

**IDENTIFIKASI STRUKTUR SESAR DAN LOKASI DAERAH  
RESERVOIR BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYABERAT  
PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY UMPU**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ARNAS HARDIANTO  
1815051028**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

**IDENTIFIKASI STRUKTUR SESAR DAN LOKASI DAERAH  
RESERVOIR BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYABERAT  
PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY UMPU**

**Oleh**

**ARNAS HARDIANTO**

**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 STRUKTUR SESAR DAN LOKASI DAERAH RESERVOIR BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYABERAT PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY UMPU

Oleh

**ARNAS HARDIANTO**

Telah dilakukan penelitian dengan menggunakan metode gayaberat di daerah Way Umpu, Kabupaten Way Kanan, Provinsi Lampung. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur sesar dan lokasi reservoir panas bumi Way Umpu berdasarkan analisis FHD dan SVD, pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D. Data yang digunakan merupakan data Anomali Bouguer Lengkap. Anomali regional dan anomali residual dipisahkan menggunakan metode *moving average* dengan lebar jendela 17. Pada anomali residual digunakan dalam analisis derivatif untuk mengetahui sesar serta pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D. Batas anomali Bouguer regional dan residual berada pada kedalaman 3000 m. Berdasarkan hasil analisis derivatif terdapat sesar naik pada daerah G. Remas, G. Neki, dan G. Benatan sedangkan sesar turun terdapat pada daerah manifestasi Juku Batu. Distribusi densitas bawah permukaan berdasarkan pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D berkisar antara 2,36 gr/cc hingga 2,91 gr/cc dengan zona lemah diidentifikasi sebagai batuan sedimen berusia tersier berupa batuan pasir dan lempung serta batuan breksi basalt, sedangkan zona tinggi berkaitan dengan meningginya basemen akibat intrusi batuan lava basalt. Lokasi reservoir berada di antara desa Bandar Agung - Tanjung Baru dan di antara desa Bandar Agung - Batu Api pada kedalaman 500 m - 2000 m dengan nilai densitas 2,45 - 2,65 gr/cc berupa batuan breksi basalt, sedangkan lokasi *heat source* berada di bawah Gunung Neki di bagian selatan reservoir. Posisi *heat source* menyebabkan suhu pada reservoir tidak terlalu tinggi, sehingga diperkirakan bahwa sistem panas bumi Way Umpu sebagai *water dominated system*.

**Kata kunci:** analisis derivatif, *forward modeling*, gayaberat, gradien gayaberat, inversi, panas bumi, reservoir, Way Umpu.

## **ABSTRACT**

### **IDENTIFICATION OF FAULT STRUCTURE AND RESERVOIR LOCATION BASED ON GRAVITY DATA ANALYSIS IN WAY UMPU GEOTHERMAL FIELD**

By

**ARNAS HARDIANTO**

The research has been carried out using the gravity method in the Way Umpu area, Way Kanan Regency, Lampung. This study aimed to identify the fault structure and Way Umpu geothermal reservoir based on FHD and SVD analysis, 2D forward modeling and 3D inversion modeling. The data used is Complete Bouguer Anomaly data. Regional anomaly and residual anomaly are separated using the moving average method with a window width of 17. The residual anomaly is used in derivative analysis to identify faults structure, 2D forward modeling and 3D inversion modeling. The regional and residual Bouguer anomaly boundaries are at a depth of 3000 m. Based on the results of the derivative analysis, there are reverse faults in the G. Remas, G. Neki, and G. Benatan areas, while normal faults are found in the Juku Batu manifestation area. 2D forward modeling and 3D inversion modeling obtain a density distribution between 2.36 gr/cc to 2.91 gr/cc with a low-density identified as tertiary sedimentary rocks in the form of sandstone, clay and basalt breccias, while the high-density is related to with the elevation of the basement due to the intrusion of basalt lava rocks. The reservoir is between Bandar Agung - Tanjung Baru and between Bandar Agung - Batu Api with a depth of around 500 m - 2000 m with a density value of 2.45 - 2.65 gr/cc in the form of basalt breccias, while the heat source is under Mount Neki in the southern part of the reservoir. The position of the heat source causes the temperature in the reservoir to not be too high, so it is estimated that the Way Umpu geothermal system is the water dominated system.

**Kata kunci:** derivative analysis, forward modeling, gravity, gradient gravity, inversion, geothermal, reservoir, Way Umpu.

Judul Skripsi : **IDENTIFIKASI STRUKTUR SESAR DAN LOKASI DAERAH RESERVOIR BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYABERAT PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY UMPU**

Nama Mahasiswa : **Arnas Hardianto**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1815051028**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



**MENYETUJUI,**

1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

Pembimbing 2

**Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si. IPU.**  
NIP. 19711210 199702 1001

**Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**  
NIP. 19750911 200012 1002

2. **Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP. 19691230 199802 1001

**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.** .....



Sekretaris : **Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.** .....



Anggota : **Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.** .....



2. Dekan Fakultas Teknik

**Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }**  
NIP. 19750928 200112 1002



Tanggal Ujian Skripsi : **20 Maret 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.

Bandar Lampung, 30 Maret 2023

Penulis



**Arnas Hardianto**

**NPM. 1815051028**

## RIWAYAT HIDUP



**Arnas Hardianto**, lahir di Desa Aro pada tanggal 14 Mei 1999. Anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Surip dan Ibu Welnida Syafni. Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD N 01 Pakan Rabaa, lalu melanjutkan pada jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 4 Solok Selatan, kemudian menempuh pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Solok Selatan. Pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai kegiatan organisasi, baik secara internal di lingkungan jurusan maupun secara eksternal, antara lain: Anggota Bidang Kaderisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (2019/2020 dan 2020/2021), Ketua Pelaksana *Geophysics Whiz Event and Seminar (GWES)* ke-7 tahun 2021, Anggota Divisi Riset dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia (HMGI) Wilayah I Periode 2020/2021, Anggota Divisi *Human Resource Development* SEG SC Unila 2021, Anggota Departemen *Education and Course* AAPG Unila SC Periode 2021, dan Presiden AAPG Unila SC Periode 2022.



Dalam bidang keilmuan dan akademik penulis aktif dan beberapa kali melakukan publikasi jurnal. Selain itu, penulis dipercaya menjadi asisten pada beberapa mata kuliah seperti, Perpetaan, Sistem Informasi Geografis, Metode Gayaberat, Metode Elektromagnetik, dan Eksplorasi Geothermal.

Pada tahun 2021 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di jurusan Teknik Geofisika Unila dengan judul “**Identifikasi Struktur Geologi Daerah Panas Bumi Way Umpu Berdasarkan Analisis Data *Second Vertical Derivative* (SVD) Anomali Gayaberat**”. Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul “**Identifikasi Struktur Sesar dan Lokasi Daerah Reservoir Berdasarkan Analisis Data Gayaberat pada Lapangan Panas Bumi Way Umpu**”.

## **PERSEMBAHAN**

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk:

**IBU DAN AYAH TERCINTA**

**SURIP**

**&**

**WELNIDA SYAFNI**

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat, dan segala dukungan yang tidak terhingga.

**KAKAK DAN ADIK TERCINTA**

**dr. WAHYU YOGMA SUTANTYO & HENI YUNIDA**

Yang telah memberikan doa, semangat dan dukungannya.

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

**Semua yang terlibat dalam proses pembuatan dan penyusunan skripsi ini,  
saya ucapkan terima kasih.**

*“Gravitation is not responsible for people falling in love.  
How on earth can you explain in terms of chemistry and physics  
so important a biological phenomenon as first love?*

*Put your hand on a stove for a minute and it seems like an hour.  
Sit with that special girl for an hour and it seems like a minute.  
That's relativity.”*

*~Albert Einstein~*

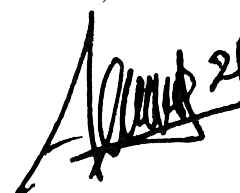
*“If I were not a geophysicist, I would probably be a musician.  
I often think in music. I live my daydreams in music.  
I see my life in terms of music.”*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “**Identifikasi Struktur Sesar dan Lokasi Daerah Reservoir Berdasarkan Analisis Data Gayaberat pada Lapangan Panas Bumi Way Umpu**”. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan Skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selama penulisan Skripsi ini banyak sekali terdapat hambatan yang dialami. Namun berkat adanya bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak, hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa tidak tertutup kemungkinan di dalam Skripsi ini terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan Skripsi ini. Semoga Skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 30 Maret 2023

Penulis,



**Arnas Hardianto**  
**NPM. 1815051028**

## SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas rahmat dan karunia Allah SWT, yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada suri tauladan Rasulullah Muhammad SAW beserta para sahabatnya dan kita selaku umatnya akhir zaman.

Skripsi ini berjudul “**Identifikasi Struktur Sesar dan Lokasi Daerah Reservoir Berdasarkan Analisis Data Gayaberat pada Lapangan Panas Bumi Way Umpu**” merupakan skripsi dari penelitian yang dilakukan penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Adapun dalam penyelesaian Skripsi ini, terdapat banyak pihak yang terlibat, yang mana pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:


1. **Kedua orang tua tercinta, Bapak Surip dan Ibu Welnida Syafni** yang selalu memberi doa, dukungan, motivasi, kekuatan, selalu menyemangati dan menyayangi dengan sepenuh hati.
2. **Kakak tercinta, dr. Wahyu Yogma Sutantyo dan Adik tersayang, Heni Yunida** yang telah memberikan dukungan dan selalu memberi semangat.

3. **Bapak Karyanto, S.Si., M.T.** selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. **Bapak Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.** selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
5. **Bapak Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.** selaku dosen Pembimbing I sekaligus Pembimbing Akademik yang telah meluangkan waktu dalam membimbing dan memberikan arahan, saran, kritik, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
6. **Bapak Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.** selaku dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan, saran, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
7. **Bapak Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.** selaku penguji yang telah meluangkan waktunya dan senantiasa memberikan masukan, kritik dan saran.
8. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan serta staf akademik Jurusan Teknik Geofisika.
9. Warga Kontrakan Pink yaitu Mas Nurul, Farhan, Nanda, Tecto, Andiko, Joy yang selalu memberikan semangat dan motivasi.
10. Teman seperjuangan selama melaksanakan skripsi yaitu Wayan, Annisa, Nurul, dan Rafika yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi, serta memberikan dukungan dan motivasi satu sama lain.
11. Keluarga Teknik Geofisika 2018 (TGasak) yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terimakasih banyak atas semua dukungan, semangat, menjadi tempat keluh kesah, berbagi beban bersama selama menjalani dunia

perkuliahan. Terimakasih atas kenangan yang tidak akan terlupakan.  
Semoga kita semua sukses selalu.

12. Semua pihak yang terlibat selama penyusunan skripsi ini yang telah memberikan kesempatan, bantuan dan pengalaman yang sangat luar biasa. Sekali lagi penulis ucapkan terimakasih banyak.

Bandar Lampung, 30 Maret 2023  
Penulis,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Arnas 28', with a horizontal line drawn through the bottom of the signature.

**Arnas Hardianto**  
**NPM. 1815051028**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>SANWACANA .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xx</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Lokasi Daerah Penelitian .....	4
2.2 Geologi Regional .....	6
2.3 Stratigrafi Daerah Penelitian.....	8
2.4 Geomorfologi Daerah Penelitian .....	9
2.5 Manifestasi Panas Bumi.....	10
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	11
<b>III. TEORI DASAR.....</b>	<b>13</b>
3.1 Metode Gayaberat.....	13
3.2 Konsep Dasar Gayaberat.....	13
3.2.1 Gayaberat Newton.....	13
3.2.2 Percepatan Gayaberat.....	14
3.2.3 Potensial Gayaberat.....	14



3.2.4	Densitas Batuan.....	16
3.3	Anomali Bouguer.....	18
3.4	Analisis Spektrum.....	19
3.5	Filter <i>Moving Average</i> .....	21
3.6	<i>First Horizontal Derivative</i> .....	22
3.7	<i>Second Vertical Derivative</i> .....	22
3.8	<i>Forward Modeling</i> .....	24
3.9	<i>Inverse Modeling</i> .....	25
<b>IV.</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
4.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	26
4.2	Alat dan Bahan.....	26
4.3	Prosedur Penelitian .....	27
4.3.1	Anomali Bouguer Lengkap.....	27
4.3.2	Analisis Spektrum .....	27
4.3.3	Pemisahan Anomali Regional dan Residual .....	28
4.3.4	Analisis Derivatif .....	29
4.3.5	Pemodelan Bawah Permukaan.....	29
4.4	Jadwal Kegiatan .....	30
4.5	Diagram Alir .....	31
<b>V.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>32</b>
5.1	Anomali Bouguer Lengkap.....	32
5.2	Analisis Spektrum.....	33
5.3	<i>Moving Average</i> .....	37
5.4	Anomali Regional .....	38
5.5	Anomali Residual.....	39
5.6	Gradien Gayaberat .....	40
5.7	Analisis Derivatif .....	45
5.8	<i>Forward Modeling 2D</i> .....	49
5.8.1	Model Penampang Melintang Lintasan AB.....	50
5.8.2	Model Penampang Melintang Lintasan CD.....	51
5.8.3	Model Penampang Melintang Lintasan EF.....	53
5.9	Pemodelan Inversi 3D.....	55

5.9.1	Distribusi Densitas Secara Horizontal .....	55
5.9.2	Kompilasi Analisis Derivatif, Model 2D dan Model Inversi 3D .....	63
<b>VI.</b>	<b>KESIMPULAN .....</b>	<b>68</b>
6.1	Kesimpulan .....	68
6.2	Saran .....	69
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>70</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Manifestasi permukaan daerah panas bumi Way Umpu.....	10
2. Nilai densitas batuan .....	16
3. Operator Henderson <i>and</i> Zietz.....	23
4. Operator Elkins .....	23
5. Operator Rosenbach.....	24
6. Data penelitian .....	26
7. <i>Software</i> yang digunakan dalam penelitian .....	27
8. Pelaksanaan kegiatan penelitian.....	30
9. Kedalaman anomali regional dan anomali residual lintasan 1-3 .....	37
10. Bilangan gelombang ( $k$ ) dan lebar jendela ( $N$ ) .....	37

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	5
2. Peta geologi daerah penelitian. ....	7
3. Stratigrafi daerah penelitian.....	9
4. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	14
5. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi. ....	15
6. Kurva $\ln A$ terhadap $k$ . ....	21
7. Teknik pemodelan dengan cara coba-coba. ....	25
8. Diagram alir penelitian.....	31
9. Peta kontur anomali Bouguer lengkap daerah penelitian.....	32
10. Lintasan analisis spektrum anomali Bouguer lengkap.....	34
11. Grafik $\ln A$ vs $k$ pada lintasan 1. ....	35
12. Grafik $\ln A$ vs $k$ pada lintasan 2. ....	35
13. Grafik $\ln A$ vs $k$ pada lintasan 3. ....	36
14. Peta kontur anomali regional daerah penelitian.....	38
15. Peta kontur anomali residual daerah penelitian. ....	39
16. Peta <i>first horizontal derivative</i> anomali Bouguer residual. ....	41
17. Peta <i>second vertical derivative</i> anomali Bouguer residual. ....	42
18. Peta deliniasi sesar berdasarkan gradien gayaberat. ....	43
19. Peta geologi di- <i>overlay</i> dengan struktur SVD. ....	44
20. Lintasan analisis derivatif pada peta anomali Bouguer residual.....	45
21. Kurva analisis derivatif lintasan AB. ....	46
22. Kurva analisis derivatif lintasan CD. ....	47
23. Kurva analisis derivatif lintasan EF.....	48
24. Lintasan penampang melintang 2D pada peta geologi. ....	49
25. Model penampang melintang 2D lintasan AB.....	51

26. Model penampang melintang 2D lintasan CD.....	52
27. Model penampang melintang 2D lintasan EF.....	53
28. Model distribusi densitas hasil inversi 3D.....	55
29. Model distribusi densitas pada kedalaman 0 meter. ....	56
30. Model distribusi densitas pada kedalaman 250 meter. ....	57
31. Model distribusi densitas pada kedalaman 500 meter. ....	58
32. Model distribusi densitas pada kedalaman 1000 meter. ....	59
33. Model distribusi densitas pada kedalaman 1500 meter. ....	60
34. Model distribusi densitas pada kedalaman 2000 meter. ....	61
35. Model distribusi densitas pada kedalaman 2000 meter di- <i>overlay</i> dengan kontur 0 <i>second vertical derivative</i> .....	62
36. Penampang melintang lintasan AB (a) Profil anomali Bouguer residual; (b) Model <i>forward</i> 2D; dan (c) Model distribusi densitas hasil inversi 3D.....	63
37. Penampang melintang lintasan CD (a) Profil anomali Bouguer residual; (b) Model <i>forward</i> 2D; dan (c) Model distribusi densitas hasil inversi 3D.....	65
38. Penampang melintang lintasan EF (a) Profil anomali Bouguer residual; (b) Model <i>forward</i> 2D; dan (c) Model distribusi densitas hasil inversi 3D.....	66

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Daerah panas bumi Way Umpu terletak di daerah Way Kanan, Provinsi Lampung. Daerah panas bumi Way Umpu diperkirakan memiliki sumber daya hipotesis sebesar 40 MWe dengan cadangan terduga sebesar 14 MWe (Ditjen EBTKE, 2017). Hal ini didukung dengan adanya manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas di daerah Juku Batu. Manifestasi panas bumi di permukaan diperkirakan terjadi karena adanya perambatan panas dari bawah permukaan atau karena adanya struktur geologi yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan (Saptadji, 2001). Daerah penelitian ini berada pada sistem yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik berumur Kuartar, yaitu G. Remas, G. Ulujamus, G. Punggur, dan dikontrol oleh struktur sekunder dari sistem sesar Sumatra (Tim Survei Terpadu, 2012).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui sistem panas bumi Way Umpu. Berdasarkan penelitian geokimia sistem panas bumi Way Umpu diketahui manifestasi Way Umpu memiliki temperatur permukaan hingga 78°C dengan debit tertinggi 1 L/s. Mata air panas Way Umpu diperkirakan sebagai zona *upflow* (Wahyudi, 2013). Air panas Way Umpu secara keseluruhan termasuk dalam tipe klorida, dan berada di dalam daerah *partial equilibrium*. Dari hasil pendugaan temperatur bawah permukaan dengan metode Na-K, Na-K-Ca diperoleh temperatur 170-200°C (Tim Survei Terpadu, 2012). Penelitian elektromagnetik mengungkapkan adanya *strike* dan zona resistivitas rendah pada permukaan dangkal hingga kedalaman 2 km yang kemungkinan besar terkait dengan pencairan parsial dan intrusi pada kedalaman yang lebih besar (Parnadi dkk., 2014).

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan peneliti sebelumnya terkonsentrasi pada daerah sekitar manifestasi panas bumi. Untuk itu pada penelitian ini akan dilakukan pengolahan dan analisis data gayaberat. Metode gayaberat dalam geofisika dilakukan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan berdasarkan perbedaan densitas. Metode ini digunakan untuk mempelajari kontak intrusi, batuan dasar, struktur geologi, endapan sungai purba, lubang di dalam masa batuan, *shaff* terpendam dan lain-lain (Sarkowi, 2014). Dalam eksplorasi panas bumi, metode gayaberat dapat mendeteksi perbedaan densitas batuan di bawah permukaan yang membentuk suatu sistem panas bumi (Sihombing dan Rustadi, 2020).

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan anomali gayaberat panas bumi Way Umpu yang meliputi wilayah Gunung Remas, Gunung Neki, Gunung Benatan dan daerah manifestasi panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan struktur bawah permukaan dan lokasi daerah prospek reservoir panas bumi Way Umpu.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan batas kedalaman anomali Bouguer regional dan residual daerah penelitian.
2. Mengidentifikasi struktur sesar daerah penelitian.
3. Mendapatkan model distribusi densitas bawah permukaan daerah penelitian.
4. Mengidentifikasi lokasi reservoir panas bumi Way Umpu berdasarkan analisis model distribusi densitas bawah permukaan.

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan merupakan data sekunder anomali Bouguer lengkap hasil pengukuran gayaberat.
2. Penentuan batas kedalaman anomali Bouguer regional dan residual menggunakan analisis spektrum.
3. Pemisahan anomali Bouguer regional dan residual menggunakan filter *moving average*.
4. Struktur bawah permukaan diidentifikasi dengan analisis derivatif, yaitu *First Horizontal Derivative (FHD)* dan *Second Vertical Derivative (SVD)*.
5. Pemodelan dilakukan menggunakan pemodelan ke depan 2D dan pemodelan inversi 3D.

### 1.4 Manfaat Penelitian

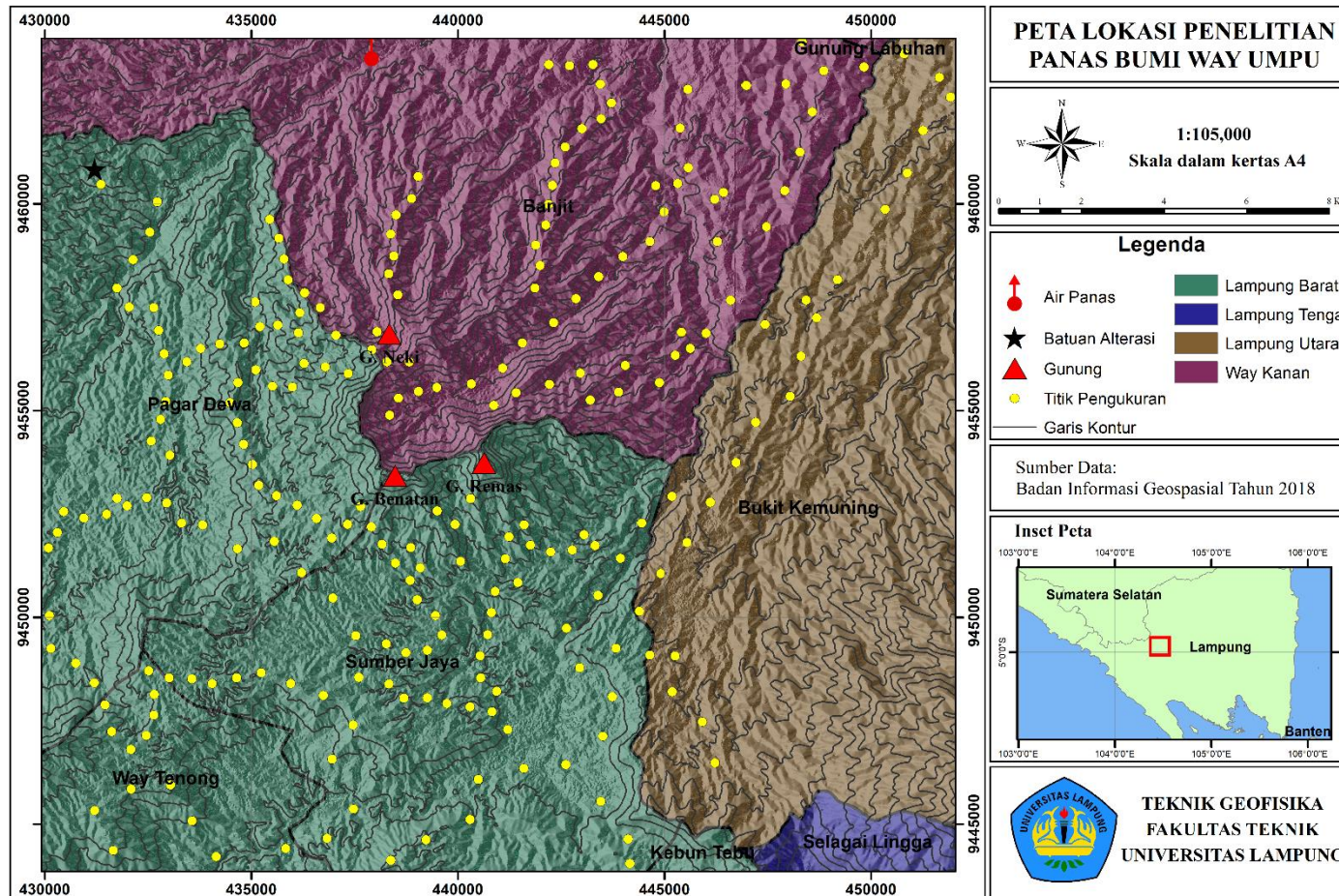
Adapun manfaat dalam pelaksanaan penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai gambaran struktur sesar serta lokasi reservoir pada daerah panas bumi Way Umpu. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan suatu referensi ataupun acuan pada penelitian selanjutnya.



## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Daerah Penelitian

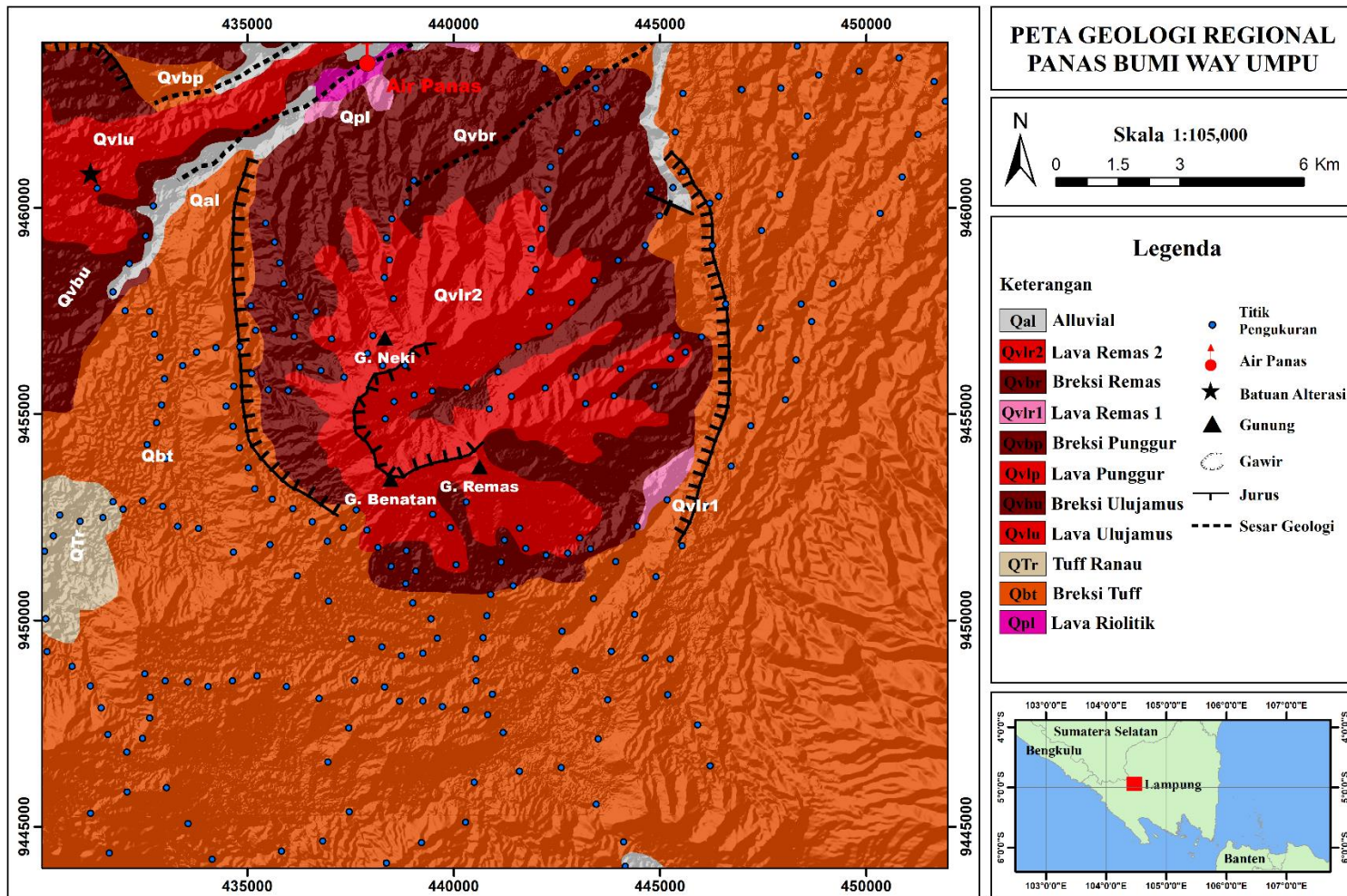
Secara administratif, daerah penelitian di tiga kabupaten, yaitu Kabupaten Way Kanan, Kabupaten Lampung Barat dan Kabupaten Lampung Utara, Provinsi Lampung. Daerah penelitian potensi panas bumi Way Umpu berjarak sejauh  $\pm 160$  km dari Kota Bandar Lampung dan dapat ditempuh selama  $\pm 5$  jam. Lokasi ini terletak pada koordinat geografis  $4^{\circ}48'40''$  -  $5^{\circ}3'50''$  Lintang Selatan dan  $104^{\circ}20'20''$  -  $104^{\circ}35'25''$  Bujur Timur atau pada koordinat 427000 – 454000 UTMX dan 9440000 – 9468000 UTMY dalam UTM (*Universal Transverse Mercator*). Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (BIG, 2018).

## 2.2 Geologi Regional

Daerah lokasi penelitian terdapat pada Lembar Baturaja, dapat dilihat pada **Gambar 2**. Daerah penelitian berada pada sistem yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik berumur Kuartar, yaitu G. Remas, G. Ulujamus, G. Punggur. Batuan yang ada di lokasi penelitian terdiri dari batuan sedimen berumur tersier dan batuan vulkanik berumur Kuartar (Tim Survei Terpadu, 2012). Struktur sesar utama di daerah penelitian adalah sesar Way Umpu berarah timur laut-barat daya. Diperkirakan sebagai blok sesar normal, yang secara relatif lebih banyak terdapat blok yang terletak dari tenggara hingga blok di barat laut. Garis sesar ditunjukkan oleh kesejajaran satuan-satuan batuan sedimen yang lurus berarah timur laut-barat daya dari sumber mata air panas. Selain itu, di beberapa titik di sepanjang sesar, sambungan intensif mudah terlihat sebagai struktur geologi yang mengendalikan mata air panas Way Umpu (Parnadi dkk., 2014).



**Gambar 2.** Peta geologi daerah penelitian (Gafoer dkk., 1993 dan Tim Survei Terpadu PSDG, 2012).

### 2.3 Stratigrafi Daerah Penelitian

Stratigrafi daerah panas bumi Way Umpu tersusun atas litologi paling tua berupa batuan sedimen berumur Tersier (Oligosen) yang terdiri dari perselingan batu pasir dan lempung, aktivitas magmatik diawali pada Kala Pleistosen berupa breksi tuff, jatuhnya piroklastik, dan aktivitas Gunung Api yaitu G. Ulujamus, G. Punggur dan G. Remas, yang menghasilkan produk berupa lava dan breksi vulkanik. Berdasarkan hasil observasi lapangan, analisis peta topografi dan citra satelit atau data DEM (*Digital Elevation Mode*), urutan stratigrafi daerah panas bumi Way Umpu mulai dari yang tertua hingga yang termuda tersusun atas Satuan batuan sedimen (Tms), Satuan Lava Andesit Tua (Tla), Satuan Lava Riolitik (Qpl), Satuan breksi Batuan Tufaan (Qbt), Satuan Jatuhan Piroklastik Ranau (QTr), Satuan Breksi Gunung Subhanallah (Qbs), Satuan Aliran Lahar Gunung Ulujamus (Qvlu), Satuan Breksi Vulkanik Ulujamus (Qvbu), Satuan Lava Gunung Punggur (Qvlp), Satuan Breksi Vulkanik Gunung Pugur (Qvbp), Berapi Lava Remas Satuan-1 (Qv1r1), Satuan Breksi Vulkanik Remas (Qvbr), Berapi Lava Remas Satuan-2 (Qv2r2), Satuan Pengendapan Aluvial (Qal) dan Alterasi Batuan (Tim Survei Terpadu PSDG, 2012). Stratigrafi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3** di bawah.

Umur	Produk			Vulkanik Lainnya	Sedimen	Endapan Piroklastik
	Ulujamus	Punggur	Remas			
Kuartar	Holosen					Qal
	Pleistosen	Qvbu Qvlu	Qvbp Qvlp	Qvbr Qvlr1	QTr Qbt Qpl	
Tersier	Pliosen					
	Oligosen				Tla	
					Tms	

**Gambar 3.** Stratigrafi daerah penelitian (Tim Survei Terpadu PSDG, 2012).

#### 2.4 Geomorfologi Daerah Penelitian

Geomorfologi di daerah penelitian dikelompokkan menjadi empat satuan geomorfologi, yaitu satuan geomorfologi gunung api kerucut, satuan geomorfologi perbukitan terjal bergelombang, satuan geomorfologi perbukitan bergelombang sedang dan satuan geomorfologi dataran. Satuan geomorfologi gunung api kerucut membentuk badan kerucut gunung api yang tidak aktif, yang dalam hal ini meliputi Gunung Remas, Ulujamus, dan Punggur. Bentuk kerucut memiliki kemiringan yang bervariasi antara 30° sampai 60°, namun di beberapa tempat kemiringannya mencapai 90°. Satuan geomorfologi tersusun atas batuan lava dan produk breksi vulkanik yang masing-masing menyusun geomorfologi kerucut vulkanik. Satuan geomorfologi perbukitan terjal bergelombang merupakan topologi transisi. Kemiringan di wilayah ini berkisar antara 30° sampai 70°. Satuan ini tersusun oleh batuan breksi tuffaan dan breksi vulkanik. Satuan geomorfologi perbukitan bergelombang sedang memiliki kemiringan lereng yang bervariasi antara 10° sampai 30°. Pada daerah ini,

satuan morfologi batuan sedimen tersusun atas breksi tufaan. Satuan geomorfologi dataran memiliki kemiringan lereng kurang dari  $10^\circ$ . Di daerah penelitian, satuan-satuan ini memiliki litologi yang tersusun dari material lepas yang diendapkan oleh sungai atau aliran aluvial (Parnadi dkk., 2014).

## 2.5 Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi dikendalikan oleh struktur yang terbentuk di zona permeabilitas tinggi yaitu sesar atau rekahan. Fraktur tersebut berfungsi sebagai saluran perpindahan fluida panas bumi dari sumbernya di reservoir sampai ke permukaan yang tampak sebagai manifestasi panas bumi. Kadang-kadang sesar terkubur di bawah lapisan *overburden*. Di wilayah studi, tidak ada sesar lokal yang mengendalikan manifestasi panas bumi yang digambarkan dalam peta regional geologi. Sesar dapat terkubur oleh lapisan *overburden*. Deskripsi sesar secara rinci (sesar lokal dan regional) sangat penting dalam eksplorasi panas bumi untuk keberhasilan pemboran (Haerudin dkk., 2016).

Manifestasi panas bumi Way Umpu berupa air panas dimana terdapat enam titik mata air panas. Manifestasi Way Umpu memiliki temperatur permukaan hingga  $78^\circ\text{C}$  dengan debit tertinggi 1 L/s. Manifestasi tersebut memiliki pH sekitar netral (6,45-7,23). Berdasarkan karakteristik mata air panas, diketahui bahwa manifestasi tersebut memiliki tipe air klorida yang berasal dari satu reservoir yang bertemperatur  $200\text{-}210^\circ\text{C}$  pada kedalaman antara 1250-1300 m. Mata air panas Way Umpu merupakan zona aliran ke atas reservoir (*upflow*) (Wahyudi, 2013). Manifestasi permukaan yang terdapat di daerah panas bumi Way Umpu dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Manifestasi permukaan daerah panas bumi Way Umpu (Ditjen EBTKE, 2017)

Lokasi Sampel	Jenis	Elevasi (m)	Temperatur Permukaan ( $^\circ\text{C}$ )	Keasaman (pH)
Wai Umpu	<i>Hot Water</i>	351	79,0	7,0
AP-WU1	Mata Air Panas	351	78,7	7,2
AP-WU1	Mata Air Panas	341	47,3	6,8
AS-TT	Air Hangat	875	22,7	8,2

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

Tim Survei Terpadu PSDG (2012) telah melakukan survei terpadu geologi, geokimia dan geofisika daerah panas bumi Way Umpu. Daerah penyelidikan berada pada sistem yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik berumur Kuartar, yaitu G. Remas, G. Ulujamus, G. Punggur dan dikontrol oleh struktur berarah timur laut-barat daya yang merupakan struktur sekunder dari sistem sesar Sumatra. Gejala panas bumi daerah penyelidikan terdiri dari mata air panas, yaitu Mata Air Panas Way Umpu 1, Way Umpu 2 Way Umpu 3, Way Umpu 4, Way Umpu 5 dan Way Umpu 6. Selain mata air panas terdapat juga bualan gas. Temperatur mata air panas di berkisar antara 38,4 hingga 78,7 °C dengan pH relatif netral. Air panas Way Umpu secara keseluruhan termasuk dalam tipe klorida, dan berada di dalam daerah *partial equilibrium* segitiga Na-K-Mg. Dari hasil pendugaan temperatur bawah permukaan dengan metode Na-K, Na-K-Ca diperoleh temperatur 170-200 °C. Sebaran Hg tanah terkonsentrasi di sisi barat daya dari Gunung Remas, yaitu pada satuan lava Gunung Remas dan Aliran Piroklastik, sedangkan dari aspek geologi zone berupa batuan ubahan yang ada di dasar depresi (kaldera) Gunung Remas. Proses pembentukan sistem panas bumi di daerah penyelidikan diperkirakan berasosiasi dengan aktivitas vulkanik Gunung Remas, yang terjadi kurang lebih sekitar 200.000 tahun yang lalu dan dari hasil kompilasi data geologi dan geokimia ini menunjukkan bahwa daerah prospek berada lereng barat daya Gn. Remas hingga ke zona depresi (kaldera) Gn. Remas.

Wahyudi (2013) telah melakukan penelitian geologi dan geokimia sistem panas bumi Way Umpu. Stratigrafi daerah penelitian terdiri dari empat satuan batuan tidak resmi. Satuan batuan ini, dari tua ke muda, adalah Satuan Breksi Andesit, Satuan Dasit, Satuan Lava Basalt Terbreksikan, dan Satuan Lava Basalt. Manifestasi panas bumi berupa air panas ditemukan di sekitar sungai Way Umpu dengan terdapat enam titik mata air panas. Manifestasi Way Umpu memiliki temperatur permukaan hingga 78°C dengan debit tertinggi 1 L/s. Manifestasi tersebut memiliki pH sekitar netral (6,45-7,23). Berdasarkan karakteristik mata air panas, diketahui bahwa manifestasi tersebut memiliki



tipe air klorida yang berasal dari satu reservoir yang bertemperatur 200-210°C pada kedalaman antara 1250-1300 m. Mata air panas Way Umpu merupakan zona aliran ke atas reservoir (*upflow*).

Parnadi dkk (2014) telah melakukan penelitian yang bertujuan untuk menentukan struktur resistivitas panas bumi Way Umpu hingga kedalaman 4 km menggunakan metode Audiomagnetotellurik (AMT) dan Magnetotellurik (MT). Dalam penelitian ini disajikan hasil pemodelan inversi 1-D dan 2-D dari 8 sounding MT. Peneliti membandingkan model inversi menggunakan skema transformasi Bostick 1D, model Occam 1D, dan algoritma 2D *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG). Hasil studi mengungkapkan adanya *strike* yang ditunjukkan dari data geologi dan zona resistivitas rendah pada permukaan dangkal hingga kedalaman 2 km yang kemungkinan besar terkait dengan pencairan parsial dan intrusi pada kedalaman yang lebih besar.

Satria dan Suyanto (2014) melakukan penelitian menggunakan metode gayaberat pada area panas bumi Way Umpu untuk mengidentifikasi sistem panas buminya. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa batuan penyusun area penelitian berupa batuan lava basalt dengan densitas 2,9 gr/cc yang merupakan hasil dari aktifitas Gunung Pungur, batuan breksi basalt dengan densitas 2,65 gr/cc yang diinterpretasikan sebagai reservoir panas bumi, batuan lava andesit dengan densitas 2,8 gr/cc yang merupakan hasil dari aktifitas Gunung Remas sebagai batuan penudung, batuan breksi andesit dengan densitas 2,6 gr/cc, serta batuan aluvial dengan densitas 1,9 gr/cc yang menutupi keempat satuan batuan di bawahnya.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran variasi medan gayaberat di bumi. Variasi gayaberat di permukaan bumi tersebut dapat disebabkan oleh adanya variasi densitas batuan di bawah permukaan, jenis batuan di bawah permukaan, perbedaan jarak permukaan bumi ke pusat bumi dan adanya perbedaan topografi di permukaan bumi (Sarkowi, 2014). Menurut Djudjun (2005) metode gayaberat merupakan salah satu hal penting dalam banyak masalah yang melibatkan pemetaan bawah permukaan bumi dan studi geologi. Metode gayaberat didasarkan pada sifat massa, dimana besarnya massa tersebut akan menentukan besarnya gaya tarik-menarik di antara benda tersebut.

#### 3.2 Konsep Dasar Gayaberat

##### 3.2.1 Gayaberat Newton

Gayaberat Newton memiliki prinsip teori yang didasari Hukum Newton dimana menjabarkan mengenai adanya gaya tarik menarik antara dua massa  $m_1$  dan  $m_2$  yang terpisah sejauh  $\vec{r}$ , diilustrasikan seperti **Gambar 4**. Gayaberat Newton dirumuskan pada persamaan (1) sebagai berikut (Serway dan Jewett, 2009):

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

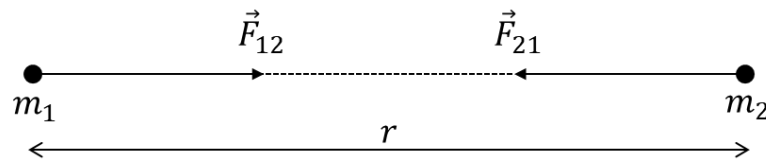
dimana:

$\vec{F}$  : Gaya gravitasi (N)

$m_1, m_2$  : Massa benda 1 dan massa benda 2 (kg)

$r$  : Jarak antara dua buah benda (m)

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



**Gambar 4.** Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).

### 3.2.2 Percepatan Gayaberat

Newton juga menjabarkan keterkaitan antara gaya dan percepatan. Hukum II Newton secara spesifik menjelaskan tentang gerak dimana gaya sebanding dengan massa benda dikalikan dengan percepatan gayaberat bumi yang dialami benda tersebut.

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

Percepatan sebuah benda bermassa  $m_2$  yang disebabkan oleh tarikan benda 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 :

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

dimana :

$\vec{g}$  : Percepatan gaya tarik bumi ( $\text{m/s}^2$ )

$M$  : Massa bumi (kg)

$m$  : Massa benda (kg)

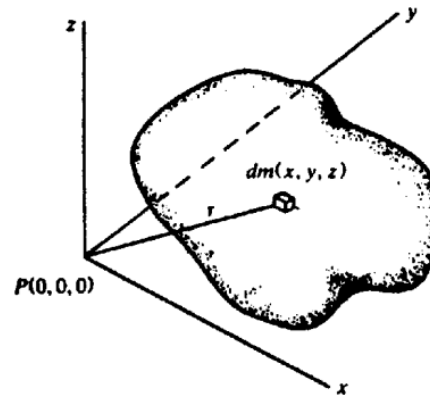
$\vec{F}$  : Gaya gravitasi (N)

$r$  : Jari-jari bumi (km)

### 3.2.3 Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat merupakan suatu energi yang digunakan untuk menempatkan suatu massa di suatu titik ke titik tertentu. Suatu benda yang memiliki massa tertentu pada sistem ruang akan menyebabkan adanya keberadaan medan potensial di sekitarnya. Medan potensial yang terbentuk memiliki sifat konservatif, artinya usaha yang terjadi dalam suatu medan gayaberat tidak berpengaruh pada lintasan yang ditempuhnya dan hanya

terpengaruh pada posisi awal dan akhir (Rosid, 2005). Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi diilustrasikan seperti pada **Gambar 5** berikut.



**Gambar 5.** Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Telford dkk., 1990).

Suatu massa pada 3 dimensi yang berbentuk sembarang akan terdistribusi secara kontinu dengan densitas  $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ , maka potensial gayaberat di titik  $P(x, y, z)$  diberikan oleh :

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (5)$$

Medan gayaberat akibat distribusi densitas di atas diperoleh dengan mendiferensialkan persamaan (5) terhadap  $x, y$  dan  $z$  yang hasilnya adalah,

$$\Delta g_x(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)(x-\alpha)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (6)$$

$$\Delta g_y(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)(y-\beta)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (7)$$

$$\Delta g_z(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (8)$$

Dari persamaan (8) akan didapatkan nilai medan gayaberat  $\Delta g$  pada permukaan bumi yang beragam. Medan gayaberat bumi diakibatkan pengaruh oleh distribusi massa di bawah permukaan yang digambarkan oleh fungsi densitas  $\rho$ . Sedangkan bentuk dari permukaan bumi yang sebenarnya digambarkan oleh batas integral (Sarkowi, 2007).

### 3.2.4 Densitas Batuan

Densitas atau disebut juga dengan rapat massa batuan merupakan besaran fisik yang sangat penting digunakan dalam pengaplikasian metode gaya berat. Untuk melakukan perhitungan anomali Bouguer kita memerlukan harga densitas rata-rata di daerah survei. Gaya tektonik akan menyebabkan terjadinya variasi densitas pada batuan sedimen. Densitas butir pembentuknya, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, porositas, dan pemadatan akibat tekanan serta pelapukan yang dialami oleh batuan akan mempengaruhi besaran densitas batuan (Brotospito, 2001). Berikut merupakan nilai variasi densitas (Telford dkk., 1990) dapat dilihat pada **Tabel 2** sebagai berikut.

**Tabel 2.** Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (gr/cc)	Rata-rata (gr/cc)
Overburden		1,92
Soil	1,20-2,40	1,92
Clay	1,63-2,60	2,21
Gravel	1,70-2,40	2,00
Sand	1,70-2,30	2,00
Sandstone	1,61-2,76	2,35
Shale	1,77-3,20	2,40
Limestone	1,93-2,90	2,55
Dolomit	2,28-2,90	2,70
Loess	1,40-1,93	1,64
Silt	1,80-2,20	1,93
Chalk	1,53-2,60	2,01
Halite	2,10-2,60	2,22
Glacier Ice	0,88-0,92	0,90
Rhyolite	2,35-2,70	2,52
Andesit	2,40-2,80	2,61
Granite	2,50-2,81	2,64
Granodiorite	2,67-2,79	2,73

Tabel 2 (lanjutan)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (gr/cc)	Rata-rata (gr/cc)
Porphyry	2,60-2,89	2,74
Quartz diorite	2,62-2,96	2,79
Diorite	2,72-2,99	2,85
Lavas	2,80-3,00	2,90
Diabase	2,50-3,20	2,91
Basalt	2,70-3,30	2,99
Gabbro	2,70-3,50	3,03
Peridotite	2,78-3,37	3,15
Syenite	2,60-2,95	2,77
Acid igneous	2,30-3,11	2,61
Basic igneous	2,09-3,17	2,79
Quartzite	2,50-2,70	2,60
Schists	2,39-2,90	2,64
Graywacke	2,60-2,70	2,65
Marble	2,60-2,90	2,75
Serpentine	2,40-3,10	2,78
Slate	2,70-2,90	2,79
Gneiss	2,59-3,00	2,80
Amphibolite	2,90-3,04	2,96
Eclogite	3,20-3,54	3,37
Phyllite	2,68-2,80	2,74
Granulite	2,52-2,70	2,65

### 3.3 Anomali Bouguer

Menurut Hinze (2013), anomali Bouguer adalah selisih antara harga gravitasi pengamatan dengan harga gravitasi teoritis yang didefinisikan pada titik pengamatan tertentu. Perbedaan akan menggambarkan perbedaan densitas pada suatu daerah dengan daerah sekelilingnya baik ke arah vertikal maupun lateral. Variasi dari anomali Bouguer merefleksikan variasi densitas secara lateral misalnya benda dengan densitas tinggi berada di dalam medium yang memiliki densitas rendah akan menghasilkan nilai anomali Bouguer positif. Sebaliknya, benda dengan densitas rendah yang berada pada medium dengan densitas tinggi akan menghasilkan nilai anomali Bouguer negatif (Reynolds, 1997).

Anomali Bouguer merupakan superposisi dari anomali residual dengan anomali regional. Anomali regional merepresentasikan kondisi geologi daerah secara umum seperti *basement*, lipatan dan sesar yang dicirikan dengan anomali berfrekuensi rendah. Anomali residual merepresentasikan kondisi geologi setempat seperti reservoir, intrusi batuan, jenis dan bentuk struktur, mineral atau bijih yang dicirikan dengan anomali berfrekuensi tinggi (Haerudin dan Karyanto, 2007). Anomali Bouguer menggambarkan persebaran dari gayaberat untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan berdasarkan kontras densitas batuan. Dengan demikian nilai Anomali Bouguer dapat dirumuskan seperti persamaan (9) berikut (Brotopuspito, 2001):

$$BA = g_{obs} - g_{\varphi} + FAC - BC + TC \quad (9)$$

dimana,

$g_{obs}$  : Gayaberat observasi

$g_{\varphi}$  : Gayaberat teoritis pada lintang  $\varphi$

$FAC$  : *Free Air Correction*/ koreksi udara bebas

$BC$  : *Bouguer Correction*/ koreksi Bouguer

$TC$  : *Terrain Correction*/ koreksi medan

### 3.4 Analisis Spektrum

Analisis spektrum memiliki tujuan untuk mendapatkan nilai kedalaman suatu benda anomali gayaberat dari bawah permukaan. Metode analisis spektrum memanfaatkan transformasi Fourier guna mengubah suatu fungsi waktu dan jarak menjadi suatu fungsi frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1996). Analisis spektrum dilakukan untuk mengetahui batas Anomali Bouguer regional dan residual daerah penelitian. Hasil dari analisis spektrum ini selanjutnya digunakan untuk mengestimasi lebar jendela untuk *filtering* anomali gayaberat. Suatu transformasi Fourier digambarkan dengan proses memisahkan suatu gelombang ke dalam bentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang bervariasi. Hasil dari penjumlahan pada gelombang-gelombang tersebut adalah bentuk gelombang aslinya (Kadir, 2000). Spektrum diperoleh dari nilai potensial yang terdapat pada suatu bidang horizontal. Dengan persamaan transformasi Fourier adalah (Blakely, 1996) :

$$F(U) = \gamma\mu F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (10)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (11)$$

dimana

$$z_1 > z_0, |k| \neq 0$$

$U$  : potensial gayaberat

$\mu$  : anomali densitas

$\gamma$  : konstanta gayaberat

$r$  : jarak

Berdasarkan kedua persamaan di atas maka diperoleh :

$$F(U) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (12)$$

Sehingga transformasi Fourier anomali gayaberat pada lintasan yang diinginkan adalah :

$$F(g_z) = \gamma\mu F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \quad (13)$$

$$F(g_z) = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (14)$$

$$F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (15)$$



dimana :

$g_z$  = anomali gayaberat

$k$  = bilangan gelombang

$z_0$  = ketinggian titik amat

$z_1$  = kedalaman benda anomali

Jika distribusi densitas bersifat acak dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gayaberat, maka  $\mu = 1$  sehingga hasil transformasi Fourier anomali gayaberat menjadi :

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (16)$$

dimana :

$A$  = amplitudo

$C$  = konstanta

Untuk memperoleh hubungan antara amplitudo ( $A$ ) dengan bilangan gelombang ( $k$ ) dan kedalaman ( $z_0 - z_1$ ) dilakukan dengan melogaritmakan persamaan (16), sehingga bilangan gelombang  $k$  berbanding lurus dengan *spectral amplitude*.

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (17)$$

Persamaan (17) di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus :

$$y = mx + c \quad (18)$$

Dimana  $\ln A$  sebagai sumbu  $y$ ,  $|k|$  sebagai sumbu  $x$ , dan  $(z_0 - z_1)$  sebagai kemiringan garis (gradien). Oleh karena itu, kemiringan garisnya merupakan kedalaman bidang dalam dan dangkal  $|k|$  sebagai sumbu  $x$  didefinisikan dengan bilangan gelombang yang besarnya  $\frac{2\pi}{\lambda}$  dan satuannya *cycle/meter*,

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Dalam menganalisis kedalaman bidang dalam dan dangkal ini dapat menggunakan kurva  $\ln A$  vs  $k$  seperti pada

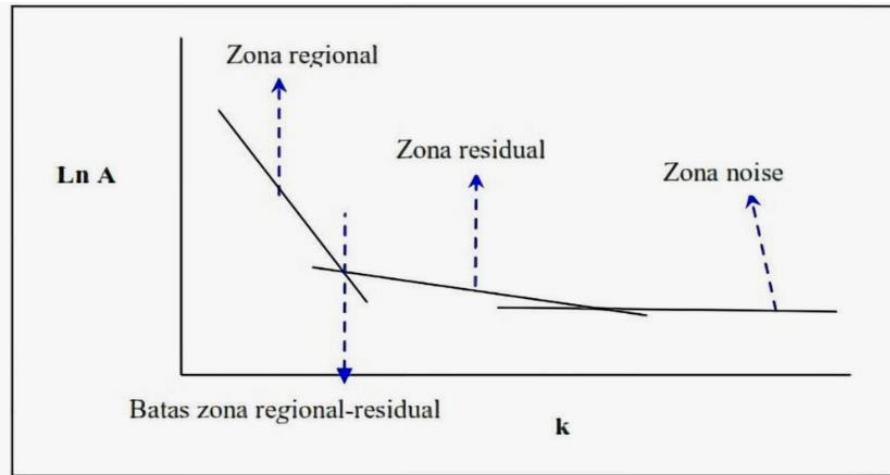
**Gambar 6.** Hubungan  $\lambda$  dengan  $\Delta x$  diperoleh dari persamaan:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{N\Delta x} \quad (19)$$

Nilai  $\lambda$  sama dengan  $\Delta x$ , ada faktor lain pada  $\Delta x$  yang disebut konstanta pengali, sehingga  $\lambda = N\Delta x$ , konstanta  $N$  didefinisikan sebagai lebar jendela, jadi lebar jendela dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (20)$$

Dimana  $\Delta x$  adalah domain spasi yang akan digunakan dalam transformasi Fourier, dan  $k_c$  adalah bilangan gelombang *cutoff*. Semakin besar nilai  $k$ , maka nilai frekuensi akan tinggi. Hubungan bilangan gelombang  $k$  dengan frekuensi  $f$  adalah  $k = 2\pi f$ , frekuensi yang sangat rendah berasal dari sumber anomali regional dan frekuensi tinggi berasal dari sumber anomali residual.



**Gambar 6.** Kurva  $\ln A$  terhadap  $k$  (Blakely, 1996).

### 3.5 Filter *Moving Average*

Filter *moving average* merupakan salah satu metode penapisan *low pass filter*, dimana metode ini menghilangkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Data anomali Bouguer lengkap ditapis menggunakan metode ini dengan lebar jendela merupakan rata-rata dari setiap lintasan yang telah melalui analisis spektrum. Hasil yang didapatkan disebut dengan anomali regional. Sedangkan anomali residual diperoleh dengan cara melakukan proses pengurangan pada Anomali Bouguer lengkap dengan anomali regional. Pada prinsipnya nilai lebar jendela yang digunakan semakin besar maka nilai anomali residual yang diperoleh akan semakin mendekati nilai Anomali Bouguer (Setiadi dkk., 2010). Adapun perhitungan *moving average* 1D ditulis pada persamaan (21) sebagai berikut :

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (21)$$

dimana :

$\Delta g_{reg}$  = besarnya anomali regional

$i$  = nomor stasiun

$N$  = lebar jendela

Nilai anomali residual  $\Delta g_{res}$  dihitung dengan menggunakan persamaan (22) :

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (22)$$

### 3.6 *First Horizontal Derivative*

Pengertian *horizontal derivative* pada data anomali gayaberat adalah perubahan nilai anomali gayaberat dari satu titik ke titik lainnya dengan jarak tertentu. *Horizontal derivative* dari anomali gayaberat yang disebabkan oleh suatu bodi cenderung untuk menunjukkan tepian dari bodi-nya tersebut. Jadi metode *horizontal derivative* dapat digunakan untuk menentukan lokasi batas kontak densitas horisontal dari data gayaberat (Cordell dan Grauch, 1982). Metode ini dapat digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan yang dangkal maupun dalam. Metode ini dapat digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan yang dangkal maupun dalam. Untuk menghitung nilai FHD dapat dilakukan dengan persamaan (23) berikut (Blakely, 1996):

$$FHD = \frac{\Delta g}{\Delta x} = \frac{g^{(i+1)} - g^{(i)}}{\Delta x} \quad (23)$$

Dengan  $\frac{\partial g}{\partial x}$  dan  $\frac{\partial g}{\partial y}$  merupakan turunan pertama perubahan nilai gravitasi pada arah  $x$  dan  $y$  dengan satuan mGal/m.

### 3.7 *Second Vertical Derivative*

*Second Vertical Derivative* (SVD) dilakukan untuk memunculkan efek dangkal dari pengaruh regionalnya yang digunakan untuk mendeteksi anomali yang disebabkan oleh struktur. *Second Vertical Derivative* (SVD) ini yaitu diturunkan dari persamaan Laplace. Adapun secara teoritis metode ini diturunkan dari persamaan Laplace untuk anomali gayaberat di permukaan seperti persamaan (24) berikut :

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (24)$$

atau :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (25)$$

sehingga *second vertical derivative*-nya diberikan oleh persamaan (26) :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (26)$$

Nilai nol turunan kedua dari Anomali Bouguer sama diinterpretasikan sebagai kontak dari kontras densitas antar dua lapisan batuan, dimana kontak tersebut dapat dikatakan sebagai struktur sesar ataupun intrusi (Sarkowi, 2010). Untuk menghitung nilai SVD dapat menggunakan beberapa operator filter 2D seperti pada **Tabel 3**, **Tabel 4**, dan **Tabel 5** berikut.

**Tabel 3.** Operator Henderson *and* Zietz (1949)

Operator Filter SVD menurut Henderson <i>and</i> Zietz (1949)				
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0838	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0838
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000

**Tabel 4.** Operator Elkins (1951)

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

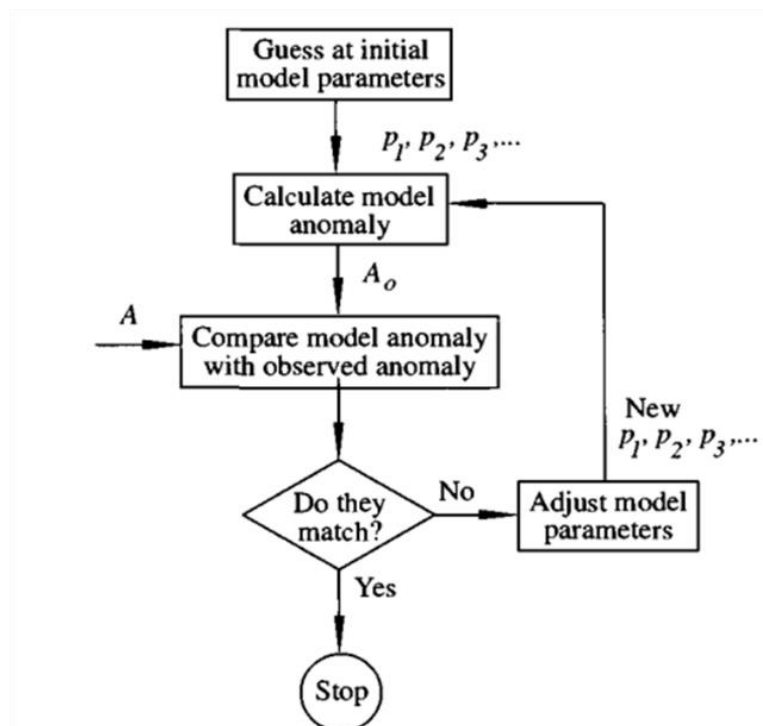
**Tabel 5.** Operator Rosenbach (1953)

Operator Filter SVD menurut 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

### 3.8 *Forward Modeling*

*Forward modeling* atau pemodelan ke depan merupakan suatu metode interpretasi untuk memprediksi atau memperkirakan nilai densitas bawah permukaan dengan membuat terlebih dahulu benda geologi yang terdapat di bawah permukaan. Pada *forward modeling* model awal dibangun berdasarkan perkiraan geologi dan geofisika. Anomali model dihitung dan dibandingkan dengan anomali yang diamati, serta parameter model disesuaikan untuk meningkatkan kesesuaian antara dua anomali. Proses penyesuaian model, perhitungan anomali, dan perbandingan anomali ini diulang sampai anomali yang dihitung dan diamati dianggap cukup mirip (Blakely, 1996).

Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respons model) dengan data lapangan dilakukan proses coba-coba dengan mengubah harga parameter model seperti pada **Gambar 7**. Istilah pemodelan ke depan atau *forward modeling* sering digunakan untuk menyatakan pemodelan data geofisika dengan cara coba-coba. Dengan kata lain, istilah pemodelan ke depan tidak hanya mencakup perhitungan respon model tetapi juga proses coba-coba secara manual untuk memperoleh model yang memberikan respon yang cocok dengan data (Sarkowi, 2014).



**Gambar 7.** Teknik pemodelan dengan cara coba-coba dan modifikasi parameter model (Blakely, 1996).

### 3.9 Inverse Modeling

*Inverse modeling* adalah suatu metode interpretasi dimana mekanisme model untuk memperoleh kecocokan data perhitungan dan data pengamatan dilakukan secara otomatis. Pada pemodelan inversi, satu atau lebih parameter model dapat dihitung secara otomatis dari data pengamatan sehingga menghasilkan respon yang sesuai. Pemodelan inversi sering disebut data *fitting* atau pencocokan data karena tahapannya melakukan pencarian parameter model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan (Grandis, 2009).

Kesesuaian antara respons model dengan data pengamatan umumnya dinyatakan oleh suatu fungsi obyektif yang harus diminimumkan. Proses pencarian minimum fungsi obyektif tersebut berasosiasi dengan proses pencarian model optimum. Karakteristik minimum suatu fungsi tersebut digunakan untuk pencarian parameter model. Secara lebih umum model dimodifikasi sedemikian hingga respons model menjadi *fit* dengan data (Sarkowi, 2014).

## IV. METODE PENELITIAN

### 4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika,  
Universitas Lampung

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

Waktu : Oktober 2022 – Maret 2023

### 4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Tabel 7** sebagai berikut :

**Tabel 6.** Data penelitian

No	Data	Sumber Data
1	Data Gayaberat	Data ini berupa nilai anomali Bouguer Lengkap dan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Pusat Survei Geologi Bandung pada tahun 2012 berjumlah 243 titik.
2	Data DEM SRTM	Data ini diperoleh dari website DEMNAS <a href="http://www.tanahair.indonesia.go.id">www.tanahair.indonesia.go.id</a> .
3	Peta Geologi	Peta geologi yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari Peta Geologi Lembar Baturaja Gafoer dkk., (1993) dan peta geologi Tim Survei Geologi PSDG, (2012).

**Tabel 7.** *Software* yang digunakan dalam penelitian

No	<i>Software</i>	Fungsi
1	Laptop	Digunakan dalam pengolahan data penelitian
2	ArcGIS 10.8	Berfungsi dalam pembuatan peta lokasi penelitian, peta geologi dan analisis SIG lainnya.
3	Numeri	Digunakan untuk analisis spektrum.
4	Surfer 13	Digunakan untuk mengolah data gayaberat yaitu dalam membuat peta kontur anomali Bouguer, pemisahan anomali Bouguer regional dan residual, perhitungan FHD dan SVD.
5	Oasis Montaj	Digunakan untuk membuat penampang melintang pemodelan ke depan 2D.
6	Grav3D 2.0	Digunakan untuk membuat model distribusi densitas bawah permukaan dengan metode inversi 3D.

### 4.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 4.3.1 Anomali Bouguer Lengkap

Data gayaberat yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data anomali Bouguer lengkap. Dalam penelitian ini tidak perlu dilakukan koreksi untuk mendapatkan nilai anomali Bouguer lengkap (ABL). Dari data ini kemudian dilakukan *gridding* untuk mendapatkan kontur anomali Bouguer lengkap menggunakan *software* Surfer 13.

#### 4.3.2 Analisis Spektrum

Setelah didapatkan peta anomali Bouguer lengkap (ABL), langkah selanjutnya adalah analisis spektrum. Metode analisis spektrum menggunakan transformasi Fourier untuk mengubah domain data dari domain jarak menjadi domain frekuensi. Dengan analisis spektrum dapat diketahui kandungan frekuensi dari data sehingga kedalaman suatu benda anomali gayaberat di bawah permukaan



dapat diperkirakan. Frekuensi rendah yang berasosiasi dengan panjang gelombang yang panjang mengindikasikan daerah regional yang mewakili struktur dalam dan luas. Sedangkan frekuensi tinggi yang berasosiasi dengan panjang gelombang yang pendek mengindikasikan daerah residual yang mewakili struktur dangkal, sedangkan frekuensi sangat tinggi menunjukkan *noise* yang disebabkan oleh berbagai faktor. Dalam penelitian ini analisis spektrum dilakukan pada 3 lintasan yang mewakili daerah yang kita inginkan. Dari ketiga lintasan tersebut kemudian dilakukan transformasi Fourier menggunakan *software* Numeri. Semua data yang didapatkan dari lintasan tersebut kemudian diolah menggunakan Ms. Excel untuk mencari nilai  $\ln A$  dan nilai bilangan gelombang  $k$  yang nantinya digunakan untuk mengetahui estimasi kedalaman.

#### **4.3.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual**

Anomali Bouguer pada metode gayaberat disebabkan oleh perbedaan densitas batuan, baik yang berada dekat dengan permukaan bumi maupun yang jauh dari permukaan bumi. Efek yang berasal dari batuan pada daerah dangkal disebut dengan anomali residual sedangkan efek yang berasal dari batuan yang dalam disebut dengan anomali regional. Pada penelitian ini pemisahan anomali regional dan anomali residual dilakukan dengan metode *moving average*. *Moving average* merupakan rerata dari data anomali gayaberat dimana hasil dari metode ini adalah anomali regional, dan untuk anomali residual diperoleh dari selisih antara Anomali Bouguer dengan anomali residual. Perangkat lunak yang digunakan untuk proses ini adalah *software* Surfer, proses pemisahan anomali dimulai dengan memasukkan data Anomali Bouguer ke dalam perangkat lunak Surfer lalu nilai lebar jendela optimal yang didapatkan pada proses analisis spektrum dimasukkan sebagai nilai input pemisahan.

#### 4.3.4 Analisis Derivatif

Analisis derivatif yang digunakan dalam pemrosesan data yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Filter SVD ini dilakukan dengan menggunakan operator Elkins yang digunakan pada peta anomali residual untuk menentukan batas-batas struktur yang ada pada daerah penelitian. Hasil dari pengolahan analisis derivatif ini akan digunakan sebagai data pendukung analisis struktur bawah permukaan untuk mengetahui sebaran struktur pada daerah penelitian.

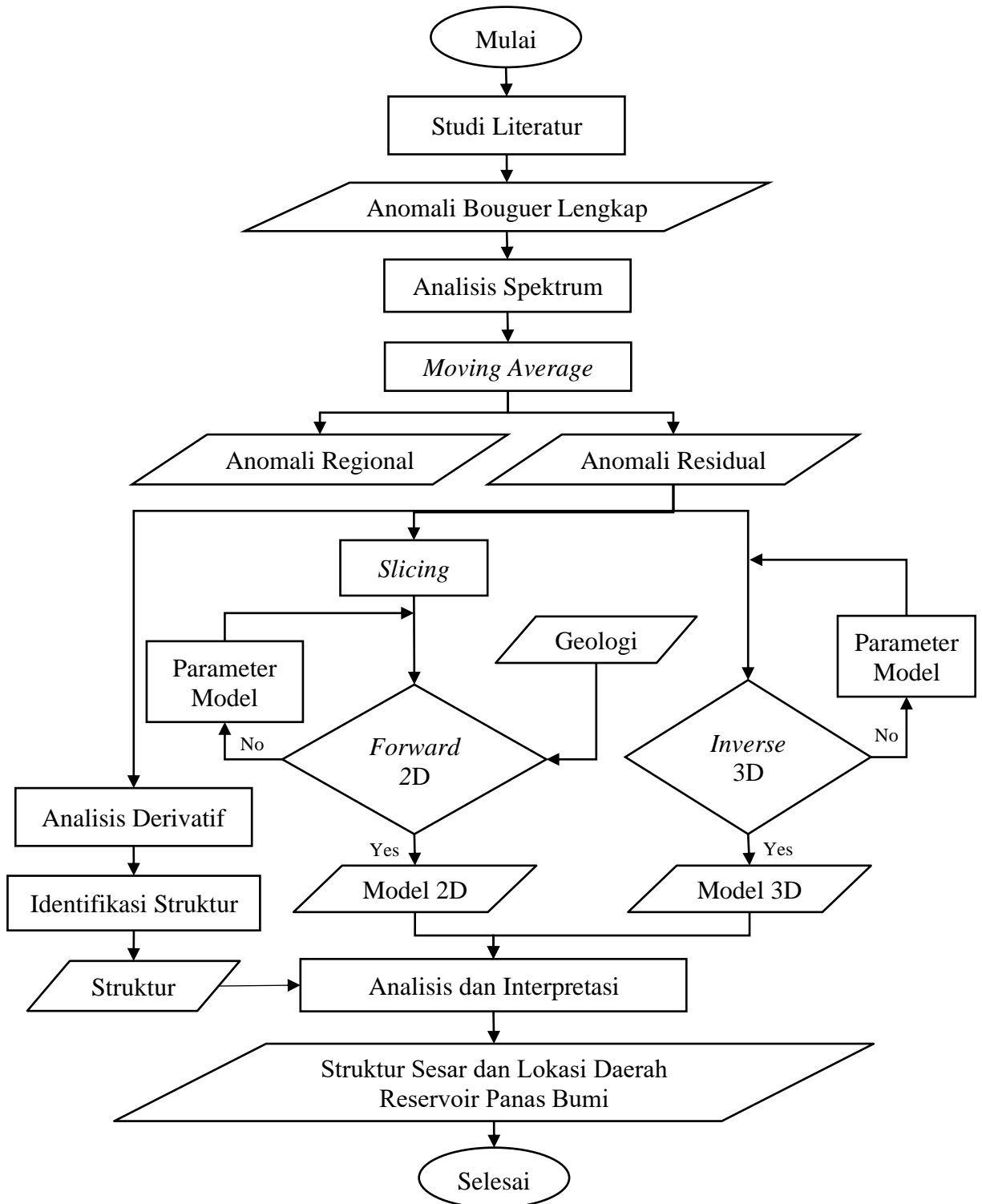
#### 4.3.5 Pemodelan Bawah Permukaan

Pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini menggunakan metode *forward modeling* (pemodelan ke depan) 2D dan *inverse modeling* (pemodelan ke belakang) 3D dengan menggunakan *software* Grav3D 2.0. Tahapan *forward modeling* dilakukan dengan melakukan input data jarak dan data anomali residual berdasarkan *slice* ataupun lintasan yang telah dibuat. Tahapan penentuan lintasan dilakukan dengan menarik lintasan yang melewati anomali tinggi dan anomali rendah yang diindikasikan sebagai daerah sesar. Tahapan *inverse modeling* 3D dilakukan dengan cara menginput data *mesh* serta data anomali residual untuk membuat suatu model 3D dari daerah penelitian yang mendekati model yang sebenarnya. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mengetahui reservoir dan *heat source* panas bumi daerah penelitian.



#### 4.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut seperti pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Diagram alir penelitian.

## VI. KESIMPULAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data gayaberat dan interpretasi data yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari hasil analisis spektrum diperoleh batas anomali Bouguer regional dan residual pada kedalaman 3000 meter.
2. Analisis derivatif menunjukkan adanya struktur sesar yang menjadi penyebab munculnya manifestasi air panas di daerah ini. Terdapat sesar naik pada daerah G. Remas, G. Neki, dan G. Benatan sedangkan sesar turun terdapat pada daerah manifestasi air panas di Juku Batu.
3. Distribusi densitas bawah permukaan berdasarkan pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D pada daerah penelitian berkisar antara 2,36 gr/cc hingga 2,91 gr/cc dengan zona lemah diidentifikasi sebagai batuan sedimen berusia tersier berupa batuan pasir dan lempung serta batuan breksi basalt, sedangkan zona tinggi berkaitan dengan meningginya basemen akibat intrusi batuan lava basalt.
4. Berdasarkan model distribusi densitas bawah permukaan daerah panas bumi Way Umpu, didapatkan bahwa lokasi reservoir berada di antara desa Bandar Agung - Tanjung Baru dan di antara desa Bandar Agung - Batu Api pada kedalaman 500 m - 2000 m dengan nilai densitas 2,45 - 2,65 gr/cc berupa batuan breksi basalt, sedangkan lokasi *heat source* berada di bawah Gunung Neki di bagian selatan reservoir, dengan nilai densitas 2,9 gr/cc berupa lava basalt. Posisi *heat source* berada di sebelah selatan dari reservoir yang menyebabkan suhu pada reservoir tidak terlalu tinggi, sehingga diperkirakan bahwa sistem panas bumi Way Umpu sebagai *water dominated system*.

## **6.2 Saran**

Untuk mengkonfirmasi struktur lebih lanjut diperlukan analisis yang mendetail mengenai sesar pada daerah penelitian. Konfirmasi juga diperlukan untuk mengetahui keberadaan lokasi reservoir tersebut dengan penelitian lebih lanjut, seperti metode magnetotelurik, mikroseismik dan geokimia sehingga hasil penelitian ini dapat dikompilasikan dengan metode tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. 2018. *Portal pencarian dan integrasi informasi geospasial melalui Ina-SDI*. <https://tanahair.indonesia.go.id>. Diakses pada tanggal 8 November 2021.
- Blakely, R.J. 1996. *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Brehme, M., Deon, F., Haase, C., Wiegand, B., Kamah, Y., Sauter, M., dan Regenspurg, S. 2016. Durch Störungszonen kontrollierte geochemische Eigenschaften des geothermischen Reservoirs Lahendong in Indonesien. *Grundwasser*, 21, 29-41.
- Brotopuspito, K.S. 2001. *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Daud, Y., Rosid, M. S., Pati, G. P., Maulana, M. R., dan Khoiroh, M. 2018. Imaging Structural Control of Geothermal Reservoir Using Remote Sensing And Gravity Data Analysis in Blawan-Ijen, East Java, Indonesia. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2023, No. 1, p. 020263). AIP Publishing LLC.
- Ditjen EBTKE. 2017. *Buku Potensi Panas bumi Jilid 1*. Direktorat Panas Bumi. Jakarta.
- Djudjun, A. 2005. Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*. Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung.
- Elkins, T.A. 1951. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. *Geophysics*, v.23, h.97-127.
- Gafoer, S., Amin, T.C., dan Pardede, R. 1993. *Peta Geologi Lembar Baturaja*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Departemen Pertambangan dan Energi. Bandung.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.

- Haerudin, N. dan Karyanto, K. 2007. Aplikasi Metode Polinomial Least Square Berbasis Matlab Untuk Memisahkan Efek Residual Anomali Regional Pada Data Gravitasi. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung*. 5(1).
- Haerudin, N., Karyanto, K. dan Kuntoro Y. 2016. Radon And Thoron Mapping To Delineate The Local-Fault in The Way Ratai Geothermal Field Lampung Indonesia. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(7), 4804-4809.
- Henderson, R.G. and Zietz, I. 1949. The Computation of Second Vertical Derivative of Geomagnetic Fields. *Geophysics Journal*. v. 14.
- Hinze, W.J. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications, 1 Ed.* Cambridge University Press. Cambridge.
- Kadir, W.G.A. 2000. *Eksplorasi Gayaberat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral. ITB. Bandung.
- Parnadi, W.W., Widodo, Savitri, R.W. dan Zarkasyi, A. 2014. Magnetotelluric Investigations in the Way Umpu Geothermal Prospect Area, Lampung Province, Indonesia. *International Journal of Technology*, 5(3). 227–241.
- Reynolds, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Chichester*. John Wiley dan sons.
- Rosenbach, O. 1953. A Contribution to The Computation of The Second Derivative From Gravity Data. *Geophysics*, XVII, 894-911.
- Rosid, S. 2005. *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Department of Physics, University of Indonesia.
- Saptadji, N.M. 2001. *Teknik Panas Bumi*. ITB. Bandung.
- Sarkowi, M. 2007. Gaya Berat Mikro Antar Waktu untuk Analisa Perubahan Kedalaman Muka Air Tanah (Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang). Disertasi. ITB Bandung.
- Sarkowi, M. 2010. Identifikasi Struktur Daerah Panas bumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, Vol. 16, No.2, Hal.111-118.
- Sarkowi, M. 2014. *Eksplorasi Gaya Berat*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Sarkowi, M., dan Wibowo, R.C. 2021. Geothermal Reservoir Identification based on Gravity Data Analysis in Rajabasa Area Lampung. *Riset Geologi dan Pertambangan Indonesian Journal of Geology and Mining*, 31(2), 77-97.



- Sarkowi, M., Wibowo, R.C., dan Karyanto K. 2021. Geothermal Reservoir Identification in Way Ratai Area Based on Gravity Data Analysis. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2110, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- Serway, R.A. dan Jewett, J.W. 2009. *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Salemba Teknik. Jakarta.
- Setiadi, I., Setyanta, B. dan Widijono, B.S. 2010. Delineasi Cekungan Sedimen Sumatera Selatan Berdasarkan Analisis Data Gaya Berat. *Jurnal Sumber Daya Geologi*. 20(2): 93-106.
- Sihombing, R.B. dan Rustadi. 2020. Pemodelan Dan Analisa Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas bumi Kepahiang Berdasarkan Metode Gayaberat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(2), 47–61.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. dan Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Tim Survei Terpadu. 2012. *Survei Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Way Umpu, Kabupaten Way Kanan, Propinsi Lampung*. Laporan Survei Terpadu Way Umpu. Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.