

**IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING
BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN
MAGNETOTELURIK**

(Skripsi)

Oleh

**BIMA HABIB NUGRAHA
NPM 1715051033**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARf LAMPUNG
2023**

**IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING
BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN
MAGNETOTELURIK**

Oleh

BIMA HABIB NUGRAHA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK

Oleh

BIMA HABIB NUGRAHA

Telah dilakukan penelitian dengan menggunakan Metode Gayaberat dan Metode Magnetotelurik di daerah Maritaing, Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur yang dikorelasikan dengan data geologi dan data geokimia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pola struktur, model bawah permukaan, dan mengidentifikasi daerah reservoir Panasbumi Maritaing. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini antara lain anomali residual daerah penelitian menunjukkan adanya struktur patahan berarah baratlaut – tenggara sesuai dengan struktur patahan utama daerah ini berarah baratlaut – tenggara dan sedikit baratdaya – timurlaut. Analisis *Second Vertical Derivative* nilai nol menunjukkan struktur geologi daerah penelitian. Hasil pemodelan inversi 3D daerah penelitian memperlihatkan densitas rendah ($1,8-2,3 \text{ gr/cm}^3$) mengindikasikan lokasi reservoir, nilai densitas sedang ($2,3-2,8 \text{ gr/cm}^3$) adalah sedimen. Nilai sebaran densitas tinggi ($2,8-3,6 \text{ gr/cm}^3$) mengindikasikan batuan beku. Model inversi 2D Magnetotelurik memperlihatkan resistivitas dengan rentang $8-300 \Omega\text{m}$, resistivitas rendah ($8-18 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai *caprock*, resistivitas sedang ($21-112 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai reservoir dan resistivitas tinggi ($>112 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai sumber panas. Berdasarkan analisis metode Gayaberat dan Magnetotelurik yang dikorelasikan dengan data geologi dan data geokimia daerah prospek reservoir panasbumi Maritaing berada disekitar mata air panas Kura dan kubah lava dasit Karitemang.

Kata kunci: gayaberat, magnetotelurik, reservoir panasbumi

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF PROSPECT RESERVOIR AREA MARITAING GEOTHERMAL FIELD BASED ON ANALYSIS OF GRAVITY AND MAGNETOTELLURIC METHOD DATA

By

BIMA HABIB NUGRAHA

Research has been conducted using the Gravity Method and Magnetotelluric Method in the Maritaing area, Alor Regency, East Nusa Tenggara Province, correlated with geological and geochemical data. The aim of this research is to obtain the structural pattern, subsurface model, and identify the reservoir area of the Maritaing Geothermal. Results obtained from this study include residual anomaly in the research area indicating a fault structure trending northwest-southeast, consistent with the main fault structure trending northwest-southeast and slightly southwest-northeast. Analysis of the Second Vertical Derivative with zero values indicates the geological structure of the research area. The 3D inversion modeling results in the research area show low density ($1.8-2.3 \text{ g/cm}^3$) indicating the reservoir location, moderate density values ($2.3-2.8 \text{ g/cm}^3$) are sediments. High-density distribution values ($2.8-3.6 \text{ g/cm}^3$) indicate igneous rocks. The 2D Magnetotelluric inversion model shows resistivity ranging from $8-300 \Omega\text{m}$, low resistivity values ($8-18 \Omega\text{m}$) identified as caprock, moderate resistivity ($21-112 \Omega\text{m}$) identified as reservoir, and high resistivity ($>112 \Omega\text{m}$) identified as heat source. Based on the analysis of the Gravity and Magnetotelluric methods correlated with geological and geochemical data, the prospective reservoir area of Maritaing geothermal is located around the Kura hot spring and the lava dome of Karitemang..

Keywords: gravity, magnetotelluric, geothermal reservoir

Judul Skripsi

**: IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK
RESERVOAR PANASBUMI MARITAING
BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE
GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK**

Nama Mahasiswa

: Bima Habib Nugraha

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051033

Program Studi

: Teknik Geofisika

Fakultas


: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

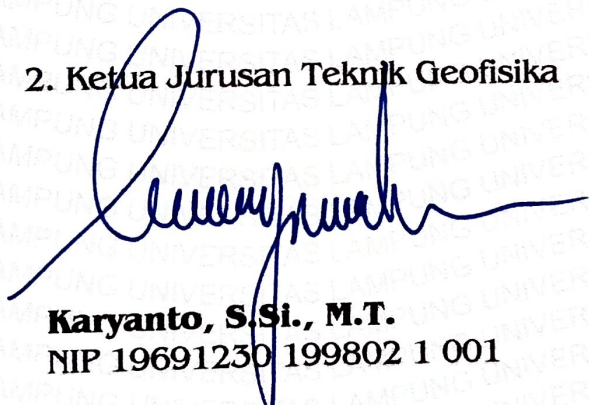
Pembimbing 1

Pembimbing 2


Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.
NIP 19730716 200012 1 002


Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720928 199903 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.** 

Sekretaris : **Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.** 

Anggota : **Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.** 

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **21 Desember 2023**

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Randa Lampung, 28 Desember 2023



Dina Nabib Nugraha
1715051033

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Agung, Tanggamus, Lampung, pada tanggal 8 November 1998, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, anak dari Bapak Suratman dan Ibu Nuryanti. Penulis beralamat di Jalan Kartini, RT/RW:08/02, Pringsewu Selatan, Kecamatan Pringsewu, Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung.

Pendidikan yang pernah ditempuh oleh penulis yaitu Taman Kanak-anak (TK) Dharmawanita Kota Agung diselesaikan tahun 2005, Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Pringsewu Selatan hingga selesai pada tahun 2011, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Pringsewu hingga selesai pada tahun 2014, dan Sekolah Menengah atas di SMA Negeri 2 Pringsewu hingga tahun 2017.

Selanjutnya, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2017. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi asisten praktikum Komputasi. Penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana) sebagai ketua bidang Multimedia Informasi, *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Universitas Lampung Student Chapter* sebagai ketua divisi *Public Relation*, Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia sebagai anggota bidang Media Informasi, dan Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Fakultas Teknik sebagai anggota bidang Pendidikan dan Keilmuan.

Pada bulan Januari-Februari 2020, penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Kedaton Induk, Kecamatan Batanghari Nuban, Kabupaten Lampung Timur. Selanjutnya, dibulan Maret-April tahun 2020, penulis melakukan Kerja Praktik di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP)

Kementrian ESDM dalam pengolahan data magnetotelurik di Bandung, Provinsi Jawa Barat. Pada September 2022, Penulis melakukan penelitian Tugas Akhir (TA) di Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika Universitas Lampung hingga akhirnya penulis menyelesaikan pendidikan sarjana teknik pada tanggal 21 Desember 2023 dengan judul skripsi “**IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK**”.

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, saya persembahkan skripsi ini kepada:

Allah Subhanahu Wa Ta'ala.

Atas berkat rahmat dan hidayah serta karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Ayahanda Tercinta Bapak Suratman

Ibunda Tercinta Ibu Nuryanti

Berkat Do'a dan kemurnian cinta kasih sayang. Terimakasih atas segala jerih payah ayah dan ibu hingga kebutuhanku dapat dipehuhi. Semuanya takkan terbalas, namun akan selalu ku ingat sampai kapanpun, hingga tak terbatas sampai nyawa lepas dikandung badan.

Kakak dan Adik Tersayang

Bekty Kurnia Dewanty

Belia Rahma Dewanty

Dwi Handoko

Terima kasih karena telah menjadi penyemangat dalam mengejar impian.

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2017

Terima kasih atas semua yang telah kalian berikan dan telah menjadi keluarga selama di kampus. Semoga kita semua sukses selalu.

MOTTO

“There are only two ways to live your life. One is as though nothing is a miracle.

The other is as though everything is a miracle.”

- Albert Einstein -

“The greatest superpower is the ability to change yourself.”

- Naval Ravikant -

“Difficulties strengthen the mind, as labor does the body.”

- Seneca -

“It isn't what you have or who you are or where you are or what you are doing that makes you happy or unhappy. It is what you think about it.”

- Dale Carnegie -

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penyusunan Skripsi dengan judul **“IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK”** telah selesai dengan sebaik-baiknya. Terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini. Penulis pun menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam penulisan Skripsi ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam laporan ini dapat memberikan manfaat kepada siapa pun, baik kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 28 Desember 2023

Penulis,



Bima Habib Nugraha

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. yang senantiasa memberikan pertolongan, berkat, dan kemurahan-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Skripsi ini. Skripsi ini berjudul **“IDENTIFIKASI DAERAH PROSPEK RESERVOAR PANASBUMI MARITAING BERDASARKAN ANALISIS DATA METODE GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK”**.Terselesaikannya penyusunan Skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan kerja sama berbagai pihak. Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta, Bapak Suratman dan Ibu Nuryanti yang selalu memberikan doa, semangat dan dukungan dalam bentuk apapun.
2. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus sebagai pembimbing akademik.
3. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si. selaku pembimbing pertama atas kesabaran, kebaikan hati, dan kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini serta meluangkan waktunya untuk bimbingan.
4. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku pembimbing kedua atas kesabaran, kebaikan hati, dan kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini serta meluangkan waktunya untuk bimbingan.
5. Bapak Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si. selaku penguji yang telah memberikan masukan dan saran-dalam proses penyelesaian skripsi.
6. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati, terima kasih untuk semua ilmu yang diberikan.

7. Kakak dan adik tersayang, Bekty Kurnia Dewanty, Belia Rahma Dewanty yang selalu menemani penulis dalam berbagai hal serta selalu menyemangati penulis.
8. Fklopper yang telah berkontribusi banyak dalam menemani, meluangkan banyak waktu, tenaga, pikiran, ataupun materi kepada penulis, dan memberikan semangat untuk terus maju tanpa kenal lelah serta menyerah.
9. Teman-teman Serigala Terakhir, Nico, Baho, Fajri, Memed, Yoyok, Ito, Tajar, Fathur, Ryas, Gede, Adief, Baco, Faiz yang selalu menemani dan membantu penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
10. Keluarga Teknik Geofisika 2017 yang telah memberikan motivasi dan membantu dalam penyusunan skripsi ini.
11. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Demikian skripsi ini disusun dengan sebaik-baiknya, harapan penulis agar skripsi ini dapat berguna bagi pembaca. Dalam penulisan skripsi ini tidak terlepas dari kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar menjadi lebih baik lagi kedepannya.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PERSETUJUAN.....	iii
PENGESAHANAN	iv
PERNYATAAN.....	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN.....	viii
MOTTO	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Letak Daerah Penelitian.....	4
2.2. Geologi daerah penelitian	5
III. TEORI DASAR	7
3.1. Metode Gayaberat.....	7
3.2. Hukum Newton.....	7
3.3. Potensial Gravitasi	9
3.4. Rapat Masa Batuan	10

3.5.	Koreksi Dalam Metode Gayaberat	11
3.5.1.	Koreksi Pasang Surut (<i>Tidal Correction</i>)	11
3.5.2.	Koreksi <i>Drift</i>	11
3.5.3.	Koreksi Lintang (<i>Latitude Correction</i>)	12
3.5.4.	Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Anomaly</i>)	12
3.5.5.	Koreksi Bouguer (<i>Bouguer Correction</i>)	13
3.5.6.	Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>)	13
3.5.7.	<i>Complete Bouguer Anomaly</i> (CBA)	14
3.6.	Metode Parasnis	14
3.7.	Analisis Spektrum	15
3.8.	<i>Bandpas Filter</i>	17
3.9.	<i>First Horizontal Derivative</i> (FHD)	17
3.10.	<i>Second Vertical Derivative</i> (SVD)	18
3.11.	<i>Inverse Modelling</i>	20
3.12.	Sistem Panas Bumi	21
3.12.1.	Fluida Panas Bumi	23
3.12.2.	Sumber Panas (<i>Heat Source</i>)	23
3.12.3.	Reservoar Panasbumi (<i>Geothermal Reservoar</i>)	24
3.12.4.	Batuan Penudung (<i>Caprock</i>)	24
3.12.5.	Manifestasi Sistem Panas Bumi	24
3.13.	Metode Magnetotelurik	26
3.14.	Prinsip Elektromagnet	27
3.15.	<i>Robust Processing</i>	31
3.16.	Koreksi <i>Static Shift</i>	32
3.17.	Inversi <i>Non Linear Conjugate Gradient</i> (NLCG)	32
IV.	METODOLOGI PENELITIAN	34
4.1.	Waktu Dan Tempat Penelitian	34
4.2.	Alat Dan Bahan Penelitian	36
4.3.	Diagram Alir	37
4.4.	Prosedur Penelitian	39
4.4.1.	Tahapan Pengolahan Data Metode Gayaberat	39
4.4.2.	Tahapan Pengolahan Data Metode Magnetotelurik	41
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
5.1.	Topografi dan Geologi	42
5.2.	Metode Magnetotelurik	45
5.2.1.	Data Magnetotelurik	45

5.2.2.	Pemilihan <i>Time Series</i>	46
5.2.3.	<i>Fast Fourier Transform</i>	46
5.2.4.	<i>Robust Processing</i>	47
5.2.5.	Seleksi <i>Crosspower</i>	47
5.2.6.	Static Shift.....	48
5.2.7.	Model Inversi 1D dan 2D Magnetotelurik.....	49
5.3.	Metode Gayaberat.....	52
5.3.1.	<i>Complete Bouguer Anomaly</i> (CBA)	52
5.3.2.	Anomali Regional dan Anomali Residual	54
5.3.3.	<i>First Horizontal Derivative</i> (FHD).....	57
5.3.4.	<i>Second Vertical Derivative</i> (SVD)	58
5.3.5.	Model Inversi 3D Gayaberat.....	60
5.4.	Model 2D Gayaberat dan 2D Magnetotelurik	62
5.4.1.	<i>Slice Line A-A'</i>	63
5.4.2.	<i>Slice Line B-B'</i>	65
5.4.3.	<i>Slice Line C-C'</i>	67
5.4.4.	<i>Slice Line D-D'</i>	69
5.4.5.	<i>Slice Line E-E'</i>	70
5.4.6.	<i>Slice Line F-F'</i>	71
5.5.	Analisis Geokimia.....	72
5.5.1.	Kimia Air	72
5.5.2.	Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan	74
5.5.3.	Isotop Oksigen-18 dan Deuterium (18O dan 2H)	75
5.5.4.	Analisis Tanah dan Udara Tanah.....	76
5.6.	Prospek Daerah Panasbumi Maritaing.....	78
VI. KESIMPULAN DAN SARAN.....		80
6.1.	Kesimpulan	80
6.2.	Saran	81
VII. DAFTAR PUSTAKA		82

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Lokasi daerah penelitian	4
2. Peta geologi daerah penelitian (Setiawan, dkk., 2015)	5
3. Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda (Grandis, 2009)	8
4. Potensial massa tiga dimensi (Telford, dkk., 1990)	9
5. Grafik metode parsnis (Sarkowi, 2014)	15
6. Kurva Ln A Terhadap k (Sarkowi, 2014)	16
7. Konseptual Sistem PanasBumi (Santoso, 2004)	22
8. Konsep Gelombang Elektromagnetik (Wachisbu, dkk., 2015)	27
9. Diagram Alir Penelitian	38
10. Peta topografi daerah penelitian	42
11. Peta geologi dan plot titik pengukuran Magnetotelurik	44
12. Lintasan data pengukuran Magnetotelurik	45
13. Raw data Magnetotelurik	45
14. Pemilihan <i>Parameter Fourier Transform</i> (PFT)	46
15. Proses FFT	47
16. Edit parameter pada <i>Robust Processing</i>	47
17. Tampilan data MTMR-15 sebelum di edit	48
18. Tampilan data MTMR-15 setelah di edit	48
19. Tampilan data MTMR-15 sesudah <i>static shift</i>	49
20. Pemodelan 1D titik MTMR-15	50
21. Model <i>X-Section</i> inversi <i>occam</i> seluruh titik pengukuran Magnetotelurik	50
22. Model resistivitas semu 2D Magnetotelurik	51
23. Peta <i>Complete Bouguer Anomaly</i>	54
24. Peta anomali regional	55
25. Peta Anomali Residual	56
26. Peta anomali FHD daerah penelitian	58
27. Peta anomali SVD daerah penelitian	59
28. Model 3D densitas Gayaberat	60
29. Peta densitas kedalaman: A. -250m, B. -500m, C. -1000m, D. -2000m	61
30. Peta geologi dengan plot garis <i>slicing</i>	62
31. Model penampang distribusi densitas lintasan A-A' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D dan model resistivitas 2D MT	63

32. Model penampang distribusi densitas lintasan B-B' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D dan model resistivitas 2D MT	65
33. Model penampang distribusi densitas lintasan C-C' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D dan model resistivitas 2D MT	67
34. Model penampang distribusi densitas lintasan D-D' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D.....	69
35. Model penampang distribusi densitas lintasan E-E' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D.....	70
36. Model penampang distribusi densitas lintasan F-F' hasil <i>slicing</i> dari model inversi 3D.....	71
37. Diagram segitiga Cl-SO ₄ -HCO ₃	73
38. Diagram segitiga Na-K-Mg	74
39. Diagram segitiga Cl-Li-B	74
40. Entalpi Klorida pada air di Maritaing	75
41. Grafik Isotop 18O terhadap konsentrasi Cl.....	76
42. Grafik isotop D (Deuterium) terhadap konsentrasi Cl.....	76
43. Peta Distribusi Temperatur Tanah Daerah Maritaing.....	77
44. Peta Distribusi Hg Tanah Daerah Maritaing.....	77
45. Peta kompilasi Geologi, Geokimia, Gayaberat, dan Magnetotelurik daerah Panasbumi Maritaing	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai densitas batuan (Telford, 1990)	10
2. Koefisien Filter SVD	19
3. Nilai resistivitas batuan (Telford, 1990).	30
4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	35
5. Estimasi kedalaman berdasarkan kurva RAPS	40

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kepulauan Indonesia terletak di salah satu kerangka tektonik paling aktif dunia, terletak di perbatasan Indo-Australia, Pasifik, Filipina, dan Lempeng Tektonik Eurasia. Posisi strategis tersebut menyebabkan Indonesia kaya akan energi panasbumi yang tersebar di 299 titik sepanjang busur vulkanik dengan total potensi 29 Gwe. Saat ini, Kebijakan Energi Nasional menetapkan target agar panas bumi menyumbang 5% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025. Namun, hingga saat ini, kontribusi panas bumi baru mencapai 1%, dengan perkembangan yang terbilang lambat. Oleh karena itu, diperlukan penyelidikan lebih lanjut untuk mengembangkan lapangan panas bumi di Indonesia (KESDM, 2017).

Panasbumi merupakan salah satu sumber energi alternatif terbarukan dan sangat berpotensi untuk diproduksi di Indonesia. Hal ini disebabkan Indonesia memiliki lingkaran sabuk gunungapi sepanjang lebih dari 7000 km yang memiliki potensi panasbumi yang besar (Gaffar, dkk., 2007). Proses pencariannya pun cukup mudah jika dibanding sumber daya energi yang lain, karena keberadaan panasbumi ditandai dengan adanya manifestasi di permukaan bumi seperti fumarole, mud pool, gletser, mata air panas dan masih banyak jenis manifestasi panasbumi lainnya.

Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panasbumi adalah di daerah Maritaing, Nusa Tenggara Timur. Berdasarkan Ditjen EBTKE dan Badan Geologi Kementerian ESDM pada tahun 2017 sumber daya hipotesis panasbumi di daerah Maritaing diduga mencapai 17 MWe. Adanya potensi panasbumi di Maritaing ditandai dengan manifestasi diantaranya struktur kawah Karitemang dan sejumlah mata air panas Kura dan mata air hangat yang tersebar di sekitar bukit

Karitemang. Pada tahun 2015 pernah dilakukan survei terpadu di daerah Maritaing oleh Kelompok Penyelidikan Panasbumi, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi (PSDMBP) untuk mengetahui kondisi bawah permukaan daerah prospek panasbumi Maritaing dengan melakukan pengamatan geologi dan geokimia. Berdasarkan survei tersebut didapatkan struktur rekahan dan juga karakterisasi fluida reservoir panasbumi (KESDM, 2017).

Untuk mendekteksi daerah panasbumi dapat menggunakan metode-metode geofisika, pada penelitian ini digunakan Metode Gayaberat dan Magnetotelurik. Metode Gayaberat merupakan salah satu metode dalam geofisika yang digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan berdasarkan adanya perbedaan rapat massa batuan di bawah permukaan, metode ini digunakan untuk mempelajari: kontak intrusi, batuan dasar, dan juga terhadap struktur geologi. *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) anomali Bouguer merupakan salah satu teknik filtering yang dapat memunculkan Anomali Residual (efek dangkal), adanya struktur patahan disuatu daerah akan dapat diketahui dengan baik menggunakan teknik ini. (Sarkowi, 2010). Sedangkan Metode Magnetotelurik digunakan untuk mengukur tahanan jenis batuan di bawah permukaan. Dalam metode ini, parameter yang diamati untuk mengevaluasi tahanan jenis reservoir panasbumi ditandai oleh nilai resistivitas yang relatif rendah, yang mencerminkan konduktivitas sebagai fungsi frekuensi. Kedalaman yang dapat diukur dalam Metode Magnetotelurik dapat mencapai hingga 10 km. (Panjaitan, 2010). Data geokimia dan geologi dapat digunakan untuk mendukung data geofisika dalam memvalidasi keberadaan sistem panasbumi di daerah penelitian. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis data Gayaberat, Magnetotelurik, geologi untuk struktur batuan dan kajian data geokimia untuk mengidentifikasi karakteristik reservoir.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi struktur daerah penelitian berdasarkan analisis anomali *Bouguer* Residual dan gradien anomali *Bouguer*.

2. Pemodelan data Gayaberat untuk identifikasi reservoir daerah panasbumi Maritaing.
3. Pemodelan data Magnetotelurik untuk identifikasi reservoir daerah panasbumi Maritaing.
4. Membuat peta daerah prospek panasbumi Maritaing berdasarkan geologi, geokimia, Gayaberat dan Magnetotelurik.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Penelitian ini difokuskan pada identifikasi daerah prospek panasbumi di daerah Mairtaing, Nusa Tenggara Timur.
2. Data Gayaberat adalah data sekunder *Global Gravity Model Plus* hasil dari <https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus> .
3. Pemisahan anomali regional dan Residual dengan menggunakan *Radially Averaged Power Spectrum* (RAPS) dan analisa *derivative* untuk mengidentifikasi struktur daerah penelitian.
4. Pemodelan data Magnetotelurik dengan menggunakan inversi 2D.

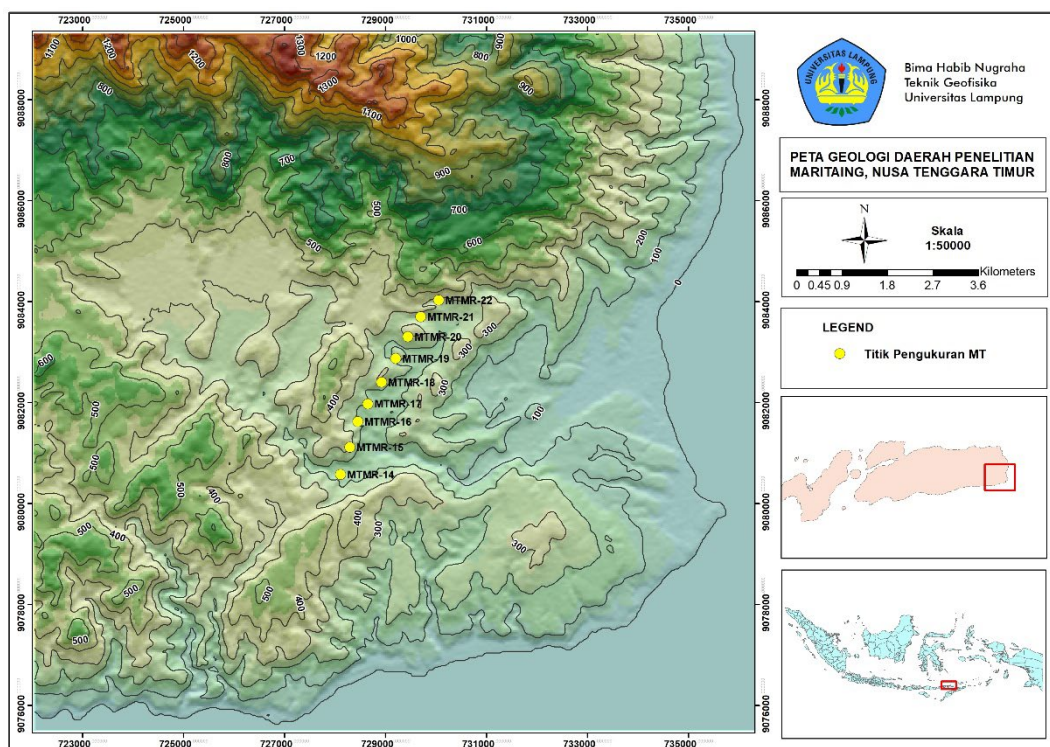
1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu memberikan informasi mengenai struktur bawah permukaan dan prospek reservoir panasbumi pada daerah penelitian berdasarkan data Gayaberat dan data Magnetotelurik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Letak Daerah Penelitian

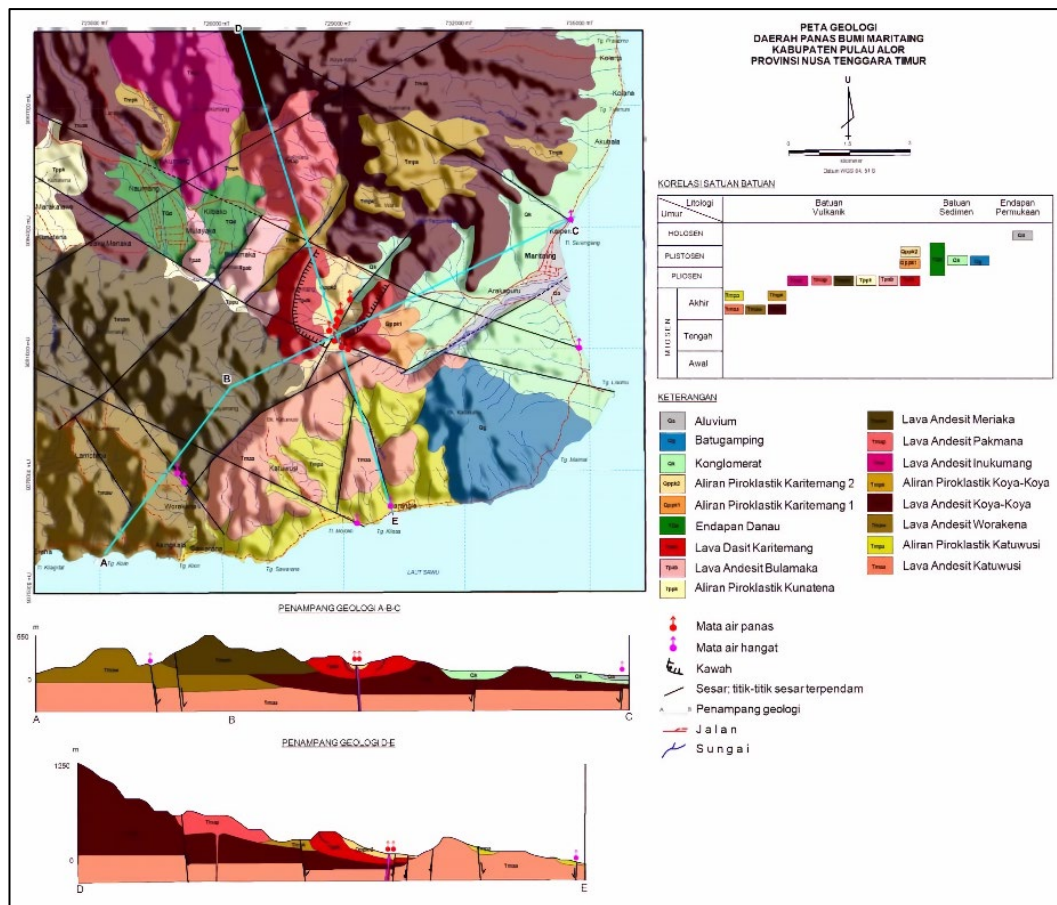
Daerah Panasbumi Maritaing termasuk ke dalam Wilayah Kecamatan Alor Timur, Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Daerah ini merupakan bagian dari gugusan pulau-pulau kecil di bagian timur Pulau Flores yang tersusun oleh beberapa perbukitan vulkanik berumur Tersier hingga Kuartar (Setiawan, dkk., 2015). Peta daerah penelitian diperlihatkan pada Gambar 1 :



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian

2.2. Geologi daerah penelitian

Daerah panas bumi Maritaing secara umum tersusun oleh batuan sedimen, batuan vulkanik, dan endapan permukaan. Batuan sedimen yang tersingkap di lapangan berupa konglomerat dan batugamping terumbu. Batuan vulkanik merupakan batuan penyusun yang paling dominan di daerah ini, meliputi lava dan piroklastik. Jenis batuan, penyebaran, serta urutan stratigrafi batuan tersebut disajikan dalam peta geologi daerah panas bumi Maritaing (Gambar 2).



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Setiawan dkk., 2015)

Satuan batuan vulkanik tertua yang berumur Miosen terdiri atas lava dan piroklastik. Satuan Lava Andesit Katuwusi bersama Satuan Lava Andesit Worakena, Lava Andesit Koya-Koya, Lava Andesit Inukumang, dan Satuan Lava Andesit Pakmana merupakan lava berjenis andesit piroksen, sedangkan Satuan Lava Andesit Meriaka berjenis andesit hornblenda. Lava yang tersingkap umumnya telah mengalami proses kekerakan, dan beberapa di antaranya membentuk struktur kekar kolom dan kekar berlembar. Satuan batuan berjenis piroklastik terdiri dari

Satuan Piroklastik Katuwusi yang melibatkan tuf lapili dan breksi tuf, serta Satuan Aliran Piroklastik Koya-Koya yang berupa breksi. Tuf dan breksi yang terpapar biasanya telah mengalami proses kekerakan dan diisi oleh mineral kalsit yang membentuk urat kalsit.

Batuan vulkanik selanjutnya terbentuk di sepanjang zona Depresi Maritaing selama Kala Pliosen. Komposisi batuan ini mencakup Satuan Aliran Piroklastik Kunatena, Satuan Lava Andesit Bulamaka, dan Satuan Lava Dasit Karitemang. Aliran piroklastik Kunatena terdiri dari breksi tuf dengan fragmen andesit dan dasit. Batuan lava andesit Bulamaka merupakan jenis andesit piroksen yang menunjukkan retakan halus yang diisi oleh mineral kuarsa. Sementara itu, lava dasit Karitemang membentuk struktur kawah di Bukit Karitemang, yang juga menjadi lokasi kelompok mata air panas Kura.

Memasuki Kala Plistosen, di bagian tengah daerah penyelidikan, pada Depresi Maritaing, terbentuk Endapan Danau yang terdiri dari konglomerat dan batupasir hasil rombakan batuan vulkanik di sekitarnya. Pada waktu yang sama, aktivitas vulkanik Gunung Karitemang menghasilkan Aliran Piroklastik Karitemang-1 di bagian timur Kawah Karitemang yang terdiri atas breksi tuf dengan fragmen andesit dan dasit. Produk selanjutnya dari Gunung Karitemang adalah Aliran Piroklastik Karitemang-2 yang terdapat di Kawah Karitemang dan meluas ke bagian selatan, terdiri atas breksi tuf dengan fragmen andesit dan dasit. Di sekitar dasar Sungai Kura, di bagian utara kelompok mata air panas Kura, terdapat pula retas (dyke) berbahan andesit yang menembus breksi Satuan Aliran Piroklastik Karitemang-2 (Qppk-2). Usia andesit tersebut diperkirakan mencapai 1,5 juta tahun, sejalan dengan fase awal dari periode Plistosen jika dikonversi ke dalam skala waktu geologi (Setiawan, dkk., 2015).

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gayaberat

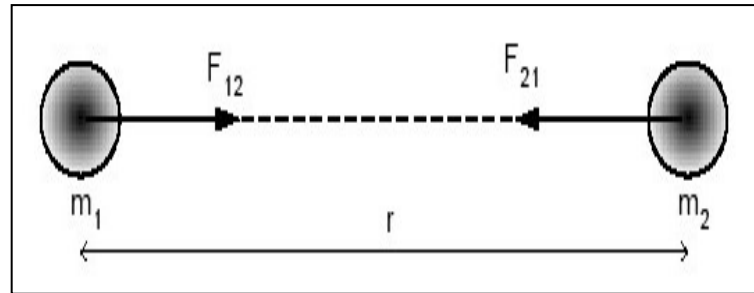
Metode Gayaberat merupakan salah satu metode geofisika berdasarkan pada pengukuran medan gravitasi. Medan Gayaberat memiliki perbedaan yang dapat diketahui melalui pengukuran, perbedaan tersebut berupa jenis batuan dan densitas bawah permukaan. Perbedaan jarak pusat bumi ke permukaan serta adanya perbedaan topografi di permukaan bumi inilah yang menyebabkan terjadinya variasi medan Gayaberat bumi. (Sarkowi, 2014).

3.2. Hukum Newton

Hukum Newton tentang gravitasi menyatakan bahwa besar dari gaya gravitasi antara dua massa adalah sebanding dengan masing-masing massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar kedua massa tersebut. Prinsip dasar teori gravitasi berdasarkan dengan Hukum Newton yang menjelaskan bahwa dua benda bermassa m_1 dan m_2 yang terpisah dalam jarak r akan saling tarik-menarik dengan gaya yang diberikan, dapat diformulasikan sebagai berikut (Serway, 2009).

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

dimana: \vec{F} merupakan gaya tarik menarik (N), m_1 m_2 merupakan massa benda 1 dan massa benda 2 (kg), r merupakan jarak antara dua buah benda (m) dan G merupakan konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$).



Gambar 3. Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda (Grandis, 2009).

Hukum II Newton membahas tentang gerak menyatakan gaya merupakan perkalian dari massa dan percepatannya.

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

Percepatan sebuah benda yang bermassa m_2 dikarenakan dari tarikan benda yang bermassa M_1 pada jarak r secara sederhana dapat dinyatakan dengan :

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

Bila ditetapkan pada percepatan gaya tarik bumi persamaan di atas menjadi:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{G \frac{Mm}{r^2}}{m} = G \frac{M}{r^2} \quad (4)$$

dimana: \vec{g} merupakan percepatan gaya tarik bumi (Nm^2/s^2), M merupakan massa bumi (Kg), m merupakan massa benda (Kg), \vec{F} merupakan Gayaberat (N) dan r merupakan jari-jari bumi (m).

Pengukuran percepatan gravitasi pertama kali dilakukan oleh Galileo, sehingga diguna menghormati Galileo, selanjutnya didefinisikan :

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

Satuan anomali Gayaberat diberikan pada orde miligal (mGall):

$$1 \text{ mGall} = 10^{-3} \text{ Gall}$$

$$1 \mu\text{Gall} = 10^{-3} \text{ mGall} = 10^{-6} \text{ Gall} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mGall} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

Dalam satuan m.k.s, pada gravitasi dapat diukur dalam g.u. atau $\mu\text{m/s}^2$ (Octonovrilna, 2009).

3.3. Potensial Gravitasi

Potensial gravitasi adalah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan suatu massa dari satu titik ke titik tertentu. Sebuah benda dengan massa tertentu dalam sistem ruang akan menciptakan medan potensial di sekitarnya. Medan potensial ini bersifat konservatif, yang berarti usaha yang diperlukan untuk bergerak dalam suatu medan gravitasi tidak tergantung pada jalur yang diambil, melainkan hanya tergantung pada posisi awal dan akhir. (Rosid, 2005). Medan potensial dapat dinyatakan sebagai gradien atau potensial skalar (Blakely, 1996), melalui persamaan :

$$\vec{g} = -\nabla U(\vec{r}) \quad (5)$$

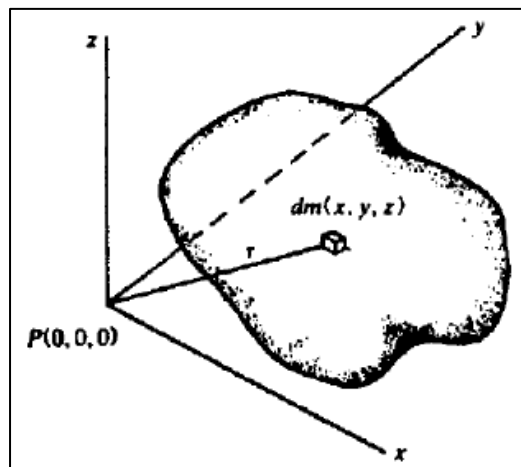
Fungsi U pada persamaan di atas disebut potensial gravitasi, sedangkan percepatan gravitasi \vec{g} merupakan medan potensial. Tanda minus menandakan bahwa arah Gayaberat menuju ke titik yang dituju.

Dengan mengasumsikan bumi dengan massa M bersifat homogen dan berbentuk bola dengan jari-jari R , potensial gravitasi di permukaan dapat didefinisikan dengan persamaan :

$$\nabla U(\vec{r}) = -\frac{F(\vec{r})}{m_2} = -g(\vec{r}) \quad (6)$$

$$U(\vec{r}) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot d\vec{r} = - \int_{\infty}^r g \cdot d\vec{r} \quad (7)$$

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (8)$$



Gambar 4. Potensial massa tiga dimensi (Telford, dkk., 1990).

Berdasarkan persamaan (8), potensial yang disebabkan oleh elemen massa dm pada titik (x, y, z) dengan jarak r dari $P(0, 0, 0)$ adalah :

$$dU = G \frac{dm}{r} = G\rho \frac{dxdydz}{r} \quad (9)$$

dimana $\rho(x,y,z)$ adalah densitas dan $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$

Potensial total dari massa adalah:

$$U = G \int_x \int_y \int_z \frac{\rho}{r} dxdydz \quad (10)$$

karena g adalah percepatan gravitasi pada sumbu z (arah vertikal) dan dengan asumsi ρ konstan, maka :

$$g = -\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right) = G\rho \int_x \int_y \int_z \frac{z}{r^3} dxdydz \quad (11)$$

3.4. Rapat Masa Batuan

Rapat massa merupakan parameter utama dalam menentukan nilai percepatan gravitasi. Variasi rapat massa pada batuan sedimen disebabkan oleh pengaruh tekanan dari gaya tektonik. Densitas batuan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti rapat massa butir pembentuknya, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, serta pemadatan yang terjadi akibat tekanan dan proses pelapukan yang dialami oleh batuan tersebut. (Kirbani, 2001).

Tabel 1. Nilai densitas batuan (Telford, 1990)

Tipe Batuan	Nilai gr/cm ³	rata-rata gr/cm ³	Tipe Batuan	Nilai gr/cm ³	rata-rata gr/cm ³
Batuan Sedimen			Batuan Beku		
Overbunden		1,92	Riolit	2,35 - 2,70	2,52
Tanah	1,2 - 2,4	1,92	Andesit	2,4 - 2,8	2,61
Lempung	1,63 - 2,60	2,21	Granit	2,50 - 2,81	2,64
Kerikil	1,7 - 2,4	2,0	Granodiorit	2,67 - 2,89	2,73
Pasir	1,7 - 2,3	2,0	Propiri	2,60 - 2,89	2,74
Batuan pasir	1,61 - 2,76	2,35	Kuarsa diorit	2,62 - 2,96	2,79
Serpilh	1,77 - 3,20	2,40	Diorit	2,72 - 2,99	2,85
Gamping	1,93 - 2,90	2,55	Lava	2,80 - 3,00	2,90
Dolomit	2,28 - 2,90	2,70	Diabas	2,5 - 3,2	2,91

Batuan Metamorf			Basal	2,7 - 3,3	2,99
Kuarsit	2,5 - 2,7	2,6	Gabro	2,7 - 3,5	3,02
Sekis	2,39 - 2,90	2,64	Peridotit	2,78 - 3,37	3,15
Graywek	2,6 - 2,7	2,65	Asam beku	2,30 - 3,11	2,61
Marmar	2,6 - 2,9	2,75	Basa beku	2,09 - 3,17	2,79
Serpenit	2,4 - 3,1	2,78			
Slat	2,7 - 2,9	2,79			
Gneis	2,59 - 3,00	2,80			
Ampibolit	2,90 - 3,04	2,96			
Eclogit	3,20 - 3,54	3,37			

3.5. Koreksi Dalam Metode Gayaberat

Metode Gayaberat adalah metode yang mengukur perbedaan densitas batuan yang ada di dalam bumi. sehingga perbedaan nilai gravitasi tersebut di pengaruhi oleh pasang bumi – bulan, keuntungan dan kerugian dari massa, karena topografi bumi, dan referensi. Dengan hal tersebut perlu dilakukan koreksi untuk menghilangkan pengaruh nilai tersebut. Koreksi-koreksi yang dilakukan dalam pengolahan Gayaberat sebagai berikut :

3.5.1. Koreksi Pasang Surut (*Tidal Correction*)

Koreksi pasang surut dilakukan karena adanya tarikan Gayaberat yang diakibatkan benda-benda yang ada dilangit, terutama bulan dan matahari. Nilai koreksi ini berubah secara berkala tergantung dari posisi benda-benda langit tersebut. Nilai tidal atau nilai pasang surut yang mempengaruhi nilai Gayaberat yang telah dihitung dengan menggunakan komputasi adalah dalam orde mikroGal (Longman, 1959). Pada grafik pasang surut terdapat nilai positif dan nilai negatif yang artinya jika positif maka bumi mengalami tarikan dari posisi normalnya dan apabila negatif maka bumi mengalami dorongan dari posisi awalnya.

3.5.2. Koreksi *Drift*

Gravimeter merupakan sistem pegas, dilengkapi dengan massa yang tergantung secara bebas diujungnya. Sistem pegas tidak kembali ke posisi semula karena pegas yang tidak sepenuhnya elastis. Koreksi apungan yang dilakukan untuk

mengoreksi kesalahan pembacaan gravimeter pada saat melakukan pengukuran nilai Gayaberat di suatu tempat. menutup (loop tertutup), caranya dengan melakukan pengukuran kembali pada tempat stasiun awal (Telford, dkk., 1990).

$$drift_n = \frac{(t_n - t_1)}{(t_N - t_1)}(g_N - g_1) \quad (12)$$

dimana: t_n merupakan waktu pembacaan pada stasiun ke-n, t_1 merupakan waktu pembacaan pada stasiun base (awal *looping*), t_N merupakan waktu pembacaan pada stasiun base (akhir *looping*), g_1 merupakan bacaan gravimeter (terkoreksi tidal) pada stasiun base (awal *looping*) dan g_N merupakan bacaan gravimeter (terkoreksi tidal) pada stasiun base (akhir *looping*).

Koreksi drift selalu dikurang terhadap bacaan gravimeter :

$$g_{td} = g_t - drift \quad (13)$$

dimana: g_{td} merupakan Gayaberat terkoreksi tidal dan drift dan g_t merupakan Gayaberat terkoreksi tidal.

3.5.3. Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Koreksi lintang adalah koreksi yang dilakukan untuk mengoreksi nilai Gayaberat pada lintang geografis yang di pengaruhi oleh gaya sentrifugal dan bentuk *ellipsoid* hal ini disebabkan oleh bentuk bumi yang tidak bulat. Koreksi lintang dapat ditentukan dengan 2 cara yaitu dengan menggunakan di ferensi IGRF 67 (untuk derajat lintang/latitude) atau IGRF 84 (untuk radian).

Rumus IGRF 67 :

$$g_\theta = 978031.8 (1 + 0.00539224 \sin^2 \theta - 0.0000059 \sin^2 2\theta) \quad (14)$$

Rumus IGRF 84:

$$g_\theta = 978032.7 (1 + 0.00539224 \sin^2 \theta - 0.0000059 \sin^2 2\theta) \quad (15)$$

3.5.4. Koreksi Udara Bebas (*Free Air Anomaly*)

Menurut Lowrie (2007) bahwa ketinggian titik ukur mempengaruhi nilai Gayaberat observasi, semakin tinggi nilai titik ukur maka nilai Gayaberat observasi semakin menurun, dan semakin menurun titik pengamatan maka nilai Gayaberat

observasi akan semakin meningkat. Koreksi udara bebas dinyatakan dalam persamaan 16 (Reynolds, 1997). :

$$\partial g_F = g_h - g_0 = -\left(\frac{2g_0 h}{R}\right) = 0,3086 \times h \quad (16)$$

Dimana: g_0 adalah 981785 mGal, R merupakan 6371000 meter.

Maka menghitung koreksi udara dengan persamaan berikut :

$$FAC = 0,3086 \times h \quad (17)$$

Dimana, h adalah ketinggian stasiun pengukuran sedangkan anomali udara bebasnya (FAA), dapat dirumuskan :

$$FAA = g_{obs} - g_{lintang} + FAC \quad (18)$$

3.5.5. Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer, juga dikenal sebagai Koreksi Bouguer, adalah suatu penyesuaian yang dilakukan untuk menghilangkan perbedaan ketinggian, tetapi tetap mempertimbangkan massa di bawahnya. Perbedaan ketinggian ini dapat memberikan pengaruh terhadap massa di bawah permukaan, yang pada gilirannya memengaruhi percepatan gravitasi di titik pengukuran. Koreksi Bouguer memperhitungkan tarikan material di antara stasiun pengukuran dan bidang datum. Sebagai contoh, jika stasiun berada di tengah daratan yang luas dan memiliki ketebalan densitas yang seragam, pembacaan gravitasi akan mengalami peningkatan akibat tarikan material di antara stasiun dan datum. Persamaan koreksi *Bouguer* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} BC &= 2\pi G \rho h \\ BC &= 0.04188 \rho h \end{aligned} \quad (19)$$

3.5.6. Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

oreksi ini dilakukan karena kondisi topografi di sekitar titik pengamatan tidak selalu teratur, dan hal ini dapat mempengaruhi nilai gaya berat yang diukur. Sebagai contoh, jika ada bukit di sekitar daerah pengukuran, bukit tersebut dapat menciptakan medan yang menekan gravimeter, sehingga meningkatkan nilai percepatan gaya berat. Sebaliknya, keberadaan lembah dapat memberikan efek

penurunan nilai pengukuran gaya berat. Koreksi terhadap medan ini diperoleh melalui pengolahan data menggunakan *Hammer Chart*. (Telford., dkk, 1990).

3.5.7. *Complete Bouguer Anomaly (CBA)*

Hasil nilai Gayaberat yang telah dilakukan koreksi-koreksi gravitasi diatas, kemudian diperoleh nilai anomali yang disebut *Complete Bouguer Anomaly (CBA)*. Nilai anomali ini merupakan penjumlahan nilai *Simple Bouguer Anomaly* dengan nilai koreksi *terrain*. Nilai CBA masih berupa campuran dari anomali regional dan Anomali Residual yang disebabkan akibat variasi kerapatan massa batuan. Untuk memperoleh nilai CBA yaitu dilakukan dengan persamaan berikut:

$$CBA = SBA + TC \quad (20)$$

Dimana :

CBA : *Complete Bouguer Anomaly* (mGal)

SBA : *Simple Bouguer Anomaly* (mGal)

TC : *Terrain Correction* (mGal)

Anomali Bouguer yang terukur adalah selisih antara nilai gravitasi yang terukur dengan gravitasi bumi secara teoritis pada suatu titik pengamatan tertentu, hal tersebut mencerminkan variasi kerapatan massa di suatu daerah. Anomali yang bernilai positif menunjukkan adanya kontras densitas yang lebih besar dari densitas rata-rata batuan di lingkungannya, sementara anomali dengan nilai negatif menunjukkan kontras densitas yang lebih rendah.

3.6. **Metode Parasnis**

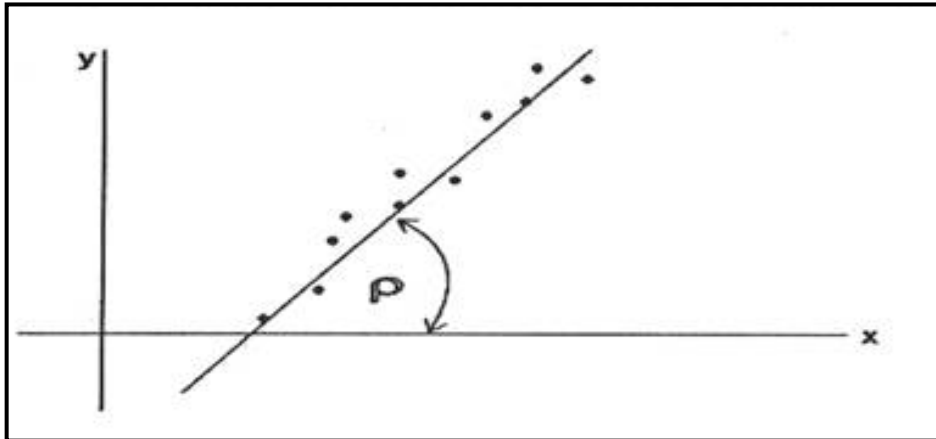
Penentuan densitas permukaan Bouguer dapat menggunakan dengan metode parasnis yang mengestimasi rapat massa metoda ini diturunkan dari anomali Gayaberat dituliskan sebagai berikut :

$$CBA = g_{obs} - g_L + 0.3085h - 2\pi\gamma\rho h \quad (21)$$

Dimana suku terakhir bagian kanan adalah koreksi medan dengan c nilai koreksi medan sebelum dikalikan dengan rapat massa. Dari persamaan tersebut didapat :

$$(g_{obs} - g_L + 0,3085h) = (2\pi\gamma h)\rho \text{ atau } y = \rho x \quad (22)$$

Dari persamaan tersebut, maka rapat massa ρ dapat diperoleh dari gradien garis lurus terbaik seperti diberikan pada **Gambar 5**, dimana CBA diasumsikan sebagai penyimpangan terhadap garis lurus tersebut.



Gambar 5. Grafik metode parsnis (Sarkowi, 2014)

3.7. Analisis Spektrum

Complete Bouguer Anomaly yang diperoleh dari hasil pengolahan masih berupa gabungan dari anomali regional dan Residual, sehingga diperlukan proses pemisahan anomali untuk keperluan interpretasi lebih lanjut. Sebelum melakukan proses pemisahan anomali, dilakukan analisis spektrum pada *Complete Bouguer Anomaly* untuk menentukan estimasi kedalaman anomali regional dan Residual, proses pemisahan anomali umumnya dilakukan dalam domain frekuensi. Pemisahan anomali dapat dilakukan karena benda-benda bawah permukaan memberikan respon Gayaberat spasial berdasarkan frekuensi rendah dan tinggi. Respon Gayaberat berada di domain jarak, sehingga diperlukan metode konversi data menjadi frekuensi atau bilangan gelombang (k), metode konversi ini dilakukan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), dimana persamaannya:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ikx} dx \quad (23)$$

Dimana,

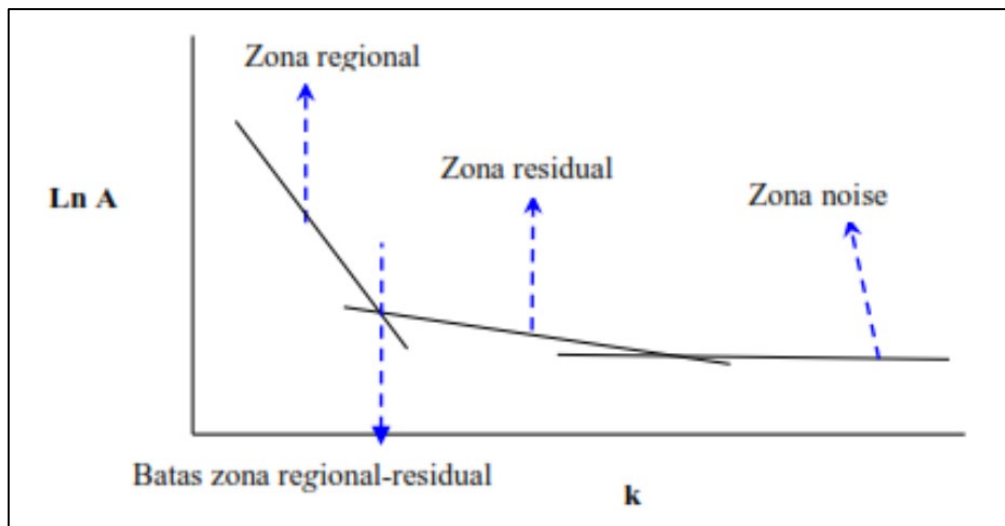
$F(k)$: Fungsi spektrum dalam domain frekuensi

k : Bilangan gelombang

$f(x)$: Fungsi spektrum dalam domain waktu dengan x adalah jarak

Proses FFT dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak geofisika, hasil dari transformasi fourier berupa kurva Radially Averaged Power Spectrum (RAPS) dengan sumbu-x berupa bilangan gelombang (wavenumber) dan sumbu-y berupa nilai Ln (power spectrum energy). Dalam penentuan kedalaman setiap anomali dari hasil transformasi fourier ditunjukkan seperti gambar 6, gambar tersebut menunjukkan terdapat 3 garis regresi linier, dimana garis pertama menunjukkan zona regional, garis kedua menunjukkan Residual dan garis ketiga menunjukkan noise. (Indrawati, dkk. 2020)

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (24)$$



Gambar 6. Kurva Ln A Terhadap k (Sarkowi, 2014).

Persamaan yang dihasilkan dapat dianalogikan dalam persamaan linier:

$$y = mx + c \quad (25)$$

Dengan menggunakan persamaan diatas didapatkan batasan anomali dengan membuat kurva hubungan nilai amplitudo (ln A) sebagai sumbu y dengan bilangan gelombang (k) sebagai sumbu x. Kedalaman bidang anomali ($z_0 - z_1$) dapat dilihat dari *slope* (gradien) dari grafik yang dihasilkan (Setiadi, 2017). Estimasi kedalaman bidang anomali (H) yaitu menggunakan persamaan berikut :

$$H = \frac{\text{slope}}{4\pi} \quad (26)$$

(Zakaria, 2021)

Berdasarkan analisis spektrum dapat diperkirakan estimasi kedalaman anomali regional dan Anomali Residual. Anomali regional merupakan anomali yang bersifat dalam dengan frekuensi rendah serta panjang gelombang yang panjang, sementara Anomali Residual adalah anomali yang bersifat dangkal dengan frekuensi tinggi serta panjang gelombang yang pendek. (Supriyadi, dkk. 2019).

3.8. *Bandpas Filter*

Pemisahan anomali diperlukan untuk melakukan interpretasi lebih lanjut, dimana Anomali Residual digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan yang merupakan target dalam penelitian ini. Filter yang dapat diaplikasikan untuk pemisahan anomali regional dan Residual adalah *Bandpass Filter*. Filter ini termasuk kedalam metode yang sederhana dan dapat memberikan hasil yang objektif.

Bandpass Filter adalah salah satu filter yang dapat meloloskan sinyal dalam rentang frekuensi tertentu. Frekuensi *cut-off* rendah dan frekuensi *cut-off* tinggi membatasi frekuensi yang diloloskan, hasil tersebut meredam sinyal yang berada dibawah dan diatas frekuensi *cut-off* rendah dan tinggi. *Bandwidth* (lebar pita) adalah istilah dari rentang frekuensi dimana berupa cakupan sinyal yang diloloskan. Nilai didapatkan dari selisih antara frekuensi *cut-off* tinggi dan frekuensi *cut-off* rendah (Setiadi, dkk., 2021).

$$BW = f_{ch} - f_{cl} \quad (27)$$

Dimana:

BW : *Bandwidth* (lebar pita) (Hz)

f_{ch} : frekuensi *cut-off* tinggi (Hz)

f_{cl} : frekuensi *cut-off* rendah (Hz)

3.9. *First Horizontal Derivative (FHD)*

First Horizontal Derivative atau turunan pertama dari anomali secara horizontal. FHD merupakan perubahan harga anomali Gayaberat dari satu titik ke titik yang mempunyai karakteristik tajam yaitu harga maksimum atau minimum pada kontak benda anomali, sehingga untuk menunjukkan batas suatu struktur

geologi. Turunan horizontal lebih mudah diaplikasikan dengan menggunakan metode turunan berhingga dan perhitungan secara diskrit. Metode FHD digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan yang dangkal maupun dalam. Amplitudo di *horizontal derivative* ditunjukkan sebagai berikut :

$$HG^{1ST} = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (28)$$

Dimana $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ adalah turunan horizontal Gayaberat pada arah x dan y.

Satuan dari HG adalah mGal.m-1 (Zaenudin dkk., 2013).

3.10. *Second Vertical Derivative (SVD)*

Second Vertical Derivative (SVD) dilakukan untuk memunculkan efek dangkal dari pengaruh regionalnya dan menentukan batas – batas struktur yang ada di daerah penelitian. Pada metode *Second Vertical Derivative Anomali Residual* ditunjukkan oleh anomali *Second Vertical Derivative* yang menggambarkan sumber – sumber anomali yang bersifat dangkal sehingga identik dengan Anomali Residual. Secara teoritis, metode ini diturunkan dari persamaan *Laplace* :

$$\nabla^2 = 0 \quad (29)$$

Untuk Metode Gayaberat :

$$\nabla^2 \Delta g(x, y, z) = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta z^2} = 0 \quad (31)$$

Untuk SVD, Persamaan 31 menjadi :

$$\frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta z^2} = - \left(\frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta y^2} \right) \quad (32)$$

Untuk data penampang, dimana y mempunyai nilai konstan maka persamaannya :

$$\frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta z^2} = - \left(\frac{\delta^2 \Delta g(x, y, z)}{\delta x^2} \right) \quad (33)$$

Berdasarkan pada Persamaan 33 menurut Zaenudin, dkk., (2013) dapat diketahui bahwa *Second Vertical Derivative* merupakan turunan orde dua

horizontal dari suatu anomali Gayaberat permukaan sama dengan negatif. Dalam grid teratur untuk data anomali Gayaberat, anomali *Second Vertical Derivative* dapat diturunkan melalui *filtering* 2D dimana persamaan konvolusinya diberikan berikut :

$$\Delta g_{svd}(\Delta x, \Delta y) \approx \iint_{-\infty-\infty}^{\infty\infty} \Delta g(x, y) F(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy \quad (34)$$

Dimana F adalah *Filter Second Vertical Derivative*, ΔG adalah anomali Gayaberat data input.

Menurut Sarkowi (2010) dalam SVD untuk menentukan patahan normal, patahan naik, patahan turun dapat dilihat dari nilai SVD_{max} dan SVD_{min} untuk menentukan patahan :

$$|SVD|_{\max} < |SVD|_{\min} = \text{Patahan Naik}$$

$$|SVD|_{\max} > |SVD|_{\min} = \text{Patahan Normal/Turun}$$

$$|SVD|_{\max} = |SVD|_{\min} = \text{Patahan Mendatar.}$$

Adapun operator koefisien *filter* SVD dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Koefisien Filter SVD

SVD Tipe Henderson & Zietz (1949)				
0,00	0,00	-0,0838	0,00	0,00
0,00	1,00	-2,6667	1,00	0,00
-0,0838	-2,6667	17,00	-2,6667	-0,0838
0,00	1,00	-2,6667	1,00	0,00
0,00	0,00	-0,0838	0,00	0,00
SVD Tipe Elkins (1951)				
0,00	-0,0833	0,00	-0,0833	0,00
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,00	-0,0334	-1,0668	-0,0334	0,00
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,00	-0,0833	0,00	-0,0833	0,00

SVD Tipe Rosenbach (1953)				
0,00	-0,0416	0,00	-0,0416	0,00
-0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	-0,0416
0,00	-0,75	4,00	-0,75	0,00
-0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	-0,0416
0,00	-0,0416	0,00	-0,0416	0,00

3.11. Inverse Modelling

Pemodelan inversi atau yang dikenal sebagai *Inverse Modelling* adalah suatu mekanisme di mana model dimodifikasi untuk mencapai kesesuaian antara data perhitungan dan data pengamatan secara otomatis. Keselarasan antara respons model dan data pengamatan umumnya dinyatakan melalui suatu fungsi objektif yang perlu diminimumkan. Dalam kalkulus, sebuah fungsi mencapai nilai minimum ketika turunan terhadap parameter atau variabel yang tidak diketahui sama dengan nol. Definisi ini digunakan untuk memperkirakan parameter model.. Dalam pemodelan inversi Gayaberat, menurut Wulandari, dkk., (2015) persamaan 2D untuk pemodelan 3D yang mana ditunjukkan oleh sebagai berikut :

$$\Delta g(x, y, z) = G \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho z dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (35)$$

Menurut Wulandari, dkk., (2015) $\Delta g(x, y, z)$ merupakan tarikan vertikal gravitasi di titik pada benda homogen, G adalah konstanta gravitasi, dan ρ adalah densitas batuan.

Menurut Yudistira dan Grandis dalam Rasimeng dkk. (2020) untuk mengubah persamaan 35 menjadi pemodelan inversi, digunakan perhitungan matriks kernel dimana grid pengukuran bersesuaian dengan titik tengah prisma yang terletak pada permukaan. Jika data hanya terdapat di permukaan yaitu ($z = 0$) sehingga jumlah data yaitu $N = n_x \times n_y \times 1$ dan jumlah parameter model $M = n_x \times n_y \times n_z$, di mana n_x , n_y dan n_z adalah jumlah grid dengan arah x , y dan z . Dengan menggunakan data di permukaan maka inversi linier *under-determined* ($N < M$) yang meminimumkan "norm" model menghasilkan model prisma m_e yang

dapat berfungsi sebagai sumber ekivalen 3D. Data pada level ketinggian tertentu ($z < 0$) diperoleh sebagai hasil kali sumber ekivalen 3D tersebut dengan matriks kernel untuk kontinuitas ke atas \underline{G}^U sebagai berikut :

$$d^U = \underline{G}^U + m_e \quad (36)$$

kontinuitas ke atas dilakukan pada sejumlah level ketinggian yang lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah prisma dalam arah vertikal. Dengan demikian, penggabungan data di permukaan dan hasil kontinuitas ke atas menghasilkan data dengan jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan jumlah parameter model ($N > M$). Oleh karena itu, permasalahan inversinya bersifat *over-determined* sehingga solusi inversi dinyatakan oleh :

$$\hat{m} = [\underline{G}^U + \underline{G}^T]^{-1} \underline{G}^T d \quad (37)$$

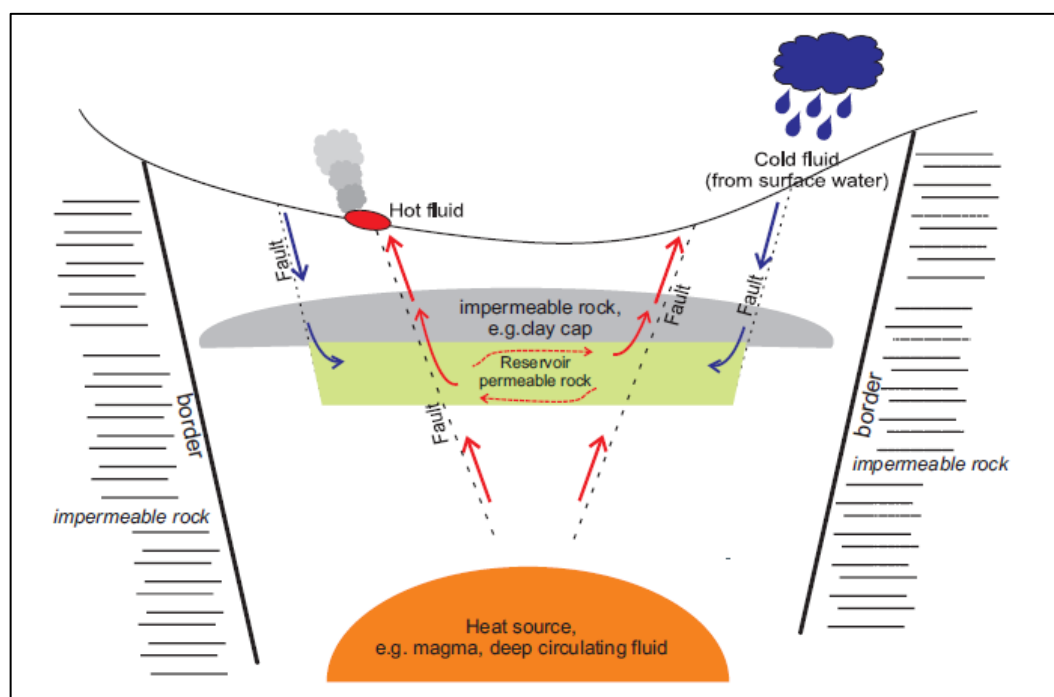
di mana matriks kernel G pada persamaan di atas melibatkan keseluruhan data atau data dalam ruang 3D (Yudistira dan Grandis dalam Rasimeng, 2020).

3.12. Sistem Panas Bumi

Torkis (2012) menyatakan bahwa panas bumi merupakan energi panas yang terdapat di dalam kerak bumi. Panas bumi terkandung dalam air panas, uap air, dan batuan bersama dengan mineral dan gas yang tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Untuk memanfaatkannya, diperlukan proses penambangan. Panas bumi menyediakan sumber energi bersih yang dapat diperbarui secara berkelanjutan. Sumber daya energi panas bumi dapat ditemukan pada air atau batuan panas di dekat permukaan bumi hingga beberapa kilometer di bawah permukaan. Bahkan, sumber panas yang ekstrim dapat ditemui pada batuan yang mencair atau magma yang berada lebih dalam lagi (Suharno, 2012). Secara umum panas bumi merupakan suatu bentuk energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung didalamnya. Sistem panas bumi adalah suatu sistem yang memungkinkan terjadinya fluida dari daerah meteoric recharge ke dalam reservoir yang berada di atas sumber panas atau *heat source*.

Gambar 7 menggambarkan sistem panas bumi, dimana struktur seperti rekahan dan patahan di permukaan memungkinkan air untuk masuk ke dalam pori-

pori batuan. Air ini kemudian menembus ke bawah dan ke samping selama terdapat celah yang memungkinkan aliran air. Saat air mencapai sumber panas, temperaturnya meningkat. Jika suhu air tinggi, sebagian air akan menguap sementara sebagian tetap cair. Perpindahan panas melalui konveksi terjadi karena gaya apung. Meskipun air memiliki kecenderungan alami untuk bergerak ke bawah karena gravitasi, kontak dengan sumber panas menghasilkan perpindahan panas, menyebabkan air menjadi lebih ringan. Seiring peningkatan suhu, volume dan tekanan air meningkat. Fluida panas akan menekan batuan di sekitarnya untuk mencari celah atau jalan keluar, melepaskan tekanan. Karena tekanan di permukaan lebih rendah daripada di bawah permukaan, air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun, menciptakan sirkulasi air atau arus konveksi.



Gambar 7. Konseptual Sistem PanasBumi (Santoso, 2004).

Ditinjau dari sistem panas bumi, reservoir panas bumi di Indonesia dapat dikenali melalui munculnya gas dan mata air panas. Mata air panas umumnya terdapat dalam batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas tinggi, yang sering disebut sebagai zona permeabel. Karakteristik khas dari zona permeabel adalah nilai anomali resistivitas yang umumnya rendah. Suatu daerah dapat dianggap memiliki sistem panas bumi jika memenuhi syarat-syarat berikut:

3.12.1. Fluida Panas Bumi

Tipe-tipe fluida panas bumi yaitu :

1. *Magmatic Water*

Yaitu air yang berasal dari magma, yang dimana terjadi saat magma bersatu dengan air *meteoric* atau air dari material sedimen.

2. *Meteoric Water*

Yaitu air yang berada pada lingkungan atmosfera.

3. *Connate Water*

Yaitu fosil air yang berhubungan dengan atmosfera pada saat periode geologi yang panjang. Air ini tertutup oleh formasi batuan yang tebal dalam cekungan sedimen.

4. *Juvenile Water*

Merupakan air yang berasal dari magma yang kemudian menjadi bagian dari hidrosfera (Moehadi, 2009).

3.12.2. Sumber Panas (*Heat Source*)

Sumber panas dalam sistem panas bumi terdiri dari intrusi batuan, dapur magma, atau gradien temperatur yang dimana semakin meningkat. Sumber panas (*heat source*) berasal dari intrusi batuan dan magma yang biasanya ditemukan pada gunungapi vulkanik. Magma sebagai sistem panasbumi biasanya terjadi karena proses pelelehan pada mantel atau penurunan pada temperatur sebagai masuknya air dari permukaan bumi saat proses subduksi (Sigurdsson, 2000).

Sumber panas dapat mengalirkan panas dalam 3 proses, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Secara umum perpindahan panas yang terjadi di kerak bumi hanya terjadi 2 tipe, yaitu : konduksi yang merupakan perpindahan panas yang melibatkan zat padat, dan konveksi merupakan perpindahan panas yang melibatkan fluida seperti liquid dan gas. Proses konveksi diawali dengan perbedaan gradient panas yang dapat menyebabkan perbedaan densitas fluida. Akibat dari pengaruh medan gravitasi, perbedaan densitas dapat membuat fluida yang bertemperatur tinggi naik ke permukaan. Sedangkan fluida yang lebih dingin akan turun ke bawah.

Pada proses konveksi membutuhkan porositas dan permeabilitas yang besar karena adanya pergerakan fluida. Parameter tersebut dapat mengalirkan dan memindahkan energi panas. Apabila nilai porositas dan permeabilitas rendah maka perpindahan panas dilakukan melalui proses konduksi. Perbedaan laju perpindahan panas melalui proses konveksi dan konduksi dapat menyebabkan perubahan sistem panas bumi (Gupta dan Roy, 2007).

3.12.3. Reservoir Panasbumi (*Geothermal Reservoir*)

Reservoir panasbumi merupakan yang dapat menyimpan dan mengalirkan fluida termal (uap dan air panas). Reservoir biasanya merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik. Porositas digunakan dalam menyimpan fluida termal, sedangkan permeabilitas berperan dalam mengalirkan fluida. Reservoir panasbumi biasanya dikelilingi oleh batuan yang memiliki permeabilitas sangat kecil (*impermeable*), lapisan ini dikenal sebagai lapisan penudung atau *caprock*. Batuan penudung umumnya terdiri dari mineral-mineral lempung yang mengikat air namun sulit untuk meloloskannya. Mineral-mineral tersebut mengandung ikatan hidroksil dan ion-ion seperti Ka dan Ca sehingga lapisan tersebut menjadi konduktif (Torkis, 2012).

3.12.4. Batuan Penudung (*Caprock*)

Batuan penudung dalam sistem panasbumi merupakan batuan yang digunakan untuk menjaga agar panas yang berasal dari reservoir tidak keluar ke permukaan. Batuan penudung memiliki karakteristik permeabilitas rendah, tebal, dan berada di atas reservoir. Pada batuan ini sering terjadi proses alterasi yang dapat disebabkan oleh interaksi fluida saat melewati batuan yang menjadi indikasi terbentuknya sistem panas bumi (Torkis, 2012). Batuan penudung memiliki permeabilitas yang rendah dan berada di atas reservoir.

3.12.5. Manifestasi Sistem Panas Bumi

Suharno, (2012) menyatakan Beberapa manifestasi permukaan yang menunjukkan gejala adanya sistem panas bumi di permukaan, yaitu :

1. Mata Air Panas (Hot Spring)

Batuan dalam dapur magma memiliki kemampuan untuk menyimpan panas dalam rentang waktu yang dapat mencapai ribuan tahun. Ketika air tanah menembus dan bersentuhan dengan magma, air tersebut akan dipanaskan. Air yang telah dipanaskan ini cenderung naik ke permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Air panas yang muncul ke permukaan disebut sebagai mata air panas. Jika jumlah air panas yang keluar cukup besar, mata air panas tersebut dapat membentuk kolam air panas.

2. Fumarola dan Solfatara

Fumarola adalah lubang asap tempat keluarnya gas-gas yang dihasilkan oleh aktivitas gunung api. Fumarole umumnya ditemukan di sekitar gunung api atau pada rekahan-rekahan di kerak bumi. Di sini, gas-gas panas dan uap air dapat melepaskan diri ke atmosfer. Sedangkan solfatara adalah jenis khusus dari fumarola yang mengeluarkan gas belerang. Solfatara sering kali menyertai aktivitas hidrotermal di daerah vulkanis, dan gas belerang yang dikeluarkan dapat memberikan karakteristik aroma belerang yang khas. Solfatara sering ditemukan di sekitar daerah vulkanis yang memiliki kandungan belerang yang tinggi.

3. Geysir

Geysir adalah fenomena di mana air tanah tersembur keluar sebagai kolam uap dan kolam air panas. Kolam tersebut terbentuk oleh celah yang berisi air dari kawah bawah tanah, yang kemudian didorong ke atas oleh tekanan uap dari lapisan bawah permukaan bumi. Semakin banyak air yang terkumpul di dalam celah, semakin tinggi tekanan uap air yang menekan dari bawah, sehingga semakin tinggi pula air yang tersembur ke atas ketika terjadi letupan atau erupsi. Proses ini melibatkan pemanasan air di dalam bumi, pembentukan uap, dan akhirnya, pelepasan tekanan yang menyebabkan air tersembur ke atas dengan gaya yang cukup kuat.

4. Lumpur Panas

Lumpur panas biasanya mengandung uap panas yang tidak terlalu banyak dan gas CO₂ yang tidak mudah menjadi cair.

5. Kawah

Kawah merupakan suatu bentuk depresi berbentuk corong terbuka ke atas yang merupakan tempat disembarkannya tepra gas-gas, lava dan gas-gas.

6. Batuan Alterasi

Batuan alterasi merupakan batuan yang terbentuk melalui interaksi antara batuan asal dengan fluida panasbumi. Proses pembentukan batuan alterasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH, dan durasi interaksi (Browne, 1998). Interaksi antara batuan dan air klorida yang berasal dari reservoir dalam (*deep chloride water*) dapat menghasilkan mineral-mineral hidrothermal, yang juga disebut mineral sekunder. Mineral-mineral ini terbentuk pada suhu tinggi dan termasuk epidote, chlorite, dan wairakit. Mineral seperti adularia dan albit, di sisi lain, cenderung terbentuk di lokasi yang memiliki permeabilitas tinggi. Dengan demikian, batuan alterasi mencerminkan proses perubahan yang terjadi pada batuan asal akibat interaksi dengan fluida panasbumi, dan komposisi mineralnya dapat memberikan informasi berharga tentang lingkungan geotermal dan kondisi di bawah permukaan bumi.

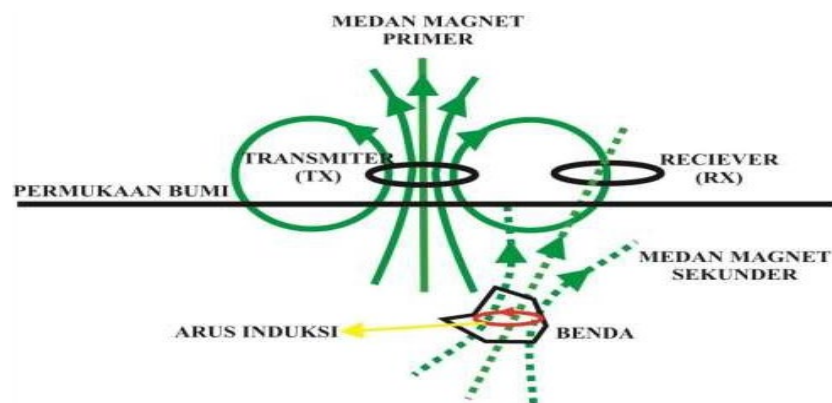
3.13. Metode Magnetotelurik

Metode Magnetotelurik (MT) adalah metode pasif berupa sounding elektromagnetik (EM) yang mengukur medan listrik (E) dan medan magnet alami (H) yang mengalami perubahan sepanjang waktu. Perbandingan antara medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus disebut impedansi, yang mencerminkan sifat kelistrikan suatu medium, termasuk konduktivitas dan resistivitas. Kurva sounding dihasilkan oleh berbagai peristiwa, seperti petir atau interaksi antara solar wind dengan lapisan magnetosfer bumi. Metode MT menggambarkan kurva resistivitas semu terhadap frekuensi melalui korelasi nilai impedansi, medan magnet, dan medan listrik, yang mencerminkan variasi konduktivitas listrik terhadap kedalaman. Oleh karena itu, secara umum, metode

MT dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai struktur tahanan jenis bawah permukaan bumi. (Simpson dkk., 2005).

3.14. Prinsip Elektromagnet

Metode MT melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan dengan hingga ratusan kilometer. Cakupan nilai frekuensi dari medan elektromagnetik alami yang terekam sekitar 300 – 0,001 Hz.



Gambar 8. Konsep Gelombang Elektromagnetik (Wachisbu, dkk., 2015)

Medan elektromagnetik alami berfungsi sebagai sumber dalam metode Magnetotelurik (MT) dengan menyampaikan variasi terhadap waktu saat mencapai permukaan bumi. Medan ini menghasilkan anomali di bawah permukaan bumi, yang kemudian menyebabkan pembentukan arus eddy (arus telurik). Arus eddy ini merupakan respons terhadap medan elektromagnetik sekunder. Selanjutnya, penerima (RX) akan merekam total medan elektromagnetik, yang merupakan hasil penjumlahan antara medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder. Dengan demikian, kita dapat memperoleh nilai medan magnet dan medan listrik terhadap waktu melalui perekaman ini.

Bumi memang memiliki medan magnet yang stabil, tetapi metode Magnetotelurik (MT) memerlukan perubahan medan magnet terhadap waktu untuk menghasilkan medan listrik. Perubahan ini dapat dihasilkan oleh sumber medan elektromagnetik dengan frekuensi lebih dari 1 Hz, seperti aktivitas meteorologi,

termasuk kilat (cahaya petir). Sinyal kilat dalam bentuk cahaya dikenal sebagai sferics, yang menjalar sebagai gelombang listrik transversal (TE), gelombang magnetik transversal (TM), atau kombinasi gelombang listrik dan magnetik transversal (TEM) dalam waveguide. Di sisi lain, interaksi antara solar wind dengan lapisan Magnetosphere dan Ionosphere bumi dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi kurang dari 1 Hz. Solar wind merupakan aliran yang kontinu dari plasma, mengandung sebagian besar proton dan elektron yang dipancarkan dari matahari. Ketika solar wind berinteraksi dengan medan magnet terestrial di magnetosfera, proton dan elektron akan berdefleksi ke arah yang berlawanan, menyebabkan timbulnya medan listrik. (Simpson, dkk., 2005).

Dalam Metode MT yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang erat kaitanya dengan Hukum Maxwell, berikut adalah Hukum Maxwell :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\varepsilon} \quad (38)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (39)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (40)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (41)$$

dimana \vec{E} merupakan medan listrik, (*Volt/m*) \vec{B} adalah fluks atau induksi magnetik (*Weber/m²* atau *Tesla*), \vec{H} adalah medan magnet (*Ampere/m*), j adalah rapat arus (*Ampere/m²*), Q adalah rapat muatan listrik (*Coulomb/m³*), ε adalah konstanta dielektrik (*F/m*), μ adalah permeabilitas magnetik (*H/m*) dan σ adalah konduktivitas (*S/m*).

Diketahui jika $\vec{J} = \vec{E}\sigma$ dan juga $\vec{B} = \vec{H}\mu$ dengan ruang hampa $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m dan $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ H/m . Dengan menggunakan *curl* dari Persamaan 48 dan disubstitusikan pada Persamaan 41 sehingga muncul persamaan kedua dari \vec{E} yaitu :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (42)$$

Untuk daerah yang konduktivitas tinggi atau konduktif efek dari perpindahan *current* atau *displacement current* diabaikan, sehingga Persamaan 42 diatas dapat ditulis ulang menjadi:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (43)$$

Bumi memiliki sifat yang diasumsikan konduktif, sehingga dapat digunakan dalam analisa MT. Pada MT atau secara umum gelombang elektromagnetik yang sinusoidal yang bervariasi terhadap waktu, kuat medan listrik dirumuskan dalam persamaan $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t}$, dan jika disubstitusikan ke dalam persamaan 43 maka akan menjadi :

$$\nabla^2 \vec{E} + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0 \quad (44)$$

EM dapat bertransformasi menjadi panas seiring dengan perambatan kedalaman, dimana pengurangan energy EM terjadi secara eksponensial. Karena atenuasi maka Persamaan 44 dapat diubah menjadi persamaan berikut :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0 \quad (45)$$

Dengan persamaan $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz}$ dengan \vec{E}_0 adalah kuat medan listrik pada permukaan, maka persamaan yang akan didapatkan ya itu :

$$\vec{E} k^2 + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0 \quad (46)$$

Dan penyelesaian variable k adalah:

$$k = \pm 1 - i \sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} \quad (47)$$

k adalah bilangan kompleks yang menyatakan kondisi dari medium, sehingga perambatan gelombang elektromagnetik di dalam medium dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t} e^{\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} z} e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} z} \quad (48)$$

Pada persamaan 48 nilai $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} z}$ adalah peluruhan dari amplitude gelombang pada arah z atau lebih dikenal *skin depth*. *skin depth* sendiri adalah jarak (δ) jarak kuat medan listrik teratenuasi oleh $1/e$ dari kuat medan listrik

awal. Selama nilai $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}} = e^{-1}$ maka $\delta = e^{\sqrt{\frac{2}{i\omega\mu\sigma}}}$ atau dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (49)$$

Karena $\omega = 2\pi f$, dan $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ dan $\sigma = \frac{1}{\rho}$ maka persamaan akan tertulis sebagai berikut:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (50)$$

Dimana ρ adalah resistivitas, pada medan magnet gelombang EM, dapat dicari dengan menggunakan cara substitusi, yaitu medan magnet dan medan listrik dengan persamaan sebagai berikut :

$$E_x = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (51)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu\sigma} \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (52)$$

Karena E dan H saling tegak lurus maka dapat dikorelasikan terhadap persamaan impedansi (z) dengan persamaan $Z = \frac{E}{H}$ maka impedansi dari Persamaan 51 dan 52 yaitu :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{E_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{i\omega\mu_0\rho} \quad (53)$$

Sehingga apparent resistivity dari persamaan 53 yaitu :

$$\rho_{xy} = \frac{1}{i\omega\mu\sigma} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (54)$$

Persamaan diatas adalah persamaan resistivitas semu (Xiao, 2004).

Tabel 3. Nilai resistivitas batuan (Telford, 1990).

Jenis batuan/mineral	Resistivitas
<i>Air</i> (udara)	~
<i>Sea water</i> (asin)	0,2 Ωm
<i>Ground water</i> (air tanah)	0,5 – 300 Ωm
<i>Clay</i> (lempung)	1 – 100 Ωm
<i>Sand</i> (pasir)	1 – 1000 Ωm
<i>Sandstone</i> (batu pasir)	1 – 10 ⁸ Ωm

<i>Alluvium</i> (aluvium)	10 – 800 Ωm
<i>Gravel</i> (kerikil)	100 – 600 Ωm
<i>Andesite</i> (andesit)	$1,7 \times 10^2$ (dry) – $4,5 \times 10^4$ (wet) Ωm
<i>Basalt</i> (basal)	200 – 10×10^4 Ωm
<i>Limestone</i> (gamping)	500 – 10×10^3 Ωm
<i>Quartz</i> (kuarsa)	500 – 8×10^6 Ωm

3.15. *Robust Processing*

Robust Processing adalah teknik pemrosesan *statistical* dengan pembobotan dari Residual untuk mengidentifikasi dan menghapus data yang dianggap menyimpang oleh *noise non-Gaussian*. *Robust Processing* menggunakan kontribusi individual dari rata-rata nilai data untuk merendahkan bobot *outliers* iterasi selanjutnya. *Outlier* adalah data dengan nilai yang menyimpang jauh dari nilai rata-rata, umumnya data tersebut dapat dianggap sebagai *noise* sehingga *Robust Processing* dapat berperan sebagai *filter noise* awal bagi data Magnetotelurik.

Robust Processing adalah salah satu contoh teknik statistik untuk mereduksi *noise* dari data MT dan AMT. Dalam teknik ini, nilai-nilai outlier dari data akan dieleminasi.

Proses ini menggunakan bantuan aplikasi SSMT 2000. Dengan bentuk dari *Robust Processing* adalah sebagai berikut :

1. *No Weight* (NW), dalah perlakuan terhadap perlakuan data yang tidak membobotkan rata-rata.
2. *Rho Variance* (RV), adalah perlakuan terhadap data dengan membobotkan data bernilai tinggi menjadi lebih besar.
3. *Ordinary Coherence* (OC), dalah perlakuan terhadap data dengan memberikan nilai bobot yang lebih besar untuk data dengan nilai *error* kecil.

Pada *Robust Processing*, sesuatu yang diperhatikan adalah koherensi dari setiap bentuk *Robust Processing* yang dilakukan. Koherensi adalah variabel yang

memiliki dimensi dengan nilai kisaran 0 hingga 1 hingga 1. Untuk nilai 1 mengindikasikan sinyal koheren yang sempurna (Simpson, dkk., 2003).

3.16. Koreksi *Static Shift*

Biasanya kurva *TE* dan *TM* selalu berimpit. Namun pada kebanyakan kasus kurva tersebut tidak berhimpit atau disebut *shifting*. Hal ini akan menyebabkan nilai resistivitas lapisan batuan akan salah. *Koreksi Static Shift* adalah koreksi titik-titik pada kurva *TE* dan *TM* agar mendekati kurva yang seharusnya, fenomena ini disebabkan heterogenitas permukaan, efek topografi. Dalam metode pengukuran MT, terdapat dua metode pengukuran yang dapat membantu dalam proses pemodelan atau interpretasi tahap awal. Pertama, *Transverse Electric Mode*, yang pada komponennya menunjukkan medan listrik yang sejajar dengan arah struktur utama, dinamakan *Transverse Electric (TE) mode* atau juga disebut *E-Polarization*. Kedua, *Transverse Magnetic Mode*, yang pada komponennya menunjukkan medan magnet yang sejajar dengan arah struktur utama, dinamakan *Transverse Magnetic (TM) mode* atau disebut juga *B-Polarization*. (Simpson, dkk., 2005).

3.17. Inversi *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)*

Inversi *Non Linear Conjugate Gradient (NLCG)* merupakan jenis inversi dapat digunakan untuk meminimalisir *objective functional* (S). Fungsi objek adalah jumlah beban *weigthed* dari model fungsi objektif serta *data misfit*.

$$S = \Phi_d + r\Phi_m \quad (55)$$

Parameter regulasi yang mengontrol *trade off* dan dipilih agar sama dengan nilai konsistensi *error* data. Jika nilai semakin besar maka diindikasikan model cocok dengan data. Inversi 2D untuk mengatur model fungsi objektif dan data *misfit* sebagai berikut :

$$\Phi_m = \| L(m - m_0) \|^2 \quad (56)$$

$$\Phi_d = (d - F(m))^2 R_{dd}^{-1}(d - F(m)) \quad (57)$$

Dimana L merupakan operator linier, m adalah model vektor, m_0 adalah model awal, d adalah vektor data observasi, $F(m)$ adalah operator pemodelan *forward*, R_{dd} merupakan matrik kovarian. Solusi masalah inversi dilakukan dengan

iteratif, metode NLCG mengaplikasikan secara langsung minimalisasi dari *objective functional* (S), dengan persamaan yaitu:

$$m^{i+1} = m^i + a^{i+1}h^{i+1} \quad (58)$$

Persamaan 58 adalah arah pencarian yang diperoleh dari metode NLCG (*Nonlinear Conjugate Gradient*) dan dihitung untuk meminimalkan nilai S dengan *line search*. Kesalahan rata-rata antara data prediksi dan data observasi direpresentasikan oleh RMS (*root mean square*). RMS Error untuk program inversi 2D dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$RMS = \sqrt{\frac{(d - F(m))^T R_{dd}^{-1} (d - F(m))}{n}} \quad (59)$$

Efisiensi komputasi algoritma ini dikontrol oleh jumlah literasi (N_{cg}). N_{cg} fungsi dari λ . Seangkan nilai λ yang besar akan mengakibatkan N_{cg} yang kecil dan begitu sebaliknya (Limswipin dkk, 2018).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Waktu Dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian ini sebagai berikut :

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika
Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Alamat : Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Gedong Meneng, Kec.
Rajabasa, Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung
35142.

Tanggal : 1 Juni – 8 Desember 2023

Adapun jadwal pelaksanaan penelitian ini terdapat pada Tabel 4.

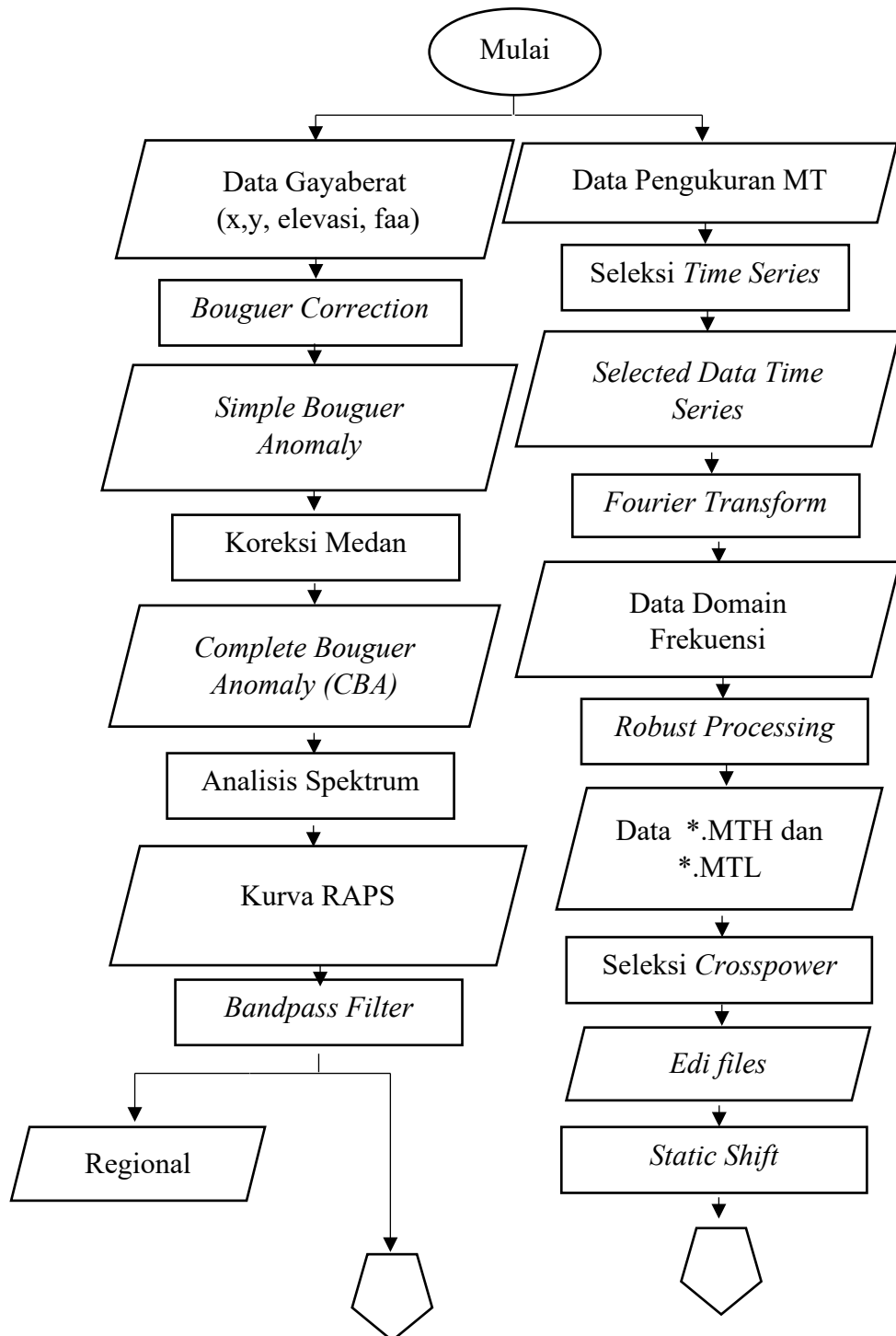
4.2. Alat Dan Bahan Penelitian

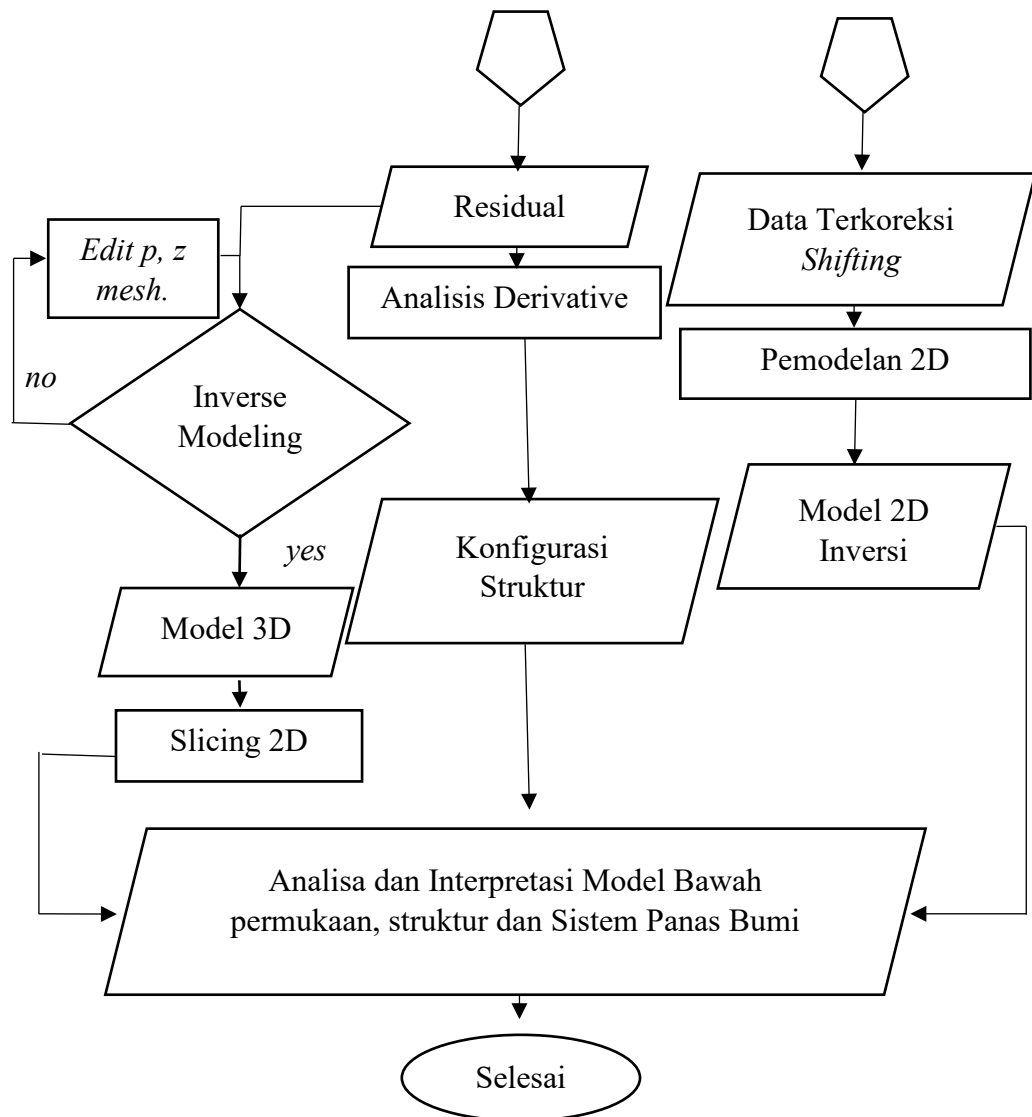
Alat dan Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Data GGMPPlus Gayaberat lapangan panasbumi Maritaing.
2. *Raw data* dan kaliberasi Magnetotelurik panasbumi Maritaing.
3. Laptop.
4. *Software* Matlab R2007b.
5. *Software* SSMT2000.
6. *Software* MTEditor.
7. *Software* WinGLink.
8. *Software* Geosoft Oasis Montaj.
9. *Software* ArcMap 10.8.

4.3. Diagram Alir

Penelitian adalah sebagai berikut pada Gambar 8.





Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

4.4. Prosedur Penelitian

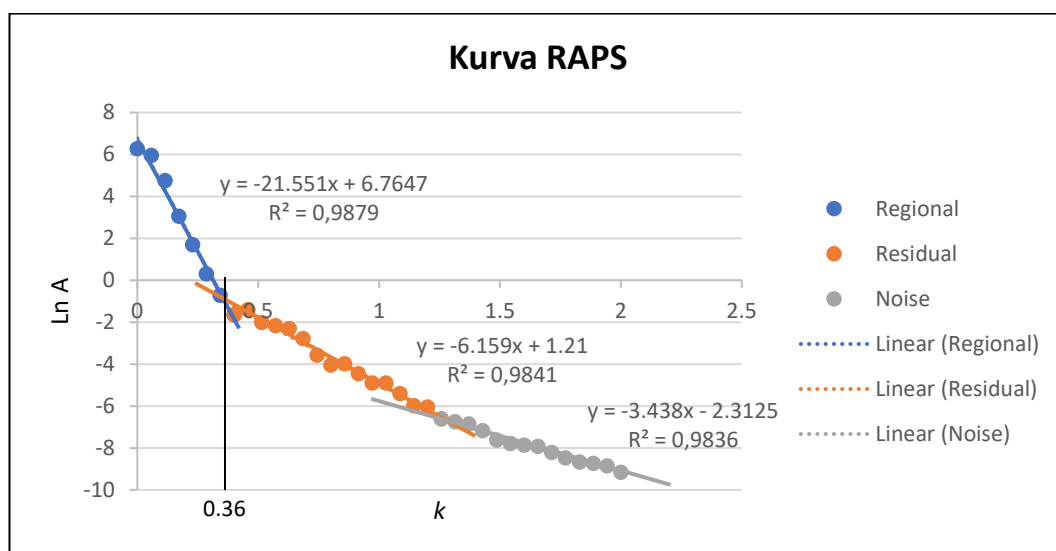
4.4.1. Tahapan Pengolahan Data Metode Gayaberat

1. Koreksi Data Metode Gayaberat

Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data *open source* GGMPPlus dengan nilai nilai X, Y, elevasi, dan FAA (*Free Air Anomaly*). Data tersebut dilakukan koreksi *terrain*, koreksi *Bouguer*, dan koreksi medan sehingga didapatkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA).

2. Analisis spektrum

Complete Bouguer Anomaly (CBA) merupakan suatu nilai total dari anomali yang disebabkan adanya pengaruh rapat masa batuan dari pusat inti bumi sehingga ke permukaan bumi dapat dipisahkan menjadi anomali regional, dalam tahap ini dilakukan *Fourier Transform* yang mengubah dari data spasial berupa domain waktu menjadi domain frekuensi, pada tahap *Fourier Transform* ini dilakukan menggunakan *software Oasis Montaj 8.4*. Untuk memudahkan menentukan zona *cut-off* dengan melakukan pembuatan kurva nilai k terhadap $\ln A$.



Gambar. Kurva *Radially Average Power Spectrum* (RAPS)

Penentuan titik *cut-off* dilakukan dengan melihat trend atau kemiringan dari kurva tersebut, sehingga didapatkan nilai gradien dari setiap anomali. Setelah mendapatkan nilai gradien, maka dilakukan kalkulasi

untuk mendapatkan nilai kedalaman setiap anomali. Berikut merupakan Tabel estimasi kedalaman dari pemisahan anomali regional dan Residual.

Tabel 5. Estimasi kedalaman berdasarkan kurva RAPS

Zona	Gradien	Depth (km)
Regional	21,55	1,72
Residual	6,159	0,49
Noise	3,438	0,27

3. Analisis *Derivative*

Analisis *derivative* dilakukan untuk menentukan batas dan jenis patahan untuk mendapatkan analisis bawah permukaan mengetahui sebaran patahan yang ada pada daerah penelitian. Dalam penelitian ini dilakukan adalah *First Horizontal Derivative (FHD)* dan *Second Vertical Derivative (SVD)*. Pada proses ini dilakukan sayatan yang saling tegak lurus terhadap dugaan patahan dengan melihat nilai minimum dan maksimum pada peta FHD, sedangkan nilai nol untuk peta SVD.

4. Pemodelan Inversi Bawah Permukaan

Pemodelan pada penelitian ini digunakan pemodelan 3D *inverse modelling* yang berasal dari data Residual yang dilakukan menggunakan *software Grablox 1.7*. Sedangkan *software Surfer* digunakan untuk mendapatkan data batas max grid, min grid, dan spasi blok yang nantinya akan dimasukkan kedalam pengaturan *Grablox* sehingga akan mendapatkan *output* berupa data x, y, *depth*, dan *density*. Pemodelan yang dihasilkan perlu di cocokkan dengan didasarkan pada referensi geologi permukaan, struktur, dan stratigrafi pada daerah penelitian.

4.4.2. Tahapan Pengolahan Data Metode Magnetotelurik

1. Pemilihan *Time Series*

Pemilihan *Time Series* dilakukan untuk memilih data Magnetotelurik dari waktu yang efektif dari pengukuran sinyal, dan pemilihan ini guna menghindari noise pada pengukuran seminimum mungkin dimana data yang dimasukan berupa komponen medan magnet dan medan listrik dalam arah x , y , dan z (E_x , E_y , H_x , H_y , dan H_z).

2. *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *Robust Processing*.

Pada pengolahan data *pemilihan Time Series*, data yang diperoleh berupa domain waktu terhadap medan magnet dan medan listrik. Proses FFT ini mengubah data pengukuran dari domain waktu menjadi domain frekuensi, dan dilakukan *Robust Processing* untuk menghilangkan nilai data *outliers* atau data yang menyimpang. *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *Robust Processing* dilakukan dengan software SSMT2000.

3. Seleksi *Crosspower*.

Pengolahan seleksi *Crosspower* yaitu untuk menentukan titik dari TE dan TM agar membentuk tren yang sesuai, dengan memastikan data yang dianggap *noise* dan mengaktifkan data yang dianggap sinyal sehingga membentuk kurva yang sesuai dengan keadaan bawah permukaan.

4. Koreksi *Static Shift* dan Pemodelan Inversi 2D.

Koreksi *Static Shift* adalah koreksi memindahkan kurva yang mengalami *shifting* atau TE dan TH tidak berhimpit akibat efek vertikal, topografi pada saat akuisisi data. Koreksi ini dilakukan sebelum pemodelan, Pemodelan yang dilakukan yaitu dengan inversi 2D dengan kurva *bostick*. *Koreksi Static Shift* dan pemodelan inversi 2D dilakukan dengan *Software WinGlink*.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan, pemodelan dan interpretasi Gayaberat dan Magnetotelurik yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis anomali Bouguer Residual dan gradien anomali Bouguer terdapat struktur sesar yang berada pada daerah sekitar mata air panas Kura, dimana sesar ditunjukkan dengan SVD bernilai 0 dan FHD bernilai minimum maksimum.
2. Berdasarkan model gayaberat zona area prospek reservoir terdapat pada densitas rendah disekitar mata air panas Kura dengan rentang densitas 1,8-2,3 gr/cm³.
3. Berdasarkan model magnetotelurik zona area prospek reservoir terdapat pada resistivitas sedang dengan rentang resistivitas 21-112 Ω m, nilai resistivitas rendah diidentifikasi sebagai caprock area dengan rentang resistivitas 8-18 Ω m, sedangkan resistivitas tinggi diidentifikasi sebagai sumber panas dengan resistivitas >112 Ω m.
4. Daerah prospek reservoir panasbumi Maritaing berdasarkan korelasi data geologi, geokimia, Gayaberat serta data Magnetotelurik terletak disekitar bukit Karitemang, struktur batuan daerah ini terdapat aliran piroklastik Karitemang, lava Karitemang dan juga batuan sedimen. Daerah tersebut terdapat manifestasi air panas Kura dan juga sesar Depresi Maritaing yang diduga sebagai pengontrol terjadinya manifestasi mata air panas Kura.

6.2. Saran

Perlu dilakukan studi pengeboran eksplorasi untuk mendukung hasil penelitian bawah permukaan dan menghitung potensi energi panasbumi di daerah penelitian agar dapat dilakukan studi kelayakan untuk pengembangan lapangan panasbumi.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Elkins, T.A. 1951. *The Second Derivative Method of Gravity Interpretation*. Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.
- Gaffar, E.Z., Dadan, D.W. dan Djedi, S.W. 2007. Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan G. Ungaran Jawa Tengah, dan Implikasinya Terhadap Struktur Panasbumi. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 8(2), 98-118.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.
- Indrawati, L. D. I., Nurwidyanto, I. 2020. Comparative Results of Regional and Residual Anomalies with the Upward Continuation, Moving Average, and Polynomial Methods for Magnetic Data. *Journal of Physics and Its Applications*, 2(2), 90-93.
- Kirbani, SB. DR. 2001. *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- KESDM. 2017. *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 2*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Limswipin, E. N., Rasimeng, S., Karyanto, Indragiri, M. N. 2018. Inversi 2D Data Magnetotelurik Untuk Mengetahui Keberadaan Hidrokarbon Daerah Bula, Maluku. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(3).

- Longman, I. M. 1959. Formula for Computing the Tidal Acceleration Due to the Moon and Sun. *Journal Geophysics Research*, 64(1).
- Lowrie, W. 2007. *Fundamentals of Geophysics, 2nd ed. x*. Cambridge University. Cambridge.
- Octonovrilna, L. 2009. Analisa Perbandingan Anomaly Gravitasi Dengan Persebaran Intrusi Air Asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 10(1).
- Panjaitan, S. 2010. Geologi Daerah Panas Bumi Ulubelu Tanggamus Lampung Berdasarkan Analisis Metode Magnetotelurik (MT). *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 20(2).
- Rasimeng, S., Tarigan, J. L., Ferucha, I. dan Robbani, M. A. 2020. Identification Of Geothermal Reservoir Based On 3d Modeling Of Data Anomaly Magnetic Residual Reduction To Pole In The Region Of Geothermal Prospect Villamasin East Oku. *Prosiding SEG International Exposition and 90th Annual Meeting 2020*.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester John Wiley and Sons Ltd.
- Rosid, S. 2005. *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Universitas Indonesia. Depok.
- Santoso, D. 2004. *Eksplorasi Energi Geothermal*. Penerbit ITB. Bandung.
- Sarkowi, M. 2010. Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16(2).
- Sarkowi, M. 2014. *Eksplorasi Gaya Berat*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Serway, Raymond, A., John, W. 2009. *FISIKA Untuk Sains dan Teknik Buku 1 Edisi 6*. Salemba Teknika. Jakarta.
- Setiadi, I. 2017. Basement Configuration and Delineation of Banyumas Sub-Basin Based On Gravity Data Analysis. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 18(2), 67-76.

- Setiadi, I., Aryanto, N. D., Nurdin, N. 2021. Delineasi Batuan Granit dan Sedimen Daerah Bintang dan Sekitarnya, Kepulauan Riau Berdasarkan Analisis Data Gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 22(3), 143-152.
- Setiawan, D. I., Wibowo, A. E. A., Hermawan, D. 2015. Geologi dan Geokimia Panas Bumi Daerah Maritaing Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, Pusat Sumber Daya Geologi.
- Simpson, F., Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- Suharno, 2012. *Buku Ajar Sistem Panas Bumi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Supriyadi, S., Khumaedi, K., Sugiyanto, S., Setiaswan, F. 2019. Pemisahan Anomali Regional dan Residual Data Gayaberat Studi Kasus di Kota Lama Semarang. *Physics Education Research Journal*, 1(1), 29-36.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherrif, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University. USA.
- Torkis, R. 2012. Analisa dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Metode Gayaberat di Daerah Prospek Panas Bumi Gunung Lawu. *Skripsi*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Wachisbu, M. I. M., Santosa, B. J. 2015. Pemodelan Data Magnetotelurik dengan Remote Reference untuk Eksplorasi Cekungan Migas Studi Kasus: Lapangan Em-4. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(1), 17-20.
- Wulandari, I. F., Setiawan, A. 2015. Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap. *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(57), 6-12.
- Xiao, W. 2004. *Magnetotelluric Exploration In Rocky Mountain foothills*. Alberta. University of Alberta.
- Zaenudin, A., Sarkowi, M., Suharno. 2013. Pemodelan Sintetik Gradien Gayaberat Untuk Identifikasi Sesar. *Seminar Nasional Sains & Teknologi V*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung.

Zakaria, M.F., 2021. Analisis Kedalaman Sumber Anomali Gravitasi menggunakan Spectral Statistical Technique di daerah Godean Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah Fisika*. FMIPA Universitas Lambung Mangkurat