

IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN ANALISIS DERIVATIF SERTA PEMODELAN INVERSI DATA GAYABERAT DI DAERAH PROSPEK PANAS BUMI MATANGNGA SULAWESI BARAT

Winda Aprilia Rosa¹, Alimuddin¹, Rahmat Catur Wibowo^{2*}

¹Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung, Lampung, Indonesia

²Prodi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Universitas Lampung, Lampung, Indonesia

e-mail : rahmat.caturwibowo@eng.unila.ac.id

Abstrak. Penelitian ini mengeksplorasi struktur geologi bawah permukaan di area prospek panas bumi Matangnga Sulawesi Barat. Pada area penelitian ditemukan beberapa indikator sistem panas bumi berupa manifestasi panas bumi yaitu mata air panas yang bersuhu 60,9°C dan alterasi batuan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan anomali Bouguer lengkap daerah penelitian, memperkirakan kedalaman anomali regional dan residual daerah penelitian, kemudian mengidentifikasi zona patahan berdasarkan hasil analisis derivatif dan mendapatkan model distribusi densitas bawah permukaan untuk menentukan model sistem panas bumi area penelitian. Pada penelitian ini menggunakan metode gayaberat yang dikenal mampu mengidentifikasi patahan berdasarkan variasi nilai gayaberat yang dipengaruhi adanya nilai rapat massa batuan yang bervariasi di bawah permukaan. Hasil dari penelitian ini didapatkan persebaran nilai anomali Bouguer lengkap pada rentang 10 mGal sampai 79 mGal. Kedalaman anomali regional rata-rata didapatkan 5038 meter dan anomali residual rata-rata didapatkan 214 meter serta lebar jendela sebesar 31. Dari analisis derivatif yang dilakukan terdapat 6 struktur patahan yang berkorelasi dengan patahan geologi, kemudian berdasarkan perhitungan menggunakan diagram Roset diketahui arah patahan pada area penelitian memiliki arah yang sama yaitu barat daya-timur laut. Serta didapatkan distribusi densitas dengan rentang nilai 1,5-2,9 g/cm³. Anomali pada densitas 2 -2,9 g/cm³ diperkirakan merupakan batuan penudung (*caprock*) yang memiliki kedalaman 0 - 2900 meter. Anomali dengan densitas rendah yaitu 1,5-1,9 g/cm³ diperkirakan sebagai reservoir yang memiliki kedalaman 600 - 5000 m.

Kata Kunci: Anomali Bouguer Lengkap, Analisis Derivatif, Gayaberat, Patahan

Abstract. This study explores the subsurface geological structure in the Matangnga geothermal prospect area of West Sulawesi. In the research area, several indicators of geothermal systems were found in the form of geothermal manifestations, namely hot springs with a temperature of 60.9°C and rock alteration. This study aims to obtain complete Bouguer anomalies in the research area, estimate the depth of regional and residual anomalies in the research area, then identify fault zones based on the results of derivative analysis and obtain a subsurface density distribution model to determine the geothermal system model in the research area. This study uses the gravity method which is known to be able to identify faults based on variations in gravity values influenced by the presence of varying rock mass density values below the surface. The results of this study obtained the distribution of complete Bouguer anomaly values in the range of 10 mGal to 79 mGal. The average regional anomaly depth was obtained 5038 meters and the average residual anomaly was obtained 214 meters and the window width was 31. From the derivative analysis carried out there were 6 fault structures that correlated with geological faults, then based on calculations using the Roset diagram it was found that the direction of the fault in the research area had the same direction, namely southwest-northeast. And a density distribution was obtained with a value range of 1.5-2.9 g / cm³. Anomalies at a density of 2 -2.9 g / cm³ are estimated to be caprock with a depth of 0 - 2900 meters. Anomalies with low density, namely 1.5-1.9 g / cm³, are estimated to be reservoirs with a depth of 600 - 5000 m.

Keywords: Complete Bouguer Anomaly, Derivative Analysis, Gravity, Fault

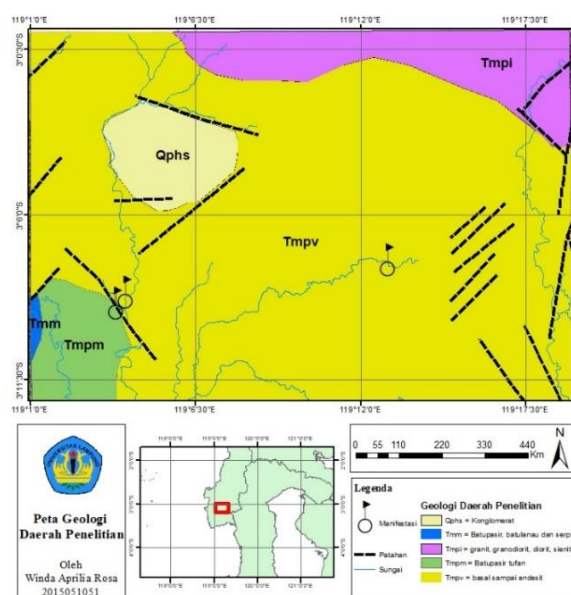
PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara dengan potensi energi panas bumi yang sangat besar karena posisinya yang berada di jalur gunung api aktif atau *ring of fire*. Jalur ini terbentuk dari interaksi tiga lempeng utama: Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Ketiga lempeng ini menyebabkan aktivitas tektonik yang tinggi menghasilkan banyak gunung api dan peluang besar untuk sistem panas bumi. Potensi panas bumi yang

melimpah ini menjadikan Indonesia salah satu negara dengan cadangan panas bumi terbesar di dunia (PSDG, 2009).

Salah satu wilayah prospek panas bumi yang signifikan adalah Matangnga, Sulawesi Barat. Di daerah ini ditemukan adanya indikasi keberadaan sistem panas bumi dengan ditemukannya beberapa manifestasi berupa mata air panas dengan suhu mencapai 60,9°C serta alterasi batuan disekitarnya (PSDG, 2010). Manifestasi di daerah Matangnga didominasi oleh batuan vulkanik yang berkomposisi andesitik hingga trahitik. Kemudian morfologi di daerah Lilli-Matangnga didominasi dengan perbukitan bergelombang dan perbukitan terjal yang memiliki bentuk kerucut yang diduga merupakan batuan vulkanik muda bekas dari pusat erupsi (Kadir, 2011). Reservoir di daerah penelitian menurut penyelidikan terpadu geologi PSDG diperkirakan batuan produk Vulkanik Walimbong seperti pada peta geologi pada Gambar 1. Formasi ini berumur Tersier yang berada di bawah satuan vulkanik tak terpisahkan yang tersusun dari lava yang berkomposisi andesitik hingga basaltik yang diperkirakan sudah terdeformasi yang membentuk rekahan-rekahan secara menerus dan bersifat permeabel. Struktur tektonik dominan, berupa sesar naik dan mendatar, menjadi faktor penting dalam pengendalian sistem panas bumi karena berperan sebagai jalur migrasi fluida panas dari *heat source* ke reservoir hingga ke permukaan menjadi manifestasi (Grant & Bixley, 2011). Pemahaman mendalam mengenai struktur geologi di daerah ini menjadi kunci dalam menentukan potensi energi panas bumi yang ada. Namun tantangan utama dalam eksplorasi panas bumi adalah keterbatasan survei geologi konvensional terutama untuk struktur patahan yang berada jauh di bawah permukaan. Untuk mengatasi hal ini, survei geofisika dengan metode gaya berat digunakan. Metode ini mampu mendeteksi variasi densitas batuan bawah permukaan berdasarkan variasi percepatan gravitasi bumi (Telford dkk, 1990). Penelitian gaya berat memberikan informasi mengenai struktur patahan, distribusi densitas batuan, serta gambaran bawah permukaan yang tidak terlihat oleh survei geologi langsung (Bott, 1962).

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan anomali Bouguer pada daerah Matangnga, menggunakan analisis spektrum untuk memperkirakan kedalaman anomali residual dan regional daerah Matangnga, mengidentifikasi zona patahan berdasarkan hasil analisis derivatif dan mendapatkan model distribusi densitas bawah permukaan untuk menentukan model sistem panas bumi daerah penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan mampu menambahkan informasi geologi di bawah permukaan yang akurat untuk mendukung eksplorasi dan pemanfaatan energi panas bumi di Matangnga, Sulawesi Barat. Kemudian juga dapat menjadi referensi tambahan untuk penggunaan metode gaya berat pada studi panas bumi di Indonesia.



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Djuri dkk., 1998)

METODOLOGI

Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan di wilayah potensi panas bumi Matangnga, Sulawesi Barat menggunakan metode gaya berat. Pendekatan ini mencakup tahapan utama yaitu studi daerah penelitian, mengumpulkan data, pengolahan, analisis hasil penelitian, dan interpretasi. Data yang digunakan bersumber dari data citra satelit GGMplus 2013. Data ini meliputi informasi percepatan gravitasi serta topografi atau elevasi wilayah penelitian. GGMplus dipilih karena memiliki resolusi spasial tinggi, mencapai 200 meter, yang memungkinkan gambaran detail mengenai distribusi densitas bawah permukaan (Hirt dkk., 2013). Wilayah penelitian ini dibatasi menggunakan perangkat lunak *Google Earth* dengan koordinat geografis 119°1'0" - 119°17'30" BT dan 3°0'30" - 3°11'30" LS.

Data yang diperoleh dari citra satelit kemudian diproses untuk menghasilkan anomali Bouguer lengkap, yang menjadi dasar dalam analisis lebih lanjut. Pengolahan data ini mencakup berbagai koreksi, seperti koreksi lintang untuk menghilangkan pengaruh perbedaan lintang geografis yang menyebabkan variasi gravitasi yang disebabkan oleh perbedaan jari-jari bumi di kutub dan ekuator (Hinze dkk., 2013). Kemudian untuk mengoreksi perbedaan gravitasi akibat variasi ketinggian titik pengukuran dari rata-rata permukaan laut dilakukan koreksi udara bebas (*Free Air Correction*). Koreksi ini dihitung menggunakan formula: $FAC = -0,3086 \times h$ dengan h adalah elevasi (Telford dkk., 1990). Koreksi Bouguer untuk menghitung tarikan massa batuan antara titik pengukuran dan permukaan laut, menggunakan densitas rata-rata batuan ($\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$) (Telford dkk., 1990). Serta koreksi medan (*Terrain Correction*) untuk mempertimbangkan persebaran massa batuan yang tidak merata di area titik pengukuran, khususnya di daerah dengan topografi bervariasi (Blakely, 1995). Setelah semua koreksi diterapkan, nilai anomali Bouguer lengkap dihitung dengan formula:

$$\nabla g_{Bouguer} = g_{obs} - g_{normal} + FAC - BC - TC$$

Tahap analisis dilakukan untuk memisahkan komponen anomali, mengidentifikasi struktur patahan, dan mengestimasi kedalaman regional dan residual. Metode yang digunakan yaitu analisis spektrum, yang melibatkan transformasi Fourier dalam mengubah sinyal dan kemudian anomali dipisah berdasarkan grafik logaritma amplitudo terhadap bilangan gelombang (Blakely, 1995; Kadir, 2000; Rasimeng dkk., 2024). Hasil dari proses ini yaitu mendapatkan batasan kedalaman anomali Bouguer regional dan residual (Sarkowi & Wibowo, 2021). Setelah kedalaman dan lebar jendela dihitung, anomali regional dipisahkan menggunakan metode *moving average*, sementara anomali residual dihitung sebagai selisih antara anomali Bouguer lengkap dan anomali regional (Sarkowi, 2014).

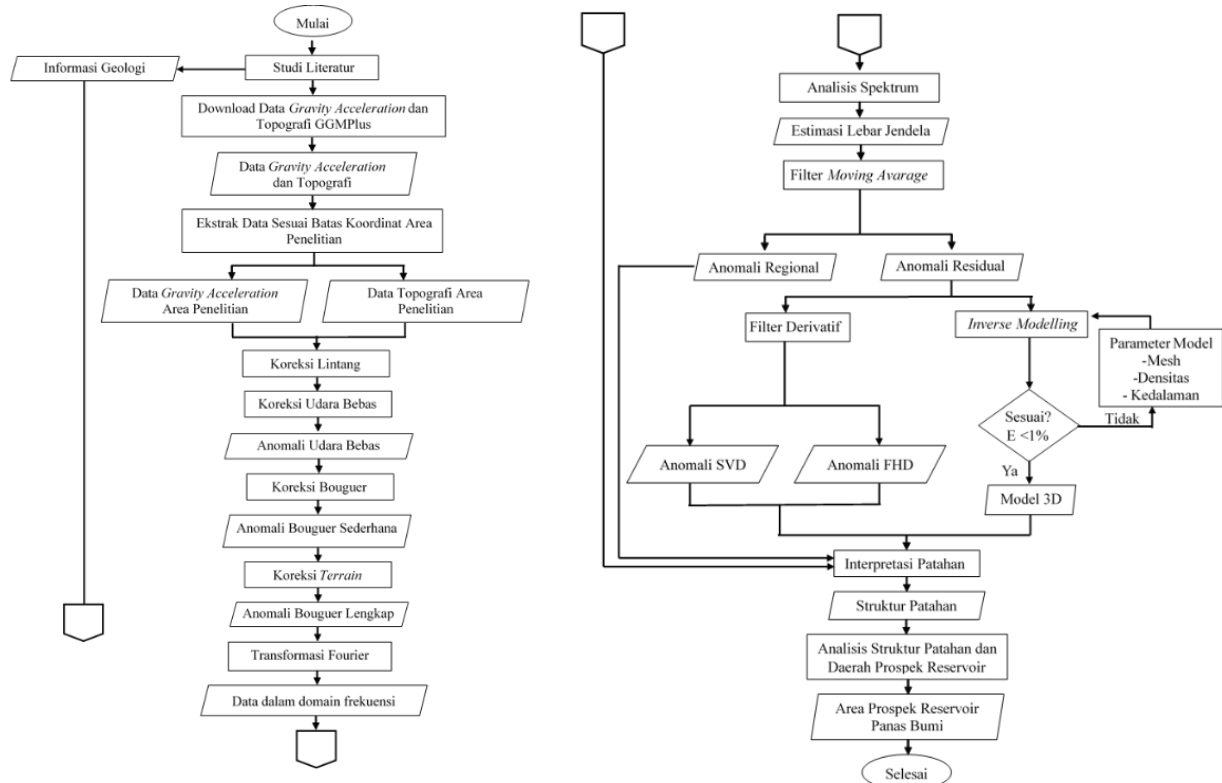
Selain itu analisis derivatif juga dilakukan untuk mengidentifikasi struktur patahan di bawah permukaan. Metode ini mencakup turunan horizontal pertama (FHD) untuk menentukan batas kontak geologi, serta turunan vertikal kedua (SVD) yang digunakan untuk mendapat batas litologi, struktur patahan dan sumber anomali berasal di dekat permukaan (Sarkowi, dkk. 2021a). Hasil analisis ini divisualisasikan untuk memetakan lokasi patahan dan arah dominan struktur geologi. Proses ini dilakukan dengan memasukkan matriks SVD Elkins seperti Tabel 1.

Tabel 1. Filter SVD Elkins (Elkins, 1951)

Filter SVD Elkins tahun 1951				
0.0000	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.0000	-0.0334	-1.0668	-0.0334	0.0000
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.0000	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000

Langkah terakhir adalah pemodelan inversi 3D untuk menghasilkan distribusi densitas bawah permukaan secara lebih jelas. Pemodelan ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Grablox v1.7, dengan data residual sebagai input utama dan visualisasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Bloxer v1.6e. Model inversi 3D dapat digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur di daerah penelitian yang lebih baik dari 2D

(Rasimeng dkk., 2020). Model ini menghasilkan representasi tiga dimensi dari distribusi densitas, yang selanjutnya digunakan untuk menginterpretasi keberadaan struktur patahan, arah dominannya, serta hubungan antara densitas batuan dan potensi panas bumi di daerah penelitian. Adapun diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.

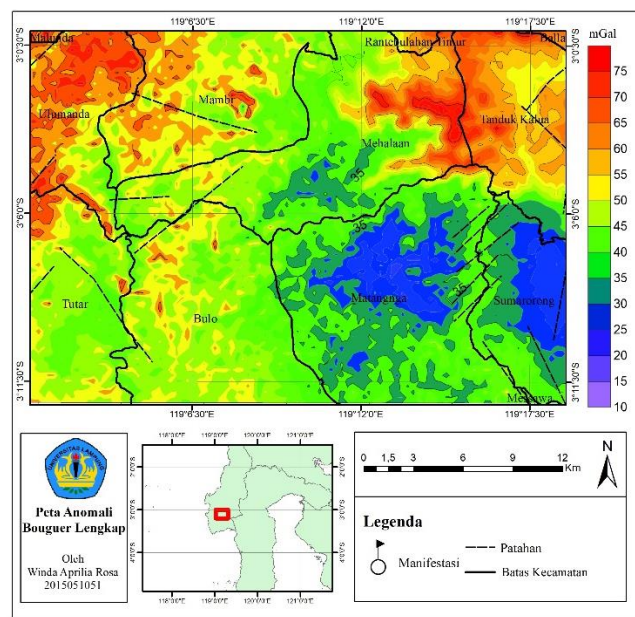


Gambar 2. Diagram alir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Anomali Bouguer Lengkap

Anomali ini digunakan dalam geofisika untuk mengidentifikasi variasi dalam nilai rapat massa batuan di bawah permukaan bumi. Peran anomali Bouguer untuk area prospek panas bumi adalah menggambarkan variasi rapat massa batuan yang menyusun sistem panas bumi (Wulandari dkk., 2022).



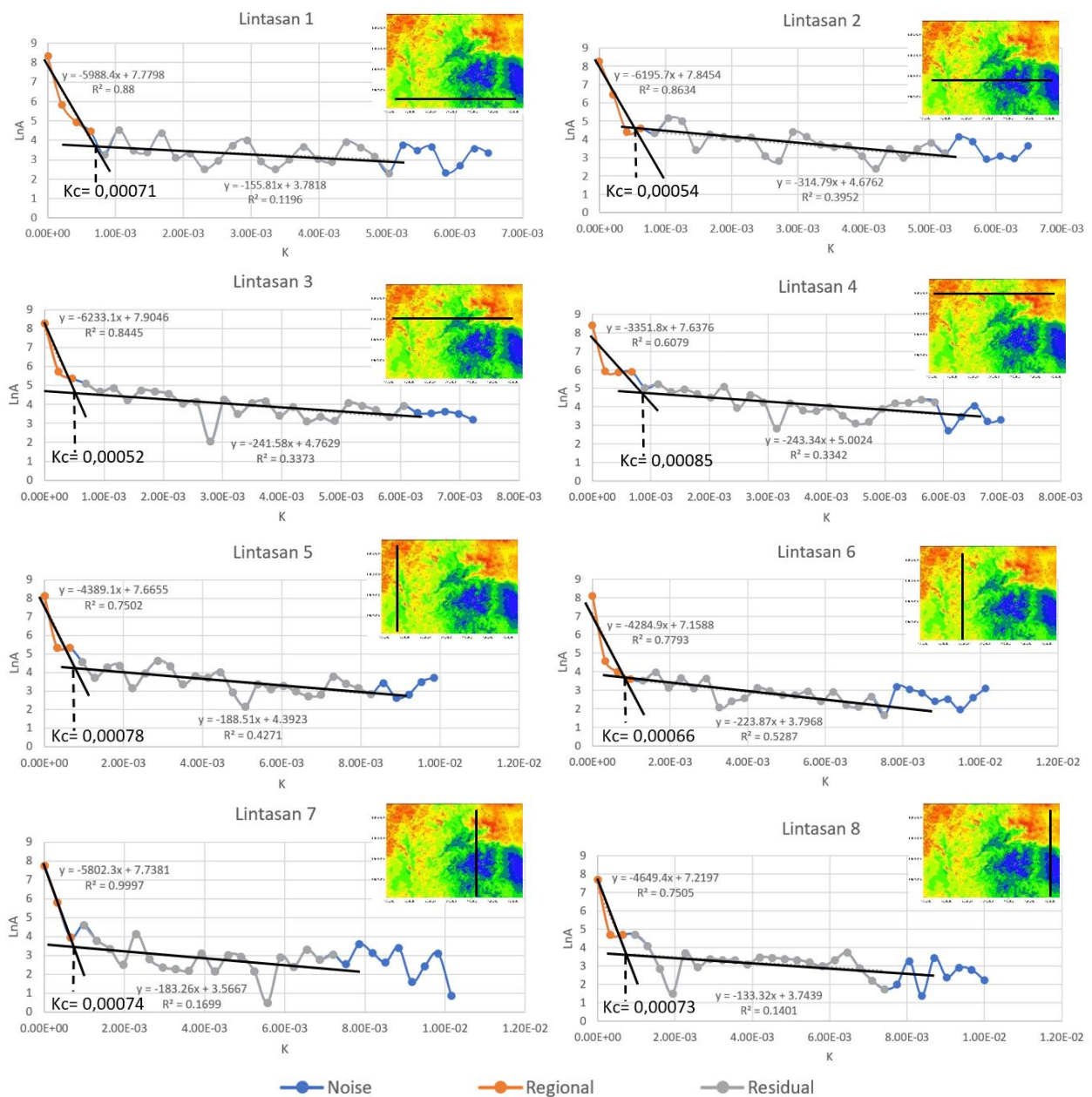
Gambar 3. Peta anomali Bouguer lengkap daerah penelitian

Peta anomali Bouguer lengkap pada gambar 3 menunjukkan rentang nilai anomali 10 mGal sampai 79 mGal yang menunjukkan respon variasi massa jenis batuan di area penelitian. Berdasarkan nilai tersebut, terbagi 3 anomali yaitu anomali rendah pada rentang nilai 10 mGal sampai 30 mGal menandakan batuan densitas rendah. Anomali sedang pada nilai 30 mGal sampai 55 mGal ditunjukkan dengan warna biru sampai kuning diduga batuan dengan densitas menengah. Anomali tinggi pada rentang 55 mGal sampai 75 mGal dengan warna kuning hingga warna merah menandakan batuan dengan densitas tinggi.

Terdapat tiga manifestasi pada bagian timur tepatnya di kecamatan Matangnga dan di bagian barat daya tepatnya di kecamatan Tutar yang berada pada anomali rendah sampai anomali sedang. Manifestasi ini menunjukkan terdapatnya dugaan adanya struktur patahan yang membuat fluida panas naik ke permukaan. Terlihat bahwa sebagian patahan geologi berada diantara batas nilai anomali rendah dan tinggi. Ketika sebuah daerah menunjukkan anomali Bouguer yang tinggi menandakan adanya variasi kontras dalam rapat massa batuan yang tinggi yang sering terjadi di daerah dengan struktur geologi yang kompleks, seperti adanya intrusi magmatik, tubuh mineral, atau variasi litologi yang signifikan.

Analisis Spektrum

Analisis ini menggunakan 8 lintasan yang mewakili semua data pada anomali Bouguer lengkap. Proses dari FFT menghasilkan nilai riil dan imajiner yang dihitung untuk memperoleh nilai $\ln A$ dan bilangan gelombang k menggunakan Microsoft Excel. Setelah semua nilai diperoleh, dilakukan *ploting* antara nilai $\ln A$ dan k untuk memperoleh nilai *cutoff* di daerah tersebut yang nantinya digunakan dalam penentuan lebar jendela. Proses analisis spektrum ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik $\ln A$ vs k pada lintasan 1-8

Hasil dari analisis spektrum dilakukan perata-rataan nilai untuk menentukan lebar jendela. Hasil lebar jendela dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kedalaman anomali dan estimasi lebar jendela

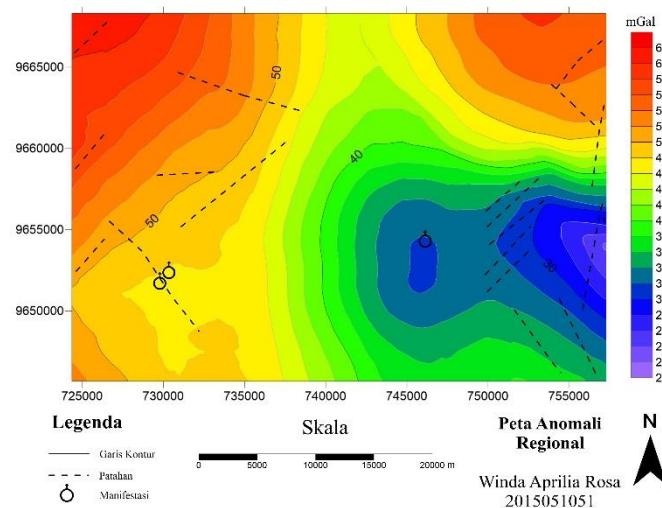
Line	Kreg (m)	Kres (m)	C1	C2	K	LAMDA	N
1	-5988.4	-155.8	7.8	3.6	0.00071	8788.7	29.3
2	-6195.7	-314.8	7.8	4.7	0.00054	11659.4	38.9
3	-6233.1	-241.6	7.9	4.8	0.00052	11982.6	39.9
4	-3351.8	-243.3	7.6	5.0	0.00085	7411.6	24.7
5	-4389.1	-188.5	7.7	4.4	0.00078	8063.4	26.9

Line	Kreg (m)	Kres (m)	C1	C2	K	LAMDA	N
6	-4284.9	-223.9	7.2	3.8	0.00083	7589.6	25.3
7	-5802.3	-183.3	7.7	3.6	0.00074	8463.7	28.2
8	-4649.4	133.3	7.2	3.7	0.00073	8645.7	28.8
Rata-rata	-5111.8	-177.2	7.6	4.2	0.00071	9075.6	30.3

Didapatkan rata-rata kedalaman regional adalah -5111,8 meter hasil ini dikatakan sebagai bidang batas antara kerak bumi bagian bawah dengan kerak bagian atas. Sedangkan rata-rata kedalaman anomali residual adalah -177,2 meter dimana diinterpretasikan sebagai kedalaman dari batuan penyusun kerak bumi yang tepat berada di atas batuan dasar lapisan terluar bumi (basement). Lalu lebar jendela yang didapatkan sebesar 30,3 yang kemudian dibulatkan ke bilangan ganjil terdekat yaitu 31.

Anomali Regional

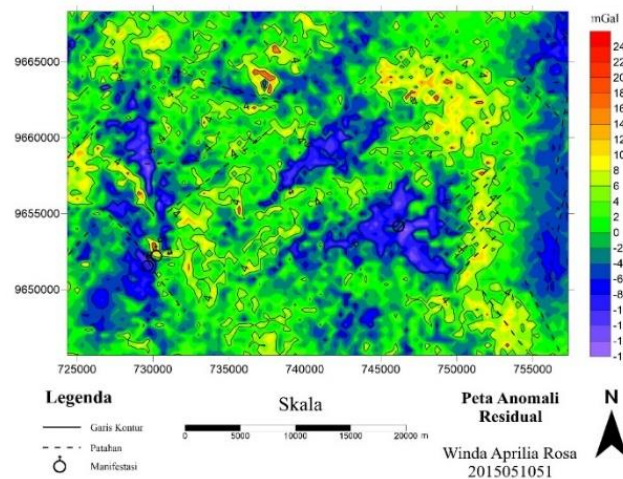
Anomali regional ditunjukkan pada Gambar 5 dengan anomali memiliki nilai 20 mGal hingga 62 mGal. Anomali tinggi terletak di daerah barat dan timur laut area penelitian lalu anomali rendah terletak pada daerah tenggara.



Gambar 5. Peta kontur anomali regional daerah penelitian.

Anomali Residual

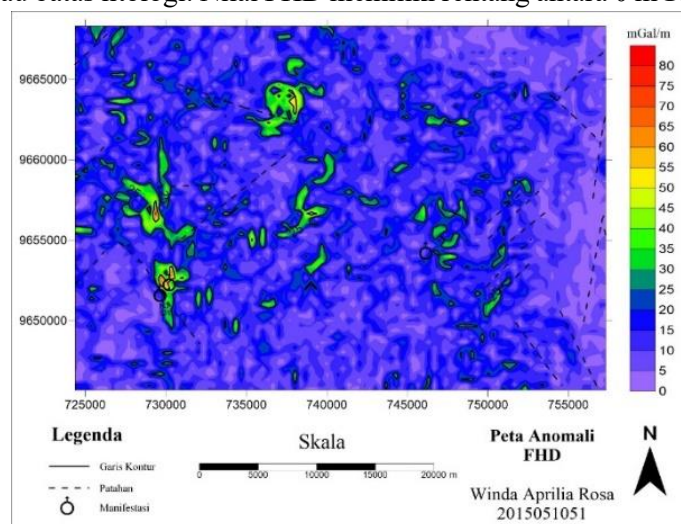
Peta anomali residual didapatkan seperti pada Gambar 6. Persebaran nilai anomali residual pada rentang -16 mGal sampai 24 mGal menunjukkan bahwa ada perubahan yang cukup besar dalam struktur geologi yang mempengaruhi gravitasi lokal. Diketahui anomali residual menggambarkan pola anomali yang mempunyai panjang gelombang yang lebih pendek dibandingkan regional, hal ini mencerminkan adanya pengaruh anomali yang dekat dengan permukaan (Zaenudin dkk, 2021). Hal ini dibuktikan dengan adanya manifestasi panas bumi pada daerah tersebut yaitu di bagian barat daya dan sedikit ke timur daerah penelitian.



Gambar 6. Peta anomali residual daerah penelitian

First Horizontal Derivative (FHD)

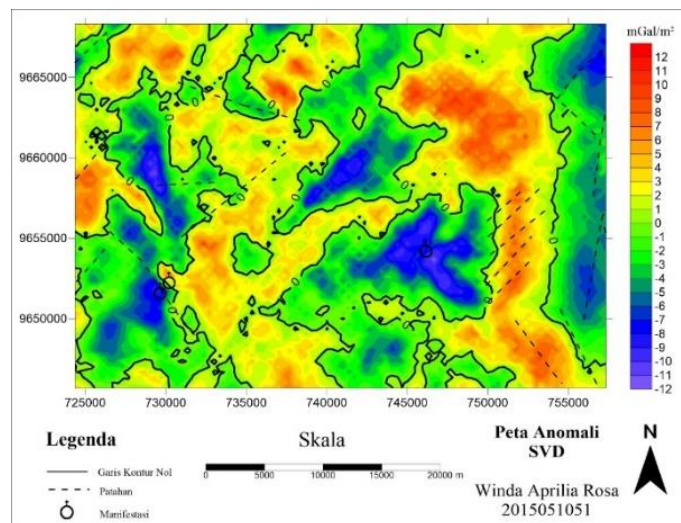
Gambar 7 merupakan Peta anomali FHD menunjukkan nilai kontur maksimum dan minimum yang merupakan struktur sesar atau batas litologi. Nilai FHD memiliki rentang antara 0 mGal/m sampai 80 mGal/m.



Gambar 7. Peta anomali FHD

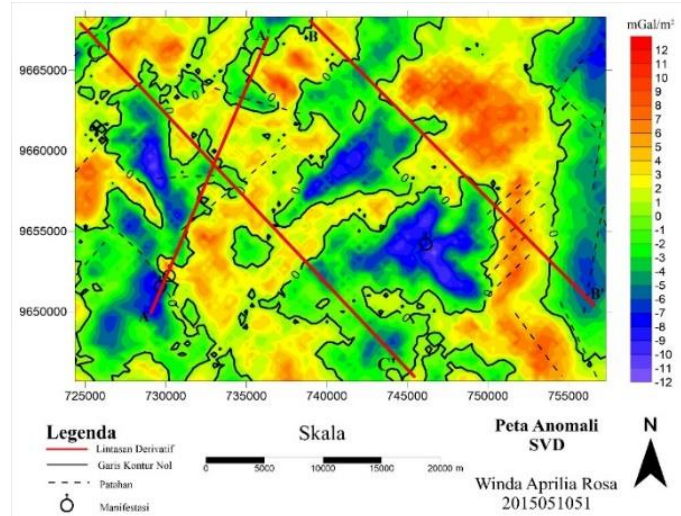
Second Vertical Derivative (SVD)

Peta SVD pada Gambar 8 menunjukkan rentang nilai berkisar antara -12 mGal/m² sampai 12 mGal/m². Nilai 0 pada SVD dapat mengindikasikan sebuah perubahan densitas yang signifikan berasal dari patahan, batas anomali, batas litologi dan batas cekungan (Sarkowi & Wibowo, 2021b). Terlihat beberapa daerah yang dibatasi oleh nilai SVD 0 dilewati oleh patahan geologi, ini dapat diindikasikan sebagai keberadaan patahan, namun banyak anomali SVD 0 yang tidak berkorelasi dengan data geologi kemungkinan hal ini dipengaruhi karena adanya patahan-patahan lokal yang berada pada daerah penelitian ataupun batas kontak.



Gambar 8. Peta anomali SVD

Gambar 9 merupakan lintasan yang dibuat berpotongan terhadap kontur nol pada anomali SVD yang juga melewati garis patahan geologi. Hal tersebut didasarkan pada informasi keberadaan patahan dari peta geologi, untuk memvalidasi keterdapatan patahan yang dipetakan. Data yang didapat dari hasil *slicing* adalah berupa nilai anomali gaya berat SVD, FHD serta interval pengambilan data. Data ini kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik yang akan memperlihatkan grafik anomali SVD serta FHD pada lintasan yang dipilih.



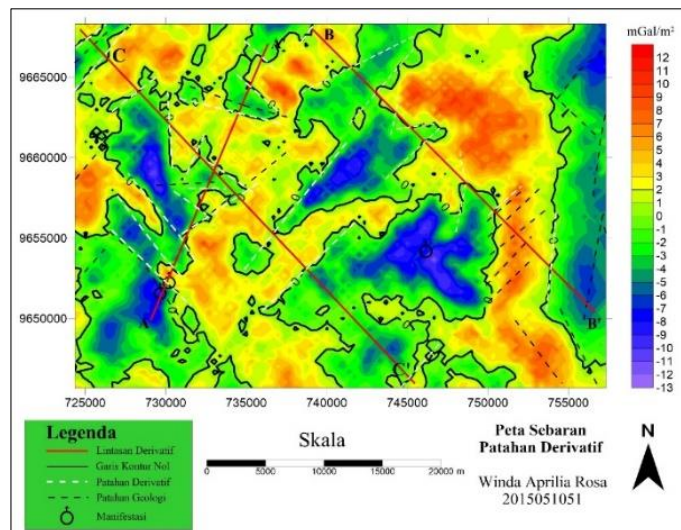
Gambar 9. Peta lintasan analisis derivatif pada anomali SVD

Hasil analisis dari kurva anomali FHD dan kurva anomali SVD pada lintasan A-A' yang dilakukan terdapat 10 patahan yang berada pada kurva FHD maksimum atau minimum dan kurva SVD berada pada nilai 0. Kemudian kurva hasil analisis derivatif pada lintasan B-B' terdapat 9 patahan dan hasil analisis derivatif pada lintasan C-C' terdapat 9 patahan.

Interpretasi Struktur Patahan

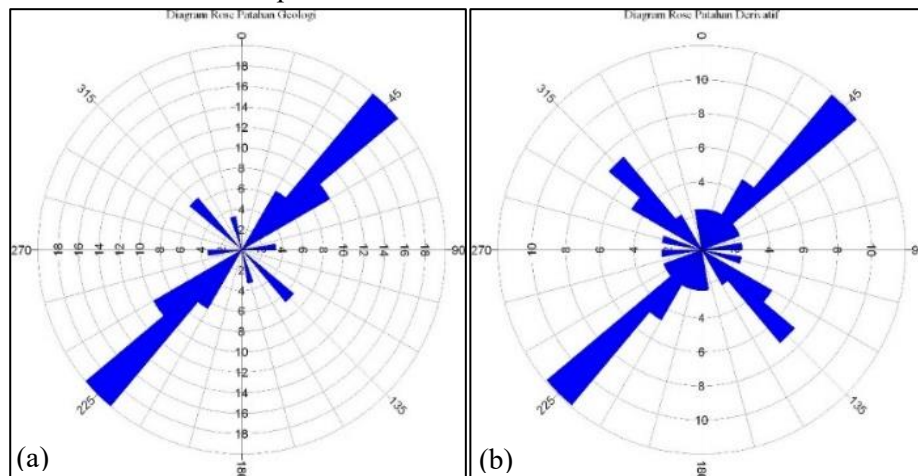
Struktur yang teridentifikasi di lintasan A-A' memiliki arah dominan barat laut-tenggara, sedangkan pada lintasan B-B' dan C-C' berarah timur laut-barat daya sesuai dengan arah struktur geologi pada peta geologi. Gambar 10 menunjukkan hasil interpretasi dari analisis derivatif dan peta geologi daerah penelitian didapatkan adanya 6 struktur patahan derivatif yang saling berkorelasi dengan patahan geologi sehingga diduga

bahwasanya struktur tersebut terdapat patahan. Di sisi lain terdapat struktur 23 patahan derivatif yang tidak mempunyai kecocokan dengan data peta geologi daerah penelitian dapat dilihat keberadaannya dengan pemodelan 3D inversi.



Gambar 10. Peta persebaran patahan derivatif pada anomali SVD

Berdasarkan perhitungan patahan dari analisis derivatif menggunakan metode SVD dan FHD diproyeksikan dalam diagram Roset pada Gambar 11. Diagram Roset membandingkan panjang patahan pada arah tertentu dengan jumlah keseluruhan patahan. Hasil dari perbandingan kedua diagram Roset diatas didapatkan bahwa arah dari patahan menunjukan kesamaan arah dominan barat daya-timur laut. Patahan yang terjadi berkaitan dengan geologi regional daerah penelitian yang memiliki tegasan utama pada Sulawesi bagian mandala barat yang dikontrol oleh sesar dengan pola struktur berarah barat daya-timur laut yang berperan penting dalam pembentukan manifestasi panas bumi.

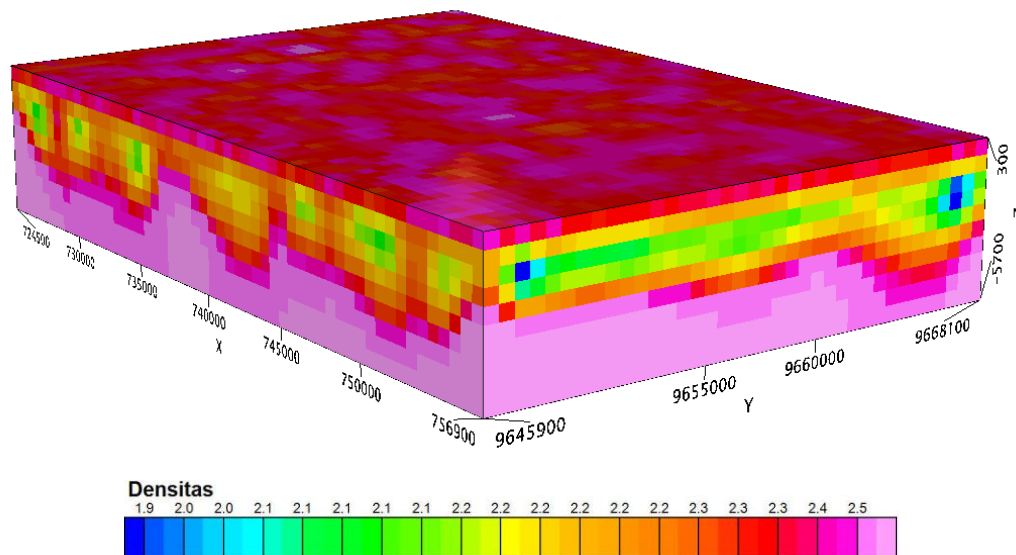


Gambar 11. (a) Diagram Roset patahan geologi, (b) Diagram Roset patahan derivatif

Inverse Modelling 3D

Model 3D yang dibuat pada Gambar 12 memiliki 20 baris sumbu X, 20 kolom sumbu Y dan 10 kolom sumbu Z dengan jumlah keseluruhan kolom dalam inversi ini adalah 4000 kolom dengan luasan wilayah 33×23 km dengan kedalaman 5 km ke arah vertikal. Pada model 3D inversi ini terlihat terdapatnya densitas rendah yang ditandai oleh warna biru muda hingga biru tua dan densitas sedang oleh warna hijau hingga kuning dan juga densitas tinggi oleh warna *orange* sampai merah. Anomali rendah menggambarkan lapisan dengan

densitas yang rendah biasanya adalah lapisan batuan sedimen pada permukaan ataupun batuan dengan densitas rendah. Kemudian daerah dengan anomali sedang dapat diidentifikasi sebagai daerah dengan densitas sedang bisa berupa batuan sedimen maupun peralihan. Lalu juga terdapat anomali tinggi yang memiliki rentang densitas yang tinggi diduga adalah batuan beku.



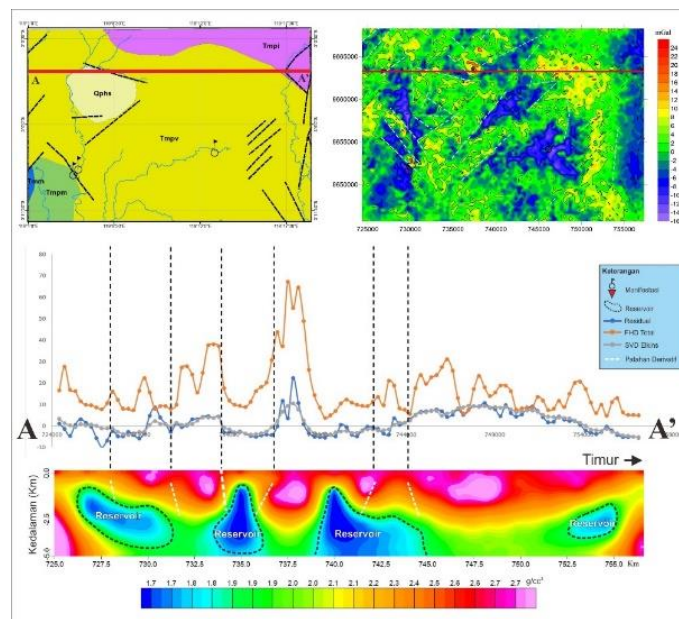
Gambar 12. Persebaran nilai densitas dalam model 3D dengan dimensi 20x20x10

Slicing 3D

Terdapat 6 lintasan *slicing* yang dibuat pada model 3D untuk mengetahui perbandingan kurva FHD dan SVD dengan *slicing* 2D inversi untuk menggambarkan struktur geologi. Kemudian dengan melihat densitas pada *slicing* 2D kita dapat menentukan keberadaan reservoir panas bumi, batuan penutup (*caprock*) serta perkiraan kedalaman.

Slicing Lintasan A-A'

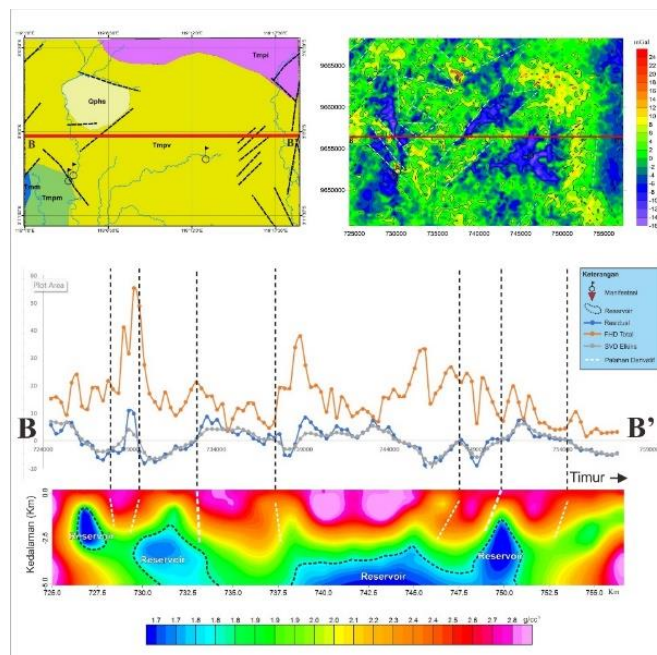
Pemodelan *slicing* A-A' yang berarah barat ke timur menunjukkan lapisan reservoir yang diduga merupakan hasil dari vulkanik Walimbong pada umur Tersier dan satuan vulkanik tak terpisahkan dengan komposisi lava andesitik hingga basaltik yang mengalami proses deformasi dan terkekarkan pada masa Eosen Akhir sehingga bersifat permeabel (PSDG, 2010). Reservoir ini berada pada kedalaman 800-5000 meter dan densitas 1,7-1,9 g/cm³. Di atasnya terdapat lapisan *caprock* yang bersifat *impermeable*, diduga mengandung silika (*silica cap*), pada kedalaman 0-3100 meter dengan densitas 2,0-2,8 g/cm³. *Heat source* tidak terdeteksi langsung di bawah reservoir karena berada pada kedalaman yang lebih dalam, namun terlihat di bagian barat dan timur lintasan, terkait dengan aktivitas plutonik. Pemodelan ini melewati 6 patahan berdasarkan analisis derivatif yang ditandai dengan garis putus-putus berwarna putih. Dari patahan tersebut terdapat 1 patahan yang berkorelasi dengan patahan geologi ditandai dengan garis putus-putus berwarna putih yang muncul ke permukaan pemodelan seperti pada Gambar 13. Patahan ini merupakan kemungkinan terbentuknya jalur keluar fluida panas ke permukaan bumi.



Gambar 13. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan A-A'

Slicing Lintasan B-B'

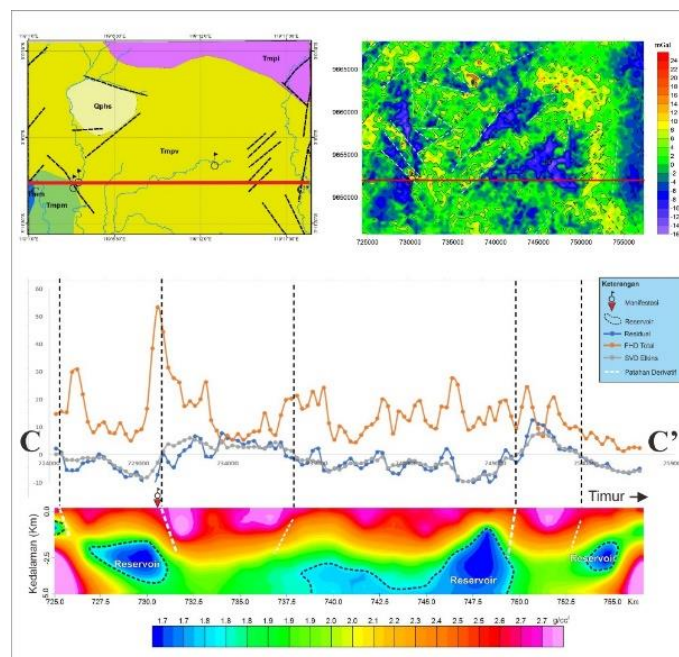
Pemodelan *slicing* B-B' barat-timur pada Gambar 14 menunjukkan lapisan *caprock* berupa batuan impermeabel yang diduga mengandung silika pada kedalaman 0-2900 meter dengan densitas 2,0-2,9 g/cm³. Di bawahnya terdapat reservoir berupa batuan hasil aktivitas vulkanik Walimbong pada umur Tersier dan satuan vulkanik tak terpisahkan dengan komposisi lava andesitik hingga basaltik yang telah mengalami proses deformasi yang bersifat permeabel. Lapisan ini berada pada kedalaman 800-5000 m dan densitas 1,7-2,0 g/cm³. *Heat source* terlihat di bagian Barat dan Timur lintasan, terkait aktivitas plutonik pada kedalaman yang tidak tercapai oleh model. Pemodelan ini juga mengidentifikasi 7 patahan, dua diantaranya berkorelasi dengan patahan geologi.



Gambar 14. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan B-B'

Slicing Lintasan C-C'

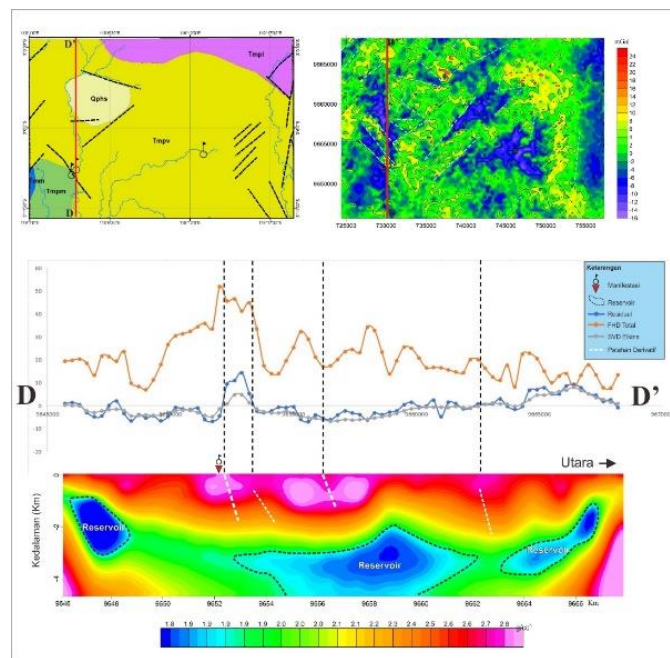
Pemodelan *slicing* C-C' arah utara-selatan pada Gambar 15 menunjukkan lapisan *caprock* berupa batuan impermeabel yang diduga merupakan batuan ubahan mengandung silika pada kedalaman 0-2900 meter dengan densitas 2,0-2,8 g/cm³. Di bawahnya terdapat reservoir berupa batuan hasil aktivitas vulkanik Walimbong pada umur Tersier dan satuan vulkanik tak terpisahkan dengan komposisi lava andesitik hingga basaltik yang telah mengalami proses deformasi yang bersifat permeabel. Reservoir ini terdapat pada kedalaman 700-5000 m dan densitas 1,7-2,0 g/cm³. *Heat source* terlihat di bagian Barat dan Timur lintasan, terkait aktivitas plutonik pada kedalaman yang tidak tercapai oleh model. Pemodelan ini mengidentifikasi 5 patahan, 3 diantaranya berkorelasi dengan patahan geologi, serta 2 manifestasi di bagian Barat lintasan yang diduga terbentuk akibat patahan di area tersebut.



Gambar 15. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan C-C'

Slicing Lintasan D-D'

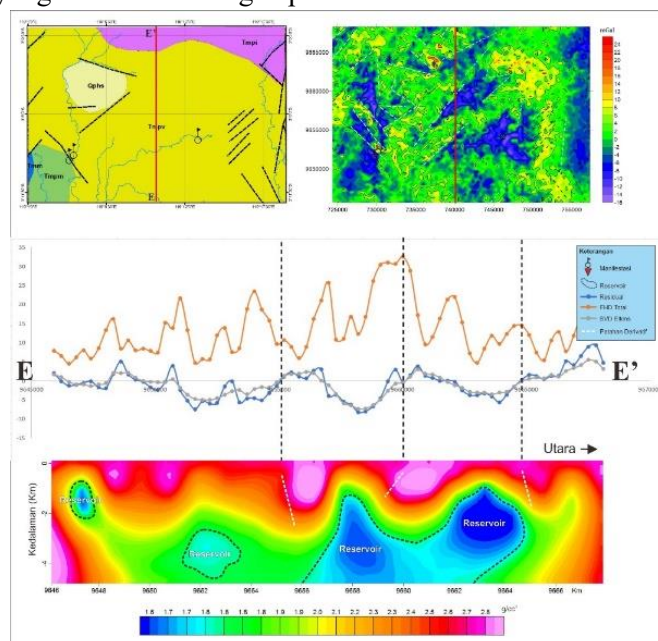
Pemodelan *slicing* D-D' arah selatan-utara pada Gambar 16 menunjukkan lapisan *caprock* berupa batuan ubahan yang mengandung silika (*silica cap*) pada kedalaman 0-2300 m dengan densitas 2,1-2,9 g/cm³. Di bawahnya terdapat reservoir berupa batuan vulkanik Walimbong berumur Tersier dan formasi Mapi yang berupa batuan sedimen, pada kedalaman 900-4700 m dengan densitas 1,8-2,0 g/cm³. *Heat source* terlihat di barat dan timur lintasan, ditandai oleh anomali tinggi di bawah reservoir. Model ini mengidentifikasi 4 patahan, 2 diantaranya berkorelasi dengan patahan geologi, serta 2 manifestasi di bagian selatan lintasan yang diduga terbentuk akibat patahan.



Gambar 16. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan D-D'

Slicing Lintasan E-E'

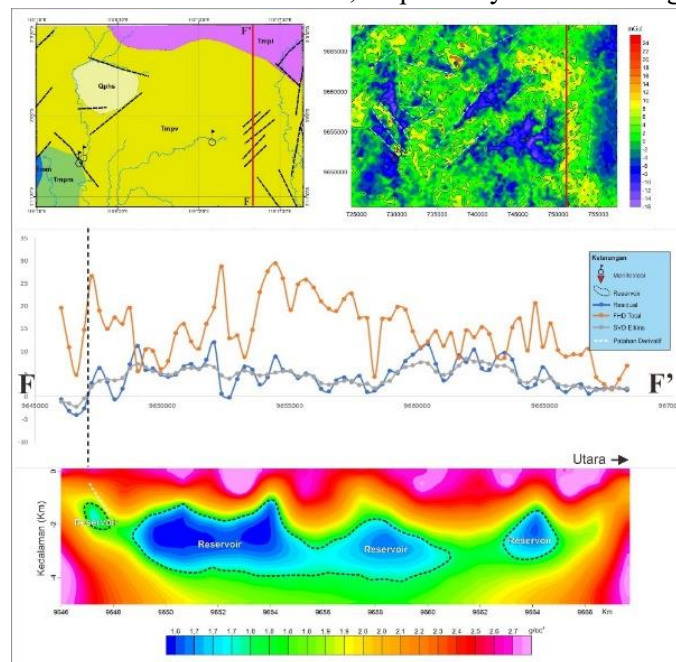
Pemodelan *slicing* E-E' arah selatan-utara pada Gambar 17 menunjukkan lapisan *caprock* berupa batuan impermeabel yang diduga mengandung silika (*silica cap*) pada kedalaman 0-2900 m dengan densitas 2,0-2,9 g/cm³. Di bawahnya terdapat reservoir berupa batuan hasil aktivitas vulkanik Walimbong pada umur Tersier dan satuan vulkanik tak terpisahkan dengan komposisi lava andesitik hingga basaltik yang telah mengalami proses deformasi yang bersifat permeabel. Terdapat pada kedalaman 600-4700 m dengan densitas 1,6-1,9 g/cm³. *Heat source* terlihat di bagian selatan lintasan, terkait aktivitas plutonik pada kedalaman yang tidak terjangkau oleh model. Pemodelan ini mengidentifikasi 3 patahan berdasarkan analisis derivatif, namun tidak ditemukan patahan geologi yang berkorelasi dengan patahan tersebut.



Gambar 17. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan E-E'

Slicing Lintasan F-F'

Pemodelan *slicing* F-F' arah selatan-utara pada Gambar 18 menunjukkan lapisan *caprock* berupa batuan impermeabel yang diduga mengandung silika (*silica cap*) pada kedalaman 0-2200 m dengan densitas 1,9-2,8 g/cm³. Di bawahnya terdapat reservoir berupa batuan hasil aktivitas vulkanik Walimbong pada umur Tersier dan satuan vulkanik tak terpisahkan dengan komposisi lava andesitik hingga basaltik yang telah mengalami proses deformasi yang bersifat permeabel. Reservoir ini berada pada kedalaman 1100-5000 m dengan densitas 1,6-1,9 g/cm³. *Heat source* terlihat di bagian selatan dan utara lintasan, ditandai oleh anomali tinggi di bawah reservoir, yang terkait aktivitas plutonik pada kedalaman yang tidak tercapai oleh model. Pemodelan ini mengidentifikasi 1 patahan berdasarkan analisis derivatif, tanpa adanya korelasi dengan patahan geologi.



Gambar 18. Model sebaran densitas hasil inversi 3D pada lintasan F-F'

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Setelah melakukan penelitian disimpulkan bahwa sebaran anomali Bouguer lengkap pada area penelitian didapatkan nilai 10-79 mGal. Anomali rendah pada nilai 10-30 mGal, anomali sedang pada nilai 30-55 mGal, dan anomali tinggi pada nilai 55-79 mGal. Kedalaman anomali regional rata-rata didapatkan 5038 meter dan anomali residual rata-rata didapatkan 214 meter serta lebar jendela sebesar 31. Didapatkan 6 struktur patahan derivatif yang berkorelasi dengan patahan geologi dan terdapat 23 struktur patahan yang tidak mempunyai kecocokan dengan data geologi. Didapatkan distribusi densitas dengan rentang nilai 1,5 – 2,9 g/cm³. Anomali berdensitas 2,0 - 2,9 g/cm³ diperkirakan merupakan batuan penutup (*caprock*) yang memiliki kedalaman 0 - 2900 m. Anomali dengan densitas rendah yaitu 1,5 - 1,9 g/cm³ diperkirakan sebagai reservoir yang memiliki kedalaman 600 - 5000 m.

Saran yang dapat diberikan yaitu menambahkan pemodelan geologi menggunakan *forward modelling* untuk memperoleh gambaran litologi bawah permukaan pada daerah penelitian dan juga untuk memastikan keberadaan struktur, perlu dilakukan analisis lebih dalam terhadap patahan di area penelitian.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih Penulis haturkan kepada semua komponen yang terlibat khususnya laboratorium PPDG Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung atas bantuannya dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Blakely, R.J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bott, M.H.P. (1962). A Simple Criterion for Interpreting Negative Gravity Anomalies. *Geophysics*, 27(3), 376–381.
- Djuri, D., Sudjatmiko, S., Bachri & Sukindo. (1998). Peta Geologi Lembar Majene dan Bagian Barat Lembar Palopo, Sulawesi, Edisi Kedua. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Elkins, T. A. (1951). The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, 16(1), 29-50.
- Grant, M.A., Bixley, P.F. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering (2nd Edition)*. Burlington: Academic Press.
- Wulandari, P.C.A., Zarkasy, A., Suharno, & Haerudin, N. (2022). Pemisahan Menggunakan Polynomial Fitting dan Analisis Second Vertical Derivative (SVD) untuk Mengidentifikasi Patahan pada Lapangan Panasbumi Pulau Pantar, Kabupaten Alor. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral (JGSM)*. 23(2), 91-96.
- Hinze, W. J., von Frese, R. R. B., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New ultra high resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283.
- Kadir, T.V.S. (2011). Metode Magnetotelluric (MT) Untuk Eksplorasi Panasbumi Daerah Lili, Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi. *Skripsi*. Universitas Indonesia.
- Kadir, W.G.A. (2000). *Eksplorasi Gaya berat dan Magnetik*. Bandung: Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral. ITB.
- Rasimeng, S., Tarigan, J. L., Ferucha, I., & Robbani, M. A. (2020). Identification of geothermal reservoir based on 3D modeling of data anomaly magnetic residual reduction to pole in the region of geothermal prospect Villamasin East Oku. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (p. D021S020R004). SEG.
- Rasimeng, S., Dani I., Syahranti, W. P., Sitompul, I. J., & Nizam, F. M. (2024). Identification of regional rock depth-residual gravity anomaly based on spectrum analysis of geothermal prospect area of Wayratai Lampung. *Gravity: Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Fisika*, 10(1) 38-53.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gaya Berat*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Sarkowi, M., Sawitri, R. F., Mulyatno, B. S. and Wibowo, R. C. (2021). Wai Selabung geothermal reservoir analysis based on gravity method, 10(2), 45–63.
- Sarkowi, M. & Wibowo, R. C. (2021a). Reservoir Identification of Bac-Man Geothermal Field Based on Gravity Anomaly Analysis and Modeling, *J. Appl. Sci. Eng.*, 25(2), 329–338.
- Sarkowi, M. & Wibowo, R.C. (2021b). Geothermal Reservoir Identification based on Gravity Data Analysis in Rajabasa Area Lampung. *Riset Geologi dan Pertambangan Indonesian Journal of Geology and Mining*, 31(2), 77–97.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Tim Survei Pendahuluan. (2009). Penyelidikan Pendahuluan Daerah Panas Bumi Polewali Mandar, Sulawesi Barat. *Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi*, 89-110.
- Tim Survei Terpadu. (2010). Penyelidikan Terpadu Geologi Dan Geokimia Daerah Panas Bumi Lilli Kabupaten Polewali Mandar Provinsi Sulawesi Barat. *Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi*, 483-494.
- Zaenudin, A., Karyanto, Kurniasih A., Wibowo, R. C. (2021). Analisis Struktur Patahan Daerah Suoh Menggunakan Metode Gaya Berat dan Penentuan Kerapatan Patahan, *Positron* 11(2), 95 – 103. doi: 10.26418/positron.v11i2.48461