

DELINEASI POTENSI PERPANJANGAN SESAR PROBOLINGGO BERDASARKAN RESPON ANOMALI GRAVITASI HIBRID

Noor Efendi¹, M. Aryono Adhi², Muhamad Syirojudin³, Supriyadi⁴

Universitas Negeri Semarang^{1,2,4}, Badan Meteorologi Klimatologi dan
Geofisika^{1,3}

noor.efendi@bmkkg.go.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan delineasi potensi perpanjangan Sesar Probolinggo berdasarkan respon anomali gravitasi hibrid guna meminimalkan ketidakpastian informasi mitigasi bencana gempabumi. Metode yang digunakan adalah integrasi data gravitasi primer hasil pengukuran lapangan (72 titik) dan data sekunder satelit GGMPPlus-SRTM2gravity 2018 melalui teknik *collocated cokriging*. Analisis dilakukan menggunakan pemisahan anomali regional-residual dengan *Band Pass Filter*, serta penerapan metode derivatif *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengidentifikasi kelurusan struktur. Hasil penelitian menunjukkan sebaran anomali gravitasi hibrid berkisar antara -14 mGal hingga 17 mGal, yang merepresentasikan variasi densitas batuan vulkanik Argopuro dan Lamongan. Delineasi jalur sesar teridentifikasi sepanjang kurang lebih 22 km dengan orientasi Barat-Timur melintasi wilayah Desa Liprak Kidul hingga Betektaman. Berdasarkan evaluasi nilai SVD yang setara antara *hanging wall* dan *footwall* (rata-rata 0,25 mGal/m²), struktur ini diidentifikasi sebagai sesar geser (*strike-slip fault*). Simpulan penelitian ini menyatakan bahwa ditemukan indikasi perpanjangan jalur sesar ke arah barat melampaui batas yang telah ditetapkan sebelumnya oleh Pusgen. Penggunaan data hibrid terbukti memberikan resolusi spasial yang lebih optimal dalam menutup celah informasi struktur bawah permukaan di wilayah tertutup material vulkanik Kuartar.

Kata Kunci: Delineasi, FHD, Gravitasi Hibrid, Sesar Probolinggo, SVD.

ABSTRACT

This research aimed to delineate the potential extension of the Probolinggo Fault based on hybrid gravity anomaly responses to minimize uncertainties in earthquake disaster mitigation information. The method employed integrates primary terrestrial gravity data from field measurements (72 points) with secondary GGMPPlus-SRTM2gravity 2018 satellite data using the collocated cokriging technique. Analysis was conducted using regional-residual anomaly separation via Band Pass Filter, alongside the application of First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) methods to identify structural lineaments. The results show that the hybrid gravity anomaly distribution ranges from -14 mGal to 17 mGal, representing the density variations of Argopuro and Lamongan

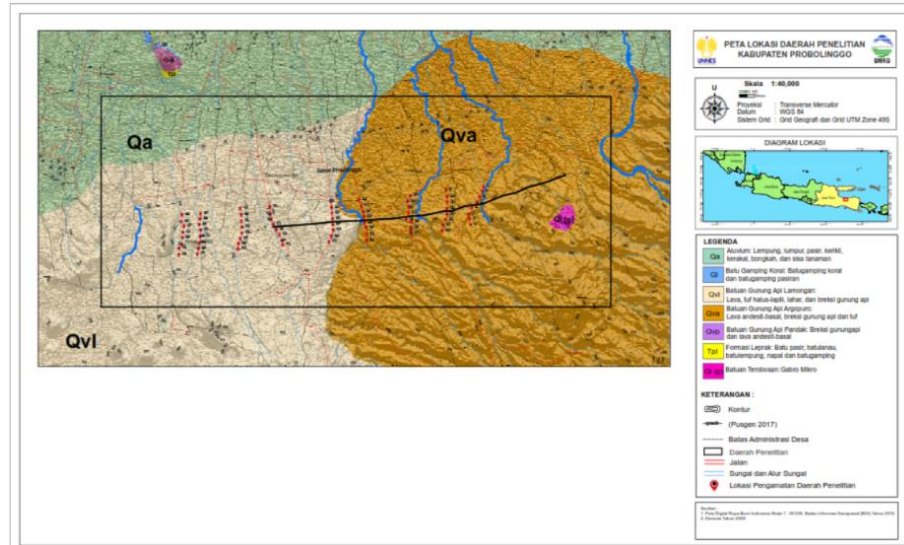
volcanic rocks. Fault lineament delineation was identified over approximately 22 km with a West-East orientation, traversing from Liprak Kidul to Betektaman. Based on an SVD value evaluation showing parity between the hanging wall and footwall (averaging 0.25 mGal/m²), this structure is identified as a strike-slip fault. The study concludes that indications of a westward fault extension beyond the boundaries previously established by Pusgen were found. The use of hybrid data proved to provide optimal spatial resolution in bridging information gaps regarding subsurface structures in areas covered by Quaternary volcanic materials.

Keywords: *Delineation, FHD, Hybrid Gravity, Probolinggo Fault, Derivative*

PENDAHULUAN

Indonesia secara tektonik merupakan wilayah yang sangat kompleks karena berada pada pertemuan lempeng-lempeng besar dunia. Lempeng besar tersebut terdiri atas Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik, sedangkan lempeng kecil terdiri atas Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Kepala Burung, Maoke, dan Woodlark (Pusgen, 2017). Di Jawa Timur, keberadaan sesar-sesar darat aktif menjadi ancaman serius bagi keselamatan penduduk dan infrastruktur. Salah satu struktur yang menjadi konsen adalah Sesar Probolinggo, sebuah sesar geser (*strike-slip*) yang melintasi zona permukiman padat dan jalur transportasi utama, yang diidentifikasi dengan adanya morfologi gawir sesar berarah timur laut–barat daya dan menjadi indikasi bahwa sesar relatif bergerak secara mendatar.

Kabupaten Probolinggo memiliki geologi yang sangat dipengaruhi oleh posisinya di busur vulkanik Kuarter Pulau Jawa. Wilayah utara merupakan dataran rendah aluvial di sepanjang pesisir yang didominasi oleh endapan sungai dan rawa. Wilayah selatan merupakan dataran tinggi dan pegunungan vulkanik yang menjadi bagian dari kompleks gunung api aktif dan purba, seperti Gunung Tengger, Gunung Lamongan, dan Gunung Argopuro. Stratigrafi di wilayah ini didominasi oleh endapan vulkanik muda (Kuarter). Batuan-batuan tersebut terdiri atas lava, breksi vulkanik, tuf, dan endapan lahar yang berasal dari letusan gunung-gunung di sekitarnya. Sesar Probolinggo teridentifikasi sepanjang kurang lebih 15 km (Pusgen, 2017), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Namun, data permukaan ini sering kali tidak mencerminkan kondisi sebenarnya di bawah permukaan, terutama pada wilayah yang tertutup oleh endapan vulkanik Kuarter dari kompleks Gunung Tengger dan Argopuro yang sangat tebal.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur (Suwarti & Suharsono, 1993).

Peta geologi daerah penelitian (Gambar 1) menunjukkan area penelitian yang ditandai dengan kotak berwarna hitam dan titik-titik sebaran pengukuran gravitasi. Batuan yang menyusun daerah penelitian pada bagian timur–tenggara merupakan batuan Gunung Argopuro yang meliputi lava andesit, basal, breksi, dan tuf. Sedangkan sebagian besar wilayah lainnya tersusun atas batuan Gunung Lamongan yang terdiri atas lava, tuf halus lapili, lahar, breksi, dan aluvium.

Kajian tentang Sesar Probolinggo telah dilakukan oleh beberapa peneliti, antara lain Rochman dkk. (2021) dengan menggunakan data gravitasi dari satelit TOPEX. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan peta anomali residual, kontras percepatan gravitasi di sisi utara garis sesar sebesar 0,12 mGal hingga 0,45 mGal dan di sisi selatan sebesar $-0,92$ mGal hingga $-0,043$ mGal, yang diinterpretasikan sebagai sesar normal. Hasil pemodelan irisan 2D (*2D slicing modelling*) menunjukkan adanya sesar geser (*shear fault*), sehingga dapat diduga bahwa area ini memiliki sesar oblik (*oblique fault*) dengan arah barat–timur. Penelitian juga dilakukan oleh Setiahadiwibowo dkk. (2025) menggunakan data gravitasi satelit GGMPlus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan interpretasi kualitatif, filter *upward continuation* mampu menggambarkan keberadaan Sesar Probolinggo sesuai dengan peta geologi yang memiliki tren arah barat–timur laut.

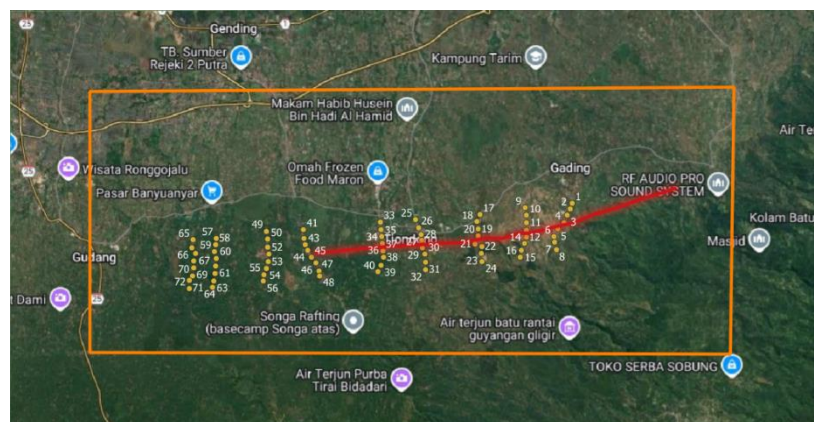
Penggunaan data gravitasi tunggal sering kali memiliki kendala pada resolusi spasial. Oleh karena itu, kebaruan pada penelitian ini adalah penggunaan pendekatan data gravitasi hibrid yang mengintegrasikan data lapangan presisi tinggi (data primer) dengan data satelit GGMPlus-SRTM2gravity (data sekunder) untuk memperoleh resolusi dan cakupan yang lebih luas. Melalui analisis derivatif (*First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative*), penelitian ini bertujuan untuk melakukan delineasi batas sesar secara lebih detail dan menganalisis potensi

perpanjangan struktur yang tersembunyi di bawah permukaan guna menutup celah informasi geologi yang ada. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pemerintah dan masyarakat dalam merencanakan pembangunan infrastruktur yang lebih aman serta menyusun mitigasi risiko bencana gempa bumi yang lebih efektif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang bertujuan identifikasi delineasi, dan menganalisis potensi perpanjangan Sesar Probolinggo. Metode penelitian ini menggunakan metode geofisika yaitu metode gravitasi. Penggunaan metode gravitasi telah banyak dilakukan peneliti untuk mengidentifikasi sesar dan struktur bawah permukaan (Sarkowi, dkk., 2016; Asra, dkk., 2020; Mardiyah A. dkk, 2024). Metode gravitasi didasarkan pada pengukuran variasi medan gravitasi bumi (Telford, dkk., 1990). Variasi medan gravitasi ini secara langsung dipengaruhi oleh distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Perbedaan densitas antara massa batuan yang tersesar menciptakan anomali yang dapat diukur dan dimodelkan untuk memperkirakan lokasi dan geometri sesarnya.

Data gravitasi primer didapatkan dengan melakukan survey langsung di daerah penelitian yaitu di kabupaten Probolinggo yang meliputi kecamatan Banyuwang, kecamatan Maron dan kecamatan Gading. Daerah penelitian ini diduga merupakan lokasi adanya Sesar Probolinggo. Kotak warna orange merupakan area penelitian dengan batas yaitu lintang -7.817076° sampai -7.915474° dan bujur 113.253145° sampai 113.494175° , yang ditunjukkan pada Gambar 2. Survey dilaksanakan selama 7 (tujuh) hari mulai tanggal 25-31 Desember 2024 dengan menggunakan alat Scintrex CG-6 Autograv dan alat pengukur posisi dan ketinggian menggunakan GPS Geodetik Trimble. Desain survei yang dilakukan dengan membuat lintasan berjumlah 9 lintasan, 72 titik pengukuran dan jarak antar titik pengukuran adalah ± 300 meter.



Gambar 2. Lokasi Titik-Titik Pengukuran Gravitasi (Titik Warna Kuning) di Daerah Penelitian (Kotak Warna Orange) yang Berada di Kabupaten Probolinggo. Garis Merah Merupakan Dugaan Sesar Probolinggo (Pusgen, 2017)

Pada gambar 2 menunjukkan sebaran titik-titik pengukuran gravitasi yang diberi warna kuning dan garis warna merah merupakan dugaan sesar Probolinggo (Pusgen, 2017).

Data gravitasi satelit digunakan untuk melengkapi dan mempertajam resolusi data yaitu data GGMPlus-SRTM2Gravity 2018. Data ini sebagai data sekunder. Data dapat diambil dari website <https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/>. Selain data gravitasi satelit juga memerlukan data ketinggian dari satelit yaitu data ketinggian DEMNAS yang diambil dari website <https://www.indonesia-geospasial.com/2024/04/download-demnas-indonesia.html>.

Analisis pengolahan data gravitasi dengan data mentah dikoreksi untuk menghilangkan pengaruh noise non geologi, meliputi koreksi drift (*drift correction*), koreksi pasang surut (*tidal correction*), koreksi lintang (*latitude correction*), koreksi udara bebas (*free air correction*), koreksi bouguer (*bouguer correction*), dan koreksi Medan (*terrain correction*). Proses pengolahan data ini menghasilkan data anomali bouguer lengkap (CBA) yang merupakan penyebaran variasi densitas batuan di bawah permukaan tanah. Data anomali bouguer lengkap ini kemudian dilakukan penggabungan dengan data gravitasi satelit GGMPlus-SRTM2Gravity 2018 menggunakan metode *collocated cokrigging*. sehingga data lebih lengkap dan detail. Hasil dari penggabungan data tersebut menghasilkan data anomali bouguer lengkap hybrid. Data ini kemudian dipetakan dengan menggunakan software surfer agar dapat dilihat dengan mudah distribusi penyebaran densitasnya.

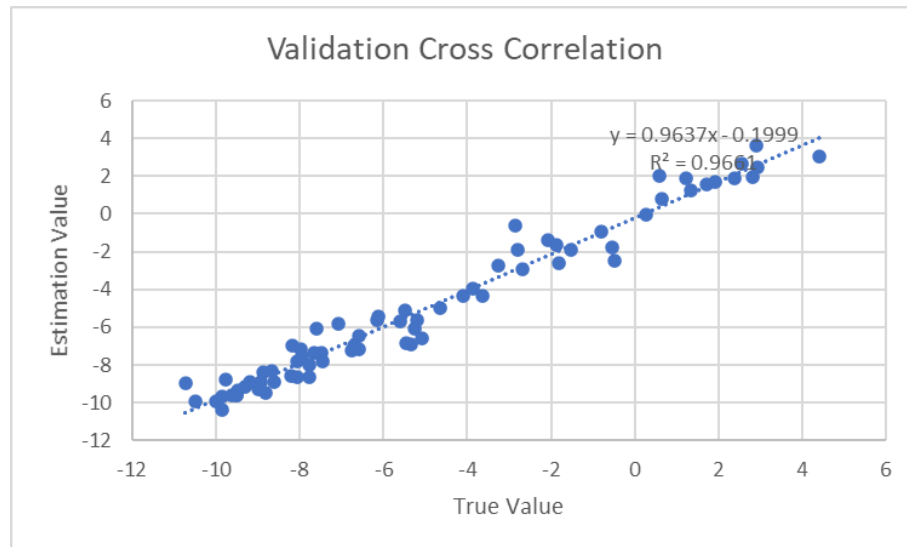
Pemisahan anomali regional dan anomali residual dilakukan dengan metode *Band Pass Filter* (BPF), yaitu proses pengolahan data berupa *filtering* berdasarkan frekuensi (domain frekuensi) atau rentang panjang gelombang tertentu. Metode ini memungkinkan pemisahan sinyal berdasarkan kedalaman sumber anomali, di mana frekuensi rendah merepresentasikan struktur dalam (regional) dan frekuensi tinggi merepresentasikan struktur dangkal atau residual (Hirt, 2014). Analisis Derivatif berupa First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD) untuk delineasi sesarnya ini menjadi inti dalam penentuan kelurusan dan perpanjangan sesar dan mengidentifikasi jenis pergerakan sesar (naik, turun, atau geser) berdasarkan kontras nilai absolut maksimum dan minimumnya (Hidayatullah, dkk., 2019; Fitriani dkk., 2020; Suarbawa dkk., 2020; Setyawan, 2020; Syaputra dkk., 2023; Faiza dkk., 2024; Sudrajad, 2024)

HASIL PENELITIAN

Pengolahan Data Dan Pembentukan Data Hibrid

Data pengukuran gravitasi (data primer) dilakukan koreksi yang kemudian menghasilkan data anomali bouguer lengkap (CBA). Guna meningkatkan detail analisis, data primer digabungkan dengan data gravitasi sekunder dari satelit GGMPlus-SRTM2Gravity 2018 menggunakan metode *collocated cokrigging*. Hasil

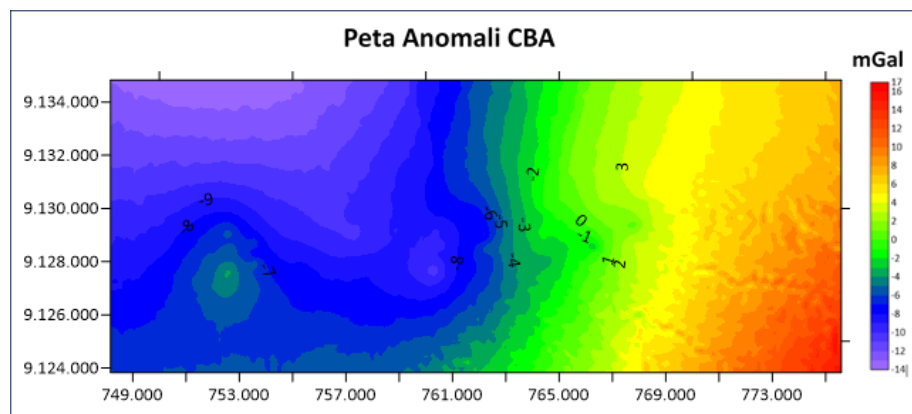
kombinasi dengan metode *colocatted cokriging* diperoleh nilai korelasi yang baik. Nilai korelasi silang antara data primer dengan data sekunder sebesar 0.96 yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Korelasi Silang Antara Data Primer dan Data Hasil Estimasi Collocated Cokriging

Hal ini mengindikasikan bahwa sekitar 96,6% variasi dari nilai estimasi mampu menjelaskan variasi pada data aktual (*true value*), yang berarti model memiliki presisi yang sangat kuat dalam memprediksi parameter bawah permukaan. Hubungan linear yang solid juga dipertegas oleh persamaan regresi $y = 0,9637x - 0,1999$, di mana nilai gradien yang mendekati angka 1 menunjukkan bahwa tidak terdapat bias sistematis yang signifikan antara data observasi dan hasil pemodelan.

Hasil integrasi ini menghasilkan peta kontur CBA hibrid tampak pada Gambar 4 yang merepresentasikan distribusi densitas batuan bawah permukaan secara lebih komprehensif.

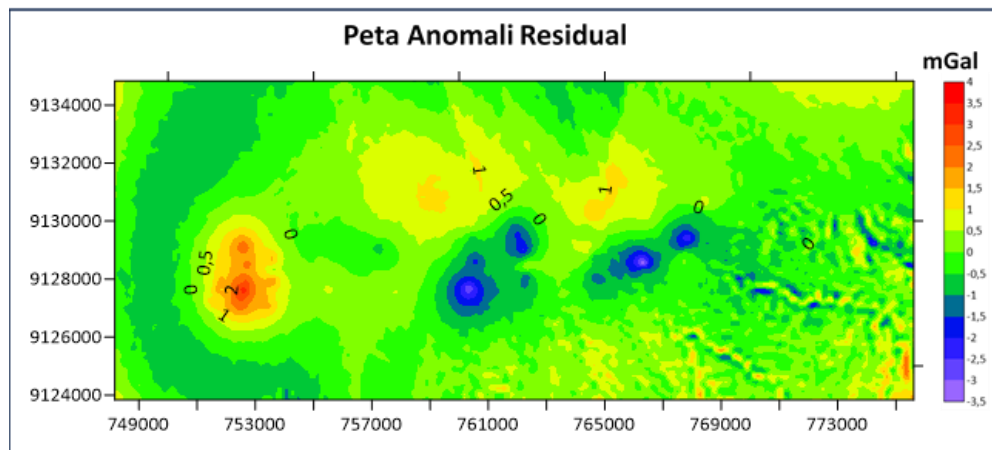


Gambar 4. Peta Anomali CBA Hasil Kombinasi antara Data Primer dan Data Sekunder.

Hasil peta CBA memiliki sebaran nilai anomali baoguer lengkap di daerah penelitian dengan rentang dari -14 mGal sampai 17 mGal. Nilai anomali positif digambarkan dengan warna gradasi dari warna hijau, kuning dan merah artinya bahwa densitas batuan di daerah tersebut lebih tinggi dari pada daerah lainnya. Adapun daerah yang mempunyai nilai anomali negatif terdapat di area Tengah hingga kearah Barat wilayah penelitian. dengan gradasi warna hijau, biru hingga ungu artinya daerah itu memiliki densitas batuan yang rendah

Analisis Peta Anomali Residual

Peta anomali residual merupakan hasil pemisahan antara CBA dengan anomali regional seperti tampak pada Gambar 5, dimana diperlihatkan sebaran nilai anomalnya berkisar antara -3.5mGal sampai 4 mGal.



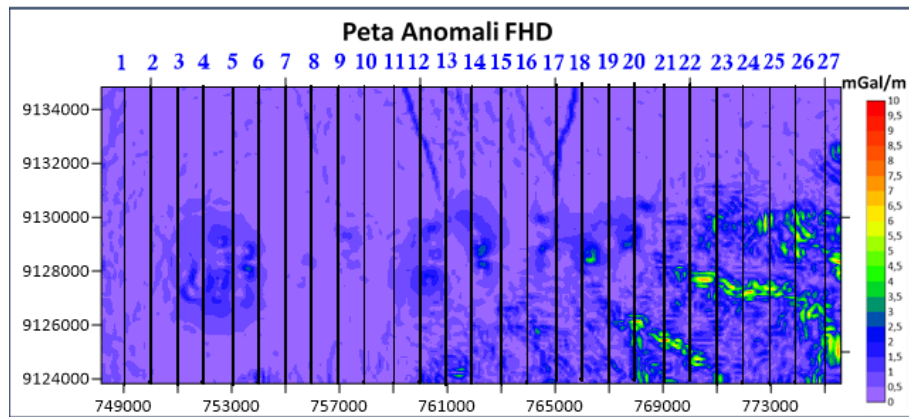
Gambar 5. Peta Anomali Residual di Wilayah Penelitian

Nilai anomali residual tinggi ditunjukkan kontur tertutup warna merah yang berlokasi di area barat. Anomali ini artinya mempunyai nilai densitas yang tinggi atau diasumsikan sebagai batuan yang padat. Berdasarkan peta geologi dan peta topografi, anomali ini diduga disebabkan adanya gunung Geni. Lokasi gunung Geni berada di wilayah desa Gunung Geni. Adapaun nilai anomali residual rendah ditunjukkan adanya kontur tertutup berwarna biru. Beberapa kontur tertutup ini terdapat di area tengah wilayah penelitian dan terlihat pola berjajar ke arah barat daya – timur laut. Pola ini mengindikasikan bahwa area tersebut diduga merupakan batas densitas batuan bawah permukaan yang diduga merupakan zona sesar.

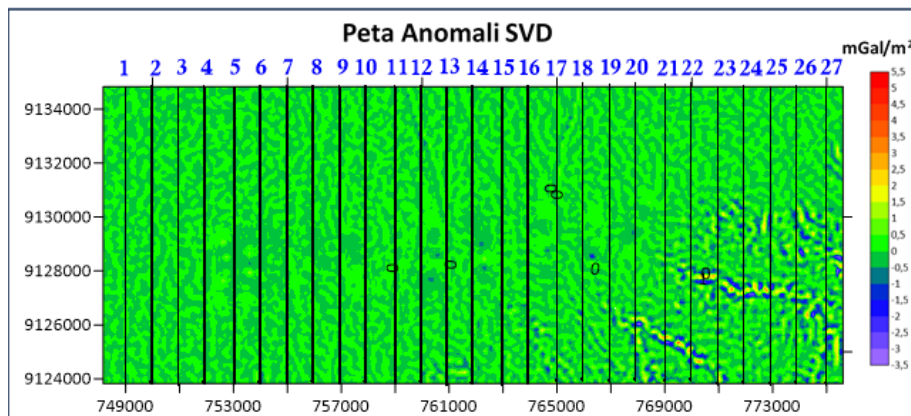
Identifikasi Kelurusan Sesar

Delineasi jalur sesar dilakukan dengan mengidentifikasi sayatan yang sama pada peta anomali FHD dan peta anomali SVD. Nilai FHD maksimum/minimum berimpit dengan nilai SVD 0 (nol) maka titik tersebut menjadi zona struktur sesar. Sayatan dilakukan sebanyak 27 dengan jarak masing-masing sekitar ± 1 (satu) km yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Nilai mutlak dari nilai SVD

maksimum dan nilai SVD minimum dari titik nilai 0 (nol) sebagai nilai penentuan jenis sesarnya.



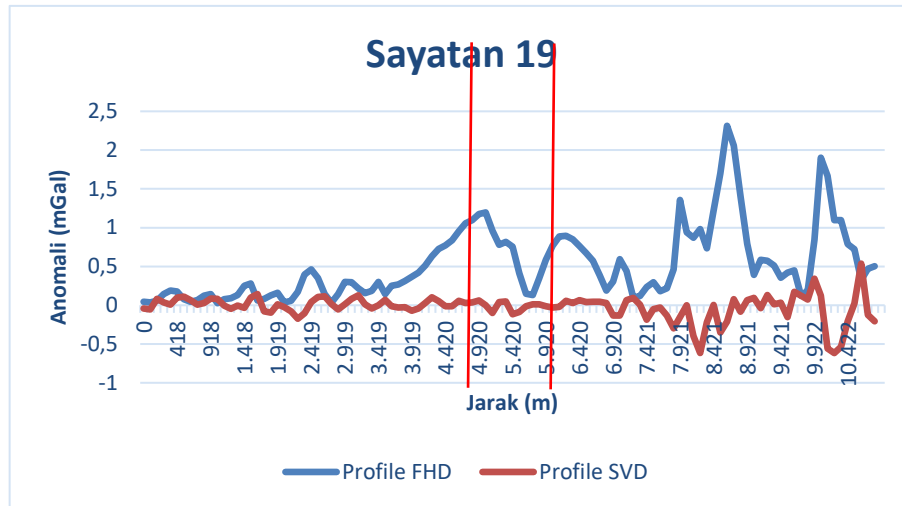
Gambar 6. Sayatan Peta Anomali FHD



Gambar 7. Sayatan Peta Anomali SVD

Sayatan peta anomali FHD dan sayatan peta anomali SVD ditunjukkan dengan garis-garis berwarna hitam. Sayatan pada keduanya dengan posisi yang sama,

Hasil sayatan peta anomali FHD dan peta anomali SVD masing-masing dibuat grafik korelasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 8. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi titik puncak (maksimum/minimum) pada grafik FHD (warna biru) dan titik potong nol pada grafik SVD (warna merah) yang selanjutnya ditandai garis tegak berwarna merah. Contoh grafik sayatan FHD dan sayatan SVD pada sayatan 19 teridentifikasi 2 (dua) korelasi antara nilai puncak maksimum FHD dan titik potong nol nilai SVD yang merepresentasikan sebagai batas perbedaan densitas batuan dan diinterpretasikan sebagai jalur sesar.



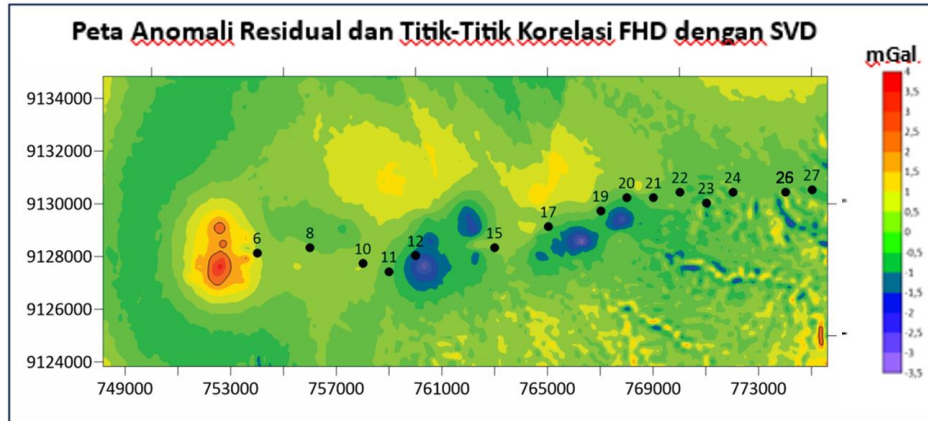
Gambar 8. Titik Potong Antara Grafik FHD Dan SVD Pada Sayatan 19

Titik korelasi pertama berada pada koordinat UTM lintang 767014 dan bujur 9129831 yang mempunyai nilai maksimum SVD sebesar 0.06 mGal/m² dan nilai minimum SVD sebesar -0.10 mGal/m². Titik korelasi kedua pada koordinat UTM lintang 767017.7 dan bujur 9128630 yang mempunyai nilai maksimum SVD sebesar 0.06 mGal/m² dan nilai minimum SVD sebesar -0.03 mGal/m². Data rincian nilai SVD maksimum dan minimum yang sebagai indikasi jalur sesar dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Nilai SVD Maksimum dan Minimum Pada Sayatan Peta Anomali SVD

No	Sayatan	Maks SVD (mGal/m ²)	Maks SVD (mGal/m ²)
1	6	0.02	0.01
2	8	0.01	0.01
3	10	0.12	0.13
4	11	0.04	0.04
5	12	0.06	0.05
6	15	0.06	0.01
7	17	0.10	0.04
8	19	0.06	0.10
9	20	0.03	0.04
10	21	0.02	0.11
11	22	0.44	0.31
12	23	0.59	1.31
13	24	1.02	0.63
14	26	1.21	0.73
15	27	0.14	0.20

Tabel tersebut merupakan data hasil analisa dari 27 sayatan yang telah dilakukan pada peta anomali FHD dan peta anomali SVD. Identifikasi titik korelasi pada seluruh sayatan dilakukan dengan mengintegrasikan kondisi geologi setempat, data topografi, serta pola anomali residual. Titik-titik hasil korelasi tersebut selanjutnya dipetakan di atas anomali residual sebagaimana terlihat pada Gambar 9

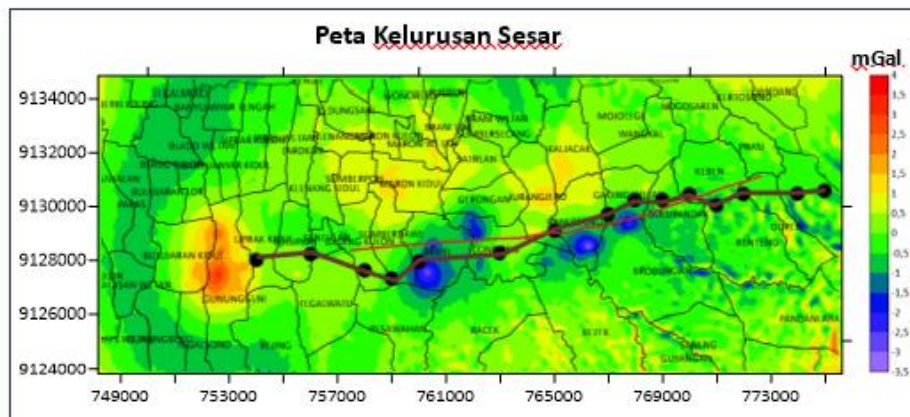


Gambar 9. Lokasi Titik-Titik Korelasi FHD dan SVD di Peta Anomali Residual

Titik-titik korelasi sayatan FHD dan sayatan SVD di peta anomali residual terlihat dibagian tengah daerah penelitian yaitu sekitar area kontur anomali residual yang nilainya rendah. Titik-titik tersebut memberikan gambaran bahwa batas-batas struktur batuan yang merupakan dugaan adanya pola jalur sesar

Potensi Perpanjangan ke Barat

Berdasarkan analisis sebaran titik-titik korelasi sayatan FHD dan sayatan SVD dengan menghubungkan semua titik-titik korelasi tersebut maka didapatkan dugaan adanya pola jalur sesarnya. Dan diperoleh identifikasi adanya perpanjangan jalur sesar Probolinggo ke arah barat dari batas jalur sesar yang telah ditetapkan oleh Pusgen, yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan Pola Kelurusan Sesar Probolinggo dari Hasil Penelitian dengan Pusgen. Garis Lurus Warna Merah Adalah Sesar Probolinggo oleh Pusgen. Garis Warna Coklat adalah Sesar Hasil Analisis Derivatif

Peta kelurusan sesar tersebut bahwa garis berwarna merah merupakan garis sesar Probolinggo berdasarkan Pusgen dan garis warna coklat merupakan hasil garis sesar Probolinggo berdasarkan hasil penelitian. Keberadaan struktur jalur sesar dengan pola garis coklat yang menunjukkan geometri non-linear atau

berbelok-belok. Kelurusan tersebut memiliki orientasi dominan dari arah Barat ke Timur dengan perkiraan panjang jalur sesar mencapai kurang lebih 22 km. Hasil interpretasi ini menunjukkan adanya perpanjangan jalur sesar ke arah barat yang lebih signifikan dibandingkan dengan jalur yang dipetakan sebelumnya oleh Pusgen. Perpanjangan ke arah barat ini teridentifikasi melalui kelurusan anomali yang memotong zona densitas tinggi di bagian barat wilayah penelitian Jalur sesar tersebut membentang melintasi beberapa wilayah, mulai dari Desa Liprak Kidul, Tulupak, Sentulan, Gading Kulon, Sumbergawe, Brage, Condong, Ranuwurung, Krobungan, Gading Wetan, Bulu Pandak, Keben, Renteng dan Betektaman.

Selain itu, hasil analisis derivatif menampilkan pola yang lebih kompleks dan berlekuk, yang mengindikasikan kemampuan metode ini dalam menangkap detail struktur lokal atau segmentasi sesar di bawah permukaan yang tidak terakomodasi dalam model linear Pusgen. Jalur sesar tersebut terlihat memotong zona transisi kontras densitas, terutama di sisi barat yang berbatasan dengan anomali tinggi (warna oranye-merah) yang diasosiasikan dengan batuan breksi gunung api dari batuan gunung Geni. Validasi jalur ini memiliki tingkat kepercayaan yang sangat tinggi karena didukung oleh hasil korelasi silang dengan nilai $R^2 = 0,9661$, serta konsistensi metodologi di mana titik sesar ditentukan berdasarkan perimpitan nilai ekstrem FHD dengan nilai nol pada SVD. Secara keseluruhan, peta ini membuktikan bahwa sistem sesar Probolinggo merupakan pengontrol struktural utama yang memisahkan blok-blok batuan dengan densitas berbeda di wilayah tersebut.

Data hasil analisis mengenai nilai SVD maksimum dan minimum di sekitar titik 0 (nol) sebagai titik perpotongan antara nilai positif dan negatif yang terdapat pada Tabel 1, yang mencakup sebanyak 15 data. Seluruh data menunjukkan besaran yang sangat kecil, yakni di bawah 1 mGal/m^2 , dengan nilai rata-rata maksimum sebesar 0.26 mGal/m^2 dan rata-rata nilai SVD minimum sebesar 0.25 mGal/m^2 . Kemiripan nilai ini mengindikasikan bahwa perbedaan densitas pada batas struktur batuan hampir seragam, dengan perubahan nilai antara *hanging wall* dan *footwall* yang relatif setara. Berdasarkan karakteristik nilai tersebut, struktur geologi yang teridentifikasi sebagai sesar geser. Hal ini sesuai dengan identifikasi sesar oleh Pusgen (2017) dan Rochman, dkk (2021)

PEMBAHASAN

Hasil delineasi pemetaan anomali *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) hibrid menunjukkan korelasi yang kuat dengan tatanan geologi regional. Dominasi anomali positif di wilayah Timur dan Tenggara secara konsisten mencerminkan massa batuan vulkanik dari Kompleks Argopuro yang bersifat masif. Sebaliknya, nilai anomali negatif di bagian Tengah hingga Barat menunjukkan bahwa wilayah tersebut merupakan zona depresi yang terisi oleh material sedimen vulkanik lepas dari Gunung Lamongan dan endapan Aluvium. Kontras densitas yang tajam di

antara kedua zona ini menjadi indikator utama keberadaan jalur diskontinu yang diasosiasikan sebagai bidang sesar.

Penggunaan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) dalam penelitian ini terbukti efektif untuk melakukan delineasi batas sesar yang tertutup oleh material vulkanik Kwartir. Temuan mengenai kelurusan jalur sesar sepanjang 22 km menunjukkan kesesuaian dengan data dari Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen, 2017) pada segmen bagian timur. Namun, pada segmen barat, hasil analisis menunjukkan pola yang lebih berkelok (non-linear). indikasi ini memberikan informasi baru bahwa Sesar Probolinggo memiliki geometri yang lebih kompleks di bawah permukaan dibandingkan proyeksi garis lurus yang umumnya digunakan dalam pemetaan regional.

Analisis kuantitatif melalui nilai absolut SVD menunjukkan bahwa Sesar Probolinggo merupakan sesar geser (*strike-slip fault*). Temuan ini didukung oleh kesetaraan nilai absolut maksimum dan minimum SVD pada profil sayatan melintang. Hal ini sejalan dengan penelitian Sumintadireja dkk. (2018) yang menyatakan bahwa karakteristik nilai SVD yang simetris pada area anomali seringkali merepresentasikan struktur patahan vertikal atau miring dengan pergerakan mendatar. Secara morfologis, hal ini juga diperkuat dengan adanya gawir sesar yang teridentifikasi di permukaan yang menunjukkan indikasi pergerakan relatif mendatar.

Tujuan penelitian ini adalah menguji hipotesis mengenai potensi perpanjangan sesar ke arah barat guna menutup kesenjangan (*gap*) informasi mitigasi. Berdasarkan integrasi data gravitasi hibrid, penelitian ini menemukan bahwa respons anomali gravitasi tidak menunjukkan kontinuitas kelurusan yang signifikan di luar batas jalur yang telah didelineasi. Hal ini mengimplikasikan bahwa energi tektonik yang membentuk Sesar Probolinggo terkonsentrasi pada jalur sepanjang 22 km tersebut. Temuan ini penting untuk membatasi estimasi magnitudo maksimum gempabumi yang mungkin dihasilkan, karena panjang rekahan (*rupture length*) berhubungan langsung dengan potensi kekuatan gempa.

Dibandingkan dengan penggunaan hanya data gravitasi satelit saja, penggunaan data hibrid dalam penelitian ini memberikan resolusi yang lebih tajam dalam memetakan anomali lokal. Keberhasilan delineasi jalur sesar yang melintasi pemukiman padat seperti Desa Liprak Kidul hingga Betektaman menegaskan perlunya peninjauan kembali tata ruang berbasis risiko bencana. Dan potensi perpanjangan ke barat ditemukan, fakta bahwa sesar ini aktif dan melintasi infrastruktur vital tetap menjadikannya ancaman seismik yang signifikan bagi Kabupaten Probolinggo.

SIMPULAN

Berdasarkan Respon Anomali Gravitasi Hibrid dapat ditarik simpulan sebagai berikut. Pertama, Penyebaran anomali gravitasi (CBA) di wilayah penelitian mempunyai rentang dari -14 mGal sampai 17 mGal. Nilai anomali positif

menyebar di area timur hingga tenggara wilayah penelitian yang berdasarkan peta geologi terdapat batuan gunung Argopuro meliputi batuan lava andesit, lava basal, breksi gunung api dan tuf. Adapaun penyebaran anomali negatif terdapat di area tengah hingga kearah barat wilayah penelitian yang berdasarkan peta geologi terdapat batuan gunung api Lamongan terdiri dari batuan lava, tuf halus-lapili, lahar dan breksi gunung api dan batuan aluvium meliputi lempung, lumpur, pasir, kerikil, kerakal, bongkah dan sisa tanaman. Terdapat 2 kontur tertutup yaitu di area barat dengan nilai kontur lebih tinggi dari pada sekitarnya dan diduga adalah area gunung Geni. Adapun kontur kedua di area tengah penelitian yang mempunyai nilai anomali CBA rendah dan diduga area tersebut merupakan area datar dan persawahan.

Kedua, Keberadaan sesar aktif Probolinggo dapat teridentifikasi secara kuantitatif melalui analisis derivatif. Berdasarkan evaluasi nilai *Second Vertical Derivative* (SVD) yang menunjukkan kesetaraan rata-rata nilai maksimum dan minimum sebesar 0,25 mGal/m², mekanisme pergerakan struktur geologi bawah permukaan ini diklasifikasikan secara dominan sebagai sesar geser (*strike-slip fault*).

Ketiga, delineasi jalur sesar menunjukkan geometri yang berkelok (non-linear) dengan orientasi dominan dari arah Barat ke Timur. Pola kelurusan sesar aktif Probolinggo dapat teridentifikasi dengan metode derivative sepanjang 22 km yang berarah barat-timur. Selain itu juga terdapat adanya perpanjangan jalur sesar ke arah barat yang lebih signifikan dibandingkan dengan jalur yang dipetakan sebelumnya oleh Pusgen

Keempat, analisis potensi perpanjangan struktur bawah permukaan menyimpulkan bahwa teridentifikasi adanya perpanjangan jalur Sesar Probolinggo ke arah barat melampaui batas yang telah ditetapkan oleh Pusgen. Integrasi data gravitasi hibrid dan analisis derivatif FHD-SVD menunjukkan bahwa respon anomali kelurusan struktur berakhir secara konsisten pada zona yang telah dipetakan sebelumnya

Model penelitian menggunakan Gravitasi Hibrid ini terbukti memberikan resolusi spasial yang lebih optimal dalam menutup celah informasi geologi yang tertutup material vulkanik Kuartar. Temuan ini diharapkan dapat menjadi rujukan ilmiah bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan mitigasi risiko bencana gempabumi yang lebih akurat dan terukur di wilayah Kabupaten Probolinggo.

DAFTAR PUSTAKA

- Asra, A., Syamsuddin, F., & Yudistira, T. (2020). Identification of the Sumatran Fault Segment in the Tarutung Basin based on gravity data analysis. *Indonesian Journal on Geoscience*, 7(1), 35–46. <https://doi.org/10.17014/ijog.7.1.35-46>

- Faiza, M. N., Sarkowi, M., Rismal, M., & Mukhlis, R. (2024). Identifikasi zona sesar berdasarkan data gravitasi daerah Pasaman Barat Sumatra Barat. *Jurnal Geosaintek*, 10(3), 242–260. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v10i3.2081>
- Fitriani, D. S., Putri, S. N. A., & Putrajy, I. F. (2020). Metode gravitasi untuk identifikasi Sesar Weluki dengan analisis First Horizontal Derivative dan Second Vertical Derivative. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2020*, 9, 53–60. <https://doi.org/10.21009/03.SNF2020.01.FA.10>
- Hidayatullah, R., & Jannah, W. (2019). Identifikasi Sesar Opak Yogyakarta berdasarkan data gravitasi menggunakan metode Second Vertical Derivative. *Jurnal Geofisika*, 17(1), 12–17. <https://doi.org/10.36435/jgf.v17i1.452>
- Hirt, C. (2014). Filtering and spectral analysis of gravity data. In E. W. Grafarend (Ed.), *Encyclopedia of Geodesy*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_26-1
- Mardiyah, A., Fachrizal, Mahmud, A. F., & Purwoko, A. (2024). Identifikasi Sesar Gorontalo dengan memanfaatkan data gravitasi satelit resolusi tinggi. *Jurnal Fisika Unand*, 13(5), 658–664. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.5.658-664.2024>
- Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Balitbang Kementerian PUPR.
- Rochman, J. P. G. N., Hidayat, R., Mulyani, T. S. R., Saepuloh, A., & Wahyudi. (2021). Preliminary study of Probolinggo active fault in East Java based on gravity method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 936, 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012025>
- Sarkowi, M., & Wibowo, R. C. (2016). Identifikasi struktur geologi panas bumi Way Ratai berdasarkan data anomali gayaberat. *Jurnal Geofisika*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.36435/jgf.v1i1.118>
- Setiabudiwibowo, A. P., Efendi, N., Rachmat, A., & Triadhy, D. A. (2025). Comparison of upward continuation and moving average filters for satellite gravity data in Probolinggo Fault case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1486, 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1486/1/012021>
- Setyawan, A., Ramadhan, F., & Sarkowi, M. (2020). Identification of geological structure using Second Vertical Derivative (SVD) method in "X" geothermal field. *Jurnal Geofisika*, 18(1), 1–6. <https://doi.org/10.36435/jgf.v18i1.461>
- Suarbawa, K. N., Adnyana, I. G. A. P., & Riyono, E. (2020). Identification of local faults of Tejakula Buleleng Bali with anomaly gravity data using second vertical derivative method. *International Journal of Physics & Mathematics*, 3(1), 18–25. <https://doi.org/10.31295/ijpm.v3n1.170>

- Sudrajad, B., Faried, M., Wahyuningsih, S., & Mustofa, A. (2024). Identifikasi patahan seismo-tektunik Jayapura berdasarkan pemodelan inversi 3D data gravitasi. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(1), 47–64. <https://doi.org/10.23960/jge.v10i1.372>
- 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. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50(1), 127–139. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.1.9>
- Suwarti, T., & Suharsono. (1993). *Peta geologi lembar Probolinggo, Jawa* [Geological map]. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Syaputra, E. W., Zulaikah, S., Wisodo, H., & Yuliati, L. (2023). Identifikasi sesar segmen Ketahun berdasarkan metode First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD) data anomali gaya berat GGMplus. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 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.