p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 3 Tahun 2026, hal 376-386

ANALISIS ANOMALI GRAVITASI UNTUK IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN AKTIF DI SURABAYA

[1)]Nabila Juliana Putri, [2)] Madlazim, [3)] Muhammad Nurul Fahmi

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nabilajuliana.22009@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: madlazim@unesa.ac.id
[3)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menginterpretasikan struktur patahan bawah permukaan di wilayah Surabaya menggunakan metode gravitasi. Wilayah penelitian diduga dipengaruhi oleh aktivitas tektonik regional yang berkaitan dengan sistem Sesar Kendeng segmen Surabaya–Waru. Data yang digunakan berupa data gravitasi sekunder dari Bureau Gravimétrique International (BGI) yang meliputi data topografi, *Free Air Anomaly* (FAA), dan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Pengolahan data dilakukan melalui pemisahan anomali regional dan residual menggunakan metode *Moving Average*, analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), serta pemodelan inversi 3D menggunakan perangkat lunak Grablox dan Bloxer. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai anomali CBA berada pada rentang -27 hingga -3 mGal. Anomali regional memiliki rentang nilai sekitar -26 hingga -3 mGal, sedangkan anomali residual berkisar antara -0,4 hingga 0,9 mGal. Analisis FHD mengidentifikasi zona gradien tinggi dengan estimasi kedalaman sumber anomali sekitar 0,3–2,5 km. Analisis SVD menunjukkan pasangan anomali maksimum dan minimum yang mengindikasikan keberadaan zona patahan dengan orientasi dominan barat–timur hingga barat daya–timur laut. Hasil inversi 3D menunjukkan distribusi densitas batuan berkisar antara 1,0–3,0 g/cm^3 hingga kedalaman sekitar 3,2 km dengan pola struktur yang semakin jelas pada lapisan dalam. Integrasi seluruh hasil analisis mengindikasikan keberadaan sesar naik (*reverse fault*) yang diduga berkaitan dengan sistem Sesar Kendeng segmen Surabaya–Waru.

Kata Kunci: metode gravitasi, Surabaya, FHD, SVD, inversi 3D, sesar naik.

Abstract

This study aims to identify and interpret subsurface fault structures in the Surabaya region using gravity methods. The study area is thought to be influenced by regional tectonic activity related to the Surabaya–Waru segment of the Kendeng Fault system. The data used are secondary gravity data from the Bureau Gravimétrique International (BGI) which includes topographic data, Free Air Anomaly (FAA), and Complete Bouguer Anomaly (CBA). Data processing is carried out by separating regional and residual anomalies using the Moving Average method, First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) analysis, and 3D inversion modeling using Grablox and Bloxer software. The analysis results show that the CBA anomaly value is in the range of -27 to -3 mGal. Regional anomalies have a value range of around -26 to -3 mGal, while residual anomalies range from -0.4 to 0.9 mGal. FHD analysis identifies a high gradient zone with an estimated anomaly source depth of around 0.3–2.5 km. The SVD analysis revealed a pair of maximum and minimum anomalies indicating the presence of a fault zone with a dominant west-east to southwest-northeast orientation. The 3D inversion results indicate a rock density distribution ranging from 1.0–3.0 g/cm^3 down to a depth of approximately 3.8 km, with increasingly clear structural patterns in the deeper layers. The integration of all analysis results indicates the presence of a reverse fault, thought to be related to the Surabaya-Waru segment of the Kendeng Fault system.

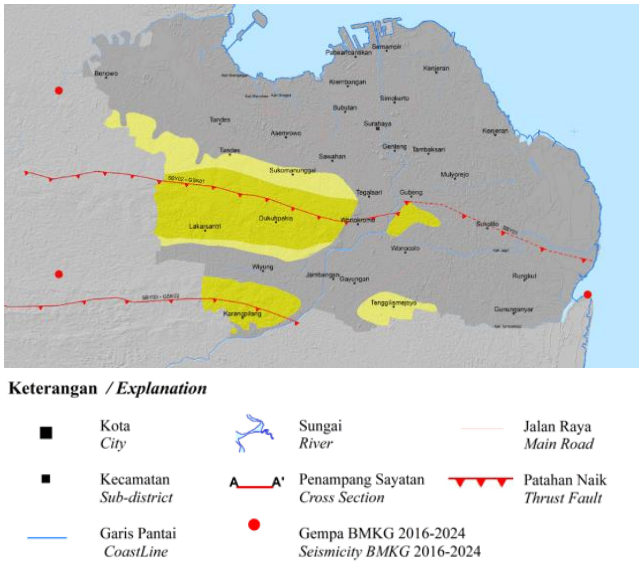
Keywords*: gravity method, Surabaya, FHD, SVD, 3D inversion, reverse fault.*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu wilayah tektonik paling aktif di dunia karena berada pada pertemuan Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Hamilton, 1979; Zahirovic *et al.*, 2014). Interaksi ketiga lempeng tersebut menghasilkan aktivitas tektonik yang intensif berupa deformasi kerak, pembentukan sesar aktif, serta kejadian gempa bumi yang berpotensi menimbulkan risiko bagi kawasan perkotaan (Hall, R. 2017; PuSGeN, 2017). Salah satu wilayah yang memiliki kerentanan terhadap aktivitas tektonik adalah Surabaya, Jawa Timur, yang berada pada zona transisi antara Cekungan Jawa Timur Utara dan Zona Kendeng serta dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Surabaya dan Sesar Waru yang merupakan bagian dari sistem sesar aktif Kendeng (Purwaningsih *et al.*, 2022; Widjajanti *et al.*, 2024).

Sebagai kota metropolitan dengan kepadatan penduduk tinggi dan infrastruktur yang berkembang pesat, Surabaya memerlukan informasi yang lebih rinci mengenai kondisi geologi bawah permukaan untuk mendukung mitigasi bahaya gempa bumi dan perencanaan tata ruang. Namun, identifikasi struktur sesar di wilayah perkotaan sering mengalami kendala karena banyak struktur geologi tertutupi oleh endapan Kuarter muda dan aktivitas pembangunan, sehingga pengamatan geologi permukaan menjadi kurang efektif (Santoso *et al.*, 2018; Triyoso *et al.*, 2021). Oleh karena itu, diperlukan metode geofisika yang mampu mengidentifikasi struktur bawah permukaan secara tidak langsung dan non-destruktif (Nurwidyanto,2019; Okpoli *et al.*,2019).



Gambar 1. Peta Patahan Aktif Kota Surabaya, Jawa Timur (ESDM,2014).

Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang efektif untuk mendeteksi variasi densitas batuan bawah permukaan melalui analisis anomali medan gravitasi (Anggraeni *et al.*, 2021; Hinze *et al.*, 2013; Reynolds, 2011). Kontras densitas yang muncul akibat keberadaan sesar atau batas litologi dapat menghasilkan pola anomali gravitasi yang khas (Hinze *et al.*, 2013; Mono *et al.*, 2018). Untuk meningkatkan ketelitian interpretasi struktur geologi, analisis turunan medan gravitasi seperti *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) banyak digunakan (Abidin, 2017; Ombati, 2022). FHD mampu menegaskan batas lateral kontras densitas dan mengidentifikasi kelurusan struktur, sedangkan SVD berfungsi memperkuat anomali dangkal sehingga memudahkan interpretasi geometri sesar (Grauch *and* Cordell, 1987; Rosid *and* Siregar, 2017; Li *and* Oldenburg, 1998). Mendukung terciptanya infrastruktur pendidikan yang aman sekaligus mengurangi potensi kerugian akibat bencana di wilayah Surabaya.

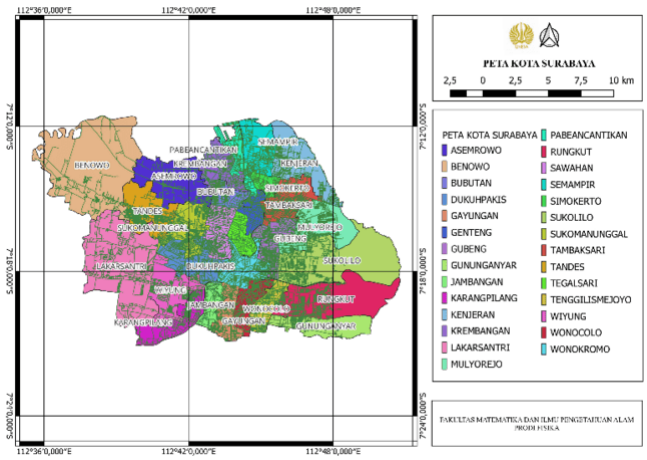
Meskipun berbagai penelitian gravitasi telah dilakukan di Indonesia, kajian mengenai identifikasi patahan aktif di wilayah Surabaya masih relatif terbatas dan umumnya bersifat regional (Hanifa *and*

Syahbana, 2020; Triyoso *et al.,* 2021). Selain itu, pemanfaatan integrasi FHD dan SVD untuk pemetaan struktur sesar di Surabaya belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola dan karakteristik patahan di wilayah Surabaya berdasarkan analisis FHD dan SVD dari data anomali gravitasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai kondisi geologi bawah permukaan (Mono *et al.,* 2019), mendukung upaya mitigasi bencana gempa bumi, serta menjadi referensi bagi pengembangan penelitian geofisika terapan di wilayah Jawa Timur.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan pendekatan komputasi geofisika untuk mengidentifikasi struktur patahan bawah permukaan di wilayah Surabaya. Data yang digunakan berupa data gravitasi sekunder *Free Air Anomaly* (FAA) yang diperoleh dari *Bureau Gravimétrique International* (BGI), serta didukung oleh data geologi dan topografi wilayah penelitian. Tahapan pengolahan data meliputi perhitungan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA), pemisahan anomali regional dan residual menggunakan metode *Moving Average*, serta analisis turunan medan gravitasi berupa FHD dan SVD. Analisis FHD digunakan untuk mengidentifikasi batas kontras densitas dan kelurusan struktur secara lateral, sedangkan analisis SVD digunakan untuk mempertegas anomali dangkal serta membantu interpretasi karakteristik patahan bawah permukaan (Grauch *and* Cordell, 1987; Guo *et al.,* 2017; Rosid *and* Siregar, 2017). Selanjutnya, hasil interpretasi FHD dan SVD dikombinasikan dengan pemodelan inversi tiga dimensi menggunakan perangkat lunak Grablox untuk memperoleh distribusi densitas bawah permukaan dan menggambarkan geometri patahan secara lebih representatif (Julzarika *et al.,* 2020; Li *and* Oldenburg, 1998; Pirttijärvi, M. 2008). Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan ketelitian identifikasi struktur sesar serta memberikan informasi geologi bawah permukaan yang mendukung mitigasi bahaya seismik di wilayah Surabaya.



Gambar 2. Lokasi Pengambilan data.

B. Variabel Operasional Penelitian

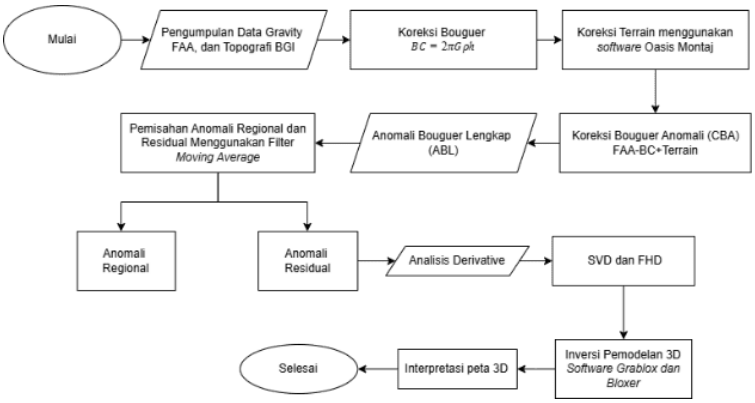
Dalam penelitian ini, variabel manipulasi berupa lokasi penelitian yang berada di wilayah Surabaya, Jawa Timur. Variabel kontrol yang digunakan adalah nilai densitas rata-rata batuan bawah permukaan yang menjadi acuan dalam proses pengolahan dan interpretasi data gravitasi. Adapun variabel respon berupa nilai anomali gravitasi dan hasil visualisasi yang diperoleh dari pengolahan data, meliputi peta CBA, anomali regional, anomali residual, hasil analisis FHD, SVD, serta model distribusi densitas bawah permukaan tiga dimensi (3D) yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur patahan di wilayah Surabaya.

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui akuisisi data sekunder berupa *Free Air Anomaly* (FAA), data Bouguer, dan data topografi yang diperoleh dari *Bureau Gravimétrique International* (BGI). Data topografi pendukung menggunakan Digital *Elevation Model-Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-

SRTM) untuk wilayah Surabaya dan sekitarnya. Seluruh data yang diperoleh kemudian diseleksi, diverifikasi, dan disiapkan sebagai basis pengolahan anomali gravitasi. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk perhitungan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA), pemisahan anomali regional dan residual, analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) *dan Second Vertical Derivative* (SVD), serta pemodelan inversi tiga dimensi guna mengidentifikasi struktur bawah permukaan dan keberadaan patahan di wilayah penelitian.

D. Teknik Pengolahan Data



Gambar 3. Flowchart Penelitian.

Pengolahan data dilakukan menggunakan data gravitasi berupa *Free Air Anomaly* (FAA), data *Bouguer*, dan data topografi yang diperoleh dari *Bureau Gravimétrique International* (BGI). Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data gravitasi sekunder berupa FAA yang diperoleh dari BGI. Wilayah penelitian berada pada koordinat 7°14'20,04"–7°22'16,32" LS dan 112°37'30,00"–112°44'30,12" BT. Selanjutnya data diolah melalui tahapan koreksi Bouguer dan koreksi terrain sehingga diperoleh CBA. Pemisahan anomali regional dan residual dilakukan menggunakan metode *Moving Average* sebelum dilakukan analisis FHD, SVD, dan pemodelan inversi 3D menggunakan perangkat lunak Grablox. Data topografi dari DEM-SRTM digunakan untuk melakukan koreksi terrain sehingga diperoleh nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang merepresentasikan variasi densitas batuan bawah permukaan (Reynolds, 2011; Hinze *et al.*, 2013). Nilai CBA dihitung menggunakan persamaan:

$$CBA = FAA - BC + TC$$

dengan CBA merupakan *Complete Bouguer Anomaly* (mGal), FAA adalah *Free Air Anomaly* (mGal), BC merupakan *Bouguer Correction* (mGal), dan TC adalah *Terrain Correction* (mGal). Persamaan tersebut digunakan untuk memperoleh nilai anomali Bouguer lengkap yang telah dikoreksi terhadap pengaruh elevasi, massa batuan, dan topografi.

Peta CBA kemudian dipisahkan menjadi anomali regional dan anomali residual menggunakan metode *Moving Average* untuk memisahkan pengaruh sumber anomali dalam dan dangkal (Cooper *and* Cowan, 2006; Zuhdi *et al.*, 2019). Anomali residual selanjutnya dianalisis menggunakan metode First Horizontal Derivative (FHD) untuk mengidentifikasi batas kontras densitas dan kelurusan struktur geologi. Nilai FHD dihitung menggunakan persamaan:

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2}$$

dengan Δg merupakan nilai anomali gravitasi (mGal), x adalah arah horizontal timur–barat, dan y adalah arah horizontal utara–selatan. Nilai FHD diperoleh dari kombinasi turunan pertama anomali gravitasi terhadap kedua arah horizontal untuk menonjolkan batas kontras densitas bawah permukaan. Metode FHD efektif

digunakan untuk menentukan batas struktur geologi dan zona sesar berdasarkan perubahan lateral anomali gravitasi (Grauch *and* Cordell, 1987; Rosid a*nd* Siregar, 2017).

Selain itu, dilakukan analisis Second Vertical Derivative (SVD) untuk mempertegas anomali dangkal dan membantu interpretasi karakteristik patahan bawah permukaan. Nilai SVD dihitung menggunakan persamaan:

$$SVD = \frac{g_{i+1} - 2g_i + g_{i-1}}{\Delta x^2}$$

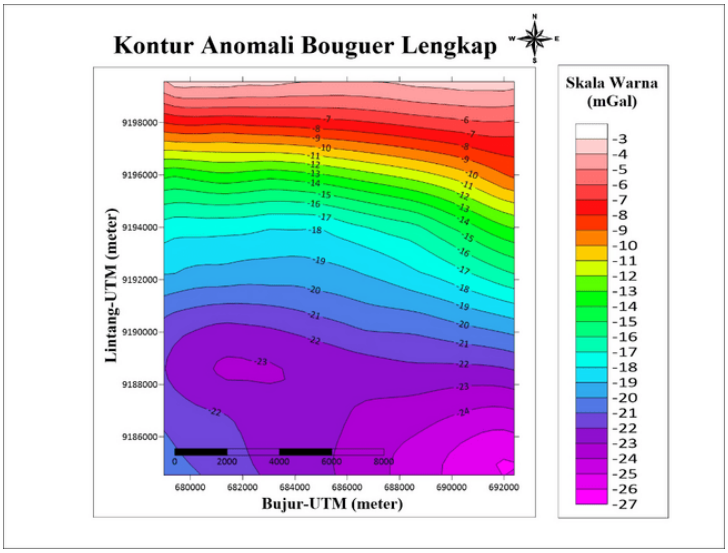
dengan gi+1 adalah nilai anomali gravitasi pada titik setelah titik pengamatan, gi merupakan nilai anomali gravitasi pada titik pengamatan, gi−1 adalah nilai anomali gravitasi pada titik sebelum titik pengamatan, dan Δx merupakan jarak antar titik pengamatan atau interval grid (m). Persamaan ini digunakan untuk menghitung turunan vertikal orde kedua sehingga anomali dangkal dapat ditampilkan dengan lebih jelas. Analisis SVD digunakan untuk meningkatkan resolusi anomali lokal dan mengidentifikasi karakteristik struktur geologi bawah permukaan berdasarkan perubahan gradien vertikal medan gravitasi (Li *and* Oldenburg, 1998; Maulidah *et al.,* 2022).

Hasil analisis FHD dan SVD kemudian diinterpretasikan untuk menentukan pola serta keberadaan struktur sesar di wilayah penelitian. Selanjutnya dilakukan pemodelan inversi tiga dimensi menggunakan perangkat lunak Grablox dan Bloxer untuk memperoleh distribusi densitas batuan bawah permukaan. Pemodelan inversi dilakukan dengan pendekatan optimasi densitas sehingga diperoleh model geometri bawah permukaan yang sesuai dengan data anomali gravitasi hasil observasi (Huffman, 2021; Pirttijärvi, M. 2008; Li *and* Oldenburg, 1998). Hasil akhir pengolahan data disajikan dalam bentuk peta anomali gravitasi, peta FHD dan SVD, serta model distribusi densitas tiga dimensi untuk menginterpretasikan keberadaan patahan di wilayah Surabaya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) wilayah Surabaya menunjukkan rentang nilai anomali sekitar -27 hingga -3 mGal. Distribusi anomali memperlihatkan pola gradasi dari nilai relatif tinggi di bagian utara menuju nilai lebih rendah di bagian selatan. Zona anomali tinggi dengan nilai sekitar -3 hingga -10 mGal diinterpretasikan sebagai batuan dengan densitas relatif lebih tinggi dan lebih terkonsolidasi, sedangkan zona anomali rendah dengan nilai sekitar -20 hingga -27 mGal menunjukkan keberadaan material berdensitas rendah yang didominasi oleh endapan aluvial muda (Hoerunisa, 2020).



Gambar 4. Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) wilayah Surabaya.

Selain itu, terdapat zona gradien tinggi pada bagian tengah hingga selatan yang ditunjukkan oleh kontur rapat dan perubahan nilai anomali yang relatif tajam. Kondisi ini mengindikasikan adanya kontras densitas bawah permukaan yang berpotensi berkaitan dengan batas struktur geologi seperti patahan atau kontak litologi (Hinze *et al.*, 2013; Maulana, 2020). Pola anomali yang berkembang menunjukkan kecenderungan arah barat–timur hingga barat daya–timur laut yang sejalan dengan arah struktur regional Jawa Timur (Pustlitbang PUPR, 2017). Namun demikian, peta CBA masih merepresentasikan gabungan pengaruh anomali regional dan lokal sehingga diperlukan pemisahan anomali untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan yang lebih detail (Reynolds, 2011; Hinze *et al.*, 2013).

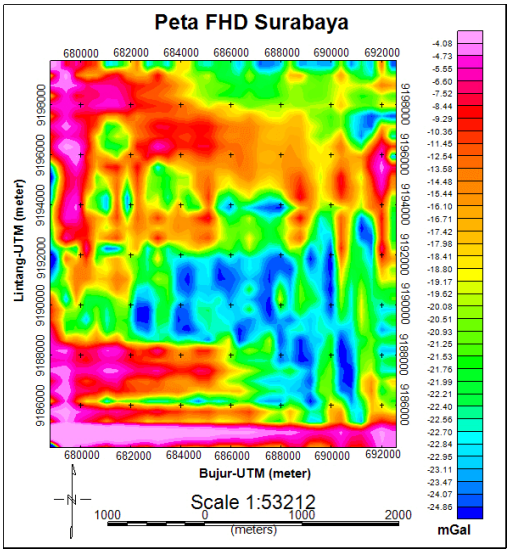
B. Pembahasan

a. Analisis *First Horizontal Derivative* (FHD)

Peta FHD pada Gambar X menunjukkan distribusi gradien horizontal anomali gravitasi yang digunakan untuk mengidentifikasi batas kontras densitas batuan di bawah permukaan. Nilai FHD yang tinggi merepresentasikan perubahan anomali gravitasi yang terjadi secara tajam, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai batas litologi atau indikasi struktur geologi bawah permukaan, sedangkan nilai FHD yang rendah menunjukkan perubahan densitas yang relatif homogen.

Berdasarkan peta FHD, terlihat adanya variasi nilai anomali yang membentuk zona-zona kontras pada wilayah penelitian. Bagian utara hingga barat laut didominasi oleh nilai anomali yang relatif lebih tinggi (warna merah hingga merah muda), sedangkan bagian tengah hingga selatan didominasi oleh nilai anomali yang lebih rendah (warna hijau hingga biru). Perubahan warna yang relatif tajam pada bagian tengah wilayah penelitian menunjukkan adanya gradien horizontal yang tinggi sebagai indikasi perubahan sifat fisik batuan di bawah permukaan.

Selain itu, pola gradien yang terbentuk memperlihatkan kecenderungan orientasi barat–timur hingga barat daya–timur laut. Orientasi tersebut relatif konsisten dengan arah struktur geologi regional di wilayah Surabaya yang dikontrol oleh sistem Sesar Kendeng segmen Surabaya–Waru. Namun demikian, hasil FHD hanya menunjukkan keberadaan batas kontras densitas sehingga belum dapat digunakan secara langsung untuk menentukan jenis sesar. Oleh karena itu, interpretasi lebih lanjut dilakukan menggunakan metode SVD melalui analisis pasangan anomali maksimum–minimum serta didukung oleh hasil pemodelan inversi tiga dimensi.



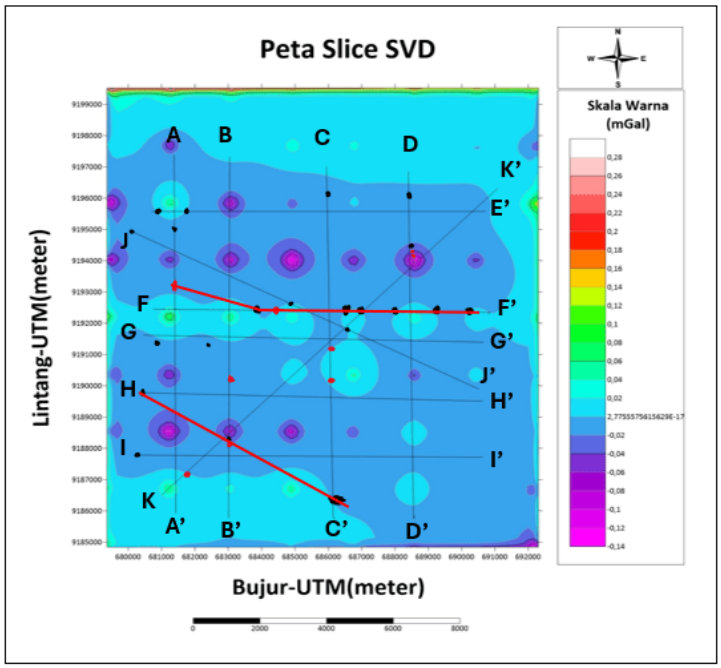
Gambar 5. Peta *First Horizontal Derivative* (FHD) wilayah Surabaya yang menunjukkan distribusi gradien horizontal anomali gravitasi sebagai indikasi batas kontras densitas batuan bawah permukaan.

Hasil analisis FHD juga sejalan dengan hasil *Radially Averaged Power Spectrum*, yang menunjukkan bahwa sumber anomali berkembang pada kedalaman sekitar 0,3–2,5 km. Informasi kedalaman tersebut

mengindikasikan bahwa zona gradien tinggi yang teramati pada peta FHD kemungkinan berkaitan dengan struktur bawah permukaan yang berkembang mulai dari lapisan dangkal hingga kedalaman menengah. Integrasi hasil analisis spektrum, peta FHD, analisis SVD, dan pemodelan inversi 3D memberikan interpretasi yang lebih komprehensif terhadap indikasi struktur patahan bawah permukaan di wilayah Surabaya. (Telford *et al.*, 1990; Reynolds, 2011).

b. Analisis *Second Vertical Derivative* (SVD)

Analisis SVD dilakukan untuk mempertegas batas struktur dangkal dan mengidentifikasi zona kontras densitas bawah permukaan. Hasil SVD menunjukkan distribusi pasangan anomali maksimum dan minimum yang membentuk pola diskontinuitas pada beberapa bagian wilayah penelitian. Pola tersebut mengindikasikan adanya perubahan densitas yang signifikan dan berasosiasi dengan struktur geologi berupa patahan atau kontak litologi, karena SVD sensitif terhadap sumber anomali dangkal (Blakely, 1995; Hinze *et al.*, 2013).

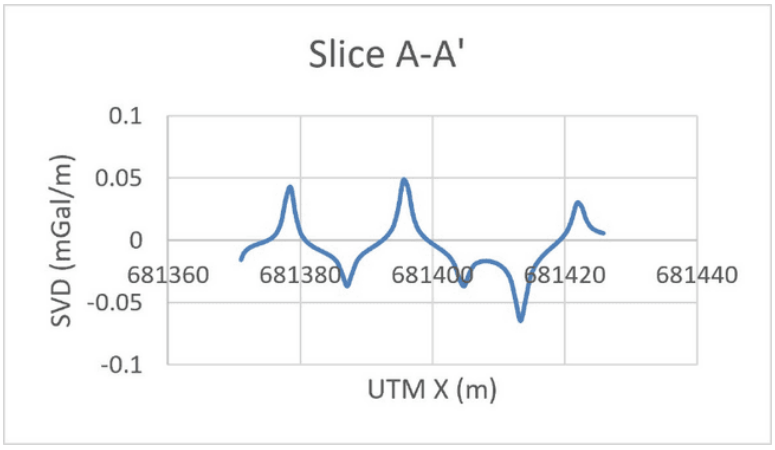


Gambar 6. Peta SVD beserta lintasan slicing dan interpretasi struktur patahan.

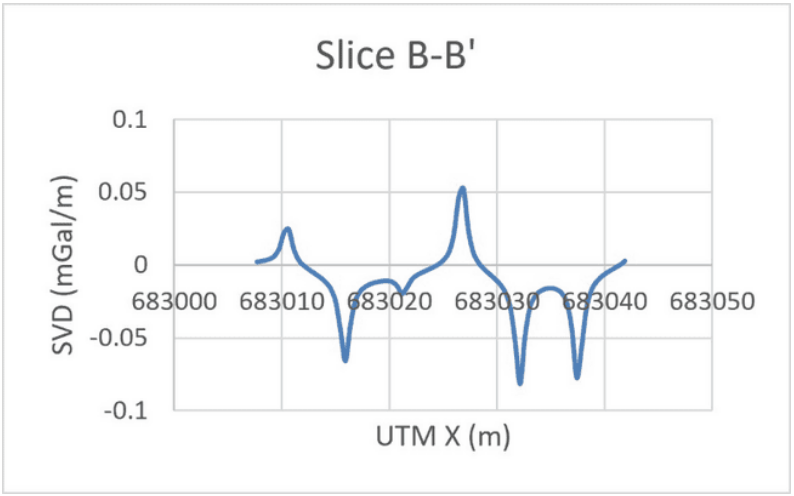
Untuk memperjelas interpretasi struktur, dilakukan *slicing* pada beberapa lintasan yang memotong zona perubahan nilai SVD yang signifikan. Hasil penampang menunjukkan adanya perubahan nilai maksimum dan minimum yang tajam dalam jarak relatif pendek, yang mencerminkan kontras densitas tinggi pada batas struktur bawah permukaan (Sumintadireja *et al.*, 2018; Maghfira *et al.*, 2019). Pola anomali yang bersifat lokal dan tidak menerus diinterpretasikan sebagai patahan minor, sedangkan pola linier yang relatif kontinu menunjukkan keberadaan sesar mayor. Distribusi zona anomali memperlihatkan orientasi dominan barat–timur hingga barat daya–timur laut yang relatif konsisten antar lintasan, sehingga mengindikasikan adanya kontrol struktur regional di wilayah Surabaya (Hall, R. 2017; Hutchings *and* Mooney, 2021).

Berdasarkan grafik sayatan A–A' dan B–B', terlihat pasangan nilai maksimum dan minimum Second Vertical Derivative (SVD) yang menunjukkan perubahan gradien vertikal anomali gravitasi secara tajam. Pada lintasan A–A', nilai maksimum mencapai sekitar 0,05 mGal/m dan nilai minimum sekitar −0,06 mGal/m, sedangkan pada lintasan B–B' nilai minimum lebih dominan hingga sekitar −0,08 mGal/m dengan nilai maksimum sekitar 0,05 mGal/m. Perubahan maksimum–minimum yang tajam mengindikasikan adanya kontras densitas batuan yang berkaitan dengan batas struktur bawah permukaan. Interpretasi jenis struktur tidak hanya didasarkan pada nilai SVD, tetapi juga diintegrasikan dengan hasil analisis FHD, pemodelan inversi 3D, dan kondisi geologi regional. Hasil integrasi tersebut menunjukkan adanya indikasi struktur

patahan bawah permukaan yang diduga berkaitan dengan sistem Kendeng Thrust di wilayah Surabaya (Sumintadireja *et al.,* 2018; Widodo *et al.,* 2020).



Gambar 7. Grafik slice A-A′ peta kontur SVD.



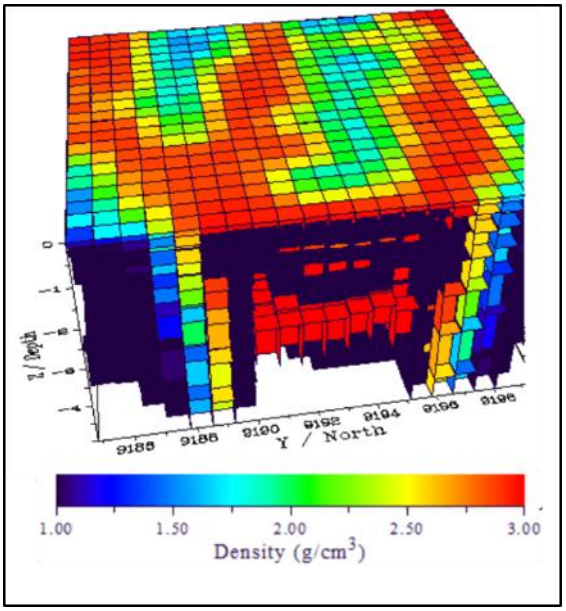
Gambar 8. Grafik slice B-B′ peta kontur SVD.

Hasil interpretasi SVD selanjutnya divalidasi dengan membandingkan pola struktur yang diperoleh terhadap kondisi geologi regional yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Peta geologi memperlihatkan keberadaan jalur struktur regional berupa patahan terpendam yang berkembang di wilayah Surabaya. Orientasi struktur tersebut memiliki kecenderungan yang serupa dengan pola pasangan anomali maksimum–minimum hasil analisis SVD, yaitu berarah dominan barat–timur hingga barat daya–timur laut. Kesesuaian orientasi tersebut menunjukkan bahwa struktur yang teridentifikasi melalui analisis SVD diduga berkaitan dengan sistem struktur geologi regional di wilayah Surabaya. Interpretasi ini juga sejalan dengan penelitian Widodo *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa wilayah Surabaya dipengaruhi oleh sistem Kendeng Thrust, khususnya segmen Surabaya–Waru. Oleh karena itu, hasil analisis SVD pada penelitian ini diinterpretasikan sebagai indikasi struktur patahan bawah permukaan yang diduga berkaitan dengan sistem Kendeng Thrust, dan diperkuat melalui integrasi dengan hasil analisis FHD serta pemodelan inversi 3D.

c. Analisis Inversi 3D Struktur Bawah Permukaan

Pemodelan inversi 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak Grablox dan Bloxer untuk memperoleh distribusi densitas bawah permukaan berdasarkan data anomali gravitasi. Hasil inversi menunjukkan variasi densitas batuan berkisar antara 1,0–3,0 g/cm³ yang tersebar tidak merata secara lateral maupun vertikal. Zona berdensitas rendah (1,0–1,8 g/cm³) diinterpretasikan sebagai material sedimen atau

batuan dengan tingkat kekompakan rendah, sedangkan zona berdensitas tinggi (2,5–3,0 g/cm³) menunjukkan keberadaan batuan yang lebih kompak dan padat (Li *and* Oldenburg, 1998; Hinze *et al.*, 2013).



Gambar 9. Model inversi 3D distribusi densitas bawah permukaan.

Model inversi memperlihatkan adanya zona kontras densitas yang membentuk pola linier dan relatif menerus. Pola tersebut memiliki orientasi dominan barat–timur hingga barat daya–timur laut, sejalan dengan hasil interpretasi FHD dan SVD. Keberadaan batas densitas yang kontras menunjukkan indikasi struktur geologi berupa patahan atau zona rekahan bawah permukaan (Indrarini *and* Setiawan, 2015). Selain itu, kontinuitas pola struktur hingga kedalaman sekitar 3,2 km mengindikasikan bahwa struktur yang teridentifikasi tidak hanya berkembang pada lapisan dangkal, tetapi juga berlanjut ke lapisan yang lebih dalam (Bahri *and* Madlazim, 2012). Hasil inversi 3D ini memperkuat interpretasi keberadaan sistem sesar yang diduga berkaitan dengan Sesar Kendeng segmen Surabaya–Waru.

Pemodelan inversi 3D dilakukan menggunakan metode Occam pada perangkat lunak Grablox. Model terdiri atas 400 blok horizontal (20 × 20 grid) dengan 8 lapisan hingga kedalaman maksimum 3,2 km. Ukuran setiap blok sekitar 12,94 m × 14,68 m dengan ketebalan tiap lapisan sebesar 400 m. Rentang densitas model dibatasi antara 1,0–3,0 g/cm³ sesuai karakteristik batuan penyusun wilayah penelitian. Proses inversi menghasilkan nilai RMS akhir sebesar 0,0397 mGal menunjukkan selisih yang relatif kecil antara data observasi dan data hasil perhitungan model (*calculated data*), sehingga model inversi dianggap telah merepresentasikan data gravitasi dengan baik. Berdasarkan model inversi, lapisan dangkal hingga kedalaman sekitar 800 m didominasi oleh densitas rendah yang diinterpretasikan sebagai endapan aluvial dan sedimen muda. Pada kedalaman yang lebih besar, distribusi densitas menunjukkan kontras yang semakin jelas sehingga mengindikasikan keberadaan batas litologi dan struktur bawah permukaan yang lebih dalam.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan analisis data gravitasi menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD), *Second Vertical Derivative* (SVD), dan pemodelan inversi 3D, wilayah Surabaya diinterpretasikan memiliki sistem struktur bawah permukaan dengan orientasi dominan barat–timur hingga barat daya–timur laut. Hasil FHD menunjukkan zona gradien tinggi yang mengindikasikan batas kontras densitas batuan, sedangkan analisis SVD menunjukkan pasangan anomali maksimum–minimum yang mengindikasikan adanya kontras densitas dan batas struktur bawah permukaan. Model inversi 3D menunjukkan distribusi densitas batuan berkisar antara 1,0–3,0 g/cm³ hingga kedalaman sekitar 3,2 km serta memperlihatkan pola struktur yang relatif

menerus. Integrasi hasil FHD, SVD, dan pemodelan inversi 3D mengidentifikasi indikasi struktur patahan bawah permukaan yang diduga berkaitan dengan sistem Sesar Kendeng segmen Surabaya–Waru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode gravitasi efektif untuk mengidentifikasi variasi densitas batuan dan indikasi struktur geologi bawah permukaan di wilayah Surabaya.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data gravitasi dengan resolusi lebih tinggi agar interpretasi struktur bawah permukaan lebih detail dan akurat. Interpretasi sesar juga perlu dikombinasikan dengan metode geofisika lain, seperti seismik, magnetik, atau geolistrik, serta divalidasi menggunakan data geologi lapangan, pemboran, dan seismisitas. Selain itu, pengembangan model inversi 3D dengan parameter lebih rinci dan cakupan wilayah lebih luas diharapkan dapat memberikan gambaran geologi bawah permukaan yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Fukuda, Y. (2013). Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): Characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *4*(3), 226–240. https://doi.org/10.1080/19475705.2012.692336

Anggraeni, F. K. A., & Sulistyorini. (2021). Two dimensional modeling (2D) gravity method for interpreting subsurface structure of mount Merapi. *Journal of Physics: Conference Series*, *1832*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1832/1/012002

Bahri, S., & Madlazim. (2012). *Pemetaan topografi, geofisika dan geologi Kota Surabaya*. Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA), 2(2), 23–28. https://doi.org/10.26740/jpfa.v2n2.p23-28

Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic*.

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). *Enhancing potential field data using filters based on the local phase $*. *32*, 1585–1591. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.016

Grauch, V. J. S., & Cordell, L. (1987). *Short Note Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data*. *52*(1), 118–121.

Guo, X., Zhao, P. D. Q., & Farahani, R. K. H. H. (2017). Earth ' s gravity field modelling based on satellite accelerations derived from onboard GPS phase measurements. *Journal of Geodesy*, *91*(9), 1049–1068. https://doi.org/10.1007/s00190-017-1009-y

Hall. (2017). J . T . V a N G O R S E L. *Bibliography Of The Geology Of Indonesia And Surrounding Areas*, 0–261.

Hinze, W.J., von Frese, R.R.B. and Saad, A. . (2013). *GMElectronicBookcopy2.pdf*.

Hoerunisa, A. (2020). *Interpretasi Anomali Data Gravitasi Daerah Panas Bumi " K51S " Berdasarkan Pemodelan 3D*. 136–140. https://doi.org/10.22146/jfi.v24i3.56789

Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *22*(9), 1–42. https://doi.org/10.1029/2021GC009812

Huffman, F. (2021). *Annotated translation of J . Duyfjes ' influential 1936 paper on the stratigraphy of the Kendeng area between Trinil and Surabaya , Java (by B . W . Seubert), and related materials (from ... August*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28619.92964

Indrarini, F., & Setiawan, A. (2015). *Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap*. *19*(57), 6–12.

Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.Julzarika, A., Suhadha, A. G., & Prasasti, I. (2020). *Plate and faults boundary detection using gravity disturbance and Bouguer gravity anomaly from space geodesy*. *4*(2), 117–131.

Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1998). *3-D inversion of gravity data*. *63*(1), 109–119.

Maulana, A. D., Prasetyo, D. A., & Setiawan, A. F. (2020). Analisis matematis penentuan konstanta koreksi Bouguer baru pada gravitasi satelit topex dalam implikasi kondisi geologi studi kasus sesar Palu Koro,

Sulawesi Tengah. *Jurnal Geosains Terapan*, *3*(5), 10–26.

Maulidah, H., Realita, A., Prastowo, T., Fisika, P. S., Fisika, J., Surabaya, U. N., & Grindulu, S. (2022). *IDENTIFIKASI SESAR GRINDULU DENGAN MEMANFAATKAN METODE GRAVITASI*. *11*, 20–27.

Maghfira, P. D., & Windhi Niasari, S. (2019). Gravity satellite data analysis for subsurface modelling in Mount Merapi-Merbabu, Java, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, *76*, 2018–2020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197603003

Nurwidyanto. (2019). Modeling of semarang fault zone using gravity method Modeling of semarang fault zone using gravity method. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series, 1217(1), p.012031.* https://doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012031 m

Okpoli, C. C., & Akingboye, A. S. (2019). Application of high-resolution gravity data for litho-structural and depth characterisation around Igabi area , Northwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, *8*(1), 231–241. https://doi.org/10.1080/20909977.2019.1689629

Markku Pirttijärvi. In *Gravity interpretation and modellling using 3-D b*Pustlitbang PUPR. (2017). *Buku Peta Gempa 2017*.

Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2017). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Purwaningsih, R. E. Y., Sekarsari, A., Sari, T. W., Pratama, C., & Wibowo, S. T. (2022). Active tectonics of the eastern java based on a decade of recent continuous geodetic observation. *Geodesy and Geodynamics*, *13*(4), 376–385. https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.004

Reynolds. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*.

Rosid, M. S., & Siregar, H. (2017). *Determining Fault Structure Using First Horizontal Derivative (FHD) and Horizontal Vertical Diagonal Maxima (HVDM) Method : A Comparative Study*. *030171*. https://doi.org/10.1063/1.4991275

Sumintadireja, P., Dahrin, D., & Grandis, H. (2018). *A Note on the Use of the Second Vertical Derivative (SVD) of Gravity Data with Reference to Indonesian Cases*. *50*(1), 127–139. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.1.9

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge.

Widjajanti, N., Pratama, C., Azizi, I. H., Yulaikhah, Y., Abiyyu, M. F., Rahman, S. A., Cahyadi, M. N., Aprianti, E., & Prayoga, O. (2024). *Strain Accumulation Along the Eastern Java Back–Arc Thrust System Inferred from a Dense Global Navigation Satellite System Network*. *Geosciences (Switzerland)*, *14*(12). https://doi.org/10.3390/geosciences14120346

Widodo, A., Syaifuddin, F., Lestari, W., & Warnana, D. D. (2020). *Earthquake potential source identification using magnetotelluric data of Kendeng thrust Surabaya area*. *156*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015601002

Yilmaz, N. (2023). Gravity data reduction, Bouguer anomaly, and gravity disturbance. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 153–161.

Zuhdi, M., Ayub, S., Taufik, M., Syamsuddin, S., Studi, P., Fisika, P., Mataram, U., Fisika, P. S., & Mataram, U. (2019). *Moving Average Filter untuk Memisahkan Efek Dangkal Anomali Gravitasi Time Lapse*. *7*(2), 138–147.