

**MENENTUKAN SISTEM PANAS BUMI BANDA BARU, KECAMATAN
AMAHAI, MALUKU TENGAH BERDASARKAN PEMODELAN INVERSI
3D ANOMALI GAYABERAT**

(Skripsi)

Oleh
Siti Fatimah
2215051034



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026

**MENENTUKAN SISTEM PANAS BUMI BANDA BARU, KECAMATAN
AMAHAI, MALUKU TENGAH BERDASARKAN PEMODELAN INVERSI
3D ANOMALI GAYABERAT**

Oleh

Siti Fatimah

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

MENENTUKAN SISTEM PANAS BUMI BANDA BARU, KECAMATAN AMAHAI, MALUKU TENGAH BERDASARKAN PEMODELAN INVERSI 3D ANOMALI GAYABERAT

Oleh

Siti Fatimah

Daerah Banda Baru yang berada di Provinsi Maluku Tengah, Kecamatan Amahai, diketahui memiliki potensi panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi di daerah tersebut, khususnya pada zona prospek *reservoir*, dengan memanfaatkan data satelit gayabarat GGMPlus (*Global Gravity Model Plus*). Analisis struktur dilakukan menggunakan metode turunan (*derivative*) yang digunakan meliputi *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Berdasarkan hasil pengolahan pada lintasan A – A, B – B, dan C – C diperoleh adanya sepuluh indikasi patahan yang berperan sebagai jalur *permeabilitas* fluida geothermal. Untuk memahami sistem panas bumi lebih detail, dilakukan pemodelan inversi 3D. Hasil pemodelan menunjukkan distribusi densitas hingga kedalaman 3100 m yang merepresentasikan kondisi bawah permukaan daerah penelitian. Zona *caprock* teridentifikasi memiliki densitas sedang berkisar 2,7 – 2,8 gr/cc tersusun oleh batupasir yang telah mengalami alterasi menjadi lempung pada kedalaman 700 – 800 m, sehingga bersifat *impermeabel*. Selanjutnya, zona densitas rendah sekitar 1,9 -2,6 gr/cc pada kedalaman 700 – 800 m diinterpretasikan sebagai *reservoir* yang memiliki porositas dan permeabilitas baik sebagai tempat akumulasi fluida panas. Sementara itu, zona dengan densitas tinggi 2,6 -2,9 gr/cc pada kedalaman 2000 – 3000 m diinterpretasikan sebagai *heat source* yang kemungkinan tersusun oleh batuan beku intrusif seperti gabro.

Kata Kunci : Sistem Panas Bumi, Banda Baru, gayabarat, FHD, SVD, inversi 3D

ABSTRACT

DETERMINING THE NEW BANDA GEOTHERMAL SYSTEM, AMAHAI DISTRICT, CENTRAL MALUKU BASED ON 3D GRAVITY ANOMALY INVERSION MODELING

Oleh

Siti Fatimah

The Banda Baru area, located in Central Maluku Province, Amahai District, is known to have geothermal potential. This study aims to identify the geothermal system in the area, particularly in the reservoir prospect zones, by utilizing GGMPlus (Global Gravity Model Plus) gravity satellite data. Structural analysis was conducted using derivative methods, namely the First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD). The analysis results on transects A - A, B - B, and C - C show the presence of ten fault indications that act as fluid permeability pathways for geothermal fluids. To understand the geothermal system in more detail, 3D inversion modeling was carried out. The modeling results show a density distribution down to a depth of 3100 m, representing subsurface conditions in the study area. The identified caprock zone has a moderate density ranging from 2,7 – 2,8 gr/cc, composed of sandstone that has undergone alteration into clay at a depth of 700 – 800 m, thus impermeable. Furthermore, the low-density zone of around 1,9 – 2,6 gr/cc at a depth of 700 – 800 m is interpreted as a reservoir with good porosity and permeability as a place for hot fluid accumulation. Meanwhile, the high-density zone of 2,6 – 2,9 gr/cc at a depth of 2000 – 3000 m is can be interpreted as a thermal energy source (heat source). likely composed of intrusive igneous rocks such as gabbro.

Keywords: *Geothermal System, Banda Baru, gravity, FHD, SVD, inversion 3D*

Judul Skripsi : **Menentukan Sistem Panas Bumi Banda Baru,
Kecamatan Amahai, Maluku Tengah
Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Anomali
Gayaberat**

Nama Mahasiswa : **Siti Fatimah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215051034**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing 1



**Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU,
Asean Eng.**
NIP. 196207171987031002

Dosen Pembimbing 2



Ridho Destawan, S.T., M.T.
NIP. 199212222024061002

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika



Dr. Ir. Svamsurrijal Kasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA, IPM.

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU, Asen Eng



Sekretaris : Ridho Destawan, S.T., M.T.



Anggota : Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.,CRP



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal lulus Ujian Skripsi: 19 Mei 2026

PERNYATAAN

Dengan ini penulis menyatakan bahwa skripsi berjudul “Menentukan Sistem Panas Bumi Banda Baru, Kecamatan Amahai, Maluku Tengah Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Anomali Gayaberat” merupakan hasil penelitian dan pemikiran penulis sendiri yang disusun berdasarkan data, hasil analisis, serta pengetahuan yang diperoleh selama proses penelitian berlangsung. Seluruh bagian dalam skripsi ini tidak mengandung karya yang pernah dipublikasikan oleh pihak lain, kecuali sumber - sumber yang telah dicantumkan secara jelas sebagai bahan rujukan sesuai kaidah penulisan ilmiah.

Pernyataan ini penulis buat dengan penuh kesadaran dan tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya kekeliruan atau pelanggaran terhadap ketentuan akademik. Dalam karya ini, penulis menyatakan kesediaannya untuk menerima segala konsekuensi sesuai dengan ketentuan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Siti Fatimah

NPM. 2215051034

RIWAYAT HIDUP



Siti Fatimah lahir pada 14 Agustus 2002 di Bandar Jaya. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Barokah dan Ibu Sumiati. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 4 Natar dan diselesaikan pada tahun 2016. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di MTs GUPPI (Gerakan Usaha Pembaharuan Pendidikan Islam) dan lulus pada tahun 2019. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Negeri 1 Natar, Lampung Selatan, dan diselesaikan pada tahun 2022. Setelah itu, penulis melanjutkan studi ke Perguruan tinggi negeri, yakni Universitas Lampung, melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada Program Studi S1 Teknik Geofisika.

Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan yang bersifat konstruktif, baik dalam bidang akademik maupun non akademik. Selain itu, penulis juga terlibat dalam organisasi internal dan eksternal kampus, salah satunya Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (HIMA TG BHUWANA), dengan keikutsertaan yang dimulai pada periode 2024 –2025 sebagai anggota bidang Dana Usaha dan berlangsung selama dua periode.

Penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada Januari hingga Februari 2025 yang berlokasi di Desa Kalibening Raya, Kabupaten Lampung Utara. Selanjutnya, pada Oktober hingga November 2025, penulis mengikuti

kegiatan Kerja Praktik (KP) di perusahaan yang bergerak di bidang sumber daya mineral, khususnya batu bara dan panas bumi, dengan judul **“Pemodelan 1D Data Geolistrik untuk Mendeteksi Batuan Penudung Panasbumi di Daerah Banda Baru Maluku Tengah”**. Selain itu, penulis juga menyelesaikan tugas akhir berjudul **“Menentukan Sistem Panas Bumi Banda Baru, Kecamatan Amahai, Maluku Tengah Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Anomali Gayaberat”** sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Instrumentasi Geofisika, Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Dengan penuh ketulusan, karya ini penulis persembahkan kepada:

KEDUA ORANG TUA TERSAYANG

Kepada ayah dan ibu tercinta, yang telah membesarkan dan mendidik penulis dengan penuh kasih sayang hingga saat ini. Terima kasih atas segala pengorbanan, doa, dan ketulusan yang tidak pernah putus diberikan kepada penulis. Meskipun ayah dan ibu belum berkesempatan menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis berharap dapat menjadi salah satu wujud dari harapan dan impian tersebut. Ungkapan terima kasih mungkin tidak akan pernah cukup untuk membalas segala kebaikan yang telah diberikan. Semoga setiap usaha, doa, dan keikhlasan ayah dan ibu dalam membesarkan anak-anaknya mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT. Penulis juga berharap ayah dan ibu senantiasa diberikan kesehatan, kelancaran rezeki, kebahagiaan, serta dapat menyaksikan anak-anaknya meraih kesuksesan di masa depan.

KAKAK DAN ADIK TERSAYANG

Kepada saudara kandung penulis, Siti Komariah dan Nur Anisah, penulis mengucapkan terima kasih atas segala dukungan, perhatian, dan kebersamaan yang selalu diberikan. Kehadiran kalian menjadi sumber semangat dan penghibur bagi penulis, khususnya selama proses penyusunan tugas akhir. Terima kasih atas motivasi yang terus diberikan sehingga penulis mampu bertahan, tidak menyerah, dan kembali bangkit dalam menyelesaikan skripsi ini.

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOFISIKA

Terkhususnya teman-teman angkatan 2022, abang dan kakak, serta para dosen yang telah memberikan banyak dukungan, kebersamaan, serta pengalaman berharga yang turut mewarnai perjalanan akademik penulis selama menempuh masa perkuliahan.

DIRI SAYA SENDIRI

Terakhir, penulis mempersembahkan kepada diri sendiri sebagai bentuk apresiasi, terima kasih atas perjuangan dan keteguhan untuk tidak menyerah hingga saat ini, dan mampu menjadi perempuan yang sabar serta ikhlas dalam menghadapi proses yang penuh tantangan bagi penulis, sehingga penulis dapat membuktikan bahwa penulis bisa mendapatkan gelar S.T dan lulus pada tepat waktu. Untuk perjalanan yang belum tahu bagaimana kedepannya dan pasti banyak lika – liku kehidupan yang akan menanti, semoga penulis dapat melewatinya dengan baik dan tidak pernah menyerah dalam hal apapun yang terjadi. Sayangi dirimu jadikan semua perjalanan yang kamu lewati hingga saat ini sebagai pengalaman hidup untuk kamu melewati hari – hari berikutnya, karena tidak semua pengalaman itu akan berbuah manis tahu pun pahit terus dan rayakanlah dirimu sendiri karena kamu berhak untuk bahagia.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya. Ia memperoleh pahala dari kebaikan yang dikerjakannya dan mendapat balasan dari keburukan yang diperbuatnya.”

(Q.S. Al-Baqarah: 286)

“Karena sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-Insyirah: 5–6)

Teruslah berusaha menjadi versi yang terbaik dari dirimu. Suatu saat nanti, kamu bisa saja merasa menyesal jika tidak mulai mencoba dari sekarang.

Jangan pernah berpikir bahwa semuanya sudah terlambat, tetaplah melangkah dan lakukan yang bisa kamu lakukan. Proses memang membutuhkan waktu, tetapi setiap latihan tidak membuatmu menjadi lebih buruk. Mungkin ada rasa sedih yang muncul, namun itu justru menjadi tanda bahwa kamu sedang berproses ke arah yang lebih baik.

-Jungkook

“Jangan pernah mengenal kata menyerah bila ingin berhasil”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Menentukan Sistem Panas Bumi Banda Baru, Kecamatan Amahai, Maluku Tengah Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Anomali Gayaberat”** , dengan baik. Penyusunan Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca, serta dapat berkontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Siti Fatimah

NPM. 2215051034

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya, serta semoga kita semua sebagai umatnya memperoleh syafaat beliau di hari akhir.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa terdapat banyak pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta bimbingan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., yang berperan sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU, ASEAN Eng., sebagai dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, memberikan arahan, dan membimbing, penulis dari awal hingga akhir penyusunan tugas akhir. Beliau juga berperan sebagai dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa membantu penulis selama masa perkuliahan.
5. Bapak Ridho Destawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan kepada penulis, sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Bapak Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.,CRP. Sebagai dosen penguji Tugas Akhir (TA) yang telah memberikan berbagai masukan, saran, serta kritik dalam proses pengerjaan skripsi ini.
7. Seluruh dosen di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung, yang penulis hormati dan banggakan, terima kasih atas ilmu, bimbingan, serta pengalaman berharga yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
8. Kedua orang tua penulis, terima kasih atas segala pengorbanan, doa, dan kasih sayang yang tiada henti. Secara khusus kepada ibu tercinta yang selalu sabar, tidak pernah mengeluh, serta senantiasa memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis.
9. Kakak dan adik penulis, Siti Komariah dan Nur Anisa, yang selalu memberikan dukungan serta menjadi tempat berbagi cerita selama menjalani proses pendidikan.
10. Malikha Maharani, M. Aditya Makki, dan Disa Salsabila, Dini Anjani, Wanti Novelia Nababan, Ulivia Natalia Haloho yang telah membantu, membimbing, serta memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
11. Keluarga besar Teknik Geofisika angkatan 2022 yang telah memberikan berbagai pengalaman serta pelajaran berharga, selama masa perkuliahan.
12. Seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan skripsi ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Siti Fatimah

NPM. 2215051034

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
PERSEMBAHAN.....	x
MOTTO	xii
KATA PENGANTAR.....	xiii
SANWACANA.....	xiv
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Lokasi Penelitian	5
2.2.1 Geomorfologi Perbukitan Bergelombang.....	5
2.2.2 Geomorfologi Perbukitan Bergelombang.....	5
2.2.3 Geomorfologi Pendataran.....	6
2.3 Geologi Daerah Penelitian.....	6
2.4 Struktur Geologi	7
2.5 Penelitian Terdahulu.....	9

III. TEORI DASAR.....	14
3.1 Sistem Panas Bumi	15
3.2 Jenis Sistem Panas Bumi	15
3.3 <i>Data Global Gravity Model Plus (GGMPlus)</i>	19
3.4 Metode Gayaberat.....	20
3.5 Konsep Dasar Gayaberat	22
3.5.1 Hukum Newton.....	22
3.5.2 Potensial Gayaberat	24
3.6 Rapat Massa Batuan	25
3.7 Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat	27
3.7.1 Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>)	27
3.7.2 Koreksi Bouguer	27
3.7.3 Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>)	28
3.7.4 Anomali Bouguer.....	28
3.8 Densitas Bawah Permukaan Rata-Rata	29
3.9 Analisis Spektrum	30
3.10 Filter <i>Moving Average</i>	33
3.11 Analisis <i>Derivative</i>	34
3.12 Pemodelan Inversi (<i>Inversion Modelling</i>)	36
IV. METODOLOGI PENELITIAN	37
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian	37
4.2 Alat dan Bahan	39
4.3 Prosedur Penelitian	40
4.3.1 Pengambilan Data	40
4.3.2 Nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL).....	40
4.3.3 Analisis Spektrum.....	41
4.3.4 Pemisahan Regional dan Residual.....	41
4.3.5 Analisis <i>Derivative</i>	41
4.3.6 Model Bawah Permukaan.....	42
4.4 Diagram Alir.....	43
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
5.1 Data Penelitian.....	44
5.2 Anomali Bouguer Lengkap	44
5.3 Analisis Spektrum	45
5.4 Filter <i>Moving Avarege</i>	51
5.5 Anomali Regional.....	51

5.6	Anomali Residual	52
5.7	Analisis <i>Derivative</i>	52
5.8	<i>First Horizontal Derivative</i> (FHD).....	53
5.9	<i>Second Vertical Derivative</i> (SVD)	53
5.10	Pemodelan Inversi 3D	63
5.11	Pemodelan Inversi 2D	66
5.12	Peta Geologi Daerah Penelitian <i>Overlay</i> Peta Residual	69
5.13	Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian.....	71
VI.	KESIMPULAN	72
6.1	Kesimpulan.....	72
6.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi penelitian	10
2. Peta geomorfologi daerah penelitian.....	11
3. Peta geologi regional daerah penelitian	12
4. Peta kelurusan daerah penelitian.....	13
5. Sistem panas bumi dan manifestasi permukaan.....	14
6. Skematik tipe sistem panas bumi.....	16
7. Ilustrasi cara kerja satelit Grace	20
8. Ilustrasi cara kerja satelit Goce	21
9. gaya tarik menarik antar dua benda	23
10. Potensi dan kuat arus medan massa 3 dimensi	25
11. Kurva $\ln A$ terhadap k^2	31
12. Diagram alir	43
13. Peta complete bouguer anomali	46
14. Peta lintasan analisis spektrum	47
15. Grafik $\ln A$ terhadap k pada lintasan 1.....	48
16. Grafik $\ln A$ terhadap k pada lintasan 2.....	49
17. Grafik $\ln A$ terhadap k pada lintasan 3.....	49
18. Grafik $\ln A$ terhadap k pada lintasan 4.....	50
19. Peta anomali regional.....	54
20. Peta anomali residual	55
21. <i>Slice</i> peta residual.....	56
22. Peta <i>first horizontal derivative</i> (FHD)	57
23. Peta <i>second vertical derivative</i> (SVD).....	58
24. Grafik residual, SVD, dan FHD lintasan A - A.....	60

25. Grafik residual, SVD, dan FHD lintasan B - B.....	61
26. Grafik residual, SVD, dan FHD lintasan C- C.....	62
27. Model 3d inversi anomali residual.....	64
28. Model distribusi densitas 3D (A) Model 3D dilihat dari arah selatan (B) Model 3D dilihat dari arah timur (C) Model 3D hasil <i>slice</i> daerah penelitian	65
29. Model <i>slicing</i> 3d dan Grafik <i>derivative</i> lintasan A - A	67
30. Model <i>slicing</i> 3d dan Grafik <i>derivative</i> lintasan B - B	68
31. Model <i>slicing</i> 3d dan Grafik <i>derivative</i> lintasan C - C	69
32. Peta geologi <i>overlay</i> peta residual	70
33. Sistem panas bumi daerah penelitian	71

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai densitas batuan	26
2. Parameter SVD (henderson, and, zietz, 1949)	35
3. Parameter SVD (Elkins, 1951).....	36
4. Parameter SVD (Rosenbach, 1953)	36
5. Pelaksanaan kegiatan penelitian	38
6. Perangkat penelitian	39
7. Data penelitian	39
8. Kedalaman Anomali Regional dan Residual	50
9. Bilangan Gelombang (kc) dan Lebar Jendela (N)	51
10. Patahan lintasan A	66
11. Patahan lintasan B	67
12. Patahan lintasan C	68

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem panas bumi sebagai salah satu sumber energi yang tersimpan dalam bentuk fluida panas, baik berupa air maupun uap, yang berada pada kondisi geologi tertentu di kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan bumi. Sistem ini ditandai oleh adanya proses perpindahan panas dan aliran fluida dari bawah permukaan menuju bagian yang lebih dangkal. Keberadaan energi panas biasanya ditunjukkan oleh nilai gradien temperatur yang tinggi serta munculnya anomali panas yang dapat terdeteksi hingga mendekati permukaan (Broto, 2011). Identifikasi sistem panas bumi di suatu wilayah umumnya dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter, antara lain jenis fluida, kondisi kesetimbangan *reservoir*, temperatur *reservoir*, batuan penyusun (*hostrock*), serta sumber panasnya (Nicholson, 1993).

Provinsi Maluku merupakan wilayah kepulauan yang memiliki potensi panas bumi cukup besar, yang umumnya berkaitan dengan kondisi geologi non - vulkanik. Salah satu lokasi yang menunjukkan potensi tersebut adalah Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Secara geografis, wilayah penelitian ini terletak pada koordinat 129°4'30"–129°6'30" Bujur Timur dan 3°11'30" – 3°13'30" Lintang Selatan dengan luas sekitar 15 km x 20 km dan bentuk bentang alam di daerah penelitian, yaitu menunjukkan sebaran morfologi yang curam dengan puncak-puncak tinggi (perkebunan bergelombang kuat), morfologi ini dijumpai pada bagian utara dan selatan yang didominasi oleh batuan sekis, sementara itu pada bagian tengah daerah penelitian berkembang morfologi berupa perbukitan bergelombang lemah hingga dataran (Fadhlan, M., 2011).

Suharno (2013) menyebutkan bahwa dalam eksplorasi energi panas bumi

Pembentukan sistem panas bumi dapat dideteksi dengan perbedaan densitas batuan bawah permukaan menggunakan metode gayaberat penelitian yang memberikan gambaran sebagai potensi sumber panas dengan melihat dari pola sebaran daerah panas (Sugianto dan Rahadinata, 2015).

Pengukuran metode gayaberat dapat dilakukan dipermukaan bumi, kapal dan udara (satelit). Data gayaberat satelit GGMplus (*Global Gravity Model Plus*) tahun 2013 memiliki keunggulan pada resolusi spasialnya yang lebih tinggi sekitar 200 meter dibandingkan dengan data satelit gayaberat lainnya, seperti BGI dan *Topex* (Suprianto dkk., 2021). Selain itu data ini dapat dipadukan dengan data topografi SRTM untuk menghasilkan informasi gayaberat yang lebih akurat dan beresolusi tinggi, serta memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang karakteristik topografi wilayah tersebut (Hirt dkk., 2013)

Penelitian potensi panas bumi di Wilayah Maluku Tengah menggunakan metode gayaberat telah dilakukan oleh Mutia dkk., (2019) yang memanfaatkan data gayaberat residual dan aeromagnetik untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan pulau seram dan pulau - pulau sekitarnya. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa variasi anomali densitas batuan memiliki keterkaitan yang kuat dengan sistem panas bumi regional. Selain itu, diperoleh estimasi kedalaman CPD (*Curie Point Depth*) berkisar antara 18 hingga 59,4 km, dengan nilai gradien geotermal sebesar 11,8 – 26 °C/km serta aliran panas antara 29 – 64 mW/m².

Penelitian mengenai sistem panas bumi di Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai, sebelumnya telah dilakukan oleh Noya (2021) melalui melalui analisis hidrokimia manifestasi permukaan, menunjukkan adanya mata air panas, *steaming ground*, dan endapan *travertin* yang menandakan sistem panas bumi aktif di wilayah tersebut. Penelitian ini memberikan dasar informasi keberadaan sistem panas bumi, namun belum menggambarkan kondisi struktur bawah permukaan secara detail sehingga diperlukan penelitian lanjutan menggunakan metode geofisika, salah satunya metode gayaberat.

Berdasarkan pernyataan diatas, maka penelitian ini dilakukan dengan metode gayaberat untuk memperlihatkan prospek *reservoir*, serta memperlihatkan struktur bawah permukaan pada daerah Banda Baru. Penelitian ini menggunakan data pengukuran satelit GGMPPlus dengan pemodelan inversi 3D untuk menduga keberadaan *reservoir* dan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan menggunakan analisis *derivative*. Diharapkan dari penelitian ini untuk mengoptimalkan dan mendukung keberlanjutan pengolahan lapangan panas bumi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Menentukan struktur patahan dari hasil analisis *derivative* anomali gayaberat.
2. Mendapatkan model 3D dari distribusi densitas bawah permukaan anomali gayaberat
3. Mendapatkan model sistem panas bumi pada daerah penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi serta menentukan struktur patahan bawah permukaan di daerah penelitian melalui analisis turunan (*derivative*).
2. Mendapatkan model inversi 3D distribusi densitas bawah permukaan dari data anomali gayaberat untuk merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan di wilayah penelitian.
3. Membuat model sistem panas bumi daerah penelitian

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan data gayaberat satelit GGMPPlus (*Global Gravity Model Plus*) dalam pemodelan struktur bawah permukaan berdasarkan filter *moving average*, analisis

derivative menggunakan FHD, dan SVD, serta model 3D menggunakan *software* Grav3D.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai struktur sesar serta zona yang diduga sebagai *reservoir* di daerah penelitian. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Penelitian

Wilayah penelitian berada pada prospek panas bumi Banda Baru yang terletak di Kecamatan Amahai, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Lokasi penelitian tersebut ditampilkan pada Gambar 1 dalam bentuk peta daerah penelitian. Secara geografis, wilayah ini berada pada koordinat 3°16'0" LS dan 129°34'3,8" BT, serta termasuk dalam zona UTM (*Universal Transverse Mercator*) 52 S. Luas area penelitian adalah sekitar 10 × 10 km². Berdasarkan kondisi morfologinya, daerah ini dapat dibagi menjadi perbukitan terjal, perbukitan bergelombang, dan dataran.

1.2.1 Geomorfologi Perbukitan Bergelombang

Peta geomorfologi daerah panas bumi Banda Baru ditampilkan pada Gambar 2. Satuan perbukitan terjal umumnya berkembang di bagian utara dengan arah memanjang barat – timur, serta memiliki kisaran elevasi antara 100 hingga 800 mdpl. Secara litologi, wilayah perbukitan di bagian utara dan tenggara didominasi oleh batuan metamorf berupa sekis, sedangkan bagian selatan tersusun oleh sekis yang berasosiasi dengan batuan beku gabro (PSDG, 2011).

1.2.2 Geomorfologi Perbukitan Bergelombang

Dari peta geomorfologi pada Gambar 2 daerah panas bumi Banda Baru, satuan geomorfologi perbukitan bergelombang dapat dijumpai dibagian selatan

sampai dengan bagian tengah, bagian timur serta beberapa bagian diutara daerah penelitian yang memiliki ketinggian antara 50 - 300 mdpl. Satuan batuan yang terdapat di daerah geomorfologi perbukitan bergelombang bagian timur dan utara tersusun oleh batuan konglomerat. Sedangkan perbukitan bergelombang bagian selatan tersusun oleh batuan sedimen berupa batupasir berlapis, batu gamping, endapan pantai dan aluvium (PSDG, 2011).

1.2.3 Geomorfologi Pendataran

Pada Gambar 2 satuan geomorfologi pedataran dapat dijumpai didaerah pesisir laut dan sepanjang daerah muara sungai besar seperti sungai Waeruata, Waenua, dan Waetanah, serta geomorfologi pedataran yang luas terdapat di daerah yang merupakan pertemuan antara ketiga sungai tersebut yang bermuara di Teluk Elpaputih yang terdapat di bagian barat daerah penelitian (PSDG, 2011).

1.3 Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pemetaan geologi di daerah panas bumi Banda Baru, jenis batuan yang terdapat di wilayah penelitian dapat dikelompokkan menjadi tujuh satuan, yaitu satuan batuan metamorf, satuan batuan beku, tiga satuan batuan sedimen, serta dua satuan endapan permukaan. Berdasarkan urutan stratigrafi dari yang tertua hingga termuda, susunan batuan di daerah penelitian meliputi batuan sekis (Pts), gabro (Jkg), batu pasir (TQp), batu gamping (Qbg), konglomerat (Qkl), endapan pantai (Qep), dan aluvium (Qal) (Tjokrosoetra, 1993).

Berdasarkan Gambar 3, ditampilkan peta geologi daerah panas bumi Banda Baru. Satuan batuan sekis (PTs) tersebar di bagian utara, selatan, dan timur wilayah penelitian. Batuan sekis di daerah ini terdiri atas beberapa jenis, antara lain sekis biotit, sekis mika, dan sekis kuarsa. Satuan sekis tersebut termasuk batuan metamorf yang terbentuk dari proses perubahan batuan asal berupa perselingan batu pasir dan batu lempung. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Ambon dan Masohi, satuan ini merupakan bagian dari Formasi Banda Baru yang berumur Perm – Trias (Tjokrosoetra, 1993).

Satuan batuan gabro (Jkg) tersebar di bagian selatan daerah penelitian. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Ambon dan Masohi, Maluku, satuan ini termasuk dalam kompleks batuan beku basa hingga ultramafik yang berumur Jura – Kapur (Tjokrosoetra, 1993).

Satuan batuan gamping (Qbg) tersebar di bagian selatan dan tengah daerah penelitian. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Ambon dan Masohi, Maluku, satuan ini termasuk batu gamping koral yang berumur Holosen (Tjokrosoetra, 1993).

Satuan batuan konglomerat (Qkl) tersebar di bagian timur dan tengah daerah penelitian, dengan distribusi yang umumnya mengikuti perbukitan rendah dan mencakup sekitar 6% dari total luas wilayah survei. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Ambon dan Masohi, Maluku, satuan ini termasuk endapan teras yang berumur Holosen (Tjokrosoetra, 1993).

Endapan pantai (Qep) tersebar di bagian barat daya daerah penelitian dengan luas sekitar 1% dari total wilayah survei. Endapan ini merupakan hasil proses sekunder akibat aktivitas pasang surut air laut yang terakumulasi di kawasan pesisir. Material penyusunnya berupa sedimen lepas yang didominasi oleh pasir, lempung, dan kuarsit. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Ambon dan Masohi, Maluku, endapan ini tersebar di bagian selatan Kota Masohi dan umumnya membentuk perbukitan rendah yang diduga merupakan garis pantai purba (Tjokrosoetra, 1993).

Aluvium (Qal) merupakan endapan sekunder yang berasal dari hasil pelapukan dan rombakan batuan sebelumnya di permukaan. Satuan ini tersusun atas material lepas yang didominasi oleh lempung, pasir, serta fragmen batuan seperti sekis dan kuarsit. Penyebaran aluvium umumnya terdapat di dataran bagian tengah, terutama di sepanjang aliran sungai dan wilayah pesisir. Secara keseluruhan, satuan ini mencakup sekitar 24% dari total luas daerah survei (Tjokrosoetra, 1993).

1.4 Struktur Geologi

Struktur geologi di daerah penelitian dapat dianalisis menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM). Hasil interpretasi peta DEM menunjukkan

bahwa struktur geologi di wilayah ini didominasi oleh arah barat laut – tenggara dan barat daya – timur laut. Keberadaan struktur sesar tersebut diperkirakan berperan dalam memfasilitasi kemunculan mata air panas di lokasi penelitian (PSDG, 2011).

Gambar 4 menampilkan peta kelurusan daerah panas bumi Banda Baru. Peta ini disusun berdasarkan hasil penelitian lapangan terhadap bidang sesar serta orientasi lapisan batuan yang meliputi jurus dan kemiringan (*strike* dan *dip*), yang kemudian diintegrasikan dengan analisis data *Digital Elevation Model* (DEM) dan peta topografi. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur geologi di daerah penelitian didominasi oleh dua arah utama, yaitu sesar berarah barat laut – tenggara dan barat daya – timur laut (PSDG, 2011).

Jenis sesar yang dominan dari struktur sesar berarah barat laut - tenggara adalah sesar mendatar mengangan (*dextral*) yang diperkirakan merupakan struktur sesar yang paling tua yang terbentuk yang mengakibatkan pergeseran pada litologi yang telah terbentuk sebelumnya. Kemudian struktur sesar berarah barat daya - timur laut memiliki pergerakan mengiri (*Sinistral*) yang juga ikut mempengaruhi kemunculan mata air panas Banda Baru. Diperkirakan terbentuknya sesar ini memiliki periode berbeda dengan sesar - sesar berarah barat laut - tenggara lainnya (PSDG, 2011).

Struktur sesar berarah barat daya–timur laut terdiri atas sesar mendatar dan sesar oblik. Sesar mendatar menunjukkan pergerakan mengiri (*sinistral*), sedangkan sesar oblik yang berkembang memiliki komponen gerakan normal yang dikombinasikan dengan pergeseran mendatar ke kiri (PSDG, 2011).

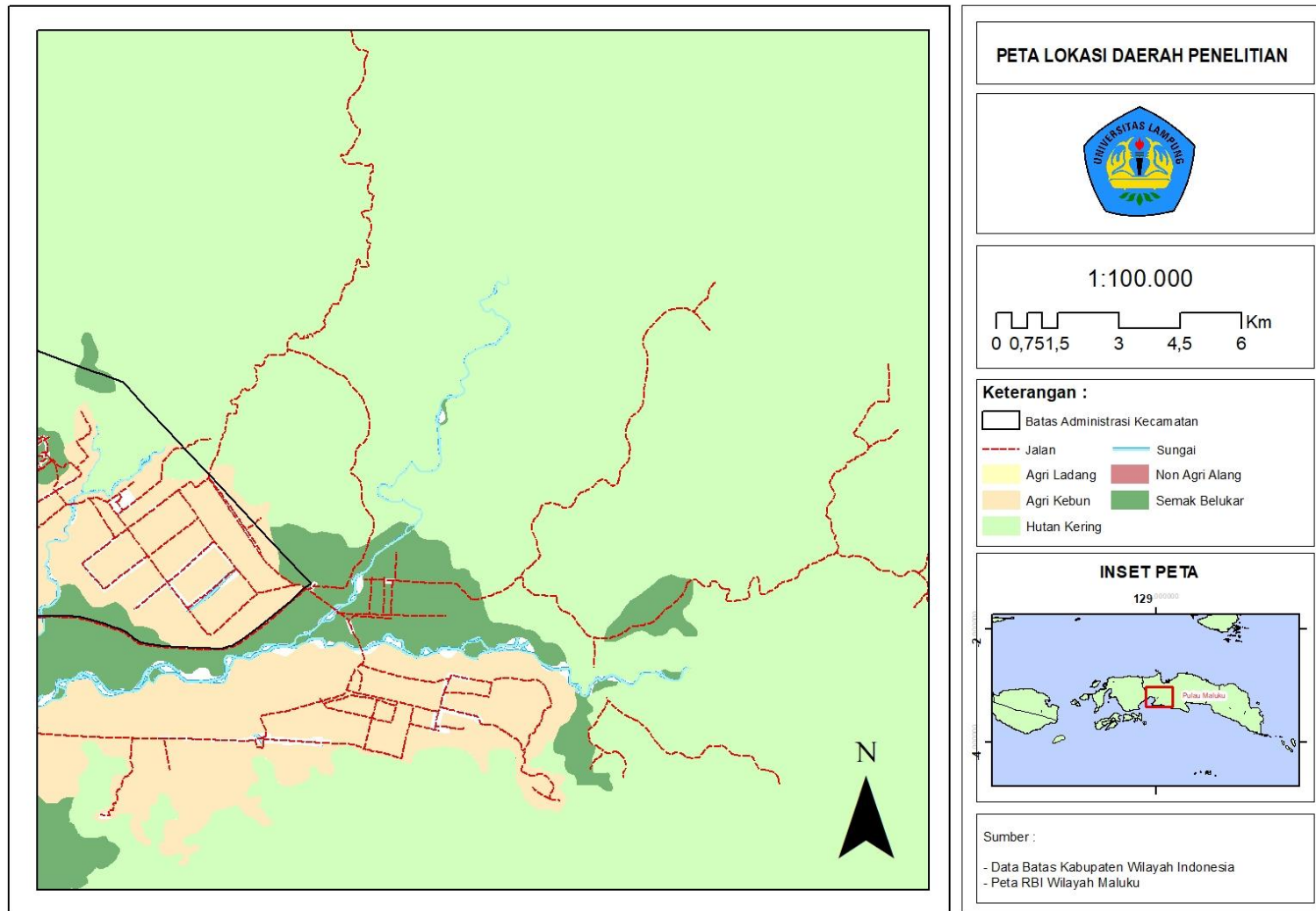
Berdasarkan hasil penelitian, struktur patahan yang terbentuk lebih awal adalah sesar mendatar mengangan (*dextral*) dengan arah barat laut – tenggara. Struktur ini diperkirakan terbentuk akibat aktivitas tektonik pada masa Pra - Tersier yang memotong batuan - batuan yang lebih tua. Selanjutnya, berkembang sesar mendatar mengiri (*sinistral*) dan sesar oblik berarah barat daya–timur laut yang berkaitan dengan aktivitas tektonik Kuartar, sehingga membentuk zona depresi di bagian tengah daerah penelitian. Zona depresi tersebut, khususnya pada bagian ujungnya serta pada area perpotongan beberapa struktur sesar, berkembang menjadi zona *permeabilitas* tinggi yang berperan dalam pergerakan fluida panas

dan memfasilitasi kemunculannya ke permukaan sebagai mata air panas (PSDG, 2011).

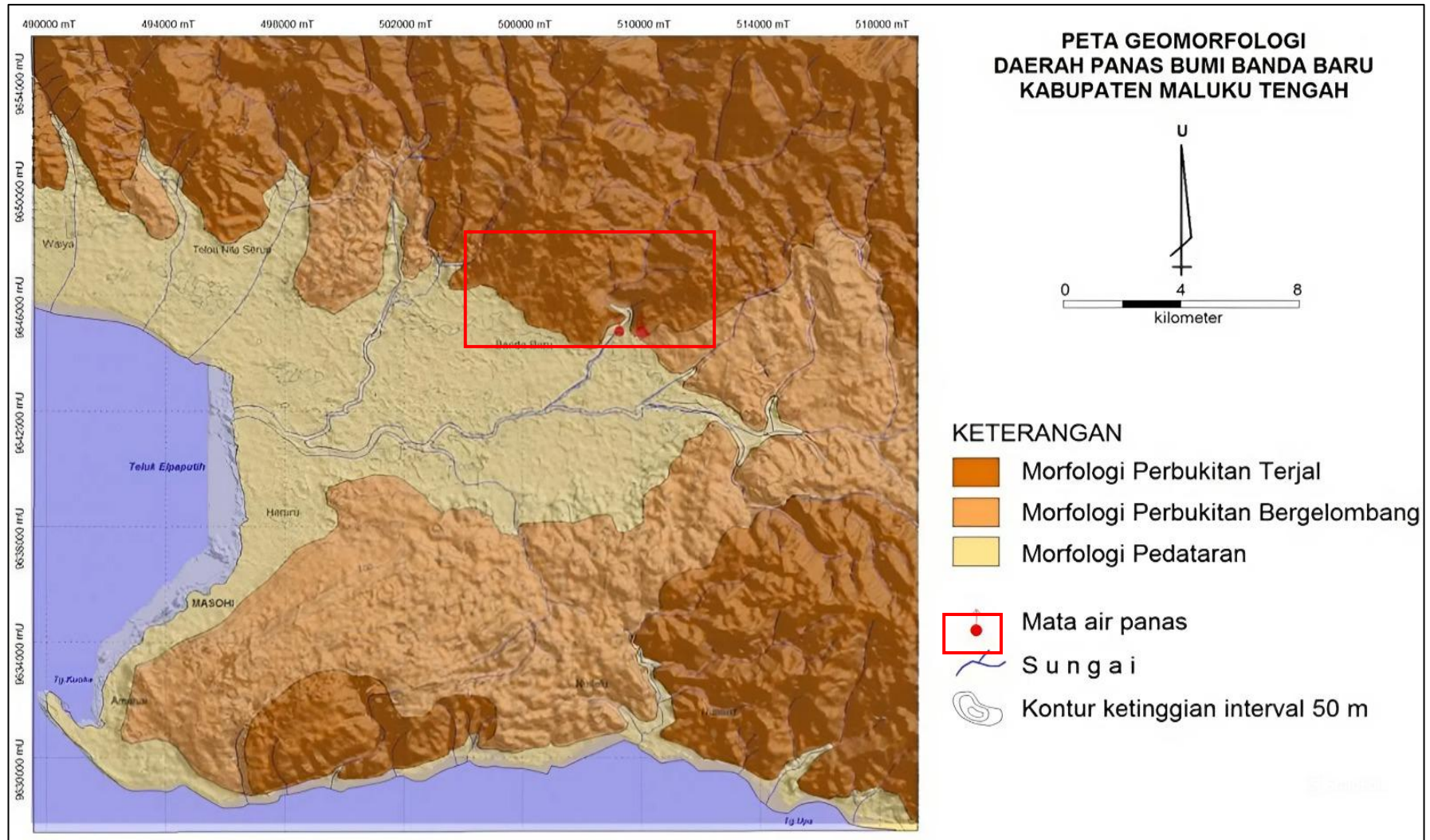
1.5 Penelitian Terdahulu

Mutia dkk. (2019) melakukan penelitian berjudul Estimasi Potensi Panas Bumi Daerah Seram Bagian Barat dan Pulau-Pulau Sekitar, Provinsi Maluku Berdasarkan Data Gayaberat dan Aeromagnetik. Penelitian tersebut memanfaatkan data anomali gayaberat residual dan aeromagnetik untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan di Pulau Seram dan wilayah sekitarnya. Hasil penelitian menunjukkan adanya dua tipe sistem panas bumi, yaitu *volcanic - hosted* dan *fault - hosted*. Sistem *volcanic - hosted* dicirikan oleh kedalaman sumber panas yang relatif dangkal serta keberadaan kelurusan struktur, seperti yang dijumpai di Pulau Ambon, Haruku, dan Saparua. Sementara itu, sistem *fault-hosted* memiliki kedalaman yang lebih sedang hingga dalam, serta berkaitan dengan struktur utama seperti Sesar Kawa. Kedalaman *Curie Point Depth* (CPD), yaitu batas suhu sekitar 580°C di mana batuan kehilangan sifat magnetiknya, menunjukkan bahwa panas dari kedalaman dapat naik ke permukaan melalui jalur sesar utama, seperti yang terjadi di Pulau Seram (Elpaputih, Banda Baru, dan Tehoru). Di wilayah Seram Bagian Barat, khususnya Kairatu, teridentifikasi sumber panas yang relatif dangkal (sekitar 24 km) yang diduga masih berkaitan dengan sistem panas bumi di Pulau Ambon.

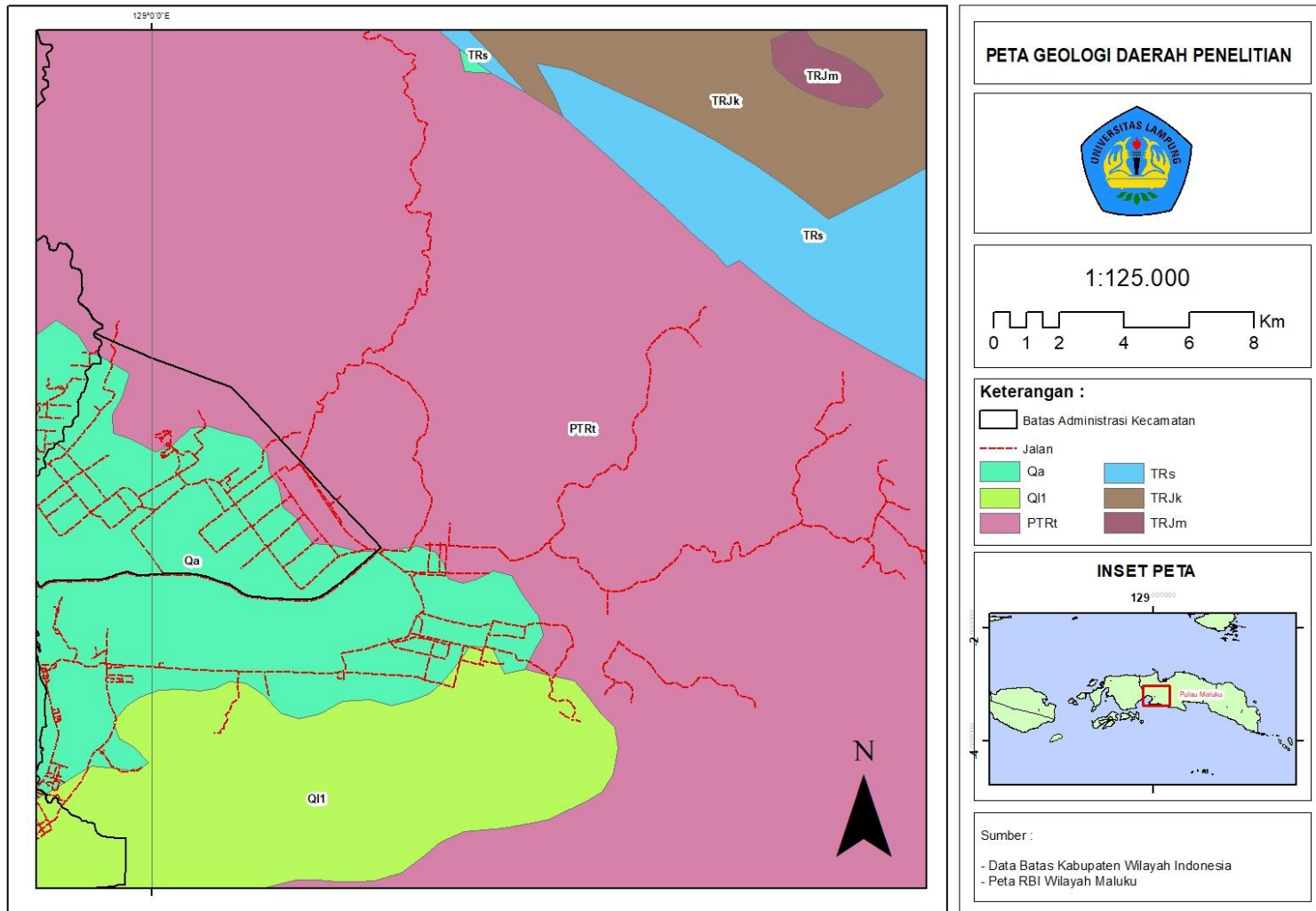
Potensi panas bumi bertipe *fault - hosted* diperkirakan berada pada kedalaman *Curie Point Depth* (CPD) kategori sedang hingga dalam, serta dikontrol oleh keberadaan struktur geologi berupa sesar, seperti Sesar Kawa (ditunjukkan oleh garis putus - putus berwarna biru), yang berkembang di wilayah Pulau Seram bagian barat hingga tengah.



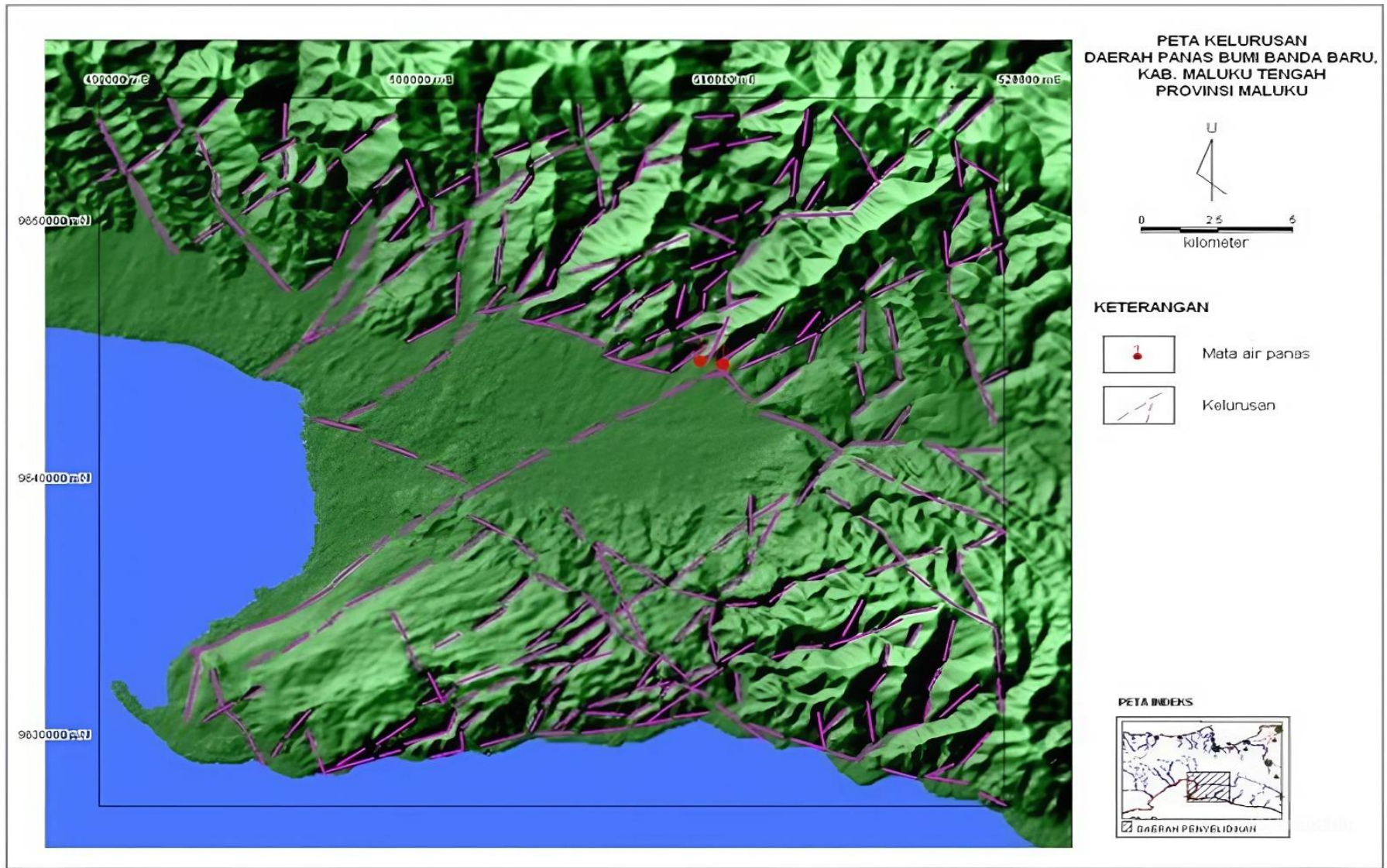
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI)



Gambar 2. Peta Geomorfologi daerah penelitian (PSDG, 2011)



Gambar 3. Peta Geologi Regional daerah penelitian (Tjokrosapoetro, 1993)

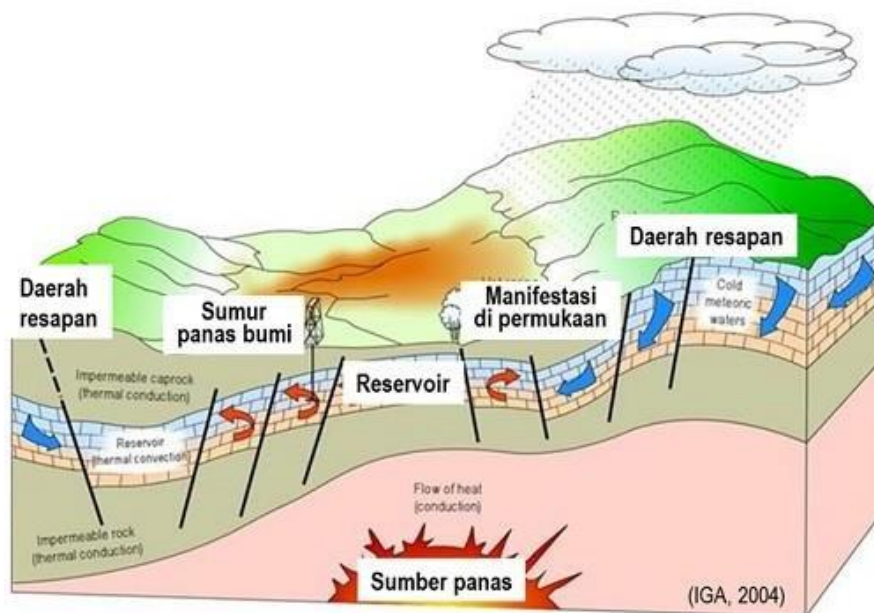


Gambar 4. Peta Kelurusan daerah penelitian (PSDG, 2011)

III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi (*geothermal system*) merupakan suatu sistem alami di bawah permukaan bumi yang berfungsi sebagai penyimpan energi panas, umumnya dalam bentuk fluida bersuhu tinggi. Energi tersebut berasal dari panas internal bumi yang berpindah menuju permukaan melalui mekanisme konduksi dan konveksi, terutama pada wilayah dengan aktivitas vulkanik maupun tektonik yang intens (Hochstein, 1990). Sistem panas bumi terbentuk ketika sumber panas, seperti aktivitas magmatik atau intrusi batuan beku, memanaskan air bawah permukaan yang terakumulasi dalam batuan berpori dan *permeabel*. Proses ini menghasilkan sirkulasi fluida panas yang selanjutnya berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi (Tresna Nagari, 2021). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



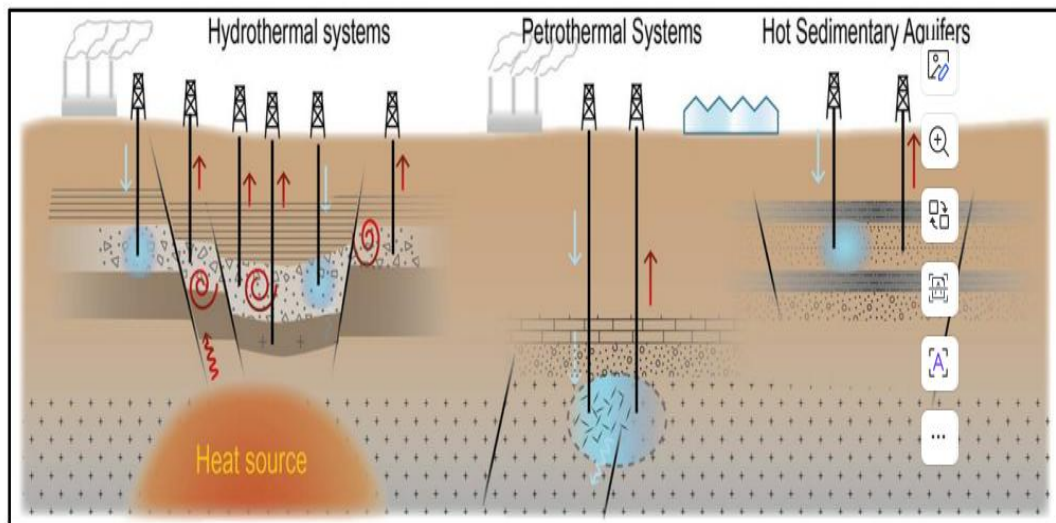
Gambar 5. Sistem panas bumi dan manifestasi permukaan (Dickson dkk., 2004)

3.2 Jenis Sistem Panas Bumi

Berdasarkan keterkaitannya dengan tatanan geologi, sistem panas bumi di Indonesia dapat dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu vulkanik, tektonik, dan non - vulkanik (Kasbani, 2009). Sistem panas bumi vulkanik merupakan sistem yang berasosiasi dengan gunung api Kuartar dan umumnya berkembang di sepanjang jalur busur vulkanik Kuartar, seperti di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, sebagian wilayah Maluku, dan Sulawesi Utara. Sistem ini umumnya tersusun oleh batuan vulkanik dengan komposisi menengah hingga asam, seperti andesit hingga basaltik. *Reservoir* pada sistem panas bumi vulkanik biasanya berada pada kedalaman sekitar 1,5 km dengan temperatur yang tinggi, berkisar antara ± 250 hingga lebih dari $370\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada daerah vulkanik aktif, batuan penyusunnya relatif berumur muda dengan kondisi temperatur yang tinggi serta kandungan gas magmatik yang besar. Namun, *permeabilitas* batuan cenderung rendah karena aktivitas tektonik belum cukup berkembang untuk membentuk rekahan yang intensif sebagai media *reservoir* (Kasbani, 2009).

Daerah non - vulkanik umumnya memiliki umur batuan yang relatif lebih tua serta telah mengalami aktivitas tektonik yang cukup intensif, sehingga membentuk rekahan yang meningkatkan *permeabilitas* batuan. Kondisi ini memungkinkan terbentuknya sistem panas bumi dengan temperatur menengah hingga tinggi, meskipun dengan kontribusi fluida magmatik yang relatif lebih kecil (Kasbani, 2009). Sistem panas bumi yang bersifat tektonik memiliki hubungan kuat dengan keberadaan struktur graben serta kerucut vulkanik, dan umumnya tersebar di kawasan Sumatera, khususnya sepanjang jalur Sesar Sumatera atau Sesar Semangko (Kasbani, 2009).

Menurut Menurut (Buijze dkk., 2019) terdapat tiga tipe utama sistem panas bumi, yaitu sistem hidrotermal (*hydrothermal system*), sistem petrotermal (*petrothermal system*), dan akuifer sedimen panas (*hot sedimentary aquifers*) seperti yang terlihat pada Gambar 5



Gambar 6. Skematik tipe sistem panas bumi (Buijze dkk., 2019)

1. Sistem Hidrotermal (*Hydrothermal System*)

Sistem hidrotermal disebut juga lapangan panas bumi merupakan sistem panas bumi yang terletak di tatanan tektonik aktif serta didominasi oleh aktivitas konveksi. Sistem hidrotermal memiliki temperatur *reservoir* yang tinggi ($>200^{\circ}\text{C}$) pada kedalaman yang dangkal ($< 3 \text{ km}$). Sistem ini dapat diklasifikasikan sebagai lapangan yang didominasi uap atau didominasi air. *Permeabilitas* matriks atau rekahnya cukup tinggi untuk memungkinkan aliran fluida tanpa stimulasi (Buijze dkk., 2019).

2. Sistem Petrotermal (*Petrothermal System*)

Sistem petrotermal merupakan tipe sistem panas bumi yang menargetkan batuan yang memiliki *permeabilitas* rendah. Sistem panas bumi tipe ini memerlukan stimulasi sebelum aliran dapat dicapai. Sistem petrotermal mencakup konsep *Hot Dry Rock* (HDR) dengan sumur-sumur dihubungkan melalui perekahan hidrolis, serta *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) dengan injeksi tekanan tinggi menstimulasi *permeabilitas* jaringan rekahan alami melalui mekanisme pergeseran (*shearing*) (Buijze dkk., 2019; Lu, 2018).

3. Akuifer Sedimen Panas (*Hot Sedimentary Aquifers*)

Sistem akuifer sedimen panas merupakan tipe sistem panas bumi yang terdiri dari formasi batuan sedimen berpori atau batuan *permeabel*. Sistem ini didominasi oleh aliran panas hasil proses konduksi dengan sebagian besar

sistem memiliki temperatur rendah hingga menengah (30°C - 150°C) pada kedalaman yang relatif dangkal (1-4 km). Umumnya, air / fluida disirkulasikan di antara dua sumur (*doublet*) pada tekanan rendah (Buijze dkk., 2019).

Berdasarkan fase dominannya, sistem panas bumi dibagi menjadi dua, yaitu dominasi cairan dan dominasi uap (Gould, 1974). Sistem cairan berisi air bertekanan tinggi yang dapat mendidih saat naik ke permukaan, sedangkan sistem uap didominasi uap kering akibat tekanan rendah, seperti di lapangan *The Geysers*, Amerika Serikat.

Menurut Suharno (2010), terdapat empat elemen utama penyusun sistem panas bumi, yaitu sumber panas, *reservoir*, lapisan penudung, serta fluida panas bumi, seperti yang digambarkan pada Gambar 5. Sumber panas biasanya berupa intrusi magma atau batuan beku muda bersuhu tinggi yang menjadi penggerak utama sistem. Batuan *reservoir* berfungsi menyimpan serta menyalurkan fluida panas bumi, sedangkan lapisan penudung yang bersifat kedap menghambat keluarnya fluida panas ke permukaan, sehingga tekanan dan panas tetap terperangkap di dalam sistem (Arintalofa dkk., 2020). Fluida panas bumi sendiri merupakan campuran air dan uap dengan kandungan mineral serta gas terlarut yang menjadi media pengangkut panas dari sumber menuju *reservoir* (Haty dkk., 2021).

Berikut merupakan 5 komponen dari sistem panasbumi menurut Suharno (2013).

1. Sumber panas (*heat source*), dihasilkan oleh batuan plutonik yang menjadi sumber energi panas.
2. Batuan berporos (*reservoir*), batuan yang memiliki pori - pori berfungsi sebagai tempat penampungan air panas atau fluida.
3. Lapisan penudung (*cap rock*), biasanya berupa batuan lempung yang memiliki lapisan yang kedap air (*impermeable*)
4. Struktur geologi, seperti patahan, pelipatan, rekahan dan ketidakselarasan berperan sebagai saluran bagi pergerakan air yang dapat dilalui (*permeable*)

5. Daerah resapan (*recharge area*) serta siklus hidrogeologi berperan penting dalam memastikan suplai air yang memadai untuk pengisian *reservoir* di bawah permukaan.

Menurut Suharno (2013), adanya sistem panas bumi dibawah ini permukaan dapat ditandai dengan adanya manifestasi di permukaan. Berikut ini merupakan manifestasi yang ada dipermukaan.

1. Fumarol dan solfatara

Fumarol merupakan aktivitas gunungapi berupa keluarnya gas-gas tempat dari gas-gas itu berupa asap yang keluar dari lubang. Fumarol terdapat pada rekahan - rekahan dipermukaan tanah yang berada disekitar gunungapi. Sedangkan solfatara ditemukan pada fumarol yang melepaskan gas – gas blerang seperti SO_2 , H_2S , dan Sulfur (S) kerap berkaitan dengan terbentuknya endapan sekitarnya.

2. Mata air panas

Mata air panas merupakan air yang keluar ke permukaan melalui rekahan batuan atau zona patahan. Air ini berasal dari air tanah yang meresap ke bawah, kemudian dipanaskan akibat kontak dengan sumber panas seperti magma. Jika akumulasinya cukup besar, air panas tersebut dapat membentuk kolam air panas.

3. Lumpur Panas

Lumpur panas memiliki konsistensi kental karena mengandung uap panas dengan kadar CO_2 . Keberadaannya dalam fase fluida terjadi akibat kondensasi uap panas. Gelembung-gelembung yang muncul pada lumpur tersebut merupakan hasil pelepasan gas CO_2 .

4. Uap Tanah

Air panas dengan suhu yang hampir mencapai titik didihnya akan terjadi penguapan diatas permukaan air dan berasal dari lapisan yang dekat dengan permukaan disebut dengan uap panas.

5. Geysir

Geysir merupakan gejala alam ketika air tanah menyembur ke permukaan sebagai kolom air panas dan uap. Fenomena ini terjadi akibat tekanan uap di bawah permukaan yang mendorong air dalam rekahan atau saluran ke atas. Semakin besar tekanan uap, semakin tinggi semburan yang dihasilkan, seiring dengan bertambahnya akumulasi air dalam saluran tersebut

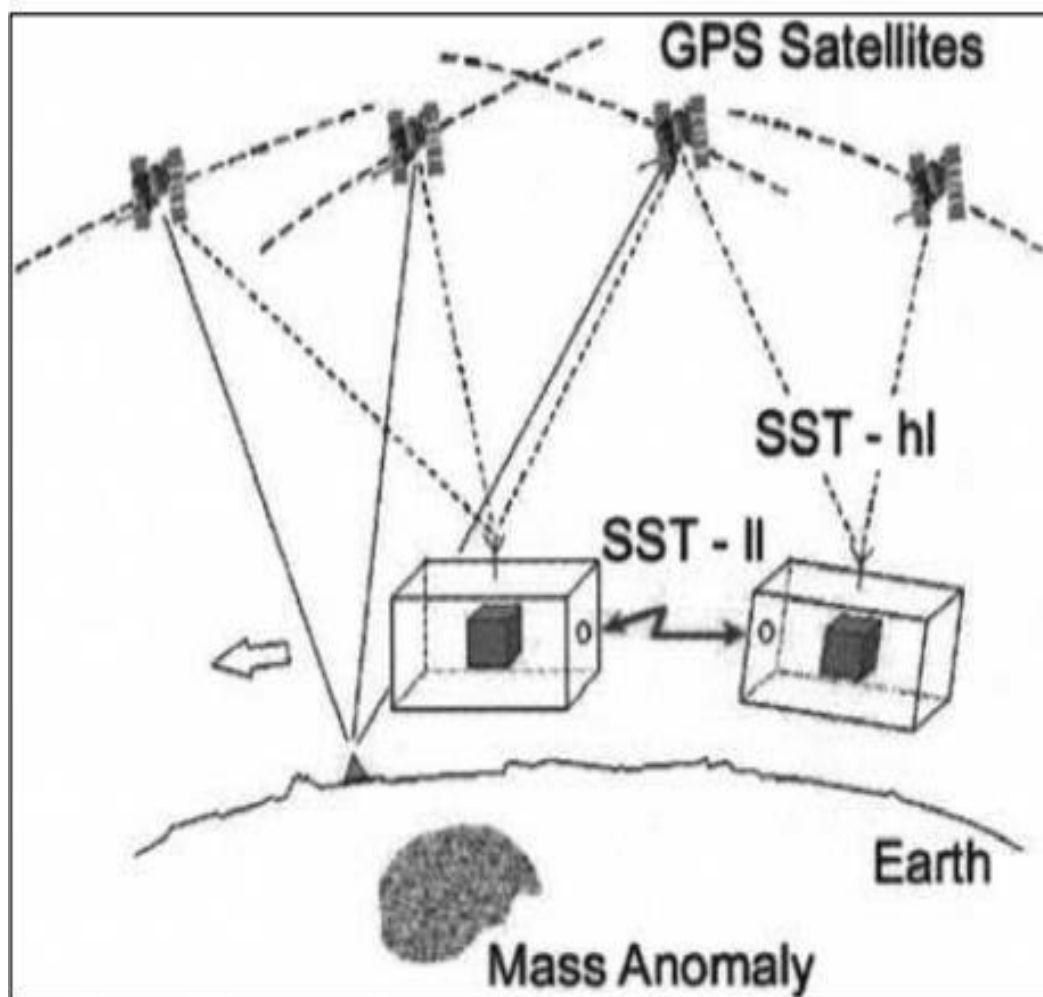
6. Kawah

Kawah adalah cekungan di puncak gunung api yang menjadi tempat keluarnya tefra, lava, dan gas vulkanik. Bentuknya menyerupai corong yang terbuka ke atas. Pembentukannya dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH, serta durasi interaksi antara fluida dan batuan.

3.3 Data Global Gravity Model Plus (GGMPlus)

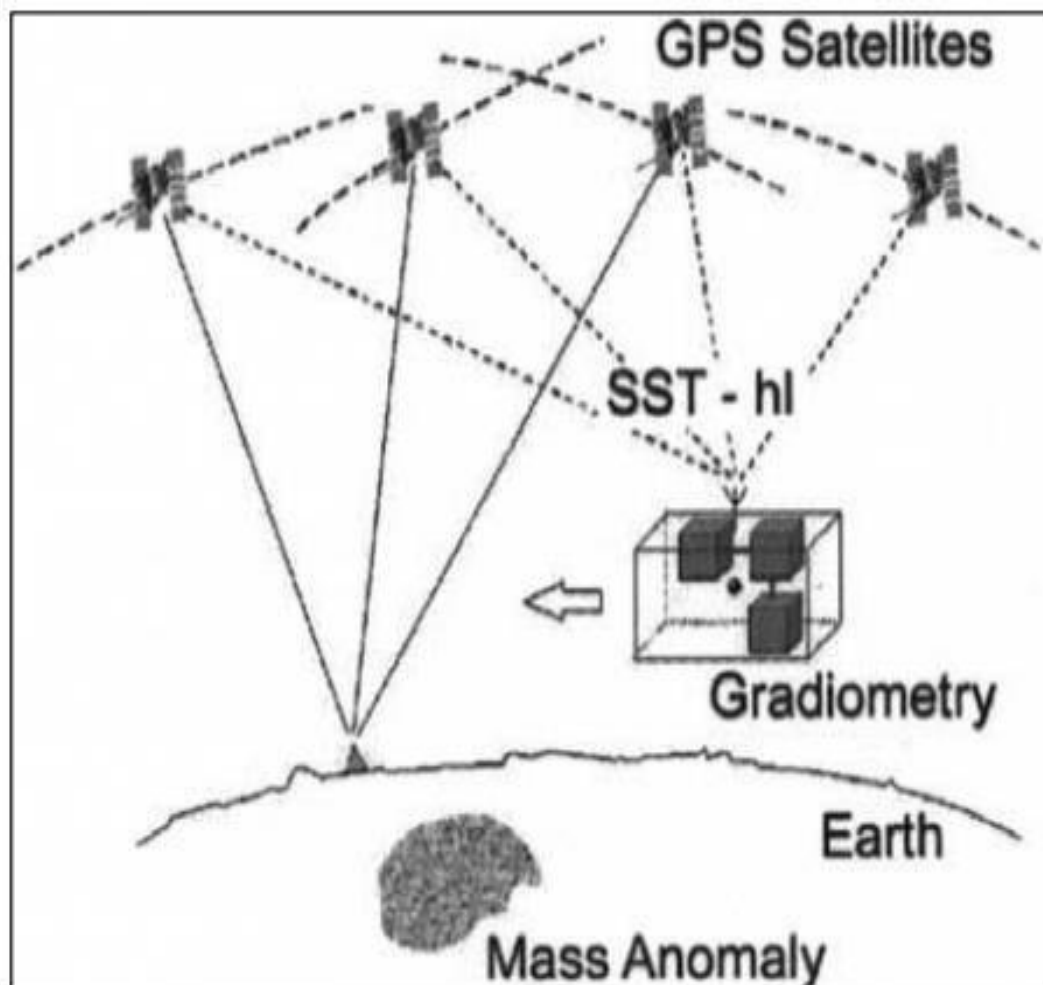
GGMPlus merupakan data berbasis satelit yang digunakan dalam pemodelan medan gayaberat, pengembangannya dilakukan dengan memanfaatkan kombinasi data topografi, model EGM2008, serta data satelit GRACE (ITG2010) dan GOCE (TIM-4). Lima jenis informasi medan gayaberat yang tersedia meliputi percepatan gayaberat, anomali gayaberat, defleksi vertikal arah utara – selatan, defleksi arah timur–barat, serta tinggi kuasigeoid. Integrasi data dari satelit GRACE dan GOCE dengan model EGM2008 menjadi dasar pengembangan GGMPlus. Proses yang dilakukan meliputi sintesis harmonik bola medan gayaberat, pemodelan maju dan perhitungan gayaberat normal di permukaan yang digabungkan untuk menghasilkan model gayaberat beresolusi tinggi (Suprianto dkk., 2021).

Dari data gayaberat satelit yang lain GGMPlus menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam hal kepadatan data dan resolusi spasial, seperti BGI dan *Topex*. Jarak antar titik gayaberat sekitar 200 meter, sehingga data GGMPlus tingkat detail yang jauh lebih tinggi memungkinkan pemetaan yang lebih akurat dan komprehensif dari medan gayaberat bumi (Hirt dkk., 2013).



Gambar 7. Ilustrasi cara kerja satelit Grace (Johannesson dkk., 2003)

Cara kerja satelit GRACE seperti Gambar 7 adalah dengan mendeteksi variasi medan gravitasi melalui pemantauan perubahan jarak antar satelit yang bergerak berpasangan di orbit. Satelit GRACE bekerja menggunakan dua satelit identik yang terhubung dan bergerak pada orbit yang sama dengan jarak sekitar 220 meter. Dalam pengukuran percepatan gravitasi, satelit yang berada di posisi depan akan lebih dulu merasakan pengaruh gravitasi yang lebih kuat ketika melintasi daerah anomali. Akibatnya, perubahan gaya tarik ini menyebabkan jarak antara kedua satelit menjadi sedikit lebih besar (Bettadpur dkk., 2016).



Gambar 8. Ilustrasi cara kerja satelit GOCE (Johannessen dkk., 2003)

Gambar 8 menunjukkan pengukuran percepatan gayaberat menggunakan gradiometer pada satelit GOCE. Gradiometer ini terdiri dari tiga pasang akselerometer identik yang dipasang pada tiga lengan saling tegak lurus. Susunan tersebut memungkinkan pengukuran simultan enam komponen medan gayaberat yang saling melengkapi namun tetap independen. Sinyal yang diukur di dalam wahana antariksa berupa perbedaan percepatan gayaberat, yang mencerminkan variasi gaya tarik akibat ketidakseragaman medan gayaberat. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti zona subduksi, lembah, pegunungan, serta ketidakhomogenan mantel bumi dan struktur geologi lainnya (Dinkwater dkk., 2003).

3.4 Metode Gayaberat

Metode geofisika yang memanfaatkan pengukuran variasi medan gayaberat disebut metode gayaberat. Variasi gayaberat di permukaan bumi disebabkan oleh perbedaan jarak dari pusat Bumi ke permukaan, variasi densitas batuan di bawah permukaan, perbedaan topografi, serta keberagaman jenis batuan (Sarkowi, 2014). Menurut Hidayat (2011), keberadaan massa batuan yang lebih besar atau lebih kecil dibandingkan material di sekitarnya menunjukkan adanya heterogenitas massa di bawah permukaan. Selain itu, perubahan topografi dan rotasi bumi juga turut memengaruhi nilai gayaberat. Oleh karena itu, sebelum data gayaberat diinterpretasikan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan, perlu dilakukan proses reduksi terlebih dahulu.

3.5 Konsep Dasar Gayaberat

3.5.1 Hukum Newton

Menurut Jacobs dkk. (1974), teori metode gayaberat didasarkan pada Hukum Gayaberat Newton. Hukum ini menyatakan bahwa dua benda saling tarik-menarik dengan besar gaya yang sebanding dengan hasil kali massa keduanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat massanya (Nurcahyati, 2016). Untuk dua benda bermassa m_1 dan m_2 yang terpisah pada jarak R seperti pada Gambar 9, gayaberat yang terjadi dapat dinyatakan dalam Persamaan (1).

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (1)$$

Keterangan :

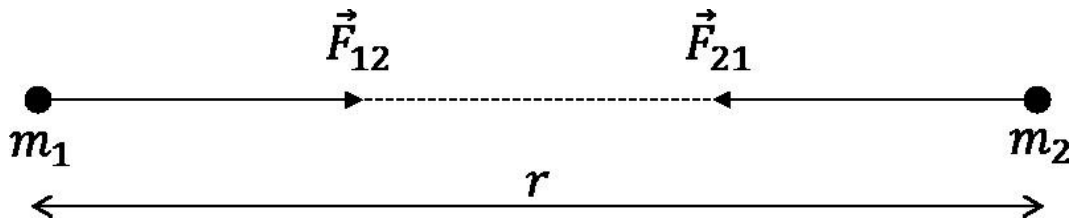
\vec{F} : gaya tarik-menarik antara dua benda (N)

G : konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

m_1, m_2 : massa masing-masing benda (kg)

R : jarak antara kedua benda (m)

\hat{r} : vektor satuan (m)



Gambar 9. Gaya tarik menarik antar dua benda (Grandis, 2009)

Hukum Newton kedua menyatakan bahwa gaya yang bekerja pada suatu benda bermassa m dapat dirumuskan pada Persamaan (2), dengan percepatan gayaberat dilambangkan sebagai g .

$$\vec{F} = m \vec{g} \quad (2)$$

Keterangan :

\vec{F} : gaya berat (N)

m : massa benda (kg)

\vec{g} : percepatan gravitasi (m/s^2)

Persamaan (3) adalah substitusi Persamaan (1) ke dalam Persamaan (2).

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (3)$$

Percepatan yang dialami oleh objek bermassa m_2 sebagai respons terhadap tarikan gayaberat dari objek bermassa m_1 pada jarak r dapat diuraikan secara ringkas menggunakan Persamaan (4).

$$g = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1}{m} \vec{F} = \frac{1}{m} \left(G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \right) \quad (4)$$

Substitusi Persamaan (3) dengan Persamaan (4) dimana massa suatu benda sama dengan hasil kali massa jenis / rapat massa dengan volume, sehingga kita bisa mendapatkan persamaan rapat massa atau densitas.

$$\vec{g} = G \frac{M}{r^2} \hat{r} \quad (5)$$

Upaya pertama untuk mengukur besaran percepatan gayaberat di bumi dilakukan oleh Galileo, kemudian didenifisikan pada Persamaan (6)

$$1 \text{ Gal} = 1 \frac{cm}{s^2} = 10^{-2} m/s^2 \text{ (dalam c.g.s)} \quad (6)$$

Untuk pengukuran yang lebih sensitif, percepatan gayaberat biasanya dinyatakan dalam miligal (mGal), seperti ditunjukkan pada Persamaan (7) dan (8), karena perubahan yang terdeteksi oleh alat ukur sangat kecil.

$$1\mu Gal = 10^{-3} mGal = 10^{-6} Gal = 10^{-8} m/s^2 \quad (7)$$

$$1 mGal = 10 g.u = 10^{-5} m/s^2 \quad (8)$$

Dalam sistem MKS, gayaberat dapat diukur dalam $g.u$ atau $\mu m/s^2$ (Octonovrilna dan Pudja, 2009)

3.5.2 Potensial Gayaberat

Jika usaha yang dibutuhkan untuk memindahkan sebuah partikel dalam medan gayaberat bergantung di posisi awal dan di posisi akhirnya saja tanpa memperhatikan jalur yang dilalui, maka medan gaya tersebut dikatakan konservatif. Vektor gayaberat yang arahnya sejajar dengan garis penghubung pusat dua massa disebut sebagai medan vektor (Sota, 2011). Gambar 10 menunjukkan suatu massa tiga dimensi dengan bentuk sembarang, di mana rapat massa $\Delta\rho = (\alpha, \beta, \gamma)$ terdistribusi secara kontinu. Dari kondisi tersebut, potensial gayaberat dapat ditentukan pada titik P (x, y, z)

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (9)$$

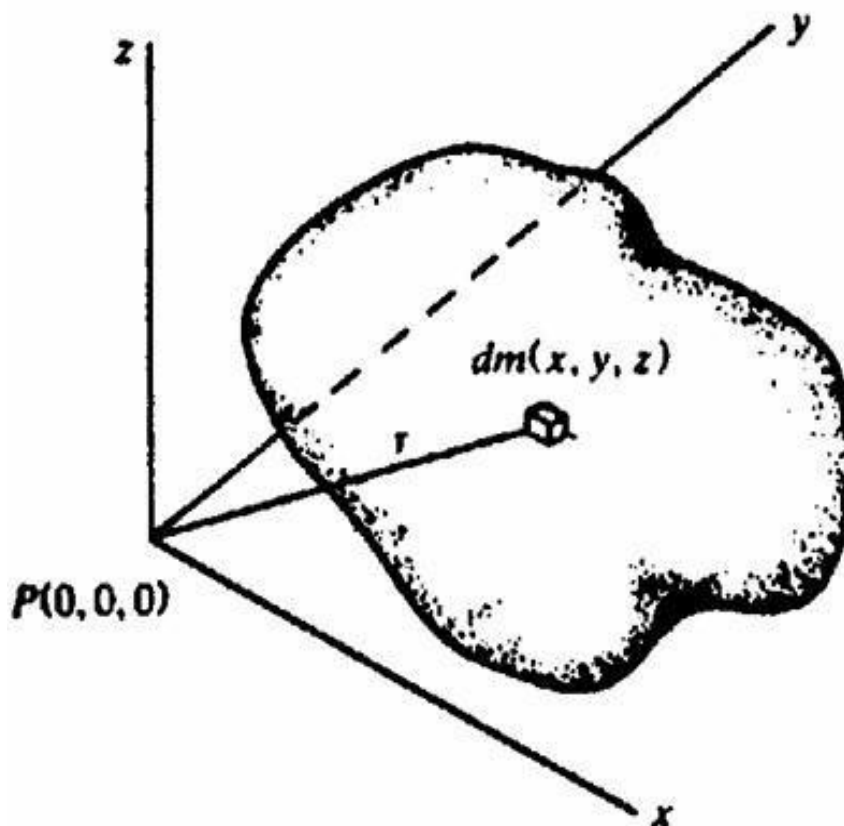
Dari distribusi rapat massa, maka medan gayaberat diperoleh diferensial pada Persamaan 7 terhadap x , y , dan z .

$$\Delta g_x(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x-\alpha)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (10)$$

$$\Delta g_y(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(y-\beta)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (11)$$

$$\Delta g_z(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (12)$$

Nilai variasi medan gayaberat Δg di permukaan bumi diperoleh melalui Persamaan (10), (11), dan (12). Batas - batas integral pada persamaan tersebut merepresentasikan bentuk sebenarnya dari permukaan bumi, sedangkan fungsi densitas (ρ) menunjukkan pengaruh medan gayaberat akibat distribusi massa di bawah permukaan (Sarkowi, 2007).



Gambar 10. Potensi dan kuat arus medan massa 3 dimensi (Telford, 1990)

3.6 Rapat Massa Batuan

Dalam perhitungan percepatan gayaberat, salah satu parameter penting yang digunakan adalah densitas atau rapat massa batuan. Densitas merupakan parameter fisik yang menggambarkan kondisi material batuan (Sucipto, 2014). Densitas dapat diartikan sebagai tingkat kerapatan ikatan antar material penyusun batuan. Nilainya dipengaruhi oleh jenis dan jumlah mineral penyusun, komposisi mineral, porositas batuan, serta fluida yang mengisi ruang pori di dalam batuan. Porositas sendiri merupakan perbandingan antara volume rongga pori terhadap volume total batuan yang dinyatakan dalam persen (Ridha dkk., 2016). Tabel 1 menunjukkan variasi nilai densitas pada berbagai jenis batuan.

Tabel 1. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Batas (g/cc)	rata-rata (g/cc)
Batuan Sedimen		
Aluvium	1,96-2,00	1,98
<i>Clay</i>	1,63-2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	2,00
<i>Loess</i>	1,40-1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80-2,20	1,93
<i>Soil</i>	1,20-2,40	1,92
<i>Sand</i>	1,70-2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61-2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77-3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93-2,90	2,55
Dolomit	2,28-2,90	2,70
<i>Chalk</i>	1,53-2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10-2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88-0,92	0,90
Batuan Beku		
Riolit	2,35-2,70	2,52
Granit	2,50-2,81	2,64
Andesit	2,40-2,80	2,61
Syenite	2,60-2,95	2,77
Basalt	2,70-3,30	2,99
Gabro	2,70-3,50	3,03
Batuan Metamorf		
Schist	2,39-2,90	2,64
Gneiss	2,59-3,00	2,80
<i>Slate</i>	2,70-2,90	2,79
<i>Granulite</i>	2,52-2,70	2,65
<i>Amphibiolite</i>	2,90-3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20-3,54	3,37

3.7 Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat

Pengolahan data gayaberat memerlukan berbagai tahapan koreksi untuk meminimalkan *noise* yang muncul akibat proses pengukuran maupun faktor alami. Beberapa koreksi yang umum dilakukan dalam metode gayaberat antara lain:

3.7.1 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas adalah penyesuaian nilai gayaberat akibat perbedaan ketinggian pengukuran dari permukaan laut rata - rata, yang menyebabkan nilai gayaberat terukur lebih kecil. Koreksi ini digunakan untuk mendapatkan nilai gayaberat absolut di titik observasi (Syamsuriadi, 2013) dan dihitung menggunakan Persamaan (13) (Brotopuspito, 2001).

$$FAC = 0,3086 h \quad (13)$$

Keterangan :

FAC : koreksi udara bebas (*Free Air Correction*)

h : ketinggian (m)

Anomali udara bebas atau *Free Air Anomaly* (FAA) diperoleh dari persamaan (14)

$$FAA = g_{obs} - g_{\phi} + 0,3086 h \quad (14)$$

Keterangan :

FAA : anomali udara bebas (*Free Air Anomaly*)

g_{obs} : Gravitasi Observasi

3.7.2 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer merupakan penyesuaian yang dilakukan untuk menghilangkan pengaruh massa batuan yang berada di antara bidang acuan dan titik pengukuran. Besarnya koreksi ini dihitung menggunakan Persamaan (15) (Brotopuspito, 2001).

$$BC = 2\pi G\rho h \quad (15)$$

Nilai dari $2\pi G$ adalah 0,04191 sehingga nilai koreksi Bouguer ini diperoleh dari Persamaan (16)

$$BC = 0,04191\rho h \quad (16)$$

Keterangan :

BC : koreksi Bouguer (mGal/m)

G : konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$)

ρ : densitas rata-rata batuan ($2,67 \text{ g/cm}^3$)

h : ketinggian (m)

3.7.3 Koreksi Medan (Terrain Correction)

Koreksi medan dilakukan untuk menghilangkan pengaruh variasi topografi yang tidak beraturan pada saat pengukuran, seperti adanya bukit dan lembah, yang dapat memengaruhi nilai gayaberat terukur. Pada daerah berbukit, nilai koreksi biasanya ditambahkan karena kondisi tersebut dapat menurunkan nilai percepatan gayaberat (Dobrin, 1960). Koreksi ini diperlukan karena dalam koreksi Bouguer diasumsikan permukaan pengukuran datar, sedangkan kondisi lapangan umumnya tidak demikian. Oleh karena itu, koreksi medan digunakan untuk memperbaiki pengaruh distribusi massa di sekitar titik pengukuran agar hasil lebih akurat (Susilawati, 2005). Jika kondisi topografi relatif datar, koreksi ini tidak diperlukan. Perhitungannya dilakukan menggunakan Persamaan (17).

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \left\{ (r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \right\} \quad (17)$$

Keterangan :

g : respon gayaberat (mGal)

n : jumlah kompartemen tiap zona

ρ : densitas (g/cc)

r_1 : jari-jari radius bagian dalam (m)

r_2 : jari – jari radius bagian luar (m)

L : selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

3.7.4 Anomali Bouguer

Anomali Bouguer diperoleh berbagai faktor, yaitu koreksi *drift*, pasang surut, lintang, udara bebas, Bouguer, dan medan. Nilai anomali ini mencerminkan variasi densitas secara lateral di bawah permukaan. Anomali Bouguer positif menunjukkan adanya material berdensitas tinggi dalam medium yang lebih rendah, sedangkan anomali negatif menunjukkan material berdensitas rendah dalam medium yang lebih tinggi (Reynolds, 1997).

Menurut Hinze (2013), anomali Bouguer merupakan selisih antara gayaberat teoritis dan gayaberat hasil penelitian pada suatu titik. Setelah diperoleh *Free Air Anomaly* (FAA), langkah selanjutnya adalah menghitung *Simple Bouguer Anomaly* (SBA), yang kemudian dilanjutkan hingga diperoleh *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) sesuai Persamaan (18). Nilai anomali yang dihasilkan merepresentasikan kondisi pada ketinggian titik pengamatan.

$$BA = g_{\text{obs}} - g_{\varphi} + FAC + BC + TC \quad (18)$$

Keterangan :

BA : anomali Bouguer (mGal)

g_{obs} : nilai gayaberat hasil pengukuran pada titik tersebut (mGal)

g_{φ} : gayaberat teoritis (mGal)

FAC : koreksi udara bebas (mGal)

BC : koreksi Bouguer (mGal)

TC : koreksi medan (mGal)

3.8 Densitas Bawah Permukaan Rata-Rata

Densitas batuan merupakan parameter fisik penting dalam metode gayaberat, terutama untuk perhitungan anomali Bouguer yang membutuhkan nilai densitas rata - rata daerah penelitian secara akurat. Penentuan densitas rata - rata dapat dilakukan dengan metode Parasnisi atau Nettleton. Metode Parasnisi digunakan dengan asumsi bahwa topografi relatif datar, sehingga kurang efektif ji-

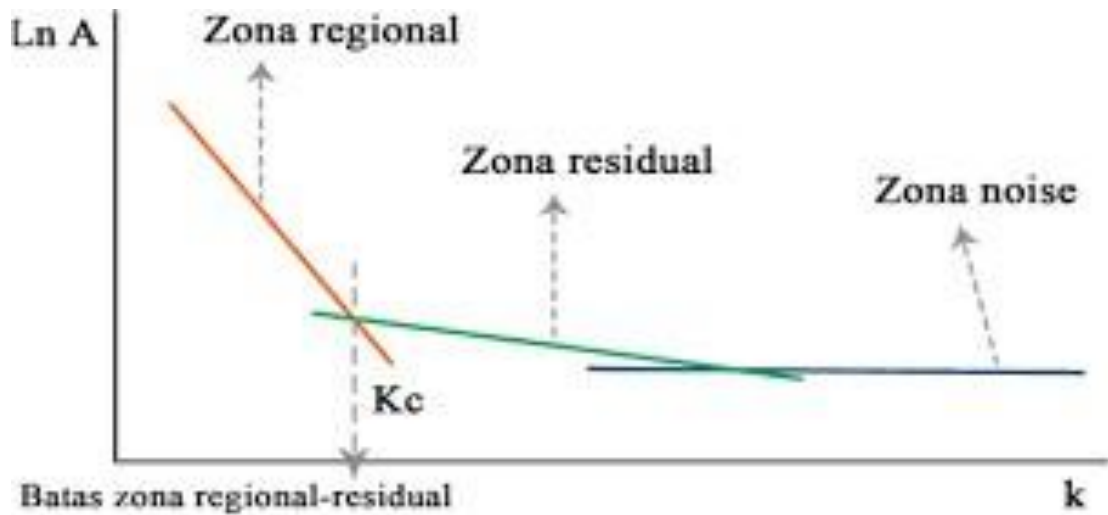
ka digunakan pada daerah dengan variasi elevasi kecil atau sebaran titik pengukuran yang tidak merata, karena hasil regresi sangat dipengaruhi oleh titik dengan elevasi yang lebih bervariasi (Kadir, 2000). Dalam metode ini, nilai $(BC/\rho - TC/\rho)$ diplot pada sumbu x terhadap FAA pada sumbu y . Dari hubungan tersebut dibuat garis regresi linear untuk memperoleh gradien, yang kemudian digunakan untuk menentukan densitas rata - rata batuan di daerah penelitian.

Metode Nettleton dilakukan dengan cara membuat grafik anomali Bouguer menggunakan beberapa nilai densitas, kemudian membandingkannya dengan profil topografi pada lintasan yang sama. Nilai densitas yang menghasilkan kesesuaian terbaik, yaitu variasi paling kecil terhadap profil topografi, dianggap sebagai densitas rata - rata daerah tersebut. Secara kuantitatif, estimasi densitas permukaan yang paling tepat dapat ditentukan melalui korelasi silang antara perubahan elevasi terhadap suatu referensi dengan nilai anomali gayaberatnya (Martha, 2017).

3.9 Analisis Spektrum

Analisis spektrum adalah proses mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier. Dengan cara ini, sinyal dapat direpresentasikan sebagai kombinasi beberapa gelombang *sinusoidal* dengan frekuensi yang berbeda. Hasil transformasi tersebut berupa spektrum amplitudo dan fase yang kemudian digunakan untuk mengestimasi kedalaman melalui analisis bilangan gelombang (k) dan amplitudo (A).

Selanjutnya, hasil analisis ini digunakan untuk menentukan ukuran jendela (*window*) sebagai masukan dalam proses *filtering* serta untuk memisahkan anomali regional dan residual. Metode ini memanfaatkan transformasi Fourier untuk mengubah fungsi dalam domain jarak atau waktu menjadi fungsi dalam domain bilangan gelombang atau frekuensi (Hidayat, 2011). Hasil transformasi Fourier kemudian disajikan dalam bentuk grafik $\ln A$ (amplitudo) pada sumbu y terhadap bilangan gelombang (k) pada sumbu x , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kurva $\ln A$ terhadap k (Blakely, 1996)

Blakely (1996) mengembangkan spektrum pada bidang horizontal dari potensial gayaberat yang diperoleh dari penelitian medan potensial gayaberat.

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (19)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (20)$$

Keterangan :

U : Potensial gayaberat

$\Delta\rho$: Perbedaan massa jenis (gr/cc)

G : Konstanta gayaberat ($m^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

r : Jarak antar posisi (m)

Dari Persamaan (19) dan (20) maka diperoleh Persamaan (21).

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (21)$$

Dengan demikian, transformasi Fourier anomali gayaberat pada lintasan yang diinginkan dinyatakan pada Persamaan (24).

$$F(g_z) = 1G\Delta\rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \quad (22)$$

$$F(g_z) = G\Delta\rho \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (23)$$

$$F(g_z) = 2\pi G\Delta\rho e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (24)$$

Keterangan :

- g_z : anomali gayaberat (mGal)
 k : bilangan gelombang (rad/m)
 z_0 : ketinggian titik pengamatan (m)
 z : kedalaman sumber anomali (m)

$\mu = 1$ ketika masing masing nilai gayaberat distribusi densitas tidak ada korelasi atau bersifat random, maka transformasi fourier anomali gayaberat seperti pada Persamaan (25).

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (25)$$

Keterangan :

- A : amplitudo
 C : konstanta

Hubungan antara amplitudo (A), bilangan gelombang (k), dan kedalaman ($z_0 - z_1$) pada Persamaan (26) diperoleh dari hasil transformasi fourier pada Persamaan (25) yang kemudian dinyatakan dalam bentuk logaritma (Sarkowi, 2011).

$$\ln A = (z_0 - z_1) |k| + \ln C \quad (26)$$

Persamaan 23 dapat diibaratkan dengan rumus garis lurus:

$$y = mx + c \quad (27)$$

$\ln A$ diposisikan sebagai sumbu y , dan k sebagai sumbu x , dan ($z_0 - z_1$) merepresentasikan kemiringan garis (gradien). Gradien yang diperoleh dapat digunakan untuk memperkirakan kedalaman sumber anomali, baik yang berada pada lapisan dangkal maupun dalam. Nilai k pada sumbu x didenifisikan sebagai $\frac{2\pi}{\lambda}$, dengan λ merupakan panjang gelombang (*cycle / meter*). Kurva hubungan antara energi spektrum dan bilangan gelombang dimanfaatkan dalam analisis kedalaman seperti terlihat pada Gambar 11. Kedalaman rata – rata sumber anomali pun dapat dihitung berdasarkan kemiringan kurva (*slope*) melalui Persamaan (28) (Hinze dkk., 2013)

$$z(k) = \frac{|slope|}{4\pi} \quad (28)$$

Hubungan antara nilai λ dan Δx diperoleh dari Persamaan (29)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{N\Delta x} \quad (29)$$

Nilai Δx setara dengan λ Terdapat faktor tambahan, yang dikenal sebagai konstanta pengali, yang ikut menentukan nilai Δx , oleh karena itu, rumusnya menjadi $\lambda = N\Delta x$, dimana N merupakan lebar jendela, jadi lebar jendela dapat dinyatakan melalui Persamaan 30.

$$N = \frac{2\pi}{kc\Delta x} \quad (30)$$

Jarak spasial dalam transformasi Fourier dilambangkan sebagai Δx , sedangkan kc merupakan bilangan gelombang batas. Nilai k yang semakin besar mencerminkan frekuensi lebih tinggi. Hubungan bilangan gelombang k dengan frekuensi f dinyatakan sebagai $k = 2\pi f$, di mana frekuensi sangat rendah berasal dari sumber anomali regional, sementara frekuensi tinggi menunjukkan sumber anomali residual.

3.10 Filter *Moving Average*

Filter *moving average* umum digunakan dalam pemrosesan sinyal digital karena sederhana dalam penerapan dan mudah dipahami. Pada metode gayabarat, filter ini digunakan untuk memperoleh anomali regional dari hasil pengolahan anomali Bouguer (Nugraha, 2016).

Analisis kualitatif dapat dilakukan dengan memisahkan anomali regional dan anomali residual. Salah satu cara yang digunakan adalah filter *moving average*, yaitu dengan menghitung nilai rata - rata dari data anomali. Nilai rata - rata tersebut merepresentasikan anomali regional, sedangkan anomali residual diperoleh dari selisih antara anomali Bouguer dengan anomali regional. Filter *moving average* dirumuskan pada Persamaan (31).

$$\Delta g_{\text{reg}}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (31)$$

Keterangan :

Δg_{reg} : besarnya anomali regional

i : nomor stasiun

N : lebar jendela

3.11 Analisis Derivative

Gradien horizontal atau *First Horizontal Derivative* (FHD) digunakan untuk mengidentifikasi batas kontras densitas secara horizontal pada data gayaberat. Adanya turunan horizontal pada data disebabkan oleh kecenderungan gelombang yang menonjolkan bagian tepi struktur. Perubahan nilai anomali gayaberat terhadap jarak antar titik disebut sebagai turunan horizontal. Nilai FHD dihitung menggunakan Persamaan (32) (Elvarani, 2022).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2} \quad (32)$$

$$FHD = \frac{\partial \Delta g}{\partial x} \quad (33)$$

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial x} = \frac{g_{(i+1)} - g_{(i)}}{\Delta x} \quad (34)$$

$$FHD = \frac{g_{(i+1)} - g_{(i)}}{\Delta x} \quad (35)$$

Keterangan :

FHD : *First Horizontal Derivative* (mGal/m)

$\frac{\partial g}{\partial x}$: Turunan pertama terhadap arah horizontal sumbu x (mGal/m)

$\frac{\partial g}{\partial y}$: Turunan pertama terhadap arah horizontal sumbu y (mGal/m)

Δx : Selisih antara jarak pada lintasan (m)

g : Nilai anomali

Vertikal kedua (*Second vertical Derivative*) dimanfaatkan untuk menekankan pengaruh sumber anomali yang berada dekat permukaan sekaligus meminimalkan kontribusi komponen regional. Metode ini juga berguna untuk mengungkap ketidakaturan struktur bawah permukaan, khususnya dalam mendeteksi adanya sesar atau patahan di area survei (Sarkowi, 2014). SVD diperoleh melalui turunan dari persamaan *Laplace*, yang secara matematis dapat dituliskan pada Persamaan (36) dan (37) sebagai berikut

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (36)$$

atau

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (37)$$

Sehingga *Second Vertical Derivative* (SVD) dinyatakan pada Persamaan (38).

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} \right) \quad (38)$$

Berikut ini merupakan Persamaan (39) data 1 - D (data penampang).

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (39)$$

Keterangan :

- ∇^2 : Operator *laplace*
 Δg : Nilai Bouguer gayaberat total
 ∂y : nilai turunan terhadap sumbu y
 ∂x : nilai turunan terhadap sumbu x

Second Vertical Derivative (SVD) ditunjukkan oleh persamaan SVD 1 - D berdasarkan anomali gayaberat sebagai turunan orde kedua pada permukaan. Secara praktis, SVD dapat diturunkan dari hasil turunan horizontal. Dari turunan kedua ini, struktur seperti patahan atau intrusi dapat diidentifikasi melalui nilai nol yang merepresentasikan batas kontak dua lapisan batuan dengan kontras densitas (Sarkowi, 2010).

Dari analisis turunan vertikal orde dua ini dapat digunakan untuk identifikasi patahan naik dan turun, yaitu :

- Untuk patahan naik (*reverse fault*)

$$\left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \right|_{\text{maks}} < \left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \right|_{\text{min}}$$

- Untuk patahan turun (*normal fault*)

$$\left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \right|_{\text{maks}} > \left| \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \right|_{\text{min}}$$

Perhitungan nilai SVD dapat dilakukan menggunakan operator filter 2D yang umum digunakan, dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Parameter SVD (Henderson and Zietz, 1949)

Operator Filter SVD Henderson dan Zietz (1949)				
0,0000	0,0000	-0,0833	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0833	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0833

0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0833	0,0000	0,0000

Tabel 3. Parameter SVD (Elkins, 1951)

Operator Filter SVD Elkins (1951)				
0,0000	0,0033	0,0000	-0,0833	0,0000
0,0083	0,6667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
-0,0000	-0,0334	1,0668	-0,0334	0,0000
0,0083	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000

Tabel 4. Parameter SVD (Rosenbach, 1953)

Operator Filter SVD Rosenbach (1953)				
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,7500	4,0000	-0,7500	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000

3.12 Pemodelan Inversi (*Inversion Modelling*)

Pemodelan inversi merupakan kebalikan dari pemodelan ke depan, di mana parameter model ditentukan langsung dari data yang tersedia. Proses ini dilakukan dengan menyesuaikan model secara iteratif atau otomatis agar kesesuaian antara data hasil perhitungan dan data observasi menjadi semakin baik (Rahma, 2012). Menurut Grandis (2009) Secara umum, inversi adalah metode matematis dan statistik untuk menurunkan informasi tentang suatu sistem fisis berdasarkan data observasi. Sistem yang dimaksud terdiri dari fenomena yang diamati serta parameter model yang ingin ditentukan. Pemodelan inversi juga dikenal sebagai teknik untuk mengestimasi parameter bawah permukaan dari data pengukuran. Disebut juga proses pencocokan data (*data fitting*), karena bertujuan untuk menentukan parameter model yang menghasilkan respons yang sesuai dengan data hasil pengamatan.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat dan waktu penelitian adalah sebagai berikut:

Tempat : Gedung Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, serta Laboratorium Instrumentasi pada Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Alamat : Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.

Waktu : Januari 2026 – Mei 2026

4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 6. Perangkat yang digunakan dalam penelitian

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Laptop	Pengolahan data dan penyusunan laporan penelitian.
2	Mathlab	Untuk memotong daerah penelitian yang akan diteliti
3	Microsoft Excell	Digunakan untuk melakukan koreksi - koreksi gayaberat, mencari nilai densitas, analisis spektrum dan analisis <i>derivative</i>
4	<i>Software</i> Global Mapper	Digunakan untuk mendapatkan nilai topografi dan melakukan koreksi medan
5	<i>Software</i> Surfer	Digunakan untuk memetakan anomali Bouguer, memisahkan anomali Bouguer lengkap menjadi anomali regional dan residual, serta melakukan analisis SVD.
6	<i>Software</i> Oasis Montaj	Digunakan untuk melakukan koreksi medan
7	<i>Software</i> Numeri	Digunakan untuk mendapatkan nilai k dan Ln A dalam analisis spektrum

Tabel 7. Data penelitian

No	Data	Fungsi
1	Data GGMPlus 2013	Data pengolahan yang digunakan, di unduh pada website :https://murraylab.caltech.edu/GGMplus/index.ml
2	Softfile geologi lembar	Referensi geologi daerah penelitian,

3	Data DEM dan Referensi peta lokasi penelitian dan data SRTM Maluku Tengah	ketinggian diperoleh melalui unduhan dari situs https://www.indonesia-geospasial.com/2020/01/download-dem-srtm-30-meter-se-indonesia.html
---	---	---

4.3 Prosedur Penelitian

Tahapan prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

4.3.1 Pengambilan Data

Data diperoleh dari website GGMPlus pada tahun 2013. Data penelitian diperoleh dari situs GGMplus tahun 2013 dengan spasi data GGMplus nya 250 meter dengan luas daerah penelitiannya $10 \times 10 \text{ km}^2$. Data yang diperoleh dari GGMPlus berupa nilai Gayaberat Observasi (*Gobs*) beserta koordinat lintang dan bujur tiap titik data. Namun, sebelum data tersebut diolah lebih lanjut, perlu ditentukan nilai ketinggian (*elevasi*) daerah penelitian. Nilai elevasi ini diperoleh menggunakan data DEM SRTM, yang nantinya digunakan dalam proses koreksi dan pengolahan data gayaberat.

Selanjutnya dilakukan berbagai koreksi data gayaberat, meliputi koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, koreksi medan (*terrain*), serta perhitungan anomali Bouguer lengkap. Nilai koreksi medan diperoleh dengan bantuan perangkat lunak Global Mapper dan Oasis Montaj.

4.3.2 Nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL)

Anomali Bouguer Lengkap (ABL) diperoleh dari rangkaian koreksi data gayaberat yang meliputi koreksi lintang, udara bebas, Bouguer, serta koreksi topografi (*terrain*). Nilai ABL dihitung dengan menambahkan Anomali Bouguer Sederhana dengan hasil koreksi medan yang telah diperoleh sebelumnya. Setelah nilai ABL didapatkan, tahap selanjutnya adalah melakukan *gridding*, berdasarkan nilai Anomali Bouguer Lengkap ke dalam *software* Surfer 23 untuk mendapatkan model kontur anomali Bouguer daerah penelitian.

4.3.3 Analisis Spektrum

Analisis spektrum dilakukan dengan menggunakan transformasi Fourier untuk mengubah data dari domain spasial (jarak) ke domain frekuensi dengan bantuan *software* Numeri. Perhitungan lanjutan dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* untuk memperoleh nilai bilangan gelombang (K) dan $\ln A$. Tujuan analisis ini adalah untuk memperkirakan lebar jendela pada metode *moving average* serta mengestimasi kedalaman sumber anomali. Frekuensi rendah (panjang gelombang besar) merepresentasikan struktur geologi regional yang lebih dalam dan luas, sedangkan frekuensi tinggi (panjang gelombang pendek) menunjukkan struktur dangkal yang lebih kecil. Sementara itu, frekuensi sangat tinggi umumnya berkaitan dengan *noise* dari berbagai faktor eksternal.

4.3.4 Pemisahan Regional dan Residual

Pemisahan anomali regional dan residual pada penelitian ini dilakukan menggunakan filter *moving average*. Filter ini berfungsi sebagai *low - pass* filter yang menonjolkan komponen frekuensi rendah sekaligus meredam komponen frekuensi tinggi. Hasil proses tersebut menghasilkan sinyal frekuensi rendah yang merepresentasikan anomali regional. Selanjutnya, anomali residual diperoleh dari selisih antara anomali bouguer lengkap dengan anomali regional. Dalam penelitian ini, analisis struktur bawah permukaan difokuskan pada anomali residual sebagai representasi anomali dangkal.

4.3.5 Analisis Derivative

Analisis *derivative* dilakukan untuk mengidentifikasi struktur dangkal bawah permukaan melalui *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Peta SVD dibuat menggunakan *software* Surfer dengan input data anomali residual, kemudian dilakukan penurunan turunan kedua terhadap arah x dan y sehingga diperoleh SVD hasil kombinasi SVD x dan SVD y . Untuk mendapatkan indikasi struktur patahan pada SVD dengan melihat titik 0. Kemudian dari peta residual di Lakukan *slice* untuk mendapatkan kurva

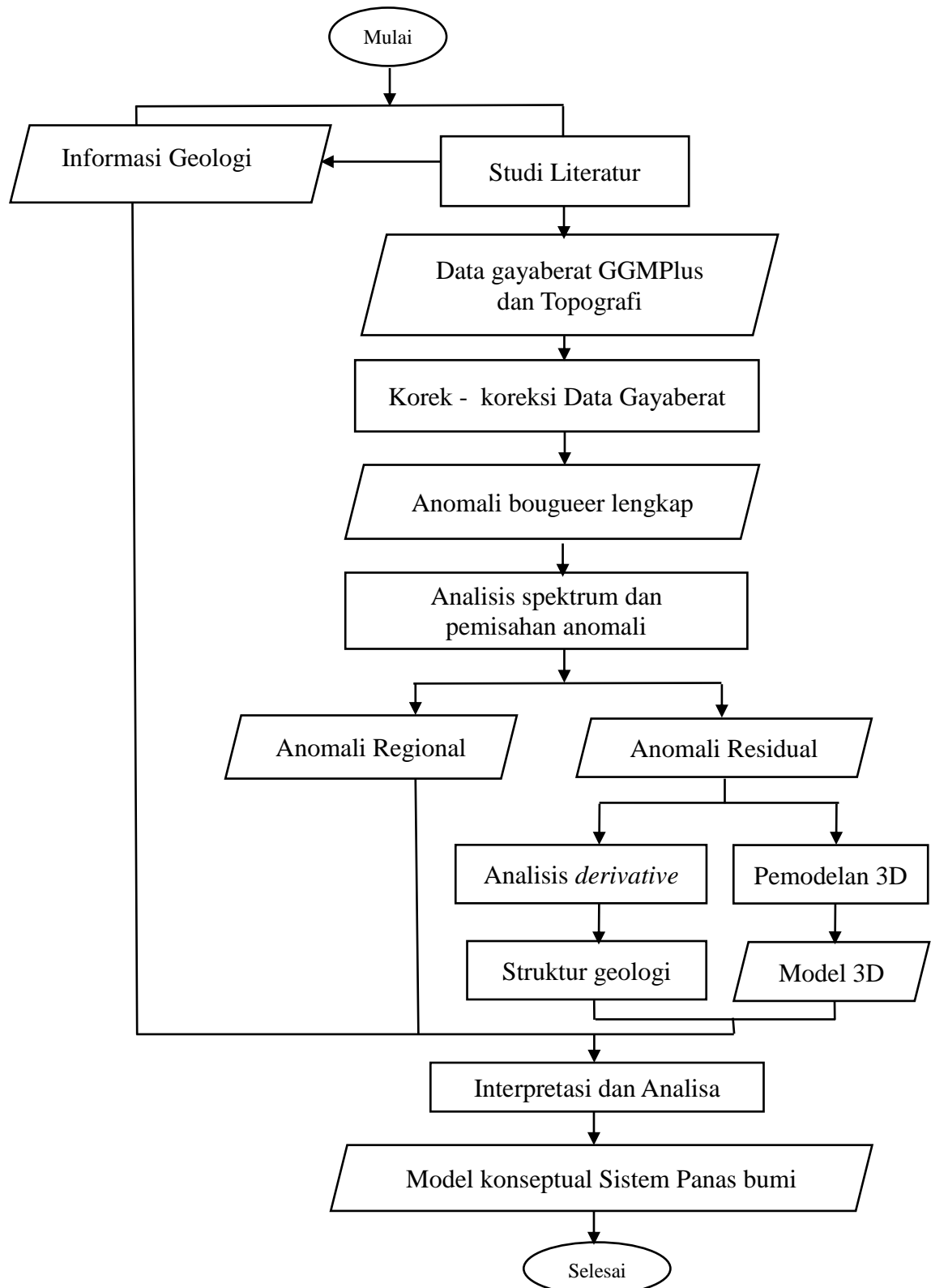
residual yang diduga daerah *reservoir*. Setelah itu dari data *slice* residual dilakukan penurunan *gradient horizontal* orde satu dan dua anomali residual. Dari kurva SVD dilakukan penarikan garis pada titik 0, sedangkan dari kurva FHD dilakukan penarikan garis dari puncak minimum dan maksimum. Garis yang diperoleh dari SVD dan FHD bersesuaian dengan literatur struktur dari peta geologi penelitian, sehingga didapat indikasi dari struktur patahan daerah penelitian. Dari kurva SVD juga dapat menentukan jenis struktur patahan, yaitu sesar naik, sesar turun dan sesar geser.

4.3.6 Model Bawah Permukaan

Penelitian ini menggunakan pemodelan 3D *Inverse modeling*. *Software* yang digunakan adalah Grav3D yang mencakup tiga program terintegrasi, yaitu gm DataViewer, MeshTools3D dan Grav3D gui. Model 3D pada penelitian ini dibuat dari nilai residual dan topografi daerah penelitian. Pemodelan dilakukan dengan pembuatan *mesh* yang dibuat untuk menggambarkan kondisi yang mirip dengan bawah permukaan dari persebaran nilai densitas batuan dan kedalaman pada daerah penelitian. Model 3D yang didapat dilakukan *slice* yang sama dengan analisis *derivative*, sehingga dapat menentukan zona *reservoir* dan *caprock* daerah panas bumi

4.4 Diagram Alir

Diagram alir yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 12. Diagram alir penelitian.

VI. KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil dan pembahasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis *derivative* dalam penelitian ini menggunakan metode First Horizontal Derivative (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Berdasarkan hasil analisis pada tiga lintasan di wilayah penelitian, teridentifikasi sebanyak 10 struktur yang diduga sebagai patahan, yang terdiri dari 4 patahan naik dan 6 patahan turun.
2. Berdasarkan hasil pemodelan 3D distribusi densitas hingga kedalaman 3100 m, diperoleh gambaran kondisi geologi bawah permukaan. Zona *caprock* memiliki densitas sedang sekitar 2,6 – 2,8 g/cc, yang diinterpretasikan sebagai batupasir yang telah teralterasi menjadi batu lempung pada kedalaman sekitar 700 – 800 m, sehingga bersifat *impermeabel*. Selanjutnya, zona dengan densitas rendah sekitar 1,9 – 2,6 g/cc pada kedalaman 800 – 2000 m diinterpretasikan sebagai *reservoir* yang memiliki porositas dan *permeabilitas* baik sebagai tempat akumulasi fluida panas. Sementara itu, zona densitas tinggi sekitar 2,8 – 2,9 g/cc pada kedalaman 2000 – 3000 m diinterpretasikan sebagai *heat source* yang berkaitan dengan keberadaan batuan beku intrusif seperti gabro.
3. Berdasarkan hasil model sistem panas bumi daerah penelitian dapat digambarkan sebagai sistem yang tersusun atas lapisan *caprock* dibagian atas, *reservoir* pada kedalaman menengah dan *heatsource* pada bagian lebih dalam. Selain itu, struktur patahan yang teridentifikasi berperan sebagai jalur utama migrasi fluida panas dari zona *heatsource* menuju *reservoir* sampai ke permukaan melalui patahan atau rekahan.

6.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah perlunya penelitian lanjutan mengenai sistem panas bumi di daerah Banda Baru dengan menggunakan metode Magnetotellurik atau data geofisika lainnya. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan model konseptual sistem panas bumi Banda Baru yang lebih lengkap dan lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Arintalofa, V., Yulianto, G., & Harmoko, U. (2020). Analisa mikrotremor menggunakan metode HVSR untuk mengetahui karakteristik bawah permukaan manifestasi Panas bumi Diwak & derekan berdasarkan nilai Vp. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(2), 54-61. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9276>
- Bettadpur, S., Tapley, B., & Save, H. (2016). High resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal Geophysics*, 121(10).
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Buijze, L., Van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B. B. T., Van Wees, J. D., Van Yperen, G. C. N., Ter Heege, J. H., & Jaarsma, B. (2019). Review of Induced Seismicity in Geothermal Systems Worldwide and Implications for Geothermal Systems in The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 98. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.6>
- Brotopuspito, K. S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada.
- Dinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., & Popescu, A. (2003). Earth Gravity Field from Space – from Sensors to Earth Sciences. *Space Sciences Series*, 18, 419–433.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Geothermal Energy Utilization and Technology*
- Dobrin, M. B. (1960). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Mc-Graw-Hill Book Company Inc.

- Elkins, T. A. (1951). The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, 16(1), 29-50.
- Elvarani, A.Y. (2022). Identifikasi Daerah Prospek Reservoir Panasbumi Pada Daerah Lapangan Panasbumi Malingping - Lebak Banten Berdasarkan Analisis Data Gayaberat. *Skripsi*. Prodi Teknik Geofisika, FT, Universitas Lampung.
- Fadhlan, M., and Intan, S., 2011. Eksplorasi Geoarkeologi Gua-Gua Karst Amahai, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Arkeologi Nasional*, Vol. 19 (1), 27-42.
- Gould, T. L. (1974). Vertical two-phase steam-water flow in geothermal wells. *Journal of Petroleum Technology*, 26(08), 833-842. <https://doi.org/10.2118/4961-PA>
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Haty, I. P., Yudiantoro, D. F., Choiriah, S.U., & Magdalena, P. E. (2021). *Geologi & Potensi Panas bumi di Kompleks Vulkanik Dieng*. Buku. Lembaga Penelitian & Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
- Henderson, R. G., & Zietz, I. (1949). The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. *Geophysics*, 14(4), 508–516.
- Hidayat, F. (2011). Penyelidikan Gayaberat untuk Pemetaan Struktur Bawah Permukaan Di Daerah Karanganyar Bagian Barat. *Skripsi*. FMIPA Universitas Sebelas Maret.
- Hidayat, F. (2011). Penyelidikan Gayaberat untuk Pemetaan Struktur Bawah Permukaan Di Daerah Karanganyar Bagian Barat. *Skripsi*. FMIPA Universitas Sebelas Maret.
- Hinze, W. J. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications, 1 Ed*. Cambridge University Press.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283.

- Hochstein, M. P. (1990) *Classification and Assessment of Geothermal Resources. Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*. UNITAR, New York, 31-57.
- Jacobs, J. A., Russel, R. D., & Wilson, J. (1974). *Physics and Geology*. Mc Graw-Hill Book Company.
- Johannessen, J. A., Balmino, G., & Provost, C. L. (2003). The European Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Satellite Mission Its Impact on Geophysics. *Surveys in Geophysics*, 24, 339–386.
- Kadir, W. G. A. (2000). *Eksplorasi Gayaberat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral. Bandung: ITB
- Kasbani. (2009). Tipe sistem panas bumi di Indonesia dan estimasi potensi energinya. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 4(1), 23–30\
- .Martha, A. (2017). Pemodelan 3D Data Gayaberat Lapangan Panasbumi Ulubelu, Tanggamus, Lampung. *Skripsi*. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Mutia Muti'ah, Gunawan, W., Afnimar, Suteja, A., & 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. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i2.755>
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Inc., Berlin.
- Noya, C. N., Haryanto, A. D., Hutabarat, J., & Gentana, D. (2021). Characteristics of hydrochemical to determine reservoir temperature Banda Baru Area, Amahai District, Central Maluku Regency, Maluku Province. *International Journal of Multidisciplinary Research and Publications*.
- Nugraha, P. (2016). Penentuan Kedalaman Optimum Anomali Gayaberat Dengan Metode Korelasi Antara Analisis Spektrum dan Continuation Studi Kasus Semarang Jawa Tengah. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang.
- Nurchayati, E. (2016). Analisis Spektrum Data Gravitasi Pada Daerah Potensi Emas. *Skripsi*. Universitas Sunan Kalijaga.
- Octonovrilna, L., dan Pudja, I. P. (2009). Analisa Perbandingan Anomali Gravitasi dengan persebaran intrusi air asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 10(1), <https://doi.org/10.31172/jmg.v10i1.32>

- Pusat Sumber Daya Geologi, (2011). Survei Geofisika Terpadu Gayaberat. Geomagnet, dan Geolistrik daerah Panas Bumi Banda Baru, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku
- Rahma, M. (2012). Pemodelan Bawah Permukaan Gunungapi Merapi Berdasarkan Anomali Gravitasi Setelah Letusan Besar 2010. *Skripsi*. UGM Jogjakarta.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Chichester*. John Wiley dan sons.
- Ridha, M., & Darminto. (2016). Analisis Densitas, Porositas dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi menggunakan Metode Archimedes dan Software Image-J. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. Jurusan Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), 12, Nomer 3.
- Rosenbach, O. (1953). A contribution to the computation of the " second derivative" from gravity data. *Geophysics*, 18(4), 894-907.
- Santoso, D. (2002). *Diktat Kuliah TG-424 Eksplorasi Energi Panasbumi*. Institut Teknologi Bandung.
- Sarkowi, M. (2007). *Gayaberat mikro antar waktu untuk analisa perubahan kedalaman muka air tanah (Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang)*. Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16(2),
- Sarkowi, M. (2011). *Diktat Kuliah: Metode Ekplorasi Gayaberat*. Bandar Lampung: FT Universitas Lampung.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Graha Ilmu.
- Sota, I. (2011). Pendugaan Struktur Patahan Dengan Metode Gayaberat. *Positron*, (1).
- Sucipto, D. A. (2014). Pengukuran Densitas Batuan Organik Berskala Mili-Liter (ML) dengan Metode Levitasi Megneto-Archimedes Menggunakan Sumber Magnet Tunggal. *Skripsi*. Universitas Brawijaya.

- Sugianto, A. dan Rahadinata, T. (2015), "Pemodelan Gayaberat 3d Daerah Panas Bumi Dolok Marawa Kabupaten Simalungun, Sumatera Utara 3d Gravity Modeling Of Dolok Marawa Geothermal Field In Simalungun Regency, North Sumatera", *Buletin Sumber Daya Geologi*, Vol.10, No.2, hal. 26–39.
- Suharno. (2010). *Pengembangan Prospek Panasbumi*. Bandar Lampung, Universitas Lampung.
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung, Universitas Lampung.
- Suprianto, A., Supriyadi, Priyantari, N., & Cahyono (2021). Correlation between GGMPPlus, topex and BGI gravity data in volcanic areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Susilawati. (2005). *Pemodelan Metode Gayaberat*. Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Syamsuriadi. (2013). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity). *Skripsi*. Universitas Hasanudin.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Tjokrosapoetra, S., (1993). *Geologi Lembar Masohi, Maluku*, skala 1 : 250. 000.
- Tresna Nagari, M. Y. (2021). Analisis Saturasi Fluida Uap Dengan Metode Local Earthquake Tomography Pada Lapangan Panas Bumi 'X'. Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.