

ANALISIS KELURUSAN SESAR DI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA BERDASARKAN DATA ANOMALI GRAVITASI

Iswanudin¹, Muchamad Aryono Adhi², Muhamad Syrojudin³

Universitas Negeri Semarang^{1,2}, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika^{1,3}
iswanu2606@gmail.com¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola kelurusan sesar berdasarkan data anomali gravitasi di wilayah Yogyakarta. Metode yang digunakan adalah metode gravitasi. Data gravitasi primer hasil pengukuran BMKG di Kabupaten Bantul, Kota Yogyakarta, dan Kabupaten Sleman diolah hingga menghasilkan Peta Anomali *Bouguer* Lengkap. Data tersebut dianalisis menggunakan pemisahan anomali regional-residual, serta teknik derivatif *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk memperjelas batas struktur geologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi anomali *Bouguer* lengkap berkisar antara 56,06 mGal hingga 130,38 mGal. Analisis derivatif berhasil mengidentifikasi dua struktur sesar utama: Sesar Opak di bagian selatan dengan arah barat daya-timur laut sepanjang $\pm 44,8$ km, dan Sesar Mataram di bagian utara dengan arah barat-timur sepanjang $\pm 27,2$ km. Terdapat korelasi yang baik antara anomali gravitasi tinggi dengan nilai *Vs30* yang tinggi, yang mengindikasikan batuan kompak dan kondisi tanah yang lebih stabil terhadap guncangan gempa, dan sebaliknya. Simpulan, di daerah penelitian teridentifikasi dua struktur sesar utama yaitu Sesar Opak di bagian selatan dengan arah barat daya-timur laut dan Sesar Mataram di bagian utara dengan arah barat-timur.

Kata Kunci: Anomali Gravitasi, Guncangan Gempa, Sesar

ABSTRACT

This research aimed to analyze fault lineament patterns based on gravity anomaly data in the Yogyakarta region. The method used is the gravity method. Primary gravity data from BMKG measurements in Bantul Regency, Yogyakarta City, and Sleman Regency were processed to produce a Complete Bouguer Anomaly Map. The data were analyzed using regional-residual anomaly separation, as well as First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) techniques to clarify geological structure boundaries. The results showed that the complete Bouguer anomaly distribution ranges from 56.06 mGal to 130.38 mGal. Derivative analysis successfully identified two main fault structures: the Opak Fault in the southern part with a southwest-northeast direction spanning approximately 44.8 km, and the Mataram Fault in the northern part with a west-east direction spanning approximately 27.2 km. There is a good correlation between high gravity anomalies and high Vs30 values, which indicates compact rocks and more stable soil conditions against earthquake shocks, and vice versa. In conclusion, two main fault structures were identified in the research area, namely the Opak Fault in the south with a southwest-northeast direction and the Mataram Fault in the north with a west-east direction.

Keywords: Gravity Anomaly, Earthquake Shock, Fault

PENDAHULUAN

Secara tektonik, Indonesia berada pada zona pertemuan tiga lempeng utama dunia yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Hamilton, 1973). Interaksi ini menjadikan wilayah Indonesia, khususnya Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), memiliki tingkat aktivitas seismik dan kerentanan yang tinggi. Ancaman seismik di DIY berasal dari dua sumber utama, yaitu sesar aktif lokal dan zona subduksi *megathrust* (PUSGeN, 2017). Sesar lokal yang paling signifikan adalah Sesar Opak, yang diduga menjadi penyebab gempa bumi merusak pada tahun 2006 dengan magnitudo Mw 6,3 (PUSGeN, 2017). Meskipun demikian, keberadaan dan posisi pasti sesar ini masih sulit dipetakan karena tertutup oleh endapan muda Gunung Merapi (Sutiono et al., 2018). Selain itu, wilayah Yogyakarta juga terpapar potensi gempa *megathrust* dari zona subduksi di selatan Jawa dengan estimasi magnitudo hingga Mw 8,7 (PUSGeN, 2017).

Berdasarkan studi-studi terbaru, telah ditemukan sumber baru, yaitu sebuah sesar yang membentang berarah timur-barat yang disebut sebagai Sesar Mataram atau Tambakboyo. Sesar ini masih berada dalam tahap awal penelitian (Andikasari et al., 2024). Studi dari Daryono et al. (2023) menemukan bahwa dugaan sesar aktif baru berorientasi timur-barat dan melintasi pusat kota yang padat penduduk. Sesar tersebut membentang sejajar dan dekat dengan Saluran Mataram (Selokan Mataram) yang terkenal. Sesar ini kemungkinan merupakan kelanjutan dari Sesar Dengkeng yang telah dikenali sebelumnya di sebelah timur Sesar Opak.

Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang struktur bawah permukaan sangat penting untuk mitigasi bencana. Metode geofisika gaya berat (*gravitasi*) dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan, termasuk sesar, melalui analisis variasi densitas batuan (Sarkowi, 2014). Identifikasi sesar menggunakan data gravitasi telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, antara lain Firdaus et al. (2016), Wahyudi et al. (2017), Rosid dan Siregar (2017), Aziz et al. (2018), Hiden (2019), Ryanto et al. (2019), Margiono et al. (2021), Putri dan Annisa (2021), Sadjab et al. (2022), hingga Mazzaluna et al. (2024).

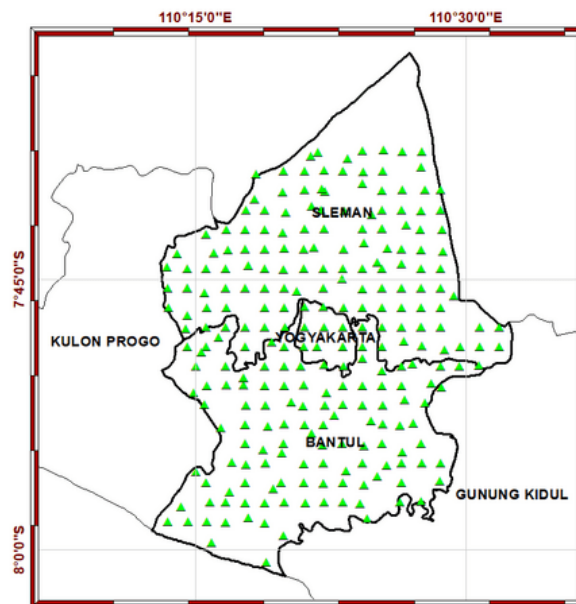
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola kelurusan sesar berdasarkan data anomali gravitasi di wilayah Yogyakarta. Penelitian ini menawarkan sejumlah kebaruan (*novelty*) dibanding studi sebelumnya, yaitu menggunakan data primer beresolusi tinggi (di mana kebanyakan peneliti terdahulu menggunakan data satelit) dan penelitian ini akan dikorelasikan dengan data kerentanan seismik yang jarang dilakukan secara komprehensif dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian ini dapat memberikan manfaat baik dalam ranah akademik maupun praktis, yaitu memberikan kontribusi ilmiah khususnya analisis data anomali gravitasi untuk identifikasi struktur sesar bawah permukaan serta memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi lembaga pemerintah dan pemangku kebijakan dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi berbasis data geofisika.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain deskriptif-kuantitatif dengan pendekatan eksploratif geofisika.

Data dan Instrumen Penelitian

Data utama yang digunakan adalah data gravitasi primer hasil pengukuran lapangan BMKG di Daerah Istimewa Yogyakarta sebanyak 260 titik ukur, yang diukur menggunakan gravimeter Scintrex CG-5. Sebaran titik pengukuran di daerah penelitian ditampilkan pada Gambar 1. Data sekunder yang digunakan meliputi data topografi DEMNAS untuk koreksi medan dan data Vs30 dari penelitian Wijayanto dkk. (2022) untuk validasi.



Gambar 1. Lokasi titik pengukuran gravitasi

Sebaran titik ukur pada Gambar 1 meliputi Kabupaten Bantul, Kota Yogyakarta, dan Kabupaten Sleman dengan interval titik ukur 2 km. Distribusi dan kerapatan titik ukur tersebut cukup mewakili area penelitian untuk identifikasi sesar.

Pengolahan dan Analisis Data

Prosedur analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkesinambungan. Tahap pertama adalah koreksi data gravitasi, di mana data mentah lapangan dikoreksi melalui serangkaian proses yang meliputi koreksi *drift*, pasang surut (*tidal*), lintang, udara bebas (*free air*), Bouguer, dan medan (*terrain*). Hasil dari proses ini adalah Peta Anomali Bouguer Lengkap (*Complete Bouguer Anomaly/CBA*). Pada tahap ini, densitas rata-rata yang digunakan untuk koreksi Bouguer ditentukan menggunakan metode Nettleton, yaitu sebesar $2,4 \text{ g/cm}^3$.

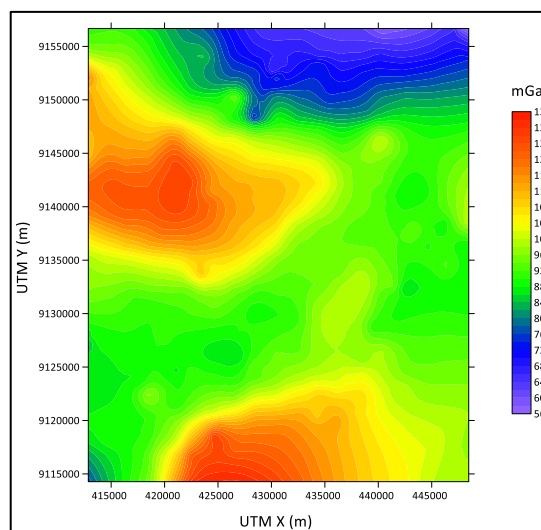
Selanjutnya, dilakukan pemisahan anomali untuk memisahkan komponen regional dan residual menggunakan *bandpass filter*. Anomali residual yang diperoleh merefleksikan struktur dangkal dan digunakan sebagai input utama dalam analisis berikutnya. Tahap berikutnya adalah analisis derivatif, di mana peta anomali residual dianalisis menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) untuk mendeteksi batas lateral densitas, serta *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mempertegas posisi sesar. Interpretasi lokasi sesar dilakukan berdasarkan nilai maksimum dan minimum pada FHD serta perpotongan nilai nol pada SVD.

Tahap akhir adalah validasi, yaitu dengan membandingkan anomali residual yang diperoleh terhadap peta geologi regional dan peta distribusi Vs30 guna memastikan kesesuaian interpretasi yang dihasilkan.

HASIL PENELITIAN

Distribusi Anomali Gravitasi

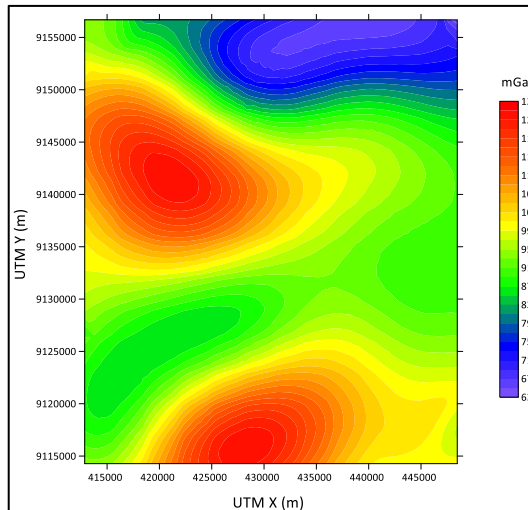
Distribusi nilai anomali bouguer lengkap daerah penelitian berkisar antara 56,06 mGal hingga 130,38 mGal, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Anomali Bouguer Lengkap

Nilai anomali bouguer rendah ditandai dengan gradasi warna ungu hingga biru, sedangkan nilai anomali tinggi ditandai dengan gradasi warna kuning hingga merah. Sebagaimana terlihat pada Gambar 2, nilai anomali Bouguer tinggi terlihat dominan di bagian barat hingga tengah dan bagian selatan daerah penelitian.

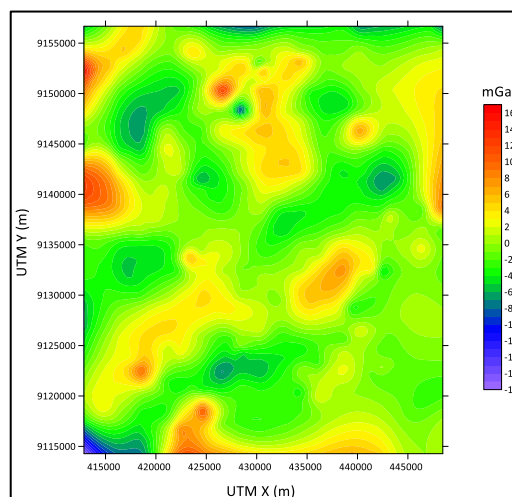
Peta anomali regional hasil filtering ditunjukkan pada Gambar 3, yang merupakan anomali gravitasi yang disebabkan oleh struktur geologi yang dalam dan berskala besar. Distribusi nilai anomali regional daerah penelitian berkisar antara 63,29 mGal hingga 124,97 mGal.



Gambar 3. Peta Anomali Regional

Sebagaimana terlihat pada Gambar 3, anomali tinggi yang ditandai gradasi warna orange hingga merah berada di bagian barat hingga tengah dan bagian selatan daerah penelitian. Anomali sedang ditandai dengan warna hijau berada di barat laut, timur dan barat daya. Nilai anomali rendah ditandai dengan gradasi warna ungu hingga biru yang terlihat dominan di bagian utara.

Sebaran nilai anomali residual daerah penelitian yang disebabkan oleh struktur geologi yang lebih dangkal dan berskala lokal berkisar antara -17,19 mGal hingga 15,33 mGal ditunjukkan pada Gambar 4.

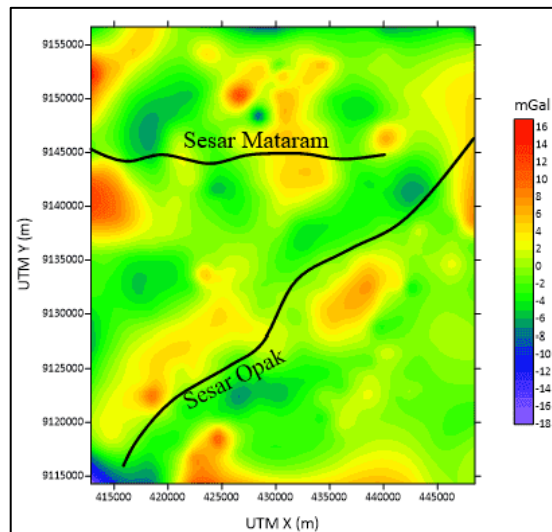


Gambar 4. Peta Anomali Residual

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4, nilai anomali residual daerah penelitian didominasi oleh nilai anomali yang rendah (warna biru hingga hijau). Nilai anomali residual tinggi tersebar di area penelitian membentuk klosur-klosur berwarna orange hingga merah.

Identifikasi Sesar (Analisis FHD dan SVD)

Analisis derivatif FHD dan SVD terhadap data anomali residual berhasil mengidentifikasi dua struktur sesar utama seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Dugaan pola kelurusan sesar hasil analisis derivative

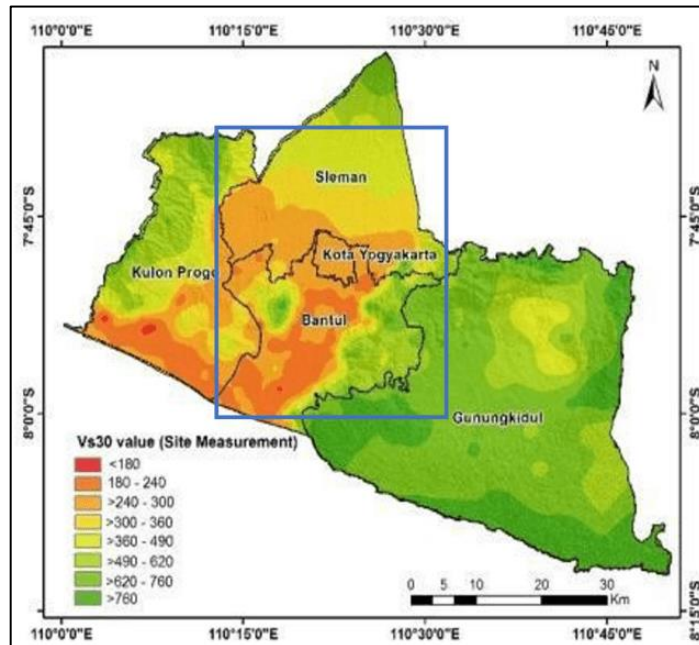
Pola kelurusan dua struktur sesar sebagaimana terlihat pada Gambar 5 ditandai dengan garis warna hitam tebal yang memiliki orientasi arah barat daya-timur laut dan barat-timur.

Validasi Anomali Residual dengan Peta Vs30

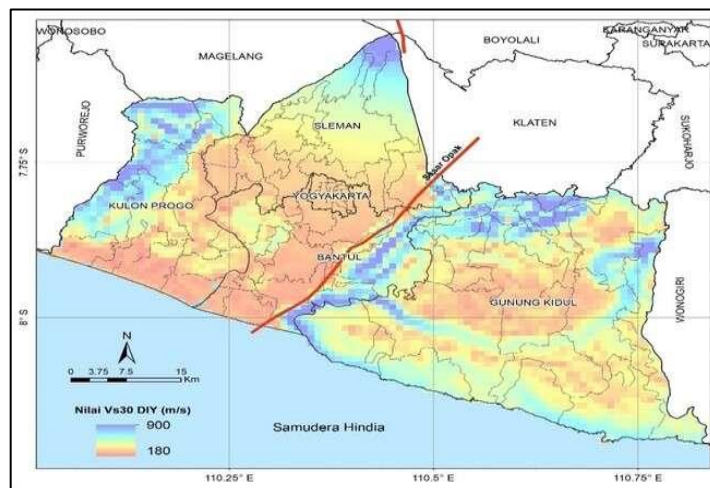
Perbandingan antara peta anomali residual pada Gambar 4 dengan peta Vs30 dari Wijayanto et al. (2022) pada Gambar 6 dan peta Vs30 dari Riswandi et al. (2023) pada Gambar 7 menunjukkan korelasi yang baik. Korelasi ini mengindikasikan bahwa distribusi anomali gravitasi residual berkaitan erat dengan karakteristik fisik material bawah permukaan yang direpresentasikan oleh nilai Vs30. Semakin tinggi nilai Vs30, maka semakin keras dan padat atau terkonsolidasi materialnya, sedangkan semakin rendah nilai Vs30 menunjukkan material yang lebih lunak dan kurang padat atau tidak terkonsolidasi (Wijayanto et al., 2022). Nilai Vs30 yang rendah umumnya berkaitan dengan lapisan sedimen yang tebal dan material yang tidak padat serta tidak terkonsolidasi, seperti endapan aluvial, lempung, pasir, dan kerikil, yang memiliki porositas tinggi dan kekompakan rendah.

Sebaliknya, nilai Vs30 yang tinggi berhubungan dengan lapisan sedimen yang dangkal atau adanya singkapan batuan, dengan karakteristik material yang lebih padat dan terkonsolidasi sehingga memiliki kemampuan menghantarkan gelombang geser yang lebih tinggi. Kondisi ini umumnya dijumpai pada wilayah dataran tinggi (Wijayanto et al., 2022). Dengan demikian, kesesuaian pola antara peta anomali residual dan distribusi Vs30 memperkuat interpretasi bahwa variasi anomali gravitasi tidak hanya mencerminkan perbedaan densitas bawah

permukaan, tetapi juga berkaitan dengan tingkat konsolidasi material. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi data gravitasi dan Vs30 dapat menjadi pendekatan yang efektif dalam mengidentifikasi karakteristik geologi bawah permukaan serta mendukung analisis kerentanan seismik.



Gambar 6. Peta distribusi Vs30 daerah Istimewa Yogyakarta
 Sumber : Wijayanto et al. (2022)



Gambar 7. Peta distribusi Vs30 daerah Istimewa Yogyakarta
 Sumber : Riswandi et al. (2023)

Terdapat korelasi positif dimana area dengan nilai Vs30 rendah pada Gambar 6 dan Gambar 7 (material lunak) seperti di wilayah Bantul dan Kota Yogyakarta, umumnya bersesuaian dengan area anomali gravitasi residual rendah (warna hijau/biru) seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Hal ini mengindikasikan adanya endapan sedimen lunak (Cekungan Yogyakarta-Bantul) yang rentan

mengalami amplifikasi gelombang seismik saat gempa. Terdapat korelasi positif lainnya yaitu area dengan nilai Vs30 tinggi pada Gambar 6 dan Gambar 7 (batuan kompak), seperti di Kulonprogo dan Gunung Kidul, bersesuaian dengan anomali gravitasi residual tinggi (warna merah) pada Gambar 4. Wilayah ini tersusun oleh batuan keras (batu gamping, breksi) dan lebih stabil terhadap guncangan gempa.

Ditemukan beberapa anomali, misalnya di Sleman, di mana nilai Vs30 sedang-rendah (permukaan lunak material vulkanik Merapi), namun terdapat anomali gravitasi tinggi. Ini menunjukkan bahwa peta Vs30 hanya mengukur 30 meter teratas, sedangkan data gravitasi mendeteksi struktur batuan dasar padat (*bedrock high*) yang terkubur lebih dalam di bawah lapisan lunak tersebut.

PEMBAHASAN

Distribusi Anomali Gravitasi

Nilai anomali Bouguer tinggi selain berkorelasi dengan topografinya yang cenderung lebih rendah, juga berkaitan dengan densitas batuan penyusun dengan massa jenis tinggi (Verma, 1985; Lo et al., 2023). Berdasarkan peta geologi (Rahardjo et al., 2012), anomali Bouguer tinggi di bagian barat daerah penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 diindikasikan sebagai Formasi Sentolo yang tersusun dari batugamping dan batupasir napalan. Sementara anomali Bouguer tinggi di bagian selatan daerah penelitian diindikasikan sebagai formasi Nglanggran yang tersusun oleh batuan breksi dan formasi Wonosari yang tersusun oleh batu gamping. Nilai anomali Bouguer rendah terlihat dominan di bagian utara dan barat daya daerah penelitian, yang mengindikasikan dataran yang tinggi atau densitas batuan yang rendah seperti alluvial (Ajayakumar & Zeba, 2024). Berdasarkan peta geologi, daerah dengan anomali Bouguer rendah merupakan Endapan Gunungapi Merapi Muda.

Struktur kelurusan dan kerapatan kontur pada peta anomali Bouguer pada Gambar 2 dan Gambar 3 dapat mengidentifikasi adanya formasi sesar di bawah permukaan daerah penelitian, sedangkan struktur pembelokan kontur menunjukkan batas blok batuan (Nurwidyanto et al., 2007). Gradien gravitasi (perubahan nilai anomali yang curam) pada Gambar 2 dan Gambar 3 di bagian barat daya ke arah timur laut dan di bagian utara berarah barat ke timur dapat mengindikasikan adanya batas antara dua zona dengan densitas batuan yang berbeda, yang bisa jadi merupakan indikasi sesar. Anomali positif residual pada Gambar 4 dapat diasosiasikan dengan tubuh batuan intrusi atau struktur geologi dangkal yang padat (Salsabila et al., 2025). Sebaliknya, anomali negatif residual dapat mengindikasikan adanya struktur dengan densitas rendah, seperti cekungan sedimen.

Identifikasi Sesar

Zona yang menjadi batas suatu struktur geologi memiliki nilai FHD berupa puncak maksimum atau minimum, sedangkan pada SVD menunjukkan nilai mutlak

maksimum dan minimum yang tajam dan dibatasi oleh nilai nol ataupun mendekati nol (Sumintadireja et al., 2018). Analisis derivatif FHD dan SVD terhadap data anomali residual berhasil mengidentifikasi dua struktur sesar utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, yang diindikasikan sebagai, a) sesar opak: teridentifikasi di bagian selatan daerah penelitian. Sesar ini memiliki arah relatif barat daya-timur laut (SW-NE) dengan panjang terdeteksi + 44,8 km; b) Sesar Mataram: teridentifikasi di bagian utara daerah penelitian. Sesar ini memiliki arah relatif barat-timur (W-E) dengan panjang terdeteksi + 27,2 km.

Hasil ini konsisten dengan data PuSGeN (2017) yang mencatat panjang Sesar Opak 45 km dan berarah barat daya - timur laut. Orientasi arah Sesar Opak hasil analisis SVD dan FHD tersebut juga sesuai dengan pola kelurusan sesar Opak pada Peta Geologi Lembar Yogyakarta dari Badan Geologi (Rahardjo et al., 2012). Sementara orientasi arah Sesar Mataram konsisten dengan hasil penelitian dari Daryono et al. (2023) dan Kurniawan et al. (2023) yang menyatakan bahwa sesar Mataram berarah barat - timur. Namun informasi mengenai panjang sesar Mataram masih minim referensinya mengingat Sesar Mataram termasuk sesar baru yang masih dalam kajian.

Validasi Anomali Residual dengan Peta Vs30

Validasi anomali residual dengan peta Vs30 menunjukkan hubungan yang cukup konsisten antara data gravitasi dan kondisi geologi dangkal. Perbandingan peta anomali gravitasi residual dengan peta Vs30 dari Wijayanto et al. (2022) dan Riswandi et al. (2023) memperlihatkan korelasi yang baik, di mana nilai Vs30 tinggi menunjukkan material keras dan padat, sedangkan nilai Vs30 rendah menunjukkan material lunak dan tidak terkonsolidasi seperti endapan aluvial, lempung, pasir, dan kerikil. Wilayah dengan Vs30 rendah seperti Bantul dan Kota Yogyakarta umumnya berasosiasi dengan anomali gravitasi rendah yang menandakan adanya endapan sedimen lunak tebal pada Cekungan Yogyakarta–Bantul yang berpotensi memperkuat amplifikasi gelombang seismik saat gempa. Sebaliknya, daerah dengan Vs30 tinggi seperti Kulon Progo dan Gunung Kidul menunjukkan anomali gravitasi tinggi yang mengindikasikan keberadaan batuan keras seperti batu gamping dan breksi yang lebih stabil terhadap guncangan gempa. Namun, terdapat anomali di wilayah Sleman, di mana nilai Vs30 sedang–rendah akibat material vulkanik Merapi yang relatif lunak di permukaan, tetapi menunjukkan anomali gravitasi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa peta Vs30 hanya merepresentasikan lapisan hingga kedalaman sekitar 30 meter, sedangkan data gravitasi mampu mendeteksi struktur yang lebih dalam, sehingga anomali tersebut diduga berkaitan dengan keber

SIMPULAN

Distribusi anomali Bouguer lengkap di wilayah penelitian berkisar antara 56,06 mGal hingga 130,38 mGal. Analisis derivatif FHD dan SVD berhasil

mengidentifikasi dua struktur sesar utama, yaitu Sesar Opak di sebelah selatan dengan arah barat daya–timur laut (SW–NE) dan panjang sekitar 44,8 km, serta Sesar Mataram di sebelah utara dengan arah barat–timur (W–E) dan panjang sekitar 27,2 km. Selain itu, terdapat korelasi yang baik antara anomali gravitasi residual dan data Vs30, di mana area dengan anomali gravitasi rendah umumnya memiliki nilai Vs30 rendah yang mencerminkan kondisi tanah lunak dan lebih rentan terhadap guncangan, sedangkan area dengan anomali gravitasi tinggi memiliki nilai Vs30 tinggi yang menunjukkan keberadaan batuan kompak yang relatif lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajayakumar, P., & Zeba, N. F. K. (2024). Influence of thick lithomargic soil cover on Bouguer gravity low: Imprints from passive continental margin of southwestern India. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(2), 100252. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100252>
- Andikasari, L. Y., Syahbana, A. J., Damayanti, C., Atmojo, H. T., Mase, L. Z., & Faris, F. (2024). Scenario seismic hazard analysis of the Mataram fault: An initial study of geophysical approach. *BIO Web of Conferences*, 131, 04004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413104004>
- Aziz, K. N., Hartantyo, E., & Niasari, S. W. (2018). The study of fault lineament pattern of the Lamongan volcanic field using gravity data. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012025>
- Daryono, M. R., Pamumpuni, A., Wardhana, D. D., & Natawidjaja, D. H. (2023). Mataram fault—New active fault crosses east–west in the centre of Yogyakarta city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1227(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1227/1/012003>
- Firdaus, M. W., Setyawan, A., & Yusuf, M. (2016). Identifikasi letak dan jenis sesar berdasarkan metode gayaberat second vertical gradient studi kasus sesar Lembang, Kota Bandung, Jawa Barat. *Youngster Physics Journal*, 5(1).
- Hamilton, W. (1973). *Tectonics of the Indonesian region*. Geological Society of Malaysia.
- Hiden, H. (2019). Analisis dan pemodelan inversi struktur bawah permukaan berdasarkan anomali gravitasi Pulau Lombok. *Indonesian Physical Review*, 2(1). <https://doi.org/10.29303/i>
- Kurniawan, S., Erlandi, M., Nadhip, M., Alansyah, A. Y., Wibisono, D. C., Winarti, W., & Qodri, M. F. (2023). Kompilasi penentuan sesar berdasarkan data struktur geologi permukaan dan implikasinya terhadap keberadaan Sesar Mataram di daerah Bokoharjo, Prambanan, Sleman, Yogyakarta. *ReTII*, 18(1), 402–413.
- Lo, Y. T., Ching, K. E., Yen, H. Y., & Chen, S. C. (2023). Bouguer gravity anomalies and the three-dimensional density structure of a thick mudstone area: A case

- study of southwestern Taiwan. *Tectonophysics*, 848, 229730. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229730>
- Margiono, R., Novitri, A., Pevriadi, A., & Zakariya, H. (2021). Analisis data gravitasi untuk identifikasi sesar lokal penyebab gempabumi di wilayah barat daya Sumba Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22(2), 67–73.
- Mazzaluna, H. P., Rustadi, & Wibowo, R. C. (2024). Geological structure identification using GGMplus satellite gravity data in the area surrounding Mount Tampomas. *Eksplorium*. <https://doi.org/10.55981/eksplorium.2024.6924>
- Nurwidyanto, M. I., Indriana, D. R., & Darwis, Z. T. (2007). Pemodelan zona Sesar Opak di daerah Pleret Bantul Yogyakarta dengan metode gravitasi. <https://www.researchgate.net/publication/266482933>
- PUSGeN. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Balitbang Kementerian PUPR.
- Putri, M., & Annisa, N. (2021). Identifikasi jenis sesar Semangko segmen Sunda di Tenggara Provinsi Lampung dan Barat Laut Provinsi Banten menggunakan metode gravitasi analisa derivatif. *Jurnal Indonesia Sosial Sains*, 2(6), 936–945. <https://doi.org/10.36418/jiss.v2i6.317>
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H. M. D. (2012). *Peta geologi lembar Yogyakarta, Jawa*. Pusat Survei Geologi.
- Riswandi, H., Ikhsan, Maharani, Y. N., Wijayanto, Sunardi, B., Ekarsti, A. K., Rizkianto, Y., & Syaifudin, M. (2023). Pemetaan mikrozonasi bahaya gempabumi sebagai upaya pengurangan risiko bencana di Yogyakarta. *Jurnal Mineral, Energi dan Lingkungan*, 7(1).
- Rosid, M. S., & Siregar, H. (2017). Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal vertical diagonal maxima (HVDM) method: A comparative study. *AIP Conference Proceedings*, 1862. <https://doi.org/10.1063/1.4991275>
- Ryanto, T. A., Suntoko, H., & Setiaji, A. B. W. (2019). Pendugaan awal patahan di Pulau Jawa menggunakan anomali gravitasi dan riwayat kegempaan. *Eksplorium*, 40(1), 43. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2019.40.1.5470>
- Sadjab, B. A., Indrayana, I. P. T., Kurnia, K., Aziz, K. N., Nur, A. R., Janis, H. B., & Sangian, H. F. (2022). Identifikasi sebaran dan jenis sesar berdasarkan analisis data anomali gravitasi Topex Provinsi Maluku Utara Lembar Pulau Halmahera Utara. *Jurnal Fisika Flux*, 19(2), 135. <https://doi.org/10.20527/flux.v19i2.9616>
- Salsabila, A., Realita, A., & Fahmi, M. N. (2025). Identifikasi dan interpretasi struktur bawah permukaan kawasan Gunung Bromo–Semeru dengan metode gravitasi. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 14(2).
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi gaya berat*. Graha Ilmu.

- 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>
- Sutiono, A., Prastistho, B., Prasetyadi, C., & Supartoyo. (2018). Opak fault: A comparative review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012049>
- Wahyudi, E. J., Kynantoro, Y., & Alawiyah, S. (2017). Second vertical derivative using 3-D gravity data for fault structure interpretation. *Journal of Physics: Conference Series*, 877(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/877/1/012039>
- Wijayanto, Mardiatno, D., Daryono, Nehren, U., Marfai, M. A., & Sunardi, B. (2022). Characteristics and spatial distribution of Vs30 based on microtremor inversion and MASW data through landform unit in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(6), 140–150. <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.6.15>
- Verma, R. K. (1985). Gravity field, seismicity and tectonics of the Indian Peninsula and the Himalayas.