

Pemodelan Inversi 3 Dimensi untuk Identifikasi Dugaan Keberadaan Sesar menggunakan Data Anomali Gaya Berat di Laut Flores (Studi Kasus Gempa Flores 14 Desember 2021)

Afra Kansa Maimuna^{1*)}, Aurora Fajri Miftakhunnisa¹, Yan Adi Segoro¹

¹Program Studi Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

ABSTRAK

Pada Selasa, 14 Desember 2021 pukul 10.20.23 WIB terjadi gempabumi dengan kekuatan M 7,4 di laut utara Flores, Nusa Tenggara Timur. Gempa bumi tersebut terjadi di titik episenter yang terletak di titik 7,605° LS dan 122,227° BT. BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) merilis peringatan dini tsunami kepada masyarakat sebagai tindak lanjut mitigasi gempa tersebut. Gelombang tsunami akibat dari gempa tersebut terekam pada stasiun pengamatan tide gauge Marapokot dan Reo setinggi 0,07 m. Salah satu sumber gempabumi yang dapat mengakibatkan terjadinya tsunami adalah sesar yang terletak di dasar laut. Untuk mengetahui struktur bawah permukaan berupa sesar yang ada di sekitar episenter, dilakukan analisis menggunakan metode gaya berat. Metode gaya berat adalah metode geofisika berdasarkan pengukuran medan gravitasi yang terekam oleh gravimeter. Metode tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung anomali gaya berat di sekitar episenter. Wilayah penelitian pada penelitian ini berada pada koordinat 8° – 7° LS dan 121,5° – 122,5° BT. Data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data yang berasal dari satelit observasi gaya berat TOPEX. Data yang telah didapatkan selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak GMT dan Grav3D untuk mendapatkan interpretasi anomali medan gaya berat dan kontras densitas di wilayah penelitian. Dari analisis yang telah dilakukan dengan perangkat lunak GMT, didapatkan sebaran anomali gaya berat di sekitar wilayah penelitian sebesar 60 mgal sampai 220 mgal dengan asumsi arah sesar yaitu barat daya – timur laut. Pada pemodelan 3D berdasarkan Grav3D menunjukkan adanya kontras densitas dengan rentang -0,969 gr/cm³ sampai 1,7 gr/cm³. Nilai kontras densitas berdasarkan pemodelan 3D tersebut terlihat jelas hingga kedalaman 15 km.

Kata Kunci: Gaya berat, gempabumi, Grav3D, sesar

ABSTRACT

On Tuesday, 14 December 2021 at 10:20:23 WIB there was an earthquake which magnitude M 7,4 in northern Flores sea, Eastern Nusa Tenggara. The earthquake's epicenter was 7.605° S and 122.227° E. BMKG (Indonesia Meteorology, Climatology, and Geophysics Agency) released tsunami warning to the public for mitigation of the earthquake. Tsunami waves caused of the earthquake recorded in tide gauge observation station Marapokot and Reo 0.07 m height. One of earthquake source which is could generate tsunami is fault on sea floor. How to knowing structure of sub surface in the form of fault around epicenter, we analyzed it with gravity method. Gravity method is geophysics method based on gravity field measurement which recorded by gravimeter. The method then used to calculate gravity anomaly around epicenter. The region of this research on 8° – 7° S dan 121.5° – 122.5° E spherical coordinate. The used data of this research are from TOPEX observation satellite. The data then processed with GMT and Grav3D software to get the interpretation of field gravity anomaly and density contrast in the region of the research. From the analysis processed by GMT software, there are gravity anomaly in range 60 mgal to 220 mgal with the assumption of the fault direction is southwest – northeast. On 3D model based on Grav3D software show the density contrast in range -0.969 gr/cm³ to 1.7 gr/cm³. The density contrast based on 3D model seen clearly in 15 km depth

Keywords: earthquake, fault, gravity, Grav3D

Penulis Koresponden:

Afra Kansa Maimuna,
Program Studi Geofisika,
Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Indonesia,
Jl. Perhubungan I No.5 Pondok Betung, Bintaro, Kec. Pd. Aren, Kota Tangerang Selatan, Banten 15221.
Email: afra.kansa.maimuna@stmkg.ac.id

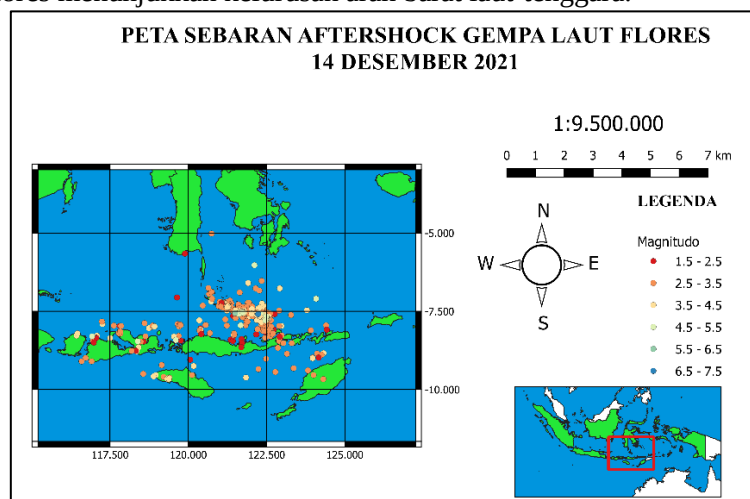
1. PENDAHULUAN

Secara fisiografi bawah laut, Indonesia terbagi menjadi tiga wilayah yaitu Paparan Sunda, Paparan Sahul, dan Zona Transisi. Paparan Sunda terdiri dari Selat Malaka, Laut Cina Selatan, dan Laut Jawa. Paparan Sahul terdiri dari daerah selatan Laut Banda dan Laut Aru. Sedangkan Daerah Transisi terdiri dari Laut Sulawesi, Laut Maluku, sebagian Laut Banda, dan Laut Flores [1].

Kepulauan di daerah Nusa Tenggara terbentuk akibat dari aktivitas perbatasan lempeng tektonik Indo-Australia dan Busur Sunda-Banda. Selain itu, terdapat struktur berupa *back arc thrust* yang membujur dari Laut Bali hingga Laut Flores [2]. Beberapa sumber pembangkit gempa diantaranya adalah sesar, zona *megathrust*, dan aktivitas vulkanik.

Pada 14 Desember 2021 pukul 10.20.23 WIB, terjadi gempabumi di Laut Flores. Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), gempa tersebut memiliki kekuatan M_w 7,4 dengan pusat berada di titik $7,59^\circ\text{LS}$ $122,25^\circ\text{BT}$. Gempa tersebut diikuti dengan Peringatan Dini Tsunami dan tercatat terdapat kenaikan muka air laut pada stasiun pengamatan *tide gauge* Marapokot dan Reo setinggi 0,07 m. Gempa dapat membangkitkan tsunami apabila episenter (pusat gempa) berada di laut [3].

Selama 20 hari terakhir, telah terjadi lebih dari 500 *event* gempa di sekitar Laut Flores berdasarkan katalog BMKG. Hal tersebut dapat menjadi indikasi terdapatnya sesar bawah laut aktif yang menjadi pemicu gempa. Aktivitas gempa di Laut Flores dengan rentang waktu 14 Desember 2021 sampai 2 Januari 2022 dapat ditunjukkan dengan Gambar 1. Episenter dari kumpulan *event* gempa di Laut Flores menunjukkan kelurusan arah barat laut-tenggara.

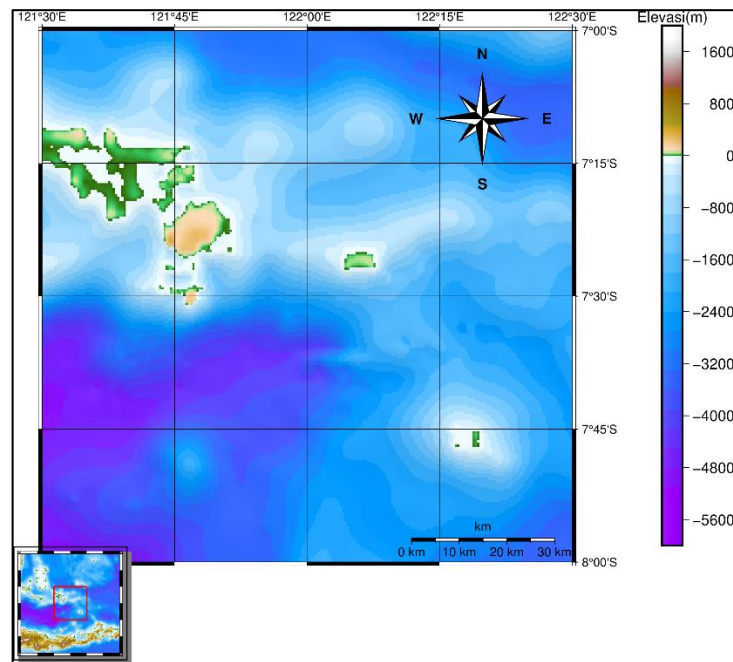


Gambar 1. Sebaran *Aftershock* Gempa Laut Flores 14 Desember 2021

Sumber: <http://repogempa.bmkg.go.id/>

Untuk mengetahui dugaan sesar yang menyebabkan terjadinya gempa, dapat dilakukan suatu penelitian. Salah satu metode untuk meneliti dugaan adanya sesar adalah metode gaya berat. Gaya berat adalah suatu metode geofisika non-destruktif yang memerlukan pengukuran medan gravitasi bumi pada lokasi tertentu. Gayaberat sangat bergantung pada perbedaan densitas material yang dapat mengakibatkan variasi pada pengukuran. Variasi tersebut dapat diinterpretasikan untuk mendapatkan struktur bawah permukaan dengan analisis Anomali Bouguer dan FAA (*Free Air Anomaly*) [4].

Berdasarkan sebaran *aftershock* gempa 14 Desember 2021, terdapat dugaan bahwa ada sesar yang belum terpetakan yang membangkitkan gempa tersebut. Oleh karena itu, dilakukan analisis Anomali Bouguer dan FAA pada lokasi sekitar episenter kejadian gempabumi Laut Flores 14 Desember 2021 untuk mengetahui dugaan sesar bawah laut Fokus wilayah penelitian ini berada pada koordinat $8^\circ - 7^\circ\text{LS}$ dan $121,5^\circ - 122,5^\circ\text{BT}$ yang ditunjukkan pada Gambar 2. Analisis dilakukan untuk mengetahui adanya kontras densitas dan sebaran anomali gayaberat yang menjadi dugaan sesar di sekitar episenter.



Gambar 2. Peta Wilayah Penelitian

2. METODE PENELITIAN

2.1. Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data anomali udara bebas (FAA) diperoleh dari data citra satelit TOPEX yang dapat di akses pada https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi. TOPEX adalah sebuah citra satelit bersama antara NASA, badan antariksa AS, dan CNES, lembaga ruang angkasa Prancis, untuk memetakan topografi permukaan laut. Data anomali udara bebas dari satelit tersebut otomatis telah terkoreksi dengan koreksi *drift*, koreksi pasang surut, koreksi lintang dan data tersebut mengandung informasi tentang topografi. Data kemudian diolah menjadi Anomali Bouguer Sederhana (*Simple Bouguer Anomaly*) atau SBA. Secara matematis, Anomali Bouguer dihitung dengan persamaan sebagai berikut [5]:

$$BA = g_{obs} - (g_{\theta} + FAA - TC) \quad (1)$$

$$FAA = (BC - FAC) = (0.04193\rho - 0.3086)h \quad (2)$$

$$BA = g_{obs} - g_{\theta} - 0.04193\rho h + 0.3086h + TC \quad (3)$$

keterangan:

BA	= Anomali Bouguer (mgal)
Gobs	= harga gravity yang telah dikoreksi terhadap pasang surut, drift, dan penutupan (mgal)
g_{θ}	= harga gravity normal di titik pengamatan
FAA	= koreksi elevasi (mgal)
TC	= koreksi topografi (mgal)
BC	= koreksi Bouguer (mgal)
FAC	= koreksi udara bebas (mgal)

2.2. Pemodelan 3 Dimensi

Nilai anomali Bouguer menggambarkan efek kondisi bawah permukaan baik kedalaman dangkal maupun dangkal. Untuk mengetahui efek ini, kita dapat melakukan pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan ke belakang (*inverse modelling*). Dalam pemodelan ke depan, kita membuat model untuk mengetahui respon anomali medan gravitasi di permukaan. Sedangkan proses pemodelan kebelakang merupakan proses untuk menentukan parameter model dari data hasil

observasi. Dalam penentuan proses inversi ini, perlu suatu model awal berupa densitas batuan rata-rata.

Pemodelan ke belakang menggunakan software GRAV3D versi 2.0 menggunakan algoritma yang dikembangkan [6]. Software ini dikembangkan oleh UBC-*Geophysical Inversion Facility*. Dalam metode gravitasi, anomali di bawah permukaan dengan densitas tertentu (x, y, z) menyebabkan perubahan pada komponen vertikal medan gravitasi F_z [7]. Hal ini dijelaskan dalam persamaan (11).

$$F_z(\vec{r}_0) = G \int \rho(\vec{r}) \frac{z-z_0}{|\vec{r}-\vec{r}_0|} dv \quad (11)$$

keterangan:

$F_z(\vec{r}_0)$ = komponen vertikal medan gravitasi

G = konstanta gravitasi

$\rho(\vec{r})$ = densitas batuan

$\vec{r}, \vec{r}_0$ = vektor lokasi pengamatan dan sumber anomali

Pemodelan ke belakang digunakan untuk memperoleh harga densitas dari medan gravitasi pada komponen vertikal yang ditunjukkan oleh anomali Bouguer. Dengan menggunakan nilai misfit, model dan data lapangan dicocokkan. Nilai misfit diminimalkan untuk memperoleh penyebaran densitas yang sesuai dengan data. Nilai misfit ditunjukkan pada persamaan (12).

$$\phi_d = ||W_d(d - d^{obs})||^2 \quad (12)$$

keterangan:

$dobs = (Fz1, Fz2, \dots, FzN)^T$ = matriks gravitasi pengukuran

d = data pemodelan

$W_d = diag\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_N}\right)$ = matriks pembobotan dengan standar deviasi

ϕ_d = nilai misfit

Nilai ϕ_d yang kecil menunjukkan hasil pemodelan sudah sesuai dengan data pengukuran. Tetapi nilai *misfit* yang kecil mampu menghasilkan banyak model. Untuk mengurangi jumlah model dalam pencocokan data, perlu fungsi objektif yang ditunjukkan oleh persamaan:

$$\begin{aligned} \phi_m(\rho) = & \alpha_s \int w_s \{w(z)[\rho(r) - \rho_0]\}^2 dv + \alpha_x \int w_x \left\{ \frac{\partial w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial x} \right\}^2 dv + \\ & \alpha_y \int w_y \left\{ \frac{\partial w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int w_z \left\{ \frac{\partial w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned} \quad (13)$$

keterangan:

ρ_0 = model awal

w_s, w_x, w_y, w_z = fungsi pembobotan bergantung secara spasial

$\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ = koefisien yang relatif penting dari komponen berbeda dalam fungsi objektif

$w(z) = \frac{1}{(z-z_0)^{\beta/2}}$ = fungsi pembobotan

Untuk melakukan perhitungan numerik, persamaan (13) diubah menjadi diskrit sehingga menjadi:

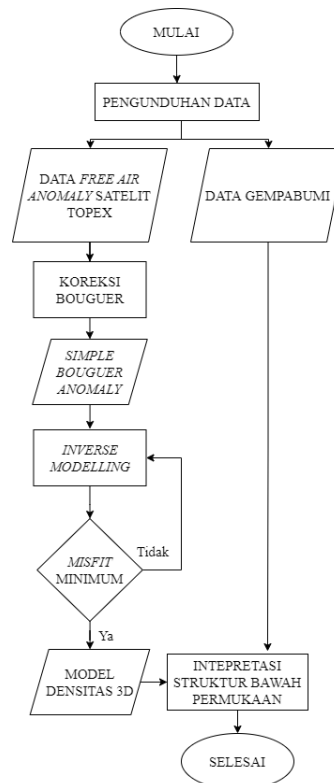
$$\begin{aligned} \phi_m(\vec{\rho}) = & (\vec{\rho} - \vec{\rho}_0)^T (W_s^T W_s + W_x^T W_x + W_y^T W_y + W_z^T W_z) (\vec{\rho} - \vec{\rho}_0) \\ = & (\vec{\rho} - \vec{\rho}_0)^T (W_m^T W_m) (\vec{\rho} - \vec{\rho}_0) \\ = & ||W_m(\vec{\rho} - \vec{\rho}_0)||^2 \end{aligned} \quad (14)$$

keterangan:

$\rho^{\rightarrow}$ dan $\rho^{\rightarrow 0}$ = matriks dengan panjang M

Ws, Wx, Wy, Wz = matriks individual

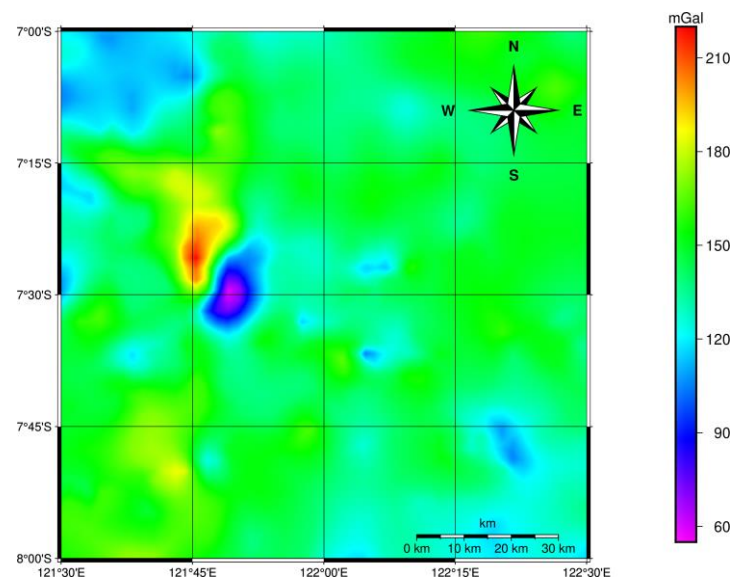
Proses inversi diselesaikan dengan menemukan nilai densitas ρ yang meminimalkan fungsi objektif ($\emptyset m$) dan misfit data. Berikut merupakan diagram alir penelitian yang penulis lakukan :



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

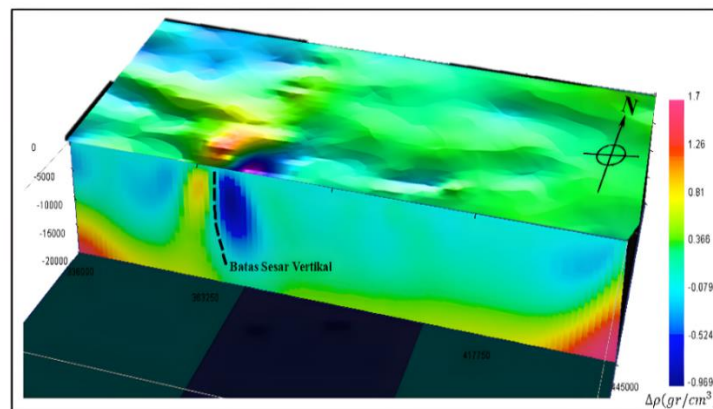
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data *free air anomaly* (FAA) yang telah didapatkan dari laman TOPEX diolah hingga menghasilkan nilai *simple bouguer anomaly* (SBA). Sebaran nilai SBA di sekitar lokasi penelitian berada di rentang 60 – 210 mGal. Pada lintang 7°15' – 7°30' LS menunjukkan adanya nilai kontras SBA rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada arah tenggara, nilai SBA berada di rentang 60 – 100 mGal. Sedangkan pada arah barat laut, nilai SBA berada di rentang 180 – 210 mGal. Nilai variasi dapat digambarkan dengan melihat perbedaan ketinggian dan warna pada kontur ini. Kontur warna ungu menunjukkan nilai anomali densitas bawah permukaan yang rendah dan kontur warna *orange* menunjukkan nilai anomali densitas bawah permukaan yang tinggi.



Gambar 4. Peta *simple bouguer anomaly* (SBA) di wilayah penelitian

Terlihat pada SBA tersebut daerah dugaan keberadaan sesar memiliki kontras anomali yang cukup jelas ditandai dengan warna jingga dan biru. Kontras densitas tinggi ditunjukkan warna jingga, sedangkan densitas yang rendah ditunjukkan dengan warna ungu begitu terlihat di daerah laut tersebut. Hal ini menjadi dugaan kuat akan adanya sesar bawah laut yang belum terpetakan oleh Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen). Selanjutnya dugaan sesar bawah laut tersebut dimodelkan dengan pemodelan tiga dimensi menggunakan *software* Grav3D seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 5. Pemodelan 3D struktur bawah permukaan di wilayah penelitian

Pemodelan tiga dimensi ini dengan jelas memperlihatkan adanya kontras densitas di wilayah penelitian yang menjadi dugaan sesar bawah laut dengan kedalaman 15 km. Anomali gravitasi yang ditunjukkan pada pemodelan ini cenderung positif dengan nilai persebaran densitas di bawah permukaan berkisar antara rentang $-0,969 \text{ gr/cm}^3$ sampai $1,7 \text{ gr/cm}^3$. Berdasarkan tabel densitas batuan modifikasi Telford dkk (1990) (dalam [8]) jenis batuan pada daerah penelitian ini merupakan batuan *clay*. Daerah dengan warna merah merupakan batuan Granit, daerah dengan warna biru tua merupakan batuan pasir, daerah dengan warna biru muda merupakan batuan *clay*, dan daerah dengan warna jingga merupakan batuan *limestone*. Hal ini sesuai dengan peta struktur geologi di wilayah tersebut dengan jenis batumannya tersusun oleh batuan berumur Tersier berupa batuan sedimen dan batugamping, serta endapan Kuarter berupa endapan aluvial pantai, sungai, dan batugamping koral. Endapan Kuarter dan batuan berumur Tersier yang telah mengalami pelapukan bersifat lepas, lunak, belum kompak (*unconsolidated*) dan memperkuat efek guncangan, sehingga rawan guncangan gempa bumi.

Mengacu pada gempa 14 Desember 2021 di Flores dengan mekanisme *strike slip* yang ternyata dapat membangkitkan tsunami juga dikuatkan dengan adanya gempa masa lalu yang pernah terjadi di wilayah tersebut yaitu pada 17 Juni 1996 terjadi gempa dengan kekuatan M_w 7,8 dan kedalaman 594 km yang diikuti dengan 14 *event aftershock*. Wiens melakukan studi untuk mengetahui distribusi spasial *aftershock* dan *rupture* dengan analisis *waveform*. Wiens mendapatkan perubahan polaritas pada *displacement waveform* [9]. [10] melakukan penelitian pada *event* yang sama dan mendapatkan bahwa mekanisme penyesaran yang berubah pada *mainshock* dan *aftershock*. Komponen *strike slip* pada *mainshock* konsisten terhadap rotasi searah jarum jam material *slab* berarah timur-barat ke utara selatan. Perubahan mekanisme fokal ketika terjadi *mainshock* dapat terjadi ketika terjadi kompleksitas *stress*.

Berdasarkan kajian BMKG terkait gempa Flores tersebut sebaran gempa susulan dan mekanisme yang didapatkan memang berasal dari sesar aktif. Namun belum terpetakan dalam Pusgen karena keterbatasan data historis gempa bumi di wilayah penelitian. Sesar ini baru dapat diidentifikasi dengan klasifikasi mekanisme sesar geser mengangan berorientasi ke timur laut. Hal ini sesuai dengan pemodelan 3D yang penulis dapatkan terlihat bahwa kontras anomali juga mengarah ke timur laut. Hasil dari pemodelan ini juga memperlihatkan adanya korelasi antara SBA dan permodelan 3D yang menunjukkan adanya indikasi keberadaan sesar di bawah permukaan tersebut. Gempa Laut Flores merupakan peringatan penting, ternyata masih ada sumber gempa aktif yang mampu membangkitkan gempa kuat dan memicu tsunami. Namun, belum ada di katalog sesar aktif sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan metode lain untuk memperkuat hasil penelitian ini. Harapan kedepannya, dugaan sesar bawah laut ini dapat terpetakan sebagai sesar aktif yang dapat ditindaklanjuti untuk upaya mitigasi.

4. KESIMPULAN

Didapatkan sebaran anomali gaya berat di sekitar wilayah penelitian sebesar 60 mgal sampai 220 mgal dengan asumsi arah sesar yaitu barat daya – timur laut. Pada pemodelan 3D menunjukkan adanya kontras densitas dengan rentang $-0,969 \text{ gr/cm}^3$ sampai $1,7 \text{ gr/cm}^3$. Nilai kontras densitas tersebut terlihat jelas hingga kedalaman 15 km. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan metode lain untuk memperkuat hasil penelitian ini agar dapat ditindaklanjuti untuk upaya mitigasi.

REFERENSI

- [1] D. C. S. Claesya, A. Satriadi, and L. Sarmili, “Studi Morfologi Dasar Laut Berdasarkan Interpretasi Refleksi Seismik Di Perairan Komba, Laut Flores, Nusa Tenggara Timur,” *J. Oceanogr.*, vol. 3, no. 3, pp. 375–383, 2014.
- [2] E. Rohyati, C. Purwanto, Y. Arman, and Apriansyah, “Interprestasi Data Anomali Medan Magnetik Total Transformasi Reduksi ke Kutub di Laut Flores,” *Prism. Fis.*, vol. 7, no. 3, 2020, doi: 10.26418/pf.v7i3.36112.
- [3] BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika), “Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempa Bumi Di Laut Flores Nusa Tenggara Timur 14 Desember 2021 | BMKG Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempa Bumi Di Laut Flores Nusa Tenggara Timur 14 Desember 2021 | BMKG,” 2021. <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=ulasan-guncangan-tanah-akibat-gempa-bumi-di-laut-flores-nusa-tenggara-timur-14-desember-2021&lang=ID&tag=gempabumi> (accessed Jan. 18, 2022).
- [4] LaFehr, R. Thomas, and M. N. Nabighian, “Fundamentals of Gravity Exploration. USA: Society of Exploration Geophysicists,” 2012.
- [5] T. R. LaFehr and M. N. Nabighian, *Fundamentals of Gravity Exploration*. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [6] Y. Li and D. W. Oldenburg, “3-D Inversion of Gravity Data,” *Geophysics*, vol. 63, no. 1, pp. 109–19, 1998, doi: 10.1190/1.1444302.
- [7] UBC-Geophysical Inversion Facility, “GRAV3D Documentation,” 2018, pp. 1–40.

-
- [8] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics*, 2nd ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
 - [9] D. A. Wiens, "Source and Aftershock Properties of 1996 Flores Sea Deep Earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 25, no. March 15, 1998, pp. 781–784, 1998.
 - [10] S. Goes, L. Ruff, and N. Winslow, "The complex rupture process of the 1996 deep Flores, Indonesia earthquake (Mw 7.9) from teleseismic P-waves," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 1295–1298, 1997, doi: 10.1029/97GL01245.