

ANALISIS SESAR SEKITAR WILAYAH DANAU TOBA BERDASARKAN DATA ANOMALI GRAVITASI FAULT ANALYSIS AROUND LAKE TOBA AREA BASED ON GRAVITY ANOMALY DATA

Muhammad Luthfi Azmi

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Kota Tangerang, 15119

*Email: luthfiazmi2903@gmail.com

ABSTRAK

Danau Toba dan Pulau Samosir terbentuk akibat erupsi besar sekitar 74 ribu tahun yang lalu. Di sekitar Danau Toba, terkhusus di bagian barat terdapat sesar-sesar yang berdekatan, yaitu Renun-C, Renun-B, dan Great Sumatran Fault/GSF. Meskipun secara historis tidak banyak gempa signifikan atau aktivitas seismik yang dihasilkan oleh sesar ini, namun sesar ini memiliki potensi gempa yang wajib diwaspadai oleh masyarakat sekitar wilayah ini. Sesar-sesar ini melintasi Kabupaten Dairi dengan 318.000 penduduk, Kabupaten Samosir dengan 144.000 penduduk, Kabupaten Humbang Hasundutan dengan 170.000 penduduk, dan Kabupaten Tapanuli Utara dengan 324.000 penduduk. Berdasarkan data jumlah penduduk, kajian terkait sesar-sesar ini penting dilakukan dalam langkah mitigasi gempabumi. Perlunya kajian sesar ini melatarbelakangi penulis untuk melakukan analisis derivatif terhadap nilai anomali gravitasi. Rentang nilai Simple Bouguer Anomaly ialah -75.2 mGal sampai 8.3 mGal. Berdasarkan data FHD, posisi sesar berhasil ditentukan dan berdasarkan data SVD setelah dilakukan enam slicing, dapat diperkirakan bahwa sesar di slice AA', BB', CC' dan slice DD' berjenis strike slip dan pada slice EE' dan slice FF' berjenis naik.

Kata kunci: Analisis Sesar, Danau Toba, Anomali Gravitasi

ABSTRACT

Lake Toba and Samosir Island were formed as a result of a large eruption around 74 thousand years ago. Around Lake Toba, especially in the western part, there are adjacent faults, namely Renun-C, Renun-B, and the Great Sumatran Fault/GSF. Although historically there have not been many significant earthquakes or seismic activity caused by this fault, this fault has the potential for earthquakes that people around this area must be aware of. These faults across Dairi Regency with 318,000 residents, Samosir Regency with 144,000 residents, Humbang Hasundutan Regency with 170,000 residents, and North Tapanuli Regency with 324,000 residents. Based on population data, studies related to these faults are important for earthquake mitigation. The need for fault studies is the background for the author to carry out a derivative analysis of the gravity anomaly values. The range of Simple Bouguer Anomaly values is -75.2 mGal to 8.3 mGal. Based on FHD data, the position of the fault was successfully determined and based on SVD data after six slicing, it can be estimated that the faults in slice AA', BB', CC' and slice DD' are strike-slip and on the EE' slice and the FF' slice it is of the thrust type.

Keywords: Fault Analysis, Lake Toba, Gravity Anomaly

1. Pendahuluan

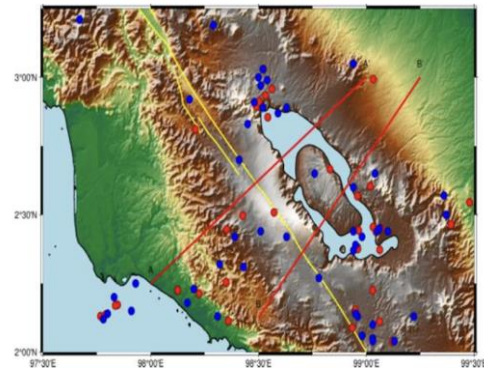
Danau Toba dan Pulau Samosir terbentuk akibat erupsi besar sekitar 74 ribu tahun yang lalu [1]. Di sekitar Danau Toba, terkhusus di bagian barat terdapat sesar-sesar yang berdekatan, yaitu Renun-C, Renun-B, dan Great Sumatran Fault/GSF [2]. Meskipun secara historis tidak banyak gempa signifikan atau aktivitas seismik yang dihasilkan oleh sesar ini, namun sesar ini memiliki potensi gempa yang wajib diwaspadai oleh masyarakat sekitar wilayah ini.

Sesar-sesar ini melintasi Kabupaten Dairi dengan 318.000 penduduk, Kabupaten Samosir dengan 144.000 penduduk, Kabupaten Humbang Hasundutan dengan 170.000 penduduk, dan Kabupaten Tapanuli Utara dengan 324.000 penduduk [3]. Daerah-daerah yang tergolong pemukiman yang cukup padat ialah Tigalingga di Dairi, Sidikalang di Dairi, Samosir, dan Doloksanggul di Humbang Hasundutan.

GSF atau Sesar Semangko terjadi akibat adanya lempeng India-Australia yang menabrak bagian barat pulau Sumatera secara miring, sehingga menghasilkan tekanan dari pergerakan ini. Karena adanya tekanan ini, yang membelah pulau Sumatera dan membentang mulai dari Lampung sampai Banda Aceh. Sesar ini menerus sampai ke Laut Andaman hingga Burma.

Patahan ini merupakan daerah rawan gempa. Sesar Sumatera merupakan sesar *dextral strike slip* yang terdiri dari 20 segmen utama sepanjang tulang punggung Sumatera, salah satunya segmen di sekitar Danau Toba [4]. Sementara itu, di Sumatera Utara sendiri memiliki beberapa sesar aktif, diantaranya adalah segmen Renun-B dan Renun-C [5].

Terdapat penelitian yang membahas sesar Renun-B dan sesar Renun-C. Pada penelitian tersebut direlokasi 82 hiposenter gempabumi dengan metode *double difference* (HypoDD) sehingga menghasilkan peta seismisitas dan *cross section* sebagaimana terlihat pada Gambar 1 [5]. Yang menjadi perbedaan antara penelitian ini dan penelitian tersebut adalah terletak pada fokus wilayahnya. Selain Danau Toba secara umum, fokus wilayah yang diteliti juga mencakup anomali Tigalingga, Sidikalang, Samosir, dan Doloksanggul.



Gambar 1. Peta seismisitas dan *cross section* berdasarkan hasil relokasi HypoDD [5].

Berdasarkan data jumlah penduduk, kajian terkait sesar-sesar ini penting dilakukan dalam langkah mitigasi gempabumi. Salah satu kajian geofisika yang dapat dilakukan untuk mengetahui posisi dan jenis sesar ini adalah metode gravitasi melalui analisis derivatif nilai anomali yaitu *first horizontal derivatives* (FHD) dan *second vertical derivatives* (SVD).

Dengan plot nilai anomali, maka akan dapat diamati batas kontrasnya. Namun, terdapat anomali regional dan lokal yang perlu dipisahkan dalam prosesnya. Penelitian ini menggunakan metode *moving average*. Dalam proses pengolahan untuk mengidentifikasi posisi dan

jenis sesarnya, diperlukan data estimasi densitas regional melalui metode Parasnis, data kedalaman regional dan residual, lalu dikoreksi Bouguer hingga mendapatkan kontur Simple Bouguer Anomaly, dan mendigitasi titik-titik pada *slice* yang memotong garis sesar referensi sehingga mendapatkan variasi anomalnya.

Dalam penelitian ini, metode FHD yang digunakan adalah FHD *backward* dan *forward*, serta koefisien filter yang digunakan adalah Rosenbach. Dengan mengamati korelasi antara grafik FHD dan SVD, maka dapat ditentukan posisi sesar dari jarak ujung titik slicing dan jenis sesar dengan memperhatikan tingkat dominasi anomali positif dan negatif sehingga dapat diketahui merupakan sesar normal, sesar naik atau sesar mendatar.

2. Data dan Metode

2.1. Data GGMPPlus

Global Gravity Model Plus (GGMPlus) adalah data model gravitasi perpaduan antara data pelacakan pesawat ruang angkasa dan data terestrial. GGMPlus menyimpan informasi gravitasi topografi beresolusi tinggi yang berasal dari data topografi *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). GGMPlus memberikan peta dan data gravitasi bumi pada resolusi 200 meter untuk wilayah daratan dan area dekat pantai. GGMPlus memberikan informasi penting untuk memperbaiki standar kisaran minimum percepatan gravitasi jatuh bebas di permukaan bumi [6].

2.2. Estimasi Densitas Metode Parasnis

Metode Parasnis adalah metode perbandingan anomali udara bebas

dengan elevasi. Metode ini dilakukan dengan cara membuat grafik scatter antara nilai anomali udara bebas pada titik pengukuran dengan elevasi lokasi pengukuran. Metode Parasnis didasarkan pada persamaan anomali Bouguer dengan asumsi nilai anomali Bouguernya adalah nol [7].

$$SBA = g_{obs} - g_{\theta} + g_{FA} - g_B = 0 \quad (1)$$

Dimana SBA adalah anomali Bouguer sederhana, g_{obs} adalah harga percepatan gravitasi observasi, g_{θ} adalah harga percepatan gravitasi normal, g_{FA} adalah koreksi udara bebas, dan g_B adalah koreksi Bouguer [7]. Dari asumsi tersebut diperoleh Pers. (2).

$$g_{obs} - g_{\theta} + g_{FA} = g_B \quad (2)$$

$$g_{obs} - g_{\theta} + 0.3086h = (2\pi Gh)\rho$$

Persamaan regresi linear diperoleh setelah muncul grafik *scatter* yang merupakan hubungan antara $g_{obs} - g_{\theta} + 0.3086h$ dan $(2\pi Gh)\rho$.

$$y = ax + b \quad (3)$$

Dimana nilai a adalah nilai estimasi densitas batuan rata-rata [7].

2.3. Simple Bouguer Anomaly (SBA)

Simple Bouguer Anomaly (SBA) merupakan selisih antara nilai gravitasi observasi dengan nilai yang diprediksi oleh model atau nilai gravitasi teoritis yang telah dikoreksi karena beberapa faktor. Faktornya ialah *drift* (kelelahan alat), pasang surut, lintang, *Free Air Anomaly* (udara bebas), dan koreksi Bouguer.

Perbedaan antara SBA dan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) adalah

bahwa tidak terdapat koreksi *terrain* (medan) dan topografi pada SBA [8].

Pengukuran gravitasi pada batas permukaan laut di ketinggian tertentu akan memberikan hasil yang berbeda. Untuk menghilangkan pengaruh ketinggian tersebut diperlukan *Free Air Anomaly* [8]. Koreksi ini dapat dirumuskan oleh Pers. (4).

$$FAA = -0.3086h \quad (4)$$

Dimana FAA adalah koreksi udara bebas dan h adalah elevasi dalam meter. Koreksi Bouguer dilakukan untuk menghilangkan efek tarikan suatu massa pada titik pengamatan dan batas permukaan laut dengan asumsi lapisan tersebut berupa slab tak berhingga [8].

$$BC = 0.04193 \rho h \quad (5)$$

2.4. Analisis Spektrum

Metode analisis spektrum adalah metode pemisahan anomali dengan proses *filtering* yang dapat memperkirakan kedalaman melalui estimasi nilai bilangan gelombang (k) dan amplitudo (A) serta dapat digunakan untuk menghitung lebar jendela filter. Analisis spektrum ini menerapkan transformasi Fourier dalam prosesnya [9]. Hubungan linear antara amplitudo dan bilangan gelombang ditunjukkan oleh persamaan (6).

$$\ln A = (z-z_0)|k| \quad (6)$$

Hasil logaritma ini menunjukkan bahwa kedalaman rata-rata bidang diskontinuitas densitas akan berbanding dengan kemiringan grafik spektrum. Estimasi kedalaman anomali adalah gradien dari masing-masing grafik spektrum pada tiap lintasan. Persamaan estimasi lebar

jendelanya adalah sebagai berikut, dimana Δx adalah spasi data dan n adalah lebar jendela [9].

$$K=2\pi/\lambda; \lambda=n.\Delta x; n=\lambda/\Delta x=2\pi/k\Delta x \quad (7)$$

$$n = 2\pi/(\Delta S.k_c)$$

2.5. Pemisahan Anomali Metode *Moving Average*

Moving average window filter adalah metode pemisahan yang jika dianalisis dari spektrumnya akan menyerupai *low pass filter* sehingga *output* dari proses ini adalah frekuensi rendah dari anomali Bouguer yang akan merepresentasikan kedalaman yang lebih dalam (regional). Selanjutnya anomali residual didapatkan dengan cara mengurangi anomali regional dari anomali Bouguernya.

Adapun untuk rumus anomali residu dan prediksi lebar jendela (n) atau *spectral analysis*-nya adalah sebagai berikut, dimana k_c adalah frekuensi *cut-off* regional dan residual serta ΔS adalah spasi *grid*.

$$\Delta g_{reg(i,j)} = \Delta g_{(i,j)} - \Delta g_{reg(i,j)} \quad (8)$$

2.6. First Horizontal Derivatives

First Horizontal Derivatives (FHD) digunakan untuk mengetahui batas keberadaan struktur berdasarkan variasi lateral dari zona anomali. FHD terbagi menjadi *forward finite difference* dan *backward finite difference*.

$$dg(x_2)/dx \approx (g(x_3) - g(x_1))/(2.\Delta x) \quad (10)$$

Rumus untuk *forward finite difference* (FFD) dan *backward finite difference* (BFD) adalah sebagai berikut.

$$FFD = (f(x + \Delta x) + f(x)) / \Delta x \quad (11)$$

$$BFD = (f(x + \Delta x) + f(x)) / \Delta x \quad (12)$$

2.7. Second Vertical Derivatives

Second Vertical Derivatives (SVD) merupakan metode untuk melihat anomali secara vertikal menggunakan turunan kedua dari sumbu-z. Berikut ini adalah perhitungan SVD dari penurunan persamaan Laplace.

$$\nabla^2 g = 0 \quad (13)$$

$$(\partial^2 g) / (\partial x^2) + (\partial^2 g) / (\partial y^2) + (\partial^2 g) / (\partial z^2) = 0$$

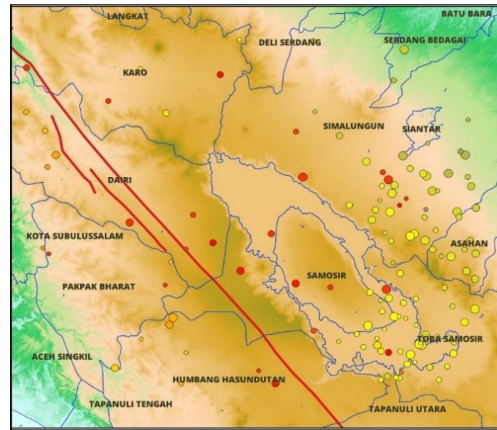
$$(\partial^2 g) / (\partial z^2) = - (\partial^2 g) / (\partial x^2) - (\partial^2 g) / (\partial y^2)$$

Terdapat beberapa koefisien filter SVD, diantaranya adalah Rosenbach (1952). Harhale (2007) menyebutkan bahwa filter Rosenbach memiliki resolusi paling baik dibandingkan matriks lainnya.

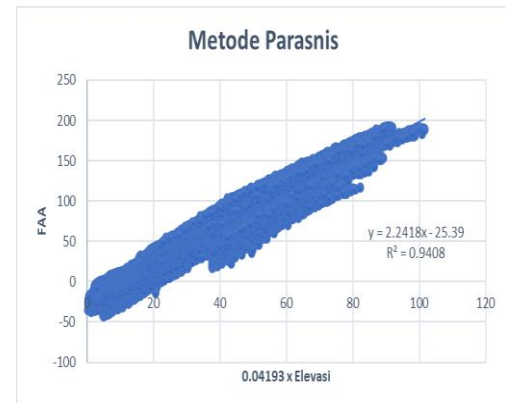
3. Hasil dan Diskusi

Berdasarkan data USGS, seismisitas daerah Danau Toba dengan koordinat lintang 2.3 – 3.2 dan bujur 98.0 – 99.2 dalam rentang waktu 1970 – 2023, diperoleh sejumlah 134 gempa, dan magnitudo maksimumnya adalah 5.6 mb. Elevasi maksimum wilayah penelitian ini adalah 2424 m dan elevasi minimumnya adalah 6 m, teramati bahwa nilai elevasi tinggi terdapat pada bagian barat Danau Toba. Nilai estimasi densitas dengan metode Parasnis di wilayah ini adalah

2.2418 g/cm³ yang merupakan gradien garis berdasarkan persamaan regresi linear $y = 2.2418x - 25.39$ dan nilai koefisien determinasinya adalah 0.9408.



Gambar 2. Wilayah penelitian dengan data elevasi, seismisitas, dan garis sesar referensi.



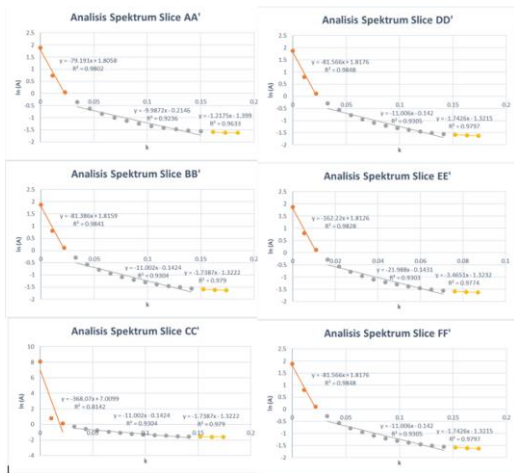
Gambar 3. Estimasi densitas regional di sekitar Danau Toba.

Tabel 1. Kedalaman zona regional dan residual berdasarkan analisis spektrum.

Nama Slice	Kedalaman Zona Regional (m)	Kedalaman Zona Residual (m)
Slice AA'	79.19	9.98
Slice BB'	81.39	11.00
Slice CC'	368.07	11.00
Slice DD'	81.56	11.00
Slice EE'	162.22	21.98
Slice FF'	81.56	11.00

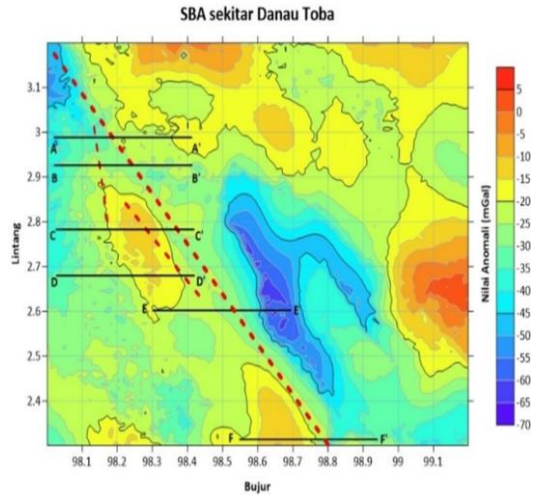
Berdasarkan data analisis spektrum, pada *slice* AA', kedalaman zona regionalnya adalah 79,19 m, residualnya adalah 9,98 m. Pada *slice* BB', kedalaman zona regionalnya adalah 81,39 m, residualnya adalah 11,00 m. Pada *slice* CC', kedalaman zona regionalnya adalah 368,07 m, residualnya adalah 11,00 m. Pada *slice* DD', kedalaman zona regionalnya adalah 81,56 m, residualnya adalah 11,00 m. Pada *slice* EE', kedalaman zona regionalnya adalah 162,22 m, residualnya adalah 21,98 m. Dan pada *slice* FF', kedalaman zona regionalnya adalah 81,56 m, residualnya adalah 11,00 m.

wilayah Tigalingga, Sidikalang, Samosir, dan Doloksanggul. Wilayah nilai SBA ini juga akan diperbesar menyesuaikan koordinat di sekitar keempat wilayah tersebut.

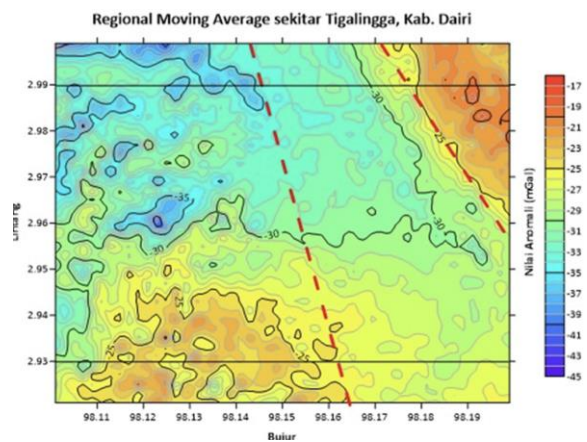


Gambar 4. Analisis spektrum *slice* AA' sampai *slice* FF'.

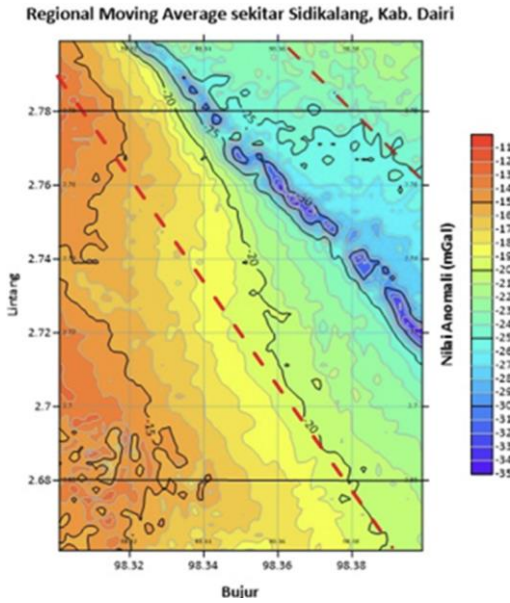
Rentang nilai SBA ialah -75.2 mGal sampai 8.3 mGal. Nilai minimum SBA berada pada koordinat 98.567 BT dan 2.741 LS, serta nilai maksimumnya berada pada koordinat 99.189 BT dan 2.629 LS. Untuk membatasi wilayah yang spesifik dengan nilai anomali tertentu dan kaitannya terhadap keberadaan sesar Renun-C, Renun-B dan GSF, maka diterapkan metode *moving average* untuk memperoleh hasil anomali regional sehingga tampak kontras undulasinya di



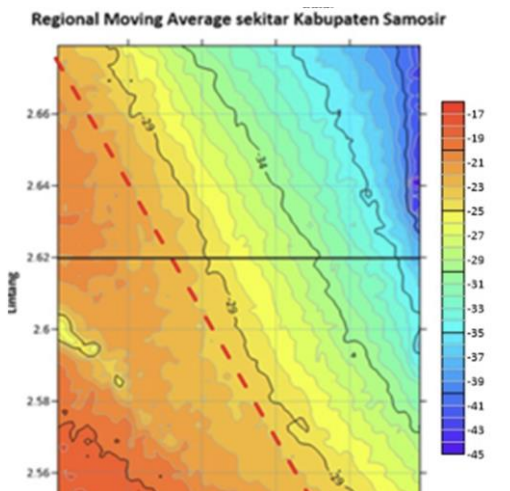
Gambar 5. Nilai *Simple Bouguer Anomaly* (SBA) di sekitar Danau Toba.



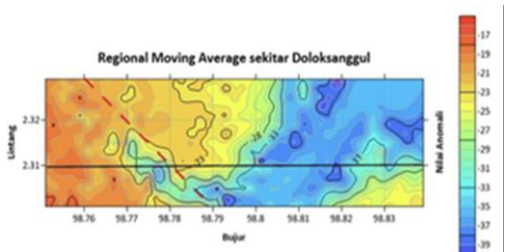
Gambar 6. Kontur anomali regional sekitar Tigalingga di Kabupaten Dairi.



Gambar 7. Kontur anomali regional sekitar Sidikalang di Kabupaten Dairi.

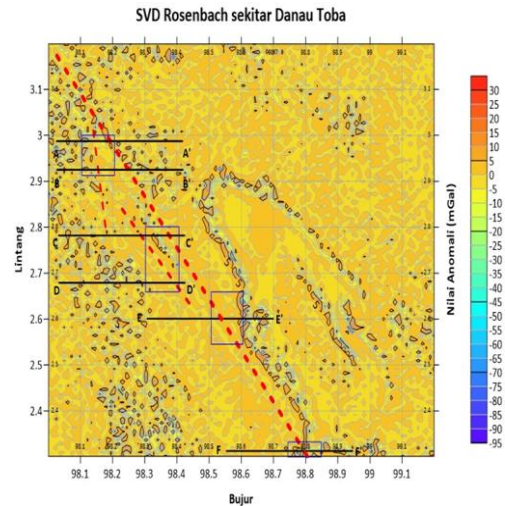


Gambar 8. Kontur anomali regional sekitar Kabupaten Samosir.



Gambar 9. Kontur anomali regional sekitar Doloksanggul.

Penerapan koefisien filter Rosenbach terhadap nilai SBA sepanjang masing-masing enam slice didigitasi dan diperoleh grafik SVD Rosenbach berupa hubungan antara nilai anomali terhadap jarak. Berikut ini adalah kontur SVD Rosenbach sekitar Danau Toba.

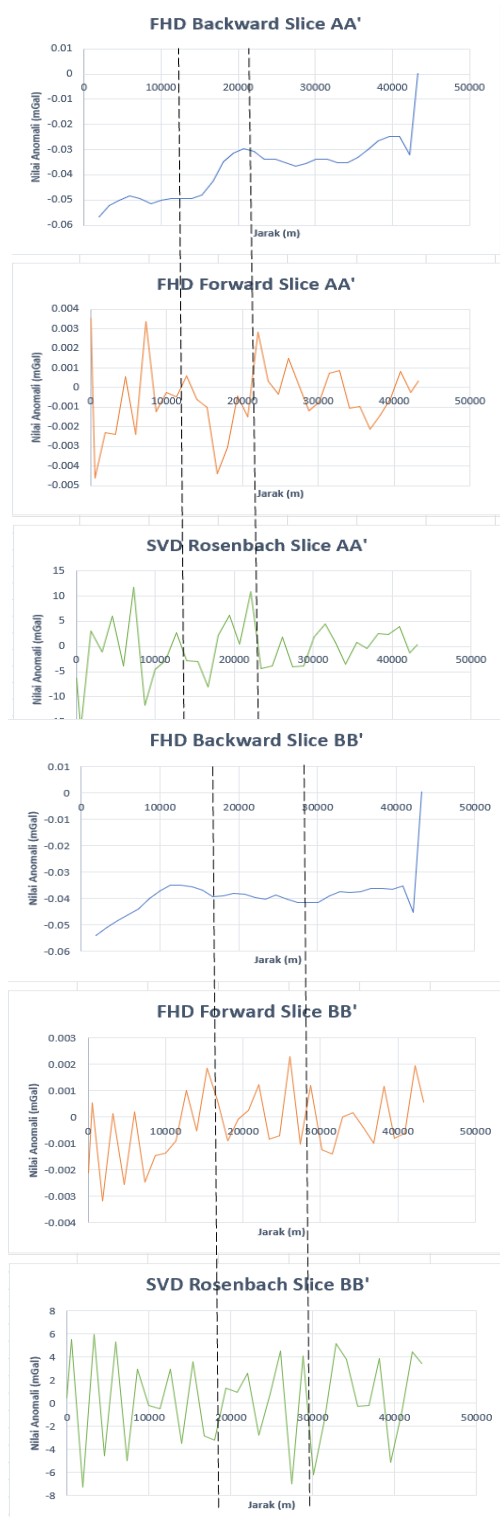


Gambar 10. Kontur SVD koefisien filter Rosenbach di sekitar Danau Toba.

Posisi sesar Renun-C dari titik A berjarak 12,67 km, dan dari titik B berjarak 16,7 km. Sementara itu, posisi GSF dari titik A berjarak 22,07 km, dan dari titik B berjarak 28,78 km. Dari grafik SVD Rosenbach, dapat diperkirakan bahwa sesar di slice AA' dan slice BB' berjenis mendatar karena dominasi nilai anomali negatifnya sama dengan nilai anomali positif.

Tabel 2. Jarak sesar dari titik A dan B.

Nama Sesar	Jarak Sesar dari titik A (km)	Jarak Sesar dari titik B (km)
Renun-C	12.67	16.7
Great Sumatran Fault (GSF)	22.07	28.78

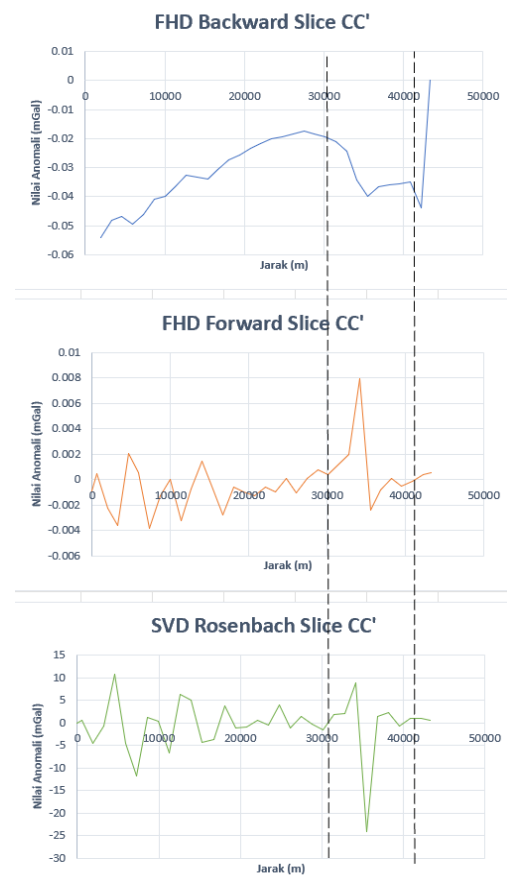


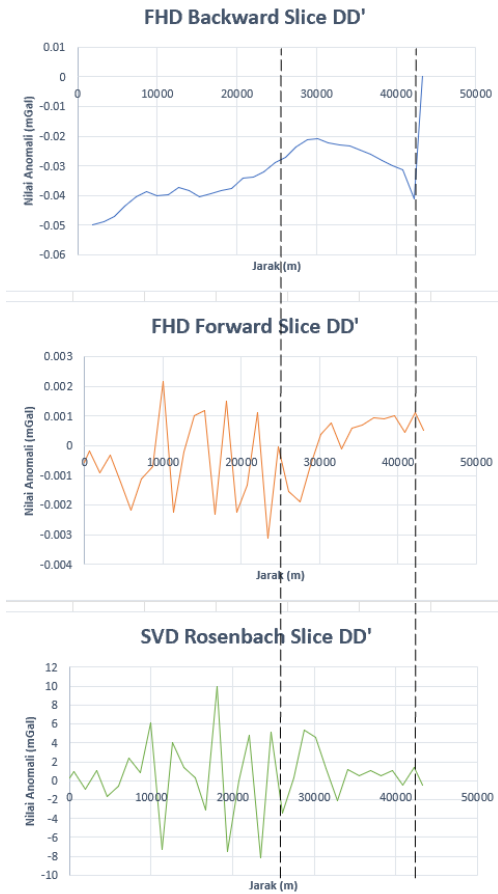
Gambar 11. Grafik korelasi FHD dan SVD pada slice AA' dan slice BB'.

Posisi sesar Renun-B dari titik C berjarak 30,12 km, dan dari titik D berjarak 24,75 km. Sementara itu, posisi GSF dari titik C berjarak 40,87 km, dan dari titik D berjarak 43,29 km. Dari grafik SVD Rosenbach, dapat diperkirakan bahwa sesar di slice CC' dan slice DD' berjenis mendatar karena dominasi nilai anomali negatifnya sama dengan nilai anomali positif.

Tabel 3. Jarak sesar dari titik C dan D.

Nama Sesar	Jarak Sesar dari titik C (km)	Jarak Sesar dari titik D (km)
Renun-B	30.12	24.75
Great Sumatran Fault (GSF)	40.87	43.29



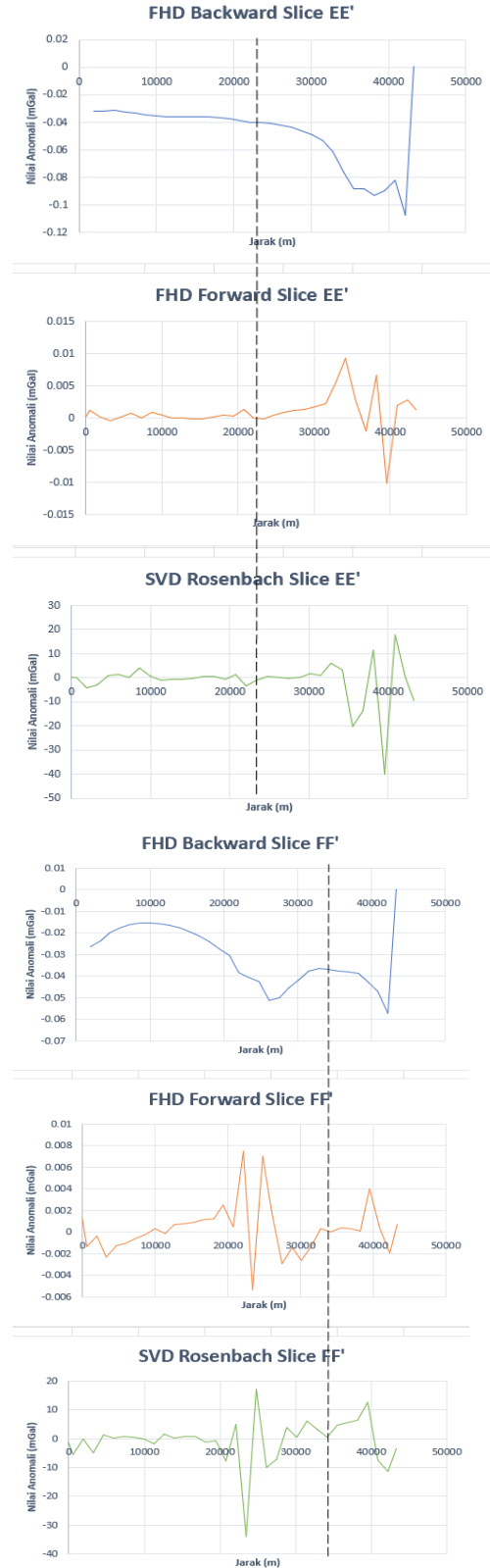


Gambar 12. Grafik korelasi FHD dan SVD pada slice CC' dan slice DD'.

Posisi GSF dari titik E berjarak 30,12 km, dan dari titik F berjarak 24,75 km. Sementara itu, posisi GSF dari titik E berjarak 23,41 km, dan dari titik F berjarak 34,15 km. Dari grafik SVD Rosenbach, dapat diperkirakan bahwa sesar di slice EE' dan slice FF' berjenis *thrust* atau naik karena dominasi nilai anomali positifnya lebih besar dari nilai anomali negatif.

Tabel 4. Jarak sesar dari titik E dan F.

Nama Sesar	Jarak Sesar dari titik E (km)	Jarak Sesar dari titik F (km)
Great Sumatran Fault (GSF)	34.15	23.41



Gambar 13. Grafik korelasi FHD dan SVD pada slice EE' dan slice FF'.

4. Kesimpulan

Elevasi maksimum wilayah penelitian ini adalah 2424 m dan elevasi minimumnya adalah 6 m, teramati bahwa nilai elevasi tinggi terdapat pada bagian barat Danau Toba. Rentang nilai SBA ialah -75.2 mGal sampai 8.3 mGal. Dari grafik SVD Rosenbach, dapat diperkirakan bahwa sesar di *slice* AA', BB', CC' dan *slice* DD' berjenis mendatar karena dominasi nilai anomali negatifnya sama dengan nilai anomali positif. Sementara itu, pada *slice* EE' dan *slice* FF' berjenis thrust atau naik karena dominasi nilai anomali positifnya lebih besar dari nilai anomali negatif.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada lembaga yang menyediakan data GGMPPlus dan DEM SRTM sehingga dapat menyelesaikan penulisan ini. Terima kasih juga diucapkan kepada Bapak dan Ibu BBMKG Wilayah II yang sudah memberikan dukungan untuk menyelesaikan penulisan ini.

Daftar Pustaka

- [1] Chesner, C., Rose, W., Deino, A., Drake, R. and Westgate, J. (1991). *Eruptive history of Earth's largest Quaternary caldera (Toba, Indonesia) clarified*. *Geology*, 19, 200.
- [2] Pusat Studi Gempa Nasional. (2022). *Peta Deagregasi Bahaya Gempa untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- [3] Badan Pusat Statistika. (2023). *Provinsi Sumatera Utara dalam*

Angka: BPS Provinsi Sumatra Utara.

- [4] Sieh, K.; Natawidjaja, D. (2002), *Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia*, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Wiley, 28, 326.
- [5] Sri Wulandari, dkk. (2021). *Relokasi Gempabumi Di Sesar Renun A, B, Dan C Dengan Menggunakan Metode Double Difference (Hypo-DD)*. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*, 4 (2).
- [6] 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*, 16 (40), 4279-4283.
- [7] M Sarkowi. (2011). *Metode Eksplorasi Gaya Berat Diktat Kuliah*. Bandar Lampung: *Universitas Lampung*.
- [8] Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Inc., England.
- [9] R. J. Blakely (1995). *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 441.