

KARAKTERISTIK STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN SESAR PALU-KORO BERDASARKAN INTEGRASI ANALISIS ANOMALI GRAVITASI DAN *FAST SIGMOID EDGE DETECTION* (FSED)

Devid Iman Santoso¹, Supriyadi², Muhamad Syirojudin³, Khalil Ibrahim⁴
Universitas Negeri Semarang^{1,2}, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika³,
Institut Teknologi Bandung⁴
devidsantosobmkg1@students.unnes.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi struktur bawah permukaan Sesar Palu-Koro melalui integrasi analisis anomali gravitasi dan metode *Fast Sigmoid Edge Detection* (FSED). Metode yang digunakan adalah metode gravitasi dengan memanfaatkan data *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang diperoleh dari GGMplus/SRTM2Gravity2018. Data dianalisis melalui pemisahan anomali regional dan residual, serta analisis turunan medan potensial yang meliputi *Derivative-X*, *Derivative-Y*, *Derivative-Z*, *Horizontal Gradient Magnitude* (HGM), *Tilt Angle* (TA), *Tilt Angle Horizontal Gradient* (TAHG), dan FSED. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jalur utama Sesar Palu-Koro dicirikan oleh gradien gravitasi yang tinggi, perubahan tanda *Tilt Angle* yang konsisten, serta respons FSED yang kuat dan kontinu. Analisis diagram *rose* kelurusan menunjukkan orientasi dominan utara-selatan hingga barat laut-tenggara yang sejalan dengan arah regional sesar. Simpulan, integrasi berbagai atribut anomali gravitasi mampu mengidentifikasi geometri dan segmentasi struktur Sesar Palu-Koro secara efektif sehingga berpotensi menjadi pendekatan yang andal dalam pemetaan sesar aktif serta mendukung kajian bahaya seismik di Sulawesi Tengah.

Kata Kunci: Anomali Gravitasi, FSED, Ggmplus/SRTM2Gravity2018, Sesar Palu-Koro, Struktur Bawah Permukaan, *Tilt Angle*

ABSTRACT

This study aimed to characterize the subsurface structure of the Palu-Koro Fault through the integration of gravity anomaly analysis and the Fast Sigmoid Edge Detection (FSED) method. The study employed the gravity method using Complete Bouguer Anomaly (CBA) data derived from GGMplus/SRTM2Gravity2018. The data were analyzed through regional-residual anomaly separation and potential field derivative analyses, including Derivative-X, Derivative-Y, Derivative-Z, Horizontal Gradient Magnitude (HGM), Tilt Angle (TA), Tilt Angle Horizontal Gradient (TAHG), and FSED. The results indicate that the main trace of the Palu-Koro Fault is characterized by high gravity gradients, consistent sign changes in the Tilt Angle, and strong, continuous FSED responses. Rose diagram analysis of lineaments reveals dominant north-south to northwest-southeast orientations that

are consistent with the regional fault trend. In conclusion, the integration of multiple gravity anomaly attributes effectively delineates the geometry and structural segmentation of the Palu-Koro Fault, demonstrating its potential as a reliable approach for active fault mapping and providing an important scientific basis for seismic hazard assessment in Central Sulawesi.

Keywords: *FSED, GGMplus/SRTM2Gravity2018, Gravity Anomaly, Palu-Koro Fault, Subsurface Structure, Tilt Angle*

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada wilayah pertemuan beberapa lempeng tektonik utama dan mikroblok aktif, yang menjadikannya salah satu kawasan dengan tingkat deformasi kerak dan aktivitas seismik tertinggi di dunia (Bird, 2003; Hamilton, 1979). Kondisi ini tercermin dari tingginya frekuensi gempa bumi dan keberadaan sistem sesar aktif yang tersebar luas di berbagai pulau besar, termasuk Sulawesi. Di antara struktur-struktur tersebut, Sesar Palu-Koro memegang peranan penting sebagai sesar geser mendatar aktif yang mengontrol dinamika tektonik Sulawesi Tengah (Bellier et al., 2001; Rangin et al., 1999).

Secara morfotektonik, Sesar Palu-Koro berkembang sebagai zona kelurusan mencolok yang memanjang hampir utara-selatan dan membentuk Lembah Palu. Studi geodetik dan geologi menunjukkan bahwa sesar ini memiliki laju geser yang tinggi, berkisar antara 29-45 mm/tahun, menjadikannya salah satu sesar mendatar tercepat di kawasan Asia Tenggara (Socquet et al., 2006; Watkinson & Hall, 2017). Aktivitas ini tercermin dalam sejarah kegempaan signifikan, termasuk gempa bumi besar pada tahun 1927, 1968, 1996, dan terutama peristiwa 28 September 2018 yang memicu kerusakan luas, tsunami Teluk Palu, serta fenomena likuifaksi ekstrem (BMKG, 2018; Song et al., 2019; USGS, 2018).

Peristiwa gempa 2018 menggarisbawahi pentingnya pemahaman struktur bawah permukaan, karena tingkat kerusakan tidak hanya dikontrol oleh sumber gempa, tetapi juga oleh kondisi geologi lokal seperti ketebalan sedimen dan geometri batuan dasar (Mochales et al., 2008; Rosid et al., 2023). Oleh karena itu, pemetaan struktur bawah permukaan yang andal menjadi kebutuhan mendesak dalam konteks mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis risiko, sejalan dengan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PuSGeN, 2017).

Metode gravitasi merupakan salah satu pendekatan geofisika yang efektif untuk mengidentifikasi variasi densitas batuan bawah permukaan yang berkaitan dengan struktur geologi seperti sesar dan cekungan sedimen (Telford et al., 1990; Blakely, 1995). Namun, interpretasi anomali gravitasi konvensional sering kali bersifat ambigu karena merupakan superposisi pengaruh sumber pada berbagai kedalaman. Oleh sebab itu, diperlukan transformasi dan analisis lanjutan, seperti pemisahan regional-residual, turunan medan potensial, filter berbasis tilt, serta metode deteksi tepi nonlinier seperti FSED (Miller & Singh, 1994; Cooper &

Cowan, 2006).

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas metode gravitasi dalam mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan pada wilayah tektonik aktif. Mochales et al. (2008) menunjukkan bahwa analisis atribut medan potensial dapat meningkatkan kemampuan deteksi batas struktur geologi, sedangkan Cooper dan Cowan (2006) mengembangkan pendekatan berbasis tilt derivative untuk memperjelas posisi sumber anomali. Di wilayah Indonesia, pemanfaatan data gravitasi juga telah digunakan untuk mengkarakterisasi kondisi geologi bawah permukaan dan sistem sesar aktif pada berbagai lingkungan tektonik, termasuk di Sulawesi (Rosid et al., 2023). Namun demikian, kajian yang mengintegrasikan berbagai atribut gravitasi dengan metode Filter of Standardized Enhanced Derivative (FSED) untuk karakterisasi detail struktur bawah permukaan Sesar Palu-Koro masih relatif terbatas.

Penelitian ini menyajikan integrasi komprehensif antara berbagai atribut gravitasi dan FSED untuk mengkarakterisasi struktur bawah permukaan Sesar Palu-Koro secara lebih objektif dan detail, sekaligus menjembatani kebutuhan ilmiah dan aplikatif dalam kajian bahaya seismik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi struktur bawah permukaan di sekitar Sesar Palu-Koro melalui integrasi berbagai atribut data gravitasi dan metode FSED guna memperoleh gambaran yang lebih rinci mengenai batas dan geometri struktur geologi aktif. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan dan integrasi berbagai atribut medan potensial gravitasi bersama metode FSED dalam satu kerangka interpretasi yang terpadu untuk memetakan struktur bawah permukaan Sesar Palu-Koro. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi ambiguitas interpretasi anomali gravitasi dan meningkatkan ketelitian dalam identifikasi batas struktur geologi.

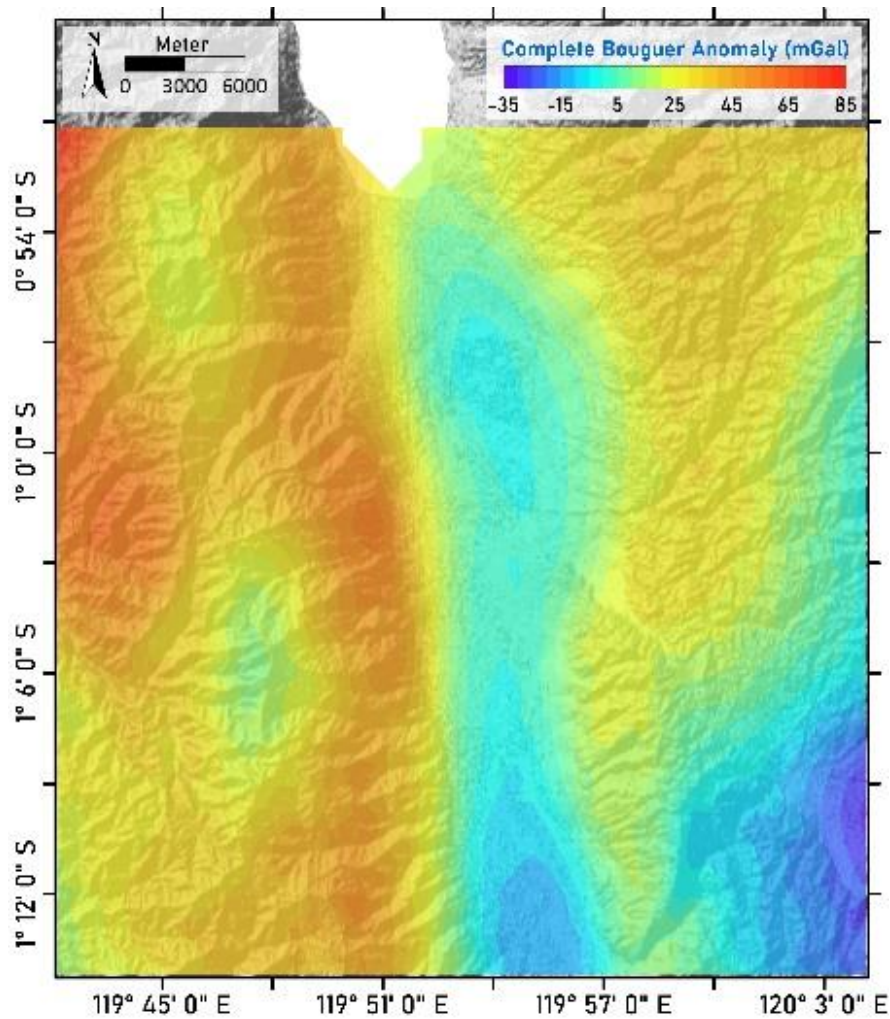
Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai karakteristik struktur bawah permukaan Sesar Palu-Koro, mendukung pengembangan model tektonik regional, meningkatkan pemahaman terhadap sumber bahaya gempa bumi, serta menjadi informasi pendukung bagi upaya mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis risiko di Sulawesi Tengah.

METODE PENELITIAN

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder yang diolah melalui serangkaian tahapan pengolahan data gravitasi hingga diperoleh *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Anomali Bouguer lengkap merupakan hasil koreksi terhadap pengaruh non-geologi, sehingga nilai yang diperoleh merepresentasikan distribusi variasi densitas batuan di bawah permukaan secara lebih akurat. Peta sebaran nilai CBA pada daerah penelitian disajikan pada Gambar 1 dan digunakan sebagai dasar untuk menganalisis karakteristik anomali

gravitasi serta mengidentifikasi indikasi struktur geologi yang berkembang di wilayah penelitian.



Gambar 1. Peta *Complete Bouguer Anomaly*

Data primer diperoleh melalui pengukuran gravitasi lapangan menggunakan gravimeter Scintrex CG-5 pada tahun 2021 sebanyak 126 titik, dengan posisi dan elevasi ortometrik ditentukan menggunakan GPS geodetik. Nilai gravitasi observasi dikoreksi terhadap pengaruh pasang surut, drift instrumen, lintang, udara bebas, Bouguer, serta medan/topografi, sehingga diperoleh nilai CBA yang merepresentasikan variasi densitas lateral batuan bawah permukaan (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997).

Data sekunder berasal dari model gravitasi global GGMPlus/SRTM2Gravity2018 dan digunakan untuk memperluas cakupan spasial serta memperhalus interpolasi gravitasi yang mencakup area pengukuran lapangan dan zona utama Sesar Palu-Koro (Hirt et al., 2013; Hirt et al., 2018). Seluruh data primer dan sekunder kemudian diintegrasikan dan digridding untuk menghasilkan CBA yang representatif sebagai dasar interpretasi struktur bawah permukaan. Data utama terdiri data primer dan data sekunder kemudian diolah masing-masing diolah

sampai menghasilkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA), yang diperoleh setelah penerapan koreksi lintang, udara bebas, Bouguer, dan medan/topografi (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997). CBA merepresentasikan variasi densitas lateral batuan bawah permukaan dan menjadi dasar utama interpretasi struktur geologi.

Pemisahan Anomali Regional-Residual

Pemisahan regional-residual dilakukan untuk memisahkan komponen berfrekuensi rendah (sumber dalam) dari komponen berfrekuensi tinggi (sumber dangkal), sesuai prinsip superposisi medan potensial (Blakely, 1995; Spector & Grant, 1970). Dalam penelitian ini, pemisahan dipandu oleh analisis spektral Radially Averaged Power Spectrum (RAPS) untuk menentukan frekuensi potong yang objektif, sehingga anomali residual benar-benar merepresentasikan struktur dangkal seperti sesar dan cekungan sedimen (Hanif et al., 2021; Safani et al., 2023).

Turunan Medan Potensial

Untuk meningkatkan kejelasan batas struktur, dihitung turunan pertama medan gravitasi terhadap arah horizontal dan vertikal:

$$\frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial G}{\partial y}, \frac{\partial G}{\partial z} \quad (1)$$

Turunan horizontal (derivative-x dan derivative-y) sensitif terhadap perubahan lateral densitas, sedangkan turunan vertikal (derivative-z) menekankan diskontinuitas densitas dangkal (Verduzco et al., 2004).

Horizontal Gradient Magnitude

Horizontal Gradient Magnitude dihitung menggunakan persamaan:

$$HGM = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

Nilai HGM maksimum umumnya berasosiasi dengan tepi sumber densitas dua-dimensi, sehingga efektif untuk mendelineasi batas sesar dan kontak litologi (Blakely, 1995; Balkan & Tün, 2023).

Tilt Angle dan TAHG

Tilt Angle (TA) dihitung untuk menormalkan hubungan antara turunan vertikal dan horizontal, sehingga batas struktur dapat diidentifikasi tanpa ketergantungan kuat pada amplitudo anomali :

$$TA = \arctan \left(\frac{\left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (3)$$

Perubahan tanda TA dari positif ke negatif mengindikasikan posisi batas sumber densitas (Miller & Singh, 1994; Salem et al., 2008). Untuk meningkatkan ketegasan batas, dihitung pula *Tilt Angle Horizontal Gradient* (TAHG), yang dapat menunjukkan kontinuitas struktur sesar secara lebih jelas.

Fast Sigmoid Edge Detection (FSED)

Fast Sigmoid Edge Detection merupakan metode deteksi tepi nonlinier yang memanfaatkan fungsi sigmoid untuk mempertegas zona transisi gradien dan mereduksi noise (Cooper & Cowan, 2006) dihitung dengan persamaan :

$$FSED = \frac{W}{(1+|W|)} \quad (4)$$

$$W = \frac{\left(\frac{\partial HGM}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial HGM}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial HGM}{\partial y}\right)^2\right)}} \quad (5)$$

FSED diaplikasikan pada anomali residual dan atribut gradien, menghasilkan peta batas struktur yang paling kontras dibandingkan metode lainnya.

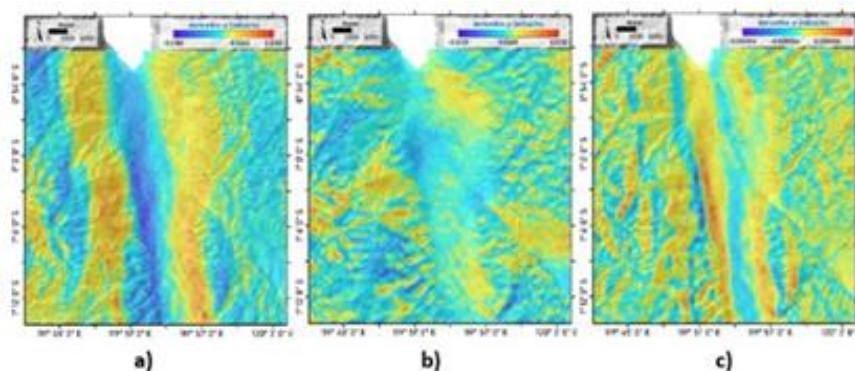
Analisis Kelurusan dan Diagram Rose

Kelurusan struktur diekstraksi dari peta FSED dan dianalisis menggunakan diagram rose untuk menentukan orientasi dominan sesar dan rekahan terkait. Diagram rose menunjukkan dominasi arah utara-selatan hingga barat laut-tenggara, konsisten dengan arah regional Sesar Palu-Koro (Bellier et al., 2001; Watkinson & Hall, 2017).

HASIL PENELITIAN

Anomali Regional dan Residual

Anomali regional hasil upward continuation 5000 m memperlihatkan pola halus dengan nilai -20 hingga 70 mGal yang mencerminkan pengaruh struktur dalam berskala regional.

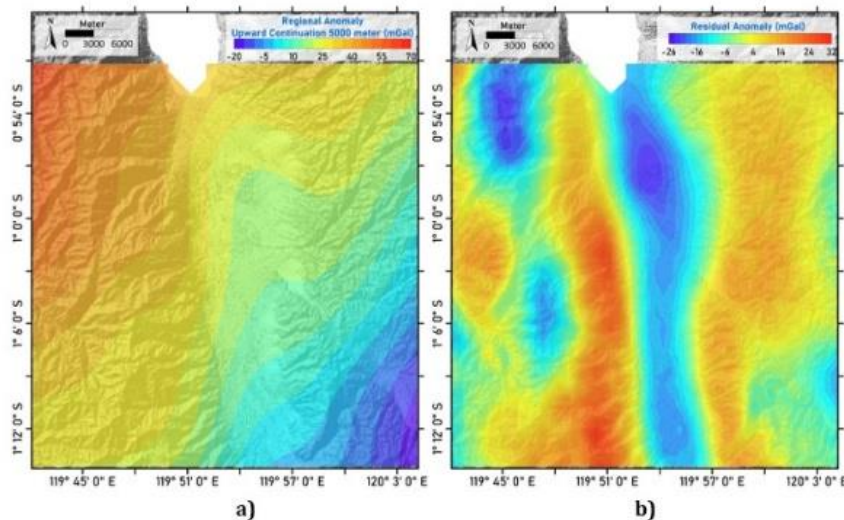


Gambar 2. Peta a) Anomali Regional, b) Anomali Residual

Sebaliknya, anomali residual dengan rentang -26 hingga 32 mGal menampilkan kontras tajam dan kelurusan linier yang berkaitan dengan sumber dangkal seperti cekungan sedimen dan zona Sesar Palu-Koro

Respon Turunan dan HGM

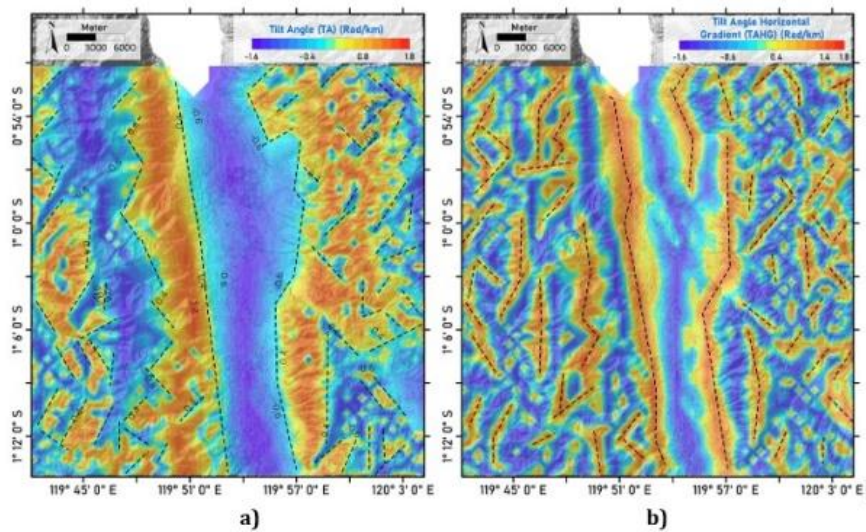
Peta derivative-x dan derivative-y menunjukkan gradien tajam pada zona sesar sedangkan derivative-z memperlihatkan diskontinuitas densitas yang jelas ditunjukkan Gambar 2. HGM menampilkan pita nilai tinggi yang kontinu, mengindikasikan batas struktur utama dan beberapa struktur sekunder yang berkembang di sekitar jalur sesar (Firdaus et al., 2016; Syaputra et al., 2023).



Gambar 3. Turunan orde pertama dari peta anomali gravitasi residual, dari kiri ke kanan yaitu: a) turunan terhadap sumbu -x, b) turunan terhadap sumbu -y, dan c) turunan terhadap sumbu -z.

Tilt Angle dan TAHG

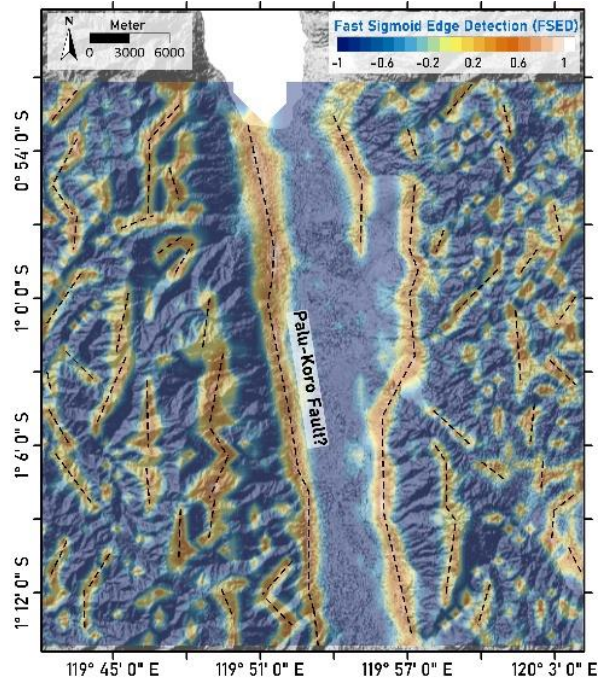
Peta *Tilt Angle* (TA) menunjukkan perubahan tanda yang konsisten di sepanjang jalur utama Sesar Palu–Koro, yang mengindikasikan posisi batas sumber densitas secara akurat ditunjukkan pada Gambar 4. Zona peralihan nilai positif–negatif TA membentuk kelurusan memanjang yang selaras dengan arah sesar. Peta *Tilt Angle Horizontal Gradient* (TAHG) mempertegas kontinuitas kelurusan tersebut dan menampilkan kontras lebih tajam dibanding TA. Pola ini memudahkan pemisahan antara sesar utama dan struktur minor di sekitarnya, sejalan dengan temuan Cooper dan Cowan (2006).



Gambar 4. Peta a) *Tilt Angle*, b) *TAHG*.

Fast Sigmoid Edge Detection

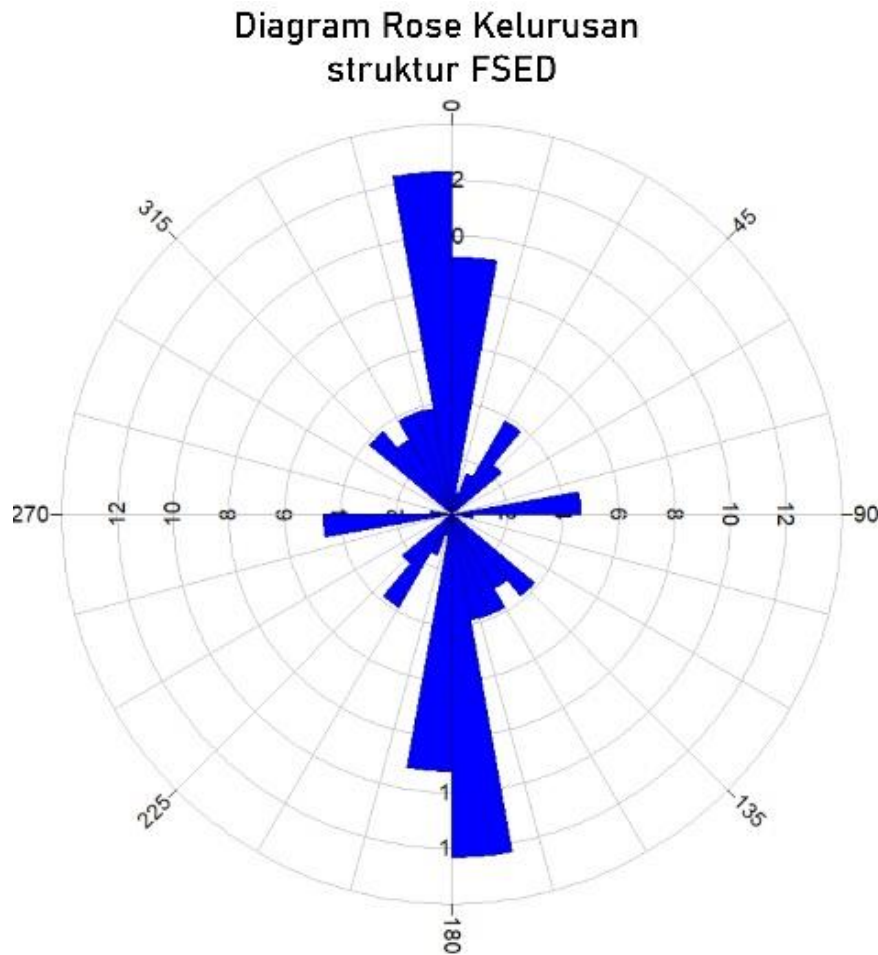
Peta *Fast Sigmoid Edge Detection* (FSED) memperlihatkan delineasi struktur paling tegas di wilayah Palu-Koro. Respon FSED yang kuat dan kontinu membentuk jalur linier utama berorientasi utara–selatan hingga barat laut-tenggara yang diinterpretasikan sebagai jejak utama Sesar Palu-Koro. Kelurusan-kelurusan sekunder di sisi barat dan timur menunjukkan adanya segmentasi dan percabangan struktur akibat deformasi geser. Pola ini menegaskan keberadaan kontras densitas signifikan antarblok batuan dalam zona deformasi yang lebar. ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Peta *Fast Sigmoid Edge Detection* (FSED)

Orientasi Struktur

Diagram rose kelurusan menunjukkan orientasi dominan utara-selatan hingga barat laut-tenggara, dengan orientasi sekunder timur laut-barat daya yang mencerminkan struktur akomodasi dan rekahan sekunder. Pola ini konsisten dengan model tektonik regional Sulawesi Tengah (Hall et al., 2011; Socquet et al., 2006).



Gambar 6. Diagram Rose

PEMBAHASAN

Pola *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) pada wilayah Palu menunjukkan kontras anomali yang jelas antara bagian barat dan timur daerah penelitian, yang mencerminkan perbedaan densitas batuan dan konfigurasi geologi regional di sekitar jalur sesar. Zona anomali relatif rendah yang memanjang di bagian tengah wilayah diinterpretasikan sebagai cekungan struktural yang berkaitan dengan Lembah Palu dan pengisian sedimen Kuartar yang tebal. Keberadaan cekungan ini sejalan dengan model tektonik pull-apart basin yang umum berkembang pada sistem sesar mendatar aktif. (Blakely, 1995; Bellier et al., 2001; PuSGeN, 2017).

Setelah dilakukan pemisahan regional-residual, anomali residual memperlihatkan pola linier beramplitudo kontras yang semakin tegas dan berimpit

dengan jalur utama Sesar Palu-Koro. Hal ini menunjukkan bahwa komponen residual lebih sensitif terhadap sumber dangkal yang berkaitan langsung dengan struktur sesar dibandingkan anomali Bouguer total. Pola linier tersebut mengindikasikan keberadaan diskontinuitas densitas batuan yang tajam, yang umumnya diasosiasikan dengan zona sesar aktif. (Spector & Grant, 1970; Blakely, 1995; Safani et al., 2023).

Turunan pertama medan gravitasi arah horizontal ($\partial g/\partial x$ dan $\partial g/\partial y$) menunjukkan perubahan gradien yang signifikan pada zona yang sama dengan anomali residual linier. Respon ini mengindikasikan adanya perubahan lateral densitas batuan yang tajam, yang merupakan ciri umum batas struktur geologi seperti sesar atau kontak litologi. Kepekaan turunan horizontal terhadap perubahan lateral menjadikannya efektif dalam mendeteksi batas struktur meskipun amplitudo anomali relatif kecil. (Verduzco et al., 2004; Blakely, 1995).

Peta Horizontal Gradient Magnitude (HGM) memperlihatkan nilai maksimum yang memanjang secara kontinu di sepanjang jalur Sesar Palu-Koro. Nilai maksimum HGM secara teoritis berasosiasi dengan posisi tepi sumber densitas dua-dimensi, sehingga interpretasi zona maksimum HGM sebagai batas struktur sesar menjadi cukup kuat. Keberlanjutan respon HGM ini juga mengindikasikan bahwa Sesar Palu-Koro berkembang sebagai struktur regional yang menerus, bukan struktur lokal terisolasi. (Blakely, 1995; Miller & Singh, 1994; Balkan & Tün, 2023).

Metode *Tilt Angle* (TA) memberikan perspektif tambahan dalam interpretasi struktur bawah permukaan karena relatif independen terhadap amplitudo anomali. Perubahan tanda nilai TA dari positif ke negatif yang teridentifikasi secara konsisten di sepanjang jalur sesar mengindikasikan posisi batas sumber densitas dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa zona tersebut merupakan diskontinuitas struktural utama di wilayah penelitian. (Miller & Singh, 1994; Salem et al., 2008).

Peta *Tilt Angle* Horizontal Gradient (TAHG) semakin mempertegas batas lateral struktur dengan menonjolkan gradien spasial nilai TA. Respon TAHG yang tinggi dan kontinu pada jalur yang sama dengan HGM dan anomali residual memperkuat interpretasi bahwa struktur tersebut merupakan jalur utama Sesar Palu-Koro. Penggunaan TAHG juga membantu membedakan sesar utama dari struktur minor yang mungkin muncul akibat heterogenitas lokal. (Salem et al., 2008; Cooper & Cowan, 2006).

Hasil *Fast Sigmoid Edge Detection* (FSED) menunjukkan delineasi batas struktur yang paling kontras dibandingkan seluruh metode transformasi lainnya. Respon FSED membentuk jalur linier yang tajam dan menerus, yang berimpit dengan jalur sesar yang teridentifikasi pada peta anomali residual, HGM, dan TAHG. Hal ini menunjukkan bahwa FSED sangat efektif dalam menegaskan zona transisi densitas yang merepresentasikan bidang sesar. (Cooper & Cowan, 2006; Ibrahim et al., 2025).

Selain jalur utama, FSED juga mengungkap keberadaan segmentasi dan percabangan struktur di sekitar Sesar Palu-Koro. Segmentasi ini mengindikasikan bahwa sesar tidak berkembang sebagai satu bidang tunggal, melainkan sebagai zona deformasi lebar yang terdiri atas beberapa segmen aktif. Karakter ini sejalan dengan model sesar mendatar aktif yang sering menunjukkan kompleksitas geometrik akibat interaksi tegasan regional dan lokal. (Bellier et al., 2001; Watkinson & Hall, 2017).

Analisis kelurusan berbasis diagram rose menunjukkan orientasi dominan utara-selatan hingga barat laut-tenggara. Orientasi ini konsisten dengan arah regional Sesar Palu-Koro yang telah dilaporkan dalam berbagai studi geologi dan geodetik sebelumnya. Konsistensi orientasi ini menunjukkan bahwa struktur yang teridentifikasi dari data gravitasi memang merepresentasikan sistem sesar regional, bukan artefak pengolahan data. (Rangin et al., 1999; Bellier et al., 2001; Watkinson & Hall, 2017).

Orientasi sekunder timur laut-barat daya yang juga teridentifikasi diinterpretasikan sebagai struktur akomodasi atau rekahan sekunder yang berkembang akibat mekanisme geser mendatar dengan komponen tarik dan tekan lokal. Keberadaan struktur sekunder ini memperkuat interpretasi bahwa deformasi di sekitar Sesar Palu-Koro bersifat kompleks dan terdistribusi secara spasial. (Hall et al., 2011).

Zona anomali densitas rendah yang diinterpretasikan sebagai cekungan sedimen berpotensi mengalami amplifikasi guncangan seismik. Kondisi ini sejalan dengan sebaran kerusakan dan kejadian likuifaksi masif pada gempa Palu 2018, yang banyak terjadi pada area dengan endapan sedimen lepas dan ketebalan sedimen signifikan. Dengan demikian, hasil interpretasi gravitasi memberikan dasar geofisika yang kuat untuk menjelaskan variasi dampak gempa secara spasial. (BMKG, 2018; USGS, 2018; Song et al., 2019).

Integrasi informasi struktur bawah permukaan dari data gravitasi dengan observasi kerusakan permukaan menunjukkan bahwa kajian geofisika struktur dapat berperan penting dalam penyusunan peta bahaya seismik dan perencanaan tata ruang berbasis risiko. Oleh karena itu, pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki relevansi langsung terhadap upaya mitigasi bencana di wilayah Palu dan sekitarnya. (PuSGeN, 2024; Mochales et al., 2008).

SIMPULAN

Analisis data gravitasi di wilayah Palu berhasil mengungkap karakteristik struktur bawah permukaan yang kuat dan konsisten dengan keberadaan serta perkembangan Sesar Palu-Koro sebagai struktur regional utama. Pola *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) menunjukkan kontras anomali yang jelas antara bagian barat dan timur wilayah penelitian, yang mencerminkan perbedaan densitas batuan dan tatanan geologi regional. Zona anomali rendah yang memanjang di bagian tengah diinterpretasikan sebagai cekungan struktural Lembah Palu dengan

pengisian sedimen Kuartar yang tebal, selaras dengan model tektonik pull-apart basin pada sistem sesar mendatar aktif.

Pemisahan anomali regional–residual mempertegas respon anomali dangkal yang berasosiasi langsung dengan jalur Sesar Palu–Koro. Anomali residual, turunan horizontal medan gravitasi, serta peta Horizontal Gradient Magnitude (HGM) secara konsisten menampilkan pola linier beramplitudo tinggi yang berimpit dengan jalur sesar, mengindikasikan adanya diskontinuitas densitas batuan yang tajam. Metode *Tilt Angle* (TA) dan *Tilt Angle* Horizontal Gradient (TAHG) semakin memperkuat penentuan batas struktur, dengan perubahan tanda dan gradien tinggi yang menandai posisi sesar secara jelas dan kontinu.

Metode *Fast Sigmoid Edge Detection* (FSED) memberikan hasil delineasi batas struktur paling kontras dan detail, sekaligus mengungkap segmentasi dan percabangan di sepanjang Sesar Palu–Koro. Temuan ini menunjukkan bahwa sesar berkembang sebagai zona deformasi yang kompleks dan tersegmentasi, bukan sebagai satu bidang tunggal. Analisis kelurusan dan diagram rose memperlihatkan orientasi dominan utara–selatan hingga barat laut–tenggara yang konsisten dengan arah regional Sesar Palu–Koro, serta orientasi sekunder timur laut–barat daya yang diinterpretasikan sebagai struktur akomodasi akibat deformasi geser mendatar.

Keberadaan cekungan sedimen berdensitas rendah yang teridentifikasi dari data gravitasi memiliki implikasi penting terhadap bahaya seismik, khususnya potensi amplifikasi guncangan dan likuifaksi, sebagaimana tercermin pada dampak Gempa Palu 2018. Dengan demikian, integrasi analisis gravitasi dan metode transformasi tepi terbukti efektif dalam memetakan struktur aktif dan kompleksitas deformasi di wilayah Palu. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan sebagai dasar geofisika dalam penyusunan peta bahaya seismik dan perencanaan tata ruang berbasis mitigasi risiko bencana di kawasan Palu dan sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Balkan, E., & Tün, M. (2023). Delineation of subsurface structures using gravity gradient-based edge detection methods. *Journal of Applied Geophysics*, 210, 104882. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104882>
- Bellier, O., Sébrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourlès, D., & Siame, L. (2001). High slip rate for a low seismicity along the Palu–Koro active fault in central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova*, 13(6), 463–470. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00382.x>
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3), 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2018). *Laporan kejadian gempa bumi dan tsunami Palu–Donggala 28 September 2018*.

BMKG. <https://www.bmkg.go.id>

- Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the logistic function. *Geophysical Prospecting*, 54(3), 335–346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2006.00520.x>
- Firdaus, M. W., Setyawan, A., & Yusuf, M. (2016). Identifikasi letak dan jenis sesar berdasarkan metode gayabarat Second Vertical Gradient studi kasus Sesar Lembang, Kota Bandung, Jawa. *Youngster Physics Journal*, 5(1), 27–34. <https://doi.org/10.14710/ypj.5.1.27-34>
- Hall, R., Cottam, M. A., & Wilson, M. E. J. (2011). The SE Asian gateway: History and tectonics of the Australia–Asia collision. *Geological Society Special Publication*, 355, 1–6. <https://doi.org/10.1144/SP355.1>
- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1078). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/pp1078>
- Hanif, M., Safani, J., & Haryanto, A. D. (2021). Spectral analysis for gravity anomaly separation using RAPS method. *Indonesian Journal of Geophysics*, 18(2), 89–101. <https://doi.org/10.36435/ijg.v18i2.527>
- Hirt, C., Claessens, S. J., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New ultra-high resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>
- Hirt, C., Rexer, M., Claessens, S. J., & Featherstone, W. E. (2018). SRTM2gravity: An ultra-high resolution global model of gravimetric terrain effects. *Earth System Science Data*, 10(2), 925–940. <https://doi.org/10.5194/essd-10-925-2018>
- Ibrahim, K., Bijaksana, S., Abdurrachman, M., Sahara, D. P., Suryanata, P. B., Zulaikah, S., Wirawan, R., Harlianti, U., Widagdo, T. A. M., Fajar, S. J., Noya, Y., & Suandayani, N. K. T. (2025). Contrasting magmatic structures and tectonic controls from integrated gravity and magnetic data in the Bromo–Tengger–Semeru complex and the Lamongan Volcanic Field, East Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 468, 108455. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108455>
- Miller, H. G., & Singh, V. (1994). Potential field tilt — a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2–3), 213–217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
- Mochales, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Pueyo, O., Roman, M. T., Pocoví, A., Barnolas, A., & Oliva-Urcia, B. (2008). Surface to subsurface 3D geology, structure and kinematic evolution of the Sant Llorenç de Morunys anticline (Southeastern Pyrenees, NE Spain). *Tectonophysics*, 459(1–4), 54–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.068>
- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Balitbang Kementerian PUPR. ISBN 978-602-5489-01-3.

- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2024). *Peta deagregasi bahaya gempa Indonesia untuk perencanaan dan evaluasi infrastruktur tahan gempa*. Pusat Studi Gempa Nasional, Kementerian PUPR.
- Rangin, C., Spakman, W., Pubellier, M., & Bijwaard, H. (1999). Tomographic and geological constraints on subduction along the eastern Sundaland continental margin (South-East Asia). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 170(6), 775–788.
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley.
- Rosid, M. S., Khoirunisa, A., & Haryono, A. (2023). Sediment thickness and seismic amplification in Palu Basin from gravity data analysis. *Natural Hazards*, 118(2), 1123–1145. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06079-7>
- Safari, J., Hanif, M., & Nugraha, A. D. (2023). Objective cutoff determination for gravity anomaly separation using RAPS. *Journal of Geophysical Engineering*, 20(2), 245–258. <https://doi.org/10.1093/jge/gxad010>
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., & Smith, R. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1–L10. <https://doi.org/10.1190/1.2799990>
- Socquet, A., Vigny, C., Chamot-Rooke, N., Simons, W., Rangin, C., & Ambrosius, B. (2006). India and Sunda plates motion and deformation along their boundary in Myanmar determined by GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B05406. <https://doi.org/10.1029/2005JB003963>
- Song, Y., Wang, W., Meng, L., & Ampuero, J. P. (2019). The 2018 Palu earthquake and tsunami: Tectonic setting and unusual characteristics. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 7693–7701. <https://doi.org/10.1029/2019GL083636>
- Spector, A., & Grant, F. S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293–302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- Syaputra, E. W., Refrizon, R., & Zakariya, H. (2023). Identifikasi sesar segmen Ketahun berdasarkan metode First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD) data anomali gaya berat GGMplus. *Jurnal Fisika Unand*, 12(4), 598–607. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.4.598-607.2023>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- United States Geological Survey (USGS). (2018). *M7.5 Palu, Indonesia earthquake event summary*. USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4>
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., & MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116–119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>

- Watkinson, I. M., & Hall, R. (2017). Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: Evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. *Geological Society Special Publication*, 441(1), 71–120. <https://doi.org/10.1144/SP441.8>