



Estimasi Potensi Panas Bumi Daerah Seram Bagian Barat dan Pulau-Pulau Sekitar, Provinsi Maluku Berdasarkan Data Gaya Berat dan Aeromagnetik

Geothermal Potential Estimation of Western Seram and Surrounding Islands, Maluku Province Based on Gravity and Aeromagnetic Data

Muti'ah¹, Wawan Gunawan A.K.², Afnimar², Aji Suteja¹, Santia Ardi Mustofa³

¹ Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM

² Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

³ Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Kementerian ESDM

e-mail: siti.muti'ah@esdm.go.id

Naskah diterima: 17 Januari 2023, Revisi terakhir: 26 Mei 2024, Disetujui: 27 Mei 2024 Online: 29 Mei 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i2.755>

Abstrak- Penelitian ini difokuskan pada estimasi kedalaman titik Curie (Curie Point Depth/CPD) dan pemodelan kedepan (*forward modelling*) menggunakan data aeromagnet dan gaya berat residual Pulau Seram Bagian barat dan pulau sekitar (Ambon, Haruku, Saparua, Nusalaut, Kelang, Boano, dan Manipa) untuk mengetahui potensi panas bumi. Penelitian dimulai dengan deliniasi struktur bawah permukaan menggunakan metode total horizontal gradien data aeromagnet. Tahap selanjutnya yaitu pembuatan peta estimasi CPD menggunakan metode analisis spektral data aeromagnet resolusi tinggi yang di reduksi ke kutub (RTP) dan dibagi menjadi 30 blok area berukuran 50 x 50 km untuk memperkirakan kedalaman sumber panas. Peta CPD yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk menghitung gradien geotermal dan aliran panas. Proses selanjutnya yaitu pemodelan kedepan (*forward modeling*) menggunakan data gaya berat residual dan total intensitas magnet untuk mempelajari struktur bawah permukaan. Estimasi CPD menghasilkan nilai berkisar 18 – 59.4 km, gradien geotermal berkisar 11.8 - 26 °C/km, dan aliran panas berkisar 29 – 64 mW/m². Nilai CPD dangkal terletak di Pulau Ambon, Haruku, dan Saparua, sedangkan nilai terdalam terdapat pada Pulau Seram bagian tengah. Sebaran kedalaman CPD dan kelurusan struktur jika dikaitkan dengan data titik panas bumi menunjukkan keselarasan, kecuali di Pulau Seram yang berada pada CPD bernilai besar. Kemungkinan terdapat dua tipe potensi panas bumi daerah penelitian yaitu terkait vulkanisme (*volcanic-hosted*) di Pulau Ambon, Haruku, Saparua; dan terkait sesar (*fault-hosted*) seperti di Pulau Seram (Tehoru dan Banda Baru). Potensi panas bumi berikutnya berdasarkan CPD dan kelurusan struktur tersebar di Pulau Seram (Asilulu, Kairatu, Taniwel), Haruku dan Saparua yang perlu untuk diteliti lebih lanjut.

Kata kunci: data aeromagnet, gayaberat, kedalaman titik Curie, total horizontal gradien, panas bumi.

Abstract- This research focuses on estimating Curie point depth (CPD) and forward modeling using aeromagnetic data and residual gravity of western Seram and surrounding islands (Ambon, Haruku, Saparua, Nusalaut, Kelang, Boano, and Manipa) to determine geothermal potential. The research began with delineation of subsurface structures using the total horizontal gradient method of aeromagnetic data. The next process is the creation of a CPD estimation map using the spectral analysis method of reduced to the poles (RTP) aeromagnetic data which divided into 30 blocks of 50 x 50 km dimension to estimate the depth of the heat source. CPD map is used to calculate geothermal gradients and heat flow. Final process is forward modeling using residual gravity data and total magnetic intensity to study the subsurface structure. Resulted CPD estimation has value ranging from 18 – 59.4 km, geothermal gradient ranging from 11.8 - 26 °C/km, and heat flow ranging from 29 – 64 mW/m². The shallowest CPD value is located on Ambon, Haruku and Saparua Islands, while the deepest values are found on the central part of Seram Island. The distribution of CPD depth and structural lineament are conformed with geothermal potential spot, except on Seram Island which has a large CPD value. It's concluded that there are two types of geothermal potential; related to volcanism (*volcanic-hosted*) located in Ambon, Haruku, Saparua island, and related to faults (*fault-hosted*) in Seram Island (Tehoru and Banda Baru). The next possible geothermal potential based on CPD and structural lineament estimated on Seram (Asilulu, Kairatu, Taniwel), Ambon, Haruku and Saparua island which needs to be confirmed through detailed exploration.

Keywords: aeromagnetic data, gravity, Curie point depth, total horizontal gradient, geothermal

PENDAHULUAN

Indonesia Timur merupakan wilayah aktif secara tektonik yang dihasilkan dari konvergensi Lempeng Eurasia, Australia, dan Pasifik (Hall, 2012; Hamilton, 1979). Interaksi antar lempeng tersebut salah satunya membentuk lengkungan yang disebut Busur Banda dengan bentukan geologi diantaranya batas lempeng, zona tumbukan, dan pergerakan subduksi aktif (Hamilton, 1979). Seram *fold-thrust belt* yang terletak di bagian utara Pulau Seram diperkirakan merupakan zona sesar aktif dikarenakan sesar anjak tersebut mempengaruhi bentuk unit stratigrafi pada lapisan yang muda (Pairault, dll., 2003). Aktifitas tektonik di Busur Banda tersebut juga diperkirakan mempengaruhi adanya potensi sumberdaya salahsatunya panas bumi, seperti di Seram Barat, Ambon, Haruku, Saparua, dan Nusalaut (<https://georima.esdm.go.id/2023>), meskipun sumber panas bawah permukaan di daerah tersebut masih belum diketahui dengan baik.

Daerah penelitian meliputi Seram bagian Barat dan pulau sekitar yaitu Ambon, Haruku, Saparua, Nusalaut, Kelang, Boano, dan Manipa. Pulau Seram bagian barat dan pulau sekitar memiliki perbedaan kondisi geologi. Pulau Seram yang termasuk sebagai Busur Banda Luar tersusun atas batuan metamorf dan batuan sedimen tua (Perem dan Jura) (Darman (2014) modifikasi dari Smet, 1999). Pulau di bagian selatan Seram (Ambon, Haruku, Saparua, Nusalaut) termasuk dalam Busur Banda Dalam yang terdiri atas busur vulkanik berumur Miosen Akhir (Honthaas dkk., 1998).

Meskipun memiliki kondisi geologi yang berbeda yaitu Busur Luar dan Busur Dalam Banda, namun pada keduanya tercatat memiliki potensi panas bumi. Menurut situs Georima (<https://georima.esdm.go.id/2023>) dari Kementerian ESDM terdapat sebaran titik panas bumi mulai dari Pulau Ambon, Haruku, Saparua, dan Pulau Seram (Tehoru dan Kairatu).

Penelitian mengenai sumber panas bumi daerah penelitian dalam skala luas sebelumnya dengan menggunakan data gaya berat dan magnet dari World Gravity Map (WGM) 2012 dan Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG2-V3) yang meliputi Ambon dan Seram bagian barat (Lewerissa, dkk., 2020) yang menunjukkan adanya intrusi batuan beku hingga kedalaman kurang dari 10 Km dibawah Pulau Ambon. Lewerissa, dkk., (2020) juga menyatakan potensi panas bumi di Pulau Seram barat bagian selatan, Tehoru, Banda Baru, dan Kairatu terkait dengan Sesar Banda-Hatuasa, Banda, dan Hule berarah timurlaut-baratdaya. Namun demikian, penelitian ini belum dapat menunjukkan bagaimana kelurusan sesar yang

berperan penting dalam manifestasi panas bumi dan sebaran panas dibawah permukaan. Dengan demikian diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui delineasi struktur dan sebaran panas bumi.

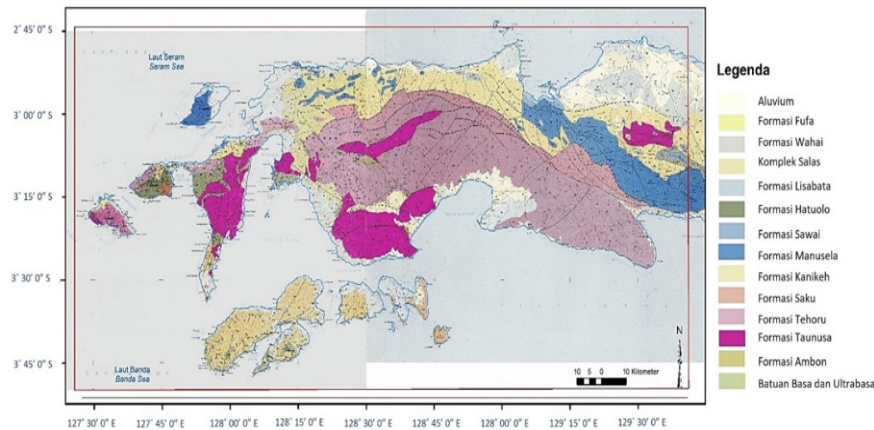
Data airborne magnet resolusi tinggi hasil survei Pusat Survei Geologi tahun 2012 dapat digunakan untuk memprediksi struktur dan sebaran panas bawah permukaan. Selain itu data gayaberat hasil survei darat berguna untuk memperkuat interpretasi struktur bawah permukaan berdasarkan parameter fisis densitas, sehingga dari analisis kedua metoda tersebut dapat digunakan untuk menginterpretasi kelurusan struktur dan sebaran panas bawah permukaan.

Metode penelitian didahului dengan delineasi struktur menggunakan metode total horizontal gradien (THD) data aeromagnet. Estimasi sebaran kedalaman sumber panas bawah permukaan dilakukan dengan metode estimasi kedalaman titik Curie (Curie Point Depth/CPD) menggunakan analisis spektral. Analisis spektral dilakukan pada data magnet reduksi ke kutub yang telah dibagi menjadi beberapa *window*. Setelah didapatkan peta CPD maka dapat dilakukan perhitungan gradien geotermal dan aliran panas (*heat flow*) untuk estimasi potensi panas bumi. Analisis struktur bawah permukaan dilakukan dengan metode *forward modeling* data magnet dan gaya berat sehingga dapat diketahui konsep geologi bawah permukaan daerah penelitian.

TATANAN GEOLOGI

Daerah penelitian terletak pada koordinat wilayah 2° 44' 14.8668" - 3° 49' 56.2786" LS dan 127° 25' 41.6065- 129° 41' 8.9920" BT. Secara geologi daerah penelitian terletak pada dua lembar kompilasi Peta Geologi Lembar Ambon (Tjokrosoepetro, dkk., 1993) dan Lembar Masohi (Tjokrosoepetro, dkk., 1993) (Gambar 1) terbitan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, sekarang Pusat Survei Geologi, skala 1:250.000.

Pengendapan di Pulau Seram bagian barat dimulai dari endapan berumur Paleozoikum Perem, yaitu Kompleks batuan beku basa hingga ultrabasa, metamorf Formasi Taunusa, dan metamorf Formasi Tehuru. Endapan berikutnya berumur Mesozoikum Trias batuan sedimen Formasi Kanikeh dan gamping Manusela, Jura sedimen laut Kompleks Nief, dan Kapur batuan endapan laut Formasi Sawai. Endapan Tersier yaitu batuan serpih Formasi Hatuولو, batuan gamping Lisabata, bongkah batuan beku-sedimen-malihan Formasi Salas, Batuan Gunung Api Ambon, batunapal Formasi Wahai, dan batupasir Formasi Fufa. Endapan Kuartar terdiri dari batuan endapan teras, endapan gamping, dan aluvium.



Gambar 1 Kompilasi peta geologi Pulau Seram bagian Barat dan pulau sekitar (Tjokrosapoetro, dkk., 1993 dan Tjokrosapoetro, dkk.,1993) pada daerah penelitian (kotak merah).

Struktur geologi regional daerah Seram barat dan sekitarnya (Patria, dkk., 2021) berupa sesar geser mengiri Kawa dan Manusela yang terletak di bagian tengah pulau berarah baratlaut-tenggara dan sesar normal Banda Baru berarah barat-timur yang terletak di bagian barat.

METODOLOGI PENELITIAN

Data primer yang digunakan yaitu data akuisisi aeromagnet grid total intensitas magnet milik Negara yang dikelola oleh Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, KESDM tahun akuisisi 2012. Spesifikasi akuisisi data aeromagnet memiliki spasi lintasan 1.000 m, spasi lintasan pengikat 10.000 m, dan tinggi terbang 100 m. Data primer ini nantinya digunakan untuk melakukan penarikan kelurusan struktur dan pemodelan kedepan. Penarikan struktur dilakukan dengan metode delineasi total horizontal gradien regional dan residual.

Perangkat lunak yang digunakan dalam mengerjakan penelitian yaitu *Geosoft Oasis Montaj* dan *Global Mapper*. *Geosoft Oasis Montaj* yang digunakan yaitu versi 6.4.2 untuk pengolahan data gaya berat dan magnet dan pembuatan pemodelan kedepan. Piranti lunak *Global Mapper* yang digunakan yaitu versi 10 untuk menarik kelurusan dari peta total horizontal gradien yang dihasilkan dari piranti lunak *Oasis Montaj* dan membandingkan dengan kondisi geologi daerah penelitian.

Pengolahan Data Magnet

Data geofisika magnet memiliki konsep untuk mengukur variasi medan magnet di permukaan bumi akibat variasi distribusi benda termagnetisasi dibawah permukaan bumi. Medan magnet di lapangan diperoleh dari pengukuran di permukaan untuk merekam kondisi kemagnetan batuan.

Metode geomagnet seringkali digunakan untuk studi identifikasi sesar dengan mengobservasi batuan obyek yang mempunyai potensi kemunculan anomali magnet (Setyonegoro, dkk., 2017). Data yang digunakan sudah dalam bentuk total intensitas magnet sehingga pengolahan dari data mentah sudah tidak dilakukan dalam penelitian ini.

Proses pengolahan berikutnya yaitu transformasi reduksi ke kutub (*reduce to pole / RTP*) untuk menghilangkan efek magnet kutub bumi (Blakely, 1996). Filter RTP digunakan untuk menyejajarkan nilai puncak anomali dan gradien magnet langsung berada diatas sumber anomali.

Rumus transformasi anomali magnet ke reduksi ke kutub dapat diekspresikan dengan formula berikut:

$$f[\Psi_r] = \frac{1}{a_1 \cos^2 \lambda + a_2 \sin^2 \lambda + a_3 \cos \lambda \sin \lambda + i(b_1 \cos \lambda + b_2 \sin \lambda)} \quad (1)$$

Dimana $\lambda = \arctan(k_y/k_x)$.

Pengolahan transformasi reduksi ke kutub pada data magnet dilakukan pada grid data intensitas magnet total. Tahap pengolahan menggunakan piranti lunak Oasis Montaj yaitu menu MAGMAP dan dipilih filter *reduce to pole* dengan menginput nilai inklinasi dan deklinasi daerah penelitian. Inklinasi yang dimasukkan adalah -23.1° dan deklinasi 1.8° .

Proses selanjutnya yaitu transformasi *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk menggeser domain data dari spasial menjadi *wavenumber / bilangan gelombang*, agar selanjutnya dapat dilakukan *filtering*. Pada data magnet, peta yang diterapkan FFT ini yaitu peta magnet RTP.

Proses selanjutnya yaitu pemisahan anomali residual dan regional menggunakan filter Gaussian yaitu

filter linier yang memanfaatkan distribusi data pada matriks kernel Gauss. Dalam melakukan filter regional/residual, metode Gaussian menerapkan filter *low pass* untuk menghasilkan anomali regional, dan *high pass* untuk anomali residual. Formula Gaussian *lowpass* ditunjukkan pada formula berikut (Gonzales dan Wood, 2002):

$$G[H(u, v)] = e^{-D^2(u, v)/2\sigma^2} \quad (2)$$

Sedangkan formula Gaussian *highpass* ditunjukkan pada formula berikut (Gonzales dan Wood, 2002):

$$G[H(u, v)] = 1 - e^{-D^2(u, v)/2\sigma^2} \quad (3)$$

Dengan,

$G[H(u, v)]$: fungsi filter Gaussian

$D^2(u, v)$: jarak dari titik (u,v) ke pusat frekuensi

σ : standar deviasi (sebaran terhadap pusat)

e : nilai logaritma natural (2,718281828459)

Dalam penelitian ini, filter Gaussian digunakan dalam pengolahan data anomali gaya berat dan magnet.

Pengolahan data magnet selanjutnya yaitu penentuan kelurusan struktur menggunakan metode total horizontal gradien untuk melokalisasi batas sumber anomali magnet / gaya berat (Cordell dan Grauch, 1985). Gradien paling curam dari anomali gaya berat / magnet semu terletak di batas luar tubuh anomali, sehingga puncak magnitudo gradien horizontal medan gravitasi semu /magnet digunakan sebagai alat untuk menemukan batas benda anomali. Amplitudo dari gradien horizontal dirumuskan oleh Grauch dan Cordell (1987) sebagai berikut:

$$HG(x, y) = \left[\left(\frac{\delta g}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta g}{\delta y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$HG(x, y) = \left[\left(\frac{\delta H}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta H}{\delta y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

dimana $\frac{\delta g}{\delta x}$ dan $\frac{\delta g}{\delta y}$ adalah turunan horizontal dari medan gaya berat pada arah x dan y, $\frac{\delta H}{\delta x}$ dan $\frac{\delta H}{\delta y}$ dan merupakan turunan horizontal dari medan magnet di arah x dan y.

Peta total horizontal gradien yang dihasilkan kemudian ditarik kelurusan strukturnya. Hasil kelurusan struktur ini selanjutnya dikorelasikan dengan kondisi geologi daerah penelitian dan sebaran kegempaan, dan dijadikan acuan konsep sesar saat pemodelan kedepan.

Estimasi Kedalaman Titik Curie (Curie Point Depth / CPD), gradien GEOTERMAL, dan aliran panas (heat flow)

Studi mengetahui potensi geotermal pada suatu wilayah dapat menggunakan metode yang menggabungkan CPD, *gradient geothermal*, dan aliran panas (*heat flow*) yang didapat dengan analisis spektral data magnet. Konsep penggunaan metode ini yaitu memanfaatkan hilangnya sifat kemagnetan mineral diatas temperature Curie (biasanya sekitar 580°C untuk magnetit) (Mayhew, 1985). Adanya lapisan batuan yang kehilangan sifat kemagnetannya maka dianggap sebagai permukaan dari sumber panas. Perhitungan kedalaman titik Curie menggunakan metode *spectral analysis* data magnet oleh Spector dan Grant (1970) dimana mereka mengestimasi kedalaman prisma rectangular magnet (Z_t) ke puncak dengan kemiringan dari log power spectrum. Battacharyya dan Leu (1975a, 1975b, 1977) kemudian menghitung kedalaman centroid dari tubuh sumber magnet (Z_0). Okubo, dll., (1985) selanjutnya mengembangkan metode untuk estimasi kedalaman dasar dari tubuh magnet (Z_b) menggunakan metode analisis spectral dari Spector dan Grant (1970).

Dengan menggunakan metode dari Tanaka, dll., (1999) yang diasumsikan salah satunya bahwa magnetisasi adalah fungsi random dari x dan y, selanjutnya Blakely (1995) memperkenalkan *spektrum power density* dari anomaly medan total $\Phi_{\Delta T}$:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta T}(k_x, k_y) &= \Phi_M(k_x, k_y) \times F(k_x, k_y) \\ F(k_x, k_y) &= 4\pi^2 C_m^2 |\Theta_m|^2 |\Theta_f|^2 e^{-2|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

dimana Φ_M adalah *density power spectrum* dari magnetisasi, C_M adalah konstanta proporsional, dan Θ_c dan Θ_f adalah factor untuk arah magnetisasi dan medan geomagnet. Persamaan ini dapat disederhanakan dengan catatan semua terminology kecuali dan adalah simetris secara radial, dimana radial average dari dan adalah konstan. Jika adalah random dan tidak berkorelasi, maka menjadi konstan, dengan demikian *radial average* dari $\Phi_{\Delta T}$:

$$\Phi_{\Delta T}(|k|) = A e^{-2|k|Z_t} (1 - e^{-|k|(Z_b - Z_t)})^2 \quad (7)$$

dimana A adalah konstanta, k adalah bilangan gelombang. Untuk Panjang gelombang yang kurang dari dua kali ketebalan lapisan, maka persamaan (7) dapat didekati dengan

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}] = \ln B - |k|Z_t \quad (8)$$

dimana B adalah konstan. Dengan demikian dapat diestimasi batas atas dari sumber magnet dengan mencocokkan garis lurus melalui bagian yang memiliki bilangan gelombang tinggi dari *radially average power spectrum* $\ln[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}]$

Disisi lain, persamaan (8) dapat ditulis ulang menjadi

$$\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2} = C e^{-|k|Z_0} (e^{-|k|(Z_t-Z_0)} - e^{-|k|(Z_b-Z_0)}) \quad (9)$$

dimana C adalah konstanta. Pada Panjang gelombang yang besar, persamaan (7) dapat ditulis sebagai berikut, maka

$$\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2} = C e^{-|k|Z_0} (e^{-|k|(-d)} - e^{-|k|(d)}) \approx C e^{-|k|Z_0} 2|k|d \quad (10)$$

dimana 2d adalah ketebalan dari sumber magnet. Dari persamaan (10) dapat disimpulkan bahwa:

$$\ln\{[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}]/|k|\} = \ln D - |k|Z_0 \quad (11)$$

dimana D adalah konstan. Titik tengah (centroid) dari sumber magnet (Z_0) dapat diestimasi dengan mencocokkan garis lurus yang melalui bagian bilangan gelombang rendah pada *radially average frequency-scaled power spectrum* $\ln\{[\Phi_{\Delta T}(|k|)^{1/2}]/|k|\}$.

Dari kemiringan kurva power spectrum, batas atas dan tengah dari tubuh magnet dapat diestimasi. Batas bawah dari bodi magnet dapat dihitung dengan persamaan Okubo, dll., (1985) dan Tanaka, dll., 1999) dengan persamaan:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (12)$$

Dikarenakan Z_b adalah kedalaman bawah dari bodi magnet, maka diperkirakan mineral feromagnetis akan berubah menjadi mineral paramagnetic pada suhu sekitar 580°C. Sehingga batas bawah dari bodi magnet diasumsikan merupakan kedalaman titik Curie (*Curie point depth*)

Tahap pertama yang dilakukan yaitu membuat *window* data magnet area penelitian dengan dimensi 50 x 50 km² yang saling menimpa 50% area *window* sebelumnya, sehingga pada penelitian ini didapatkan total 30 blok *window*. Data magnet yang digunakan pada penelitian ini yaitu RTP magnet. Pada setiap *window* dilakukan perhitungan dan sehingga didapat nilai setiap titik yang selanjutnya menjadi nilai CPD. Nilai CPD yang diperoleh selanjutnya dilakukan pengkisian seluruh area untuk mendapatkan peta CPD.

Hasil peta CPD selanjutnya digunakan untuk perhitungan gradien thermal menggunakan persamaan Okubo, dkk., (1985)

$$\text{grad } T = 580^\circ\text{C}/Z_b \quad (13)$$

Dan selanjutnya dapat dihitung aliran panas (q) menggunakan formula

$$q = k \left(580^\circ \frac{C}{Z_b} \right) \quad (14)$$

dimana k = koefisien konduktifitas thermal sebesar 2.5 Wm⁻¹ K⁻¹ untuk daerah kerak bagian atas (Springer, 1999).

Validitas perhitungan CPD ditentukan dari seberapa sesuai peta yang dihasilkan dengan data yang telah ada sebelumnya (Okubo, dll., 1985).

Pengolahan Data Gaya Berat

Data gaya berat merupakan data sekunder hasil digitasi Peta Anomali Gaya Berat Bouguer Lembar Ambon (Nasution dan Setyanta, 2007) dan Lembar Masohi (Padmawidjaja dan Setiadi, 2007) yang diterbitkan oleh Pusat Survei Geologi. Data gaya berat ini digunakan untuk pemodelan kedepan bersama data aeromagnet.

Pengolahan data gaya berat yaitu pemisahan anomali regional dan residual untuk digunakan dalam pemodelan kedepan. Adapun data untuk pemodelan kedepan yaitu anomali gaya berat Bouguer residual yang didapat dari filter Gaussian.

Pemodelan Kedepan (*Forward Modeling*)

Pemodelan kedepan adalah proses perhitungan data yang akan teramati di permukaan bumi secara teoritis jika harga parameter model bawah permukaan tertentu diketahui (Grandis, 2009). Menurut Talwani (1959) pemodelan kedepan untuk efek gayaberas beda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n yang dinyatakan sebagai integral garis sepanjang sisi poligon.

$$g_x = 2 G \rho \phi z d \quad (15)$$

Jika dinyatakan sebagai jumlah garis maka persamaan menjadi

$$g_x = 2 G \rho \sum_{t=1}^n g_t \quad (16)$$

Selanjutnya dilakukan pendekatan sebagai poligon poligon dengan sistem koordinat kartesian

$$g_1 = \int_b^a \frac{a_1 t_1 - b_1}{\psi_1 - t_1} d \quad (17)$$

Jika dilakukan pendekatan harga dengan koordinat titik pada sumbu x dan z maka diperoleh persamaan berikut

$$Z_1 = \frac{a_1 c}{c^2 + 1} \left\{ \theta_1 - \theta_2 + \frac{1}{2} c \left(\frac{x_2^2 - z_2^2}{x_3^2 - z_3^2} \right) \right\} \quad (18)$$

Yang kemudian dijadikan dasar perhitungan model bawah permukaan diperangkat lunak (Fransbudit, 2008).

Secara teori terdapat dua konsep pemodelan kedepan. Konsep pertama yaitu untuk menghitung respons data teori atau data perhitungan dari suatu model. Konsep kedua yaitu dengan cara *trial and error* dan memodifikasi parameter model sehingga diperoleh kesesuaian antara data perhitungan dengan data lapangan. Pada studi ini dilakukan konsep kedua yaitu *trial and error*. Adapun data yang digunakan dalam pemodelan kedepan yaitu integrasi data gaya berat dan magnet.

HASIL

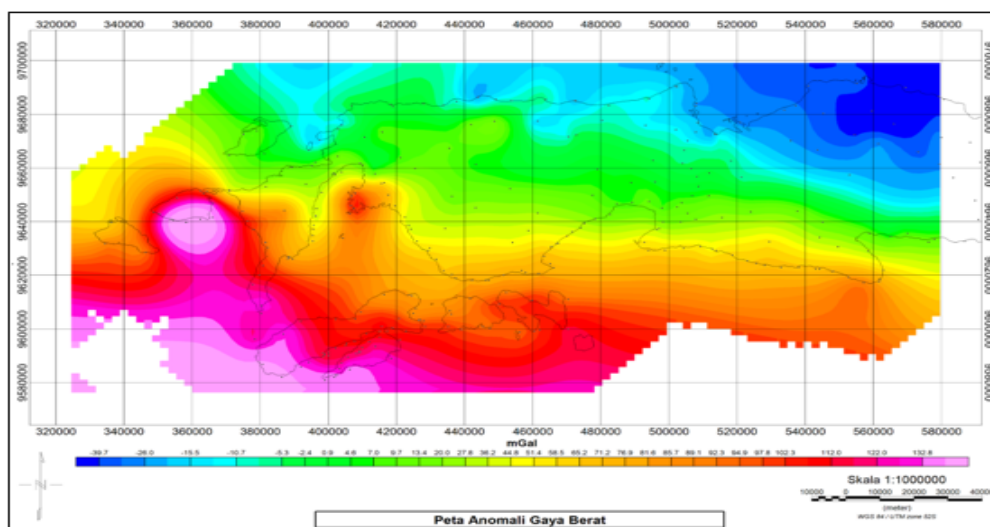
Pengolahan Data Gaya Berat

Gambar 2 adalah data gaya berat yang telah diakuisisi dan dilakukan koreksi serta pengkisan, dihasilkan anomali gaya berat beserta sebaran pengambilan data. Titik pengambilan data daerah penelitian terlihat terdistribusi cukup merata. Anomali gaya berat yang dihasilkan menunjukkan nilai berkisar dari -46.303 hingga 165.273 mGal yang tersebar di daerah penelitian. Pola anomali yang terbentuk menunjukkan adanya anomali rendah di bagian utara Pulau Seram bagian tengah berarah barat laut-tenggara, anomali sedang di bagian tengah Pulau Seram bagian barat hingga timur yang berarah barat laut-tenggara. Anomali tinggi terletak di selatan Pulau Seram.

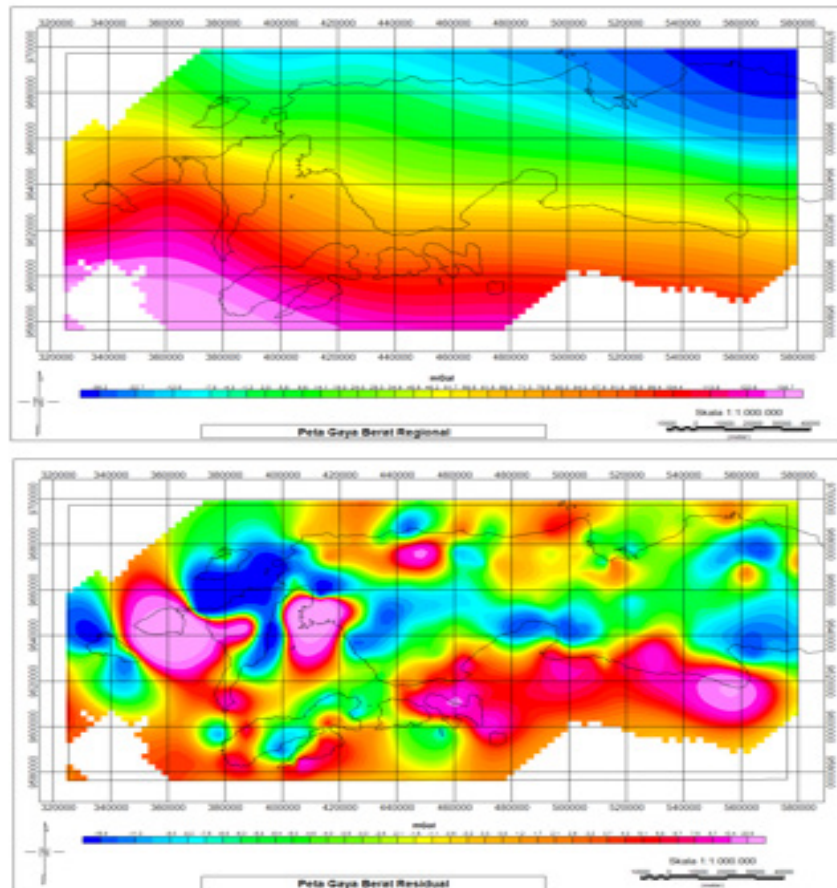
Pola anomali gaya berat Bouguer menunjukkan bentuk rendahan anomali di bagian utara Pulau Seram yang kemungkinan besar terkait dengan palung Seram. Anomali tinggi di selatan Seram kemungkinan terkait dengan lempeng kontinen dan busur vulkanik yang membentuk Busur Banda.

Proses pengolahan data gaya berat selanjutnya adalah pemisahan data regional dan residual menggunakan 4 kali percobaan untuk membandingkan hasil terbaik dengan kondisi geologi. Filter yang digunakan yaitu Gaussian. Proses yang dilakukan sebelum melakukan filter Gaussian yaitu transformasi sinyal menggunakan Fast Fourier Transform 2 Dimensi (FFT-2D). Setelah proses transformasi FFT-2D, maka dilakukan Filtering Gaussian menggunakan berbagai nilai standar deviasi, dimana pada penelitian ini sebesar 0.008472 , 0.01059 , 0.01694 , dan 0.05295 . Adapun standar deviasi pada fungsi Gaussian ini dalam satuan *ground unit* ($1/k_0$) yaitu meter (mirip dengan titik *cutoff*, kecuali jika amplitudo fungsi pada titik ini hanya 0.39). Hasil pemisahan terbaik diperoleh pada nilai standar deviasi 0.01059 (Gambar 3).

Pada Gambar 3a terlihat kondisi peta gaya berat regional memiliki korelasi dengan kondisi geologi dimana pada bagian utara merupakan perbatasan dengan Lempeng Pasifik yang menjam sehingga ditandai dengan nilai anomali gaya berat dan semakin meninggi kearah selatan. Pada Gambar 3b terlihat peta residual gaya berat yang dihasilkan terlihat memiliki nilai sedang dibagian tengah.



Gambar 2. Peta gaya berat anomali Bouguer lengkap beserta persebaran titik amat (titik hitam) (Nasution dan Setyanta, 2007 dan Padmawidjaja dan Setiadi, 2007).



Gambar 3 Peta citra anomali gaya berat regional (atas) dan residual (bawah) daerah penelitian.

Peta anomali gaya berat residual yang digunakan untuk melakukan pemodelan kedepan bersama dengan data magnet yang proses pengerjaannya akan dilakukan pada pembahasan berikutnya. Penggunaan anomali gaya berat residual dalam pemodelan kedepan dikarenakan ingin mengetahui kondisi bawah permukaan dengan kedalaman yang relatif dangkal (<30km) dan dikaitkan dengan prospek panas bumi pada kedalaman yang tidak terlalu dalam.

Pengolahan Data Magnet

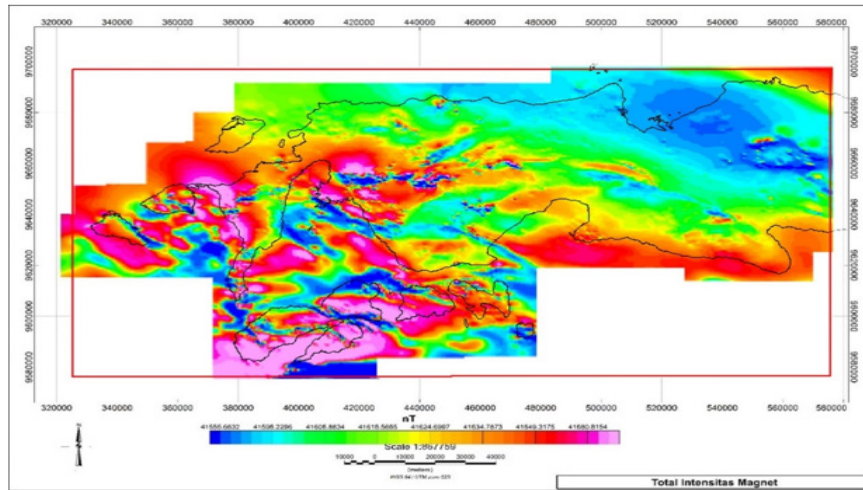
Data aeromagnet merupakan hasil kompilasi Peta Citra Intensitas Magnet Total Skala 1:100.000 Lembar Asilulu, Pulau Kelang, Piru, Masohi, Pulau Buano, Taniwel, Lumapelu, Ambon, Saparua, Tanjung Woka, dan Tehoru (Sulandari, 2023; Sulandari, 2023; Hadibroto, 2023; Hadibroto, 2023; Hadibroto, 2023; Hadibroto, 2023; Hadibroto, 2023; Sulandari, 2023; Sulandari, 2023; Setyanta, 2023; Suteja, 2023) berdasarkan kegiatan survei Pusat Survei Geologi Tahun 2012.

Proses pertama dalam pengolahan data aeromagnet yaitu pengkisian data TMI dengan grid berukuran

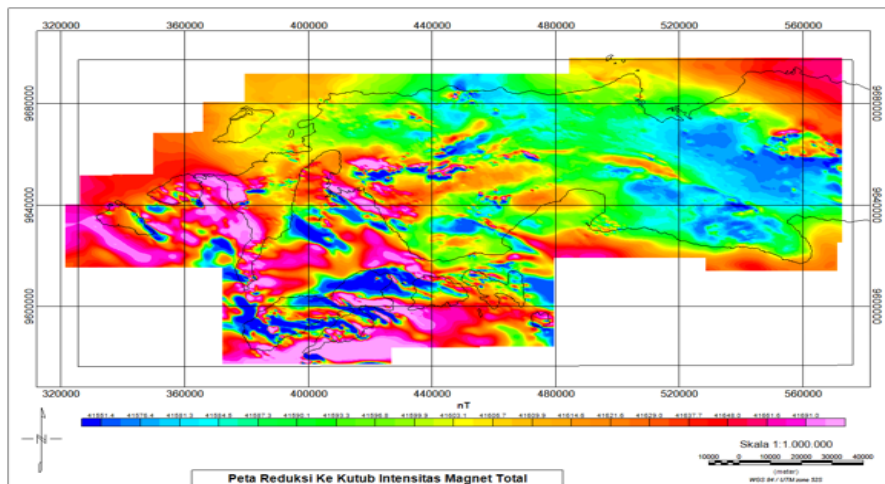
100 ground unit. Rentang nilai total intensitas magnet dalam berkisar dari 40572.75 nT - 42688.2891 nT (Gambar 4).

Berdasarkan peta total intensitas magnet yang dihasilkan, terlihat pola anomali Pulau Seram bagian barat terlihat banyak fluktuasi di bagian barat dibandingkan bagian timur yang lebih halus dengan pola anomali utamanya berarah baratlaut-tenggara. Peta citra intensitas magnet total Gambar 4 selanjutnya dilakukan transformasi reduksi ke kutub dengan memasukkan nilai inklinasi dan deklinasi magnet daerah penelitian daerah Pulau Seram yaitu $-23,1^\circ$ dan $1,8^\circ$.

Peta RTP (Gambar 5) yang dihasilkan memiliki nilai dengan rentang 41064.418 nT - 42975.5703 nT. Terdapat pergeseran posisi anomali dimana pada peta ini Seram bagian Tengah didominasi nilai anomali rendah hingga sedang dari yang awalnya menengah hingga tinggi. Sedangkan nilai anomali tinggi terlihat semakin bergeser kearah barat dan Selatan. Pola anomali RTP masih sama dengan peta intensitas magnet total dengan arah utama baratlaut-tenggara.



Gambar 4 Peta Citra Intensitas Magnet Total Daerah Seram bagian barat dan pulau sekitar beserta dengan garis pantai (garis hitam).



Gambar 5 Peta intensitas magnet total RTP Pulau Seram bagian barat dan pulau sekitar beserta dengan garis pantai (garis hitam).

Pergeseran posisi anomali hasil RTP ini cukup sesuai dengan peta geologi munculnya batuan metamorf Formasi Kobipoto di bagian barat. Pada Seram bagian tengah yang didominasi anomali rendah dicirikan dengan batugamping Formasi Manusela pada peta geologi. Terlihat kelurusan berarah barat-laut-tenggara yang mencerminkan kelurusan Sesar Kawa. Pola anomali pada Seram bagian barat dan pulau-pulau di selatan yaitu Ambon, Haruku, dan Saparua lebih fluktuatif dibandingkan Seram bagian tengah hingga timur yang didominasi batuan gunung api dan ultrabasa.

Pengolahan data magnet setelah peta RTP yaitu pemisahan anomali regional dan residual. Pemisahan diolah dengan piranti lunak Oasis Montaj dengan menu MAGMAP spectrum filtering. Jenis pemisahan yang dilakukan adalah memasukkan nilai standar deviasi pada Gaussian regional/residual filter. Berdasarkan

kurva anomali residual dan regional, nilai standar deviasi yang digunakan untuk pemisahan ini adalah 0.1714. Berdasarkan filter tersebut maka didapatkan peta seperti pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Hasil pemisahan regional (Gambar 6a) menunjukkan kesamaan dengan peta citra anomali magnet reduksi ke kutub. Nilai magnet regional yang terbentuk berkisar 4143.68 hingga 42412.625 nT. Nilai magnet tinggi ditemukan di bagian utara dan tenggara Pulau Seram seperti ada peta RTP. Daerah nilai magnet rendah ditemukan di Seram bagian barat hingga tengah.

Hasil pemisahan anomali magnet residual (Gambar 6b) terlihat memiliki nilai berkisar antara -562.04 hingga 574.88 nT, dengan kontras anomali lebih tinggi dibandingkan dengan anomali regional. Pola magnet dengan kontras yang tinggi terdapat di Seram bagian barat dengan arah barat-laut-tenggara, sedangkan

bagian timur dan utara terlihat kontras lebih kecil.

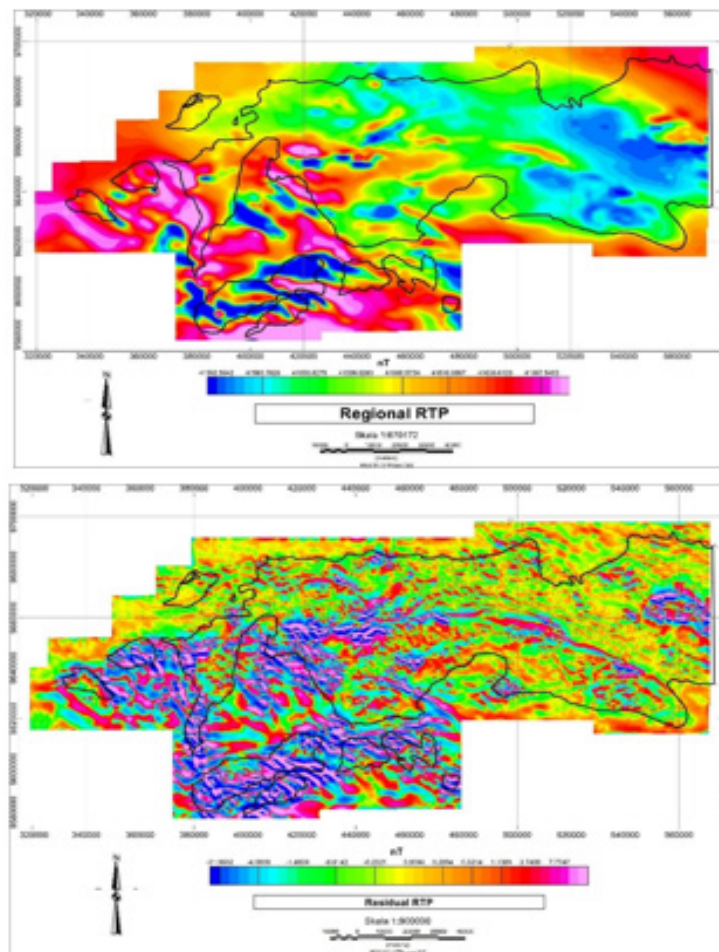
Jika dikaitkan dengan kondisi geologi kemungkinan nilai kontras yang tinggi di bagian barat dan selatan berasal dari batuan ultrabasa dan beku Formasi Ambon yang diketahui memiliki suseptibilitas magnet tinggi. Kontras magnet residual yang rendah di Seram bagian tengah hingga timur akibat dominasi batuan berupa sedimen. Kelurusan yang terbentuk berarah baratlaut-tenggara yang mencerminkan Sesar Kawa dan Sesar Manusela di lokasi tersebut.

Kelurusan struktur

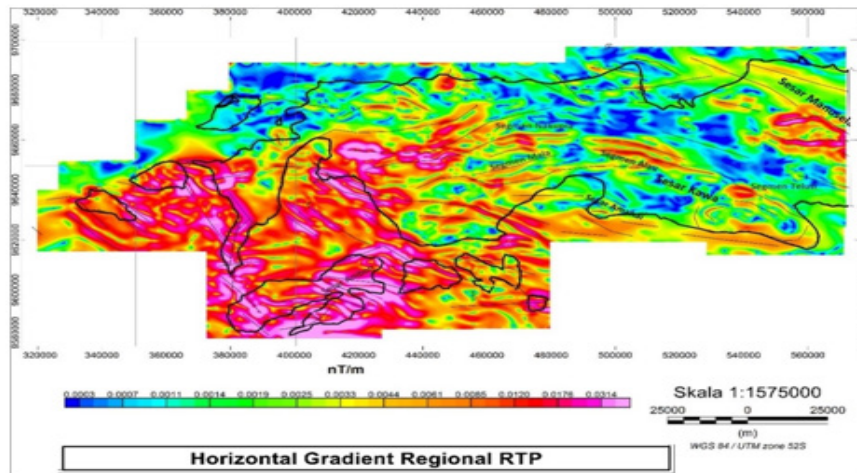
Pengolahan data magnet untuk melihat kelurusan struktur digunakan metode total horizontal gradien. Proses pengolahan menggunakan fungsi general expression yang berisikan formula dari total horizontal gradien. Pembuatan total horizontal gradien dilakukan pada citra magnet RTP regional dikarenakan pada data residual terlihat cukup banyak *noise*. Hal ini kemungkinan karena daerah yang cukup

luas, resolusi data yang tinggi dan kontras anomali daerah penelitian cukup besar, sehingga citra dari anomali residual kurang dapat menunjukkan orientasi kelurusannya.

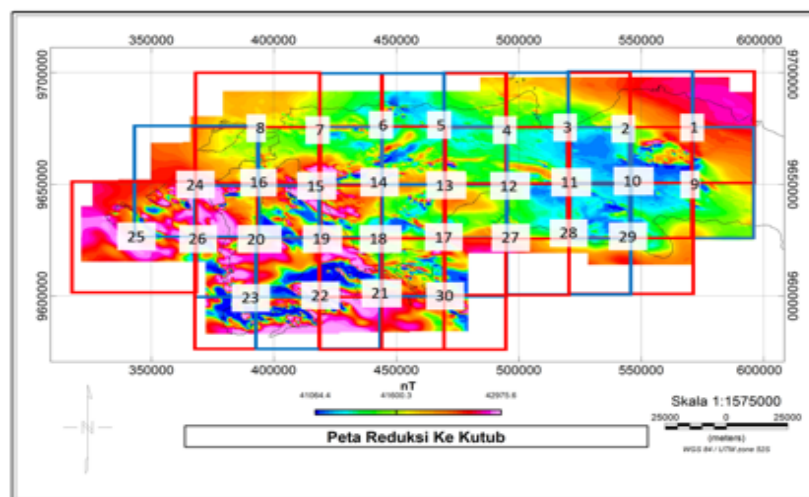
Hasil delineasi kelurusan peta RTP regional (Gambar 8) terlihat di Pulau Seram bagian barat memiliki arah lebih bervariasi dibanding bagian tengah. Pola anomali Seram bagian barat berarah NNW-SSE, sedangkan pada bagian tengah berarah NW-SE. Perbedaan ini kemungkinan besar karena komposisi batuan dimana bagian barat tersusun atas batuan metamorf yang terdeformasi kuat dibandingkan batuan sedimen yang mulai terdapat di Seram Tengah. Pulau bagian selatan tersusun atas batuan beku yang memang dicirikan suseptibilitas magnet yang tinggi sehingga memiliki kontras yang tinggi pula. Citra anomali di Seram bagian tengah memiliki kontras yang lebih kecil dibanding Seram bagian barat. Pola kelurusan di daerah ini berarah barat-timur hingga baratlaut-tenggara.



Gambar 6 Peta citra magnet RTP regional (atas) dan residual (bawah) Pulau Seram beserta dengan garis pantai (garis hitam).



Gambar 7 Peta total horizontal gradien RTP regional dan interpretasi kelurusan. Nama sesar Pulau Seram disesuaikan dengan segmen sesar aktif Patria, dll., (2021).



Gambar 8 Pembagian blok pembuatan kedalaman titik Curie pada peta RTP.

Kelurusan sesar yang dapat dikenali dari delinesasi ini yaitu sesar Kawa mulai dari timur ke barat yakni Segmen Teluti, Alau, Nakupia, hingga Mala yang didefinisikan sebagai sesar aktif (Patria, dkk., 2021). Seram bagian utara yang tersusun atas batuan kuartar juga terlihat adanya beberapa kelurusan berarah barat-laut-tenggara. Kelurusan di bagian utara ini belum terpetakan di Peta Geologi Lembar Masohi (Tjokrosapoetro, dkk., 1993) maupun Peta Patahan Aktif Indonesia (Badan Geologi, 2021; PusGen, 2017), dimana terdapat banyak sumber gempa di daerah tersebut (www.globalcmt.org).

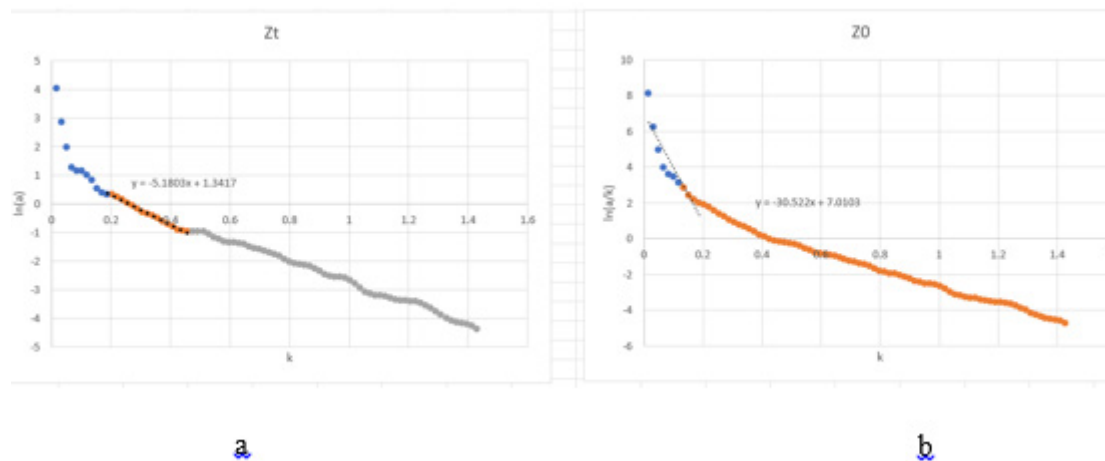
Estimasi Kedalaman Titik Curie (Curie Point Depth/CPD)

Kedalaman Titik Curie didapat dengan menghitung Z_0 dan Z_t daerah Seram Barat yang dibagi menjadi 30 blok. Blok tersebut berukuran sebesar 50 x 50 km

yang saling menimpa 50% area blok (Gambar 9). Pembuatan kedalaman titik Curie pada penelitian ini menggunakan data magnet transformasi RTP.

Setelah dilakukan pembagian 30 blok pada peta RTP, selanjutnya maka dilakukan perhitungan kedalaman Z_0 dan Z_t menggunakan analisis spektral masing-masing blok. Metode pengambilan kurva Z_0 dan Z_t menggunakan metode Centroid dikarenakan memiliki kesesuaian yang lebih baik terhadap kondisi yang sebenarnya (Quintero, dkk., 2019).

Gambar 9 menunjukkan contoh penentuan kedalaman magnetisasi bernilai nol (Z_0) dan kedalaman puncak (Z_t) pada Blok 1 dari Gambar 9. Garis kurva Z_0 ($\ln(a/k)$ vs k) yang memiliki kedalaman dalam dan Z_t ($\ln(a/k)$ vs k) mencerminkan kedalaman lebih dangkal. Nilai gradien kurva Z_t dan Z_0 merupakan estimasi nilai kedalamannya. Setelah dilakukan penentuan Z_0 dan Z_t pada 30 blok tersebut, maka



Gambar 9 Pengambilan kurva Zt (a) dan Zo (b) pada window grid Blok 1 menggunakan peta magnet RTP. Garis putus-putus hitam merupakan pengambilan data kedalaman pada kurva power spectrum window Blok 1. Hasil Zt dan Z0 digunakan untuk menghitung Zb (titik kedalaman Curie).

dilakukan perhitungan titik kedalaman Curie (Zb), gradien geotermal, dan aliran panas (*heat flow*) setiap blok yang diplot pada Tabel 1.

Hasil titik CPD masing-masing blok tersebut kemudian dilakukan pengkisan untuk seluruh area menggunakan metode kriging. Peta CPD dapat dilihat pada Gambar 10 beserta dengan lokasi sebaran potensi panas bumi dari situs <https://georima.esdm.go.id>. *Overlay* ini dilakukan untuk membandingkan lokasi panas bumi dengan pola CPD.

Peta CPD daerah Seram barat (Gambar 10) menunjukkan rentang nilai mulai 18 – 59.4 km. Nilai CPD dangkal tersebar di bagian barat utamanya di Pulau Ambon dan menyebar ke Pulau Haruku dan sebagian Saparua. Terdapat sebagian kecil anomali dangkal pula di bagian utara Seram Barat disekitar Taniwel Timur. Bagian timur daerah penelitian terlihat memiliki CPD yang lebih dalam yaitu sekitar 33 – 59.4 km yang semakin mendalam ke utara berarah timurlaut-baratdaya.

Sebaran kedalaman CPD dengan potensi panas bumi Georima sebagian besar menunjukkan kesesuaian terutama di bagian Seram Barat dan Pulau Ambon, Haruku, dan Saparua. Namun demikian terdapat 2 titik potensi yang terletak pada CPD menengah hingga cukup dalam di daerah Seram Tengah yaitu Banda Baru dan Tehoru (titik kuning) yang diestimasikan kedalaman sekitar 46 km. Sebaran titik potensi panas bumi juga bersesuaian dengan kelurusan dari peta regional magnet seperti pada struktur utama Seram bagian tengah yaitu Sesar Kawa di batuan metamorf Formasi Tehoru.

Setelah dilakukan pembuatan peta CPD pada Gambar 11, maka dilakukan perhitungan untuk membuat peta gradien geotermal (Gambar 11a). Hasil peta gradien

geotermal memiliki pola yang identik dengan CPD karena dihasilkan langsung dari perhitungan pada peta CPD. Nilai gradien geotermal yang dihasilkan berkisar 11.8 – 26 °C/km. Titik potensi panas bumi Georima terdapat pada daerah dengan nilai gradien geotermal antara 13.7 – 23.5 °C/km.

Proses selanjutnya yaitu pembuatan peta aliran panas (Gambar 11b). Hasil yang terdapat pada Gambar 11b juga identik dengan peta gradien geotermal karena merupakan perhitungan langsung dari peta tersebut. Nilai yang dihasilkan berkisar antara 29 – 64 mW/m². Titik potensi dari situs Georima terletak pada nilai 34 – 59 mW/m².

Pemodelan Kedepan (Forward Modeling)

Proses berikutnya yaitu pemodelan kedepan untuk mengetahui penampang bawah permukaan. Adapun kelurusan yang didapat sebelumnya digunakan untuk petunjuk dalam menarik sesar pada model bawah permukaan.

Lintasan untuk melakukan pemodelan disebut lintasan C-D yang berarah utara-selatan melintasi Seram bagian barat hingga Pulau Saparua. Pemodelan kedepan ini dilakukan menggunakan data anomali Bouguer residual dan total intensitas magnet. *Density background* pada lintasan ini yaitu 2.67 gr/cc.

Nilai densitas batuan metamorf amfibolit (ungu tua) Formasi Taunusa yang digunakan mengacu pada Simanjuntak (2021) yaitu sekitar 2.9 gr/cc, dimana hal ini masih sesuai dengan rentang pada Telford, dkk., (1990) yaitu sekitar 2.39 – 2.9 gr/cc. Nilai densitas batuan metamorf sekis Formasi Tehoru (ungu muda) yang diambil yaitu sekitar 2.75 gr/cc mengacu pada Telford, dkk., (1990) yang mempunyai rentang 2.39 – 2.9 gr/cc. Batuan dasar dibawah metamorf (merah

muda) dianggap berkomposisi andesit-granit yang berdasarkan Telford, dkk., (1990) kemudian diambil nilai sekitar 2.7-2.8 gr/cc. Batuan berumur Tersier dan Kuarter (kuning) diambil sebagai satu lapisan dimana diambil nilai densitas batuan sedimen sekitar 2.45 gr/cc. Nilai suseptibilitas yang digunakan berdasarkan rentang Telford, dkk., (1990) pada batuan metamorf sekis dan filit yaitu $0.3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$ SI, sedangkan batuan sedimen Tersier Kuarter yaitu $\pm 0.4 \times 10^{-3}$ SI.

Gambar 10 merupakan hasil dari pemodelan dengan tampilan *vertical exaggeration* (VE) 1,93. Hasil pemodelan memiliki error pada data intensitas magnet total sebesar 25,87 dan gaya berat residual 1,905.

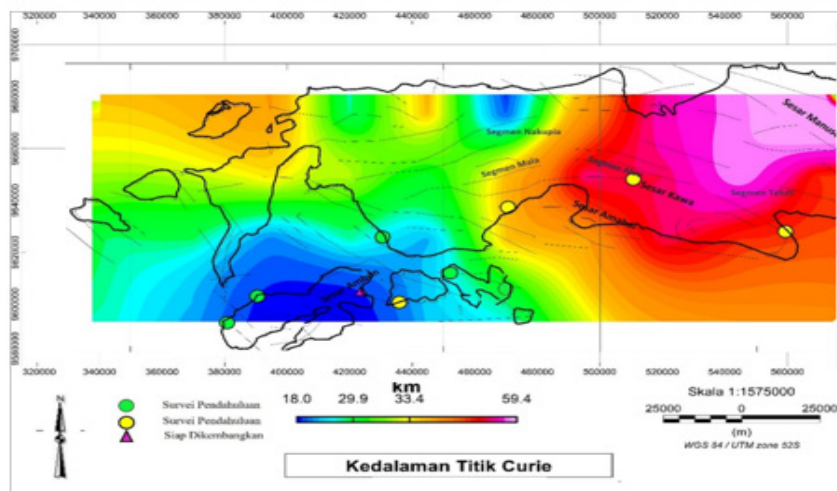
Bentuk pemodelan kedepan pada penampang C-D dimulai pada bagian utara berupa cekungan berisi batuan sedimen Kuarter Tersier, lalu menuju ke darat terdapat sesar anjak yang mengangkat batuan metamorf Taunusa dan Tehoru. Sesar anjak ini mempunyai dip ke selatan. Pada daerah darat

bagian utara terdapat tinggian metamorf Taunusa yang terangkat akibat sesar anjak yang ditandai anomali gaya berat tinggi dengan ketebalan hingga 1 km. Selanjutnya bagian tengah berupa berbentuk cekungan yang diisi oleh batuan metamorf Tehoru (ketebalan hingga 5472 m) dan Taunusa (ketebalan hingga 900 m). Cekungan tersebut kemudian menipis kembali yang mengakibatkan terangkatnya lapisan metamorf Taunusa di bagian selatan yang ditandai anomali gaya berat tinggi. Akibat adanya pengangkatan lapisan metamorf yang cukup intensif maka lapisan yang lebih muda diperkirakan tererosi sehingga tidak terlihat lagi bekas endapannya pada penampang. Selanjutnya terdapat anomali gaya berat yang turun dibarengi dengan anomali magnet yang meningkat pada Pulau Saparua. Bentuk ini didefinisikan sebagai batuan gunung api. Selanjutnya setelah bentukan gunung api Pulau Saparua tersebut diperkirakan terdapat sukseksi endapan Kuarter hingga metamorf Paleozoikum secara lengkap.

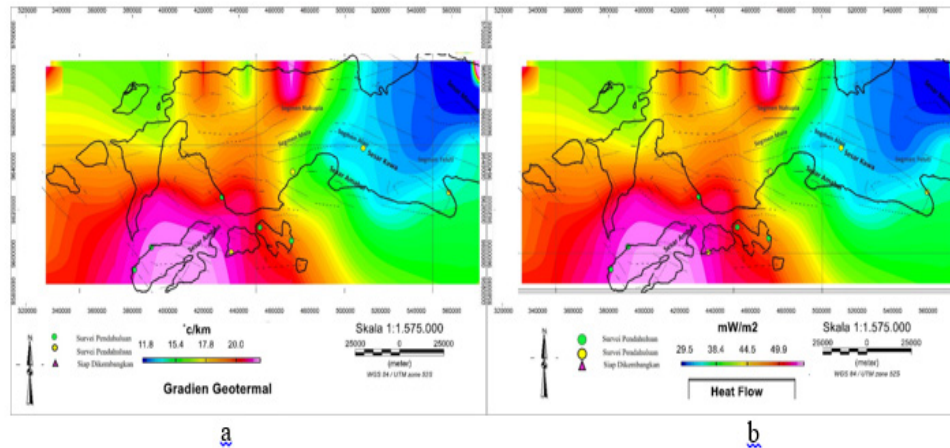
Tabel 1. Perhitungan kedalaman titik Curie (Zb), gradien geotermal, dan heat flow masing-masing blok

Blok	Kedalaman Titik Curie			Gradien Geotermal (°C/km)	Heat flow (mW/m2)
	Z0 (km)	Zt(km)	Zb (km)		
1	30.522	5.18	55.864	10.38	25.96
2	28.132	9.0343	47.2297	12.28	30.70
3	24.227	4.32	44.134	13.14	32.85
4	20.061	3.171	36.951	15.70	39.24
5	14.445	3.204	25.686	22.58	56.45
6	19.401	4.517	34.285	16.92	42.29
7	16.578	3.708	29.448	19.70	49.24
8	18.848	4.1349	33.5611	17.28	43.20
9	22.664	5.4266	39.9014	14.54	36.34
10	26.505	5.0333	47.9767	12.09	30.22
11	23.378	4.3621	42.3939	13.68	34.20
12	22.691	2.5524	42.8296	13.54	33.85
13	18.488	2.6545	34.3215	16.90	42.25
14	17.44	4.32	30.56	18.98	47.45

15	18.672	4.9526	32.3914	17.90	44.76
16	19.371	5.118	33.624	17.25	43.12
17	18.497	2.883	34.111	17.00	42.51
18	15.78	4.2475	27.3125	21.24	53.09
19	16.693	4.1984	29.1876	19.87	49.68
20	15.554	4.6879	26.4201	21.95	54.88
21	15.947	4.0986	27.7954	20.87	52.17
22	14.169	4.8766	23.4614	24.72	61.80
23	14.091	4.279	23.903	24.26	60.66
24	15.937	4.4756	27.3984	21.17	52.92
25	17.202	4.9635	29.4405	19.70	49.25
26	16.926	4.3117	29.5403	19.63	49.08
27	20.341	5.5714	35.1106	16.52	41.30
28	23.523	4.6349	42.4111	13.67	34.19
29	22.131	4.4508	39.8112	14.57	36.42
30	16.723	4.0482	29.3978	19.73	49.32



Gambar 10 Peta kedalaman titik Curie Seram Barat dan sekitarnya overlay dengan deliniasi kelurusan peta RTP (garis hitam) dan titik potensi panas bumi (<https://georima.esdm.go.id/2023>) dengan status Survei Pendahuluan Awal, Survei Pendahuluan Rinci, dan Siap Dikembangkan.



Gambar 11. Peta gradien geotermal (a) dan heat flow (aliran panas) (b) Seram Barat dan sekitarnya overlay dengan delineasi kelurusan peta RTP (garis hitam) dan titik potensi panas bumi (<https://georima.esdm.go.id/2023>) dengan status Survei Pendahuluan Awal, Survei Pendahuluan Rinci, dan Siap Dikembangkan.

DISKUSI

Kelurusan Pulau Seram Bagian Barat dari peta total horizontal gradien regional RTP data aeromagnet memperlihatkan pola yang cukup sesuai dengan peta geologi seperti Sesar Kawa-Manusela di Pulau Seram yang digambarkan sebagai sesar aktif (Patria, dkk., 2021). Terlihat pula kemenerusan sesar Kawa dibagian barat (segmen Mala) dari kelurusan data magnet dan tercatat juga kemungkinan sebagai sesar aktif dimana pada peta geologi belum tergambarkan sebelumnya. Pada daerah Seram Utara (batuan kuarter), yang tercatat banyak terdapat sumber gempa (Pusgen, 2017), juga terlihat adanya kelurusan sesar dimana pada peta geologi belum tergambarkan adanya struktur. Kenampakan kelurusan dibagian utara ini sesuai dengan Pairault, dll., (2003) yang menyatakan fold-thrust belt di Seram utara merupakan zona sesar aktif dan sumber gempa dangkal, meskipun pada peta sebelumnya belum tergambarkan. Adanya kesesuaian antara kelurusan magnet dengan data kegempaan dapat dijadikan penunjang untuk melakukan delineasi sesar terutama daerah yang tidak terdapat singkapan seperti pada batuan kuarter.

Penelitian mengenai aliran panas seluruh Indonesia oleh Hall dan Morley (2004) menunjukkan adanya dominasi panas di bagian barat Seram hingga Pulau Buru berarah timurlaut-baratdaya. Jika dikaitkan dengan peta CPD (Gambar 12) terlihat adanya pendangkalan sumber panas di bagian barat berarah timurlaut-barat daya. Peta CPD menunjukkan adanya pusat sumber panas di bawah Pulau Ambon yang memiliki pola aliran panas melingkar, dimana pada penelitian Hall dan Morley (2004) sumber panas masih terlihat membesar ke bagian barat

hingga Pulau Buru. Hal ini menunjukkan penelitian selanjutnya didaerah Pulau Buru penting dilakukan untuk mengetahui keterkaitan dengan pola sebaran panas di Pulau Seram.

Penelitian Lewerissa, dkk., (2020) menggunakan data EMAG2-V3 juga menyatakan titik panas terbesar terdapat di Pulau Ambon dengan kedalaman sekitar 10 km, sedangkan pada penelitian ini ± 18 km. Sebaran panas dari data Georima (georima.esdm.go.id) juga mengkonfirmasi adanya lokasi panas bumi di Pulau Ambon dengan status paling prospek dibandingkan daerah lain, yaitu Siap Dikembangkan. Berdasarkan penampang forward modeling (Gambar 12), pada bagian selatan Pulau Seram yaitu Pulau Saparua terlihat merupakan daerah gunung api yang memiliki korelasi yang cukup tergambarkan dengan baik adanya sumber panas di kedalaman yang relative dangkal. Namun dikarenakan berdasarkan peta CPD lokasi paling dangkal berada pada wilayah Ambon, sehingga belum dapat dipastikan sumber panas seperti apa di wilayah Ambon. Dengan demikian pola CPD penelitian ini memiliki korelasi yang baik dengan sebaran panas bumi dari data yang telah ada sebelumnya.

Secara umum sebaran potensi panas bumi Georima berkorelasi positif dengan kelurusan struktur dan kedalaman sumber panas dari peta CPD terutama di Ambon, Haruku, dan Saparua yang berupa pulau vulkanik. Namun pada sebaran panas bumi di Pulau Seram tidak menunjukkan korelasi yang positif dengan peta CPD dimana terdapat potensi panas bumi pada kedalaman ± 46 km, yaitu Banda Baru dan Tehoru (Seram bagian barat-tengah). Meskipun titik potensi panas bumi berada di nilai CPD yang dalam,

namun kedua titik tersebut dilintasi oleh sesar utama yaitu Kawa pada batuan metamorf Formasi Tehoru.

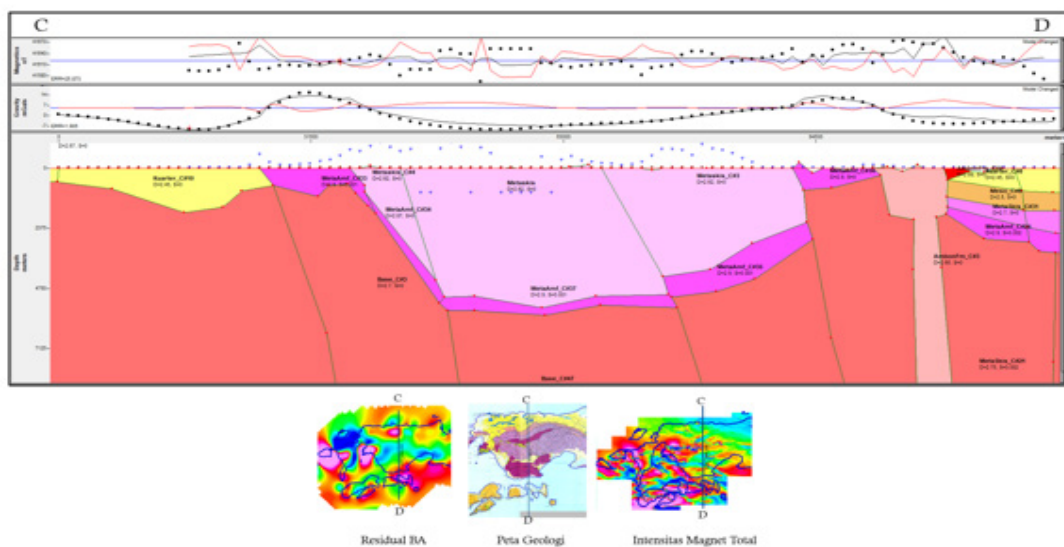
Pada umumnya terdapat dua jenis potensi panas bumi yaitu terkait vulkanisme (*volcanic-hosted*) dan tektonik (*fault-hosted*). Panas bumi tipe *volcanic-hosted* terletak di kompleks gunung api dengan dominasi air geotermal berkomposisi asam (HCl , H_2SO_4 , HF) yang terbentuk melalui absorpsi gas magmatik kedalam sirkulasi air tanah di kedalaman dan mengakibatkan penghancuran batuan, alterasi argilik tahap lanjut, dan silifikasi (Giggenbach, 1988). Panas bumi tipe *fault-hosted* memiliki sistem geotermal dengan sirkulasi panas yang dalam (amagmatik) dimana fluida geotermal berasal dari air meteorik yang terpanaskan oleh sirkulasi di kedalaman diantara zona sesar (Reed, 1983). Untuk menentukan jenis panas bumi maka dapat diperkuat dengan hasil pengujian fluida panas bumi.

Karakteristik fluida di Pulau Seram, yaitu Kairatu, masuk dalam kelompok daerah panas bumi Kelapa Dua dengan suhu air $58 - 60.4^\circ\text{C}$, pH netral (7 – 7.19) dan termasuk air klorida (Nanlohy, dkk., 2009). Daerah selanjutnya yaitu Tehoru, memiliki tipe air bikarbonat bersuhu hingga 94°C (Toisuta, dkk., 2021; Andayani, 2016). Merujuk pada tipe air bikarbonat dan klorida, pH netral, dan nilai CPD yang dalam, maka diindikasikan karakter geotermal di Seram terutama bagian tengah tidak terkait dengan vulkanisme melainkan akibat aktifitas tektonik dengan sumber panas yang dalam atau *fault-hosted*.

Karakteristik fluida di Pulau Ambon (Paais, dkk.,

2021), daerah Tawiri menunjukkan tipe air panas *peripheral water* dan *mature water* dengan pH netral dimana keseluruhan air menunjukkan adanya *mixing*. Namun studi inklusi fluida pada batuan (Sari, 2015) menunjukkan temperatur masa kini $199-263^\circ\text{C}$. Selain itu terdapat mineral yang berasosiasi dengan pirit dan kuarsa pada kedalaman ukur 260 m yang mengindikasikan adanya fluida asam di masa lampau. Fluida asam ini kemudian turun dan mengalami netralisasi pH yang diindikasikan keterdapat anhidrit. Sehingga pH netral pada sampel air kemungkinan akibat proses *mixing*. Terdapatnya fluida asam pada inklusi fluida di Pulau Ambon, menurut Giggenbach (1988) dapat diindikasikan sistem panas bumi daerah tersebut bertipe *volcanic-hosted*.

Dengan demikian terdapat dua tipe panas bumi di Seram Barat dan pulau sekitar yaitu *volcanic-hosted* dan *fault-hosted*. Menurut pola CPD (Gambar 12), tipe *volcanic-hosted* dicirikan dengan nilai dangkal dan dilalui kelurusan struktur seperti di Pulau Ambon, Haruku, Saparua. Sumber panas bumi *fault-hosted* yang dicirikan dengan nilai CPD yang sedang/dalam dan dilintasi kelurusan utama yaitu Sesar Kawa sehingga panas di kedalaman dapat termanifestasikan naik ke permukaan melalui sesar utama seperti di Pulau Seram (Elpaputih, Banda Baru dan Tehoru). Pada daerah di Seram Bagian barat, yaitu Kairatu (titik hijau di Pulau Seram Barat) terlihat memiliki panas yang cukup dangkal (± 24 km) yang menurut pola CPD terlihat masih satu sumber panas dengan Pulau Ambon.

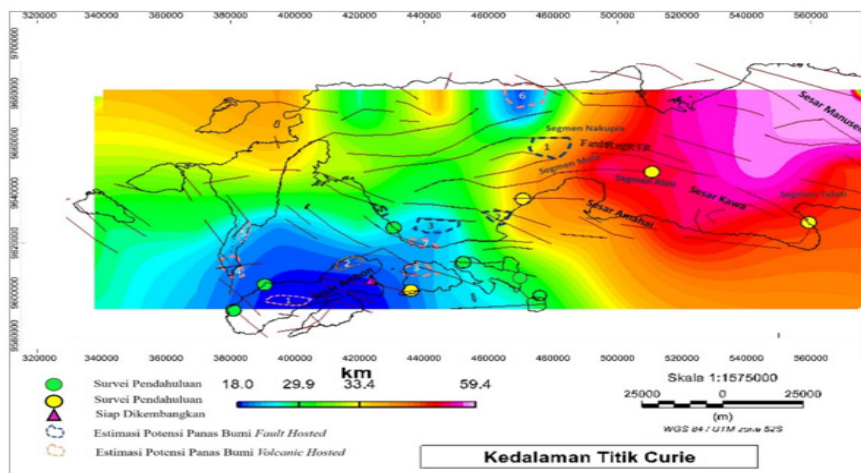


Gambar 12 Model bawah permukaan Pulau Seram berdasarkan data anomali gaya berat residual (survei darat) dan total intensitas magnet (survei airborne).

Dengan memperhatikan pola sebaran potensi panas bumi pada peta CPD, kelurusan struktur, dan titik sebaran panas Georima, maka dilakukan delineasi kemungkinan potensi panas bumi berikutnya (Gambar 13). Delineasi potensi panas bumi *volcanic-hosted* dilakukan pada daerah dengan nilai CPD rendah-menengah (hingga paling dalam 28 km) yang dilintasi kelurusan seperti pada Pulau Ambon, Saparua, dan beberapa daerah di Pulau Seram yang masih terkait sumber panas dari Pulau Ambon yaitu Asilulu dan Kairatu (garis putus-putus merah muda). Estimasi potensi panas bumi *fault-hosted* diperkirakan berada pada CPD bernilai sedang-dalam dan dilintasi oleh

struktur seperti sesar Kawa (garis putus-putus biru) yang seluruhnya terdapat di Pulau Seram bagian barat-tengah. \

Dengan demikian, estimasi potensi panas bumi (Gambar 13) tipe *volcanic hosted* didominasi berada pada bagian barat, dan *fault hosted* berada pada bagian timur. Terdapat satu anomali estimasi *volcanic hosted* di bagian utara (potensi nomor 6) yang ditandai adanya sesar dan nilai CPD yang dangkal, sekitar Taniwel Timur. Namun dikarenakan lokasi 6 tersebut berada di tepi data penelitian maka diperlukan data penunjang lain untuk validasi estimasi potensi pada area tersebut.



Gambar 13. Peta estimasi potensi panas bumi berikutnya daerah Pulau Seram Bagian Barat dan pulau sekitar berdasarkan peta CPD dan kelurusan struktur yang dikelompokkan menjadi fault hosted dan volcanic hosted

KESIMPULAN

Studi potensi panas bumi daerah Seram Barat dan pulau sekitar menggunakan data anomali magnet survei airborne menunjukkan adanya kesesuaian dengan titik potensi yang sudah ada saat ini. Terdapat sumber panas besar di bawah Pulau Ambon dengan kedalaman sekitar 18 km. Terdapat dua jenis potensi panas bumi di Seram Barat dan pulau sekitar yaitu *volcanic-hosted* terutama di pulau vulkanis seperti Pulau Ambon, Haruku, Saparua, dan Seram bagian barat) dan *fault-hosted* di Seram tengah-barat yang dilintasi oleh Sesar Kawa. Dengan mempelajari sebaran CPD dan kelurusan struktur diperkirakan masih terdapat potensi panas bumi baik di Pulau Seram (Asilulu, Kairatu, Taniwel), Haruku dan Saparua.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami ucapkan kepada Kepala Pusat Survei Geologi, selaku pimpinan instansi asal penulis, yang telah memberikan izin penulis untuk melanjutkan studi dan menggunakan data aeromagnet

dan gaya berat survei darat daerah penelitian. Ucapan terimakasih juga penulis ucapkan kepada tim pengumpul data airborne magnet dan radiometri resolusi tinggi tahun 2012 (Harry P. Siagian, Jufri Nasution, Imam Sobari, D.Z. Hayat, Undang R., Didi Pandu Tasno, Amid, Dede Taeran, dan Toni Tohadi) sehingga pemetaan airborne magnet dan radiometri daerah Maluku dapat diselesaikan. Terakhir penulis ucapkan terimakasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan atas dukungan finansial sehingga penulis dapat melakukan penelitian ini sebagai thesis pada Program di Sains Kebumihan, FITB, ITB.

KONTRIBUTOR PENYUSUN MAKALAH

Penyusun utama makalah adalah Siti Muti'ah (Penyelidik Bumi, Pusat Survei Geologi) yang telah melakukan studi di Sains Kebumihan FITB, ITB dengan Wawan Gunawan A.K sebagai Pembimbing Pertama, dan Afnimar sebagai Pembimbing Kedua. Penulis ketiga dan keempat merupakan rekan diskusi mengenai pengolahan data dan penulisan paper.

ACUAN

- Andayani, H. (2016). Research of Alteration Minerals and Its Impact on The Environment Around the Tehoru Hot Springs, Central of Mollucas. *Journal of Medical Science and Clinical Research (JMSCR)*, 4(11), 13943-13947.
- Badan Geologi, (2021). Peta Patahan Aktif Indonesia Skala 1:5.000.000. Badan Geologi, Bandung
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.K., (1975a). Analysis of Magnetic Anomalies over Yellowstone National Park: Mapping and Curie Point Isothermal Surface for Geothermal Reconnaissance. *Journal of Geophysical Research*, 80, 4461–4465.
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.K., (1975b). Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures. *Geophysics*, 40, 993–1013.
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.K., (1977). Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Geophysics*, 42, 41–50.
- Blakely, R. J. (1996). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge university press.
- Blakely, R.J., (1995). Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press, Cambridge.
- Claeson, D., Lundin, I. A., Persson, P. O., & Morris, G. (2018). U-Pb zircon age of the host granite of the REE and Mo (U, Th, Nb, Ta) mineralisation at Tåresåive, map sheet 27J Porjus SV, Norrbotten County.
- Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps* (pp. 181-197). Society of Exploration Geophysicists.
- Darman, H. (2014). Book Review: Mesozoic Geology and Paleontology of Misool Archipelago, Eastern Indonesia. *Berita Sedimentologi*, 31(1), 100-103.
- Fransbudit, 2008, Pemodelan 3D data gayaberat mikro time-lapse, Skripsi, Teknik Geofisika ITB.
- Georima.esdm.go.id “Panas Bumi”; <https://georima.esdm.go.id>.
- Giggenbach, W.F., (1988), Geothermal solute equilibria: derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators, *Geochimica and Cosmochimica Acta*, v. 52, p. 2749-2765.
- Global CMT Catalog Search; <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Grandis, H. (2009). Pengantar pemodelan inversi geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Grauch, V. J. S., & Cordell, L. (1987). Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, 52(1), 118-121.
- Hadibroto, H., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Piru, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Hadibroto, H., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Masohi, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Hadibroto, H., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Pulau Buano, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Hadibroto, H., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Taniwel, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Hadibroto, H., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Lumapelu, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570, 1-41.
- Hall, R., & Morley, C. K. (2004). Sundaland basins. *Continent-ocean interactions within East Asian marginal seas*, 149, 55-85.
- Honthaas, C., Réhault, J. P., Maury, R. C., Bellon, H., Hémond, C., Malod, J. A., & Arnaud, N. (1998). A Neogene back-arc origin for the Banda Sea basins: geochemical and geochronological constraints from the Banda ridges (East Indonesia). *Tectonophysics*, 298(4), 297-317.
- Lewerissa, R., Sismanto, S., Setiawan, A., & Pramumijoyo, S. (2020). The igneous rock intrusion beneath Ambon and Seram islands, eastern Indonesia, based on the integration of gravity and magnetic inversion: its implications for *geothermal* energy resources. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29(4), 596-616.
- Mayhew, M. A. (1985). Curie isotherm surfaces inferred from high altitude magnetic anomaly data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B3), 2647-2654.
- Nanlohy, F., Bangbang S., Arif M., Janes S., & Robertus S. L. S. (2009). “Penyelidikan Pendahuluan Daerah Panas Bumi P, Seram, Kabupaten Maluku Tengah dan Kabupaten Seram Bagian Barat – Maluku”, Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun 2009, Pusat Sumber Daya Geologi: Bandung
- Nasution, J. dan Setyanta, B., (2007), Peta Anomali Bouguer Lembar Ambon, Maluku, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Okubo, Y., Graf, R. J., Hansen, R. O., Ogawa, K., & Tsu, H. (1985). Curie point depths of the island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, 50(3), 481-494.

- Paais, C., Haryanto, A. D., Hutabarat, J., & Gentana, D. (2021). Geokimia Air Panas Dan Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan Pada Potensi Panas Bumi Daerah Tawiri, Kecamatan Teluk Ambon, Kota Ambon, Provinsi Maluku. *Geoscience Journal*, 5(2), 138-149.
- Padmawidjaja, T. dan Setiadi, I., (2007), Peta Anomali Bouguer Lembar Masohi, Maluku, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Pairault, A.A., Hall, R. and Elders, C.F. (2003). Structural styles and tectonic evolution of the Seram Trough, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*. 20(10): 1141–1160.
- Patria, A., Tsutsumi, H., & Natawidjaja, D. H. (2021). Active fault mapping in the onshore northern Banda Arc, Indonesia: Implications for active tectonics and seismic potential. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218, 104881
- PuSGen, P. G. N. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. *Bandung: Puskim*
- Quintero, W., Campos-Enríquez, O., & Hernández, O. (2019). Curie point depth, thermal gradient, and *heat flow* in the Colombian Caribbean (northwestern South America). *Geothermal Energy*, 7(1), 1-20.
- Reed, M.J., ed., (1983), Assessment of lowtemperature geothermal resources of the United States-1982: U.S. Geological Survey Circular 892, 73 p.
- Sari, I. W. A. (2015). STUDI ALTERASI HIDROTERMAL BAWAH PERMUKAAN SUMUR BETA-01, LAPANGAN PANAS BUMI BETA, AMBON DENGAN METODE DIFRAKSI SINAR-X (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Setyanta, B., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Tanjung Woka, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Setyonegoro, W., Kurniawan, T., Ahadi, S., Rohadi, S., Hardy, T., & Prayogo, A. S. (2017). Validity of active fault identification through magnetic anomalous using earthquake mechanism, microgravity and topography structure analysis in Cisolok area. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1857, No. 1). AIP Publishing.
- Simanjuntak, H. (2021), Identifikasi Struktur Bawah Permukaan dengan Pemodelan 2-D Menggunakan Data Gayaberat Pada Daerah Maluku, ITERA
- Spector, A., & Grant, F. S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293-302.
- Springer, M. (1999). Interpretation of heat-flow density in the Central Andes. *Tectonophysics*, 306(3-4), 377-395.
- Sulandari, B., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Assilulu, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Sulandari, B., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Pulau Kelang, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Sulandari, B., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Saparua, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Sulandari, B., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Ambon, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Suteja, A., (2023). Peta Citra Intensitas Magnetik Total Lembar Tehoru, Maluku, Skala 1:100.000, Badan Geologi: Bandung
- Talwani, M. Worzel, J.L. and Ladisman, M. 1959. Rapid Gravity Computation for Two Dimensional Bodies with Application to The Medicino Submarine Fractures Zone. *Journal of Geophysics Research*. Vol. 64 No.1.
- Tanaka A., Okubo, Y., Matsubayashi, O., 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics*, 306, 461-470
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Tjokrosapoetro, S., Achdan, A., Suwitodirdjo, K., Rusmana, E., Abidin, H.Z., Peta Geologi Lembar Masohi, Maluku, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1993
- Tjokrosapoetro, S., Rusmana, E., Achdan, A., Peta Geologi Lembar Ambon, Maluku, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1993
- Toisuta, Y. M., Agus Didit, H., Hutabarat, J., & Gentana, D. (2021). Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan Pada Manifestasi Panas Bumi Berdasarkan Analisis Geokimia Air Panas Daerah Kecamatan Tehoru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. *Geoscience Journal*, 5(3), 267-279.