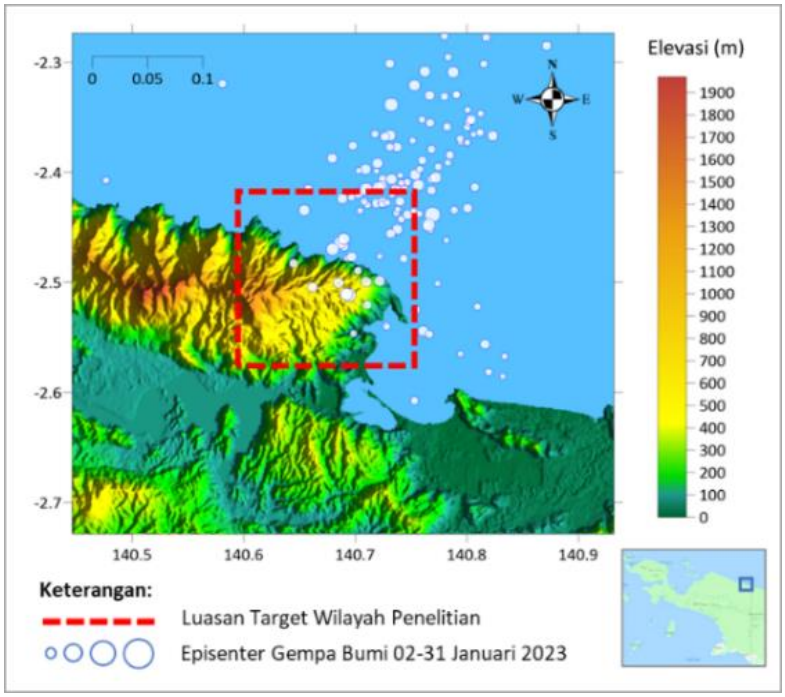
3.1. Lokasi dan Luasan Target Penelitian

Lokasi penelitian merupakan wilayah Kota Jayapura yang difokuskan pada zona seismisitas tinggi di mana terdapat sesar-sesar prediksi dan episentrum gempabumi selama Bulan Januari-Februari 2023. Luas daerah yang menjadi target penelitian adalah ± 462,25 km2 yang dibatasi antara 2,42°-2,61° LS dan 140.61°-140.80° BT. Peta daerah penelitian dan seismisitas gempabumi Jayapura Bulan Januari 2023 dapat dilihat pada **Gambar 4**.

3.2. Data dan Akuisisi Data

Data yang diolah pada penelitian ini merupakan data primer dan data sekunder di luasan wilayah penelitian (**Gambar 4**). Adapun data sekunder yang diolah adalah 9021 titik data medan gravitasi GGMplus, data elevasi titik ukur ERTM 2160, data model elevasi digital (DEM), data hiposenter gempabumi, dan data peta geologi. Sedangkan data primer yang diolah dalam penelitian adalah data densitas sampel batuan pada beberapa titik koordinat yang mewakili satuan geologi wilayah penelitian

yang diambil di lapangan. Pengukuran densitas (massa jenis) sampel batuan ini dilakukan dengan cara membagi hasil pengukuran massa dengan nilai hasil pengukuran volume setiap sampel batuan tersebut.

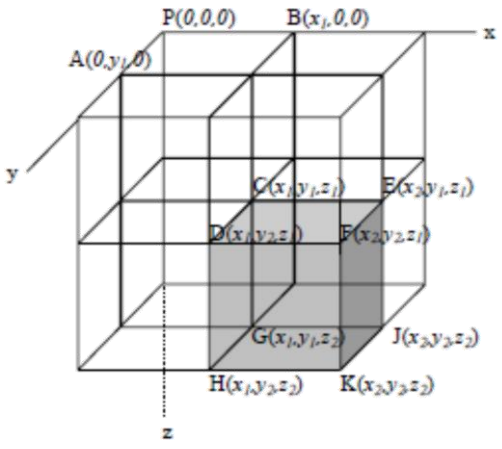


Gambar 4. Luasan target wilayah penelitian.

3.3. Pengolahan Data

Pada penelitian ini, pengolahan data medan gravitasi sekunder GGMplus diawali dengan perhitungan nilai medan gravitasi normal untuk setiap datum. Lebih lanjut dengan mengurangkan medan gravitasi observasi dengan medan gravitasi normal maka diperoleh nilai anomali gravitasi (Δg) (Torge, 2001). Anomali gravitasi (Δg) kemudian dikoreksi untuk memperoleh anomali gravitasi Bouguer Lengkap (ABL). Adapun koreksi-koreksi yang dilakukan meliputi koreksi udara bebas; koreksi Bouguer sederhana, dan koreksi *terrain* atau koreksi medan (Telford dkk., 1990). Anomali gravitasi total (ABL) yang diperoleh kemudian dipisahkan melalui proses kontinuasi ke atas sehingga diperoleh anomali regional dan residual/lokal. Anomali lokal yang inilah yang kemudian digunakan dalam pemodelan 3D struktur bawah permukaan.

Pemodelan tiga dimensi (3D) ini diawali dengan menyusun model awal (*initial model*) menggunakan bantuan *Software Bloxer 1.6c* (Pirttijärvi, 2012). Model awal berupa blok mayor mewakili volume daerah penelitian dan blok-blok minor dengan densitas tertentu menyusun isi dari blok mayor (**Gambar 5**).



Gambar 5. Susunan blok mayor dan blok minor dalam pemodelan 3D (Pirttijarvi, 2008).

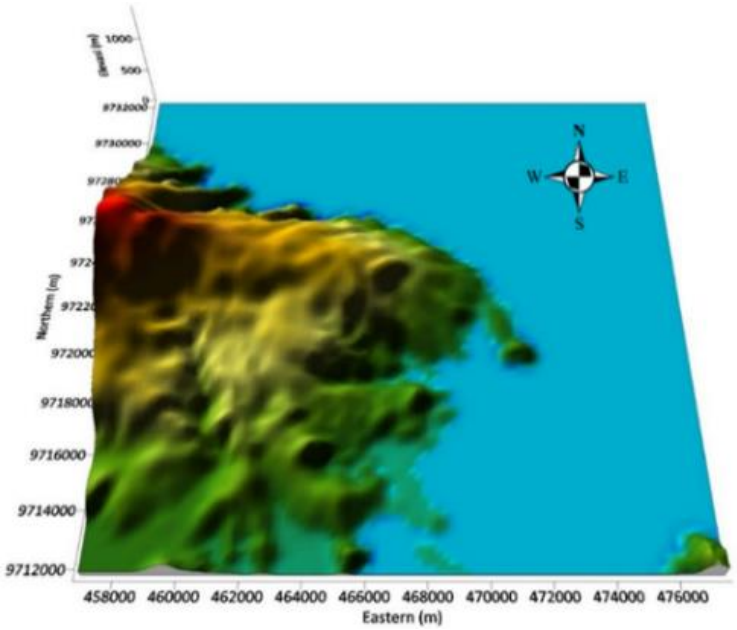
Model awal dalam penelitian ini dibuat dengan ukuran blok mayor: panjang (X) = 22,4 km; lebar (Y) = 22,4 km; dan kedalaman (Z) = 6,00 km. Sedangkan ukuran blok minornya antara lain: panjang (x) = 0,7 km; lebar (y) = 0,7 km; dan tinggi (z) = 1,0 km. Jumlah total blok minor yang menyusun isi blok mayor adalah 6.144 blok dan jumlah lapisan (dz) sebanyak 6 lapis. Model awal tersebut dibuat melalui pemodelan maju (*forward modeling*) berdasarkan syarat batas dari data densitas sampel batuan dan informasi peta geologi lembar Jayapura (Suwarna & Noya, 1995). Adapun medan anomali gravitasi di titik P (Δg_p) yang dihasilkan sebuah blok minor dengan densitas tertentu (**Gambar 5**) dapat dinyatakan oleh persamaan di bawah ini.

$$\Delta g_p = G_\rho \int_{x1}^{x2} \int_{y1}^{y2} \int_{z1}^{z2} \frac{z}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} dxdydz \quad (1)$$

Proses pemodelan inversi 3D pada penelitian ini menggunakan algoritma inversi Occam untuk parameter densitas (*Occam density*). Inversi Occam dimanfaatkan untuk optimasi model dalam melakukan pencocokan kurva (*curve fitting*) antara data gravitasi hasil kalkulasi model (*computed*) dengan data anomali gravitasi hasil observasi (*measured*). Adapun pemodelan inversi tersebut dilakukan dengan bantuan *Software Grablox 1.6b.* Pemodelan inversi dilakukan berdasarkan input data anomali gravitasi lokal dan model awal 3D melalui beberapa kali iterasi. Pengulangan proses inversi atau iterasi dilakukan sampai diperoleh model akhir terbaik dengan *error* atau *misfit* data (*data RMS*) terkecil. Model akhir 3D dalam fungsi densitas yang diperoleh berikutnya akan diinterpretasi dengan melihat model perlapisan dan penampang bawah permukaan guna memperoleh informasi kondisi struktur bawah permukaan wilayah penelitian dimana terdapat sebaran episenter gempabumi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

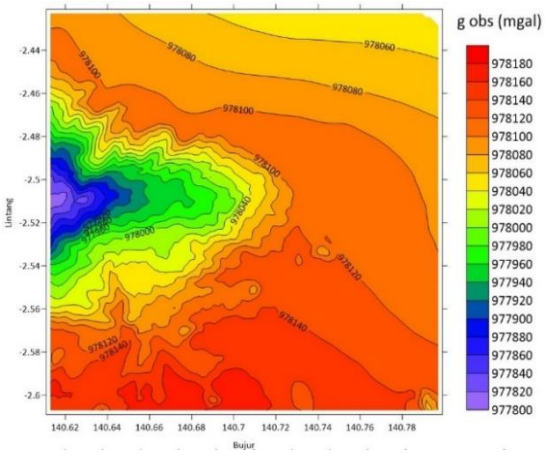
Pada Penelitian ini, luasan wilayah yang menjadi target pemodelan mencakup wilayah daratan Kota Jayapura dan wilayah laut dangkal di bagian utara Kota Jayapura dan Teluk Youtefa. Adapun data gravitasi GGMplus yang melingkupi wilayah penelitian memilki resolusi sangat tinggi dengan spasi antar titik data pada arah Utara-Selatan mendekati ~200 m (Hirt dkk., 2013). Luasan target daerah penelitian dapat dilihat pada Peta *Digital Elvation Model* (DEM) Tiga Dimensi daerah penelitian di bawah ini (**Gambar 6**).



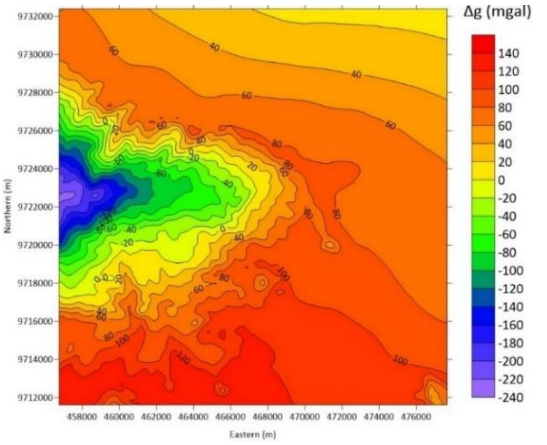
Gambar 6. Peta model elevasi digital 3D willayah target penelitian (EROS Center, 2018).

Penelitian ini diawali dengan pengolahan data sekunder medan gravitasi GGMplus melalui proses koreksi dan proses penapisan (*filtering*). Adapun koreksi yang dilakukan meliputi: (1) pengurangan nilai medan gravitasi observasi GGMplus (g_{obs}) yang ditunjukkan **Gambar 6** dengan nilai gravitasi normal (γ) sehingga diperoleh anomali gravitasi sebelum dikoreksi (**Gambar 8**); (2) koreksi udara bebas sehingga diperoleh anomali udara bebas (**Gambar 9**); koreksi Bouguer sederhana sehingga diperoleh anomali Bouguer sederhana (**Gambar 10**); dan koreksi medan sehingga diperoleh anomali Bouguer lengkap (ABL) yang bebas dari koreksi-koreksi (**Gambar 11**). Peta Kontur anomali Bouguer lengkap (ABL) merupakan anomali gravitasi total yang kemudian ditapis lolos rendah (*low pass filter)* dengan metode kontinuasi ke atas sehingga didapatkan anomali regional. Lebih lanjut, dari hasil pengurangan nilai anomali total (ABL) dengan anomali regional diperoleh anomali lokal/residual/ (**Gambar 12**). Data anomali gravitasi lokal/residual ini yang kemudian digunakan sebagai input dalam pemodelan inversi 3D berdasarkan data penunjang berupa data geologi dan data densitas sampel batuan di lapangan.

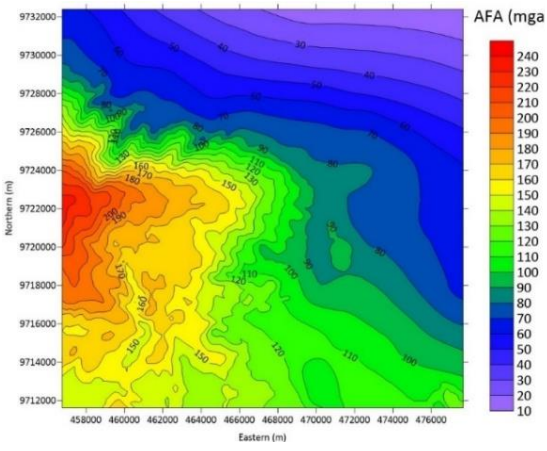
Berdasarkan **Gambar 7**, nilai medan gravitasi observasi di daerah penelitian berada pada rentang nilai 977809,91 - 978171,09 mgal. Berdasarkan **Gambar 6** dan **Gambar 7** terlihat korelasi antara elevasi titik data (topografi) dengan nilai medan atau gravitasi percepatan gravitasi observasi GGMplus. Adapun pada wilayah dengan elevasi tinggi memiliki nilai medan gravitasi yang rendah dibandingkan pada wilayah dengan elevasi rendah yang memiliki medan gravitasi tinggi seperti di wilayah laut. Berikutnya dengan mengurangkan nilai medan observasi GGMplus dengan medan gravitasi normal hasil perhitungan sebagai fungsi lintang dengan menganggap bahwa densitas bumi homogen sehingga diperoleh Peta anomali gravitasi yang belum terkoreksi (**Gambar 8**). Nilai anomali gravitasi di daerah penelitian berkisar pada rentang -225,42 sampai 138 mgal. Adapun pola kontur anomali gravitasi mirip dengan medan gravitasi observasi GGMplus.



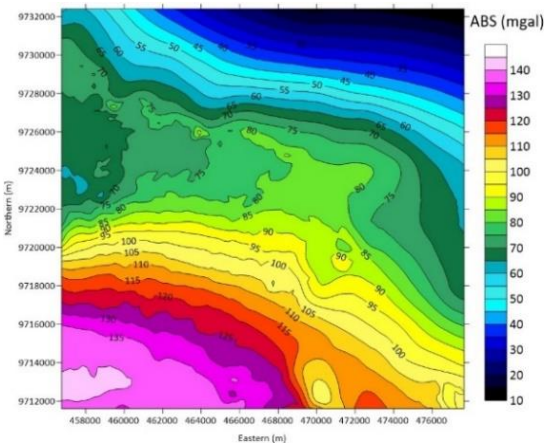
Gambar 7. Peta Kontur Medan Gravitasi observasi GGMplus wilayah penelitian.



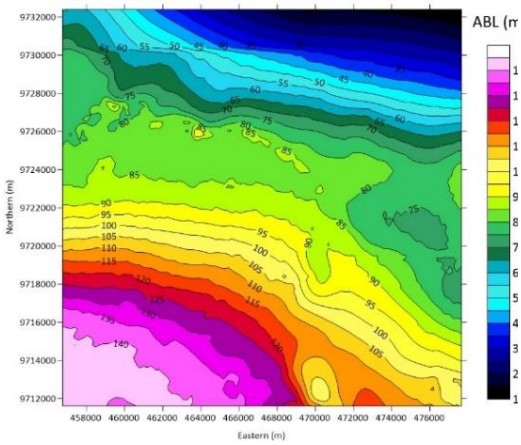
Gambar 8. Peta Kontur Anomali Gravitasi wilayah penelitian.



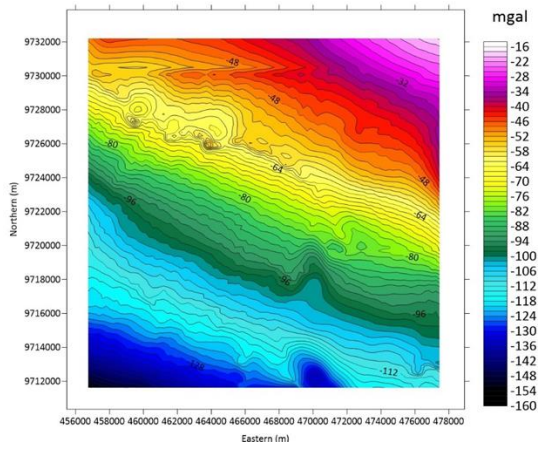
Gambar 9. Peta Kontur Anomali Udara Bebas wilayah penelitian.



Gambar 10. Peta Kontur Anomali Bouguer Sederhana (ABS) wilayah penelitian.



Gambar 11. Peta Kontur Anomali Bouguer Lengkap (ABL) wilayah penelitian.



Gambar 12. Peta Kontur Anomali Gravitasi Residual/lokal wilayah penelitian.

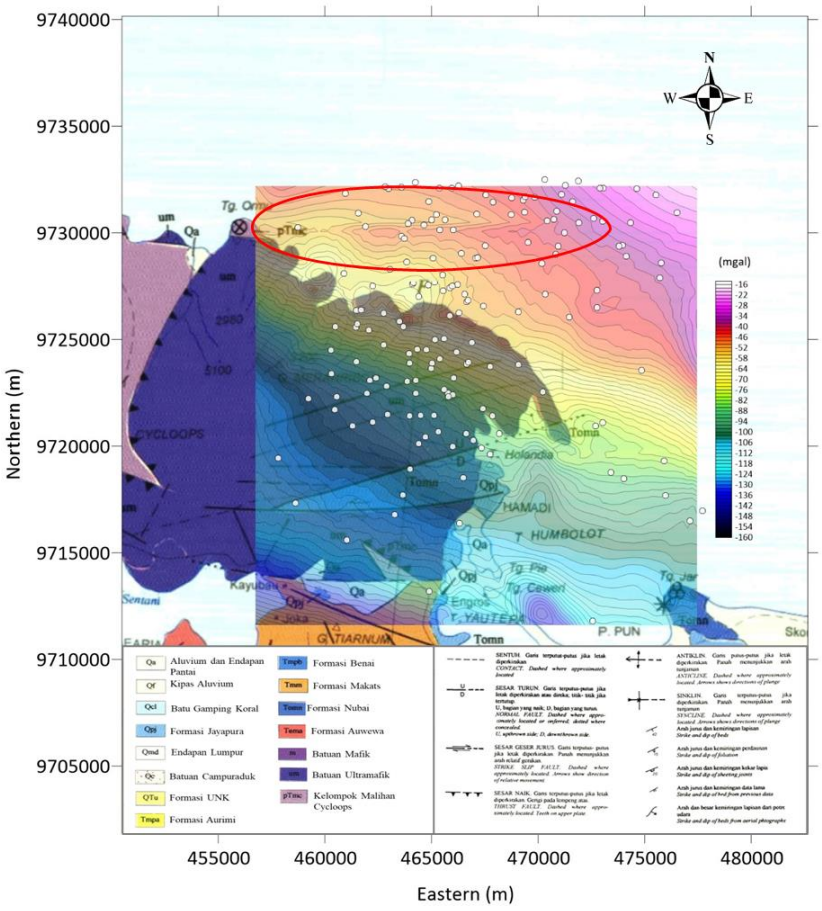
Dari hasil koreksi udara bebas (*free-air*) ini kemudian diperoleh Peta kontur Anomali udara bebas (AFA) yang ditunjukkan pada **Gambar 9**. Anomali gravitasi udara bebas di daerah penelitian berdasarkan Peta anomali udara bebas tersebut berkisar pada rentang 10,61-235,72 mgal. Dari peta anomali udara bebas (**Gambar 9**), terlihat bahwa sudah tidak terdapat pengaruh perbedaan elevasi untuk nilai gravitasi normal dan observasinya. Namun anomali udara bebas ini belum memperhitungkan pengaruh massa di atas geoid sampai dengan topografi sehingga masih perlu dilakukan koreksi topografi yang terdiri dari koreksi Bouguer sederhana dan koreksi medan *terrain.* Dari hasil koreksi Bouguer sederhana diperoleh peta kontur anomali Bouguer sederhana (**Gambar 10**).

Peta kontur anomali Bouguer sederhana ini masih mengandung kesalahan oleh karena efek gravitasi yang disebabkan residual topografinya. Kesalahan ini meliputi pengaruh gravitasi oleh karena lembahan di sekitar titik data yang terisi massa *slab* dan massa perbukitan yang lebih tinggi di sekitarnya titik data yang belum diperhitungkan saat meletakkan *slab* tak hingga. Dengan demikian maka dilakukan tahapan kedua dari koreksi topografi yaitu dengan melakukan koreksi *terrain* (Hammer, 1939). Dari hasil koreksi *terrain* ini kemudian dihasilkan peta kontur anomali Bouguer lengkap (**Gambar 11**). Berdasarkan Peta Kontur Anomali Bouguer Lengkap yang diperoleh, Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap di wilayah target penelitian berkisar pada rentang 10,61- 144,26 mgal.

Pada penelitian ini identifikasi struktur sesar pada sebaran episenter gempabumi Kota Jayapura Bulan Januari-Februari 2023 dilakukan melalui Pemodelan Inversi Tiga Dimensi (3D). Dengan demikian guna menangkap kontras anomali gravitasi yang menjadi indikasi keberadaan sesar maka dilakukan penapisan *(filtering)* guna memperoleh anomali gravitasi lokal /residual yang berasal dari struktur bawah permukaan dan batuan bawah permukaan yang lebih dangkal. Proses penapisan menggunakan metode kontinuasi guna memperoleh anomali gravitasi regional. Selanjutnya dengan mengurangkan anomali Bouguer lengkap/total (**Gambar 11**) dengan anomali gravitasi regional maka diperoleh

anomali lokal/residual di daerah penelitian. Peta Kontur Anomali Gravitasi Lokal/residual hasil *filtering* ditunjukkan oleh **Gambar 12**.

Berdasarkan **Gambar 12** nilai anomali gravitasi lokal/residual di wilayah penelitian berkisar pada rentang -156,75 sampai -19,03 mgal. Peta Anomali Gravitasi Residual yang diperoleh kemudian di-*overlay* dengan peta geologi (**Gambar 2**) dan dengan sebaran distribusi episenter gempabumi Jayapura (**Gambar 1**) hal ini dilakukan guna melakukan interpretasi awal berdasarkan pola klosur kontur anomali yang dikorelasi dengan peta geologi dan seismisitas gempabumi. Peta hasil *overlay* ditunjukkan pada **Gambar 13**. Dari hasil interpretasi **Gambar 13** diperoleh adanya klosur anomali memanjang dengan distribusi nilai anomali yang mengindikasi keberadaan patahan atau sesar di wilayah laut di bagian utara. Posisi yang diidentifikasi sebagai keberadaan sesar atau patahan berdasarkan anomali gravitasi lokal/residual dan seismisitas gempabumi ditandai dengan lingkaran garis merah (**Gambar 13**).



Gambar 13. Peta kontur anomali gravitasi lokal/residual di-*overlay* dengan peta geologi dan titik episenter gempabumi Jayapura Bulan Januari-Februari 2023.

Pada tahap awal pemodelan inversi 3D, terlebih dahulu dilakukan pengambilan densitas sampel batuan di lapangan pada setiap formasi geologi yang ada di wilayah daerah penelitian yang meliputi Formasi Jayapura (Qpj); Formasi Makats (Tmm); Formasi Kelompok Malihan Cycloops (PTmc); Formasi Nubai (Tomn) dan Formasi Ultramafik (um). Dokumentasi pengambilan densitas batuan di lapangan dan proses pengukuran densitas dapat di lihat pada **Gambar 14**. Densitas Sampel batuan diperoleh dengan mengukur massa dan volume batuan. Hasil nilai densitas di

lapangan ini selain digunakan dalam interpretasi model akhir juga digunakan sebagai acuan syarat batas dalam membangun model awal (*intial model*) berdasarkan informasi geologi. Hasil densitas rata-rata sampel batuan 2,50 g/cm^3 digunakan untuk membuat densitas wilayah daratan di permukaan. Rentang nilai parameter densitas model awal dibuat 1,98 - 3,15 g/cm^3.

Model awal (*initial model*) yang digunakan sebagai input pada pemodelan inversi 3D ini, dibuat dalam bentuk blok mayor sebagai volume daerah penelitian yang tersusun oleh blok-blok minor dengan densitas tertentu menggunakan bantuan *Software* Bloxer 1.5a. Model awal 3D struktur bawah permukaan wilayah target penelitian dapat dilihat pada **Gambar 15**. Lapisan pertama pada model awal dibuat berdasar hasil pengukuran densitas sampel batuan di lapangan, serta dengan membuat pola *hanging wall* pada area yang diduga sebagai sesar naik berdasarkan hasil interpretasi awal peta kontur anomali residual (**Gambar 13**). Kemudian lapisan 2 sampai 6 dibuat dengan densitas yang meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai dengan kondisi geologi formasi batuan ultrabasa.

Perbandingan data anomali gravitasi lokal/residual hasil observasi terhadap data anomali gravitasi lokal/residual hasil kalkulasi (*computed*) model awal dapat dilihat pada **Gambar 16**. Adapun model awal ini data hasil kalkulasi (*computed*) memiliki misfit atau *error* data (data RMS) sebesar 0,631756 atau 63,17%. Model awal tersebut selanjutnya digunakan sebagai input dalam pemodelan inversi menggunakan *Software Grablox* 2.1.

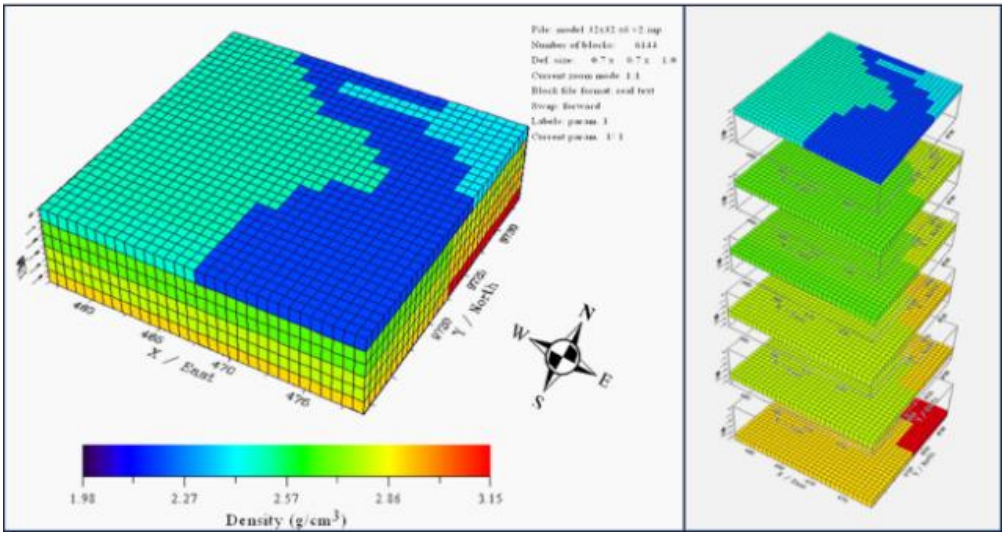
Model awal 3D struktur bawah permukaan diinversi dengan menggunakan algoritma inversi *Occam Density* guna memperoleh nilai parameter model yang terdiri dari parameter model densitas dan parameter geometeris. Adapun proses inversi yang dilakukan adalah sebanyak 30 kali iterasi. Dari hasil pemodelan inversi diperoleh model akhir dengan misfit atau *error* data (*data RMS*) sebesar 0,00532718 atau 0,53% (**Gambar 17**). Perbandingan data anomali gravitasi lokal/residual hasil observasi dengan data anomali gravitasi lokal/residual hasil kalkulasi (*computed*) model akhir dapat dilihat pada **Gambar 17**. Berdasarkan perbandingan nilai anomali pada **Gambar 17** tersebut, model akhir 3D memiliki misfit yang sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa data kalkulasi (*computed*) yang dihasilkan model akhir memiliki kecocokan yang tinggi dengan data observasi (*measured*). Dengan demikian model akhir yang dihasilkan dari pemodelan inversi dapat mewakili kondisi bawah permukaan wilayah penelitian. Model akhir ini kemudian diinterpretasi untuk memperoleh informasi densitas, bentuk geometri, dan kedalaman struktur bawah permukaan wilayah penelitian. Model akhir yang dihasilkan dapat dilihat pada **Gambar 18.**

Gambar 14. Dokumentasi kegiatan pengambilan sampel batuan pada setiap formasi geologi di lapangan dan pengukuran densitas batuan di laboratorium.

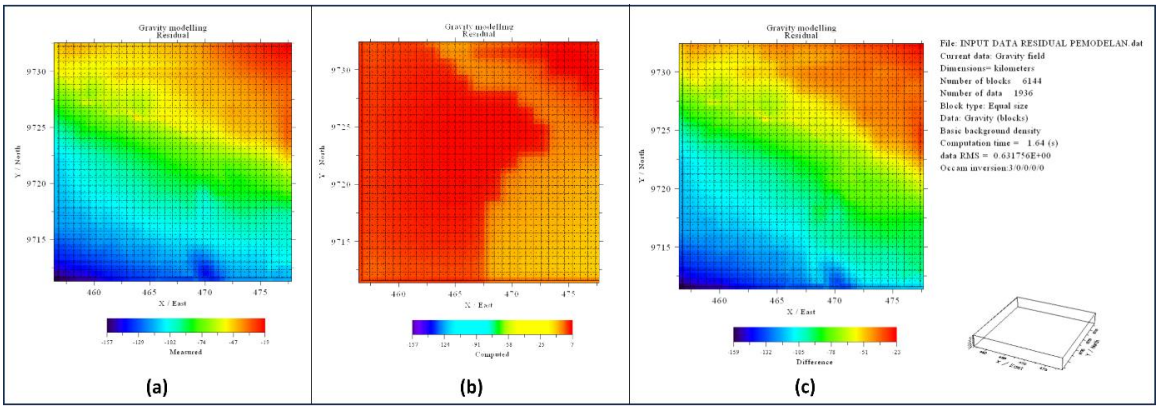
Berdasarkan **Gambar 17**, terlihat bahwa antara peta kontur data kalkulasi (*computed*) anomali gravitasi residual model akhir dan

nilai anomali gravitasi residual observasi (*measured*) memiliki kecocokan atau kemiripan pola kontur. Adapun berdasarkan **Gambar 18,** model akhir yang dihasilkan dari proses inversi memiliki distribusi nilai densitas yang cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman. Dari nilai kontras densitas model akhir ini menunjukkan adanya distribusi nilai densitas tinggi batuan bawah permukaan yang berkisar pada nilai 2,70 - 3,15 g/cm^3.

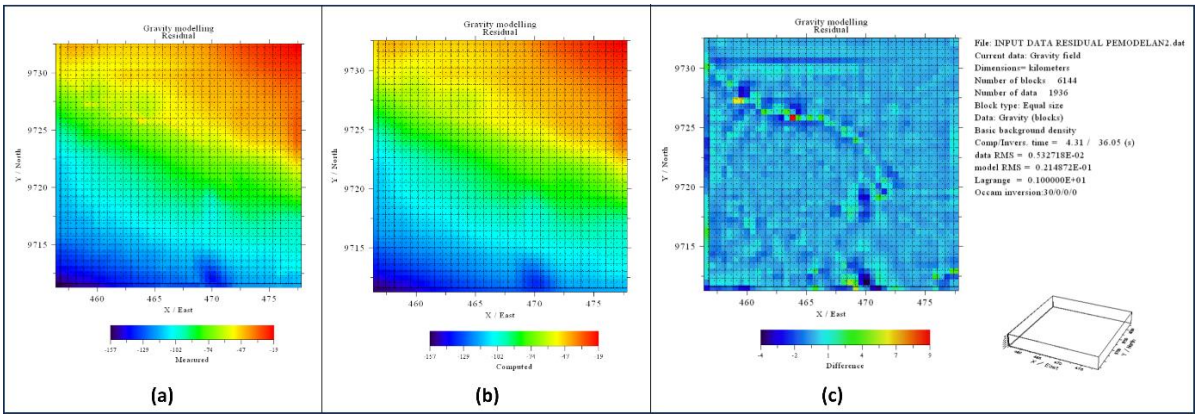
Distribusi blok-blok minor yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa pada luasan target penelitian Batuan Ultramafik merupakan jenis bantuan yang mendominasi lokasi penelitian. Di mana sesuai dengan informasi dari peta geologi dan hasil pengambilan sampel densitas batuan permukaan di lapangan, Formasi Ultramafik di permukaan didominasi oleh batuan Gabro dan Batuan Ultrabasa. Selain jenis batuan tersebut dari model akhir diperoleh bahwa dari kedalaman 1 km sampai dengan 6 km (lapisan 2-lapisan 6) terdapat pola distribusi batuan berdensitas tinggi berkisar 2,80-3,15 g/cm^3 yang membentuk pola intrusi (**Gambar 18**). Batuan berdensitas tinggi pada kedalaman tersebut diinterpretasikan sebagai Batuan Ultra basa dan Batuan Peridotit.



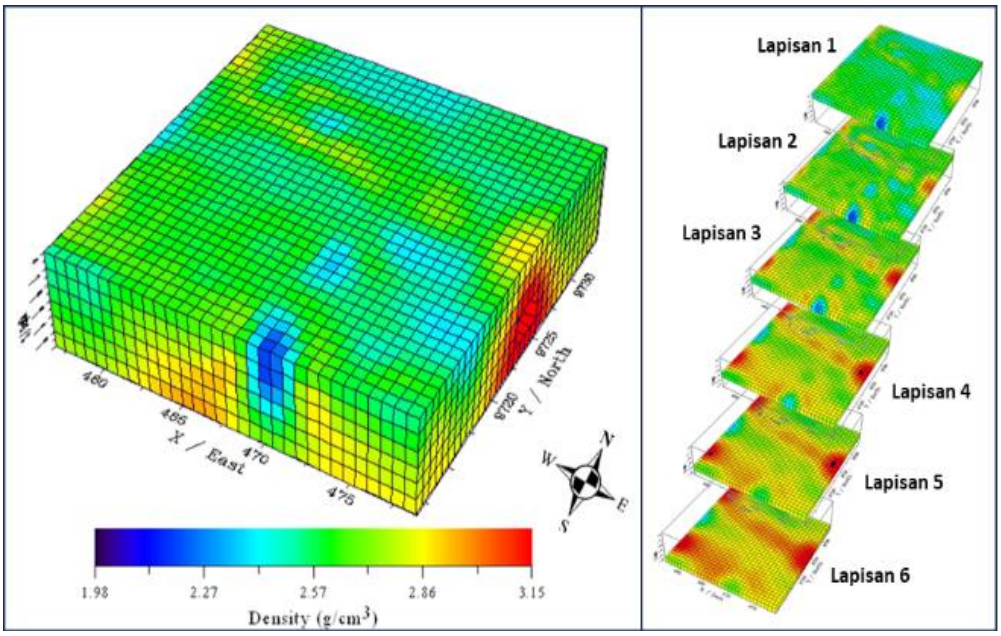
Gambar 15. Model awal 3D struktur bawah permukaan wilayah penelitian.



Gambar 16. (a) Anomali gravitasi lokal/residual observasi (*measusred*); **(b)** anomali gravitasi lokal/residual kalkulasi (*computed)* model awal; dan **(c)** Perbedaan (*difference*) antara anomali gravitasi lokal/residual kalkulasi (*computed*) model awal sebelum inversi terhadap anomali gravitasi lokal/residual observasi (*measusred*).



Gambar 17. (a) Anomali gravitasi lokal/residual observasi (*measusred*); **(b)** anomali gravitasi lokal/residual kalkulasi (*computed)* model akhir; dan **(c)** Perbedaan (*difference*) antara anomali gravitasi lokal/residual kalkulasi (*computed*) model akhir hasil inversi iterasi ke-30 terhadap anomali gravitasi lokal/residual observasi (*measusred*).

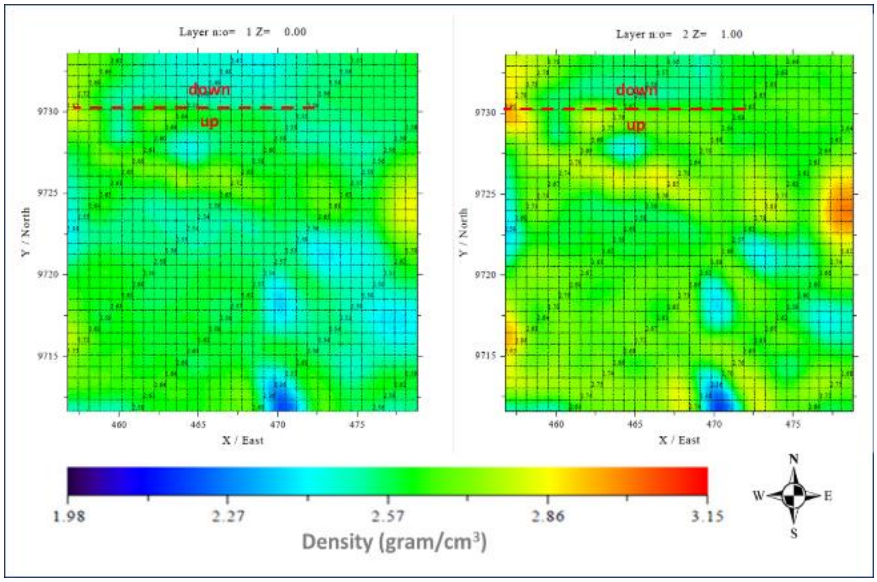


Gambar 18. Model akhir 3D struktur bawah permukaan wilayah penelitian hasil pemodelan inversi.

Sebelumnya dari hasil interpretasi awal peta kontur anomali residual (**Gambar 13**), teridentifikasi keberadaan patahan yang ditunjukkan oleh pola kontur memanjang pada arah Timur - Barat pada posisi lintang UTM Y=9730.20 km. Posisi yang diperkirakan sebagai keberadaan patahan atau sesar yang juga berasosiasi dengan seisimisitas distribusi episenter gempabumi. Berdasarkan interpretasi model akhir 3D (**Gambar 18**), struktur patahan tersebut dapat terlihat pada lapisan pertama dan lapisan kedua (**Gambar 19**).

Pada **Gambar 19**, *strike* patahan ditunjukkan dengan garis merah putus – putus. Pada lapisan satu sebelah selatan garis patahan memiliki densitas 2,57–2,72 g/cm^3 lebih tinggi dibandingkan densitas batuan di sebelah utara *strike* patahan (2,47 - 2,50 g/cm^3). Pada lapisan 2, bantuan di sebelah utara *strike* patahan memiliki densitas yang kurang lebih sama dengan nilai densitas batuan pada sebelah selatan di lapisan 1 pada kedalaman 1 km. Hal ini mengindikasikan bahwa bidang patahan di sebelah utara *strike* patahan merupakan

foot-wall patahan dan bidang patahan di sebelah selatan *strike* patahan merupakan *hanging-wall* patahan. Berkaitan dengan hal tersebut guna mengetahui jenis sesar tersebut apakah sesar naik atau sesar turun, maka dilanjutkan interpretasi model akhir 3D berdasarkan penampang bawah permukaan pada arah melintang selatan-utara atau tegak lurus terhadap arah *strike* patahan.



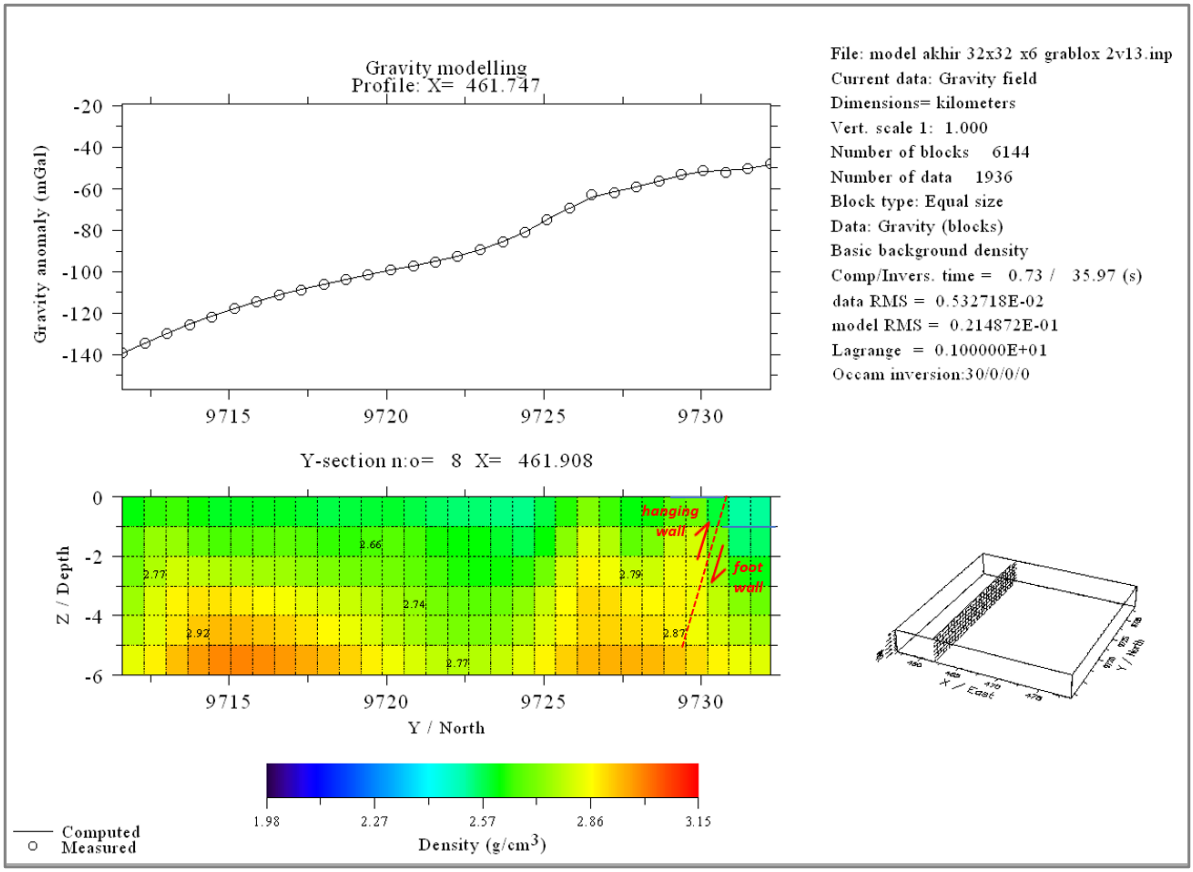
Gambar 19. Interpretasi Iapisan 1 (kiri) dan Iapisan 2 (kanan) model akhir 3D dalam mengidentifikasi sesar gempabumi.

Interpretasi penampang bawah permukaan model akhir 3D di arah melintang selatan-utara dapat dilihat pada **Gambar 20**, dan **Gambar 21**. Penampang bawah permukaan arah melintang pertama diambil pada koordinat UTM X=461,908 km (**Gambar 21**). Berdasarkan distribusi densitas dan batas kontak densitas pada koordinat UTM Y=9730,20 km di penampang tersebut, mekanisme patahan di wilayah tersebut merupakan patahan naik. Patahan naik pada **Gambar 20** ditunjukkan oleh garis merah. Selanjutnya dilakukan interpretasi penampang melintang struktur bawah permukaan yang sejajar dengan penampang pertama sesuai dengan kelurusan *strike* patahan dalam penampang melintang sejajar lainnya pada koordinat UTM X= 469, 596 km (**Gambar 21**).

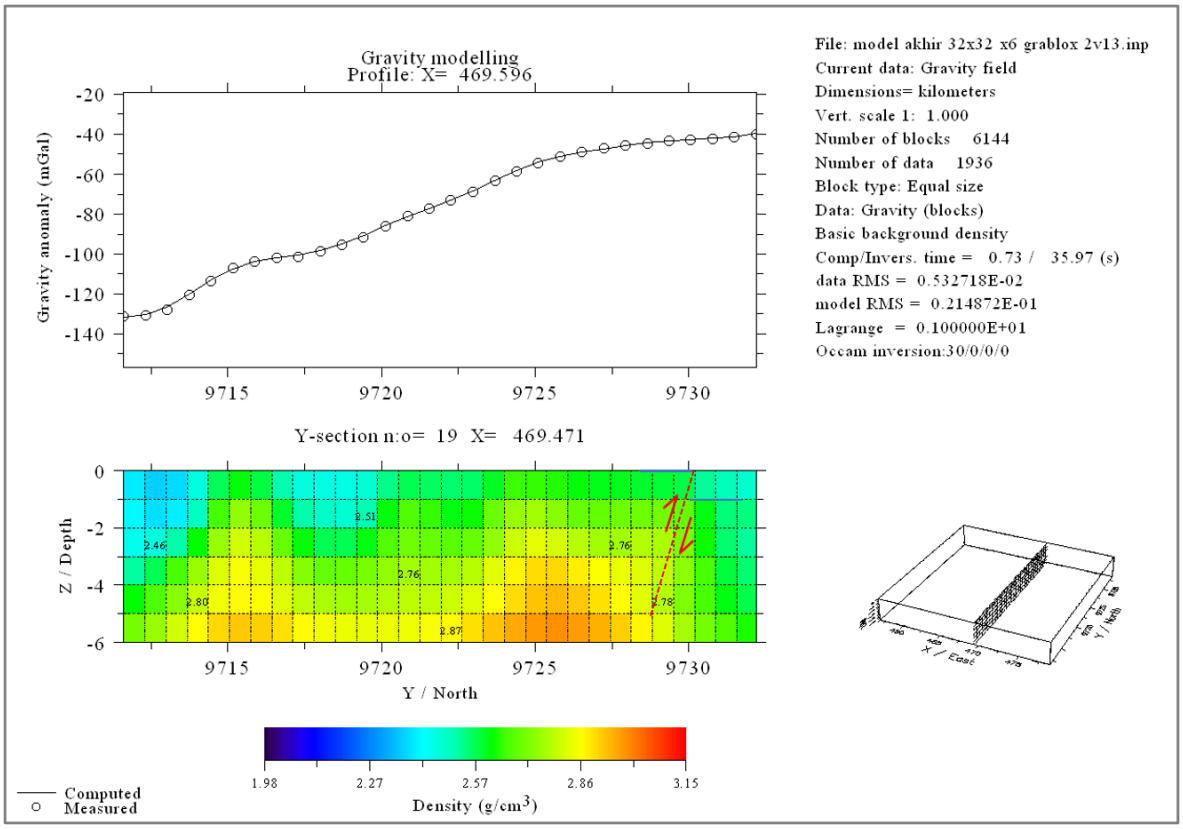
Berdasarkan interpretasi kedua penampang melintang bawah permukaan (**Gambar 20** dan **Gambar 21**) ditemui kelurusan pola mekanisme patahan dengan posisi *hanging wall* dan *footwall* berupa sesar naik (*trust fault*). Hal ini juga didukung dengan adanya pola intrusi yang melalui celah bidang pada dip patahan tersebut dengan ditunjukkan adanya distribusi batuan berdensitas tinggi dengan nilai densitas sekitar 2,80-2,90 g/cm^3. Batuan berdensitas tinggi tersebut kemungkinan masih berasosiasi dengan batuan Ultramafik Jayapura di wilayah daratan. Patahan naik yang teridentifikasi ini berdasarkan sebaran distribusi seismisitas hiposenter gempabumi Jayapura merupakan patahan aktif yang menjadi salah satu struktur patahan sumber lokasi hiposenter gempabumi Kota Jayapura pada Bulan Januari- Februari 2023.

Apabila dikaitkan dengan mekanisme sumber (*focal mechanism*) dari GFZ Jerman, yang menyatakan bahwa terdapat sesar geser berarah timur-barat pada gempabumi Jayapura magnitude 5,4, maka ada kemungkinan mekanisme gempabumi tersebut bukan hanya sesar geser melainkan kombinasi komponen sesar naik. Dengan demikian sesar tersebut kemungkinan merupakan sesar *oblique*. Teridenti-fikasinya patahan yang merupakan hasil mekanisme konvergen di lokasi penelitian

ini sesuai dengan kondisi tatanan tektonik Pulau Papua yang terbentuk pada zona tumbukan antara Lempeng Samudera Pasifik dan Lempeng Kraton Benua Australia (Bird, 2003). Konvergensi di wilayah ini masuk ke dalam zona deformasi aktif yang berada di antara Palung New Guinea di sebelah utara dan kelompok sesar anjak pegunungan tengah di bagian selatan wilayah penelitian (Müller dkk., 2019).



Gambar 20. Penampang melintang model akhir 3D struktur bawah permukaan arah selatan-utara pada koordinat X=461,747 km.



Gambar 21. Penampang melintang model akhir 3D struktur bawah permukaan arah selatan-utara pada koordinat X=469,596 km.

Berdasarkan temuan patahan atau sesar naik dari hasil pemodelan inversi 3D data gravitasi dan adanya kemungkinan bahwa patahan tersebut memiliki mekanisme *oblique,* maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan kemungkinan tersebut. Hal ini perlu dilakukan karena pada penelitian dengan metode gravitasi parameter struktur bawah permukaan yang diperoleh hanya terbatas berdasarkan distribusi nilai parameter densitas bawah permukaan dan bentuk geometrisnya. Dengan demikian perlu penelitian lanjutan dengan metode geofisika lainnya yang bisa dilakukan pada wilayah patahan yang berada di dasar laut seperti metode seismik refleksi, relokasi hiposenter gempabumi, geomagnetik atau metode geofisika kelautan lainnya seperti metode *sonar* (Hamouda dkk., 2023). Harapannya penelitian-penelitian tersebut dapat melengkapi model densitas bawah permukaan yang telah diperoleh dengan model-model parameter fisis lainnya guna mendapatkan hasil interpretasi yang lebih banyak lagi terhadap struktur patahan yang menjadi target penelitian dalam rangka memetakan sumber hiposenter gempabumi yang ada di wilayah Jayapura.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain: (1) Anomali Bouguer lengkap (anomali total) di wilayah penelitian berkisar antara 10,61- 144,26 mgal yang terbagi atas anomali gravitasi regional dengan rentang nilai 10-150 mgal dan anomali lokal dengan rentang nilai berkisar -156,75 sampai -19,03 mgal. (2) Model akhir 3D struktur bawah permukaan yang dihasilkan dari proses pemodelan memiliki kesesuaian dengan kondisi geologi dan memiliki tingkat presisi model yang sangat baik dengan *misfit* atau *error* data (*data RMS*) sebesar 0,00532718 atau 0,53%; (3) Dari hasil interpretasi model akhir 3D struktur bawah permukaan di wilayah penelitian, teridentifikasi keberadaan

patahan aktif berupa patahan naik pada koordinat UTM Y 9730,20 km atau koordinat geografis 2,44092° LS dengan orientasi berarah barat-timur yang merupakan salah satu sumber sebaran hiposenter gempabumi Jayapura pada Bulan Januari-Februari 2023.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Cenderawasih atas pemberian hibah dana penelitian PNBP tahun anggaran 2023 sehingga tim peneliti dapat melaksanakan kegiatan penelitian dengan luaran sesuai target serta selesai pada waktu yang telah dijadwalkan. Adapun penelitian yang didanai merupakan penelitian dengan surat perjanjian kerja penelitian Nomor: 085/UN20.2.1/PG/2023.

DAFTAR PUSTAKA

Binti, M. (2023). *Sejarah Gempa Merusak di Jayapura Papua, Pernah Diguncang M7,3. News Okezone*. https://news.okezone.com/read/2023/01/02/340/2738684/sejarah-gempa-merusak-di-jayapura-papua-pernah-diguncang-m73?page=2.

Bird, P. (2003). An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems,* 4(3). https://doi.org/10.1029/2001GC000252

BMKG (2023). *Data Katalog Gempabumi Jayapura Januari-Februari 2023*. https://repogempa. bmkg.go.id/eventcatalog

Cenderawasih Pos (2023). *Gempa Berulang Akibatkan Beberapa Bangunan Rusak.* Cenderawasih Pos. https://cenderawasihpos.jawapos.com/nasional/09/02/2023/ gempa-m52-guncang-jayapura-beberapa-bangunan-dan-jalan-rusak

Curtin University & Technical University Munich (2012). *Repository Data ERTM2160.* http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/data

EROS Center (2018). *Digital Elevation Model (DEM) SRTM (40).* Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. https://doi.org/ 10.5066/F7PR7TFT

Hamouda, A. Z., El-Gendy, N. H., El-Gharabawy, S., Salah, M., & Barakat, M. Kh. (2023). Marine Geophysical Surveys and Interpretations on The Ancient Eunostos harbor Area, Mediterranean Coast, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum,* 32(1), 47–55. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2023.01.003

Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field. *Geophysical Research Letters,* 40(16), 4279–4283. https://doi.org/10.1002/grl.50838

Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D. H., Kertapati, E., Meliano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., & Ridwan, M. (2010). *Ringkasan Hasil Studi Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.*

Müller, R. D., Zahirovic, S., Williams, S. E., Cannon, J., Seton, M., Bower, D. J., Tetley, M. G., Heine, C., Le Breton, E., Liu, S., Russell, S. H. J., Yang, T., Leonard, J., & Gurnis, M. (2019). A Global Plate Model Including Lithospheric Deformation Along Major Rifts and Orogens Since the Triassic. *Tectonics,* 38(6), 1884–1907. https://doi.org/10.1029/2018TC005462

Permana, N., Rahman, F., Zani, F., Shafa, D., & Fadrian, D. (2023). Identification of The Ancient Lakes Based on Gravity Methods In Borobudur Temple. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi), 9*(1), 32-42. doi:https://doi.org/10.23960/jge.v9i1.237

Pirttijarvi, M. (2008). *GRABLOX Gravity Interpretation and Modeling Software Based on a 3-D Block Model (1.6b).* Department of Physics Sciences. University of Oulu.

Pirttijärvi, M. (2012). *BLOXER Interactive visualization and editing software for 3-D block models (1.6c).* Department of Physics University of Oulu.

Puntodewo, S. S. O., McCaffrey, R., Calais, E., Bock, Y., Rais, J., Subarya, C., Poewariardi, R., Stevens, C., Genrich, J., Fauzi, Zwick, P., & Wdowinski, S. (1994). GPS Measurements of Crustal Deformation Within The Pacific-Australia Plate Boundary Zone in Irian Jaya, Indonesia. *Tectonophysics*, 237(3–4), 141–153. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90251-8

Purnama, S., & Fardaniah, R. (2023). Badan Geologi Paparkan Analisis Gempa Bumi Sampai Merusak di Papua. *ANTARA*. https://www.antaranews.com/berita/3388473/badan-geologi-paparkan-analisis-gempa-bumi-sampai-merusak-di-papua

Sarkowi, M., Yusuf, M., & Minardi, S. (2023). Identifikasi Struktur Iliran High Sumatera Selatan Berdasarkan Analisa Anomali Gravity. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi), 9*(2),

150-160. doi:https://doi.org/10.23960/jge.v9i2.303

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*. Universitas Gadjah Mada.

Sudrajad, B. (2022). Pemodelan Inversi Tiga Dimensi (3D) Struktur Bawah Permukaan Kelompok Batuan Ofiolit di Distrik Uwapa, Kabupaten Nabire, Papua, Sebagai Referensi Potensi Sumberdaya Mineral Berdasarkan Data Anomali Gravitasi GGMplus. *Prosiding Seminar Nasional MIPA UNIPA*, 109–116. https://doi.org/10.30862/psnmu.v7i1.16

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. https://doi.org/10.31957/jfp.v2i1.22

Suwarna, N., & Noya, Y. (1995). *Peta Geologi Lembar Jayapura (Pegunungan Cycloops), skala 1:250.000*.

Taleb, N. N. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. Random House Publishing Group.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sherrif, R. E., & Keys, D. A. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.

Tim Detikcom (2023). Tentang Black Swan Earthquakes, Fenomena Gempa Langka di Jayapura. *Detik.Com*. https://news.detik.com/berita/d-6566106/tentang-black-swan-earthquakes-fenomena-gempa-langka-di-jayapura

Torge, W. (2001). *Geodesy* (Extended Edition, Vol. 3). Walter de Gruyter.