

Identifikasi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan pemodelan 3D data gravitasi (studi kasus daerah potensi panas bumi Kepahiang)

Sukmaji Anom Raharjo^{1*}, Aditya Verry Saputra¹, Tony Rahadinata²

¹Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

²Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), Bandung

Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

*e-mail:sukmaji.raharjo@unsoed.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan survei metode gravitasi di daerah potensi panas bumi Kepahiang meliputi area dengan luas $12 \times 16 \text{ km}^2$ dengan total 332 titik data pengukuran. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan dan distribusi densitas batuan bawah permukaan yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal daerah potensi panas bumi. Pemodelan dan identifikasi struktur geologi bawah permukaan menggunakan analisis derivatif yang dapat mengetahui kontak vertikal massa bawah permukaan dan dapat mengetahui jenis struktur patahan yang dihasilkan. Hasil pemodelan 3D memperlihatkan suatu blok dengan nilai densitas rendah yang berarah selatan-barat dan terletak di daerah mata air panas. Densitas batuan rendah tersebut bernilai sekitar $2,4 \text{ g/cm}^3$ dan diinterpretasi sebagai jenis batuan piroklastik yang telah mengalami pelapukan akibat naiknya larutan hidrotermal. Hasil pemodelan juga memperlihatkan suatu blok batuan dengan densitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai respon batuan andesit, basalt yang masih kompak dan memungkinkan sebagai sumber panas bagi daerah panas bumi Kepahiang.

Kata Kunci: panas bumi, gravitasi, analisis derivatif, pemodelan

Abstract – A survey of the gravity method in the Kepahiang geothermal potential area has been carried out, covering an area of $12 \times 16 \text{ km}^2$ with a total of 332 measurement data points. This study aims to identify the subsurface geological structure and the distribution of subsurface rock density associated with the hydrothermal system of the potential geothermal area. Modeling and identifying subsurface geological structures using derivative analysis can determine the type of fault structure produced by subsurface mass's vertical contact. The 3D modeling results show a block with a low-density value located in the hot spring area in a southwest direction. The low rock density is about 2.4 g/cm^3 and is interpreted as pyroclastic rock undergoing weathering due to rising hydrothermal solutions. The modeling results also show a block of rock with high density, interpreted as a response to andesite rock, basalt, which is still compact and possible as a heat source for the Kepahiang geothermal area.

Key words: geothermal, gravity, derivatives analysis, modeling

PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Kepahiang berada di daerah Kabupaten Kepahiang dan Rejang Lebong, Provinsi Bengkulu yang merupakan daerah vulkanik tinggi dan berada di jalur subduksi pada daerah busur magmatik yang terletak di sebelah barat Pulau Sumatra. Secara geologi, batuan pada kompleks Kaba pada umumnya berjenis andesit–basaltik yang berasal dari Bukit Itam, 1960, Biring, Selojuang, Penyeluan dan Kaba. Pembentukan kompleks gunung Kaba dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang searah dengan pola sesar Sumatera dan antitetikanya yang berarah baratdaya timurlaut [1].

Fluida panas pada sistem panas bumi Kepahiang bertipe bikarbonat dan sulfat yang

berada pada zona *immature water*. Indikasi sistem panas bumi di daerah ini dicirikan dengan munculnya manifestasi berupa air panas dengan temperatur tertinggi 94°C , pH netral, sulfatara dan fumarol dengan temperatur hingga 360°C dan alterasi batuan di sekitar Airsempiang, puncak Kaba, dan mata air panas di daerah Sempiang dan Babakan Bogor [1].

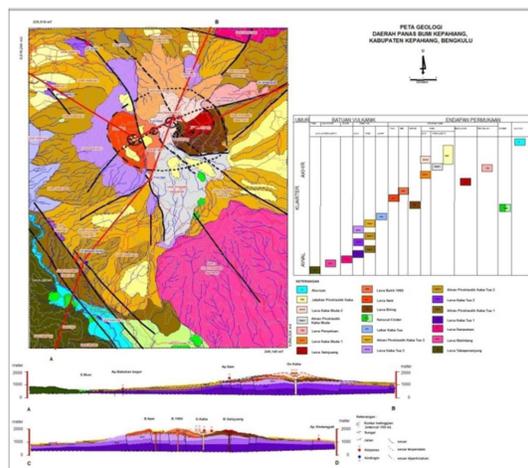
Data geologi daerah Panas Bumi Kepahiang menunjukkan adanya batuan yang memiliki sifat impermeable dengan kandungan mineral lempung jenis montmorilonit dan kaolinit yang cukup tinggi pada daerah alterasi di sekitar manifestasi Air Sempiang. Batuan alterasi yang terbentuk merupakan tipe argilik hingga argilik lanjut. Alterasi tersebut muncul pada aliran piroklastik dan lava produk Gunung

Kaba. Batuan penudung ini berada pada zona struktur sesar Sempiang yang berarah hampir utara selatan. Selain data alterasi, kemungkinan lainnya yang dapat diinterpretasikan sebagai batuan penudung adalah lava muda produk Kaba yang masif dan belum terkekarkan secara kuat [1].

Salah satu faktor penting dalam suatu sistem panas bumi adalah faktor sumber panas atau *heat source*. Sumber panas ini biasanya merupakan magma dibawah permukaan yang berasosiasi dengan batuan yang mempunyai densitas yang lebih tinggi, dan kontras dengan batuan di sekelilingnya. Kontras densitas ini dapat terlihat dari data gravitasi yang ditunjukkan adanya anomali pada peta gravitasi [2]

Untuk mengetahui zona permeabel dalam suatu sistem panas bumi diperlukan pemahaman dan informasi struktur geologi bawah permukaan yang mengontrol sistem panas bumi tersebut. Penyelidikan geologi diperlukan untuk mengetahui keberadaan struktur regional, sedangkan analisa dan pemodelan data gravitasi diperlukan untuk menemukan struktur maupun kontras litologi dengan perkiraan kedalamannya dibawah permukaan bumi [3]

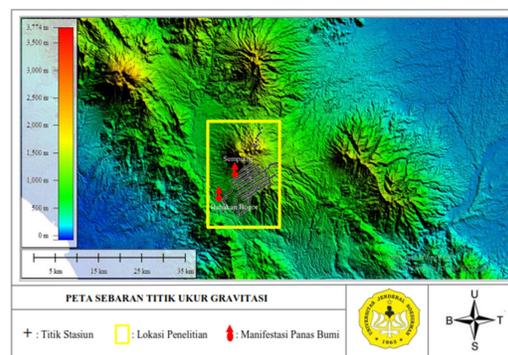
Dalam artikel ini, struktur geologi dan sumber panas dari sistem panas bumi Kepahiang diidentifikasi menggunakan analisa *derivative* medan gaya berat dengan estimasi densitas rata-rata yang diperoleh dari pengukuran densitas sampel batuan di lokasi penelitian dan pemodelan yang digunakan berupa pemodelan 3 dimensi.



Gambar 1. Peta struktur geologi daerah penelitian

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini data gravitasi yang digunakan sebanyak 332 titik dengan spasi antar titik pengukuran dalam lintasan adalah 250 meter. Data pengukuran gravitasi meliputi nilai bacaan alat, waktu pengukuran dan data *inner* atau *terrain* sekitar titik pengukuran. Nilai bacaan alat akan dikonversi ke dalam mGal yang kemudian diikatkan ke nilai gaya berat nasional (IGSN 71) DG0 Bandung. Stasiun basis (BS) dibuat di *base camp* sebagai titik *looping* pengukuran. Hasil pengukuran BS di daerah panas bumi Kepahiang terhadap DG0 menghasilkan nilai gravitasi 97786,976 mGal.



Gambar 2. Peta titik ukur gravitasi daerah panas bumi Kepahiang

Estimasi densitas yang dihasilkan adalah densitas rata-rata permukaan daerah penelitian yang dapat diperoleh dengan mengukur densitas sampel batuan dari lokasi penelitian di laboratorium dan dibandingkan dengan menggunakan analisis kualitatif dan kuantitatif seperti metode metode Nettleton dan Parasnis.

Tabel 1. Densitas batuan daerah panas bumi (Laboratorium PSDG)

No	Kode Sampel Batuan	Jenis Batuan	Densitas (g/cm ³)
1	KP.17	Lava Tua	2,08
2	KP.91	Dasit	2,69
3	KP.114	Andesit	2,39
4	RK.89	Basalt	2,47
Densitas rata-rata			2,41

Penentuan densitas secara kualitatif menggunakan metode Nettleton dilakukan dengan membuat profil topografi dan profil anomali Bouguer untuk densitas yang berbeda-beda dari tiap-tiap lintasan yang dipilih. Harga densitas yang dipilih sebagai densitas batuan permukaan (atau densitas topografi) adalah

densitas yang profil anomali Bouguernya tidak berkorelasi terhadap profil topografi.

Densitas rata-rata batuan daerah penelitian secara kuantitatif diperoleh menggunakan metode paransis. Metode paransis menggunakan persamaan regresi linear $y = mx + c$ yang diturunkan dari persamaan anomali gravitasi (persamaan 1), di mana sumbu y diperoleh dari nilai FAA ($g_{obs} - g_n + 0,3086h$) dan sumbu x didapat dari ketinggian dikalikan dengan 0,04192. Kemiringan garis trend dari grafik tersebut merupakan densitas rata-rata batuan yang ada di daerah penelitian [4].

$$\Delta g = g_{obs} - g_n + 0,3085h - 0,04192\rho_0h \quad (1)$$

Selanjutnya, parameter densitas ini digunakan untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) dengan menggunakan persamaan (2). Peta kontur *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) hasil dari pemetaan nilai CBA dilakukan menggunakan *Software Geosoft Oasis Montaj 8.4*.

$$CBA = g_{obs} - g(\phi) + g_{FAC} - g_B + TC \quad (2)$$

Pemisahan anomali residual dan regional dilakukan untuk melihat anomali bawah permukaan yang terdapat di daerah penelitian yang lebih jelas. Metode pemisahan anomali regional dari CBA dilakukan dengan menggunakan filter *moving average*, yang bekerja dengan meloloskan data berfrekuensi rendah dan menghilangkan data berfrekuensi tinggi sehingga didapatkan anomali regional. Pada penelitian ini digunakan low pass filter 5x5 dengan lebar *window* yang diestimasi menggunakan analisis spektrum. Analisis spektrum dilakukan dengan melakukan *slicing* sebanyak 7 lintasan pada peta kontur CBA yang meliputi seluruh daerah pengukuran.

Analisis derivative pada data medan gravitasi yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan struktur geologi meliputi *First Horizontal Derivative* (FHD) and *Second Vertical Derivative* (SVD) yang bersifat sebagai low pass filter yang dapat memisahkan frekuensi rendah dari frekuensi tinggi [5].

Teknik FHD diterapkan untuk interpretasi kualitatif data anomali gravitasi residual, dimana kasus gradien horisontal paling tinggi merefleksikan perubahan densitas batuan dalam arah lateral [6]. Perubahan anomali secara horizontal ditandai dengan nilai maksimum FHD pada grafik FHD [4], dengan nilai FHD diperoleh dari persamaan (3).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2} + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2 \quad (3)$$

Ketika diterapkan untuk interpretasi dua dimensi (2D), kurva gradien horisontal cenderung menempati ridge yang sempit. Oleh sebab itu gradien horisontal yang bernilai paling besar akan terlokalisir langsung di tepi benda (batas litologi). Hal ini dapat dimanfaatkan untuk melokalisir batas-batas kontak litologi benda anomali terhadap lingkungannya dengan cara melihat perubahan densitas benda dalam arah lateral [6].

Karena medan gravitasi memenuhi persamaan laplace, SVD dapat diperoleh dari turunan horizontal, yang dapat dituliskan pada persamaan (4)

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right) \quad (4)$$

dengan kriteria penentuan jenis patahan seperti pada persamaan (5) dan (6) [7].

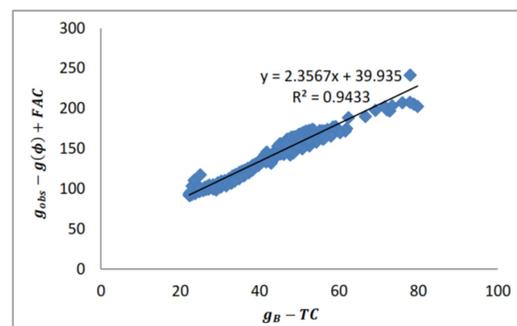
$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)_{maks} > \left|\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)\right|_{min} \text{ Patahan Turun} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)_{maks} < \left|\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}\right)\right|_{min} \text{ Patahan Naik} \quad (6)$$

Penggunaan SVD untuk analisis sebaiknya dibatasi untuk kondisi struktur geologi yang relative sederhana dan digunakan untuk interpretasi secara kualitatif saja [8].

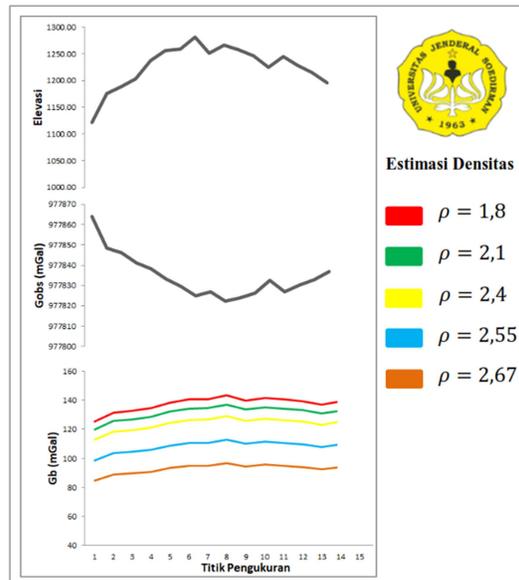
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan densitas menggunakan metode Paransis adalah 2,3567 g/cm³ dan dibulatkan menjadi 2,4 g/cm³.



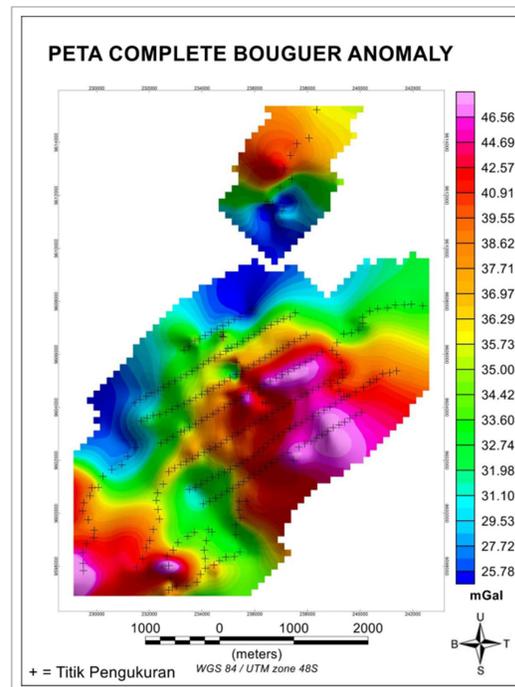
Gambar 3. Estimasi densitas batuan dengan metode Paransis

Metode secara kualitatif yang juga digunakan yaitu Nettleton (**Gambar 4**). Penentuan densitas batuan dilakukan dengan korelasi antara grafik topografi, gravitasi observasi dan densitas. Anomali Bouguer titik ukur pada suatu lintasan diplot dengan berbagai macam densitas. Nilai densitas diperoleh apabila nilai anomali gravitasi yang dihasilkan tidak mempunyai korelasi dengan topografi. Pada penelitian ini diperoleh nilai densitas di daerah penelitian yaitu $2,4 \text{ g/cm}^3$.



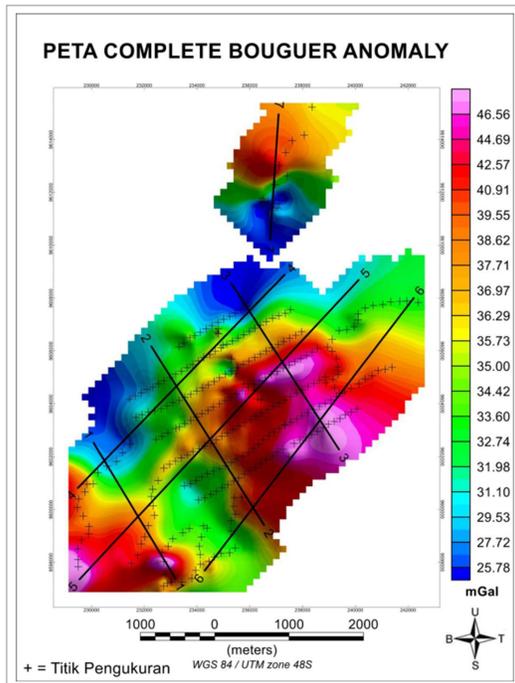
Gambar 4. Estimasi densitas batuan dengan metode Nettleton

Nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) diperoleh dari persamaan (2) dengan nilai densitas batuan yang digunakan yaitu $2,4 \text{ g/cm}^3$, dan sebaran nilainya terlihat pada **Gambar 5**, dan slicing lintasan pada peta CBA di **Gambar 6**.



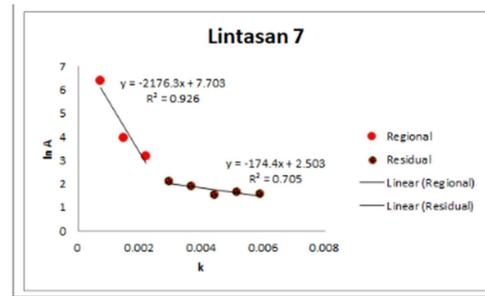
Gambar 5. Peta Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Dari Peta CBA, nilai anomali pada daerah penelitian berkisar $25,78 \text{ mGal}$ sampai $46,56 \text{ mGal}$, dengan anomali CBA tinggi, berada di bagian timur dan barat daya dengan nilai $> 39,55 \text{ mGal}$. Anomali ini ditafsirkan sebagai respon dari batuan dasit dan andesit. Anomali sedang, berada di tengah bagian barat, selatan, timur dan tenggara dengan nilai $31,98\text{-}39,55 \text{ mGal}$ yang ditafsirkan sebagai respon batuan basalt yang didominasi oleh batuan piroklastik yang telah mengalami pelapukan lemah-sedang. Anomali rendah, tersebar di bagian barat, barat laut dan utara dengan nilai $25,78\text{-}31,98 \text{ mGal}$ yang ditafsirkan sebagai respon batuan yang telah mengalami pelapukan dari tingkat lemah sampai kuat akibat naiknya larutan hidrotermal.



Gambar 6. Irisan tujuh lintasan pada analisis spektrum

Analisis spektrum dilakukan dengan *slicing* tujuh lintasan (Gambar 6) pada peta kontur Complete Bouguer Anomaly (CBA) yang mencakup seluruh daerah penelitian, proses ini bertujuan untuk memperoleh data anomali bouguer dari masing masing *slicing* yang selanjutnya ditransformasi dalam bilangan gelombang dengan melakukan transformasi fourier, dan hasilnya terlihat pada Gambar 7.

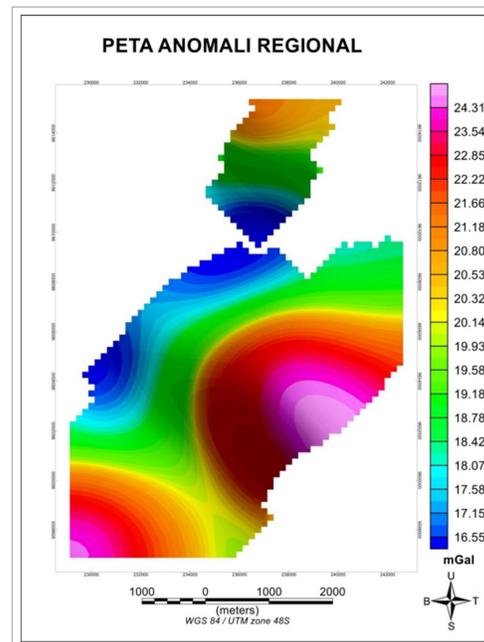
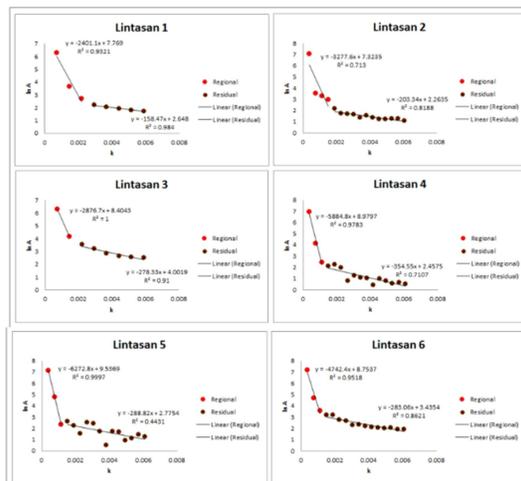


Gambar 7. Grafik Analisis Spektrum Tujuh Lintasan

Dari tujuh lintasan tersebut, nilai rata-rata sumber anomali regional berada pada kedalaman 3.947,4 m dan nilai rata-rata kedalaman anomali residual 248,71 m, yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Spektrum

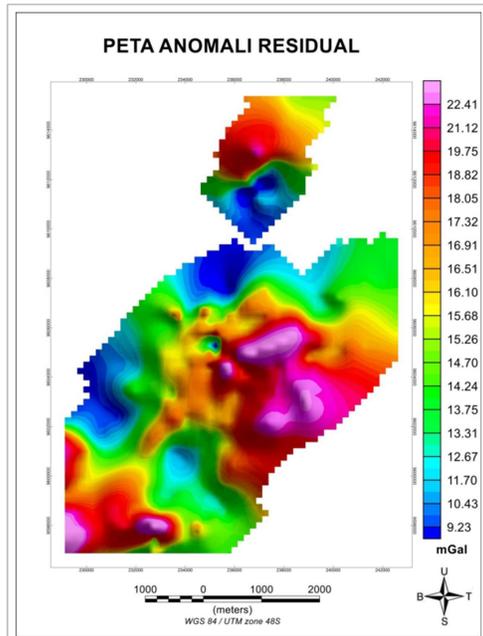
Lintasan	Kedalaman Regional (m)	Kedalaman residual (m)	N
1	2401,1	158,4	11,01
2	3277,6	203,3	15,27
3	2876,7	278,3	14,83
4	5844,8	354,5	21,31
5	6272,8	288,8	22,24
6	4742,4	283,1	21,07
7	2176,3	174,4	23,92
Rata-rata	3947,4	248,7	18,52
Window			19



Gambar 9. Anomali regional daerah penelitian

Daerah dengan anomali tinggi pada peta anomali regional (Gambar 9) berada di bagian timur, tenggara, selatan dan barat daya dengan nilai anomali gravitasi 20,14 -24,31 mGal yang

diinterpretasi sebagai respon batuan dasit yang masih kompak dan masif.

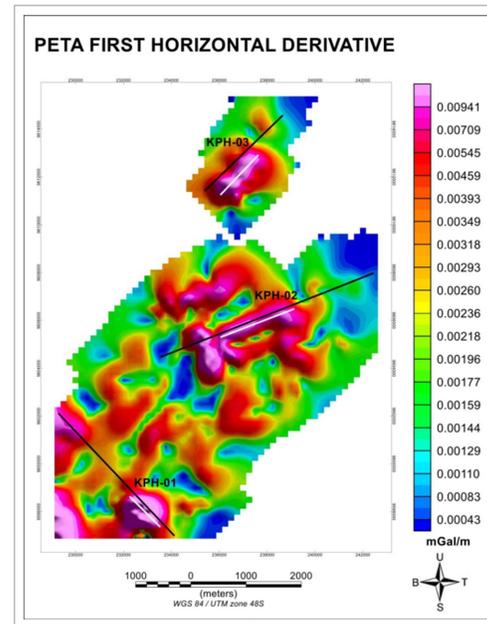


Gambar 10. Anomali residual daerah penelitian

Anomali residual daerah penelitian (Gambar 10) merupakan respon dari objek bawah permukaan yang menunjukkan struktur pada kedalaman yang dangkal. Terdapat beberapa indikasi adanya struktur geologi berupa patahan yang diinterpretasi dari anomali residual, seperti liniasi di bagian utara, tengah dan barat daya. Pada bagian utara hingga barat terlihat pola anomali dengan liniasi dan kerapatan kontur antara anomali rendah dan sedang yang cukup tajam.

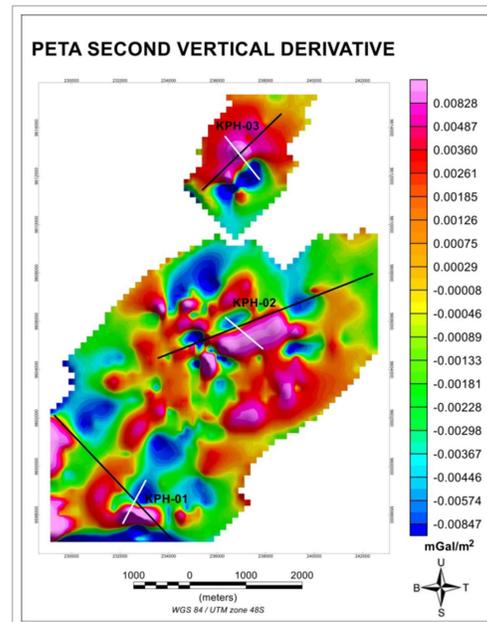
Liniasi ini menggambarkan seperti suatu struktur kaldera yang melingkupi mata air panas Sempiang daerah Gunung Kaba. Liniasi ini diperkirakan merupakan segmen struktur patahan aktif Sumatera yang memanjang dari selatan hingga utara Pulau Sumatera dan merupakan kontrol struktur air panas Babakan Bogor.

Analisis gradien horizontal dan vertikal biasanya dilakukan sebagai bagian dari interpretasi kualitatif dan semi kuantitatif yang diharapkan dapat memperjelas batas sumber anomali dari peta anomali residual [8]. First Horizontal Derivative (FHD) dilakukan terhadap peta anomali residual untuk memperjelas keberadaan struktur patahan dan hasilnya terlihat pada Gambar 11. Nilai FHD tinggi 0,00545-0,00941 mGal/m pada daerah penelitian menunjukkan adanya struktur geologi berupa patahan.



Gambar 11. Peta Kontur Anomali FHD

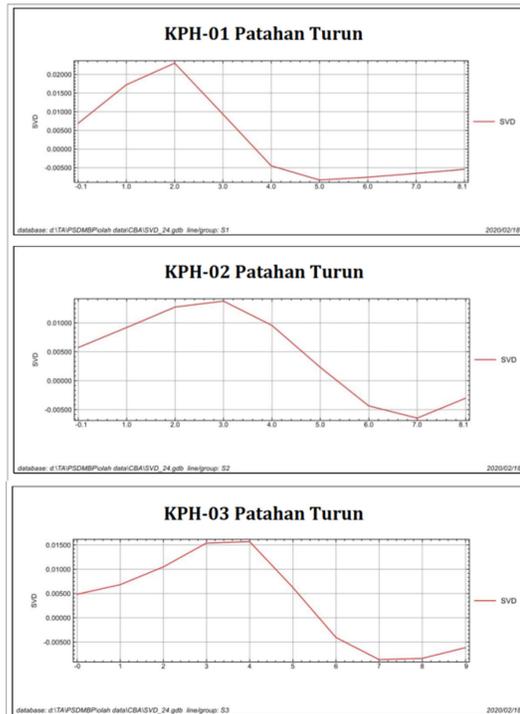
Data geologi berupa struktur patahan yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam pada peta kontur anomali FHD (Gambar 11) ternyata bersesuaian dengan nilai FHD yang tinggi. Selanjutnya dilakukan analisa Second Vertical Derivative (SVD) untuk mengidentifikasi jenis patahannya dengan melakukan irisan (slicing) tegak lurus terhadap arah patahan pada peta kontur anomali SVD (Gambar 12).



Gambar 12. Peta Kontur Anomali SVD

Grafik Kurva SVD seperti ditunjukkan pada Gambar 12 menunjukkan nilai mutlak

maksimum dan nilai mutlak minimum, dan dengan menggunakan persamaan (5) dan (6) bisa ditentukan jenis patahannya.



Gambar 13. Grafik nilai SVD pada irisan tegak lurus patahan

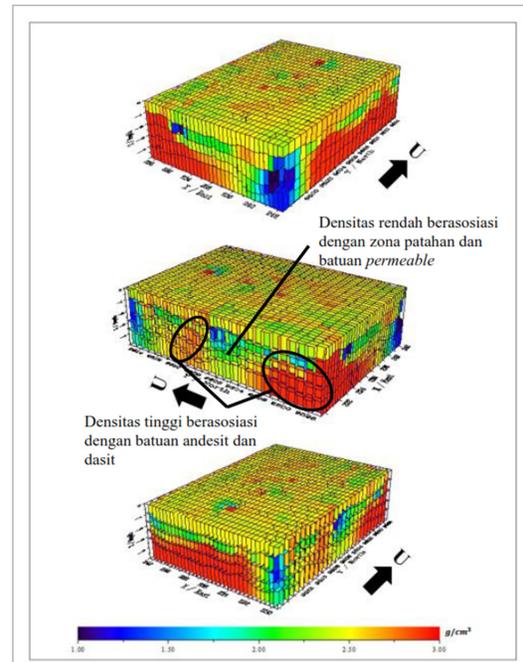
Jenis patahan dari hasil irisan ketiga lintasan pada **Gambar 13** memiliki jenis patahan turun yang ditunjukkan dari nilai mutlak maksimum lebih besar dari nilai mutlak minimum dan sesuai dengan jenis patahan dari data geologi.

Model geologi 3D bawah permukaan pada penelitian ini dibuat menggunakan Perangkat lunak Grablok, dengan model awal berupa blok dengan densitas awal $2,67 \text{ g/cm}^3$ dimana sumbu X dibagi menjadi 26 blok, sumbu Y menjadi 33 blok dan sumbu Z menjadi 5 blok, sehingga menghasilkan 4290 blok minor. Data dari nilai Complete Bouguer Anomaly (CBA) diinversikan terhadap model awal, dengan teknik optimasi *singular value decomposition*.

Hasil pemodelan gravitasi 3D daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 14**, dengan model 3D disajikan dalam bentuk penampang dan distribusi densitas dalam arah X, Y dan Z. Batuan dengan densitas tinggi terdapat di sekitar gunung Kaba terlihat hingga ke permukaan dan diperkirakan berasosiasi dengan batuan dasit dan andesit.

Batuan dengan densitas rendah yang berada di sekitar mata air panas Sempiang dan Babakan

Bogor diperkirakan berasosiasi dengan zona patahan yang menyebabkan densitas batuan menjadi lebih rendah dan memungkinkan batuan menjadi permeable. Zona tersebut sangat memungkinkan menjadi zona reservoir panas bumi.



Gambar 14. Model 3D daerah penelitian

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa dari data gravitasi, struktur geologi berupa patahan turun pada daerah potensi panas bumi Kepahiang dapat diidentifikasi. Berdasarkan hasil pemodelan 3D, terindikasi batuan dengan densitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai respon batuan beku yang masih kompak dan memungkinkan sebagai sumber panas bagi daerah panas bumi Kepahiang, dan batuan dengan densitas rendah yang diperkirakan sebagai zona patahan dan batuan permeabel.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Kusnadi, “Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Kepahiang,” 2010.
 [2] E. B. Purwasatriya and A. Widagdo, “Tinjauan Potensi Panas Bumi Gunung Slamet Berdasarkan Data Gravitasi dan Geologi,” *Proceeding Semin. Nas. Inov.*

- dan Rekayasa Teknol. Ke-3*, no. October, 2014.
- [3] Y. Daud *et al.*, “First horizontal derivative and Euler Deconvolution in application for reconstructing structural signature over the Blawan-Ijen Geothermal area,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 254, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/254/1/012008.
- [4] D. S. Fitriani, S. N. A. Putri, and I. F. Putrajy, “Metode Gravitasi Untuk Identifikasi Sesar Weluki Dengan Analisis First Horizontal Derivative Dan Second Vertical Derivative,” vol. IX, pp. 53–60, 2020, doi: 10.21009/03.snf2020.01.fa.10.
- [5] H. A. Azkia and Y. Daud, “Integrated geophysical and geological methods to identify structure existence as a permeable zone in a geothermal field,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2320, no. March, 2021, doi: 10.1063/5.0038802.
- [6] U. N. P. Sehad and S. A. Raharjo, “Pemanfaatan Data Anomali Gravitasi Citra Satelit Untuk Interpretasi Kualitatif Batas Cekungan Air Tanah Purwokerto,” *Prosiding*, 2022, [Online]. Available: <http://jurnal.lppm.unsoed.ac.id/ojs/index.php/Prosiding/article/view/1841%0Ahttp://jurnal.lppm.unsoed.ac.id/ojs/index.php/Prosiding/article/download/1841/1600>.
- [7] S. Prabu *et al.*, “IDENTIFIKASI PATAHAN MIKRO PENYEBAB GEMPA BUMI,” vol. V, pp. 79–84, 2016.
- [8] P. Sumintadireja, D. Dahrin, and H. Grandis, “A note on the use of the second vertical derivative (SVD) of gravity data with reference to Indonesian cases,” *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 127–139, 2018, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.1.9.