

Analisis Anomali Gaya Berat Menggunakan Metode SVD dan Pemodelan 3D - Studi Kasus Gempa di Kepulauan Togean, Kabupaten Tojo Una-Una, Sulawesi Tengah

Afra K. Maimuna^{1,*}, Elisabet A. Pramesthi¹, Yan A. Segoro¹, Relly Margiono¹, Kekey S. Azzahra², M. Akhadi³, Denny V. Siregar⁴

¹Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

²Stasiun Geofisika Kelas I Bandung

³Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG

⁴Stasiun Geofisika Kelas III Mataram

*Email: afra.kansa.maimuna@stmkg.ac.id

Submit: 2021-03-13; Revised: 2021-08-19 ; Accepted: 2021-10-09

Abstrak: Metode gaya berat adalah salah satu metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran medan gravitasi. Metode ini dapat diaplikasikan untuk memetakan daerah yang mengalami deformasi struktural berupa sesar terutama pada kejadian gempabumi. Aplikasi gaya berat ini diterapkan untuk memetakan sesar pada area di Kabupaten Tojo Una-Una Sulawesi Tengah yang mengalami gempabumi dengan episenter dasar laut pada periode 9-15 Oktober 2020. Area ini sebelumnya tidak mempunyai interpretasi sesar sebelumnya. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gravitasi hasil observasi satelit TOPEX dengan koordinat $0,25^{\circ}$ LU – $1,15^{\circ}$ LS dan $121,46^{\circ}$ BT – $123,30^{\circ}$ BT. Metode yang digunakan adalah metode Second Vertical Derivative (SVD) dan pemodelan 3D menggunakan *software* Grav3D. Hasil analisis kurva anomali SVD terdapat kontras nilai densitas yang mengindikasikan adanya dugaan keberadaan sesar yang memanjang dengan orientasi Barat - Timur. Hasil pemodelan 3D hingga kedalaman 24 km menunjukkan adanya anomali positif dengan nilai kontras densitas di bawah permukaan berkisar antara $-0,8$ gr/cm³ sampai $1,1$ gr/cm³.

Kata kunci: Anomali Gaya Berat, SVD (*Second Vertical Derivative*), Pemodelan 3D, Sesar

Abstract: The gravity method is a geophysical method based on gravitational field measurement. Gravity method and analysis are commonly applied for the fault mapping in structurally deformed and earthquake-active areas. One of the active areas, Tojo Una-Una Regency, Central Sulawesi was struck by an earthquake between 9-15 October 2020. The epicenter is assumed at the seabed, and the area is not known to have faults interpretation. The aim of the gravity analysis in the area is therefore finding the fault's existence. The data used in this study is the gravitational data from the TOPEX satellite observations with coordinates $0,2^{\circ}$ N – $1,15^{\circ}$ S and $121,4^{\circ}$ E – $123,3^{\circ}$ E. The method used is the second vertical derivative (SVD) and 3D modeling using the Grav3D software. The results of the SVD show contrast density that indicates the possibility of a west-east orientation fault. The 3D modeling results show positive

anomaly with the value of the distribution density between $-0,8$ gr / cm³ to $1,1$ gr / cm³.

Keywords: Gravity Anomaly, SVD (*Second Vertical Derivative*), 3D Modelling, Faults

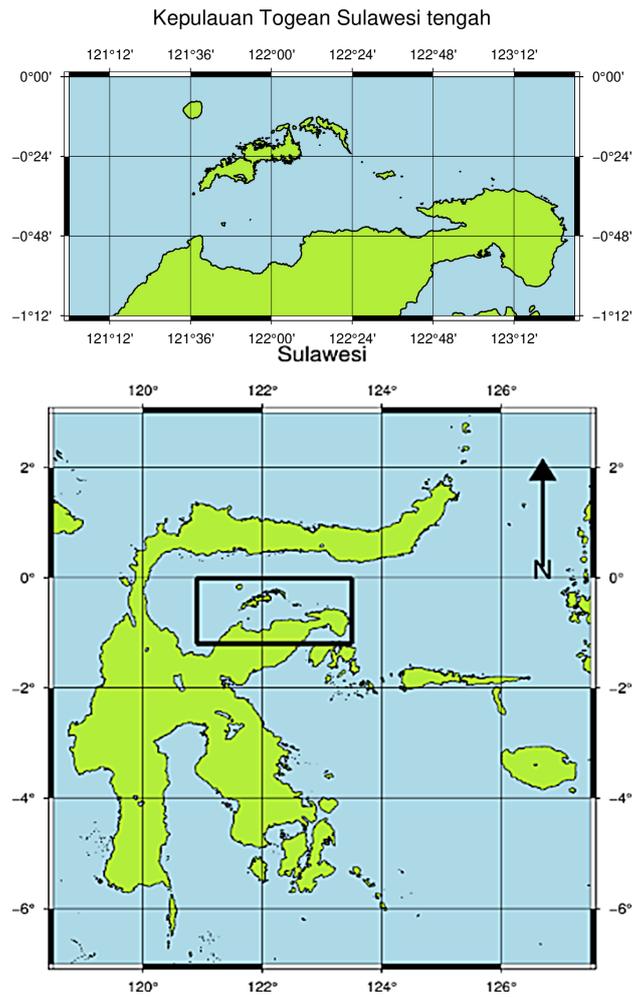
1 PENDAHULUAN

Sulawesi dan pulau-pulau kecil di sekitarnya mempunyai kondisi geologi yang kompleks. Hal ini disebabkan kawasan itu merupakan tempat tumbukan aktif dari tiga lempeng (*triple junction*): Lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif ke arah Utara, Lempeng Samudra Pasifik bergerak relatif ke barat, dan Lempeng Eurasia yang relatif diam. Tumbukan ketiga lempeng tersebut mengakibatkan Wilayah Sulawesi mempunyai struktur geologi dan stratigrafi yang rumit, serta komposisi batuan yang beragam. Akumulasi dari pergerakan lempeng aktivitas utama dan mikro ini menyebabkan tingkat aktivitas seismisitas yang tinggi (Jamidun dkk., 2019).

Lempeng makro meliputi Lempeng Samudra Pasifik, Eurasia, dan Indo-Australia. Tumbukan tiga lempeng itu menimbulkan pecahan bagian lempeng tersebut menjadi lempeng mikro. Lempeng mikro itu adalah Lempeng Filipina dan Lempeng Caroline. Aktivitas tektonik yang melahirkan penimbunan energi dan akan dilepaskan secara tiba-tiba sebagai kejadian gempabumi dengan beragam kekuatan dan hal ini menandakan adanya proses deformasi (Barber dkk., 2005).

Daerah yang menjadi fokus pada penelitian ini berlokasi di provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis koordinat lokasi penelitian terletak pada $0,25^{\circ}$ LU – $1,15^{\circ}$ LS dan $121,46^{\circ}$ BT – $123,30^{\circ}$ BT ditunjukkan oleh Gambar 1 tepatnya di sekitar kepulauan Tojo Una-Una, Sulawesi Tengah yang sebagian besar merupakan wilayah perairan.

Pemilihan Wilayah Sulawesi Tengah didasarkan pada seringnya terjadi gempa magnitudo 3 sampai dengan 4 yang terjadi sebanyak 17 kali terhitung sejak 9-15 Oktober 2020



Gambar 1. Wilayah Penelitian yaitu Kepulauan Togean, Sulawesi Tengah

yang bersumber dari repo gempa Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), diakses tanggal 10 Februari 2021 (BMKG, 2021). Sebagian besar gempa yang terjadi terletak pada kedalaman dangkal dan diduga disebabkan indikasi adanya aktivitas sesar bawah laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dugaan keberadaan sesar bawah laut tersebut dengan menggunakan metode gaya berat.

2 METODE PENELITIAN

Metode gayaberat adalah salah satu metode geofisika dengan parameter fisis yang diukur adalah variasi medan gravitasi Bumi (Sarkowi, 2011). Penggambaran struktur bawah permukaan dengan menganalisis Anomali Bouguer dan Anomali Udara Bebas (*Free Air Anomaly* atau FAA) yang dapat diukur dengan serangkaian koreksi data gravitasi (Firdaus dkk., 2016).

Metode *Second Vertical Derivative* (SVD) digunakan untuk membantu dalam interpretasi jenis struktur terhadap data Anomali Bouguer. Metode ini digunakan untuk memperlihatkan sumber anomali dangkal atau lokal sehingga sangat bagus untuk identifikasi sesar atau patahan di suatu wilayah. Metode ini dapat menyelesaikan anomali residual

yang tidak dapat dipisahkan dengan metode pemisahan anomali regional dan residual pada umumnya (Sarkowi, 2011).

Penelitian ini menggunakan data FAA yang diperoleh dari data citra satelit TOPEX yang di akses tanggal 7 Januari 2021 pukul: 20.30 WIB melalui https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi (TOPEX, 2021). TOPEX adalah sebuah citra satelit bersama antara *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) badan antariksa Amerika Serikat (AS), dan *Centre National D'Etudes Spatiales* (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 (Kadir, 1999):

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

$$FAA = (BC - FAC) = (0.04193\rho - 0.3086)h \quad (1b)$$

dimana :

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

Setelah SBA hasil perhitungan didapatkan, dilakukan analisis deformasi dengan melakukan sayatan pada daerah tertentu di wilayah penelitian yang diduga terdapat struktur geologi berupa sesar.

Analisis selanjutnya menggunakan metode turunan kedua vertikal atau *Second Vertical Derivative*(SVD). Penggunaan metode turunan kedua vertikal dari data anomali Bouguer memungkinkan peneliti memisahkan efek struktur dangkal dan struktur dalam (Parera dkk., 2015). Metode SVD dikembangkan oleh Elkins tahun 1951 untuk menentukan nilai gravitasi di permukaan bumi dengan asumsi bidang horizontal dari tanah adalah pada saat kedalaman $z = 0$ (Sari, 2012).

Turunan dari data gravitasi sangat bermanfaat dalam interpretasi struktural (Firdaus dkk., 2016) Persamaan gravitasi dapat diturunkan terhadap beberapa arah, tetapi turunan terhadap arah vertikal z lebih sering digunakan. Selain menggunakan metode SVD untuk menentukan keberadaan sesar, penelitian ini juga menggunakan pemodelan tiga dimensi untuk memperlihatkan kontras densitas dan letak keberadaan dugaan sesar lebih jelas.

Pemodelan inversi 3D dilakukan dengan software Grav3D. Terdapat tiga program yang terintegrasi di dalamnya yaitu *gmDataViewer*, *MeshTools3d*, dan *Grav3D-gui*. Dalam pemodelan, terdapat satu mesh yang merupakan prisma segiempat besar terdiri dari beberapa prisma kecil atau cell untuk memodelkan nilai densitas dari anomali gaya berat yang terukur. Untuk melakukan pemodelan inversi, data yang dibutuhkan yaitu data anomali gaya berat, data topografi, dan data mesh.

Data pengukuran gravitasi ditambahkan dengan nilai error terlebih dahulu pada program *gmDataViewer*. Nilai error ini diasumsikan sebagai noise pada data pengukuran. Apabila data anomali gaya berat kita anggap memiliki noise yang rendah, maka nilai error yang ditambahkan kecil. Setelah menambahkan nilai error, ukuran mesh ditentukan sesuai dengan luas wilayah penelitian menggunakan program *MeshTools3d*. Data anomali gaya berat, data mesh, dan data topografi dimasukkan dalam program *Grav3D-gui* untuk dilakukan inversi. Proses inversi dilakukan sampai mendapatkan data gaya berat kalkulasi yang sesuai dengan data gaya berat observasi. Interpretasi struktur bawah permukaan dapat dilihat dari model hasil inversi yang sudah dibuat (Akhadi, 2020).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menunjukkan data topografi dan percepatan gravitasi yang telah dipetakan. Terlihat bahwa daerah yang memiliki topografi rendah cenderung digambarkan dengan kontur warna ungu sedangkan daerah yang memiliki topografi tinggi digambarkan dengan kontur warna merah.

Data topografi kemudian diolah sedemikian rupa se-

Tabel 1. Nilai Mutlak SVD per Irisan

Irisan	Nilai Mutlak SVD Maksimum	Nilai Mutlak SVD Minimum
A - A'	10,0860327	27,908672
B - B'	13,1376365	17,199372
C - C'	12,7670505	9,2085019
D - D'	33,0725722	16,673202
E - E'	29,74995076	18,028039
F - F'	18,03461113	14,374146

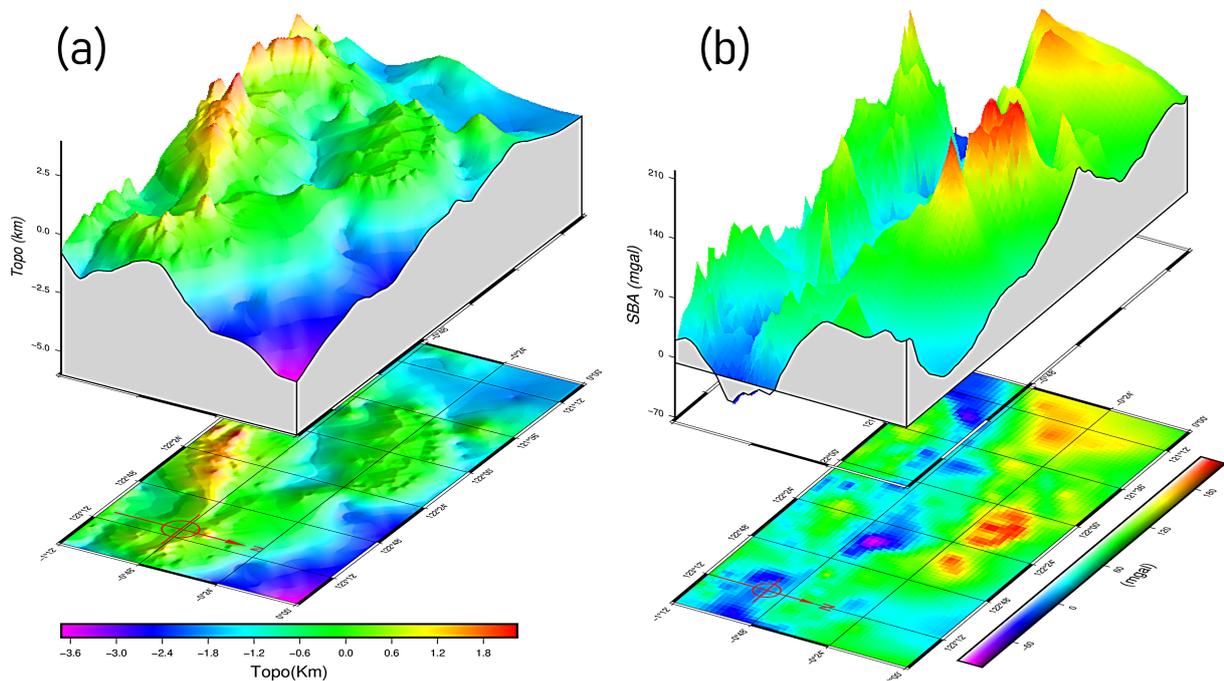
hingga didapatkan nilai Simple Bouguer Anomaly (SBA) sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Dari hasil pemetaan SBA didapatkan rentang nilai SBA dari -70 mgal hingga 210 mgal. Nilai anomali ini cenderung memiliki konsentrasi anomali positif yang tinggi. Nilai variasi dapat digambarkan dengan melihat perbedaan warna pada peta kontur. Kontur warna ungu menunjukkan nilai anomali densitas bawah permukaan yang rendah dan kontur warna merah menunjukkan nilai anomali densitas bawah permukaan yang tinggi. Terdapat korelasi antara topografi dan nilai anomali bouguer yaitu apabila suatu wilayah memiliki ketinggian maka akan memiliki nilai anomali Bouguer yang rendah (Verma, 1985). Untuk memisahkan SBA dan Anomali Regional, dilakukan filter SVD dengan menggunakan operator Elkins. Anomali residual adalah anomali yang memuat berbagai informasi mengenai struktur bawah permukaan, kondisi geologi, serta bahan-bahan tambang. Dari hasil *filtering*, didapatkan rentang nilai anomali residual berkisar antara -40 mgal hingga 80 mgal sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Nilai anomali negatif ditunjukkan dengan warna biru hingga ungu. Sedangkan anomali positif ditunjukkan dengan warna hijau hingga kuning.

Perubahan nilai anomali diindikasikan akibat terjadinya pertemuan struktur batuan dengan respon yang sangat signifikan di daerah perbatasan zona kontak batuan (Siregar dkk., 2018). Berdasarkan Gambar 4, terdapat area yang diindikasikan merupakan dugaan zona sesar. Dugaan sesar tersebut berarah Barat-Timur dan hal tersebut diindikasikan dengan adanya penampakan nilai anomali gaya berat yang cukup kontras dengan pola yang ditandai dengan kontras anomali rendah dan anomali tinggi (Azzahra, 2020).

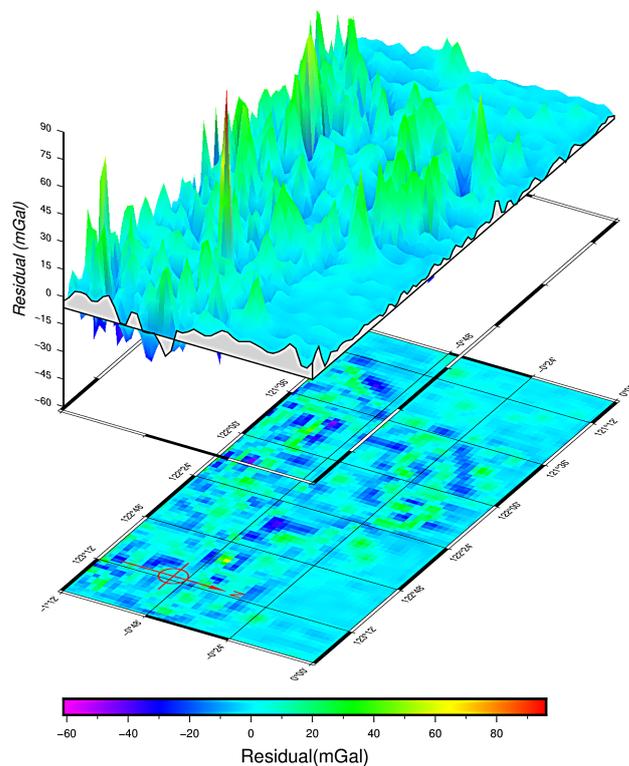
Untuk memperjelas hasil analisis sayatan vertikal tegak lurus pada area dugaan sesar maka dilakukan seperti yang terlihat pada Gambar 4. Hal ini bertujuan untuk menentukan grafik kontras densitas dari dugaan sesar bawah laut tersebut. Dengan menggunakan data anomali residual, dilakukan analisis deformasi batuan dengan melakukan slicing pada daerah yang diduga terdapat sesar. Struktur penampang vertikal akan terlihat melalui grafik jarak terhadap nilai anomali residual pada daerah tersebut. Enam sayatan secara acak dihasilkan dengan panjang masing-masing sayatan seperti terdefinisi pada Gambar 5. Garis vertikal warna merah yang memotong sayatan menunjukkan dugaan keberadaan sesar bawah laut di wilayah Tojo Una-Una.

Keenam garis vertikal tersebut menunjukkan batas perbedaan nilai absolut anomali SVD antara maksimum dan minimumnya. Kontras densitas terlihat sangat jelas di setiap irisannya. Nilai SVD maksimum dan minimum setiap irisan tertera pada Tabel 1.

Setelah dilakukan sayatan di wilayah dugaan sesar dan mengetahui nilai SVD maksimum dan minimumnya, kemu-



Gambar 2. Topografi Kepulauan Togeana(a) dan Sebaran SBA di Kepulauan Togeana (b)

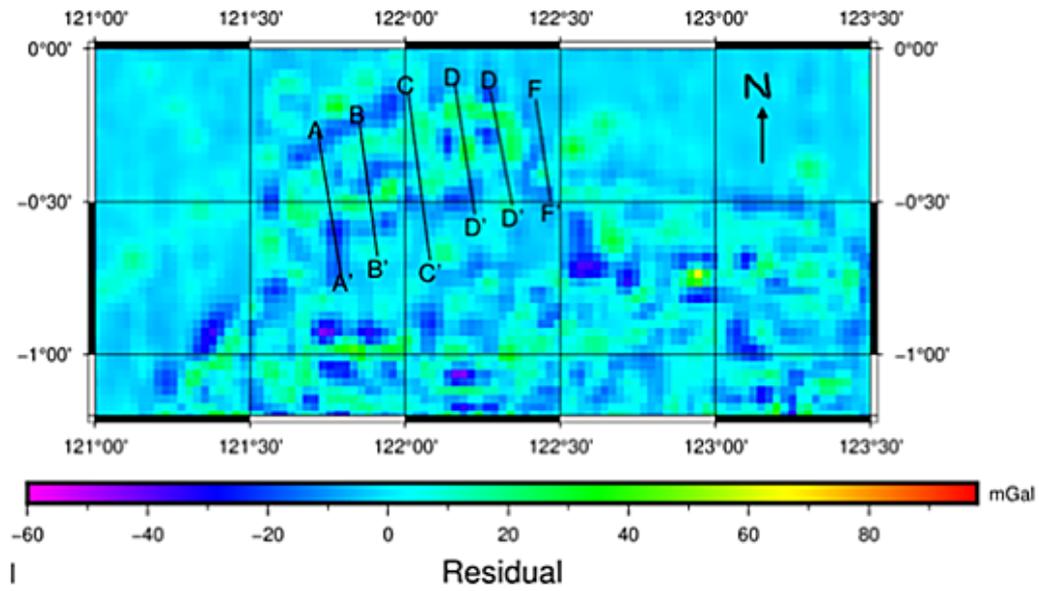


Gambar 3. Anomali Residual Kepulauan Togeana

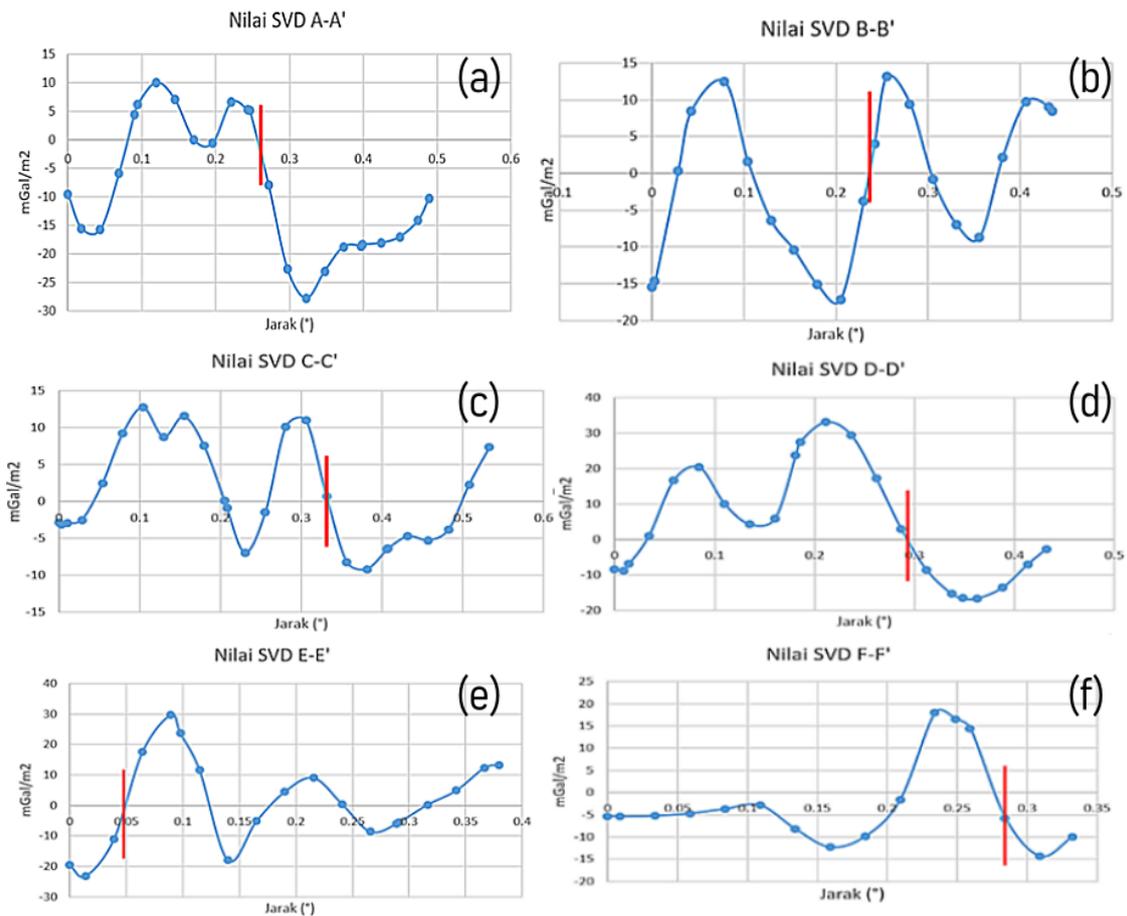
dian dilakukan pemetaan letak sesar dengan garis warna merah seperti terlihat pada Gambar 6. Pada sebelah kanan gambar terlihat pemetaan sesar yang berdasarkan Pusgen (2017) sesar tersebut merupakan sesar Balatak, sedangkan

letak dugaan orientasi sesar terlihat memanjang dari Barat ke Timur.

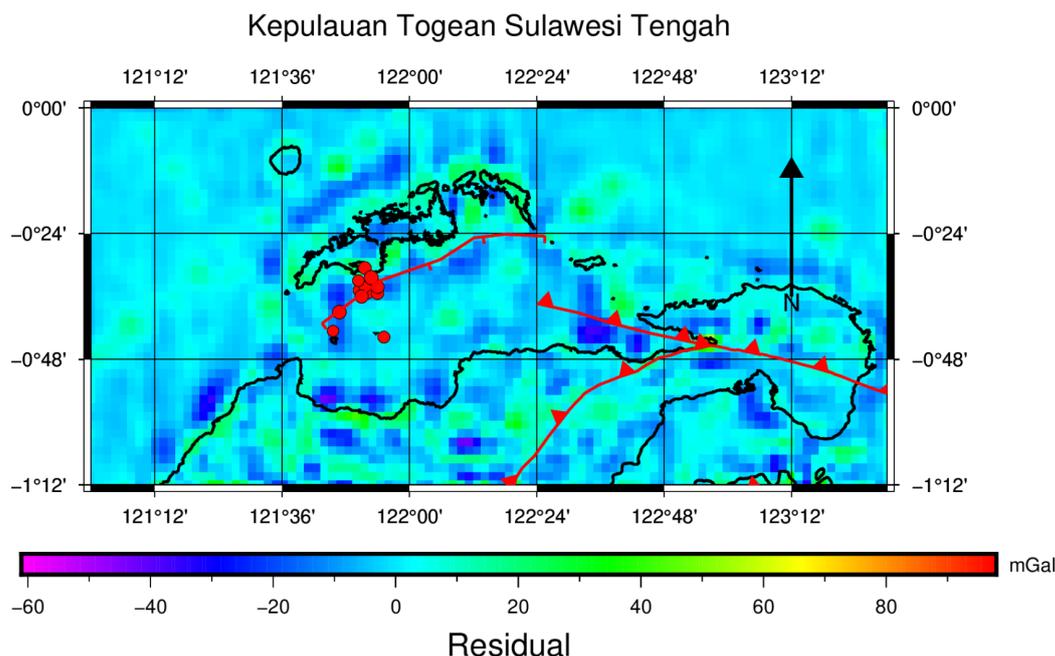
Selanjutnya, dugaan sesar bawah laut tersebut dimodelkan dengan pemodelan tiga dimensi menggunakan software Grav3D seperti terlihat pada Gambar 7. Pemodelan



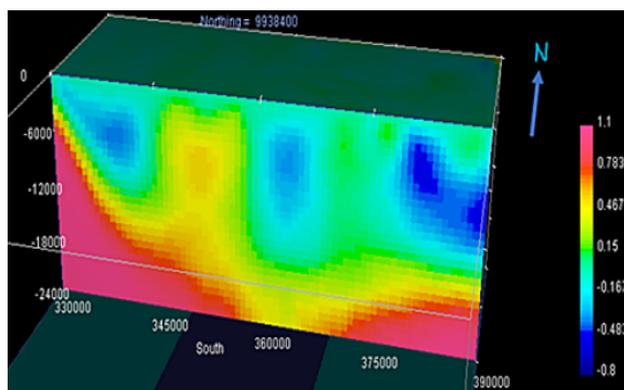
Gambar 4. Irisan SVD wilayah dugaan sesar



Gambar 5. (a)Grafik SVD pada irisan A-A', (b)Grafik SVD pada irisan B-B', (c)Grafik SVD pada irisan C-C', (d)Grafik SVD pada irisan D-D', (e)Grafik SVD pada irisan E-E', (f)Grafik SVD pada irisan F-F'



Gambar 6. Wilayah Dugaan Sesar di Kepulauan Togean



Gambar 7. Pemodelaan 3D Anomali Bouguer

tiga dimensi ini dengan jelas memperlihatkan adanya kontras densitas di wilayah penelitian yang menjadi dugaan sesar bawah laut dengan kedalaman 24 km. Nilai densitas rendah pada model Grav3D ditunjukkan dengan warna biru dan nilai densitas tinggi pada model Grav3D ditunjukkan dengan warna kuning. Anomali gaya berat yang ditunjukkan pada pemodelan ini cenderung positif dengan nilai kontras densitas di bawah permukaan berkisar antara $-0,8$ gr/cm³ sampai $1,1$ gr/cm³. Hasil pemodelan ini memperlihatkan adanya korelasi antara hasil SVD dan pemodelan 3D yang menunjukkan adanya indikasi keberadaan sesar. Namun, metode SVD hanya dapat digunakan untuk menentukan perubahan densitas dan orientasi kemiringan suatu antarmuka dari batas geologi (Sumintadireja dkk., 2018). Sehingga perlu dilakukan studi lapangan dan penelitian lebih lanjut terkait dugaan keberadaan sesar ini. Agar kedepannya dapat diketahui pemicu gempa dasar laut tersebut bersumber dari sesar baru atau percabangan dari sesar lain di wilayah Sulawesi Tengah.

4 KESIMPULAN

Anomali Bouguer sederhana di wilayah Kepulauan Tojo Una-Una menunjukkan adanya konsentrasi anomali tinggi. Nilai anomali tinggi ini berkorelasi positif dengan kondisi topografi Kepulauan Togean. Hasil analisis kurva anomali SVD residual dan pemodelan 3D hingga kedalaman 24 km menunjukkan adanya korelasi yang ditunjukkan dengan kontras nilai densitas yang mengindikasikan adanya keberadaan sesar. Sesar ini memanjang dengan orientasi barat – timur dengan nilai kontras densitas di bawah permukaan berkisar antara $-0,8$ gr/cm³ sampai $1,1$ gr/cm³. Perlu dilakukan studi lapangan dan penelitian lebih lanjut terkait dugaan keberadaan sesar ini. Agar kedepannya dapat diketahui pemicu gempa dasar laut tersebut bersumber dari sesar baru atau percabangan dari sesar lain di wilayah Sulawesi Tengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Paul Wessel dan Walter H.F. Smith sebagai perancang software GMT, Prof. Djoko Santoso yang telah mengembangkan software Grav3D, Mariska Geofisika 2013 yang telah memberikan ide kepenulisan, serta semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian jurnal ini.

Pustaka

- Akhadi, M. (2020): Metode fhd dan svd untuk identifikasi sesar sumatera bagian utara dan pemodelan 3d struktur bawah permukaan wilayah pidie jaya, aceh menggunakan data ggmplus. Skripsi STMKG.
- Azzahra, K.S. (2020): Identifikasi struktur bawah permukaan di wilayah bogor, bekasi dan banjarnegara menggunakan metode turunan pertama horizontal dan turunan kedua vertikal data gravitasi ggmplus. Skripsi STMKG.
- Barber, A.J., Crow, M.J. dan Smet, M.E.M.D. (2005): Chapter 14 tectonic evolution. *Geological Society, London, Memoirs*, **31**(1), 234–259, doi:10.1144/gsl.mem.2005.031.01.14.
- BMKG (2021): Repo Gempa. Accessed 10 Februari 2021.
- Firdaus, M.W., Setyawan, A. dan Yusuf, M. (2016): Identifikasi letak dan jenis sesar berdasarkan metode gayaberat second vertical gradient studi kasus sesar lebang, kota bandung, jawa barat. *Youngster Physics Journal*, **5**(1), 21–26.
- Jamidun, J., Rusydi, M., SB, K., P, S. dan Suryanto, W. (2019): Analisis dan model inversi gaya berat 2d untuk penampakan sesar palu koro di sulawesi tengah indonesia. *Natural Science: Journal of Science and Technology*, **8**(1), doi:10.22487/25411969.2019.v8.i1.12644.
- Kadir, W. (1999): The 4-d gravity survey and its subsurface dynamics: a theoretical approach. *Proceeding of 24th HAGI Annual Meeting, Surabaya*, 94–99.
- Parera, A.F.T., Bunaga, I.G.K.S. dan Yusuf, M. (2015): Pemodelan tiga dimensi anomali gravitasi dan identifikasi sesar lokal dalam penentuan jenis sesar di daerah pacitan. *PROSIDING SEMINAR NASIONAL FISIKA (E-JOURNAL)*, vol. 4, SNF2015–IX.
- Pusgen (2017): Peta sumber dan bahaya gempa indonesia tahun 2017. Tech. rep., Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Sari, E.P. (2012): Aplikasi metode turunan kedua vertikal (second vertical derivative) data gravitasi untuk interpretasi sesar baribis jawa barat. Skripsi STMKG.
- Sarkowi, M. (2011): Metode eksplorasi gayaberat. *Diktat Kuliah. Bandar Lampung: Universitas Lampung*.
- Siregar, D.V., Yulizar, Y. dan Adidarma, A. (2018): Karakteristik sesar meratus berdasarkan anomali gaya berat menggunakan metode second vertical derivative. STMKG.
- Sumintadireja, P., Dahrin, D. dan Grandis, H. (2018): A note on the use of the second vertical derivative (svd) of gravity data with reference to indonesian cases. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, **50**(1).
- TOPEX (2021): URL:http://topex.ucsd.edu, accessed 7 Januari 2021, 20.30 WIB.
- Verma, R.K. (1985): Description of bouguer and free-air anomaly maps of peninsular india. In: *Gravity Field, Seismicity and Tectonics of the Indian Peninsula and the Himalayas*. Springer Netherlands, 30–43, doi:10.1007/978-94-009-5259-1_3.