

ARTIKEL RISET

Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Gunungapi Lokon Dan Soputan Menggunakan Pemodelan Inversi 3D Berdasarkan Data Gravitasi GGMplus

Dwi Eta Darmawati^{1*}, Ari Setiawan

Received: Oct 19, 2020 | Accepted: July 22, 2021 | Published: Sept 17, 2021 | DOI: 10.22146/jfi.v25i1.60649

Ringkasan

Gunungapi Lokon dan Soputan merupakan gunungapi aktif di Minahasa yang memiliki resiko bencana tinggi, sehingga perlu upaya mitigasi. Salah satu upaya yang dapat dilakukan yaitu penelitian dengan metode gravitasi. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan anomali gravitasi regional dan lokal, menggambarkan struktur bawah permukaan dengan analisis horizontal derivatif dan memodelkan secara 3D struktur bawah permukaan di Gunungapi Lokon dan Soputan.

Penelitian ini menggunakan data sekunder dari GGMplus berupa *gravity disturbance*. *Gravity disturbance* perlu diolah hingga mendapatkan anomali bouguer lengkap, kemudian dikontinuasi ke atas untuk memisahkan anomali lokal dan regional. Anomali lokal dan regional kemudian dianalisis dengan analisis horizontal derivatif dan dimodelkan secara 3D dengan program *Grablox* dan *Bloxer*.

Hasil analisis pola sebaran anomali regional bernilai tinggi berarah baratdaya-timurlaut diduga merupakan *partial melting* dan magma Gunungapi Soputan, Lokon-Empung dan Mahawu. Berdasarkan analisis horizontal derivatif menunjukkan lebar anomali tinggi di Gunungapi Soputan 9,5 km, Lokon-Empung 7,7 km, dan Mahawu 19,2 km × 6 km. Berdasarkan pemodelan 3D terlihat densitas tinggi 3,31 gram/cm³ - 3,45 gram/cm³ di mantel atas yang merupakan *partial melting*. Hasil analisis pola sebaran anomali lokal bernilai tinggi di lokasi Gunungapi Soputan, Lokon-Empung dan Mahawu dan diduga merupakan magma Gunungapi tersebut. Berdasarkan analisis horizontal derivatif menunjukkan dimensi pusat anomali Gunungapi Soputan 1,6 km × 2,4 km, dan Gunungapi Lokon 1,3 km × 1,5 km. Berdasarkan pemodelan 3D di area Gunungapi Soputan dan Lokon-Empung terlihat densitas tinggi 2,7 gram/cm³ - 2,99 gram/cm³ yang merupakan magma basaltik Gunungapi tersebut. Berdasarkan hasil analisis model anomali gravitasi, telah dibuat model tentatif bawah permukaan daerah penelitian.

Kata Kunci : GGMplus, anomali gravitasi, analisa horizontal derivatif, pemodelan inversi 3D, Gunungapi Soputan, Gunungapi Lokon.

*Correspondence: Dwieta93@mail.ugm.ac.id

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan,
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

† Equal contributor

Abstract

Lokon and Soputan volcanoes are active volcanoes in Minahasa which have a high risk of disaster, so they need mitigation efforts. One of the mitigation efforts that can be done is research with the gravity method. This study aims to map regional and local gravity anomalies, describe subsurface structures with horizontal derivative analysis and 3D model subsurface structures at Lokon and Soputan Volcanoes.

This study uses secondary data from GGMplus in the form of a gravity disturbance. Gravity disturbance needs to be processed to obtain a complete bouguer anomaly, then it is continued upward to separate local and regional anomalies. Then, local and regional anomalies were analyzed using horizontal derivative analysis and modeled in 3D using the Grablox and Bloxer programs.

The results of the analysis of high-value regional anomaly distribution patterns trending southwest-northeast is thought to be partial melting and magma of Mount Soputan, Lokon-Empung and Mahawu. Based on the horizontal derivative analysis, the height anomaly at Mount Soputan is 9.5 km, Lokon-Empung 7.7 km, and Mahawu 19.2 km \times 6 km wide. Based on 3D modeling, it can be seen that a high density of 3.31 grams/cm³ - 3.45 grams/cm³ in the upper mantle is part of the partial melting. The results of the analysis of local anomaly distribution patterns are of high value at the Mount Soputan, Lokon-Empung and Mahawu locations and are thought to be the magma of the volcano. Based on the horizontal derivative analysis, it shows that the anomaly center dimensions of the Soputan Volcano are 1.6 km \times 2.4 km, and Lokon Volcano 1.3 km \times 1.5 km. Based on 3D modeling in the Soputan and Lokon-Empung volcanic areas, it can be seen that a high density of 2.7 grams/cm³ - 2.99 grams/cm³ is the basaltic magma of the volcano. Based on the results of the analysis of the gravity anomaly model, a model of the subsurface geological map of the study area has been made.

Keywords: GGMplus; gravity anomaly; horizontal derivative analysis; 3D inversion modeling; Soputan Volcano; Lokon Volcano.

1 PENDAHULUAN

Gunungapi Lokon dan Soputan merupakan gunungapi aktif di wilayah Minahasa, Sulawesi Utara yang merupakan bagian dari sistem Busur Kepulauan Sangihe dan terkait dengan Zona Tumbukan Laut Molluca. Gunungapi Lokon merupakan gunungapi strato yang berada di komplek pegunungan Lokon-Empung dengan ketinggian 1.579,5 mdpl dan memiliki kawah aktif Tompaluan yang berada di antara keduanya. Sedangkan Gunungapi Soputan merupakan gunungapi strato dengan ketinggian 1784 mdpl. Kedua gunungapi ini termasuk ke dalam gunungapi dengan tingkat risiko bahaya tinggi. Oleh karena itu berbagai penyelidikan dan penelitian diperlukan dalam upaya mitigasi, salah satunya adalah mengetahui kondisi struktur bawah permukaan gunungapi terutama kantong magma dan zona- zona lemahnya.

Banyak penelitian yang telah dilakukan di Gunungapi Lokon diantaranya penyelidikan geomagnet oleh Yasa dkk. (2007) yang mengindikasikan kemagnetan tinggi di daerah kawah Tompaluan (<https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/520-g-lokon>). Selanjutnya, penelitian mengenai seismisitas Gunungapi Lokon dilakukan oleh Haerani dkk.

(2010) [1] dan Anthe dkk. (2015) [2] yang sama sama mengindikasikan adanya aktivitas di sekitar Kawah Tompaluan. Sedangkan penelitian di Gunungapi Soputan yang telah dilakukan diantaranya dalam bidang geomagnet oleh Palgunadi S. (1992) yang menyimpulkan bahwa puncak Gunungapi Soputan mempunyai harga anomali lebih rendah dibandingkan Gunungapi sekitarnya. Selain itu, penyelidikan gaya berat oleh Yohana dkk. (1992) menyimpulkan bahwa peta anomali Bouguer memperlihatkan densitas batuan semakin besar ke arah puncak Soputan serta adanya struktur geologi berupa sesar yang berarah timurlaut-tenggara dan barat-timur (<https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/535-g-soputan>). Penelitian di bidang seismik oleh Dawid dkk. (2015) menyimpulkan zona aseismik berada pada kedalaman \geq 8000 m di bawah kubah lava yang di asosiasikan sebagai daerah kantong magma [3]. Hal ini juga diperkuat oleh penelitian Bunaga dan Nugraha (2017). Penelitian yang telah dilakukan telah banyak memberikan informasi mengenai kondisi Gunungapi Lokon dan Soputan, namun informasi tambahan mengenai struktur bawah permukaan dengan data yang lebih baru masih diperlukan untuk menunjang informasi yang ada [4].

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mendelineasi dan memodelkan struktur bawah permukaan adalah metode gravitasi. Metode gravitasi adalah metode geofisika yang sensitif terhadap perubahan percepatan gravitasi bumi yang diakibatkan oleh perbedaan densitas batuan dari satu sumber anomali terhadap densitas di sekitarnya [5]. Perbedaan densitas tersebut dapat digunakan untuk menginterpretasikan geometri struktur bawah permukaan [6]. Saat ini, pengukuran data gravitasi tidak hanya dilakukan di darat, laut dan udara, namun pengukuran juga dilakukan dengan satelit yang dilengkapi dengan posisi titik data di permukaan bumi. Salah satu data sekunder yang tersedia adalah data gravitasi GGMplus. GGMplus merupakan data model gravitasi global (*Global Gravity Model*) yang memiliki resolusi paling tinggi dengan spasi grid antar titik data $7,2 \text{ arc} - \text{secon}$ [7]. Oleh karena itu, dilakukan pemodelan struktur bawah permukaan Gunungapi Lokon dan Soputan menggunakan pemodelan inversi 3D berdasarkan data gravitasi GGMplus.

2 METODE PENELITIAN

Area penelitian berada di Kabupaten Minahasa dan dibagi menjadi 3 daerah penelitian yang ditampilkan dalam peta geologi pada Gambar 2. Daerah pertama, seluas $(46,62 \times 46,62) \text{ km}^2$ untuk analisis horizontal derivatif dan pemodelan regional. Daerah kedua, seluas $(14,43 \times 14,8) \text{ km}^2$ untuk pemodelan lokal Gunungapi Soputan dan daerah ketiga, seluas $(5,55 \times 7,4) \text{ km}^2$ untuk pemodelan lokal Gunungapi Lokon. Data pada penelitian ini merupakan data sekunder GGMplus berupa *gravity disturbance* yang merupakan anomali *free air* dari *Curtin University Australia* yang diakses melalui <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/data/>. Mengingat data yang diperoleh merupakan anomali *free air* yang telah terkoreksi udara bebas, maka langkah selanjutnya adalah dilakukan koreksi Bouguer sederhana serta koreksi terrain guna memperoleh Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Nilai ABL yang diperoleh masih merupakan anomali total yang mengandung anomali lokal dan regional, sehingga dilakukan pemisahan anomali lokal dan regional ini melalui metode kontinuasi ke atas (*low pass filter*). Dengan mengurangi anomali total dengan anomali regional maka diperoleh anomali lokal. Anomali regional dan anomali lokal ini kemudian dianalisis horisontal derivatif dan digunakan dalam melakukan pemodelan inversi tiga dimensi (3D) guna mengidentifikasi struktur bawah permukaan. Analisis horisontal derivatif yaitu *first horizontal derivative* dan *second horizontal derivative* (FHD dan SHD)

digunakan untuk mengetahui keterdapatan batas sumber anomali di daerah penelitian. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan FHD dan SHD secara diskrit adalah sebagai berikut:

$$FHD = \frac{\partial g_z}{\partial r} = \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial r} \approx \frac{\Delta g}{\Delta r} \quad (1)$$

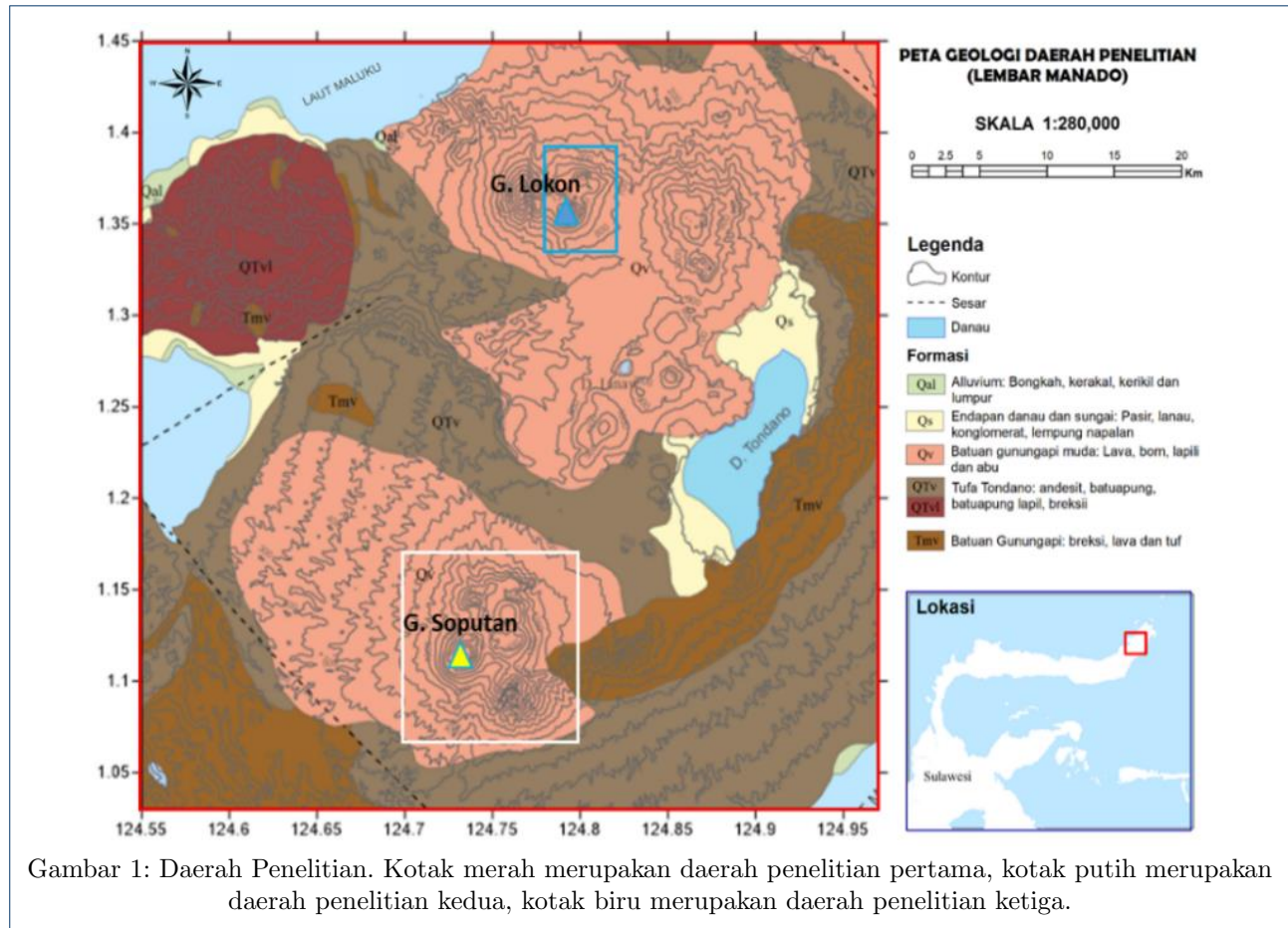
$$SHD = \frac{\partial^2 g_z}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial r^2} \approx \frac{\Delta FHD}{\Delta r} \quad (2)$$

Hasil perhitungan FHD dan SHD kemudian diplot dalam bentuk grafik dan diinterpretasi guna mendeteksi keberadaan struktur bawah permukaan. Pemodelan dilakukan untuk interpretasi secara kuantitatif struktur bawah permukaan. Pemodelan ke belakang ini dilakukan dengan terlebih dahulu membangun model awal tiga dimensi (3D) menggunakan menggunakan program *bloxer*. Model awal dalam penelitian ini dibuat berdasarkan *constrain* (syarat batas) berdasarkan informasi geologi. Pemodelan 3D struktur bawah permukaan berdasarkan anomali regional dan lokal pada penelitian ini dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak *Grablox 1.6b* dan *Bloxer 1.5a*.

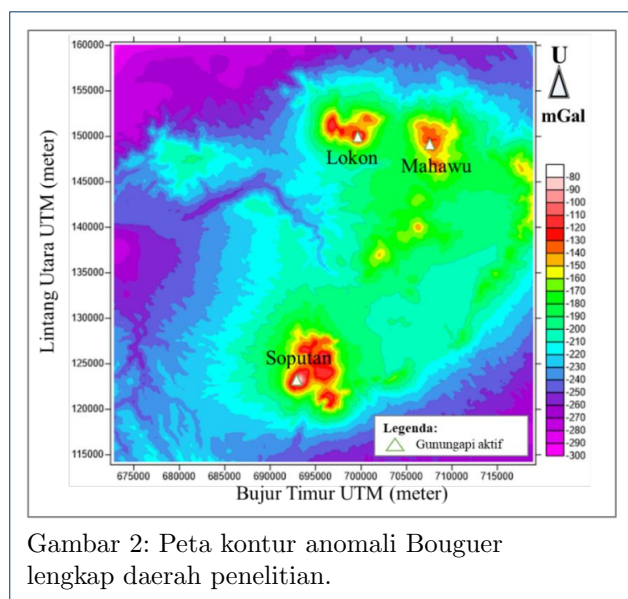
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data dilakukan dengan koreksi bouguer sederhana kemudian dilakukan koreksi terrain untuk memperoleh anomali bouguer lengkap. Anomali kemudian digunakan sebagai acuan dalam interpretasi. Gambar 3 menunjukkan anomali Bouguer lengkap yang berada pada rentang -300 mGal hingga -40 mGal . Selanjutnya dengan melakukan kontinuasi ke atas dan diperoleh Anomali regional dengan rentang -270 mGal sampai -185 mGal . Kemudian dengan mengurangi nilai Anomali Bouguer Lengkap dengan nilai anomali regional diperoleh nilai anomali lokal dengan rentang -35 mGal hingga 105 mGal . Peta kontur anomali regional dan lokal yang telah diperoleh dapat dikorelasikan dengan batas litologi dari peta geologi guna melakukan interpretasi awal secara kualitatif.

Identifikasi struktur dilakukan dengan memetakan koordinat titik-titik batas kontak densitas pada masing-masing lintasan dalam peta overlay anomali dengan garis batas litologi dan struktur sesar dari peta geologi ditunjukkan pada Gambar 3 dan 3. Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat korelasi hasil deleniasi batas kontak densitas hasil FHD dan SHD anomali regional dengan batas litologi dan struktur geologi. Lintasan R1-R1', dan R2-R2' diambil melewati anomali tertinggi di daerah penelitian yang diinterpretasikan



Gambar 1: Daerah Penelitian. Kotak merah merupakan daerah penelitian pertama, kotak putih merupakan daerah penelitian kedua, kotak biru merupakan daerah penelitian ketiga.

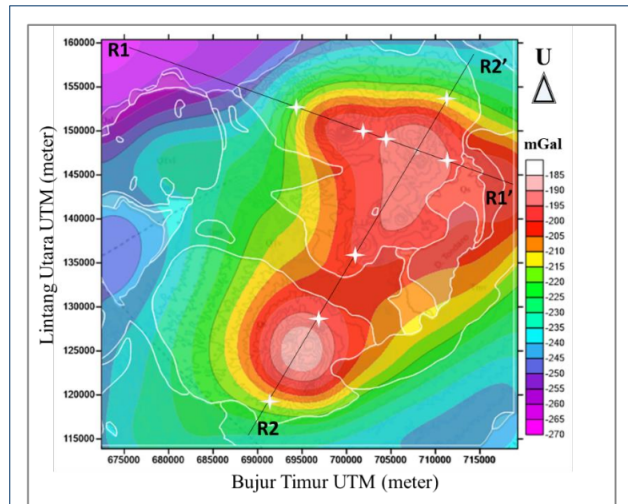


Gambar 2: Peta kontur anomali Bouguer lengkap daerah penelitian.

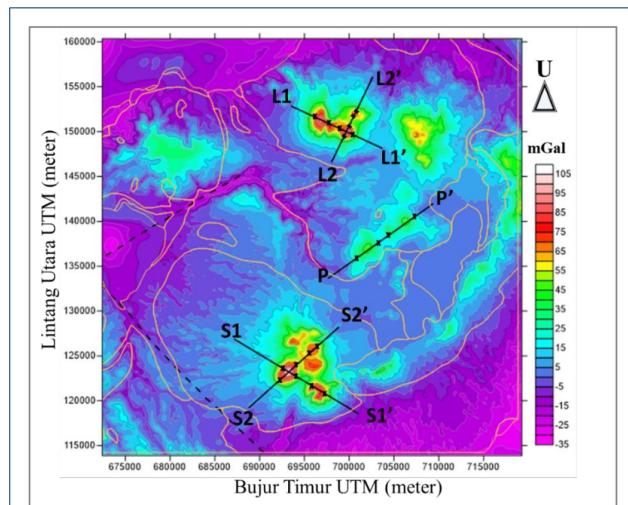
sebagai *partial melting* dan magma Gunungapi aktif di daerah penelitian, yang berarah baratdaya-timurlaut. Berdasarkan hasil analisis ini diperoleh 3 batas kontak

densitas yang mengindikasikan partial melting sebagai sumber magmatisme dari Gunungapi Lokon-Empung, Mahawu dan Soputan masing-masing dengan lebar 7,7 km, 19,2 km × 6 km, dan 9,5 km.

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat korelasi hasil deleniasi batas kontak densitas hasil FHD dan SHD anomali lokal dengan batas litologi. Pada korelasi ini batas litologi di permukaan tidak terlalu nampak, namun batas anomali yang lebih dalam nampak. Lintasan L1-L1', L2-L2' dan S1-S1', serta S2-S2' diambil melewati anomali tinggi di daerah penelitian yang diinterpretasikan sebagai magma Gunungapi Lokon-Empung dan Soputan. Dari hasil sayatan terdapat kekonsistenan lokasi kontak densitas dan bentuk kontak densitas yang mengindikasikan adanya anomali tinggi yang merupakan magma Gunungapi Lokon-Empung (1,3 km × 1,5 km) dan magma Gunungapi Soputan (1,6 km × 2,4 km). Adapun lintasan P-P' yang melewati anomali sedang ditengah daerah penelitian, ditemukan pusat anomali berada pada jarak 5,4 km dan 10,4 km yang diduga sebagai batuan intrusi di Gunungapi Lengkoan dan Gunungapi Tampusu dan merupakan sumber panas dari sistem panas bumi Lahendong.



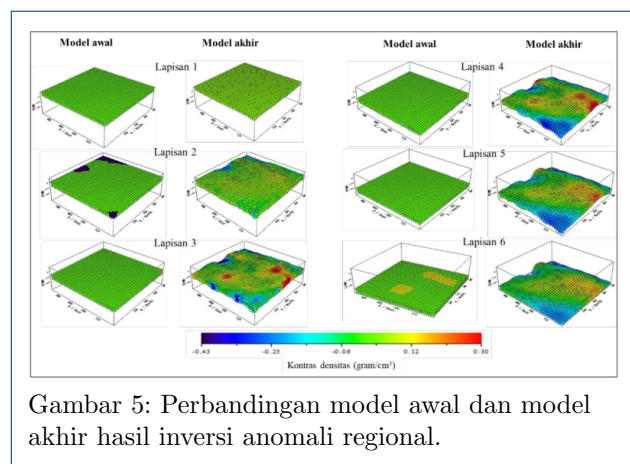
Gambar 3: Batas kontak densitas (simbol x) hasil analisis horizontal derivatif (FHD dan SHD) overlay peta kontur anomali regional dan batas litologi.



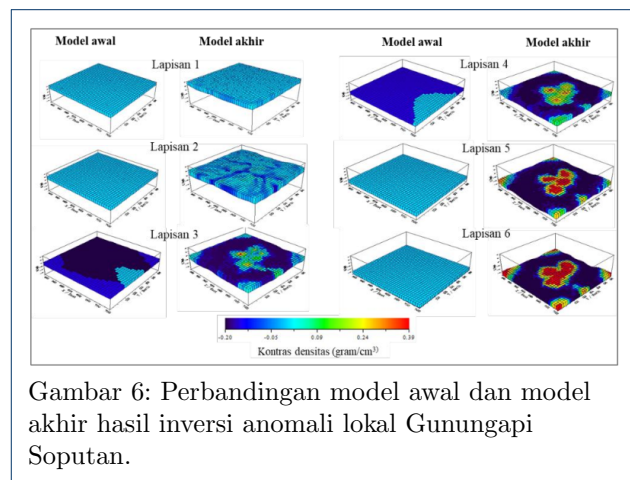
Gambar 4: Batas kontak densitas (simbol x) hasil analisis horizontal derivatif (FHD dan SHD) overlay peta kontur anomali lokal dan batas litologi.

Pemodelan tiga dimensi dilakukan dengan membuat model awal yang mempertimbangkan kondisi geologi daerah penelitian, kemudian model awal diubah dalam nilai kontras densitas ($\Delta\rho$) yang merupakan perbedaan nilai densitas batuan terhadap densitas *background* (densitas dominan pada tiap lapisan). Selanjutnya dilakukan pemodelan kebelakang. Pemodelan ini dilakukan untuk anomali regional dengan target *partial melting*, sedangkan untuk anomali lokal Gunungapi Soputan dan Lokon-Empung dengan

target sumber magmatisme. Hasil pemodelan ke belakang menunjukkan adanya kecocokan antara data pengukuran dan perhitungan dengan tingkat kesalahan (*error*) sebesar 2,50% untuk anomali regional, 5,24% untuk anomali lokal Gunungapi Soputan, dan 4,17% untuk anomali lokal Gunungapi Lokon-Empung. Perbandingan model tiga dimensi antara model awal dan model akhir hasil inversi untuk setiap lapisan pada masing-masing model anomali ditunjukkan pada Gambar 5, 6, dan 7. Sedangkan ilustrasi ringkasan penampang 3D struktur bawah permukaan Gunungapi Soputan dan Lokon-Empung dapat dilihat pada Gambar 8.

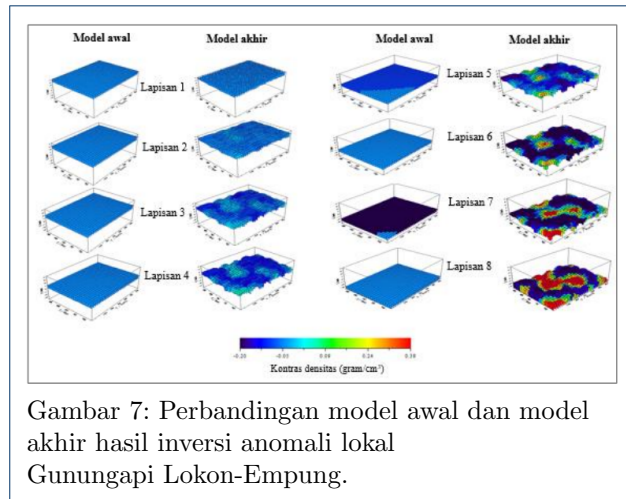


Gambar 5: Perbandingan model awal dan model akhir hasil inversi anomali regional.



Gambar 6: Perbandingan model awal dan model akhir hasil inversi anomali lokal Gunungapi Soputan.

Berdasarkan pemodelan 3D anomali regional, terlihat anomali tinggi pada arah barat daya menuju timur laut daerah penelitian dengan densitas 3,31 gram/cm³ hingga 3,4 gram/cm³ pada palisan mantel atas dan densitas 2,7 gram/cm³ sampai 2,99 gram/cm³ yang pada lapisan kerak dibawah Gunungapi Soputan, Lokon-Empung dan Mahawu. Anomali tinggi ini merupakan *partial melting* dan



Gambar 7: Perbandingan model awal dan model akhir hasil inversi anomali lokal Gunungapi Lokon-Empung.

magma Gunungapi tersebut. Sedangkan berdasarkan pemodelan 3D anomali lokal yang diambil pada area kompleks Gunungapi Soputan dan area kompleks Gunungapi Lokon-Empung, terlihat anomali tinggi ditengah kompleks Gunungapi Soputan dan di bawah puncak Lokon-Empung serta kawah Tompaluan dengan densitas $2,7 \text{ gram/cm}^3$ hingga $2,99 \text{ gram/cm}^3$ yang merupakan magma basaltik sebagai sumber vulkanisme Gunungapi tersebut.

4 KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah diperolehnya pola sebaran anomali regional bernilai tinggi berkisar -210 sampai -105 mGal (barat daya-timur laut) dan anomali lokal berkisar 55 sampai 105 mGal diduga merupakan *partial melting* dan magma Gunungapi Soputan, Lokon-Empung dan Mahawu. Anomali regional bernilai rendah berkisar -270 hingga -235 mGal (barat laut dan tenggara) dan anomali lokal berkisar -35 hingga 5 mGal didominasi batuan sedimen dan alluvium. Berdasarkan analisis horizontal derivatif pada anomali regional menunjukkan dimensi *partial melting* di bawah Gunungapi Lokon-Empung, Mahawu dan Soputan, sedangkan pada anomali lokal menunjukkan adanya pusat anomali tertinggi secara konsisten di bawah kawasan Gunungapi Soputan

dan Lokon yang diduga sebagai magma Gunungapi tersebut. Berdasarkan pemodelan 3D anomali regional dan lokal di area Gunungapi Soputan dan Lokon-Empung, terlihat anomali dengan densitas $3,31 \text{ gram/cm}^3 - 3,4 \text{ gram/cm}^3$ (di mantel atas) dan densitas $2,7 \text{ gram/cm}^3 - 2,99 \text{ gram/cm}^3$ dilapisan kerak. Anomali tinggi ini merupakan *partial melting* dan magma basaltik Gunungapi tersebut. Berdasarkan hasil analisis model anomali gravitasi, telah dibuat model tentatif bawah permukaan daerah penelitian yang merupakan kesimpulan dari hasil interpretasi sayatan model 3D anomali gravitasi regional dan lokal.

AUTHOR

- 1 Dwi Eta Darmawati

From :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada

- 2 Ari Setiawan

Dari :

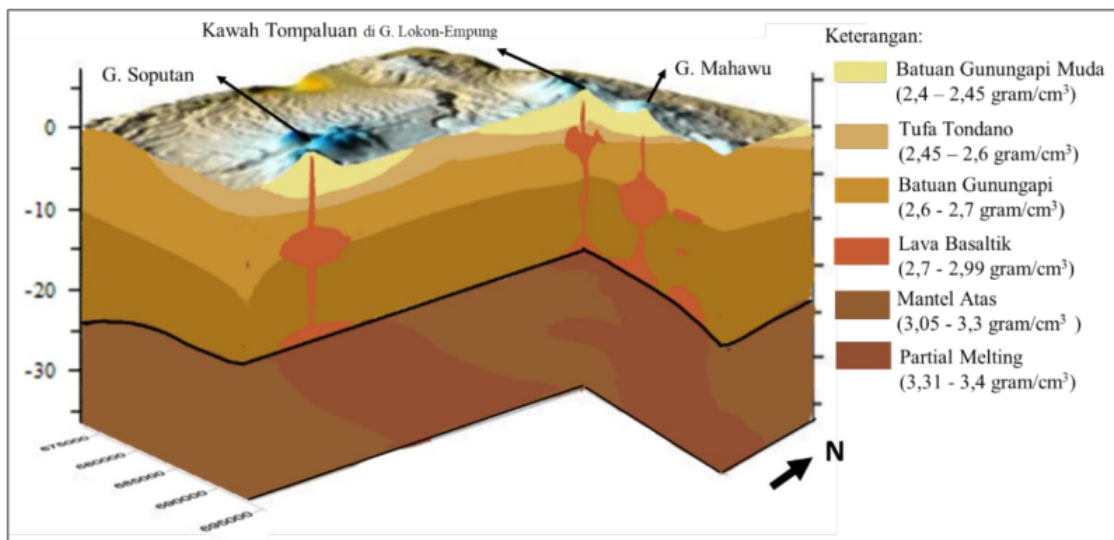
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada

Author details

¹ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Pustaka

1. Haerani N, Gunawan H, Kristianto K, Kushendratno K, Wittiri SR. Studi terpadu seismik dan deformasi di Gunung Lokon, Sulawesi Utara. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. 2010;1(3):151–164.
2. Anthe S, Pasau G, Tanauma A. Variasi zona lemah struktur internal gunung Lokon berdasarkan studi seismo-vulkanik. *Jurnal Ilmiah Sains*. 2015;15(1):27–32.
3. Dawid S, Ferdy F, Pasau G. Penentuan Lokasi Pergerakan Magma Gunung Api Soputan Berdasarkan Studi Sebaran Hiposenter Gempa Vulkanik Periode Mei 2013–Mei 2014. *Jurnal Ilmiah Sains*. 2015;15(2):88–93.
4. Bunaga I, Nugraha MF. Preliminary Result of The Influence of Earthquake Stress Change and The Implication for Soputan Volcano and Lokon Volcano. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. vol. 62. IOP Publishing; 2017. p. 12057.
5. Dentith M, Mudge ST. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press; 2014.
6. Ochieng L. Overview of geothermal surface exploration methods. *Geothermal Development Company, Nakuru Kenya*. 2013;.
7. Hirt C, Claessens S, Fecher T, Kuhn M, Pail R, Rexer M. New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical research letters*. 2013;40(16):4279–4283.



Gambar 8: Ilustrasi ringkasan penampang 3D struktur bawah permukaan Gunungapi Soputan dan Lokon-Empung.