

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Tanda tangan yang tertera dalam halaman pengesahan adalah asli. Jika tidak asli, saya siap menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Jambi, Mei 2025
Yang menyatakan

SHELLA FRANOLLA EVAULINA
F1C321010

RINGKASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Graho Nyabu, Kabupaten Merangin, Provinsi Jambi, dengan pendekatan metode geofisika, yaitu metode gaya berat dan *Fault Fracture Density* (FFD). WKP Graho Nyabu merupakan salah satu wilayah yang menunjukkan indikasi adanya potensi sistem panas bumi, ditandai dengan keberadaan manifestasi panas bumi seperti mata air panas dan tanah beruap. Metode gaya berat digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui variasi densitas batuan di bawah permukaan, yang berkaitan dengan struktur geologi seperti *caprock*, *reservoir*, dan sumber panas. Data gravitasi diperoleh dari satelit GGMplus dan kemudian diolah melalui tahapan koreksi seperti koreksi *Free Air*, koreksi Bouguer, koreksi medan (*terrain correction*), serta analisis spektral untuk menghasilkan nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Selanjutnya dilakukan pemisahan anomali regional dan residual untuk mengetahui kontras densitas batuan dangkal dan dalam. Data residual kemudian digunakan untuk pemodelan 2D guna mengidentifikasi zona prospektif reservoir panas bumi. Sementara itu, metode *Fault Fracture Density* (FFD) digunakan untuk menganalisis kepadatan rekahan atau patahan yang menjadi jalur utama migrasi fluida panas bumi dari kedalaman ke permukaan. Data FFD diperoleh dari citra elevasi digital (DEMNAS) dan diolah melalui proses digitalisasi kelurusan untuk mengetahui distribusi rekahan pada area penelitian. Zona dengan nilai FFD tinggi diinterpretasikan sebagai zona dengan permeabilitas tinggi dan potensi migrasi fluida panas yang signifikan. Hasil dari integrasi kedua metode ini menunjukkan adanya keterkaitan antara zona densitas rendah dari hasil anomali gravitasi dengan zona FFD tinggi, yang mengindikasikan keberadaan jalur migrasi fluida dan potensi reservoir panas bumi. Oleh karena itu, metode ini dapat memberikan gambaran yang komprehensif dalam eksplorasi awal wilayah panas bumi, khususnya di WKP Graho Nyabu.

SUMMARY

This research was conducted to identify the geothermal system in the Graho Nyabu Geothermal Working Area (WKP), located in Merangin Regency, Jambi Province, using geophysical methods, specifically the gravity method and Fault Fracture Density (FFD) analysis. WKP Graho Nyabu is one of the areas that shows indications of geothermal potential, as evidenced by surface manifestations such as hot springs and steaming ground. The gravity method was applied to investigate variations in subsurface rock density, which are related to geological structures such as caprock, reservoirs, and heat sources. Gravity data were obtained from the GGMplus satellite and processed through several correction stages, including Free Air correction, Bouguer correction, terrain correction, and spectral analysis to generate the Complete Bouguer Anomaly (CBA) values. Subsequently, regional and residual anomaly separation was carried out to distinguish between shallow and deep density contrasts. The residual anomaly data were then used for 2D modeling to identify prospective geothermal reservoir zones. Meanwhile, the Fault Fracture Density (FFD) method was used to analyze the density of fractures or faults that serve as primary pathways for geothermal fluid migration from depth to the surface. FFD data were obtained from digital elevation models (DEMNAS) and processed through lineament digitization to determine the distribution of fractures in the study area. Zones with high FFD values are interpreted as areas of high permeability and significant geothermal fluid flow potential. The integration of both methods reveals a correlation between low-density zones identified by gravity anomalies and high FFD zones, indicating the presence of fluid migration pathways and potential geothermal reservoirs. Therefore, this integrated approach provides a comprehensive framework for early-stage geothermal exploration, particularly in the WKP Graho Nyabu area.

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DI WILAYAH
KERJA PANAS BUMI (WKP) GRAHO NYABU
MENGUNAKAN *FAULT FRACTURE DENSITY* (FFD)
DAN ANOMALI GRAVITASI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana Pada
Program Studi Fisika



**SHELLA FRANOLLA EVAULINA
F1C321010**

PROGRAM STUDI FISIKA

JURUSAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS JAMBI

2025

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul **IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DI WILAYAH KERJA PANAS BUMI (WKP) GRAHO NYABU MENGGUNAKAN *FAULT FRACTURE DENSITY* (FFD) DAN ANOMALI GRAVITASI** yang disusun oleh **SHELLA FRANOLLA EVAULINA, NIM: F1C321010** telah dipertahankan didepan tim penguji pada tahun 2025 dan dinyatakan lulus.

Susunan Tim Penguji:

Ketua : Jesi Pebralia, S.Pd., M.Si.
Sekretaris : Ichy Lucya Resta, S.Pd., M.Si.
Anggota : 1. Dr. Tugiyono Aminoto, S.Si., M.Si, M.Ed.
2. Muhammad Ficky Afrianto, S.Si., M.Si
3. Samsidar, S.Si., M.Si.

Pembimbing Utama Disetujui : Pembimbing Pedamping

Jesi Pebralia, S.Pd., M.Si.
NIP. 199108282024062001

Ichy Lucya Resta, S.Pd., M.Si.
NIP. 199108282024062001

Diketahui :

Dekan,
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Jambi

Ketua Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan
Teknologi Universitas Jambi

Drs. Jefri Marzal, M.Sc., D.I.T
NIP. 196806021993031004

Dr. Intan Lestari, S.Si., M.Si.
NIP. 197409221999032002

RIWAYAT HIDUP



Shella Franolla Evaulina lahir di Kota Jakarta, Provinsi DKI Jakarta, pada tanggal 8 Juni 2003. Ia merupakan anak pertama dari dua bersaudara, putri dari pasangan Bapak Benget Sibarani dan Ibu Hermi Rengsi Pangaribuan.

Penulis mengawali pendidikan formal di SD Perguruan Advent 1 Jakarta 06. Setelah menyelesaikan jenjang sekolah dasar, penulis melanjutkan pendidikan ke tingkat menengah pertama di SMP Negeri 76 Jakarta. Selanjutnya, penulis melanjutkan studi ke jenjang sekolah menengah atas di SMA Negeri 27 Jakarta dengan mengambil jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA).

Pada tahun 2021, penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas dan melanjutkan studi ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Jambi pada Program Studi S1 Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis dikenal sebagai mahasiswa yang aktif dalam kegiatan sosial, organisasi kemahasiswaan, dan akademik.

PRAKARTA

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Identifikasi Sistem Panas Bumi Di Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Graho Nyabu Menggunakan *Fault Fracture Density* (FFD) Dan Anomali gravitasi”**.

Dalam penulisan tugas akhir ini, tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk semua pihak yang telah memberikan motivasi dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini hingga selesai, terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Drs. Jefri Marzal, M.Sc., D.I.T selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
2. Bapak Ir. Bambang Hariyadi, M.Si.,Ph.D selaku Wakil Dekan Bagian Akademik, Kerjasama dan Sistem Informasi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
3. Ibu Dr. Intan Lestari, S.Si., M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
4. Ibu Frastica Deswardani, S.Si., M.Sc. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.
5. Ibu Yoza Fendriani, S.Pd., M.Si selaku Pembimbing Akademik yang telah membimbing proses akademik.
6. Ibu Jesi Pebralia, S.Pd., M.Si. selaku Pembimbing Utama skripsi yang telah membimbing proses penyusunan skripsi.
7. Ibu Ichy Lucia Resta, S.Pd., M.Si. selaku Pembimbing Pedamping yang membimbing dalam penulisan skripsi ini.
8. Ibu Nurhidayah, S.Pd., M.Si selaku Pembimbing Magang yang telah membimbing selama proses perkuliahan.
9. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi yang telah banyak membantu dan membimbing saat masa perkuliahan.
10. Terimakasih kepada Tuhan Yesus Kristus menyertai saya dalam suka maupun duka dalam hidup saya.
11. Terimakasih kepada Papa yang sangat saya cintai dan sayangi, Papa Benget Sibarani yang selalu mengusahakan segalanya sampai saya bisa berada pada titik ini. Terimakasih kepada Mama Hermi Rengsi

Pangaribuan yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan kasih sayang yang sangat amat berarti bagi saya.

12. Adik saya Reinhard Andy Anggoro yang selalu ada setiap proses penulis, menemani suka maupun duka, mendukung dan memberikan semangat yang luar biasa kepada saya.
13. Terimakasih kepada Didik Anugrah, Pola Artha br. Silitonga, Ribka Simbolon dan teman-teman Sahabat Till Jannah yang selalu menemani penulis selama perkuliahan dan menjadi teman yang baik.
14. Terimakasih kepada teman seperjuangan Fisika 2021 yang telah menjadi bagian perjalanan panjang ini. Bersama kalian semua yang sulit akan menjadi lebih ringan, setiap tawa akan menjadi kenangan yang indah dimasa tua. Terimakasih atas semangat, bantuan, dan kebersamaan yang kita lalui bersama selama perkuliahan.
15. Terimakasih kepada diri sendiri yang sudah mampu bertahan pada titik ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kesalahan dan kekurangan dalam penulisan skripsi ini, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan agar kedepannya dapat menjadi lebih baik. Penulis mengucapkan terimakasih dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Jambi, Mei 2025

Shella Franolla Evaulina
F1C321010

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Geologi Regional	6
2.2 Panas Bumi.....	9
2.3 Metode Gaya Berat	14
2.4 <i>Fault Fracture Density</i> (FFD)	24
III. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Waktu dan Tempat	26
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	26
3.3 Metode Penelitian	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Data Lapangan	33
4.2 Data Gravity	36
4.3 <i>Fault Fracture Density</i> (FFD).....	53
4.4 Diskusi.....	Error! Bookmark not defined.
V. PENUTUP	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Densitas Batuan	22
2. Jadwal Kegiatan Penelitian.....	26
3. Data Satelit GGMplus	36
4. Hasil Analisis Spektral	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Rencana Pengembangan Panas Bumi (Direktorat Jenderal Energi Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020).	1
2. Peta Geologi Lembar Sungaipenuh dan Ketaun	7
3. Sistem Panas Bumi (Dickson dan Fanelli, 2004).	10
4. <i>High Terrain Geothermal Systems</i> (Nicholson, 1993).	11
5. <i>Low Terrain Geothermal Systems</i> (Nicholson, 1993).	12
6. Mata Air Panas.	13
7. Gaya tarik menarik antar massa	15
8. Akuisisi Satelit GRACE dan GRACE-FO (Adams et. al., 2022).	16
9. Analisis Spektrum (Apriani, 2017).	20
10. Respon Anomali gravitasi terhadap Pendugaan Reservoir, Sesar dan Rekahan (Sihombing et. al., 2024).	21
11. Pemodelan 2D (Scottish Water, 2020).	23
12. Peta <i>Fault Fracture Density</i> (Kurniawan, 2022).	24
13. Hasil Kalkulasi dari Panjang Rekahan (Kurniawan, 2022).	25
14. Diagram Alir	29
15. Mata Air Panas	33
16. Tanah Beruap	33
17. Alterasi Batuan	34
18. Batuan Andesit	34
19. Endapan Travertin	35
20. Batuan Propilitik.	35
21. Topografi Daerah Penelitian	37
22. Grafik Metode Parasnis	38
23. Peta Complete Bouguer Anomaly.	39
24. <i>Slicing</i> dari Peta <i>Complete Bouguer Anomaly</i>	41
25. Kurva Analisis Lintasan 1	41
26. Kurva Analisis Lintasan 2	42
27. Kurva Analisis Lintasan 3	42
28. Kurva Analisis Lintasan 4	43
29. Kurva Analisis Lintasan 5	43
30. Kurva Analisis Lintasan 6	44
31. Peta Anomali Regional.	45
32. Peta Anomali Residual	47
33. Peta Gradien Horizontal	48
34. Arah lintasan <i>Slicing</i> pada peta Gradien Horizontal.	49

35. Arah lintasan Slicing pada peta Anomali Residual.....	50
36. Pemodelan 2D Pada Lintasan 1	51
37. Pemodelan 2D Pada Lintasan 2	52
38. Pemodelan 2D Pada Lintasan 3	53
39. Gunung Sumbing dan Gunung Hulunilo.....	57
40. Peta Overlay Peta Geologi, Peta Gradien Horizontal dan Peta Fault Fracture Density	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Data Lapangan.....	64
2. Batuan.....	64
3. Peta Geologi Regional	65
4. Data Gaya Berat.....	66
5. Data Parasnis	75
6. Data Analisis Spektrum	80
7. Data Analisa Patahan.....	92
8. Data <i>Fault Fracture Density</i>	95

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi dikategorikan sebagai salah satu sumber energi terbarukan karena merupakan salah satu sumber daya alam yang dapat diperbaharui (Ermawati et. al., 2012). Energi terbarukan merupakan energi yang ketersediaannya melimpah di alam dan dapat diperbarui serta dimanfaatkan secara berkelanjutan, sedangkan energi tak terbarukan adalah sumber daya energi yang diambil dari alam yang proses pembentukannya memerlukan waktu selaa berjuta-juta tahun (Azhar et. al., 2018). Letak Indonesia yang berada diantara gunung-gunung api dan tumbukan lempeng tektonik serta garis khatulistiwa menjadikannya negara yang memiliki potensi energi terbarukan panas bumi yang besar (Nurwahyudin dan Harmoko, 2020). Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024), Indonesia merupakan negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia dengan potensi 24 GW (giga watt) dan sekitar 40% potensi panas bumi dunia berada di Indonesia. Namun, hingga saat ini, potensi tersebut belum sepenuhnya dimanfaatkan secara optimal dikarenakan proses eksplorasi yang sering kali memerlukan biaya besar dan teknologi tinggi untuk mengidentifikasi daerah yang memiliki potensi *reservoir* panas bumi.



Gambar 1. Rencana Pengembangan Panas Bumi (Direktorat Jenderal Energi Terbarukan dan Konservasi Energi, 2020).

Indonesia memiliki potensi panas bumi yang tersebar di Pulau Sumatera, Maluku, Kalimantan, Jawa, Sulawesi, dan Papua. Di pulau-pulau tersebut, sebagian besar energi panas bumi dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik (Hakim et. al., 2022). Menurut Badan Standarisasi Nasional (2016), potensi panas bumi di dunia, yang tersebar di 265 lokasi sepanjang jalur vulkanik yang membentang khususnya di Pulau Sumatra. Berdasarkan data dari Ditjen EBTKE Kementerian ESDM (2017), menyebutkan Provinsi Jambi memiliki potensi energi panas bumi mencapai 400MW yang tersebar di Kabupaten Kerinci dan Kabupaten Merangin.

Lapangan Graho Nyabu terletak di Kabupaten Merangin, Provinsi Jambi, dengan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) yang mencakup area seluas 109.000 hektar (Ha). Area ini memiliki titik potensi yaitu Air Dikit dan Graho Nyabu. Potensi ini berasosiasi dengan Gunung Masurai, Gunung Sumbing dan Gunung Hulunilo. Gunung berapi sering kali menjadi sumber potensi panas bumi karena adanya aktivitas vulkanik yang menciptakan *reservoir* panas di bawah permukaan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017). Keterdapatn manifestasi panas bumi di area WKP Graho Nyabu seperti sumber mata air panas Grao Sakti, ini membuktikan jika WKP Graho Nyabu memiliki potensi panas bumi sehingga diperlukan kajian penelitian lebih lanjut.

Dalam mengidentifikasi potensi panas bumi di suatu wilayah, diperlukan pendekatan dan metode eksplorasi yang mendalam. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode geofisika, yang bertujuan untuk memahami struktur bawah permukaan berdasarkan sifat fisika batuan tanpa perlu melakukan pengeboran langsung. Dalam penelitian ini, metode geofisika yang digunakan adalah metode gaya berat dan diintegrasikan dengan metode *Fault Fracture Density* (FFD). Metode gaya berat mampu memberikan informasi batuan bawah permukaan dan struktur kontras respon anomali gravitasi, sedangkan *Fault Fracture Density* (FFD) mampu memberikan informasi terkait zona lemah batuan atau zona rekahan yang mengindikasikan adanya zona pergerakan fluida bawah permukaan.

Metode gravitasi memiliki keunggulan dalam mendeteksi perbedaan densitas batuan yang mencerminkan komponen sistem panas bumi seperti *caprock*, *reservoir*, dan sumber panas (Ibrahim et. al., 2024; Lase et. al., 2024). Teknik ini bekerja dengan menganalisis anomali Bouguer secara regional dan residual untuk memetakan struktur bawah permukaan secara menyeluruh. Sementara itu, metode *Fault Fracture Density* (FFD) unggul dalam mengidentifikasi zona rekahan rapat yang menjadi jalur migrasi fluida panas bumi (Arrofi et. al., 2022; Suryantini dan Wibowo, 2010). Integrasi kedua metode

ini memungkinkan identifikasi yang lebih akurat terhadap zona prospek panas bumi berdasarkan struktur geologi dan karakteristik hidrogeologisnya.

Metode gaya berat adalah metode geofisika yang digunakan untuk mendeteksi perbedaan densitas batuan di bawah permukaan bumi dengan mengukur variasi medan gravitasi bumi. Dalam eksplorasi panas bumi, anomali gravitasi dapat mengungkap adanya perbedaan densitas yang berhubungan dengan struktur geologi seperti intrusi magma, *reservoir* panas bumi, dan zona alterasi. Daerah dengan densitas lebih rendah sering kali terkait dengan keberadaan fluida panas atau daerah dengan struktur geologi yang mengalami pelapukan dan rekahan. Menurut Telford et. al., (1990), metode gaya berat ini sangat efektif dalam mendeteksi anomali-anomali yang disebabkan oleh intrusi batuan magma atau keberadaan batuan dengan porositas tinggi, yang seringkali merupakan *reservoir* panas bumi. Metode anomali gravitasi akan membantu dalam memetakan struktur bawah permukaan dan mengidentifikasi area-area dengan perbedaan densitas yang berpotensi mengindikasikan adanya *reservoir* panas bumi di WKP Graho Nyabu.

Metode *Fault Fracture Density* (FFD) digunakan untuk menganalisis kepadatan, patahan, atau rekahan di wilayah eksplorasi. Patahan dan rekahan merupakan jalur utama bagi migrasi fluida panas dari *reservoir* bawah permukaan menuju ke area yang lebih dangkal atau bahkan permukaan bumi. Semakin tinggi kepadatan rekahan di suatu wilayah, semakin besar kemungkinan adanya aliran fluida panas bumi yang dapat dimanfaatkan. Fournier (1991) menjelaskan bahwa patahan dan rekahan berperan sangat penting dalam transportasi fluida panas bumi, terutama pada daerah dengan aktivitas vulkanik atau tektonik yang tinggi. Pendekatan FFD ini akan digunakan dalam penelitian untuk mengetahui zona lemah atau zona patahan yang dapat menjadi jalur fluida panas bumi. Data FFD dapat mengungkap daerah-daerah dengan tingkat rekahan yang tinggi, yang kemungkinan besar menjadi tempat berkumpulnya atau Bergeraknya fluida panas bumi. Dengan demikian, metode ini dapat memberikan petunjuk lebih rinci mengenai zona prospektif yang memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan sebagai sumber energi panas bumi.

Pada tahun 2020, Mahardika et.al, telah melakukan penelitian di daerah manifestasi panas bumi Gunung Sumbing, Kabupaten Merangin, Jambi. Penelitian ini menggunakan interpretasi data landsat 8 dan geolistrik untuk mengidentifikasi keberadaan manifestasi panas bumi dan telah mengidentifikasi beberapa manifestasi panas bumi di daerah tersebut. Lalu peneliti Utama et.al, pada tahun 2020 meneliti mengenai peran zona sesar Sumatera dari segmen Sesar Dikit terhadap munculnya fitur panas bumi di Grao Sakti yang digunakan

untuk mendapatkan data geokimia. Selanjutnya pada tahun 2023, Utama et.al, melakukan penelitian mengenai data geokimia untuk eksplorasi panas bumi di Grao Sakti. Penelitian tersebut menghasilkan beberapa data geokimia yang diambil dari manifestasi panas bumi daerah tersebut.

Penelitian sebelumnya di WKP Graho Nyabu belum mengintegrasikan metode gaya berat dan *Fault Fracture Density* (FFD) secara bersamaan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi secara menyeluruh. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi potensi sistem panas bumi di WKP Graho Nyabu menggunakan metode geofisika, yaitu anomali gravitasi. Anomali gravitasi digunakan untuk mengetahui perbedaan densitas batuan dan keberadaan zona patahan serta rekahan dengan pemodelan 2D. *Fault Fracture Density* (FFD) untuk menganalisis kepadatan patahan atau rekahan yang digunakan untuk menentukan jalur migrasi fluida panas bumi yang memungkinkan mengetahui terbentuknya reservoir panas bumi di WKP Graho Nyabu.

1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka identifikasi masalah dalam penelitian ini yaitu WKP Graho Nyabu memiliki potensi energi panas bumi yang besar, tetapi belum dimanfaatkan secara maksimal. Wilayah ini memerlukan studi eksplorasi yang lebih mendalam untuk mengetahui potensi sebenarnya. Metode geofisika khususnya anomali gravitasi dengan menggunakan *Fault Fracture Density* (FFD) diharapkan dapat mengidentifikasi struktur bawah permukaan dan jalur fluida panas menggunakan pemodelan 2D yang dapat membantu penentuan lokasi *reservoir* panas bumi di WKP Graho Nyabu. Peran patahan dan rekahan dalam transportasi fluida panas bumi sangat penting, tetapi belum dapat sepenuhnya teridentifikasi di WKP Graho Nyabu, sehingga memerlukan pendekatan lebih dalam dengan menggunakan *Fault Fracture Density* (FFD).

Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana variasi densitas batuan berdasarkan anomali gravitasi untuk mengetahui *reservoir* panas bumi di WKP Graho Nyabu?
2. Bagaimana jalur migrasi fluida panas bumi berdasarkan kepadatan patahan atau rekahan di WKP Graho Nyabu menggunakan *Fault Fracture Density* (FFD)?
3. Bagaimana sistem panas bumi di WKP Graho Nyabu?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang, identifikasi dan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis variasi densitas batuan dalam mengidentifikasi *reservoir* panas bumi di WKP Graho Nyabu.
2. Menganalisis kepadatan patahan atau rekahan dalam menentukan jalur migrasi fluida panas bumi di WKP Graho Nyabu.
3. Mengetahui sistem panas bumi di WKP Graho Nyabu

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya :

1. Memberikan informasi tambahan untuk akademika dalam mengetahui daerah potensi panas bumi WKP Graho Nyabu.
2. Memberikan informasi bagi masyarakat mengenai peningkatan pemahaman tentang pentingnya pengembangan energi terbarukan, khususnya energi panas bumi

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Lokasi penelitian berada di Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Graho Nyabu, yang terletak di Kabupaten Merangin, Provinsi Jambi, Indonesia, berada di zona geologi yang dikenal sebagai Busur Magmatik Sumatra yang terbentuk sebagai hasil dari interaksi tektonik antara Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara-timur laut dan Lempeng Eurasia. Area prospek dikendalikan secara dominan oleh Sesar Besar Sumatra, khususnya segmen Sesar Dikit (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017). Jalur subduksi ini menghasilkan rangkaian pegunungan aktif yang dikenal sebagai Pegunungan Bukit Barisan, yang memanjang dari ujung utara hingga ujung selatan Pulau Sumatra. Selain itu, terdapat juga Sesar Sumatra, sesar geser besar yang membentang sejajar dengan Bukit Barisan dan berperan penting dalam pembentukan struktur geologi di lokasi penelitian (Barber et. al., 2005).

Secara regional, aktivitas vulkanik dihasilkan oleh subduksi lempeng di sepanjang Sumatra telah membentuk banyak gunung berapi aktif dan sistem hidrotermal yang menjadi sumber energi panas bumi. WKP Graho Nyabu termasuk dalam wilayah ini dan dikelilingi oleh kompleks vulkanik yang mendukung pembentukan sistem panas bumi.

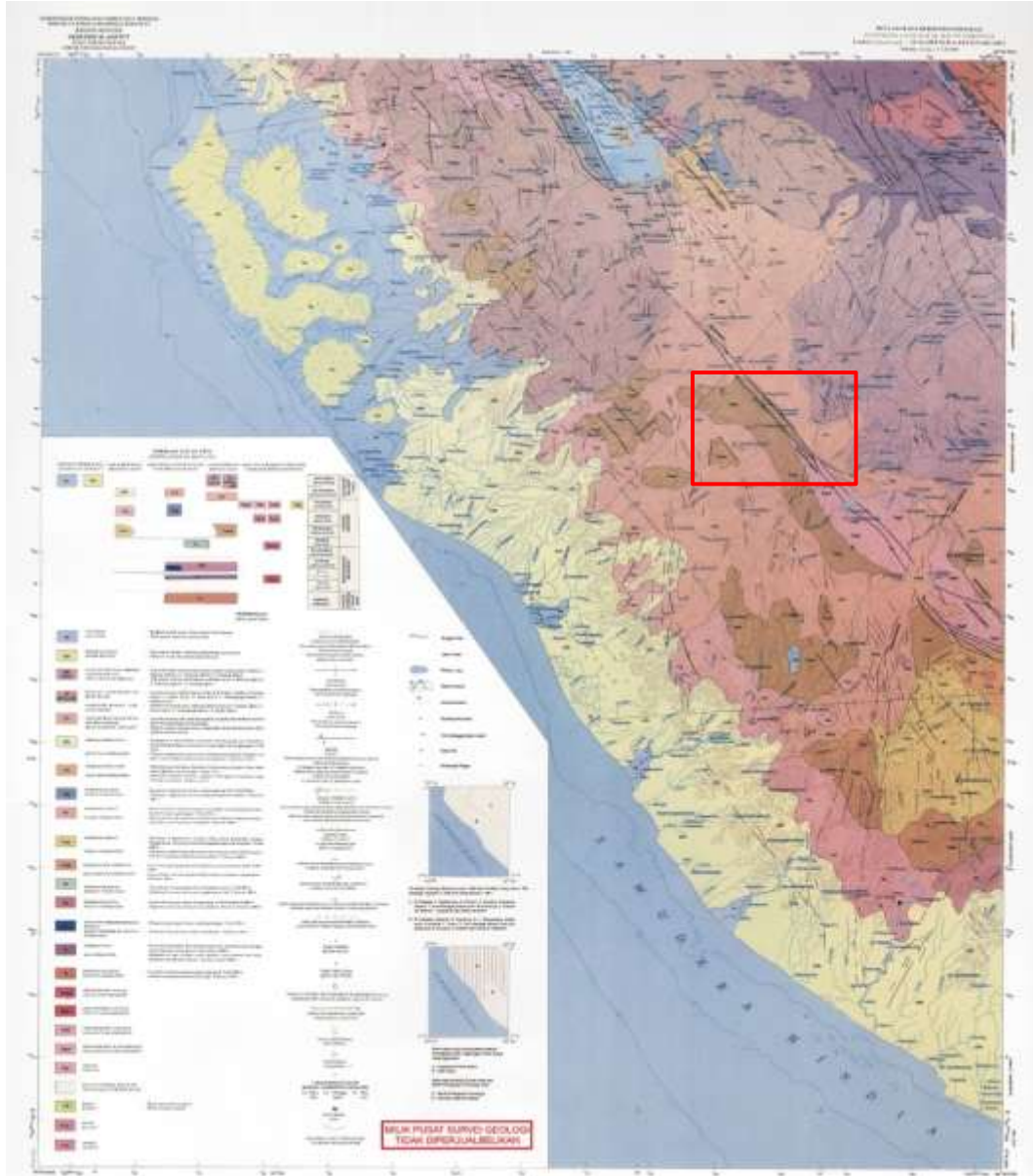
Tatanan Tektonik

Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Graho Nyabu terletak dalam sistem tektonik yang aktif di sepanjang jalur subduksi Sunda. Subduksi ini terjadi di lepas pantai barat Sumatra, dimana Lempeng Indo-Australia menyusup ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan 6-7 cm per tahun (Simons et. al., 2007). Proses subduksi ini menghasilkan berbagai aktivitas geologi, termasuk gempa bumi, pembentukan gunung berapi, dan aktivitas magmatisme.

Selain subduksi, Sesar Sumatra berperan penting dalam geologi regional wilayah ini. Segmen Sesar Dikit merupakan bagian dari sistem Sesar Sumatra yang memiliki pola kelengkungan struktur sesar dan berhubungan erat dengan kemunculan manifestasi panas bumi di wilayah Grao Sakti, Jambi (Utama et. al., 2023). Sesar ini merupakan sesar geser mendatar dengan pergerakan dominan kearah kanan (*dextral strike-slip fault*), yang menghasilkan deformasi kerak bumi dan mempengaruhi struktur geologi di daerah penelitian. Struktur-struktur patahan dan rekahan yang dihasilkan dari aktivitas tektonik ini menjadi jalur penting bagi migrasi fluida panas bumi di dalam kerak bumi (McCaffrey, 2009).

Geologi Umum

Secara geologi, WKP Graho Nyabu berada di Kawasan vulkanik Kuarter yang berhubungan dengan aktivitas magmatisme yang masih aktif hingga sekarang. Vulkanisme di wilayah ini menghasilkan berbagai jenis yaitu batuan beku dan endapan vulkanik yang menjadi salah satu faktor utama terbentuknya potensi energi panas bumi (Gambar 2).



Gambar 2. Peta Geologi Lembar Sungaipenuh dan Ketaun

Menurut Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (2017) batuan penyusun di wilayah WKP Graho Nyabu meliputi :

1. Batuan Vulkanik Kuarter, yang terdiri dari lava andesit dan basalt, serta breksi vulkanik dan tufa, yang terbentuk dari aktivitas gunung api.

2. Batuan Sedimen, mencakup endapan alluvial di lembah-lembah dan kaki pegunungan yang terbentuk oleh proses erosi dan sedimentasi.
3. Batuan Intrusi seperti diorite dan granit, yang terbentuk dari instruksi magma pada kedalaman dangkal hingga menengah. Kehadiran batuan instrusi ini sering kali menjadi sumber panas bagi sistem hidrotermal yang berkembang.

Stratigrafi

Menurut Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (2017), stratigrafi di WKP Graho Nyabu mencerminkan sejarah panjang aktivitas vulkanik dan sedimentasi. Secara umum, stratigrafi wilayah WKP Graho Nyabu ini dibagi menjadi beberapa satuan utama :

1. Satuan Batuan Vulkanik Kuarter
 - Batuan ini terdiri dari lava andesit dan basal, breksi vulkanik, serta endapan piroklastik. Satuan ini mencerminkan aktivitas gunung api yang terus menerus hingga zaman kuarter.
 - Breksi vulkanik dan tufa terbentuk dari letusan gunung berapi yang melepaskan material piroklastik dalam jumlah besar, kemudian terendapkan di sekitarnya.
2. Satuan Endapan Aluvial
 - Merupakan endapan yang terbentuk dari proses sedimentasi di sepanjang lembah-lembah sungai dan daerah kaki pegunungan. Endapan ini terdiri dari kerikil, pasir, dan lempung, yang diangkut oleh aliran sungai. Satuan ini penting dalam sistem hidrogeologi karena berfungsi sebagai akuifer tempat terjadinya sirkulasi air tanah.
3. Satuan Batuan Intrusi
 - Terdiri dari diorit, granit, dan batuan beku lainnya yang terbentuk sebagai hasil intrusi magma pada kedalaman dangkal. Batuan ini berperan sebagai sumber panas bagi sistem panas bumi.

Daerah penelitian ini terletak di sepanjang Zona Patahan Sumatera, tepatnya pada segmen Dikit yang membentuk Cekungan Dikit. Wilayah ini adalah bagian barat dari Kompleks Vulkanik Masurai. Tataan geologi yang ditunjukkan pada hubungan patahan, sesar dan kompleks gunung berapi terhadap kemunculan manifestasi fitur panas bumi panas bumi (Utama et. al., 2023). Batuan vulkanik yang bersifat permeabel, seperti lava andesit dan basal, memungkinkan pergerakan fluida panas di dalam kerak bumi. Potensi ini menjadikannya lokasi yang menjanjikan untuk eksplorasi dan pengembangan panas bumi. Potensi ini berasosiasi dengan Gunung Masurai, Gunung Sumbing dan Gunung Hulunilo.

Fisiografi

Fisiografi Pulau Sumatera bagian selatan dibagi beberapa zona yaitu Zona Bukit Barisan, Zona Sesar Semangko, Zona Bukit Tiga Puluh, Zona Dataran dan Perbukitan, Zona Busur Luar dan Zona Paparan Sunda (Mahardhika et. al., 2020).

Fisiografi di WKP Graho Nyabu didominasi oleh pegunungan vulkanik yang merupakan bagian dari Pegunungan Bukit Barisan (Bemmelen, 1949). Morfologi wilayah ini sangat bervariasi, mulai dari puncak-puncak gunung api, lereng terjal, lembah curam, hingga dataran yang lebih rendah. Ciri fisiografi utama wilayah ini mencakup :

1. Pegunungan Vulkanik : Wilayah ini didominasi oleh puncak-puncak gunung berapi yang terbentuk dari letusan vulkanik masa lalu. Aktivitas vulkanik yang masih berlangsung menciptakan potensi energi panas bumi.
2. Lembah dan Cekungan : Lembah-lembah terbentuk akibat erosi yang berlangsung selama jutaan tahun. Lembah ini menjadi tempat utama bagi pengendapan material alluvial yang berperan dalam system air tanah.
3. Jalur Sesar : Jalur Sesar dan rekahan di wilayah ini berfungsi sebagai jalur bagi fluida panas dan *reservoir* di kedalaman menuju manifestasi panas bumi di permukaan, seperti mata air panas dan fumarol.

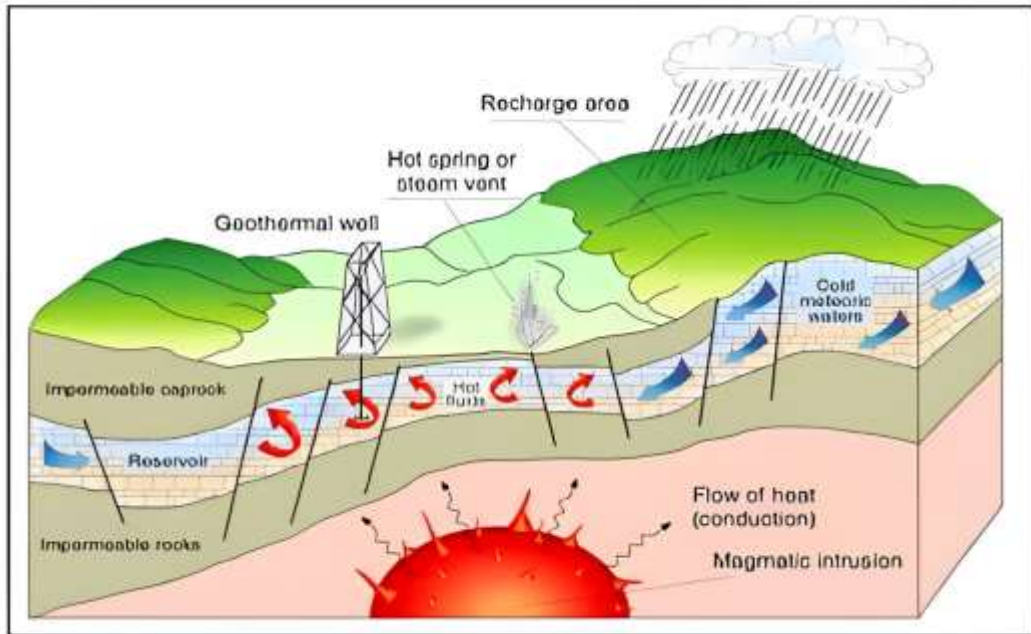
Fisiografi yang didominasi oleh pegunungan terjal juga mempengaruhi pola aliran air permukaan dan drainase. Aliran air yang deras di lembah curam mempercepat erosi dan sedimentasi, membentuk endapan alluvial yang kaya akan material vulkanik (Burbank dan Anderson, 2011).

2.2 Panas Bumi

Panas bumi merupakan sumber daya alam berupa air panas dan uap yang terbentuk di dalam *reservoir* bumi melalui pemanasan air dibawah permukaan oleh batuan panas (Winarsih, 2014). Letak Indonesia yang berada diantara gunung-gunung api dan tumbukan lempeng tektonik serta garis khatulistiwa menjadikannya negara yang memiliki potensi energi terbarukan panas bumi yang besar. Dengan memanfaatkan panas bumi banyak keuntungan yang akan didapatkan dibandingkan penggunaan bahan bakar fosil, panas bumi dapat dijadikan sebagai alternative energi terbarukan yang keberadaannya selalu tetap dan tidak bergantung pada cuaca serta musim (Nurwahyudin dan Harmoko, 2020). Dalam UU No. 27 Tahun 2003 tertulis bahwa “Sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan serta mineral dan gas lainnya secara genetika semuanya tidak dapat dipisahkan pada suatu sistem panas bumi. dan guna pemanfaatannya dibutuhkan proses penambahan”.

Komponen Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi didefinisikan sebagai adanya transfer panas dari suatu sumber panas di dalam bumi ke penampang panas secara natural. Pendapat lain menyatakan bahwa energi panas bumi merupakan energi panas yang keluar dari dalam bumi yang terkandung pada batuan dan fluida yang mengisi rekahan dan pori batuan pada kerak bumi (Rybach dan Muffker, 1981).



Gambar 3. Sistem Panas Bumi (Dickson dan Fanelli, 2004).

Berdasarkan Gambar 3, maka sistem panas bumi yang ideal akan terdiri atas beberapa komponen. Menurut Suharno (2010), komponen-komponen penting yang mengontrol sistem panas bumi adalah :

1. Sumber panas (*heat source*)

Sumber panas dapat berupa intrusi batuan, dapur magma atau gradien temperatur (semakin dalam, temperatur semakin meningkat). Sumber panas mengalirkan panas melalui tiga proses yaitu konduksi, konveksi dan radiasi (Gupta dan Roy, 2007).

2. Fluida Panas Bumi

Fluida panas bumi berupa uap panas maupun air yang secara siklik terperangkap dalam suatu reservoir panas bumi. Fluida ini menjadi media dalam proses transfer panas dari *heat source* ke penampang panas bumi secara natural.

3. *Reservoir* Panas Bumi

Reservoir panas bumi merupakan struktur batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik sehingga fluida dapat terakumulasi dan dipanaskan oleh *heat source*.

4. Batuan Penutup (*Cap Rock*)

Batuan penutup yang dimaksud adalah batuan yang berfungsi untuk menjaga panas yang berasal dari *reservoir* agar tidak keluar dari permukaan. Batuan ini memiliki permeabilitas yang rendah, tebal, dan terletak di atas *reservoir*. Di atas batuan penutup biasanya akan terjadi proses alterasi karena adanya interaksi fluida sehingga menimbulkan manifestasi di atas permukaan berupa air panas ataupun uap panas.

5. Daerah resapan air atau aliran bawah permukaan (*recharge area*).

Daerah resapan merupakan suatu daerah yang dimana air akan meresap lebih banyak di banding dengan daerah lainnya. Resapan yang dihasilkan melalui permukaan tanah kemudian akan diteruskan ke dalam permukaan dalam bumi. Untuk kebutuhan pemanfaatan *reservoir* panas bumi sendiri daerah resapan air memiliki fungsi yang sangat penting, dimana daerah ini dapat diartikan sebagai kawah dari panas bumi.

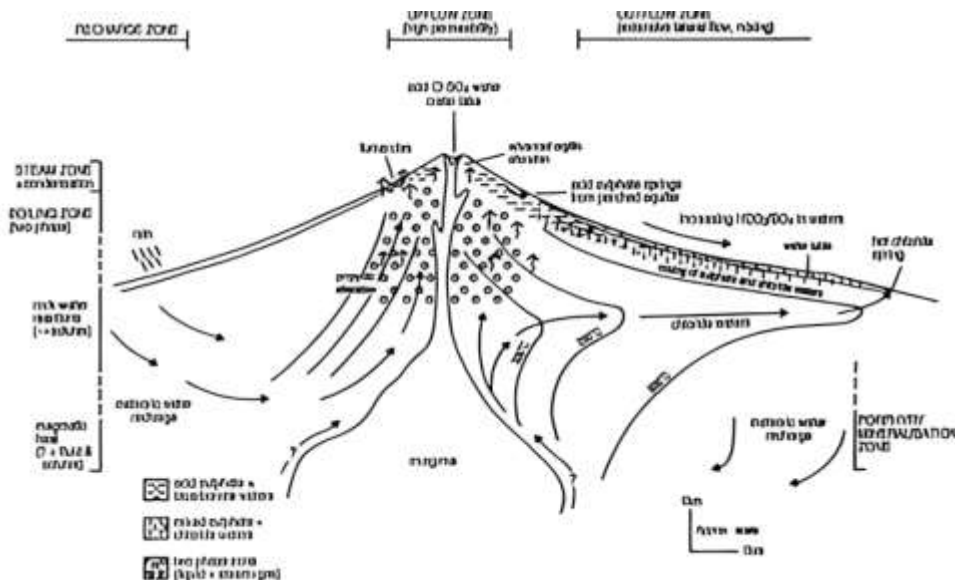
Kategorisasi Sistem Panas Bumi

Kategorisasi sistem panas bumi dibagi menjadi 2 yaitu menurut :

- **Kondisi Geografis Wilayah**

Nicholson (1993) dalam bukunya “*Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*” mengkategorikan sistem panas bumi berdasarkan kondisi geografis wilayah, yaitu :

• *High Terrain Geothermal Systems*

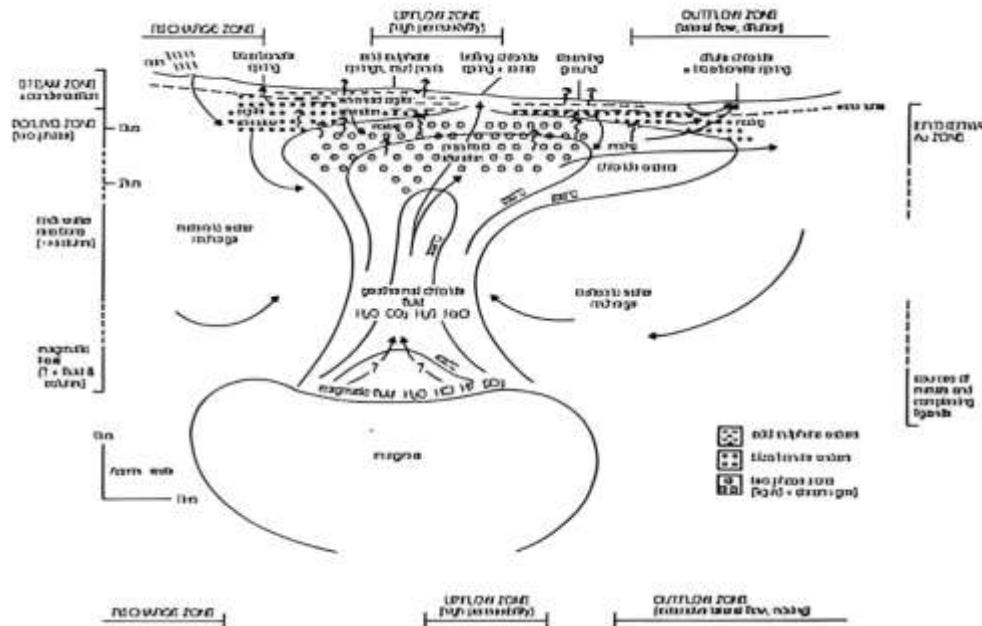


Gambar 4. *High Terrain Geothermal Systems* (Nicholson, 1993).

Sistem panas bumi yang berada di wilayah pegunungan atau dataran tinggi (Gambar 4), biasanya terkait dengan aktivitas vulkanik. Sistem ini memiliki

gradien suhu yang tinggi, reservoir terletak lebih dangkal, dan air *reservoir* biasanya lebih panas.

- *Low Terrain Geothermal Systems*



Gambar 5. *Low Terrain Geothermal Systems* (Nicholson, 1993).

Sistem panas bumi di wilayah dataran rendah atau cekungan sedimen (Gambar 5) dimana tidak ada aktivitas vulkanik yang signifikan. Sistem ini biasanya memiliki gradien panas yang lebih rendah dan sering kali terkait dengan *reservoir* yang lebih dalam.

- Menurut Temperatur dan Sifat Fluida Panas Bumi

Goff dan Janik (2000) mengklasifikasikan sistem panas bumi berdasarkan temperatur *reservoir* dan sifat fluida panas bumi, yaitu :

- *Sistem Suhu Tinggi (High-Temperature System)*
Sistem ini memiliki temperatur di atas 220°C di *reservoir* dan biasanya terdapat di daerah vulkanik aktif. Fluida yang dihasilkan umumnya berupa uap panas atau air yang sangat panas, yang cocok untuk pembangkit listrik.
- *Sistem Suhu Menengah (Medium-Temperature System)*
Sistem dengan suhu *reservoir* antara 150-220°C. Potensi energi dari sistem ini umumnya lebih rendah dari pada sistem suhu tinggi, tetapi masih dapat digunakan untuk pembangkit listrik skala menengah atau aplikasi langsung seperti pengeringan atau pemanasan.
- *Sistem Suhu Rendah (Low-Temperature System)*
Sistem ini memiliki temperatur di bawah 150°C dan biasanya tidak terletak di wilayah vulkanik. Fluida dalam sistem ini umumnya berupa air hangat

yang lebih cocok untuk aplikasi langsung seperti pemanasan runagan atau pertanian.

Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi di permukaan terjadi diakibatkan adanya perpindahan panas dari bawah permukaan karena adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air) mengalir ke permukaan. Manifestasi panas bumi adalah tanda-tanda alam yang terlihat di permukaan bumi sebagai bukti awal adanya aktivitas panas bumi di bawah permukaan (Ibrahim, 2020).



Gambar 6. Mata Air Panas.

Keberadaan suatu sistem panas bumi biasanya ditandai oleh adanya manifestasi permukaan. Beberapa manifestasi permukaan menunjukkan gejala adalah sebagai berikut :

- Fumarol dan Solfatara

Fumarol merupakan lubang asap tempat dikeluarkannya gas-gas yang dihasilkan oleh gunung api. Pada umumnya fumarol ditemukan di daerah gunung api atau pada terobosan melalui rekahan-rekahan, sedangkan solfatara adalah fumarole yang mengeluarkan gas belerang seperti SO_2 , H_2S , S dan tidak jarang juga dijumpai belerang yang mengendap sebagai kristal dan melapsisi rekahan-rekahan pada batuan yang dilaluinya.

- Mata Air Panas

Batuan dalam dapur magma mampu menyimpan panas dalam ribuan tahun. Air tanah yang turun dan bersentuhan dengan magma akan terpanaskan. Air yang panas akan cenderung naik ke permukaan melalui rfekahan-rekahan, pada kondisi jumlah air panasnya sangat besar, maka mata air panas tersebut bisa menjadi kolam air panas (Gambar 6).

- Uap Tanah

Uap panas ini diperkirakan berasal dari suatu lapisan yang berada di dekat permukaan yang mengandung air panas yang mempunyai suhu mendekati titik didihnya, sehingga terjadi penguapan di atas permukaan.

- Geyser

Geyser adalah air tanah yang tersembur keluar sebagai kolom uap dan kolom air panas. Kolom tersebut terbentuk oleh adanya celah yang terisi air dari kawah, kemudian terdorong ke atas oleh tekanan uap air dari bawah. Semakin banyak akumulasi air di dalam celah, maka semakin kuat tekanan uap air yang menekan dari bawah, sehingga semakin tinggi air yang tersembur ke atas.

- Batuan Alterasi

Batuan alterasi terjadi karena proses interaksi antara batuan asal dengan fluida panas bumi. Batuan alterasi terjadi karena disebabkan oleh beberapa faktor antara lain suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH dan lamanya interaksi (Suharno, 2012).

Salah satu manifestasi yang umum muncul di atas permukaan yaitu berupa mata air panas yang mentransfer panas ke permukaan tanah. Temperatur *reservoir* untuk sistem air panas menunjukkan kisaran yang cukup besar: <90°C (temperatur rendah), 90-150°C (temperatur menengah) dan 150-240°C (temperatur tinggi). Temperatur mata air panas tidak akan melebihi suhu didih air di ketinggian mata air itu (K. Wohletz dan G. Heiken, 1992).

2.3 Metode Gaya Berat

Metode gaya berat adalah salah satu metode geofisika dengan parameter fisis yang diukur adalah variasi medan gravitasi bumi (Sarkowi, 2011). Teori paling mendasar dalam metode gaya berat adalah Hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara benda dengan massa tertentu. Hukum tarik-menarik pada Newton dijelaskan dalam bukunya yang berjudul *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* yang diterbitkan pada tahun 1687. Bukunya menyatakan bahwa tarik-menarik antara dua massa sama bandingnya dengan hasil kali dari kedua massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua massa (R.J. Blakely, 1995).

Dalam koordinat kartesius gaya timbal balik antara partikel bermassa m_2 yang berpusat dengan titik $Q = (x', y', z')$ dan partikel bermassa m_1 di titik $P = (x, y, z)$, dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

dimana :

F = Gaya bekerja pada massa (Newton)

γ = Konstanta ($6,672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$) dalam cgs ($6,672 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2/\text{g}^2$)

m_1 = Massa benda 1 (kg)

m_2 = Massa benda 2 (kg)

r = Jarak antara m_1 dan m_2 (m)



Gambar 7. Gaya tarik menarik antar massa

Telford et. al., 1990 dalam bukunya persamaan gaya gravitasi sebagai berikut :

$$F = \gamma \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right) \hat{r} \quad (2)$$

dimana :

F = Gaya bekerja pada massa (Newton)

γ = Konstanta ($6,672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$) dalam cgs ($6,672 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2/\text{g}^2$)

m_1 = Massa benda 1 (kg)

m_2 = Massa benda 2 (kg)

r = Jarak antara m_1 dan m_2 (m)

$\hat{r}$ = Vektor satuan berorientasi dari m_1 dan m_2

Pada persamaan tersebut diketahui gaya tarik-menarik pada m_1 diakibatkan oleh m_2 yang berarti memiliki arah dari m_2 menuju m_1 . Menurut hukum gerak kedua Newton, jika suatu benda bermassa m dikenai gaya F , maka benda tersebut mengalami percepatan sebesar a , diketahui $a = g$ (percepatan gravity bumi) (Abdul Basid, 2012).

Hukum II Newton persamaannya sebagai berikut :

$$F = m \cdot g \quad (3)$$

dimana :

F = Gaya bekerja pada massa (Newton)

m = Massa benda (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

Dengan persamaan percepatan gravitasinya adalah :

$$g = -\gamma \left(\frac{m}{r^2} \right) \hat{r} \quad (4)$$

dimana :

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

γ = Konstanta ($6,672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$) dalam cgs ($6,672 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2/\text{g}^2$)

m = Massa benda (kg)

r = Jarak antara m_1 dan m_2 (m)

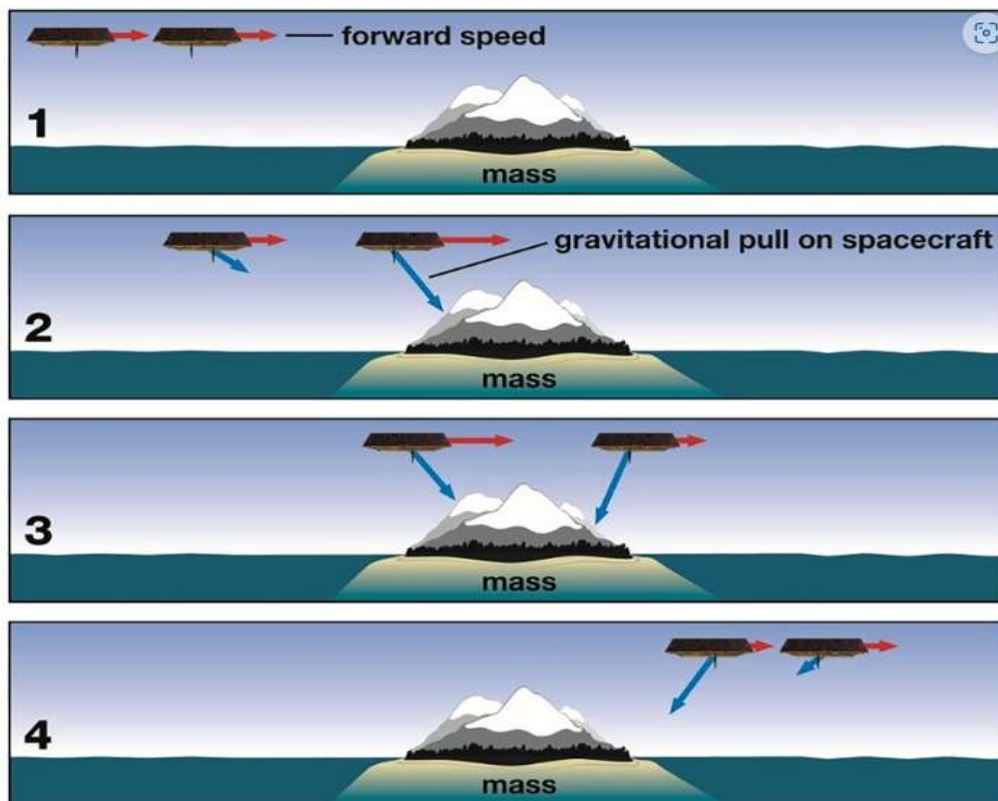
$\hat{r}$ = Vektor satuan berorientasi dari m_1 dan m_2

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai variasi percepatan gaya berat bumi antara lain yaitu densitas batuan (kerapatan massa), kondisi morfologi, pasang surut, udara bebas dan bentuk bumi (Lestari et. al., 2020). Dalam studi anomali gravitasi, variasi kecil dalam percepatan lokal dibandingkan dengan nilai gravitasi teoritis dihitung dan dinyatakan dalam satuan yang lebih kecil dari Gal, yaitu mGal (miligal). 1 mGal adalah 1/1000 dari 1 Gal, atau dalam satuan SI :

$$1 \text{ mGal} = 0.001 \text{ Gal} = 0.00001 \text{ m/s}^2$$

Anomali gravitasi biasanya dinyatakan dalam mGal karena variasi gaya gravitasi yang terukur di permukaan bumi, umumnya hanya dalam kisaran beberapa puluh hingga beberapa ratus mGal. Anomali gravitasi ini membantu ilmuwan memahami struktur bawa permukaan bumi, seperti adanya cekungan atau pegunungan bawah tanah, dan digunakan dalam eksplorasi sumber daya alam.

Data Gravitasi GGMPlus



Gambar 8. Akuisisi Satelit GRACE dan GRACE-FO (Adams et. al.,, 2022).

Ilustrasi dari NASA (Gambar 8), menjelaskan bagaimana eksperimen pemulihan gravitasi dan iklim oleh GRACE dan GRACE-FO untuk mengukur gravitasi. Kedua satelit bergerak bersama mempertahankan jarak yang relatif konstan sejauh 220km antara satu sama lain. Saat satelit terbang di atas wilayah yang memiliki gravitasi, maka percepatan akan diukur dan dikonversi kembali ke massa gravitasi yang setara (Adams et. al., 2022).

Akuisisi data gravitasi tidak hanya dilakukan secara langsung ke lapangan, namun dapat dilakukan menggunakan satelit yang telah lengkap dengan posisi titik data di permukaan bumi. Salah satu data satelit yang dapat digunakan dalam pengukuran gravitasi yaitu *Global Gravity Model Plus* (GGMplus). GGMplus adalah model gravitasi yang berasal dari pengukuran satelit luar angkasa dan data terestrial. Satelit luar angkasa tersebut diantaranya GRACE, GOCE, dan EGM2008 dengan data topografi SRTM yang memiliki resolusi tinggi. Model gravitasi GGMPlus hasil penelitian Universitas Curtin (Perth, Australia Barat) dan Universitas Teknik Munich (Jerman). Gravitasi GGMplus menyediakan grid data percepatan gravitasi, gravitasi *disturbance*, *undulasi quasigeoid*, dan defleksi komponen vertikal Utara- Selatan dan Barat-Timur. Kelebihan dari data GGMPlus yaitu memiliki kerapatan spasial $\pm 220\text{m}$, dan tidak memerlukan biaya seperti dalam pengukuran lapangan (N. A. Karimah dan A. Suprianto, 2020).

GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) adalah satelit gravimetri yang memberikan keakuratan informasi mengenai model medan gravitasi bumi dalam rentang waktu 5 tahun. Satelit ini memantau perubahan jarak yang terjadi antara 2 satelit GRACE pada orbitnya untuk mendeteksi perubahan medan gravitasi bumi dengan dengan kedua satelit berjarak sekitar 220 kilometer.

GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*) adalah satelit yang menentukan medan gravitasi statis berupa geoid dengan ketelitian 1 cm, anomaly gravitasi dengan ketelitian 1 miligal dan spasial grid sekitar 100 kilometer di permukaan bumi. data GOCE memberikan model khas dari medan gravitasi dan dalam merepresentasi bidang ekipotensial yang terwakili oleh geoid.

EGM2008 (*Earth Geopotential Model 2008*) dirilis oleh *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA). Data EGM2008 merupakan model gravitasi global yang mempunyai data anomaly gravitasi dan nilai undulasi geoid. Data EGM2008 menggabungkan data altimetri satelit, data gravitasi terestrial dan data gravitasi satelit GRACE. EGM2008 memiliki informasi tentang data koefisien harmonik bola, diantaranya orde (n), degree (m), koefisien geopotensial (C, S) dan standar deviasi (N. Marcelino et. al., 2010).

Data satelit GGMplus dapat diperoleh melalui situs online yang telah disediakan melalui website <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>

Koreksi-Koreksi dalam Metode Gaya Berat

Free Air Anomaly (FAA) merupakan data awal yang diperoleh saat mengunduh data gaya berat, di mana nilainya telah dikoreksi terhadap ketinggian titik pengukuran. Meskipun demikian, FAA belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan yang sebenarnya. Oleh karena itu, diperlukan serangkaian koreksi tambahan untuk menghilangkan pengaruh eksternal yang tidak diinginkan. Beberapa koreksi penting yang umum diterapkan antara lain *bouguer correction*, *terrain correction*, dan *complete bouguer anomaly* guna meningkatkan akurasi data serta menghasilkan interpretasi geologi yang lebih tepat.

a. Bouguer Correction

Koreksi bouguer digunakan untuk menghilangkan efek h (ketinggian) di atas medan gravitasi bumi tanpa mengabaikan massa di bawahnya. Efek ketinggian dapat mempengaruhi massa di bawah permukaan terhadap percepatan gravitasi. Besarnya koreksi bouguer diberikan oleh persamaan berikut :

$$\Delta g_B = 2\pi G \rho h = \beta \rho h (g.u.) \quad (5)$$

dimana :

Δg_B = Nilai koreksi bouguer (mGal)

$\beta = 2\pi G = 0.4192 \text{ g. u. } m^2 Mg^{-1}$

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

$G = 6.67 \times 10^{-8} m^3 Mg^{-1} s^{-2}$

h = ketinggian antara titik pengamatan dan sferoid referensi (m)

Setelah perhitungan koreksi bouguer, kemudian bisa didapatkan nilai anomali bouguer sederhana. Anomali Bouguer Sederhana (*Simple Bouguer Anomaly*) merupakan hasil yang didapatkan dari perhitungan koreksi bebas dan koreksi bouguer tanpa memasukkan koreksi medan. Untuk memperoleh nilai SBA yaitu dilakukan dengan persamaan berikut: (M. I. Sugita et. al.,, 2020).

$$SBA = FAA - BC \quad (6)$$

dimana :

SBA = Anomali Bouguer Sederhana (mGal)

FAA = Anomali Udara Bebas (mGal)

BC = Koreksi Bouguer (mGal)

b. Terrain Correction

Kondisi keteraturan permukaan melainkan berlemah dan berbukit, hal tersebut mempengaruhi nilai gravitasi. Bukit-bukit di atas elevasi stasiun

memberikan tarikan ke atas pada gravimeter, sementara lembah yang elevasinya rendah tidak memberikan tarikan ke bawah (W. M. Telford et. al., 1990), maka dari itu digunakan koreksi terrain. Koreksi terrain adalah tahapan koreksi yang dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan adanya pengaruh penyebaran massa yang tidak teratur di sekitar titik pengukuran. Koreksi terrain mengasumsikan bahwa titik amat yang diambil data percepatan gravitasi berada pada sebuah bidang yang sangat luas, namun pada saat dilapangan data yang diambil tidak selalu pada bidang datar, terdapat beberapa dataran yang memiliki ketinggian tidak seragam misalnya pada perbukitan, pegunungan dan lembah.

Koreksi medan dapat dilakukan sebagai berikut :

$$TC = g\rho\theta[(r_2 - r_1) + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2}] \quad (7)$$

dimana :

g = konstanta gravitasi ($6.673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

ρ = merupakan densitas batuan (kg/m^3)

θ = sudut yang terbentuk ($^\circ$)

r = jari-jari (m)

z = ketinggian medan (m)

c. **Complete Bouguer Anomaly**

Nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) adalah nilai anomali gravitasi yang diperoleh dari data pengukuran lapangan setelah melalui koreksi-koreksi gravitasi. Nilai CBA sebagai bentuk tanggapan total perubahan nilai anomali percepatan gravitasi di permukaan diakibatkan oleh perubahan densitas batuan batuan penyusun bawah permukaan. Untuk dapat mengetahui bentuk anomali yang dekat dengan permukaan dan jauh dari permukaan maka tanggapan terhadap CBA terbagi menjadi dua, yaitu residual dan regional (Karunianto et. al., 2017).

Besarnya nilai CBA dapat diketahui dengan persamaan berikut :

$$CBA = g_{obs} - g_\theta + FAC - BC + TC \quad (8)$$

$$CBA = g_{obs} - g_\theta + (0.3086 \times h) - 0.04193 \times p \times h + TC \quad (9)$$

dimana :

CBA = *Complete bouguer anomaly* (mGal)

g_{obs} = Nilai Gravitasi Observasi (mGal)

g_θ = Gaya Berat Normal/Teoritis pada Lintang

FAC = Nilai Koreksi Udara Bebas (mGal)

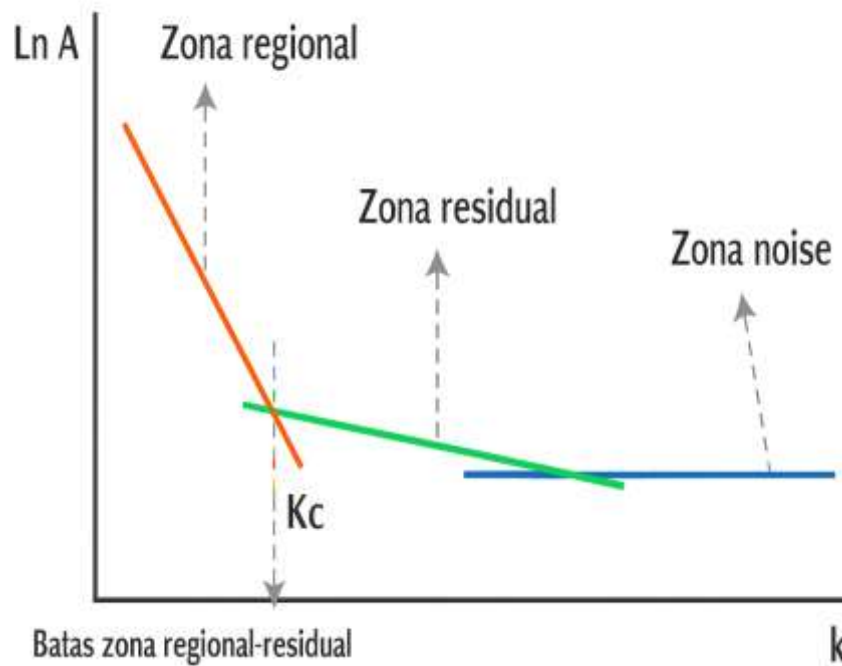
TC = Nilai Koreksi Medan (mGal)

BC = Nilai Koreksi Bouguer (mGal)

ρ = Rapat Massa (gr/cc)

h = Tinggi (m)

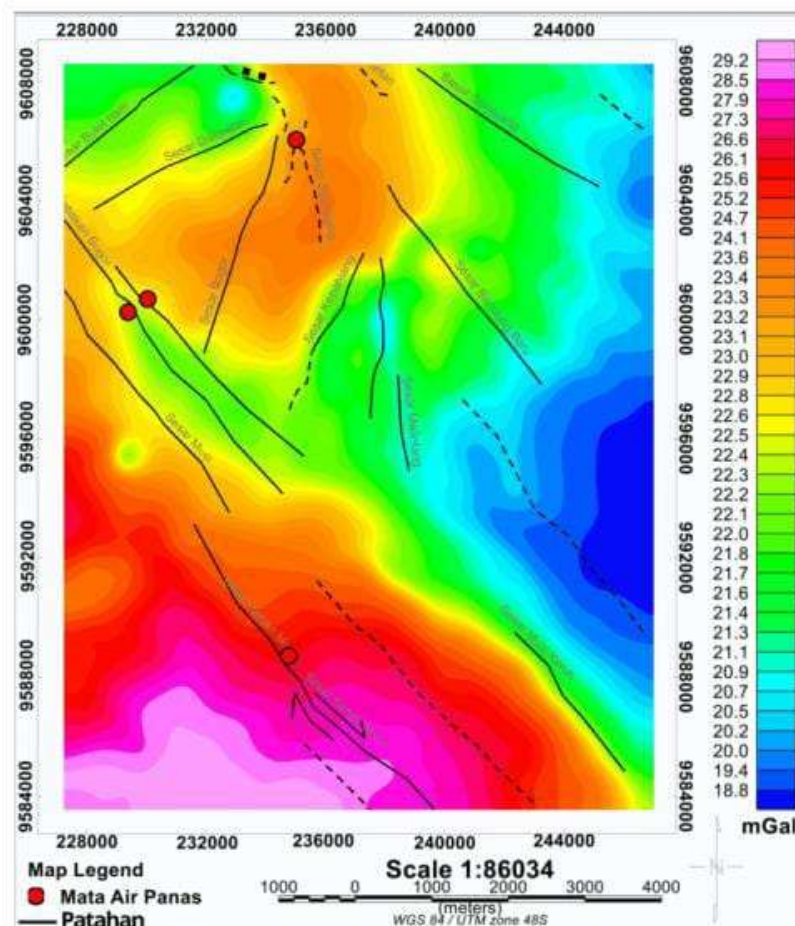
Analisis Spektrum



Gambar 9. Analisis Spektrum (Apriani, 2017).

Analisis spektrum merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui kedalaman anomali. Analisis spektrum menggunakan prinsip transformasi *fourier* yaitu dengan mengubah data dari domain ruang menjadi domain bilangan gelombang. Gradien dari grafik analisis spektrum besarnya sebanding dengan kedalaman bidang anomali, dimana gradien yang bernilai besar mencerminkan anomaly regional sedangkan gradien yang bernilai lebih kecil mencerminkan anomaly residual (Gambar 9) (Apriani, 2017). Kemudian Analisa spektrum ini juga berguna dalam menentukan lebar dari jendela filter menurut perhitungan frekuensi *cut off* dari analisa spktrum nantinya (Amaliah et. al., 2014).

Peran gaya berat dalam survei panas bumi adalah untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan yang berpotensi untuk menyimpan energi panas bumi. Gaya berat dilakukan untuk pemodelan struktur bawah permukaan dengan menganalisis variasi anomali gravitasi. Hasilnya, gaya berat membantu dalam memahami perbedaan densitas batuan yang berhubungan dengan intrusi magma atau struktur patahan, yang menjadi indikator panas bumi (Mutiah et. al., 2024).



Gambar 10. Respon Anomali gravitasi terhadap Pendugaan Reservoir, Sesar dan Rekahan (Sihombing et. al., 2024).

Metode gaya berat bekerja dengan mengukur variasi kecil pada medan gravitasi di permukaan bumi, yang diinterpretasikan sebagai hasil dari perubahan densitas di bawah tanah. Dalam konteks panas bumi, perbedaan densitas ini dapat terkait dengan :

- Reservoir panas bumi : Biasanya memiliki densitas lebih rendah dibandingkan dengan batuan sekitarnya karena adanya cairan hidrotermal atau material termal yang lebih panas.
- Sesar dan rekahan : Sistem panas bumi sering terasosiasi dengan struktur geologi seperti sesar dan rekahan, yang bertindak sebagai jalur fluida panas (Gambar 10). Sesar dan rekahan biasanya memiliki densitas yang lebih rendah karena porositas yang tinggi, terutama jika diisi oleh fluida panas.

Faktor utama dalam menghitung nilai percepatan gravitasi adalah kerapatan massa atau densitas batuan. Banyak faktor, termasuk kerapatan massa, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-pori batuan, tekanan yang

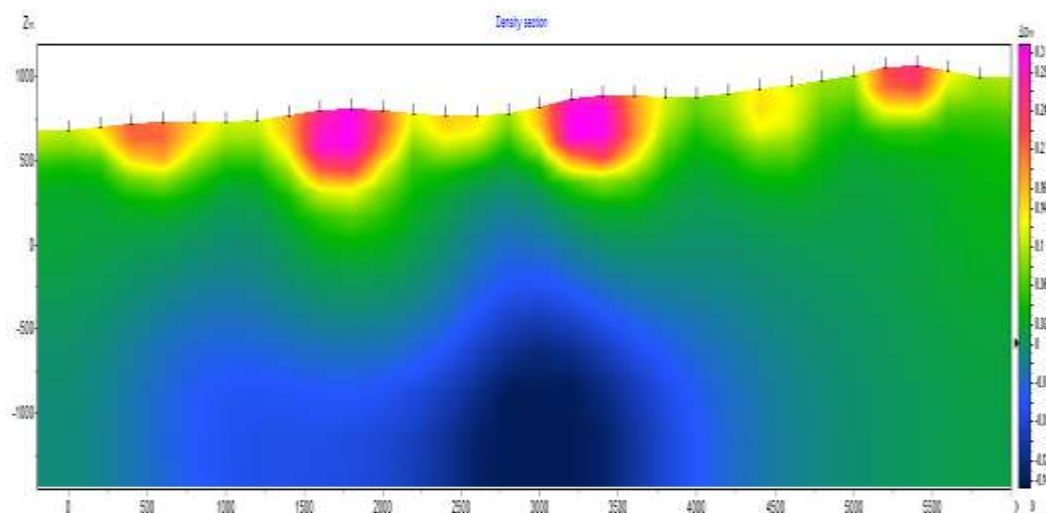
menyebabkan pemadatan dan pelapukan batuan, mempengaruhi densitas batuan (Kirbani, 2001).

Table 1. Densitas batuan (W. M. Telford et. al., 1990).

Rock Type	Range(g/cm³)	Average(g/cm³)
<i>Sediments</i>		
<i>Overburden</i>	1.92	1.92
<i>Soil</i>	1.2 – 2.4	1.92
<i>Clay</i>	1.63 – 2.6	2.21
<i>Gravel</i>	1.7 – 2.4	2.0
<i>Sand</i>	1.7 – 2.3	2.0
<i>Sandstone</i>	1.61 – 2.76	2.35
<i>Shale</i>	1.77 – 3.2	2.40
<i>Limestone</i>	1.95 – 2.90	2.55
<i>Dolomite</i>	2.28 – 2.90	2.70
<i>Sedimentary rocks (av.)</i>		2.50
<i>Igneous rocks</i>		
<i>Rhyolite</i>	2.35 – 2.70	2.52
<i>Andesite</i>	2.4 – 2.8	2.61
<i>Granite</i>	2.50 – 2.81	2.64
<i>Granodiorite</i>	2.67 – 2.79	2.73
<i>Porphyry</i>	2.60 – 2.89	2.74
<i>Quartz diorite</i>	2.62 – 2.96	2.79
<i>Diorite</i>	2.72 – 2.99	2.85
<i>Lavas</i>	2.80 – 3.00	2.90
<i>Diabase</i>	2.50 – 3.20	2.91
<i>Basalt</i>	2.70 – 3.30	2.95
<i>Gabbro</i>	2.70 – 3.50	3.03
<i>Peridotite</i>	2.78 – 3.37	3.15
<i>Acid igneous</i>	2.30 – 3.11	2.61
<i>Basic igneous</i>	2.09 – 3.17	2.79
<i>Metamorphic rocks</i>		
<i>Quartzite</i>	2.5 – 3.70	2.60
<i>Schists</i>	2.39 – 2.9	2.64
<i>Graywacke</i>	2.6 – 2.7	2.65
<i>Marble</i>	2.4 – 2.9	2.75
<i>Serpentine</i>	2.4 – 3.10	2.78
<i>Slate</i>	2.6 – 2.9	2.79
<i>Gneiss</i>	2.59 – 3.0	2.80
<i>Amphibolite</i>	2.90 – 3.04	2.96
<i>Eclogite</i>	3.2 – 3.4	3.31
<i>Metamorphic (av.)</i>	2.4 – 3.1	2.74

Densitas batuan mempengaruhi bagaimana panas disimpan dan ditransfer di dalam kerak bumi, serta dapat memberikan petunjuk mengenai komposisi, porositas, dan tingkat rekahan batuan di reservoir panas bumi. Batuan dengan densitas tinggi, seperti batuan beku, cenderung lebih padat dan memiliki konduktivitas termal yang lebih baik, sementara batuan dengan densitas rendah, seperti batuan sedimen atau batuan yang teralterasi, dapat menunjukkan adanya ruang pori yang lebih besar, yang memungkinkan penyimpanan dan pergerakan fluida panas.

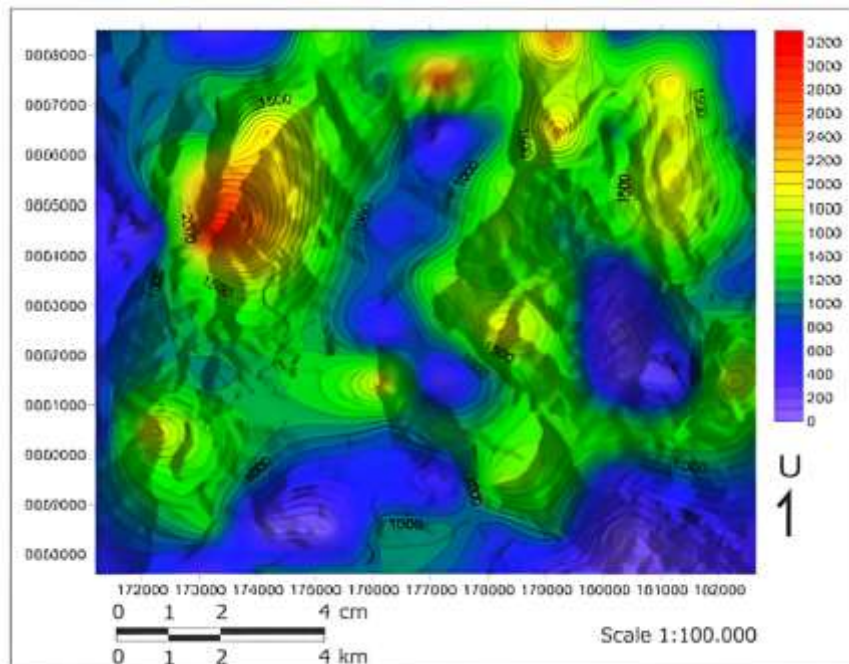
Pemodelan gravitasi digunakan untuk menginterpretasikan data gravitasi guna memahami struktur geometri bawah permukaan. Metode ini dilakukan dengan menganalisis distribusi batuan di bawah permukaan. Terdapat tiga jenis pemodelan gravitasi, yaitu dua dimensi (2D), dua setengah dimensi (2,5D), dan tiga dimensi (3D). Pemodelan 2D adalah salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis data gravitasi. Ini memungkinkan penggambaran struktur bawah permukaan dengan detail yang cukup baik.



Gambar 11. Pemodelan 2D (Scottish Water, 2020).

Pemodelan inversi adalah proses perhitungan data model secara terbalik, dimana parameter model dapat diperoleh langsung dari data melalui pemodelan matematis (Supriyanto, 2007). Pemodelan inversi dapat diterapkan dengan baik untuk data anomali gravitasi, baik data lapangan maupun data citra satelit. Zuhdi et. al., (2020) telah menerapkan pemodelan secara inversi terhadap data anomali gravitasi mikro (microgravity) untuk mengidentifikasi pola injeksi fluida dalam lapisan reservoir. Metode ini sering kali digunakan bersama data geofisika untuk merekonstruksi struktur bawah permukaan secara optimal, seperti yang ditunjukkan pada model dari anomali Bouguer.

2.4 Fault Fracture Density (FFD)

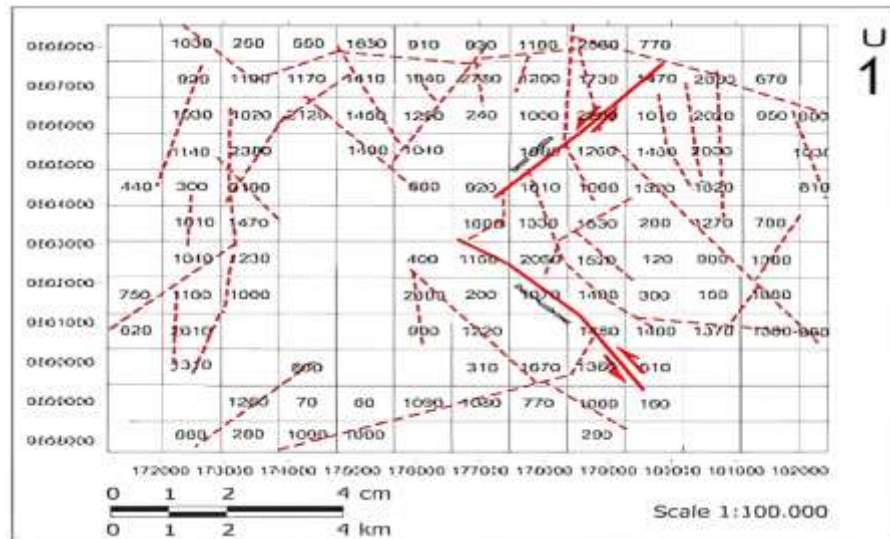


Gambar 12. Peta *Fault Fracture Density* (Kurniawan, 2022).

Rekahan merupakan struktur yang penting untuk diperhatikan karena struktur ini erat hubungannya dengan jalur masuk dan keluarnya fluida hidrotermal dan erat pula hubungannya dengan siklus hidrologi (Gambar 12). Rekahan dapat menyebabkan batuan beku yang memiliki permeabilitas primer yang kecil menjadi memiliki nilai permeabilitas sekunder yang besar (Santoso, 2004). Sebuah area dengan densitas rekahan yang tinggi dapat mengindikasikan tingginya tingkat masuknya fluida pada area tersebut (Soengkono, 1990).

Analisis *fault fracture density* dapat dilakukan dengan melakukan penarikan kelurusan pada lembahan dan sungai pada *digital elevation map* (DEM). Berdasarkan hasil analisis *fault fracture density* terdapat area yang memiliki densitas rekahan tinggi. Area ini diinterpretasikan sebagai area permeabel yang memungkinkan lolosnya fluida dari permukaan untuk masuk kedalam suatu sistem panas bumi dan juga sebagai area permeabel yang memungkinkan adanya manifestasi panas bumi seperti mata air panas di permukaan.

Analisis kerapatan patahan (FFD) menunjukkan bahwa memiliki linaemen dan wilayah dengan kerapatan patahan tinggi menjadi tempat munculnya manifestasi panas bumi seperti mata air panas dan fumarol. Hal ini mengindikasikan bahwa permeabilitas batuan di bawah permukaan baik, sehingga memungkinkan fluida geothermal untuk naik ke permukaan melalui patahan-patahan lokal (Nayoan et. al., 2023)



Gambar 13. Hasil Kalkulasi dari Panjang Rekahan (Kurniawan, 2022).

Rekahan ditunjukkan oleh garis-garis merah (atau hitam dalam beberapa peta (Gambar 13)). Rekahan ini adalah representasi dari patahan geologi yang ada di daerah tersebut. Setelah menghitung FFD, kamu dapat membandingkan kerapatan rekahan di berbagai bagian peta. Area dengan nilai FFD yang tinggi menunjukkan zona yang lebih tertekan atau memiliki aktivitas tektonik yang lebih intens, sedangkan area dengan FFD yang lebih rendah mungkin lebih stabil secara geologis. Interpretasi hasil jika nilai FFD yang tinggi dapat menunjukkan potensi area yang lebih rapuh atau lebih rentan terhadap aktivitas tektonik, karena kerapatan rekahan yang lebih tinggi berarti ada lebih banyak zona lemah di lapisan batuan. Nilai FFD yang rendah menunjukkan bahwa wilayah tersebut lebih stabil secara struktural, dengan lebih sedikit patahan yang terlihat. Analisis ini sering digunakan untuk memahami potensi zona patahan aktif, mendeteksi aliran fluida bawah tanah (seperti panas bumi), atau menentukan area berisiko gempa.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Akuisisi data dilakukan di Desa Renah Kemumu, Kecamatan Jangkat, Kabupaten Merangin dan pengolahan data dilakukan di Universitas Jambi.

Tabel 2. Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	November				Januari				Maret				April				Mei				Juni			
	Desember				Februari																			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Studi Literatur Pemetaan Geologi Pengambilan Data Pengolahan dan Pemodelan Interpretasi dan Analisis Hasil Evaluasi dan Penyajian Laporan																								

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Laptop, berfungsi untuk menjalankan beberapa *software* yang digunakan pada saat pengolahan data gaya berat. *Software* ini digunakan pada pengolahan data gravitasi tersebut ialah:
 - *Microsoft Excel* digunakan untuk mengolah perhitungan *slice* lokasi dalam menentukan lebar jendela dalam analisis spektrum.
 - *Surfer* digunakan untuk membuat peta kontur dari nilai topografi, serta untuk mengubah koordinat *decimal degree* menjadi UTM untuk membantu dalam proses mendapat nilai *terrain correction* di oasis montaj.
 - *Global Mapper* digunakan untuk menentukan nilai batas daerah regional dan batas lokal pada daerah lokasi penelitian.
 - *Matlab* digunakan untuk mengekstrak data gravitasi GGMPlus kemudian dilakukan koreksi topografi menggunakan *software oasis montaj*.
 - *Oasis Montaj* digunakan untuk mencari nilai *terrain correction*, membuat peta *complete bouger anomaly*, pemisahan anomali regional, membuat peta anomali regional, residual dan pemodelan 2D.
 - *Arcgis* digunakan untuk membuat peta lokasi penelitian.

2. Kompas Geologi, berfungsi untuk mengukur orientasi struktur geologi seperti patahan, rekahan, dan lapisan batuan.
3. Palu Geologi, berfungsi untuk mengambil sampel batuan di lapangan dan mengidentifikasi sifat fisik batuan seperti tekstur, kekerasan, dan komposisi mineral.
4. *Global Positioning System* (GPS), berfungsi untuk menentukan lokasi geografis, memetakan lokasi pengambilan sampel, titik pengukuran dan jalur survei.

Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data Gravity yang di *download* dari citra satelit pada website <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>. Berupa data citra satelit yakni berupa data gravitasi *free air anomaly* (FAA) dan data topografi berupa latitude, longitude serta elevasi.
2. Data SRTM yang di *download* dari website <https://www.indonesia-geospasial.com/2020/01/download-dem-srtm-30-meter-se-indonesia.html> yang digunakan untuk membuat peta kontur lokasi penelitian
3. Data Geologi Regional yang digunakan data pendukung dan dapat memberi informasi mengenai formasi, struktur, stratigrafi, fisiografi, jenis dan sifat batuan yang disajikan dalam bentuk gambar dengan warna, simbol dan corak maupun gabungan ketiganya yang ada di daerah yang dipetakan.
4. Data *Fault Fracture Density* (FFD) yang digunakan untuk menggambarkan jumlah, intensitas, atau frekuensi rekahan dan patahan dalam area penelitian.

3.3 Metode Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode campuran, yaitu kualitatif dan kuantitatif dalam menganalisis data anomali gravitasi dan *fault fracture density* (FFD), berikut merupakan metode penelitian yang akan dilakukan:

1. Pendekatan Kualitatif
 - Anomali gravitasi : Pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami pola dan interpretasi umum dari variasi medan gravitasi di area penelitian. Misalnya, berdasarkan peta anomali gravitasi, peneliti dapat mengenali adanya struktur bawah permukaan seperti cekungan, intrusi magma, atau zona rekahan. Ini berguna untuk mengidentifikasi area-area yang berpotensi memiliki reservoir panas bumi, terutama dengan memperhatikan pola kontras densitas batuan.

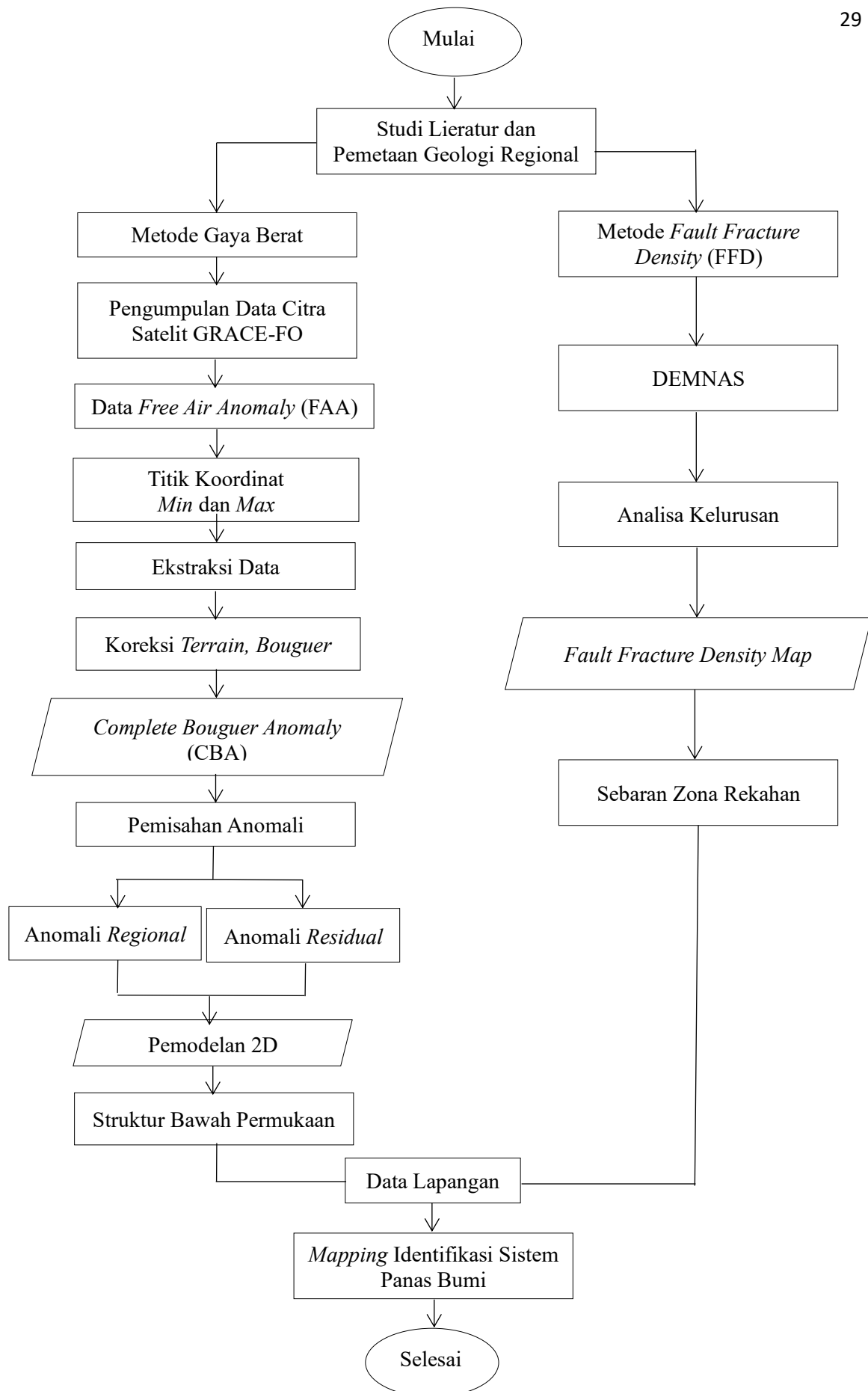
- *Fault Fracture Density* (FFD) : Analisis kualitatif dilakukan dengan mengidentifikasi pola distribusi rekahan dan patahan pada wilayah penelitian. Peneliti dapat melihat bagaimana jalur patahan mempengaruhi sirkulasi fluida panas bumi di bawah permukaan. Selain itu, data ini digunakan untuk menentukan zona permeCBAe yang memungkinkan adanya migrasi fluida ke *reservoir* panas bumi, serta memprediksi jalur fluida berdasarkan observasi pola patahan.

2. Pendekatan Kuantitatif

- Anomali gravitasi : Pendekatan kuantitatif dalam analisis gravitasi melibatkan pengukuran variasi medan gravitasi secara numerik untuk menghitung densitas batuan di bawah permukaan. Melalui metode *Bouguer Correction* dan *Terrain Correction*, variasi percepatan gravitasi diukur dalam satuan mGal, yang kemudian diolah untuk menghasilkan anomali bouguer. Data ini diproses menggunakan pemodelan 2D berdasarkan respon anomali residual. Untuk menentukan variasi densitas batuan di bawah permukaan dan memperkirakan lapisan batuan sistem panas bumi.
- *Fault Fracture Density* (FFD) : Pada FFD, pendekatan kuantitatif dilakukan dengan menghitung panjang dan distribusi rekahan dalam suatu area. Data ini diambil dari *Digital Elevation Model* (DEMNAS) dan digunakan untuk mengukur kerapatan patahan di berbagai wilayah. Hasil kuantitatif ini kemudian dikorelasikan dengan potensi jalur migrasi panas bumi.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian adalah serangkaian proses yang harus dijalani secara sistematis dan terukur untuk menjalankan penelitian. Proses-proses ini membantu peneliti dalam merencanakan, melaksanakan, menganalisis, dan melaporkan hasil penelitian dengan akurat (Gambar 14).



Gambar 14. Diagram Alir

Tahapan penelitian yang akan dilakukan mencakup beberapa aspek berikut:

1. Persiapan

Pada penelitian ini, studi literatur mencakup penelusuran jurnal, buku, dan laporan sebelumnya terkait metode gaya berat, pemetaan geologi, serta aplikasi data *fault fracture density* (FFD). Penelitian sebelumnya memberikan dasar teori yang akan menjadi acuan dalam analisis dan interpretasi data gaya berat serta FFD. Peta-peta yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi:

- Peta Geologi Regional : Memberikan informasi mengenai formasi geologi, jenis batuan, struktur, dan stratigrafi yang ada di area penelitian.
- Peta Kontur : Peta ini dibangun dari data topografi, seperti SRTM, untuk menggambarkan ketinggian permukaan dan mendukung analisis kontur di daerah penelitian.

Pemetaan Geologi Regional ini dilakukan di lapangan dengan mengukur orientasi struktur geologi seperti patahan dan rekahan menggunakan kompas geologi. Selain itu, diambil sampel batuan untuk dianalisis sifat fisiknya, seperti tekstur, kekerasan, dan komposisinya mineral. GPS digunakan untuk menentukan lokasi pengambilan sampel, titik pengukuran, dan jalur survei di lapangan.

2. Akuisisi Data

- Data gaya berat dalam penelitian ini berasal dari citra satelit yang memberikan informasi tentang anomali medan gravitasi. Data ini diunduh dari situs GGMPPlus, yang menyediakan data gravitasi berdasarkan pengukuran satelit. Satelit mengukur variasi medan gravitasi berdasarkan distribusi massa batuan di bawah permukaan. Dari data ini, Batasan area penelitian akan ditentukan.

Tahapan Akuisisi Data :

1. Membuka situs penyedia data, yaitu GGMPPlus.
 2. Menentukan area lokasi penelitian berdasarkan koordinat yang sesuai dengan daerah penelitian, yang berada di zona UTM 47S di Desa Renah Kemumu.
- Data *Fault Fracture Density* (FFD) berasal dari model elevasi digital, seperti DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*). Data DEMNAS memiliki resolusi 8,1 meter per pixel, yang cukup tinggi untuk memetakan pola patahan dan rekahan.

Tahapan Akuisisi Data :

1. Membuka situs penyedia data DEMNAS, yaitu Portal Geospasial Indonesia.
 2. Menentukan area lokasi penelitian berdasarkan koordinat yang sesuai, kemudian mendownload data DEMNAS untuk digunakan dalam pemetaan kerapatan patahan di wilayah penelitian.
- Data Lapangan

Tahapan Akuisisi Data :

1. Menentukan area lokasi penelitian berdasarkan koordinat yang sesuai.
2. Luas daerah penelitian yaitu 4 x 4 km.

3. Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data, proses yang dilakukan yaitu :

1. Pengolahan Data Gaya berat :
 - Proses dilakukan dengan studi literatur dan pemetaan geologi regional. Langkah ini bertujuan untuk memahami konsep gaya berat, mengetahui kondisi geologi awal dan kerangka dasar yang menjadi latar belakang dari analisis selanjutnya.
 - Pengumpulan data gaya berat yaitu mengetahui titik koordinat minimum dan maksimum ditentukan untuk menentukan wilayah penelitian. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data di lapangan, yang merupakan informasi terkait gaya gravitasi di berbagai lokasi dalam wilayah yang diteliti.
 - Ekstraksi data, dilakukan ekstraksi data untuk pengolahan data mentah dari satelit GGMPlus menggunakan Matlab untuk mendapatkan koordinat longitude, latitude dan data gaya berat dalam satuan mGal.
 - Koreksi terrain, dilakukan untuk memperbaiki efek medan topografi terhadap data yang dikumpulkan dengan menggunakan *oasis montaj*. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan distorsi yang disebabkan oleh variasi medan permukaan.
 - Analisis spektral, dilakukan untuk pemisahan anomali.
 - Pemisahan anomali, dilakukan pemisahan anomali regional dan residual untuk memisahkan efek gravitasi dari struktur bawah permukaan yang lebih dangkal (residual) dan lebih dalam dengan menggunakan metode analisis spektrum.

2. Pengolahan Data *Fault Fracture Density* (FFD) :

- Pengolahan DEMNAS, data elevasi dari DEMNAS awalnya data dalam bentuk data raster, maka diperlukan konversi menjadi data vektor untuk diperoleh data kontur yang dilakukan di QGIS.
- Analisa kelurusan, dilakukan dengan melakukan penarikan garis bantu yang memperlihatkan pola pada peta kontur yang rapat.

3. Pemodelan Data

Pada Pemodelan Data Gaya Berat dilakukan pemodelan 2D, dilakukan *slicing* pada data anomali residual pada area target yang memperlihatkan kontras densitas batuan untuk dilakukan pemodelan bawah permukaan.

4. Analisis Data

- Anomali gravitasi, yang dihasilkan dianalisis dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan berdasarkan variasi anomali bouguer, regional dan residual.
- Pada *Fault Fracture Density* (FFD), diperoleh sebaran nilai variasi kepadatan patahan yang memperlihatkan nilai rendah, sedang, tinggi dan untuk geometri elemen struktur seperti arah, kemiringan, dan panjang patahan dianalisis untuk memahami pola struktur geologi.

5. Interpretasi Data

- Gaya Berat

Pada interpretasi data gaya berat didapatkan anomali positif yang menunjukkan adanya massa batuan dengan densitas tinggi seperti batuan beku, sedangkan anomali negatif dapat menunjukkan adanya massa batuan dengan densitas rendah seperti batuan sedimen.

- *Fault Fracture Density* (FFD)

Hasil analisis FFD digunakan untuk mengidentifikasi zona dengan kepadatan patahan tinggi yang mungkin menunjukkan area dengan permeabilitas tinggi atau potensi geologi tertentu. Misalnya, zona kepadatan patahan tinggi dapat menunjukkan potensi sumber daya panas bumi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Lapangan

Mata Air Panas



Gambar 15. Mata Air Panas

Mata Air Panas Graho Nyabu adalah salah satu manifestasi panas bumi yang terletak di Desa Renah Kemumu, Kecamatan Jangkat. Kawasan ini merupakan bagian dari Kompleks Vulkanik Gunung Masurai dan berada dalam zona patahan aktif, khususnya Segmen Sesar Dikit dari Sistem Sesar Sumatra. Suhu permukaan mata air panas berkisar antara 71.5 hingga 91.3°C. Pengukuran pH pada manifestasi air panas di lokasi penelitian memiliki pH netral yaitu 7.

Tanah Beruap



Gambar 16. Tanah Beruap

Beberapa daerah lapangan panas bumi sering ditemukan tempat-tempat yang mengeluarkan uap panas yang terlihat keluar dari permukaan tanah. Fenomena ini terjadi ketika uap air panas dari kedalaman bumi naik melalui

rekahan atau pori-pori batuan dan keluar di permukaan tanah, menciptakan area dengan permukaan hangat hingga panas serta sering kali disertai dengan pelepasan gas.

Alterasi Batuan



Gambar 17. Alterasi Batuan

Alterasi hidrotermal menjadi tanda-tanda penting pada lapangan panas bumi. Alterasi hidrotermal merupakan proses yang kompleks karena meliputi perubahan secara mineralogi, kimia dan tekstur yang dihasilkan dari interaksi larutan hidrotermal dengan batuan pada kondisi fisika, kimia tertentu. Faktor yang mempengaruhi proses alterasi hidrotermal, antara lain: suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH dan lamanya interaksi.

Jenis Batuan

Batuan andesit



Gambar 18. Batuan Andesit

Batuan andesit yang ditemukan tersingkap dengan kenampakan adanya kekar. Sampel batuan andesit yang ditemukan di lapangan berwarna coklat,

dengan jenisnya termasuk batuan beku ekstrusif. Batuan ekstrusif adalah batuan yang terbentuk dari pendinginan lava di permukaan bumi.

Endapan travertin



Gambar 19. Endapan Travertin

Endapan travertin yang didapat di lapangan berada disekitar manifestasi mata air panas yang memiliki pH bernilai 7 atau netral. Endapan travertin yang ditemukan di lokasi penelitian membentuk suatu perlapisan, yang tersusun atas mineral-mineral komposisi senyawa karbonat.

Batuan propilitik



Gambar 20. Batuan Propilitik

Batuan propilitik terjadi karena telah mengalami alterasi batuan vulkanik. Batuan propilitik yang terdapat di lokasi penelitian memiliki warna keabuan.

Berdasarkan keterdapatannya di lapangan melalui pengamatan geologi, mengindikasikan bahwa batuan tersebut merupakan hasil dari aktivitas vulkanik Formasi Tomh (Hulusimpang). Munculnya batuan beku andesit yang tersingkap dengan adanya proses pengkekarannya mengindikasikan bahwa batuan

andesit mengalami pendinginan lava di permukaan. Sedangkan endapan travertin dan batuan propilitik menunjukkan bahwa alterasi hidrotermal yang terjadi di lokasi penelitian termasuk dalam alterasi tipe propilitik.

4.2 Data Gravity

Data Satelit GGMplus

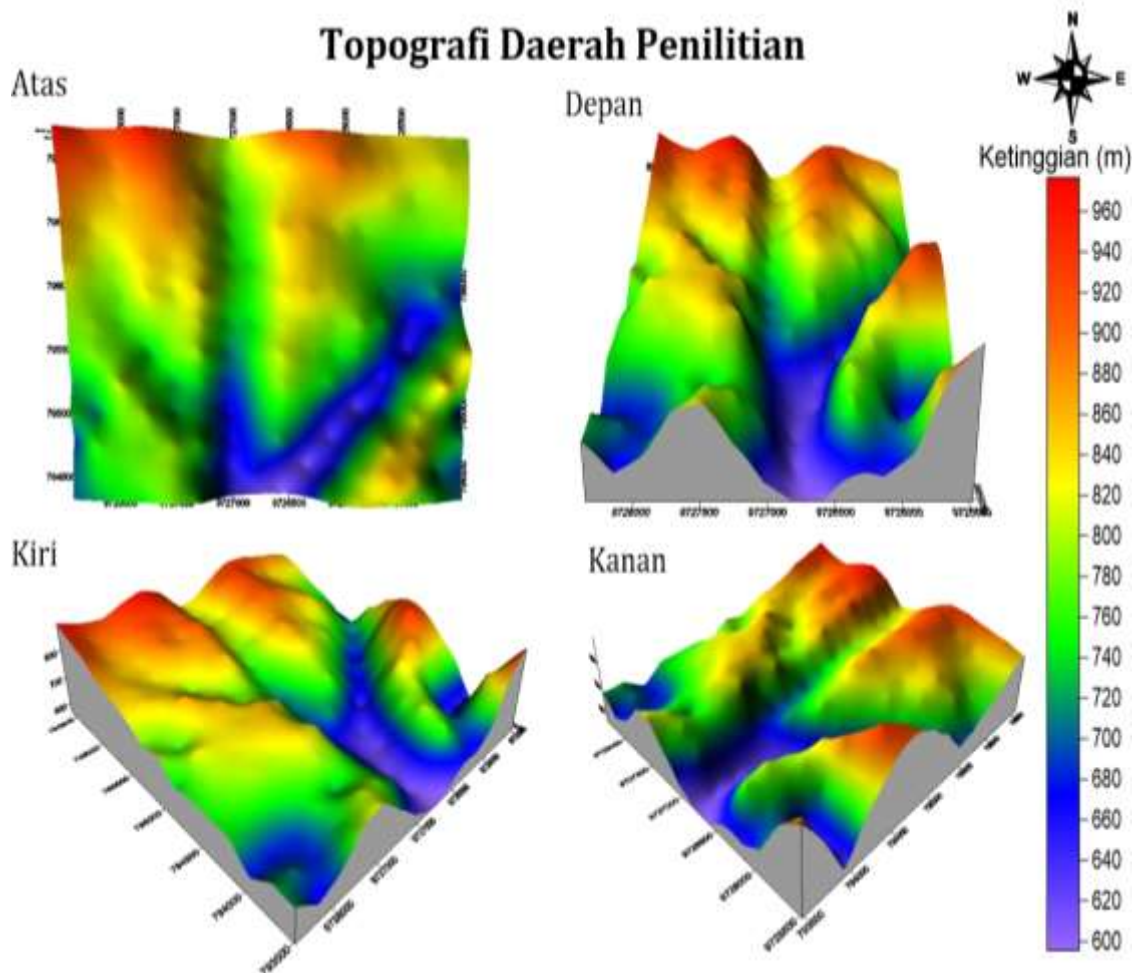
Pada Tabel 1. dapat dilihat merupakan data yang diperoleh dari data satelit GGMplus yang diekstrak menggunakan *software* matlab. Adapun data yang diperoleh yaitu data koordinat (*longitude* dan *latitude*), elevasi dan *free air anomaly* (FAA) untuk setiap titik pada daerah penelitian. Dengan memasukkan batas koordinat lokasi penelitian diperoleh data sebanyak 210 data.

Tabel 3. Data Satelit GGMplus

Long	Lat	FAA	Elevasi
101.639	-2.481	118.8	868
101.641	-2.481	102.5	752
101.643	-2.481	81.7	592
101.645	-2.481	102.3	708
101.647	-2.481	111	778
101.649	-2.481	117.3	837
101.651	-2.481	118.2	843
101.653	-2.481	114.7	806
101.655	-2.481	105.9	746
101.657	-2.481	91.8	647
101.659	-2.481	95.9	659
101.661	-2.481	103.4	700
101.663	-2.481	107.1	727
101.665	-2.481	112.7	768
101.667	-2.481	115.2	789
101.639	-2.479	112.4	805
101.641	-2.479	107.4	775
101.643	-2.479	88.3	613
101.645	-2.479	100.1	692
101.647	-2.479	112.6	799

Topografi Daerah Penelitian

Pada Gambar 21. menunjukkan model topografi tiga dimensi dari wilayah penelitian yang dibuat menggunakan perangkat lunak *Surfer*. Pemodelan ini bertujuan untuk menggambarkan variasi elevasi permukaan secara lebih jelas dan detail. Berdasarkan hasil pemodelan tersebut, wilayah penelitian memiliki rentang ketinggian yang cukup bervariasi, yaitu mulai dari 580 meter hingga 880 meter di atas permukaan laut (mdpl).



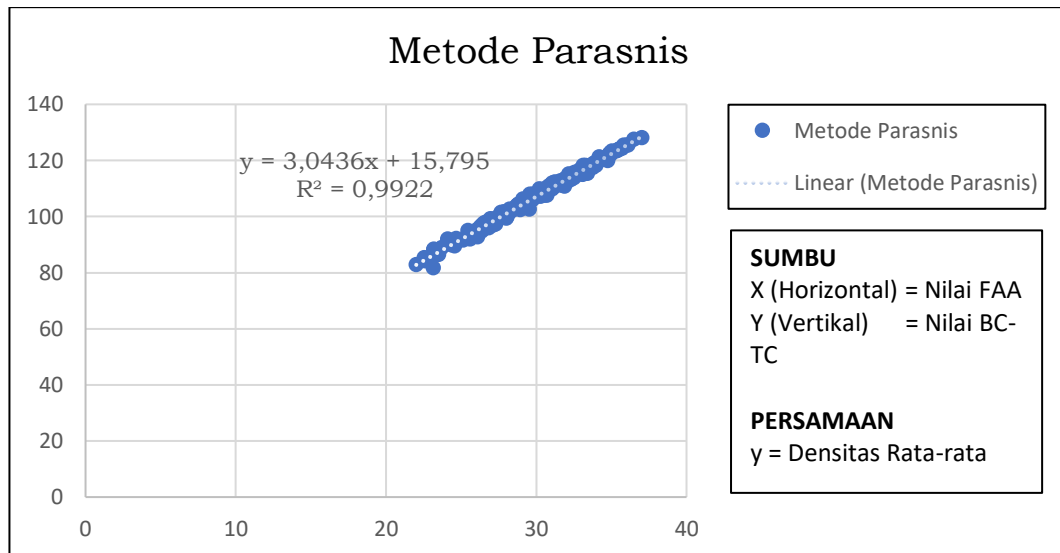
Gambar 21. Topografi Daerah Penelitian

Gradasi warna digunakan untuk merepresentasikan variasi ketinggian, dimana warna biru hingga ungu menunjukkan daerah dengan elevasi rendah, hijau hingga kuning menunjukkan ketinggian sedang, dan *orange* hingga merah mewakili elevasi tinggi. Area bertopografi tinggi terletak di bagian timur laut dan barat laut wilayah penelitian, yang diasosiasikan dengan keberadaan kompleks gunung api. Sementara itu, area dengan ketinggian sedang, yang ditandai oleh warna hijau, tersebar di bagian barat dan utara. Adapun wilayah bertopografi rendah mendominasi bagian barat daya, sebagaimana ditunjukkan oleh warna biru hingga ungu.

Metode Parasnis

Metode parasnis merupakan pendekatan analisis untuk menentukan rata-rata densitas di wilayah penelitian. Nilai estimasi densitas rata-rata dapat diketahui berdasarkan kurva linier hubungan dari nilai *Free Air Anomali* (sumbu x) dengan hasil pengurangan dari nilai koreksi *bouguer* dengan nilai *terrain correction* (sumbu y). Dapat dilihat pada Gambar 22. menunjukkan hasil

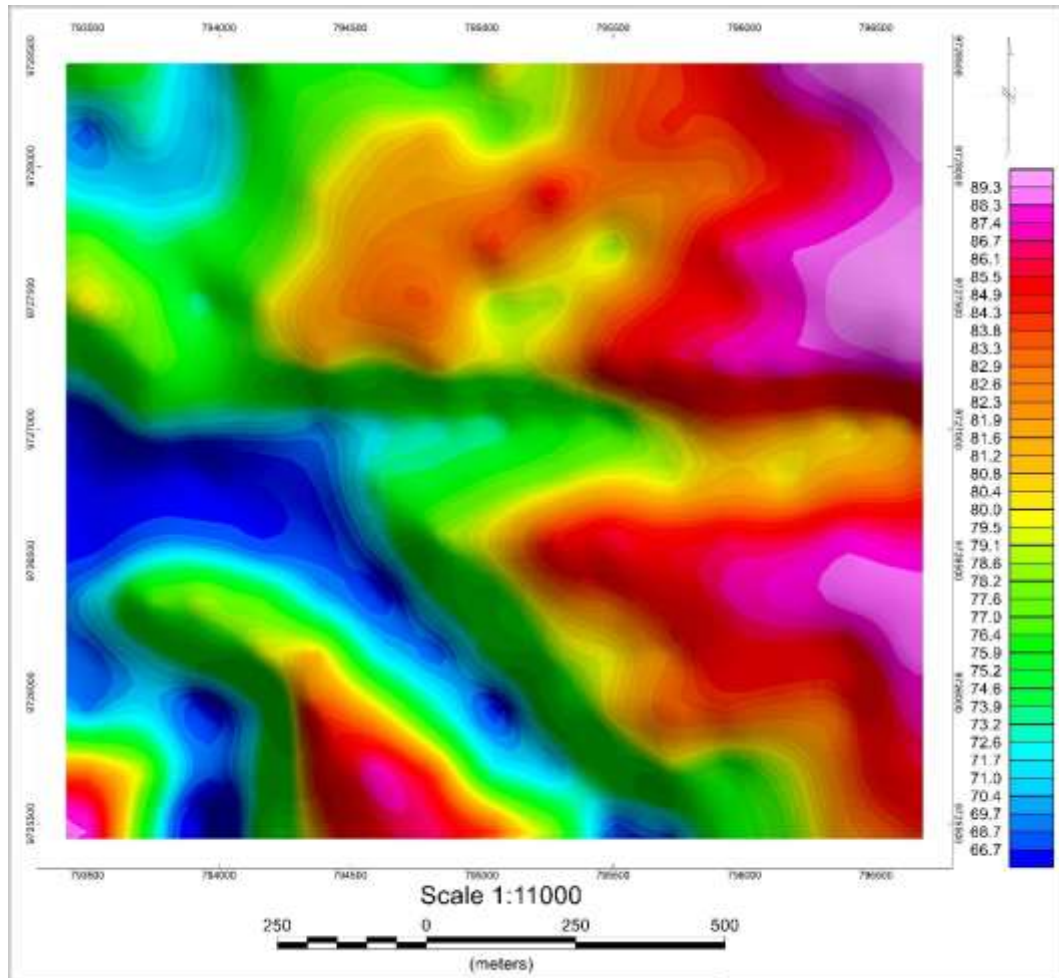
perhitungan nilai densitas rata-rata daerah penelitian. Adapun persamaan garis miring yang didapatkan menggunakan metode parsnis yaitu $y = 3.0436x + 15.795$ dengan nilai koefisien korelasi (R^2) yang diperoleh sebesar 0.9922, dimana nilai tersebut mendekati angka 1 yang menunjukkan keakuratan data. Selanjutnya nilai rata-rata densitas batuan pada daerah penelitian didapatkan sebesar 3.0436 gr/cm^3 . Menurut tabel Telford (1990) nilai densitas rata-rata yang diperoleh pada daerah penelitian ini merupakan nilai densitas batuan beku.



Gambar 22. Grafik Metode Parasnis

Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) didapatkan melalui proses pengolahan data dengan cara menjumlahkan *Terrain Correction* dengan *Simple Bouguer Anomaly* (SBA). Selanjutnya akan dilakukan pengolahan di *oasis montaj* untuk mendapatkan peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Setelah dilakukan pengolahan pada *oasis montaj* didapatkan peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang ditunjukan pada Gambar 23. Peta *Complete Bouguer Anomaly* di daerah penelitian menunjukan rentang anomali antara 66.7 mGal sampai 89.3 mGal. Hasil tersebut merupakan variasi rapat massa batuan yang ada pada daerah penelitian tersebut. Terdapat perbedaan anomali disebabkan karena adanya perbedaan kontras densitas. Gradasi warna pada peta tersebut menunjukkan variasi nilai anomali *bouguer* yang terdapat pada daerah penelitian.



Gambar 23. Peta Complete Bouguer Anomaly

Pada peta *Complete Bouguer Anomali* (CBA) dibedakan menjadi 2 kelompok anomali yaitu anomali rendah, anomali sedang dan anomali tinggi. Anomali rendah ditunjukkan oleh warna biru tua hingga kuning tua yang memiliki rentang nilai anomali 66.7 mGal sampai 81.9 mGal. Anomali tinggi yang ditunjukkan oleh warna orange hingga merah muda dengan rentang nilai 82.3 mGal hingga 89.3 mGal.

Anomali rendah dengan rentang nilai 66.7 – 81.9 mGal digambarkan dengan warna biru tua hingga kuning tua. Warna biru tua hingga biru muda ditunjukkan oleh sebaran anomali yang dominan terdapat di bagian barat hingga selatan wilayah penelitian. Anomali rendah dikaitkan dengan batuan berdensitas rendah seperti tuf, breksi vulkanik dan lava teralterasi. Wilayah ini termasuk dalam Formasi QTV (Formasi Kompleks Barisan), yang juga menjadi lokasi beberapa potensi panas bumi. Warna hijau muda hingga kuning berada pada rentang 74.6 – 81.9 mGal. Wilayah ini berada di area transisi ke barat laut hingga utara. Batuan di zona ini memiliki densitas menengah dan berpotensi sebagai

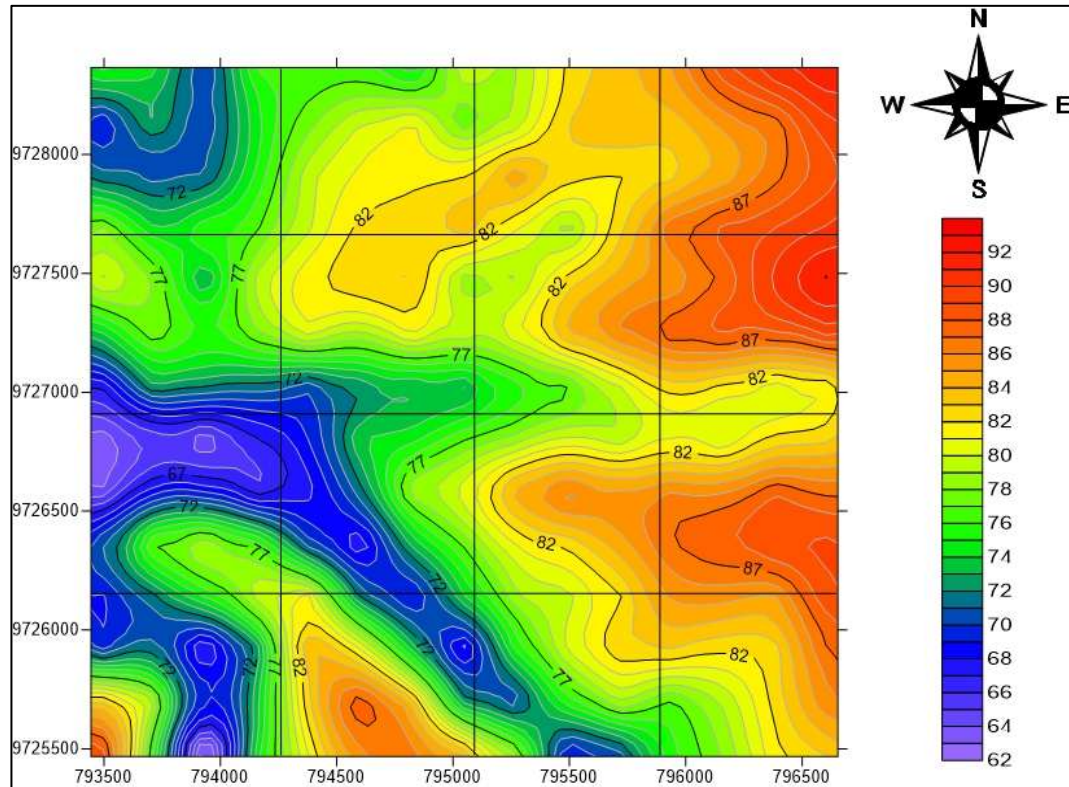
jalur naiknya fluida panas. Anomali ini biasanya menunjukkan adanya rekahan atau sesar.

Anomali tinggi memiliki nilai antara 82.3 – 89.3mGal dan digambarkan dengan warna orange hingga merah muda. Sebarannya tampak dominan di bagian timur laut hingga tenggara wilayah penelitian. Anomali ini menunjukkan keberadaan batuan berdensitas tinggi seperti lava andesit, basalt, atau indikasi intrusi dangkal. Berdasarkan peta geologi, wilayah ini termasuk dalam Formasi Tomh (Formasi Hulusimpang) dan memiliki kemunculan *warm spring*. Sebaran anomali Bouguer ini berkorelasi erat dengan kondisi geologi dan keberadaan manifestasi panas bumi. Formasi Tomh menunjukkan nilai anomali tinggi dan mengandung banyak kemunculan *warm spring*. Sementara itu, Formasi QTV di barat laut hingga utara memiliki anomali rendah dan didominasi oleh potensi panas bumi. Hubungan ini menunjukkan bahwa zona anomali sedang hingga tinggi berpotensi sebagai jalur naiknya fluida hidrotermal yang penting dalam eksplorasi panas bumi.

Analisis Spektral

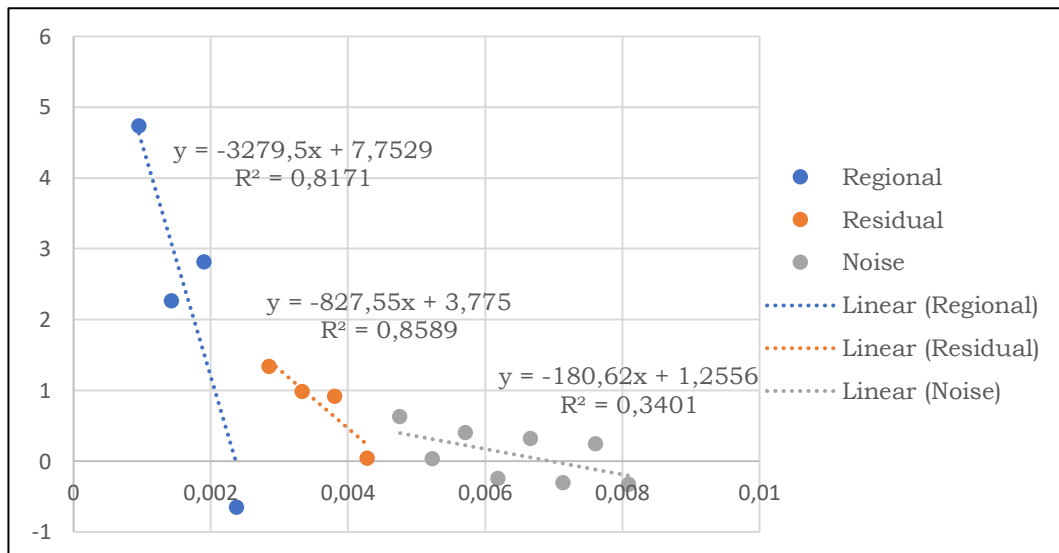
Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) merupakan peta yang masih mengandung anomali regional, anomali residual serta *noise*. Sehingga harus dilakukan proses *filter moving average* dan dilakukan analisis spektral untuk menghilangkan *noise*. Analisis spektral dilakukan dengan menggunakan metode *transformasi fourier* yang akan menampilkan kurva estimasi kedalaman anomali regional dan residual. Kedalaman yang telah diketahui nilainya digunakan sebagai masukan perhitungan dalam penentuan lebar jendela. Nilai lebar jendela yang digunakan diharapkan dapat memunculkan efek residual dan regional pada daerah penelitian. Analisis spektral dilakukan dengan membuat *slice* sebanyak 6 lintasan pada peta CBA menggunakan *software Oasis montaj* dapat dilihat Gambar 24, dimana lintasan 1 sampai lintasan 3 diambil secara vertical dan lintasan 4 sampai 6 diambil secara horizontal. Hal tersebut dilakukan agar kedalaman dapat terwakili dengan *slice* tersebut.

Dari hasil setiap lintasan *slice* pada peta CBA tersebut nantinya akan didapatkan nilai G.Abs (Gravitasi Absolut) yang akan diolah pada *Microsoft Excel* menggunakan transformasi fourier, nilai G.Abs akan di absiskan sehingga mendapat nilai G.Abs, lalu nilai G.Abs di In kan sehingga mendapat nilai In A (Amplitudo) sedangkan nilai k (Panjang gelombang) didapat dari perubahan waktu dibagi dua lalu dibagi dengan frekuensi. Hasil dari analisis spektrum akan menampilkan kurva estimasi kedalaman regional dan residual pada setiap lintasan.



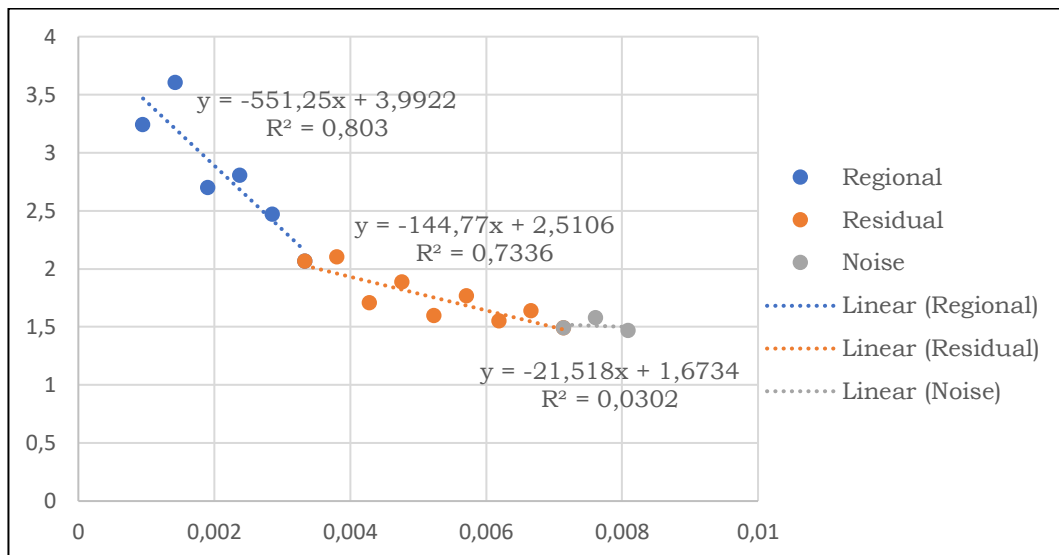
Gambar 24. Slicing dari Peta Complete Bouguer Anomaly

Pada Gambar 25. merupakan kurva analisis spektral pada lintasan 1, dimana anomali regional yang ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -3279.5x + 7.7529$ dan warna orange menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -827.55x + 3.775$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasannya pada persamaan regional nilai 3279.5 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual 827.55 menunjukkan kedalaman dari anomali residual itu sendiri.



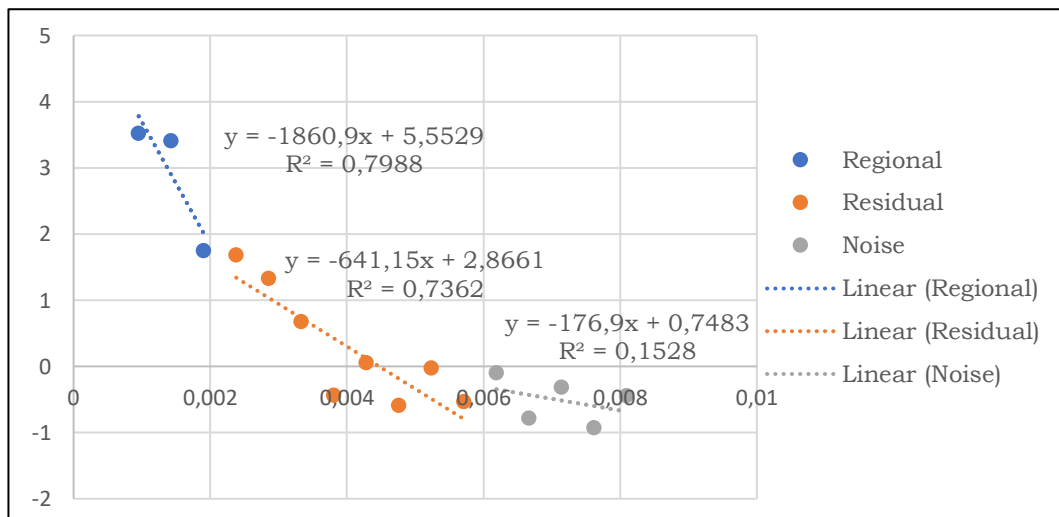
Gambar 25. Kurva Analisis Lintasan 1

Pada Gambar 26. merupakan kurva analisis spektral lintasan 2, dimana anomali regional yang ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -551.25x + 3.9922$ dan warna *orange* menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -144.77x + 2.5106$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasanya pada persamaan regional nilai 551.25 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual nilai 144.77 menunjukkan kedalaman residual itu sendiri.



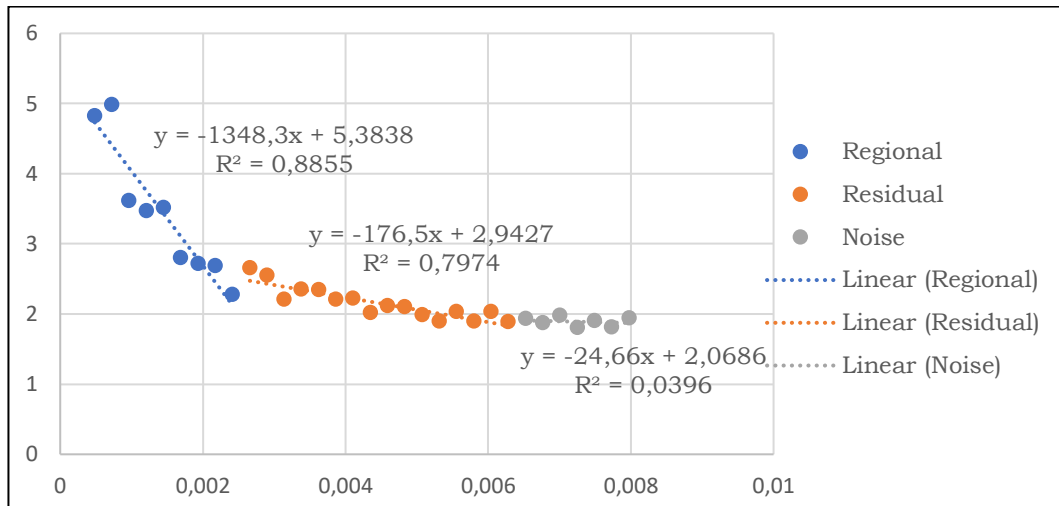
Gambar 26. Kurva Analisis Lintasan 2

Pada Gambar 27. merupakan kurva lintasan 3, dimana anomali regional yang ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -1860.9x + 5.5529$ dan warna *orange* menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -641.15x + 2.8661$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasannya pada persamaan regional nilai 1860.9 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual nilai 641.15 menunjukkan kedalaman dari anomali residual itu sendiri.



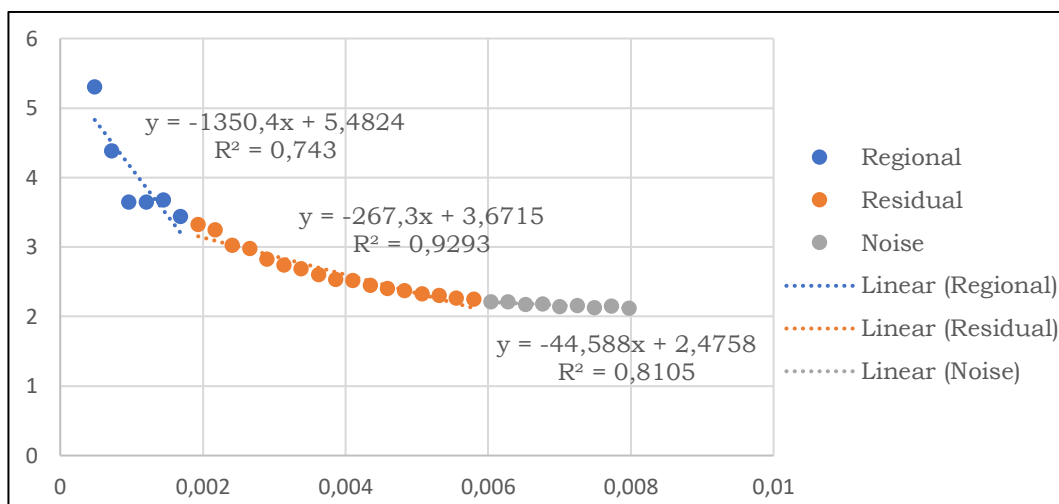
Gambar 27. Kurva Analisis Lintasan 3

Pada Gambar 28. merupakan kurva analisis spektral pada lintasan 4, dimana anomali regional yang ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -1348.3x + 5.3838$ dan warna *orange* menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -176.5x + 2.9427$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasannya pada persamaan regional nilai 1348.3 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual nilai 176.5 menunjukkan kedalaman dari anomali residual itu sendiri.



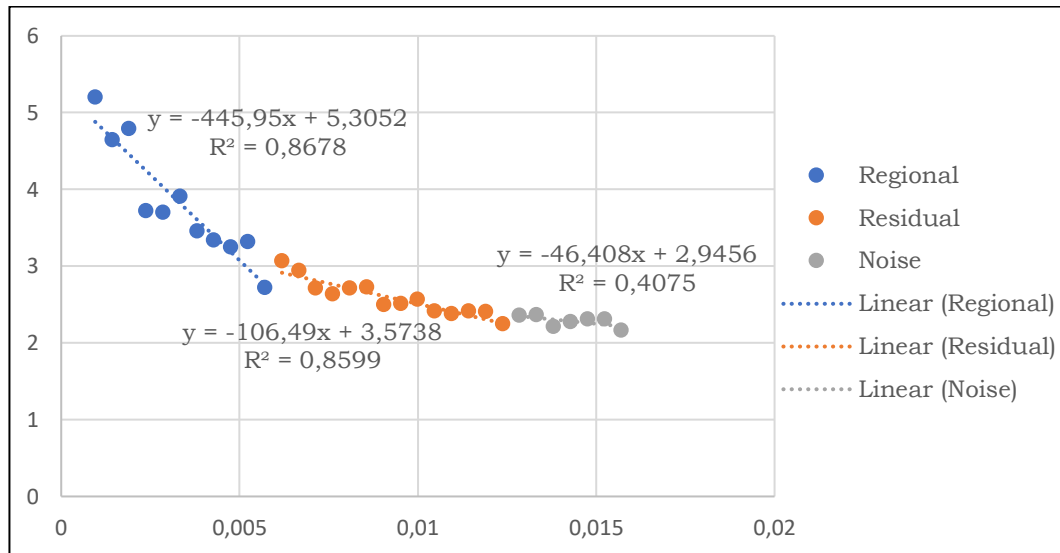
Gambar 28. Kurva Analisis Lintasan 4

Pada Gambar 29. merupakan kurva analisis spektral pada lintasan 5, dimana anomali regional ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -1350.4x + 5.4824$ dan warna *orange* menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -267.3x + 3.6715$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasannya pada persamaan regional nilai 1350.4 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual nilai 267.3 menunjukkan kedalaman dari anomali residual itu sendiri.



Gambar 29. Kurva Analisis Lintasan 5

Pada Gambar 30. merupakan kurva analisis spektral pada lintasan 6, dimana anomali regional yang ditandai dengan warna biru memiliki persamaan $y = -445.95x + 5.3052$ dan warna *orange* menunjukkan anomali residual dengan persamaan $y = -106.49x + 3.5738$. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwasannya pada persamaan regional nilai 445.95 merupakan kedalaman dari regional sedangkan pada residual nilai 106.49 menunjukkan kedalaman dari anomali residual itu sendiri.



Gambar 30. Kurva Analisis Lintasan 6

Tabel 4. Hasil Analisis Spektral

SLICE	REGIONAL (m)	RESIDUAL (m)	C1	C2	K	LAMDA	N
1	-3279.5	-827.55	7.7529	3.775	0.001622	3872.912	19.36456
2	-492.45	-169.77	3.8989	2.6189	0.003967	1583.952	7.919759
3	-1860.9	-641.15	5.5529	2.8661	0.002203	2852.432	14.26216
4	-1348.3	-176.5	5.3838	2.9427	0.002083	3016.114	15.08057
5	-1350.4	-267.3	5.4824	3.6715	0.001672	3757.976	18.78988
6	-445.95	-106.49	5.3052	3.5738	0.0051	1231.888	6.159438
	-1462.9166	-364.79333					13.59606
Rata-rata=							14

Keterangan :

REGIONAL = Kedalaman Regional

RESIDUAL = Kedalaman Residual

C1 = Konstanta Regional

C2 = Konstanta Residual

K = Bilangan Gelombang

LAMDA = Panjang Gelombang

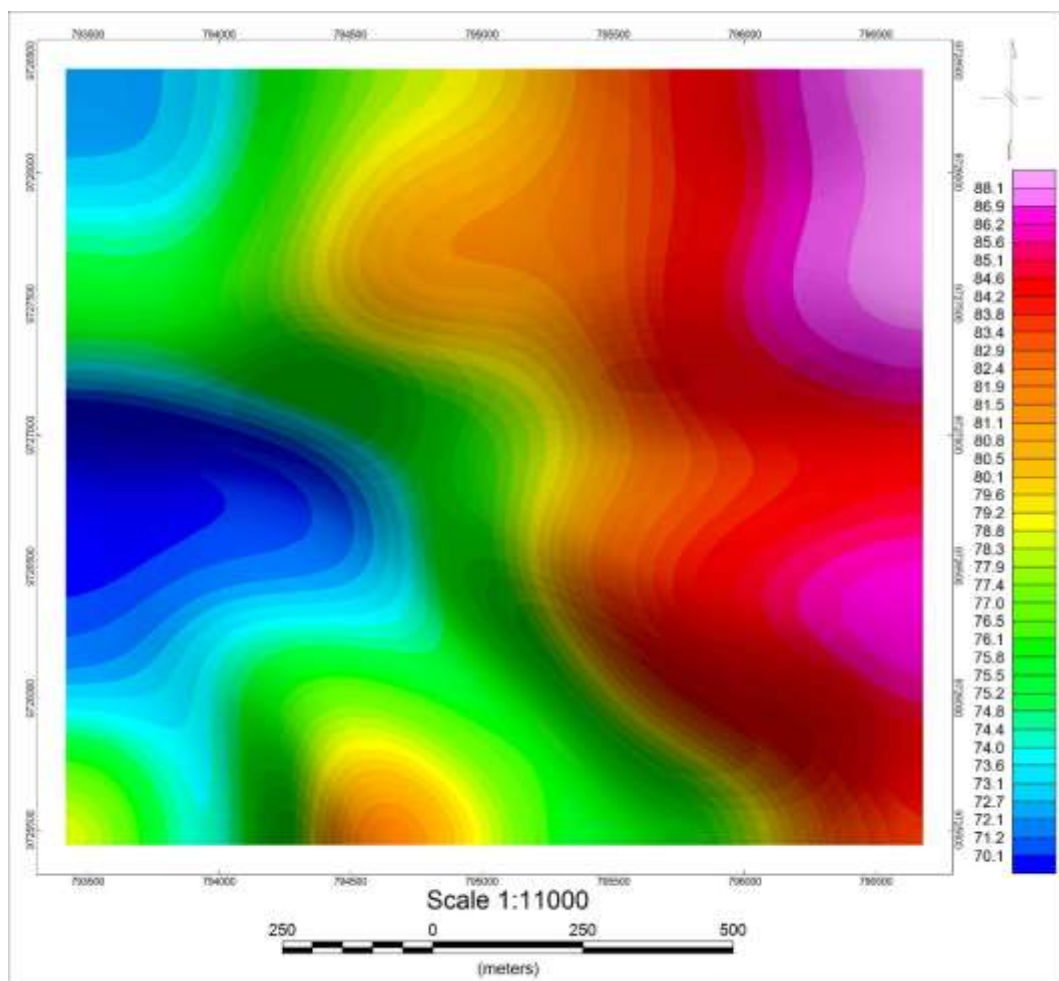
N = Lebar Jendela

Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Pada pemisahan anomali regional dan residual digunakan metode *moving average* yang merupakan hasil rata-rata dari anomali gravitasi. Dengan metode *moving average* ini nantinya akan menghasilkan anomali regional sedangkan anomali residual diperoleh dari selisih antara anomali *bouguer* dan anomali regional. Pemisahan anomali regional dan residual ini dilakukan pada *software oasis montaj*.

Anomali Regional

Berdasarkan peta anomali regional pada Gambar 31. dapat dilihat bahwa daerah penelitian memiliki kontras densitas dengan rentang 70.1 mGal hingga 88.1 mGal dengan kedalaman 1462.91 meter atau 1.5 Km. Nilai anomali regional pada daerah penelitian dibedakan mejadi 2 kelompok anomali yaitu anomali rendah,dan anomali tinggi.



Gambar 31. Peta Anomali Regional

Anomali rendah ditunjukkan oleh warna biru tua hingga kuning, umumnya berada di bagian selatan dan barat daya wilayah penelitian dengan rentang 70.1 – 79.2 mGal. Warna biru tua hingga biru muda mengindikasikan

keberadaan batuan berdensitas rendah, seperti tuf dan breksi vulkanik yang telah mengalami pelapukan. Berdasarkan peta geologi, zona ini termasuk dalam Formasi QTV, yang tersusun atas batuan tuf, breksi, dan lava andesit. Manifestasi panas bumi berupa *hot spring* dan *warm spring* juga banyak ditemukan di zona ini, yang memperkuat dugaan adanya sumber panas aktif di bawah permukaan, menjadikan zona ini sebagai target prospek dalam eksplorasi panas bumi lebih lanjut.

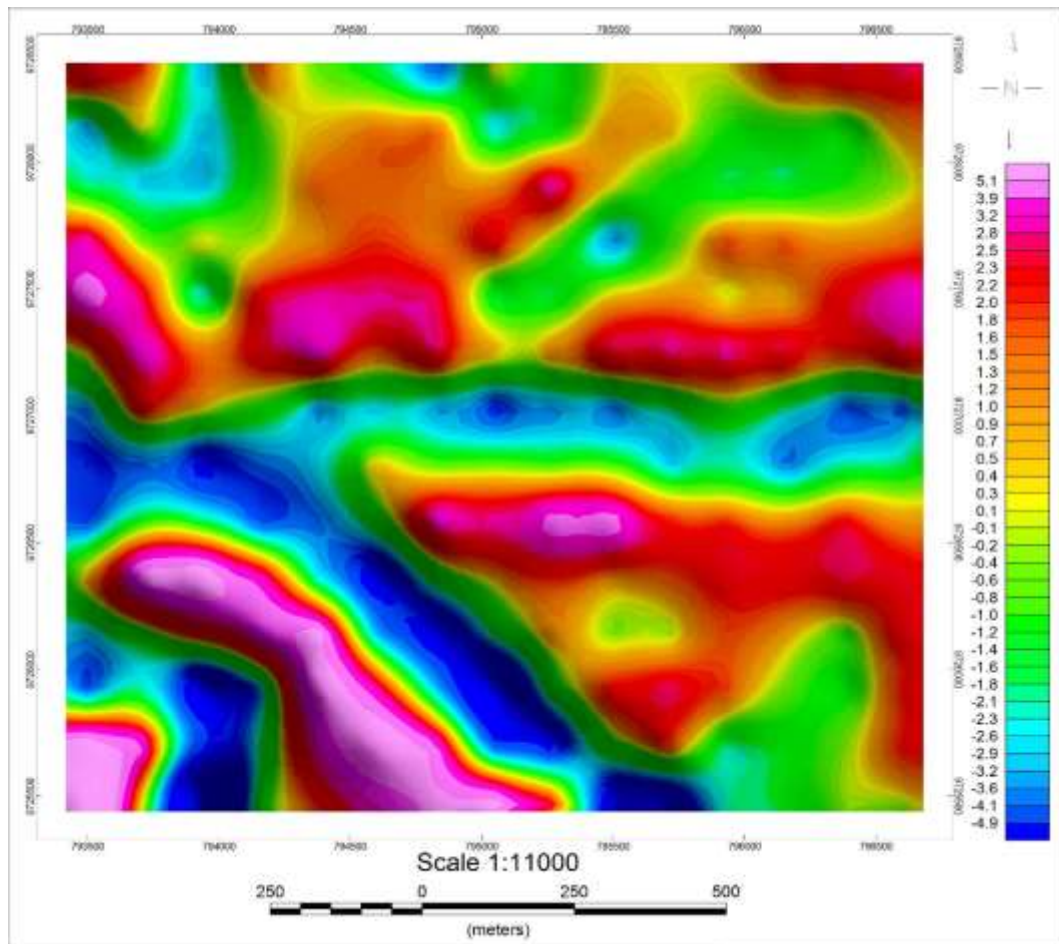
Warna hijau muda hingga kuning tersebar di area transisi antara selatan ke utara dengan rentang 74.4 – 79.2 mGal. Wilayah ini diasosiasikan dengan batuan yang memiliki densitas menengah, seperti lava andesit yang lebih segar atau batuan campuran antara formasi tua dan muda. Dari data geologi, zona ini masih termasuk dalam Formasi Tomh (Formasi Hulusimpang) dan sebagian masuk ke Formasi QTV (Kuartar Tua Vulkanik). Keberadaan manifestasi panas bumi seperti *warm spring* di zona ini menunjukkan bahwa fluida hidrotermal mungkin bergerak melalui rekahan atau zona permeabel yang bersifat transisional.

Anomali tinggi ditandai oleh warna jingga hingga merah muda dan mendominasi bagian utara hingga tenggara wilayah penelitian dengan rentang 79.6 – 88.1 mGal. Nilai anomali gravitasi yang tinggi menandakan adanya batuan dengan densitas tinggi, seperti lava basalt, andesit segar, atau intrusi dangkal. Zona ini bersesuaian dengan Formasi Tomh, yang tersusun atas batuan tuf, lava dan breksi. Daerah ini juga menunjukkan kemunculan manifestasi panas bumi seperti *hot spring* dan *steaming ground*, yang mendukung interpretasi adanya sistem hidrotermal dangkal.

Secara keseluruhan, terdapat hubungan yang jelas antara nilai anomali gravitasi dengan kondisi geologi bawah permukaan. Anomali tinggi mengindikasikan batuan alterasi dengan densitas tinggi, sedangkan anomali rendah mengarah pada keberadaan sumber panas dan menunjukkan zona transisi yang berpotensi sebagai reservoir.

Anomali Residual

Peta anomali residual pada Gambar 32. akan menunjukkan pola anomali yang lebih kompleks dibandingkan anomali regional. Peta anomali residual dapat menunjukkan sebaran densitas yang relatif lebih kompleks dari pada anomali regional karena pada anomali residual menunjukkan adanya variasi batuan-batuan yang dangkal. Berdasarkan peta anomali residual diatas dapat dilihat bahwa daerah penelitian memiliki kontras densitas dengan rentang -4.9 mGal hingga 5.1 mGal dengan kedalaman 364.79 meter. Nilai anomali residual pada daerah penelitian dibedakan menjadi 2 anomali yaitu anomali rendah, dan tinggi.



Gambar 32. Peta Anomali Residual

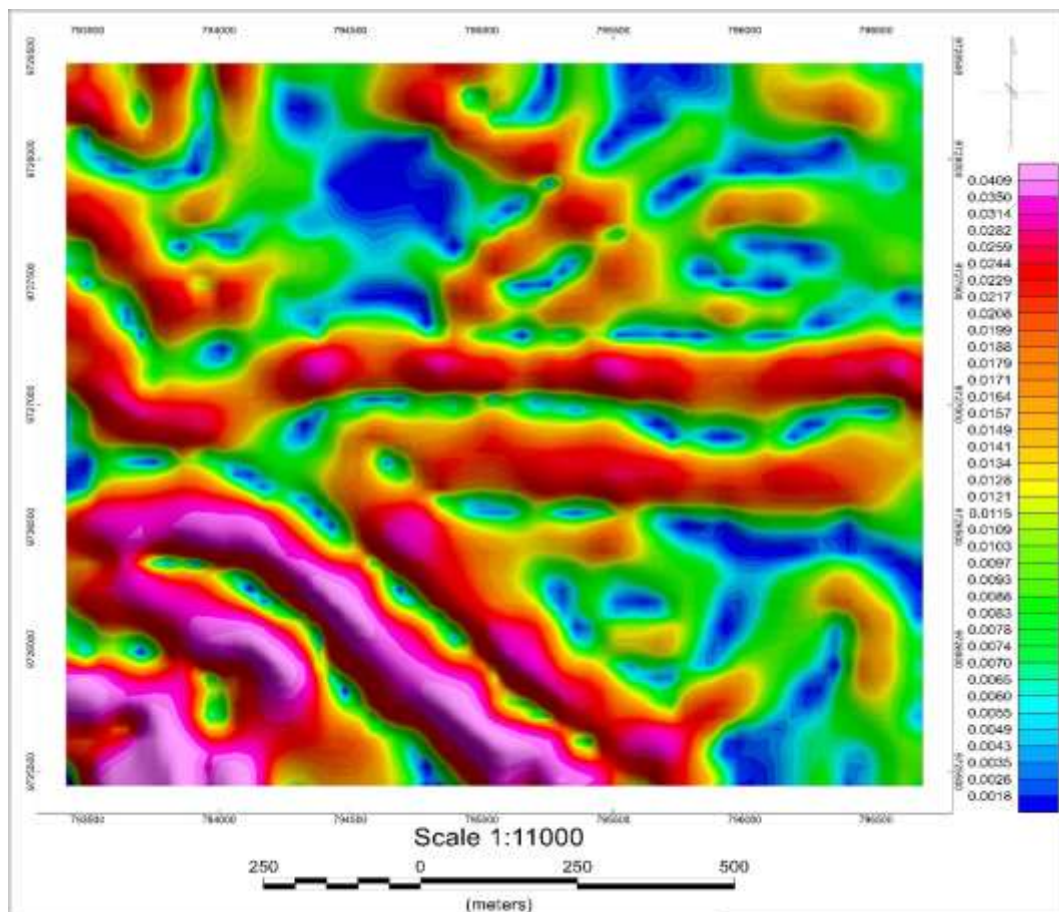
Anomali rendah terdapat pada nilai antara -4.9 mGal hingga -0.1 mGal, ditandai dengan warna biru tua hingga kuning. Warna biru tua hingga biru muda menunjukkan bahwa zona ini kemungkinan tersusun atas batuan berpori dan memiliki densitas rendah, seperti breksi vulkanik teralterasi dan batuan sedimen hasil pelapukan. Wilayah ini umumnya berkaitan dengan struktur geologi seperti sesar atau rekahan yang berperan sebagai jalur fluida panas bumi. Daerah ini berasosiasi dengan Formasi QTV, yang diidentifikasi sebagai gunung api muda dan memiliki potensi sebagai zona *reservoir*.

Warna hijau hingga kuning yang memiliki rentang antara -2.1 mGal hingga -0.1 mGal. Area ini mencerminkan batuan campuran antara batuan alterasi ringan dan batuan vulkanik padat yang belum banyak mengalami pelapukan. Zona ini diperkirakan sebagai jalur transisi fluida yang cukup permeabel dan mendukung pergerakan panas dari bawah permukaan. Secara geologi, zona ini meliputi kontak antara Formasi Tomh dan QTV, serta berada dekat dengan manifestasi permukaan seperti hot spring dan *steaming ground*.

Anomali tinggi ditunjukkan oleh nilai 0.3 mGal hingga 5.1 mGal, dan divisualisasikan dalam warna oranye hingga merah muda. Nilai ini mengindikasikan keberadaan batuan berdensitas tinggi seperti lava andesit atau intrusi batuan beku yang kompak. Daerah ini biasanya bersifat impermeabel dan bertindak sebagai penutup sistem panas bumi. Zona ini sebagian besar tersusun atas Formasi Tomh, yang merupakan produk aktivitas gunung api yang lebih tua dan padat.

Gradien Horizontal

Gradien Horizontal adalah perubahan anomali gravitasi pada bumi dari satu titik ke titik lainnya secara horizontal dengan jarak tertentu untuk menunjukkan batas suatu struktur geologi yang menyebabkan anomali. Karakteristik nilai maksimum akan menunjukkan daerah yang terdapat batas struktur geologi. Tahapan gradien horizontal merupakan suatu tahapan untuk mengetahui keberadaan dari patahan atau batas struktur yang menyebabkan anomali.

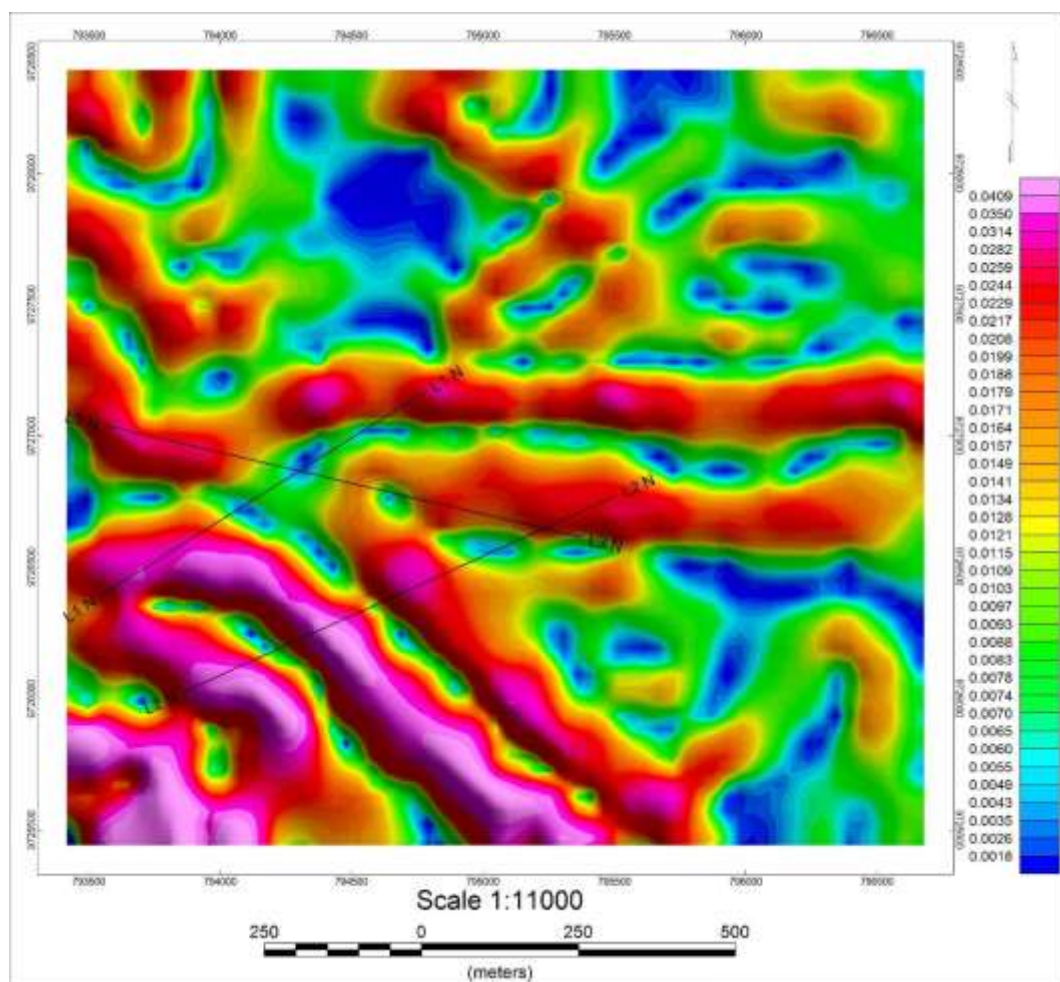


Gambar 33. Peta Gradien Horizontal

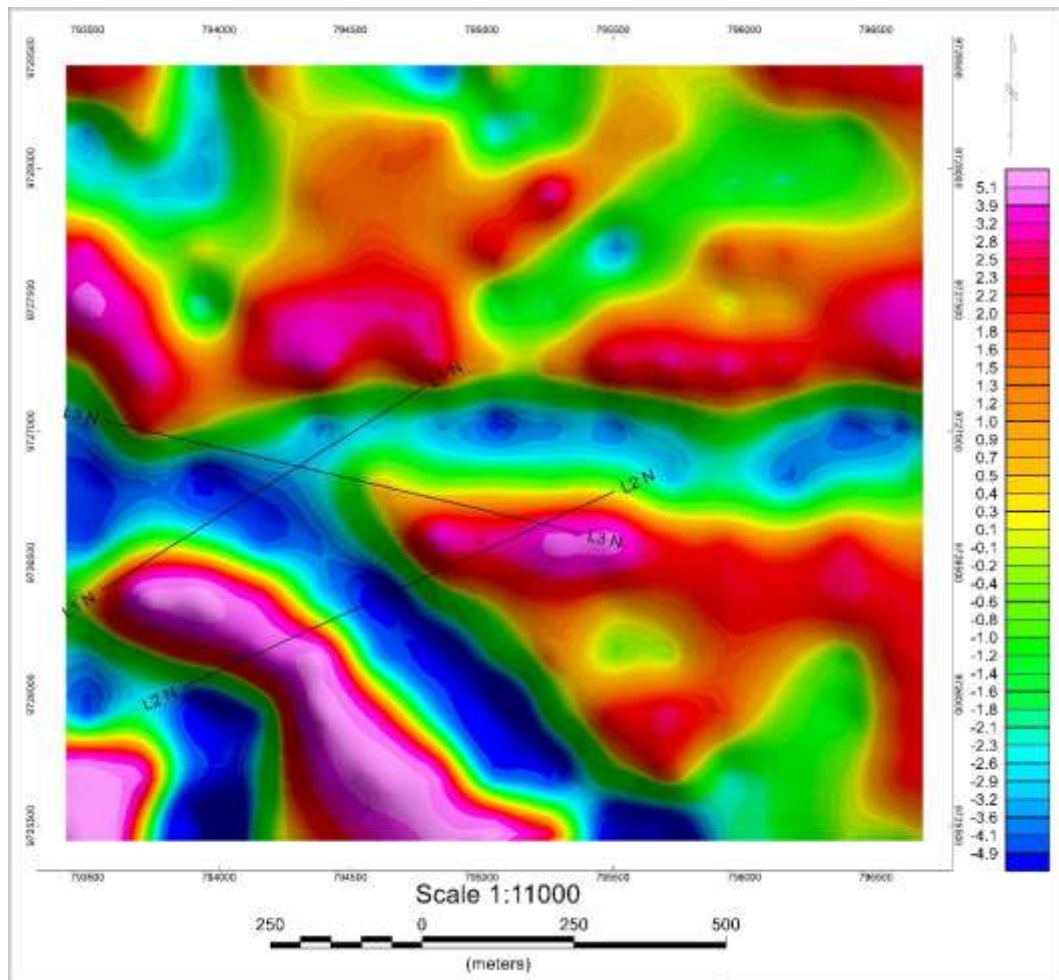
Anomali gradien horizontal merupakan anomali gravitasi yang memiliki karakteristik perubahan nilai yang tajam berupa nilai maksimum, hal tersebut mengindikasikan adanya suatu batas anomali yang bawah permukaan tergambarkan. Berdasarkan anomali gradien horizontal pada Gambar 19. didapatkan nilai gradien horizontal berkisar 1.8×10^{-3} mGal sampai dengan 4.09×10^{-2} mGal. Nilai yang tinggi menunjukkan punggung dari suatu anomali atau batas dari suatu anomali yang berada bawah permukaan yang tergambarkan pada gradien horizontal.

Analisa Patahan

Analisa patahan dilakukan dengan cara peta gradien horizontal dan peta residual dilakukan *slicing* yaitu dengan 3 lintasan.



Gambar 34. Arah lintasan Slicing pada peta Gradien Horizontal



Gambar 35. Arah lintasan Slicing pada peta Anomali Residual

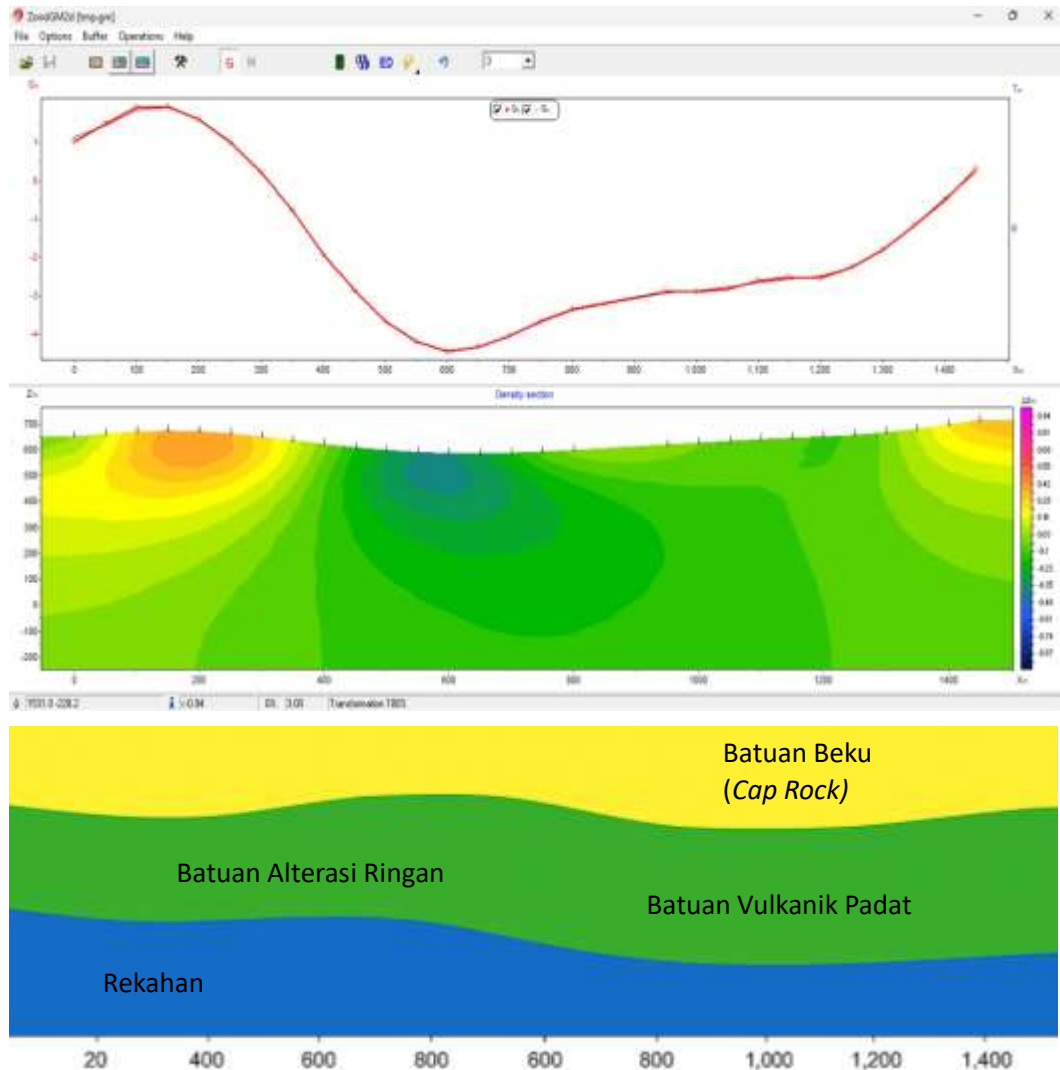
Pemodelan Inversi 2D Berdasarkan Gradien Horizontal

Pemodelan 2D dilakukan dengan menggunakan aplikasi ZondGM2D. Pada pemodelan inversi dilakukan berdasarkan data *First Horizontal Derivative* untuk memberikan hasil penampang 2D. Pemodelan variasi densitas dilakukan dengan melakukan *slicing* pada peta *First Horizontal Derivative*. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan inversi 2D pada area manifestasi sebanyak 3 lintasan.

Pemodelan 2D pada lintasan 1 dengan panjang lintasan 1.4 km dengan sumbu y menunjukkan nilai anomali gravitasi dalam satuan mGal dengan nilai berkisar 2 hingga -4 MGal. Kurva merah menunjukkan turun-naiknya densitas bawah permukaan akibat struktur geologi dan litologi batuan. Bagian bawah merupakan model densitas bawah permukaan yang dimana sumbu x menunjukkan jarak lateral dalam meter dan sumbu z menunjukkan kedalaman dalam meter.

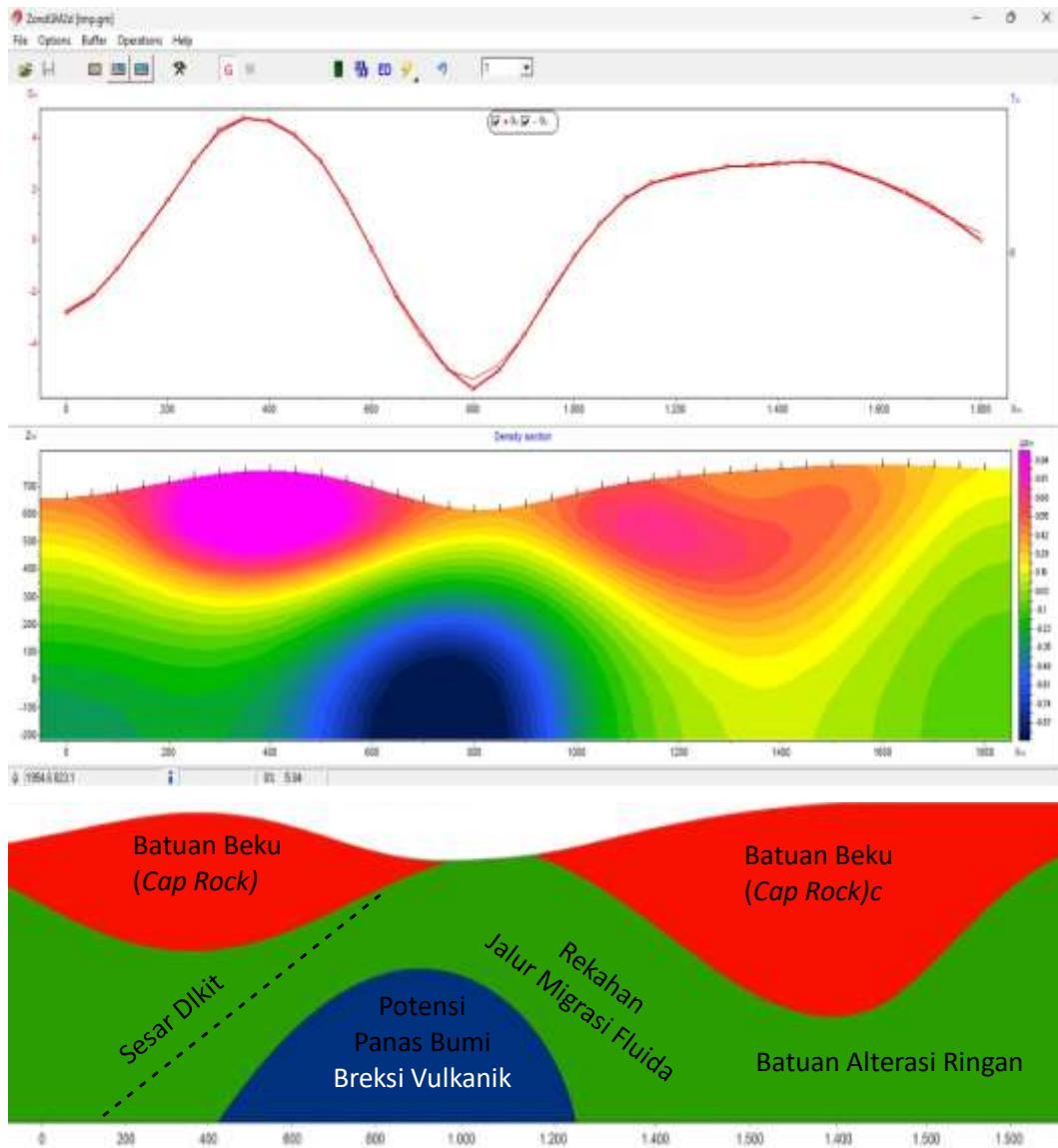
Warna menunjukkan nilai densitas relatif terhadap densitas rata-rata. Warna merah hingga oranye dengan rentang 0.16 sampai 0.94 menunjukkan densitas yang tinggi dan biasanya ditandai dengan batuan padat yang

menunjukkan batuan penutup (*cap rock*). Warna hijau hingga kuning dengan rentang 0.03 hingga 0.34 yaitu batuan berdensitas sedang yang ditandai dengan batuan sedimen padat dan batuan vulkanik terubah. Sedangkan warna biru dengan rentang -0.48 hingga -0.87 menunjukkan densitas rendah yang mengindikasikan zona alterasi hidrotermal, rekahan atau akumulasi fluida panas bumi.



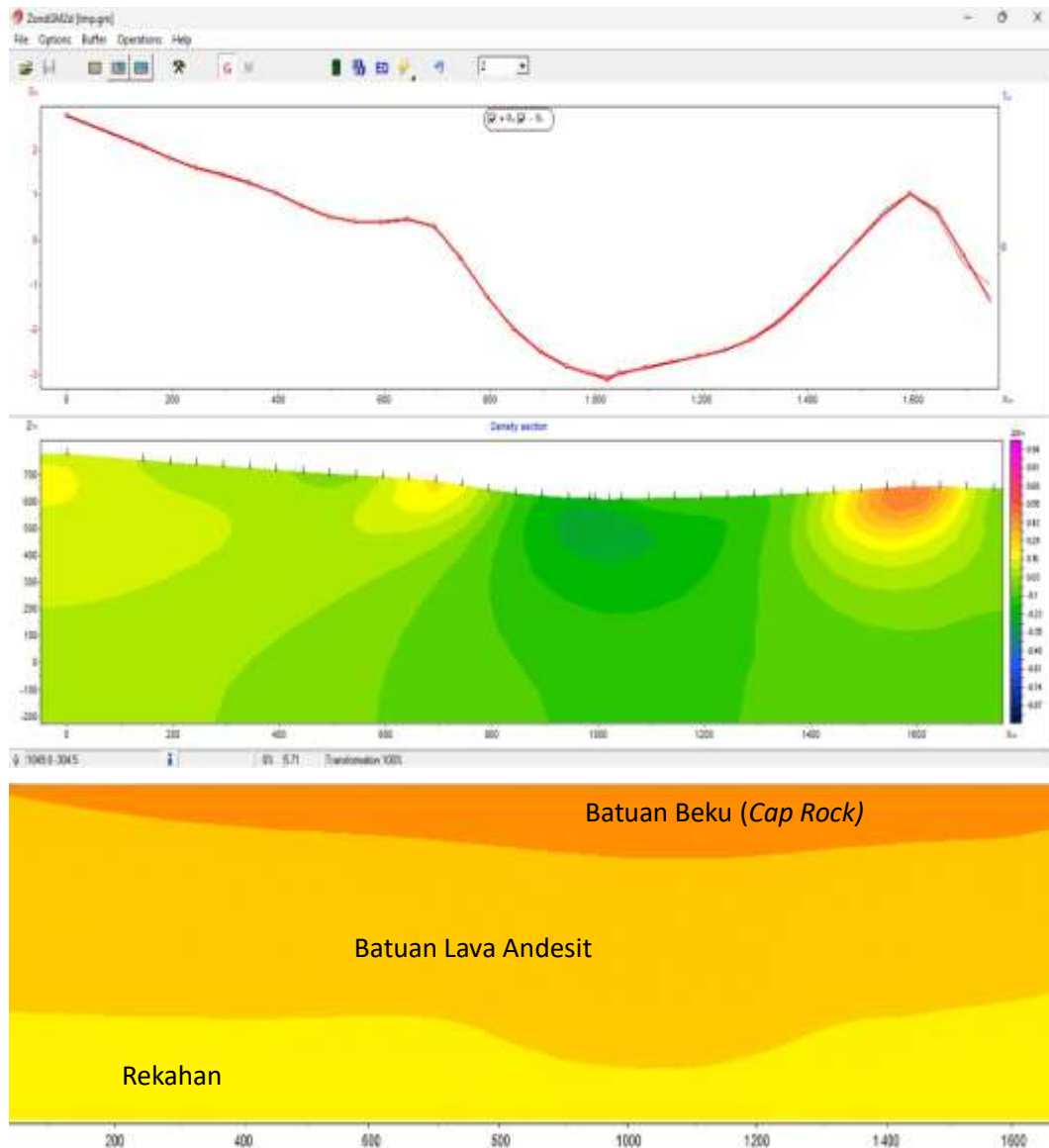
Gambar 36. Pemodelan 2D Pada Lintasan 1

Pada Lintasan 2 dengan panjang lintasan 1.8 km ditunjukkan dengan sumbu x dan sumbu y menunjukkan nilai anomali gravitasi. Pola sinusoidal memperlihatkan anomali negatif paling dalam yang terdapat ditengah lintasan yaitu 800 meter. Warna biru hingga biru tua menunjukkan densitas rendah yang mengindikasikan zona alterasi dan potensi panas bumi. Sedangkan warna hijau menunjukkan densitas sedang yang mengindikasikan rekahan dan jalur migrasi fluida panas bumi. Sedangkan merah hingga ungu menunjukkan densitas tinggi yaitu batuan beku yang biasanya mengindikasikan batuan penutup (*cap rock*).



Gambar 37. Pemodelan 2D Pada Lintasan 2

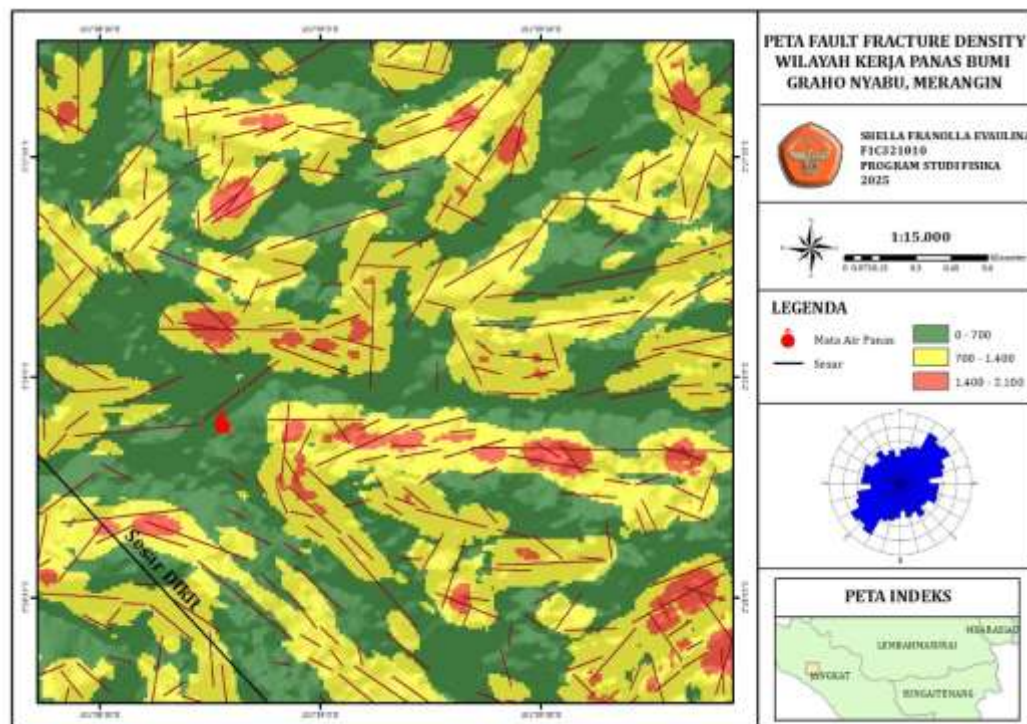
Pada Lintasan 3 dengan panjang lintasan <1.8 km ditunjukkan dengan sumbu x dan sumbu y menunjukkan nilai anomali gravitasi. Warna hijau menunjukkan daerah berdensitas sedang dengan rentang 0.0 hingga 0.3 yang mengindikasikan rekahan atau sistem panas bumi. Warna kuning dengan rentang 0.3 hingga 0.55 menunjukkan densitas agak tinggi yang mengindikasikan batuan beku.



Gambar 38. Pemodelan 2D Pada Lintasan 3

4.3 Fault Fracture Density (FFD)

Analisa patahan dilakukan menggunakan software Geomatica 2014 untuk mendapatkan patahan secara otomatis dengan memasukkan data DEMNAS. Selanjutnya diolah dengan Arcgis sehingga mendapatkan peta Fault Fracture Density (FFD).



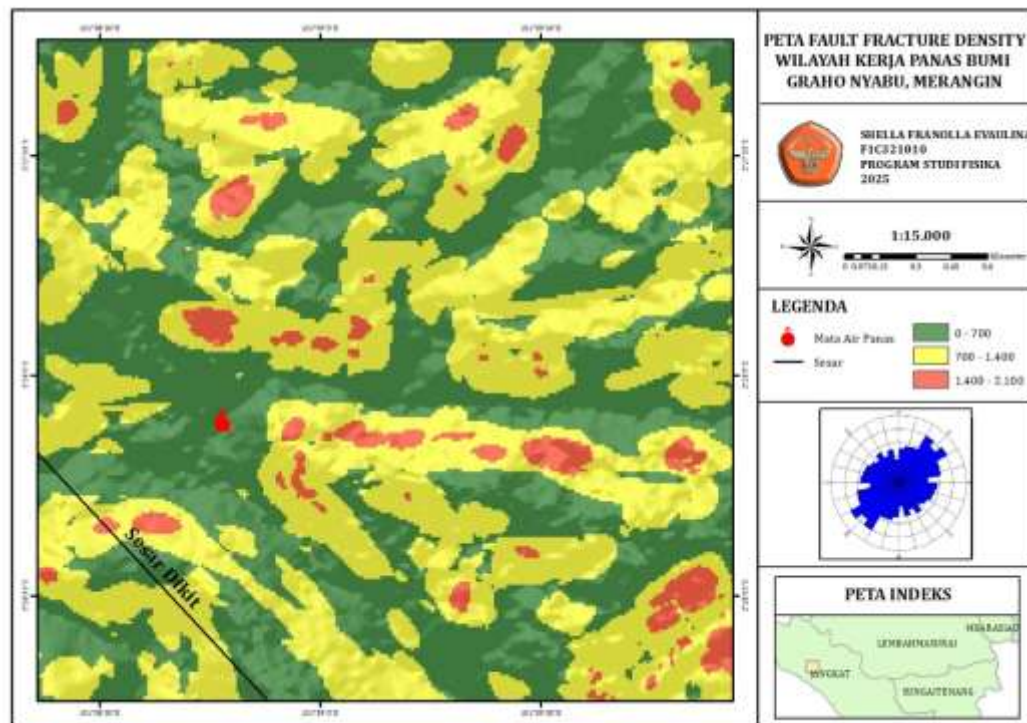
***Fault Fracture Density* berdasarkan Persentasi Panjang Total Kekar**

Pada penelitian ini, analisis kekar dilakukan dengan metode statistik berdasarkan panjang total kekar (*Length Method*) untuk mengetahui arah kekar yang paling berperan dalam membentuk jalur aliran fluida bawah permukaan. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk diagram mawar, yang menggambarkan sebaran panjang kekar berdasarkan interval arah sebesar 10° .

Dari data yang diperoleh, jumlah kekar yang terukur sebanyak 3.223 buah, dengan total panjang keseluruhan mencapai 1096,12 kilometer. Kelompok arah dengan total panjang kekar tertinggi mencapai 45,26 kilometer, sedangkan panjang rata-rata per arah adalah 30,44 kilometer. Hal ini menunjukkan bahwa ada arah tertentu yang memiliki kekar-kekar lebih panjang, yang kemungkinan saling terhubung dan membentuk jalur permeabel yang luas.

Arah kekar yang paling dominan adalah $N51,7^\circ E$, atau sekitar arah timur laut-barat daya (NE-SW), dengan tingkat kepercayaan 80% dan selisih $\pm 7,6^\circ$. Arah ini diperkirakan merupakan hasil dari tegasan utama atau pemekaran batuan pada masa lalu yang membentuk rekahan-rekahan signifikan. Nilai standar deviasi panjang kekar sebesar 7,10 menunjukkan adanya perbedaan panjang kekar yang cukup besar antar arah. Meskipun demikian, nilai R-magnitude yang rendah (0,12) menandakan bahwa penyebaran orientasi kekar masih cukup menyebar, tidak terkonsentrasi hanya pada satu arah tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah penelitian kemungkinan mengalami lebih dari satu fase tektonik, sehingga pola kekar yang terbentuk menjadi lebih kompleks.

Secara umum, arah kekar NE–SW atau timur laut – barat daya ini juga ditemukan sebagai arah dominan pada metode analisis sebelumnya. Kekar dengan arah yang dominan dan panjang yang besar biasanya memiliki konektivitas yang baik, sehingga sangat penting dalam sistem hidrologi panas bumi, karena dapat menjadi jalur utama pergerakan fluida panas di bawah permukaan.



Interpretasi Tektonik di Zona Patahan

Daerah penelitian terletak di dalam Zona Sesar Dikit yang merupakan zona geologi aktif. Wilayah ini telah mengalami deformasi signifikan akibat pergerakan kerak bumi. Kondisi tersebut menyebabkan terbentuknya kekar-kekar yang berkembang secara sistematis. Pola kekar yang terbentuk umumnya menunjukkan orientasi tertentu sesuai dengan arah tegasan yang bekerja.

Arah dominan kekar mengarah ke timur laut–barat daya ($N51,7^{\circ}E$). Arah ini diduga terbentuk akibat gaya utama (tegasan) yang bekerja di wilayah tersebut. Kekar dapat terbentuk sejajar atau tegak lurus terhadap arah tegasan, tergantung jenis gaya yang mempengaruhinya. Oleh karena itu, orientasi kekar dapat mencerminkan kondisi tegasan saat batuan mengalami rekahan.

Sebaran arah kekar yang cukup bervariasi menunjukkan bahwa wilayah ini kemungkinan telah mengalami beberapa episode deformasi tektonik. Zona sesar aktif sering kali mengalami tekanan dari berbagai arah secara berulang. Tekanan ini menyebabkan pola kekar yang terbentuk menjadi kompleks dan

tidak seragam. Meskipun demikian, tetap terlihat adanya satu arah dominan yang menonjol.

Arah kekar dominan yang sejajar atau tegak lurus terhadap arah sesar utama dapat digunakan sebagai petunjuk arah gerakan tektonik. Hal ini penting untuk mengidentifikasi arah pergerakan lempeng atau sesar di wilayah penelitian. Analisis ini juga membantu memahami hubungan antara pola rekahan dengan proses geologi regional. Dengan demikian, orientasi kekar menjadi informasi penting dalam interpretasi evolusi tektonik suatu daerah

Hubungan Pola Kekar terhadap Jalur Migrasi Fluida Panas Bumi

Kekar memiliki peran sangat penting dalam sistem panas bumi karena dapat berfungsi sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal dari kedalaman ke permukaan. Fluida panas bumi cenderung bergerak melalui zona-zona yang permeabel, seperti rekahan dan kekar, karena jalur tersebut memberikan celah alami untuk aliran fluida. Arah kekar dominan ke arah NE–SW berpotensi besar sebagai jalur utama migrasi fluida panas bumi, terutama jika kekar tersebut saling terhubung membentuk jaringan permeabel yang luas. Panjang kekar yang signifikan juga memperkuat bahwa struktur tersebut memiliki konektivitas tinggi dan mampu menghantarkan fluida panas dari reservoir ke permukaan.

Nilai R-magnitude yang rendah menunjukkan bahwa terdapat banyak arah kekar sekunder, yang dapat membentuk sistem multiporos dan memperbesar kapasitas aliran fluida. Hal ini sangat mendukung terbentuknya sistem konveksi fluida panas di bawah permukaan. Dalam konteks eksplorasi panas bumi, keberadaan kekar yang panjang, banyak, dan teratur adalah indikator positif karena menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki potensi sebagai zona konduksi atau zona konveksi panas. Kekar yang saling berpotongan atau berada pada perpotongan dengan sesar utama juga sering menjadi lokasi keluarnya manifestasi panas bumi seperti mata air panas, fumarol, atau endapan silika.

Dengan demikian, hasil analisis kekar melalui diagram mawar tidak hanya memberikan informasi tentang arah tegasan, tetapi juga sangat penting dalam mengidentifikasi dan memprediksi jalur aliran fluida panas bumi, yang merupakan salah satu kunci dalam pengembangan dan pengelolaan potensi panas bumi di suatu daerah.

4.4 Sistem Panas Bumi

WKP Graho Nyabu memiliki sistem panas bumi yang termasuk kategori *high terrain geothermal system* karena terletak di daerah pegunungan. Sistem ini terbentuk akibat aktivitas gunung api dan pergerakan patahan yang menciptakan

jalur bagi fluida panas bumi. Fluida panas bergerak dari dalam bumi melalui rekahan batuan lalu muncul ke permukaan sebagai mata air panas atau uap. Keberadaan jalur rekahan ini membuat daerah Graho Nyabu memiliki potensi panas bumi yang besar.

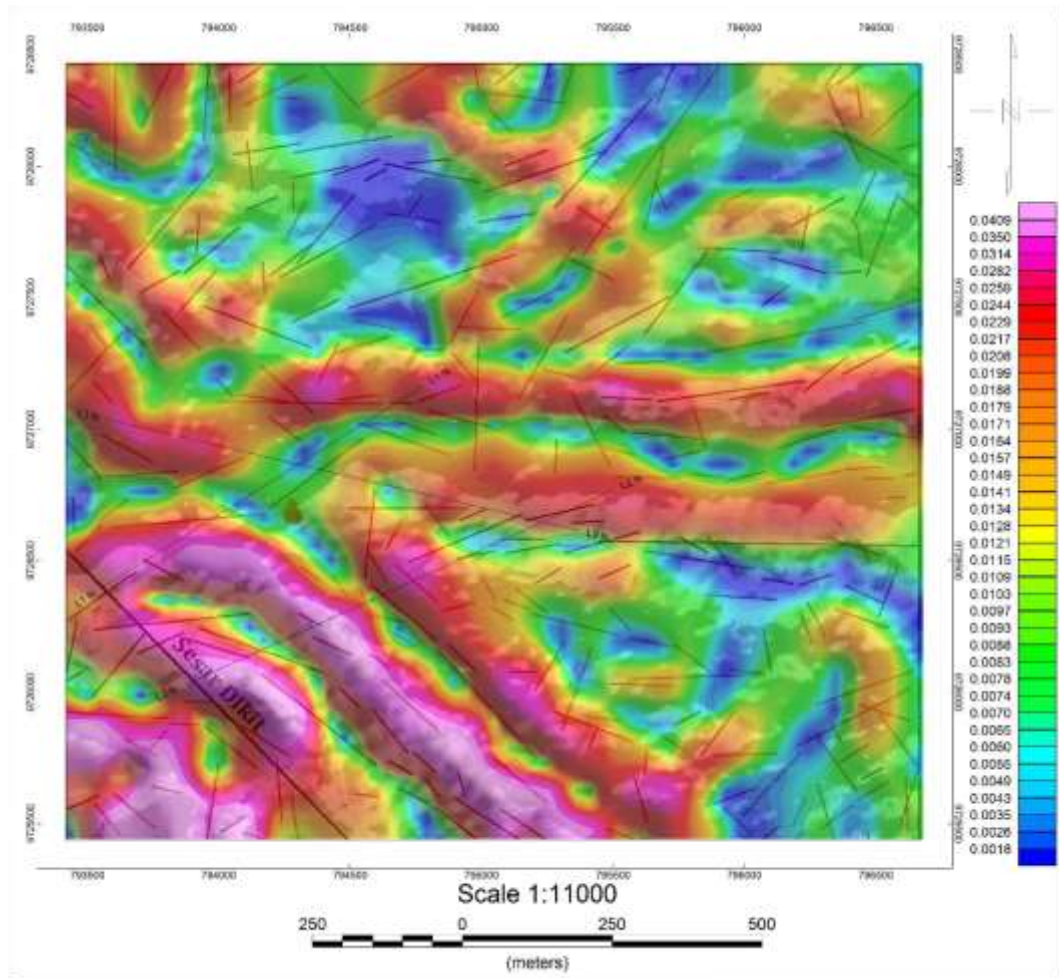


Gambar 39. Gunung Sumbing dan Gunung Hulunilo

Sumber panas di WKP Graho Nyabu berasal dari batuan panas di bawah permukaan yang memanaskan air tanah. Air yang sudah panas bergerak naik melalui patahan atau rekahan yang ada di batuan. Metode *Fault Fracture Density* (FFD) dan anomali gravitasi digunakan untuk mengetahui jalur fluida panas ini. Dengan kondisi tersebut, Graho Nyabu dapat dikembangkan sebagai sumber energi panas bumi yang ramah lingkungan.

4.5 Diskusi

Wilayah penelitian di Desa Renah Kemumu menunjukkan indikasi kuat adanya sistem panas bumi aktif, yang ditandai dengan manifestasi permukaan berupa mata air panas, tanah beruap, dan zona alterasi batuan. Suhu mata air panas Graho Nyabu tercatat antara 71,5°C hingga 91,3°C dengan pH netral sebesar 7. Di lapangan juga ditemukan jenis batuan yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal, antara lain andesit berkekar, endapan travertin yang terbentuk dari presipitasi karbonat, serta batuan propilitik berwarna keabuan yang terbentuk akibat alterasi hidrotermal. Batuan-batuan tersebut diduga berasal dari Formasi Tomh, yang merupakan hasil aktivitas vulkanik masa lampau.



Gambar 40. Peta Overlay Peta Geologi, Peta Gradien Horizontal dan Peta Fault Fracture Density

Analisis gradien horizontal terhadap data gravitasi menunjukkan sebaran nilai maksimum yang mengindikasikan keberadaan batas struktur geologi bawah permukaan, seperti sesar atau zona rekahan. Zona-zona ini menjadi dasar pemilihan lintasan untuk pemodelan inversi dua dimensi. Hasil pemodelan 2D pada tiga lintasan utama menunjukkan variasi densitas yang signifikan. Lintasan 2 memperlihatkan keberadaan zona densitas tinggi, yang diinterpretasikan sebagai intrusi batuan beku atau sumber panas. Sementara itu, zona densitas rendah pada lintasan 1 dan 3 menunjukkan kemungkinan adanya batuan alterasi atau rekahan yang terisi fluida, yang berpotensi sebagai jalur migrasi fluida panas bumi. Perubahan densitas yang tajam pada model juga mengindikasikan batas litologi atau struktur sesar yang penting dalam sistem panas bumi.

Analisis struktur lebih lanjut dilakukan melalui pemetaan *Fault Fracture Density* (FFD) berdasarkan data DEMNAS. Hasilnya menunjukkan terdapat 3.223 kekar dengan orientasi dominan ke arah timur laut-barat daya (N51,7°E). Arah

dominan ini bertepatan dengan arah Segmen Sesar Dikit yang melintasi lokasi penelitian. Sebaran dan panjang kekar yang signifikan menunjukkan tingkat konektivitas yang tinggi, menjadikannya jalur potensial migrasi fluida dari reservoir ke permukaan. Nilai R-magnitude yang rendah menunjukkan keberagaman orientasi kekar, yang mengindikasikan adanya beberapa fase deformasi tektonik. Secara keseluruhan, struktur rekahan ini berperan penting dalam sistem konveksi fluida panas bumi dan mendukung potensi daerah ini sebagai lokasi prospek eksplorasi panas bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Basid, N. H. 2012. Analisis Anomali Gravitasi Sebagai Acuan Dalam Penentuan Struktur Geologi Bawah Permukaan Dan Potensi Geothermal (Studi Kasus Di Daerah Songgoriti Kota Batu). *Jurnal Neutrino*.
- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., Haines, B. J., Argus, D. F., Liu, Z., Smith, R., Famiglietti, J. S., dan Rodell, M. 2022. Remote sensing of groundwater: current capabilities and future directions. *Water Resources Research*, 58(10).
- Amaliah, Rezki, dkk. 2014. Pemodelan Anomali Gravitasi Menggunakan Metode Inversi 2D (Dua Dimensi) Pada Area Prospek Panasbumi Lapangan 'A'. In *Core Research*. Hasanuddin University Repository.
- Apriani, Mila dkk. 2017. Estimasi Ketebalan Sedimen dengan Analisis Power Spectral pada Data Anomali Gayaberat DKI Jakarta. Jakarta : Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG.
- Arrofi, D., Abu-Mahfouz, I. S., dan Prayudi, S. D. 2022. Investigating High Permeable Zones in Non-Volcanic Geothermal Systems Using Lineament Analysis and Fault Fracture Density (FFD): Northern Konawe Regency, Indonesia. *Geothermal Energy*, 10(29).
- Azhar, M., Solechan, S., Saraswati, R., Suharso, P., Suhartoyo, S., dan Ispriyarso, B. (2018). The New RenewCBAe Energy Consumption Policy of Rare Earth Metals to Build Indonesia's National Energy Security. *E3S Web of Conferences*, 68, 1–10.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milsom, J. S. 2005. Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution. Geological Society of London.
- Burbank, D. W., and Anderson, R. S. 2011. "Tectonic Geomorphology." Blackwell Publishing.
- Dickson, M. H., dan Fanelli, M. 2004. What is Geothermal energy. Italy: Institute Geoscience Pisa.
- Ermawati, Y., Yulistia, E., dan Zulyanti, F. 2022. Potensi Panas Bumi sebagai Energi Alternatif dalam Mewujudkan Indonesia Bebas Emisi Karbon. *UEEJ-Unbara Environmental Engineering Journal*, 2(2), 1-10.
- Fournier, R. 1991. The Transition from Hydrostatic to Greater than Hydrostatic Fluid Pressure in Presently Active Continental Hydrothermal Systems in Crystalline Rock. *Geophysical Research Letters* 18(5), 955-958.
- Goff, F., dan Janik, C. J. 2000. "Geothermal Systems." *Encyclopedia of Volcanoes*.
- Gupta, H., dan Roy, S. 2007. Geothermal Energi: An Alternatif Resource For The 21ST Century. Elsevier, Oxford.
- Hakim, A. F., Krismadiana, Sholihah, F., Ismawati, R., dan Dewantari, N. 2022. Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Indonesia. *Indonesian Journal of Conservation*, 11(2), 71-77.
- Ibrahim, M. M., Pranata, R., Nababan, B. S., Heriani, N., Maharani, A., Situmorang, A. S. J., Puspita, D., Landia, K. P., dan Harfiandri, M. S. 2022. *Karakteristik Manifestasi dan Rekomendasi Pemanfaatan Potensi Panas Bumi pada Daerah Danau Ranau, Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan, Provinsi Sumatera Selatan*. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
- Ibrahim, M. M., Utami, P., dan Raharjo, I. B. 2024. Modeling and Interpretation of Geothermal System Components Using the Gravity Method at the "X"

- Geothermal. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment and Technology*, 9(2), 162–169.
- Karunianto, A. J., Haryanto, D., Hikmatullah, F., dan Laesanpura, A. 2017. Penentuan Anomali Gayaberat Regional dan Residual Menggunakan Filter Gaussian Daerah Mamuju Sulawesi Barat. *EKSPLORIUM*, 38(2), 89.
- Kirbani, S. B. 2001. Panduan Workshop Eksplorasi Geofisika: Metode Gravitasi, Laboratorium Geofisika. Universitas Gadjah Mada.
- Kusnama, R. Pardede, S. Andi Mangga, dan Sidarto. 1992. The Geology of The Sungai Penuh and Ketaun Quadrangle, Sumatera. Report Geological Research and Development Centre, Bandung in Press.
- K. Wohletz, and G. Heiken. 1992. *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California.
- Kurniawan, S.T., M.T., O. 2022. Analisis Fault Fracture Density pada Potensi Panas Bumi Non-Vulkanik untuk Menentukan Recharge Area; Studi Kasus di Wilayah Lore Lindu, Sulawesi Tengah. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 2(2), 46.
- Lase, F. T. Z., et. al.,. 2024. Analysis and Interpretation of Gravity Data to Modelling 'PB' Geothermal Field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1293(1), 012001.
- Lestari, A. F., Widayati, N. T., Rusman, dan Supriyadi, dan Khumaedi. 2020. Analisis gaya berat di Trangkil Gunungpati Semarang. *Pascasarjana Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Semarang*, 50237.
- Mahardhika, R., Said, Y. M., Resta, I. L., dan Kurniawan, A. 2020. Identifikasi Keberadaan Manifestasi Daerah Panas Bumi Gunung Sumbing, Jangkat Berdasarkan Interpretasi Data Landsat 8 dan Geolistrik. Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi.
- McCaffrey, R. 2009. The Tectonic Framework of Sumatra, Java, and the Sunda Strait. In *Earthquake Hazard, Risk, and Strong Ground Motion in the Sunda Arc*. Springer.
- M. I. Sugita, A. F. Janah, D., Rahmawati, Supriyadi, dan Khumaedi. 2020. Analisis Data Gaya Berat Di Daerah Bendan Duwur Semarang. *J. Res. Technol*, Vol.6(1), pp.90-93.
- Mutiah, S., Gunawan, W. A. K., Afnimar, Suteja, A., dan Mustofa, S. A. 2024. Estimasi potensi panas bumi daerah Seram bagian Barat dan pulau-pulau sekitar, Provinsi Maluku berdasarkan data gaya berat dan aeromagnetik. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(2), 117-133.
- N. A. Karimah, dan A. Suprianto. 2020. Korelasi Data Gravitasi Satelit Pada Daerah Panas Bumi Blawan-Ijen Correlation of Satellite Gravitation Data in Blawan Geothermal Area -Ijen. *J. Sains Dasar*, Vol. 9, pp.11-15.
- Nayoan, A. G. P., Pranatikta, K. A., Anil, Hendrasto, F., dan Yuniasih, S. 2023. Upflow-outflow Zone Identification Based on Geochemistry Indicator and Fault Fracture Density Correlation Analysis in Mt. Gede Geothermal Case, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1159(1).
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Springer.
- N. Marcelino, R. Poerawardi, D. Ramdani, dan D. Apriyanti. 2010) Studi penentuan Nilai Undulasi Dari EGM 2008 Dengan Derajat Harmonik 360, 720, dan 2190 Di Pulau Jawa, *J. Online Mhs. Bid. Tek. Geod*, 1–8.

- Nurwahyudin, D. S., dan Harmoko, U. 2020. Pemanfaatan dan Arah Kebijakan Perencanaan Energi Panas Bumi di Indonesia Sebagai Keberlanjutan Maksimalisasi Energi Baru Terbarukan. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(3), 111–123.
- R. J. Blakely. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press
- Rybach, L., dan Muffler, L. J. P. 1981. *Geothermal System: Principles and Case Histories*. Wiley.
- Santoso, D. 2004, "Catatan Kuliah Eksplorasi Energi Geothermal". Penerbit ITB, Bandung
- Sarkowi, M. 2011: *Metode eksplorasi gayaberat*. Diktat Kuliah. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Scottish Water. 2020. 2D Modeling Subsurface Layer Based On Microgravity Data. 21(1), 1-9.
- Sihombing, P. A., Hadi, A. I., Refrizon, R., dan Zakariya, H. (2024). Identification of the distribution of geothermal reservoirs around Kepahiang Bengkulu Province using GGMPlus gravity data anomalies by the 2D inversion method. *Journal of Aceh Physics Society*, 13(1), 1–8.
- Simons, W. J. F., Socquet, A., Vigny, C., et. al.,. 2007. "A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6).
- Suharno. 2010. *Pengembangan Prospek Panasbumi*. Bandar Lampung: 46 Universitas Lampung.
- Suharno. 2012. *Sistem Panas Bumi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Supriyanto 2007. *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia.
- Suryantini, dan Wibowo, H. H. 2010. Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System: A Case Study in Sulawesi, Indonesia. *Jurnal Geoaplika*, 5(1), 27–37.
- Soengkono, S. 1999, "Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assesment of Geothermal System". Geothermal Institute, University of Auckland.
- Utama, H. W., Said, Y. M., dan Siregar, A. D. 2023. *Releasing Bend Structures of Dikit Fault Segment on Grao Sakti, Jambi: Its Related Strike-slip Fault Zone*. Department of Geological Engineering, Faculty of Science and Technology, Jambi University.
- van Bemmelen, R. W. 1949. *The Geology of Indonesia*. The Hague: Government Printing Office.
- Winarsih, F. F. 2014. Identifikasi Litologi daerah manifestasi panas bumi parangwedang Kabupaten Bantul DIY dengan metode magnetik. In skripsi. UIN Sunan Kalijaga
- W. M. Telford, L.P. Geldart, dan R. E. Sheriff. 1990. *Applied Geophysics* (Second). Cambridge Universitu Press.
- Zuhdi, M., Ardhuha, J., Kosim, Wahyudi dan Ayub, S. 2020. Pemodelan Anomali Gravitasi Menggunakan GrCBAox untuk Identifikasi Injeksi Fluida pada Reservoir. *Kappa Journal*, 4(2), 240-249.