

**IDENTIFIKASI *RESERVOIR* DAN BATUAN *HEATSOURCE*
PANAS BUMI BITTUANG BERDASARKAN ANALISIS
PEMODELAN DATA GAYABERAT**

(Skripsi)

Oleh

Paulina Beny Claudia Manullang

2215051021



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

**IDENTIFIKASI *RESERVOIR* DAN BATUAN *HEATSOURCE*
PANAS BUMI BITTUANG BERDASARKAN ANALISIS
PEMODELAN DATA GAYABERAT**

oleh
Paulina Beny Claudia Manullang

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

IDENTIFIKASI *RESERVOIR* DAN BATUAN *HEATSOURCE* PANAS BUMI BITTUANG BERDASARKAN ANALISIS PEMODELAN DATA GAYABERAT

Oleh

Paulina Beny Claudia Manullang

Potensi panas bumi Bittuang, Sulawesi Selatan merupakan salah satu wilayah prospek panas bumi di Indonesia. Panas Bumi Bittuang memiliki beberapa manifestasi yang muncul ke permukaan, struktur geologi berupa patahan yang berperan sebagai jalur keluarnya fluida panas bumi. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi *reservoir* dan *heatsource* berdasarkan hasil analisis pemodelan data gayaberat. Pengolahan data gayaberat menggunakan data GGMPPlus diawali dengan pemisahan anomali regional dan residual menggunakan filter *moving average*. Selanjutnya dilakukan penentuan struktur patahan melalui analisis *derivative* dengan empat penampang, dan untuk mengidentifikasi zona *reservoir* dan *heat source* dilakukan pemodelan inversi 3D yang menunjukkan hasil persebaran distribusi densitas berkisar 1,9 hingga 2,9 gr/cc dengan rentang kedalaman 2600 dibawah *mean sea level*. Keberadaan *reservoir* berada di sekitar titik manifestasi air panas yang mengalir dari zona *upflow* yang berada dekat dengan Gunung Karua, sedangkan *heatsource* berada tepat dibawah permukaan Gunung Karua yang diinterpretasikan pada model inversi memiliki nilai densitas yang tinggi berkisar dari 2,7 gr/cc hingga 2,9 gr/cc.

Kata kunci: Bittuang, gayaberat, inversi 3D, panas bumi

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF RESERVOIR AND HEAT SOURCE ROCKS OF THE BITTUANG GEOTHERMAL SYSTEM BASED ON GRAVITY DATA MODELING ANALYSIS

By

Paulina Beny Claudia Manullang

The geothermal potential of Bittuang, South Sulawesi, is one of the prospective geothermal areas in Indonesia. The Bittuang geothermal field has several surface manifestations and geological structures in the form of faults that act as pathways for geothermal fluid discharge. This study was conducted to identify the reservoir and heat source based on gravity data modeling analysis. Gravity data processing utilized GGMPPlus data, beginning with the separation of regional and residual anomalies using the moving average filter. Furthermore, fault structures were determined through derivative analysis using four cross-sections. To identify the reservoir zone and heat source, 3D inversion modeling was carried out, showing a density distribution ranging from 1.9 to 2.9 g/cc at depths reaching 2600 m below mean sea level. The reservoir is interpreted to be located around the hot spring manifestation points, supplied by an upflow zone situated near Mount Karua, while the heat source is interpreted to lie directly beneath Mount Karua, represented in the inversion model by high density values ranging from 2.7 g/cc to 2.9 g/cc.

Keywords: Bittuang, gravity, 3D inversion, geothermal

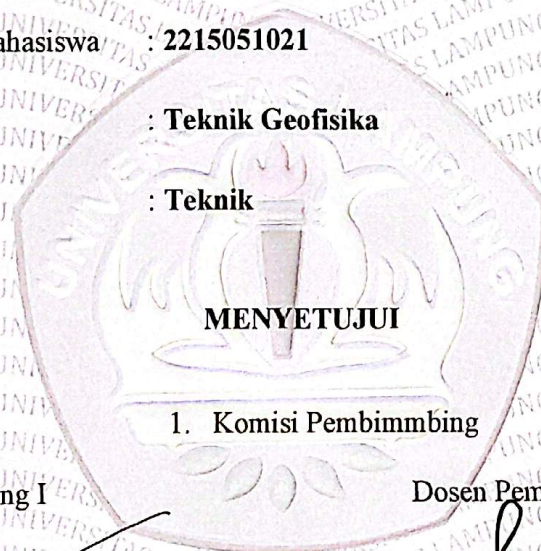
Judul Skripsi : **Identifikasi Reservoir Dan Batuan Heatsource Panas
Bumi Bittuang Berdasarkan Analisis Pemodelan
Data Gayaberat**

Nama Mahasiswa : **Paulina Beny Claudia Manullang**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215051021**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU

Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T

NIP. 197112101997021001

NIP. 199102072018032001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.E.I.A., IPM.

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.

Sekretaris : Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T.

Anggota : Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T.

2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIR 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 18 Mei 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Identifikasi *Reservoir* dan Batuan *Heatsource* Panas Bumi Bittuang Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat” adalah hasil kerja saya sendiri yang berdasarkan pengalaman, pengetahuan dan data yang telah saya dapatkan. Karya ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil plagiat karya orang lain. 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 ilmiah. Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila saya tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Mei 2026



Paulina Beny/Claudia Manullang

NPM. 2215051021

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Paulina Beny Claudia Manullang, lahir di Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 12 Agustus 2004. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang berasal dari keluarga kecil yang harmonis yang selalu dan akan mendukung penulis dalam pendidikan. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 1 Beringin Raya pada tahun 2010, dilanjutkan jenjang SMP Negeri 14 Bandar Lampung pada tahun 2016, lalu pada jenjang sekolah menengah atas di SMA Negeri 7 Bandar Lampung pada tahun 2019 hingga 2022.

Penulis kemudian melanjutkan pada jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada tahun 2022. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif dalam berbagai kegiatan baik di bidang akademik maupun non-akademik. Pada tahun 2023, penulis menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (HIMA TG Bhuwana) menjadi pengurus di Bidang Sains dan Teknologi selama dua periode dan pada tahun 2024 penulis menjadi *sie creative* pada acara *Geophysics Whiz Event and Seminar (GWES)*. Pada tahun yang sama juga pada tahun 2024 penulis menjadi *sie creative* pada acara *Geophysics Academy and Event (GEAVENT)* yang bersifat regional yang diselenggarakan oleh HIMA TG Bhuwana. Penulis juga menjadi anggota divisi *Internal Affairs* dalam HAGI UNILA SC pada tahun 2023/2025. Lalu pada tahun yang sama penulis menjadi Bendahara Umum pada UKM Basketball Universitas Lampung hingga dua periode. Penulis menjalankan kegiatan Kerja Praktik (KP) pada bulan September 2025 di Badan Meteorologi,

Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Bandung, dengan judul **“Analisa Gempabumi Wilayah PGR II Dan Penentuan Magnitudo Lokal Menggunakan Jaringan Tsmip (Studi Kasus: Gempabumi Taiwan 2021-094)”**.

Selama menjalani masa perkuliahan, penulis telah mempublikasikan karya tulis ilmiah. Pada tahun 2024, penulis menerbitkan artikel ilmiah dengan judul **“Identifikasi Zona Potensi Likuifaksi di Kota Bandar Lampung Berdasarkan Analisis Data Spasial”** Pada Jurnal Geofisika Eksplorasi (JGE) Vol. 10 No 13 tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis juga mempublikasikan karya tulis ilmiah dengan judul **“Analisis Pengaruh Curah Hujan Terhadap Rata-Rata Suhu, Kecepatan Angin, dan Kelembapan di Kota Bandar Lampung”** pada jurnal Ilmiah Teknosains (JITEK) Vol. 11 No 1 tahun 2025.

PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati dan rasa syukur yang tak terhingga, kupersembahkan dengan sepenuh hati karya yang tidak lebih dari sempurna kepada kedua orang tua yang sangat saya cintai. Terima kasih untuk kasih telah menjadi rumah yang penuh kasih sayang dan cinta yang hangat untuk tempat beristirahat. Kelak apa yang diusahakan membuahakan yang manis untuk kita.

KELUARGA TERCINTA

Terima kasih kepada keluarga besar yang senantiasa memberikan doa, dukungan baik dalam segi materi maupun non-materi demi memastikan agar penulis bisa mengenyam pendidikan hingga ke tahap ini, dan semangat tanpa henti.

TEKNIK GEOFISIKA 2022 “GRANIT”

Terima kasih atas segala kenangan indah yang tercipta sejak semester awal hingga akhir perkuliahan. Terima kasih sudah memberikan pelajaran dan ilmu yang berharga untuk hidup dan belajar bersama sekaligus partner dalam berbagai kegiatan. Terima kasih telah mengukir cerita yang sangat indah dan berharga. Semoga bertemu lagi di versi terbaik masing-masing.

KELUARGA BESAR TEKNIK GEOFISIKA UNIVERSITAS LAMPUNG

Terima kasih untuk semua pengajaran, bantuan, dan pengalaman yang sangat berkesan selama masa perkuliahan di Teknik Geofisika.

MOTTO

“Percayalah kepada Tuhan dengan segenap hatimu, dan janganlah bersandar kepada pengertianmu sendiri.”

(Amsal 3:5)

“Whatever you do, work at it with all your heart, as working for the Lord”

(Colossians 3:23)

“Sederhanakan diri, didepan masih panjang. Karena hidup tak hanya senang dan indah”

(Pegang Tanganku- Nosstress)

“Do what feels right to you, life is too beautiful to live by everyone else’s expectations”

KATA PENGANTAR

Mengucap syukur kepada Tuhan atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini dengan judul “Identifikasi *Reservoir* dan Batuan *Heatsource* Panas Bumi Bittuang Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayabarat” terselesaikan dengan baik. Proses penyusunan skripsi tidak lepas dari berbagai hambatan dan tantangan. Akan tetapi, berkat dukungan, doa dan bimbingan dari berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan dengan baik. Terima kasih penulis sampaikan pada semua pihak yang turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan laporan. Harapan penulis, semoga dalam laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, baik kalangan umum maupun akademik dalam menunjang kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 10 Mei 2026
Penulis,

Paulina Beny Claudia Manullang
NPM. 2215051021

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Kuasa karena kasih dan anugerah-Nya, penulis dapat menyusun skripsi ini dengan baik, dengan judul skripsi “Identifikasi *Reservoir* dan Batuan *Heatsource* Panas Bumi Bittuang Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat” sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik. Skripsi ini merupakan hasil dari proses panjang yang tidak dapat penulis lalui seorang diri. Banyak pihak yang berkontribusi dan berperan besar dalam memberi dukungan, nasihat dan semangat. Oleh karena itu, dengan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Is. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, sekaligus pembimbing Kerja Praktik saya, yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, dan juga penasehat terbaik keluarga PPDG yang telah memberikan banyak bantuan, serta kemudahan kepada penulis dalam menyelesaikan studi secara tepat waktu.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU., selaku dosen pembimbing akademik dan dosen pembimbing I tugas akhir saya yang telah membimbing, selalu meluangkan waktu, memberikan arahan, saran, masukan dan koreksi, serta ilmu yang diberikan tidak hanya memperkaya wawasan penulis, tetapi juga membentuk cara berpikir yang lebih kritis serta tidak lupa selalu memberikan

semangat dan dukungan kepada penulis, tidak hanya selama proses penyusunan skripsi ini, melainkan sepanjang proses perkuliahan.

5. Ibu Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T., selaku dosen pembimbing II tugas akhir saya yang telah memberikan arahan, saran, dan koreksi, serta selalu membimbing penulis selama proses penyelesaian skripsi ini.
6. Seluruh dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan banyak sekali ilmu, dan pembelajaran yang bermanfaat dan berharga untuk saya selama saya berkuliah, dan civitas akademik terutama kepada “mas Dayat” yang membuat hidup suasana Teknik Geofisika.
7. Orang tua saya terutama kepada mama saya yang memberikan seluruh tenaga, usaha, doa, dan dukungan secara fisik dan moral yang tiada henti, untuk papa disurga ini salah satu ucapan syukur yang belum bisa kita rayakan bersama tapi saya harap papa bangga melihatku hingga dititik ini.
8. Kepada adik saya satu-satunya Bonita Jessica Imanuella, terima kasih sudah memberikan dukungan dan semangat hingga detik ini, jadilah lebih baik dari kemarin.
9. Kepada “Lollipop” sahabat suka dan duka, keluarga kecil tempat berkeluh kesah, dan penasehat pribadi yang tidak bisa dibayar dengan apa-apa. Terima kasih yang teramat untuk Q, Nb, Kapi, dan Bunjil, terlalu banyak hal yang belum bisa tersampaikan, tapi doa saya semoga persahabatan ini akan dan selalu selamanya.
10. Kepada penghuni Lab. PPDG saya berterima kasih untuk waktu, kebahagiaan, dan pertemanan unik yang kita bangun secara singkat tapi bermakna di akhir, terima kasih sudah menemani hingga akhir untuk Tila, Nadia, Ika, Dini, Edu, Razan, Harsya, Yusron, dan teman teman dalam grub “WISUDA JULI FIX MAX”.
11. Kepada Bang Rehan (aka ITB 2.0), Bang Rezky, Bang Fahmi, Bang Rifan, Bang Rayya (*hero*), Bang Piko, Kak Febby, Kak Dinda, Kak Intan, Kak Rinda, Kak Finna, Bang Ahya, Bang Erick, terimakasih untuk pelajaran, waktu, dan menjadi abang dan kakak yang membuat kisah dan kesan indah selama diperkuliahkan .
12. Kepada UKM Basketball Universitas Lampung, terimakasih sudah menjadi tempat pelarian selama masa perkuliahan, tempat dimana saya bisa menjadi diri saya

sendiri, terutama untuk Uje, Rama, Rafha, Abdel, Harsya, Dinda, Danu, Naja, Fathur, Siti, Jije, Diky, Ogap dan teman-teman lainnya yang belum tersebut.

13. Kepada “Anak Embung”, yaitu Senobiya dan Tila, terima kasih sudah menemani dari semester empat hingga semester akhir, sangat senang bisa berbagi cerita, dan menikmati waktu bersama paling indah dengan kalian berdua menjadi tempat kita. Apapun yang terjadi diantara kita itu merupakan bumbu untuk pertemanan kita, semoga kita bertemu kembali dengan versi terbaik kita.
14. Kepada Q, Inun, Yasin, dan Pinus teman dalam menghabiskan waktu, tempat pelarian, dan teman penjelajah alam, saya berterima kasih untuk waktu dan kebahagiaan yang tidak bisa tergantikan, doa yang terbaik untuk kita.
15. Kepada “G-Team”, yaitu Helga dan Tila, saya bersyukur dengan ketidaksengajaan yang menyenangkan ini, pertemanan yang mengajarkan saya dalam hal berproses dan hal-hal baik lainnya. Terimakasih untuk usaha dan keberanian kita saat itu, senang mencapai lima besar bersama kalian.
16. Kepada “MaFaDAu”, kepada Rama, Rafha, dan Dinda, terimakasih untuk waktu-waktu yang terbuang dan tergantikan dengan momen-momen indah yang hanya bisa dilakukan sekali saja. Menyenangkan menghabiskan malam bersama dengan kalian.
17. Kepada “PBB TG22”, terimakasih sudah menjadi keluarga tempat nyaman untuk bercanda tawa baik di TG maupun di kontrakan, terimakasih untuk Edu, Pra, Wanti, Uliv, Paris, dan Aloy (yang dibatalkan).
18. Kepada “Rocket Printing”, yang telah membantu dalam mentuntaskan semester akhir saya, sukses selalu ya kak.
19. Kepada Qinthara Shafa Khalisa, sangat amat berterima kasih sudah mau menjadi teman dan saudara perempuan saya, mau berbagi cerita, dan menjadi tempat dimana saya perlu berhenti sejenak, semoga apa yang kita “impikan itu” benar benar terwujud.
20. Kepada M. Sunuy Subekti, teman sekaligus saudara untuk saya, terima kasih untuk nasehat, bantuan, dan tempat mengeluh saya, dan tidak pelit dalam berbagi dalam hal apapun kepada saya, *such a pleasure to know you.*

21. Kepada Shabra Panska Shatila, sangat berharga untuk mengenalmu lebih dekat. Terima kasih telah menjadi tempat berkeluh kesah dan bersabar menghadapi tingkah laku penyusun. Senang menghabiskan waktu bersamamu baik di Bandar Lampung maupun di Bandung. *See you when I see you.*
22. Kepada seseorang yang sedang berjalan bersama di sisi penulis, yang selalu percaya dan mengusahakan saya. Terima kasih atas ketulusan, kesabaran, dan dukungan yang tidak pernah berkurang dan semoga selalu dan terus bertambah. Kehadiranmu merupakan ketidaksengajaan indah yang memberikan kekuatan disetiap proses yang dilalui.
23. Teruntuk diri sendiri, saya berterima kasih karena telah melewati setiap proses dengan penuh kesabaran dan keteguhan. Terima kasih untuk tidak pernah menyerah pada diri sendiri. Perjalanan ini menjadi pengingat bahwa kekuatan terbesar datang dari dalam diri.

Bandar Lampung, 18 Mei 2026

Paulina Beny Claudia Manullang
2215051021

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	x
MOTTO	xi
KATA PENGANTAR	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR GAMBAR	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Administrasi Lokasi	6
2.2 Geologi Daerah Penelitian	7
2.2.1 Geomorfologi	7
2.2.2 Stratigrafi	9
2.2.3 Struktur Geologi	13
2.3 Penelitian Terdahulu	14
III. TEORI DASAR	18
3.1 Sistem Panas Bumi	18
3.2 Metode Gayaberat	19

3.3	Konsep Dasar Metode Gayaberat.....	20
3.3.1	Gayaberat Newton	20
3.3.2	Percepatan Gayaberat	20
3.3.3	Potensial Gayaberat	22
3.3.4	Rapat Massa Batuan	23
3.4	Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat.....	25
3.4.1	Koreksi Lintang	25
3.4.2	Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>)	26
3.4.3	Koreksi <i>Bouguer</i>	26
3.4.4	Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>)	27
3.4.5	Anomali <i>Bouguer Lengkap</i>	28
3.5	Pemisahan Anomali Regional dan Residual	29
3.6	<i>Fitlering Moving Average</i>	33
3.7	<i>First Horizontal Derivative (FHD)</i> dan <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i> 34	
3.7.1	<i>First Horizontal Derivative (FHD)</i>	34
3.7.2	<i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	35
3.8	<i>Inverse Modelling</i>	37
3.9	<i>Global Gravity Model plus (GGMPlus)</i>	38
IV.	METODOLOGI PENELITIAN	39
4.1	Tempat dan Waktu Penelitian	39
4.2	Jadwal Penelitian.....	40
4.3	Alat dan Bahan	41
4.4	Prosedur Penelitian.....	42
4.4.1	Studi Literatur	42
4.4.2	Koreksi Data	42
4.4.3	Penentuan Nilai Densitas	43
4.4.4	<i>Anomali Bouguer Lengkap</i>	43
4.4.5	Pemisahan Anomali Regional dan Residual.....	44

4.4.6 <i>First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD)</i>	45
4.4.7 <i>Pemodelan Bawah Permukaan</i>	46
4.5 <i>Diagram Alir Penelitian</i>	47
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	48
5.1 <i>Anomali Bouguer Lengkap</i>	48
5.2 <i>Analisis Spektrum</i>	49
5.3 <i>Pemisahan Anomali Regional dan Residual</i>	57
5.4 <i>Analisis Derivative</i>	60
5.5 <i>Inverse Modelling</i>	65
5.6 <i>Komparasi Inversi Gayaberat dengan Metode Magnetotellurik</i>	73
5.7 <i>Analisis Geokimia</i>	75
5.8 <i>Model Konseptual Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian</i>	80
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	82
6.1 <i>Kesimpulan</i>	82
6.2 <i>Saran</i>	83
DAFTAR PUSTAKA	84

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu	14
2. Nilai Densitas Batuan Sedimen (Telford dkk., 1990).....	24
3. Nilai Densitas Batuan Beku (Telford dkk., 1990).....	24
4. Nilai Densitas Batuan Metamorf (Telford dkk., 1990).....	25
5. Pelaksanaan Kegiatan Penelitian.....	40
6. Alat dan Bahan.....	41
7. Estimasi Kedalaman Rata-Rata Kedalaman Regional, Residual, Cut Off,.....	57
8. Analisis Derivative Penampang A-A'	61
9. Analisis Derivative Penampang B-B'	62
10. Analisis Derivative Penampang C-C'	63
11. Analisis Derivative Penampang D-D'	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Administrasi Kabupaten Tana Toraja	6
2. Peta Geomorfologi Penelitian (Modifikasi dari Soetoyo dkk., 2009).....	8
3. Peta Geologi Daerah Penelitian (Modifikasi dari PSG, 2009).....	9
4. Sistem Panas Bumi (Dickson dan Fanelli, 2003).....	19
5. Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda (Grandis, 2009).....	20
6. Potensial dan Kuat Medan Massa 3D (Telford dkk., 1990).....	22
7. Pemisahan Regional dan Residual (Blakely, 1995).	30
8. Diagram Alir Penelitian	47
9. Anomali Bouguer Lengkap	49
10. Penampang Analisis Spektrum	50
11. Grafik Ln A terhadap Penampang A-A'	51
12. Grafik Ln A terhadap Penampang B-B'	52
13. Grafik Ln A terhadap Penampang C-C'	53
14. Grafik Ln A terhadap Penampang D-D'	54
15. Grafik Ln A terhadap Penampang E-E'	55
16. Grafik Ln A terhadap Penampang F-F'	56
17. Peta Anomali Regional	58
18. Peta Anomali Residual.....	59
19. Penampang Analisis Derivative	60
20. Profil Residual, FHD, SVD Penampang A-A'	61
21. Profil Residual, FHD, SVD Penampang B-B'	62
22. Profil Residual, FHD, SVD Penampang C-C'	63
23. Profil Residual, FHD, SVD Penampang D-D'	64
24. Model Inversi 3D Distribusi Densitas.....	65
25. Penampang A-A' Pada Profil Residual, FHD, SVD, dan Model 3D.....	67
26. Penampang B-B' Pada Profil Residual, FHD, SVD, dan Model 3D.....	68
27. Penampang C-C' Pada Profil Residual, FHD, SVD, dan Model 3D.....	69
28. Penampang D-D' Pada Profil Residual, FHD, SVD, dan Model 3D.....	70
29. Model 3D Penampang A-A' dengan Data Magnetotellurik L6	74
30. Diagram Segitiga Cl-SO ₄ -HCO ₃	77

31. Diagram Segitiga Cl-Li-B	78
32. Diagram Segitiga Na-K-Mg.....	79
33. Model Sederhana Sistem Panas Bumi Bittuang.....	81

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia menyimpan cadangan energi panas bumi yang sangat melimpah, dengan estimasi potensi mencapai 29 GW atau sekitar 40% potensi panas bumi yang ada di seluruh dunia (ESDM, 2017). Meski demikian, tingkat pemanfaatannya hingga kini masih jauh dari optimal, dimana kapasitas yang dimanfaatkan baru mencapai 1.189 MW atau hanya sekitar 4,2% dari keseluruhan potensi yang tersedia. Pencapaian tersebut menempatkan Indonesia pada posisi ketiga dunia dalam kapasitas terpasang panas bumi, berada di bawah Filipina dan Amerika Serikat. Pemerintah sendiri telah menetapkan target dalam Kebijakan Energi Nasional agar panas bumi mampu berkontribusi sebesar 5% terhadap bauran energi nasional. Akan tetapi, realisasi hingga saat ini baru menyentuh angka sekitar 1%, menunjukkan bahwa laju pengembangannya masih tergolong lambat dan belum sesuai dengan target yang diharapkan. Rendahnya pemanfaatan panas bumi menuntut dilakukannya aksi eksplorasi untuk mengonversi potensi menjadi cadangan terbukti (Lund dkk., 2010).

Metode gayaberat digunakan secara efektif dalam eksplorasi panas bumi di Indonesia karena mampu memberikan gambaran awal mengenai struktur geologi bawah permukaan secara tidak merusak dengan biaya yang relatif terjangkau. Teknik ini bekerja dengan mendeteksi variasi kecil dalam medan gayaberat bumi

yang disebabkan oleh perbedaan densitas batuan di bawah permukaan. Dalam analisis data gayabarat, anomali yang terukur dapat dimodelkan untuk menghasilkan representasi bawah permukaan yang informatif bagi interpretasi struktur geologi, konfigurasi *basement*, dan pola sesar. Kemampuan metode ini dalam mendeteksi variasi densitas secara lateral dan vertikal mendukung aplikasinya yang luas, termasuk dalam kajian struktur, batuan dasar, intrusi magmatik, cekungan sedimen, serta endapan aliran sungai purba (Sarkowi, 2014). Dalam konteks sistem panas bumi, anomali gayabarat rendah sering dikaitkan dengan keberadaan batuan alterasi, zona rekahan, atau *reservoir* panas yang relatif kurang padat akibat keberadaan fluida panas. Sebagai contoh, daerah Bittuang, Sulawesi Selatan, dipilih sebagai lokasi prioritas untuk kajian ini. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi dan mengkarakterisasi *reservoir* di Bittuang dengan menggunakan data gayabarat (Bakrun dkk., 2009).

Wilayah Bittuang berada di Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan, dan termasuk salah satu daerah potensi panas bumi di Indonesia yang belum dimanfaatkan secara maksimal (Soetoyo dkk., 2009). Secara geologi, kawasan ini didominasi oleh sesar dengan arah barat laut-tenggara yang merupakan bagian dari pengaruh Sistem Sesar Palu-Koro (Ratman dan Atmawinata, 1993). Kehadiran berbagai manifestasi panas bumi yang masih aktif di daerah penelitian, seperti mata air panas (AP Balla dan AP Cepeng) serta fumarol, mengindikasikan keberadaan sistem hidrotermal yang aktif di bawah permukaan. Sistem tersebut diduga memiliki keterkaitan erat dengan aktivitas vulkanik Gunung Karua yang terletak di bagian utara kawasan studi (Setiawan, 2010; Mangala dkk., 2017). Diketahui pula bahwa manifestasi panas bumi di Daerah Bittuang berasosiasi zona patahan, yang mengindikasikan keberadaan *reservoir* di daerah penelitian yang diperkirakan berada di utara area penelitian dekat dengan manifestasi Balla (Sirait, 2015). Prospek panas bumi Bittuang dicirikan oleh hadirnya manifestasi berupa

mata air panas bertemperatur 36°C - 93°C , *steam vent* bertemperatur 68°C , batuan ubahan, dan kaipohan. Penelitian terkait panas bumi di Daerah Bittuang telah dilakukan beberapa kali, diantaranya oleh Nanlohi, dkk (1992) dan oleh Badan Geologi (2009). Pada tahun 2021, Badan Geologi kembali melakukan survei panas bumi melalui Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi (PSDMBP), yaitu berupa survei akuisisi data geosains panas bumi Daerah Bittuang. Survei ini bertujuan untuk melengkapi data geosains yang sudah tersedia saat ini, yaitu dengan melakukan akuisisi data geologi, geokimia, dan geofisika, serta LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

Berdasarkan penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya menggunakan beberapa metode geofisika lainnya maka, sebelumnya sudah dilakukan penelitian pada daerah Baratdaya menggunakan data pengukuran lapangan dengan menggunakan metode gayaberat yang dilakukan oleh S Irait pada tahun 2020, selanjutnya penulis melakukan penelitian menggunakan metode gayaberat dengan menggunakan data GGMPlus pada daerah Utara penelitian yang belum dilakukan pada daerah Bittuang yang lebih dekat pada daerah Gunung Karua dan ingin melakukan identifikasi mengenai sistem panas bumi pada daerah penelitian khususnya pada identifikasi *reservoir* dan *headsource* yang setidaknya terdapat empat manifestasi pada daerah penelitian. Dalam melakukan identifikasi *reservoir* dan *headsource* dilakukan dengan melakukan pengolahan data gayaberat hingga mendapatkan *Anomali Bouguer Lengkap* lalu dilakukan pemisahan anomali regional dan residual untuk mengetahui struktur sesar selanjutnya dengan melakukan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dengan metode *bandpass filter* dan *Second Vertical Derivative* (SVD) pada daerah penelitian dan melakukan analisis 3D menggunakan *software* Grav3D guna menginterpretasikan keberadaan *reservoir* dan *heatsource* yang gunanya untuk mengevaluasi potensi ekonomi dan teknis pengembangan lapangan panas bumi di daerah ini.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi struktur sesar menggunakan analisis *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative*.
2. Mendapatkan model distribusi densitas dari pemodelan anomali gayaberat untuk mengidentifikasi struktur sesar dengan melakukan pemodelan inversi 3D.
3. Menginterpretasi keberadaan *reservoir* dan *heatsource* dari analisis pemodelan distribusi gayaberat, data geologi dan geokimia sebagai pendukung interpretasi zona prospek panas bumi di daerah penelitian.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah penelitian ini sebagai berikut:

1. Data yang digunakan merupakan data GGMPPlus (*Global Gravity Model Plus*) yang telah terkoreksi sebanyak 2396 data.
2. Anomali regional dan residual dianalisis menggunakan analisis spektrum menggunakan *software* Numeri, dengan *filter moving average* menggunakan *software* Surfer 13.
3. Analisis struktur dan pemodelan dibatasi pada interpretasi model inversi 3D berdasarkan data gayaberat.

1.4 Manfaat Penelitian

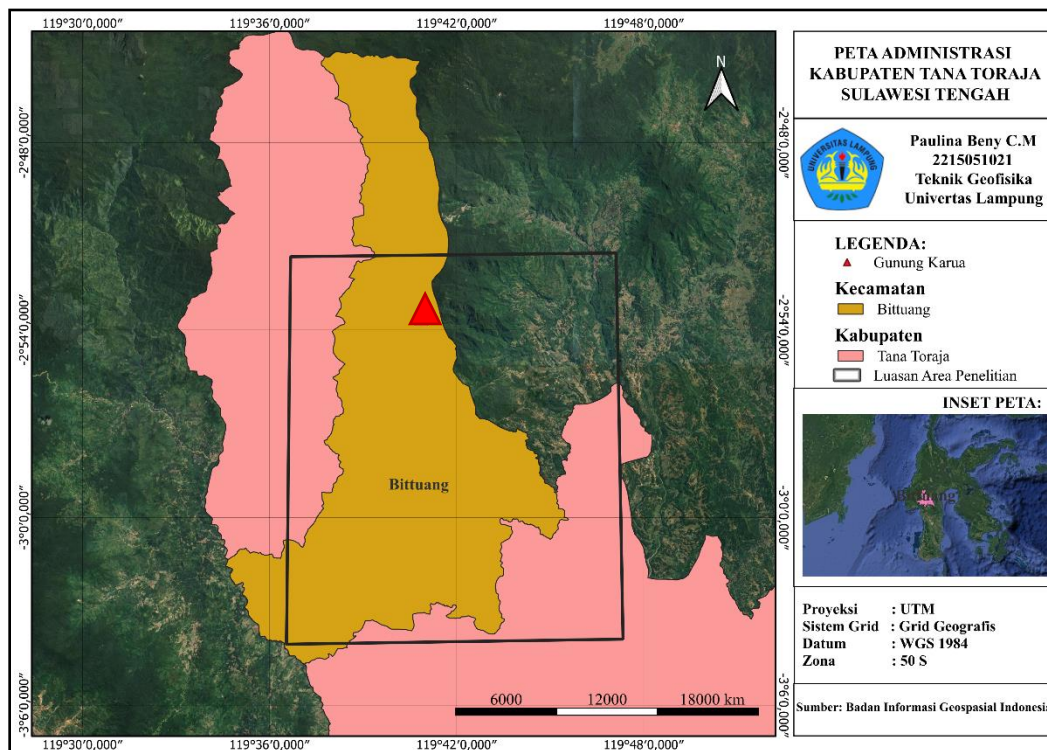
Manfaat penelitian ini yaitu memberikan pemahaman mengenai struktur bawah permukaan dan mengidentifikasi potensi *reservoir* panas bumi pada wilayah Penelitian melalui pemodelan 3D berbasis data gayaberat, yang diharapkan dapat memetakan zona anomali yang berhubungan dengan rekahan yang terindikator sistem panas bumi. Informasi ini dapat digunakan sebagai acuan tahap awal

pengembangan energi panas bumi dan berkontribusi ilmiah bagi Penelitian lanjutan di bidang eksplorasi panas bumi pada daerah Bittuang, Sulawesi Selatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Administrasi Lokasi

Daerah penelitian dilakukan pada kecamatan Bittuang yang merupakan salah satu kecamatan yang ada pada Tana Toraja, Sulawesi Selatan yang bisa dilihat pada (Gambar 1). Luas daerah Penelitian berkisar 113 km². Dengan lokasi penelitian tepat terletak antara 119° 39' 24.43" - 119° 39' 49.25" BT dan 2° 57' 4.64" - 2° 59' 52.67" LS.



Gambar 1. Peta Administrasi Kabupaten Tana Toraja

2.2 Geologi Daerah Penelitian

2.2.1 Geomorfologi

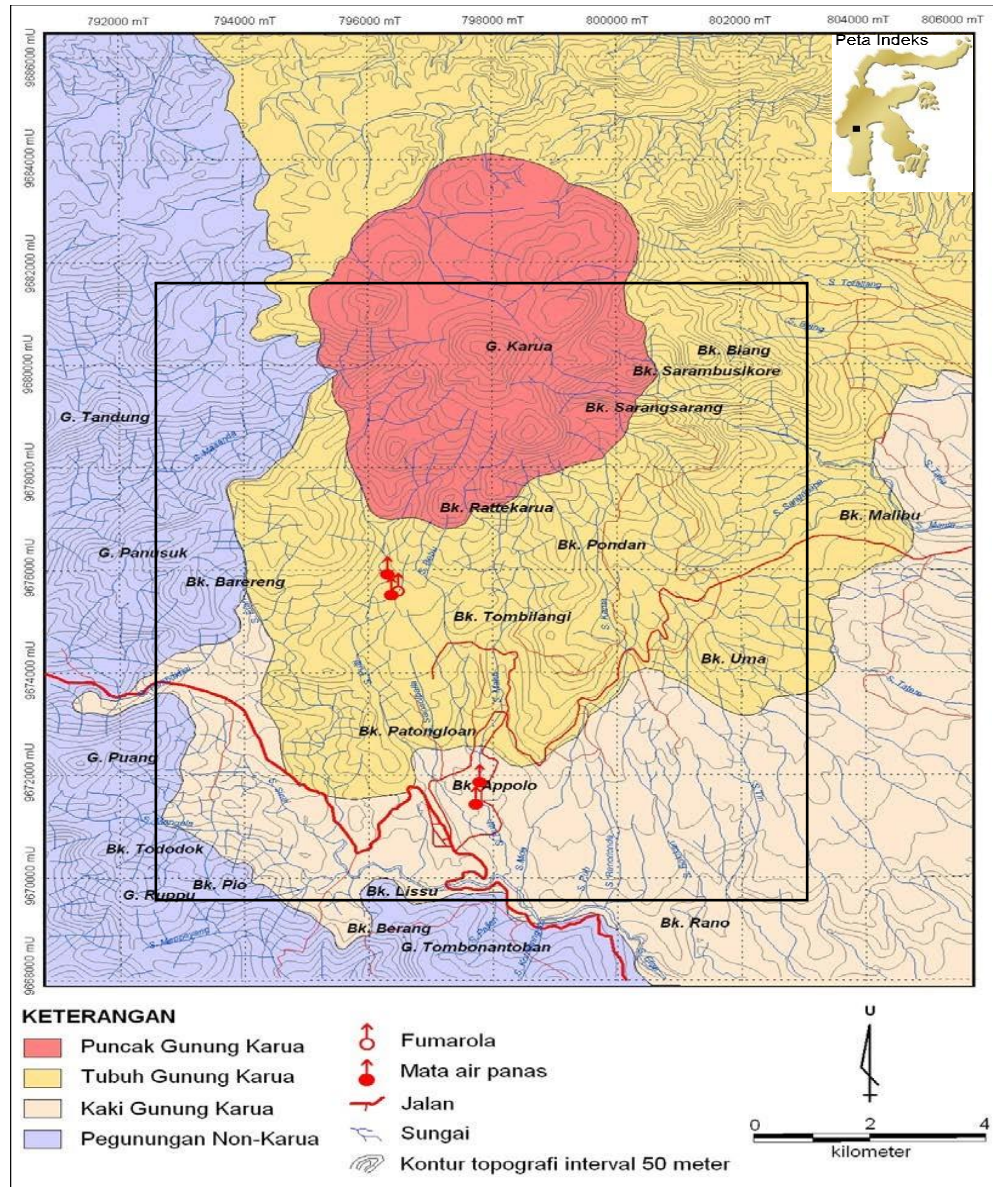
Wilayah daerah penelitian diklasifikasikan yang terbagi hingga empat satuan geomorfologi (Gambar 2), diantaranya yaitu satuan puncak Gunung Karua, tubuh Gunung Karua, kaki Gunung Karua dan satuan geomorfologi non-vulkanik Karua.

Geomorfologi Puncak Gunung Karua menempati wilayah bagian tengah daerah penelitian yang meliputi sekitar 13% luas daerah penelitian. Satuan ini disusun oleh puncak-puncak gunung yang membentuk kompleks Gunung Karua. Gunung-gunung ini diantaranya Gunung Rattekarua, Gunung Sarangarang, Gunung Sarambusikore dan Gunung Biang. Daerah ini mempunyai ketinggian lebih dari 1850 meter, dengan pola aliran sungai memancar yang bersumber dari puncak gunung, dengan tingkat kerapatan sungai sedang hingga tinggi. Batuan penyusun satuan ini adalah lava dan aliran piroklastik.

Geomorfologi Tubuh Gunung Karua menempati sebagian besar wilayah utara, timurlaut dan tengah daerah penelitian yang meliputi sekitar 37%. Daerah ini berada pada ketinggian antara 1250-2250 meter dengan pola aliran sungai dendritik hingga sub-dendritik. Satuan ini merupakan bentuk morfologi tubuh penyusun puncak-puncak gunung yang membentuk kompleks Gunung Karua. Batuan penyusun satuan ini adalah lava dan aliran piroklastik.

Geomorfologi Kaki Gunung Karua menempati bagian timur, tenggara memanjang hingga tengah daerah penelitian. Daerah ini berada pada ketinggian 900-1600 meter dengan pola aliran sungai sub-dendritik hingga sub-paralel. Satuan ini merupakan bentuk morfologi bagian bawah (kaki) dari kompleks Gunung Karua. Batuan penyusun satuan ini adalah batuan aliran piroklastik.

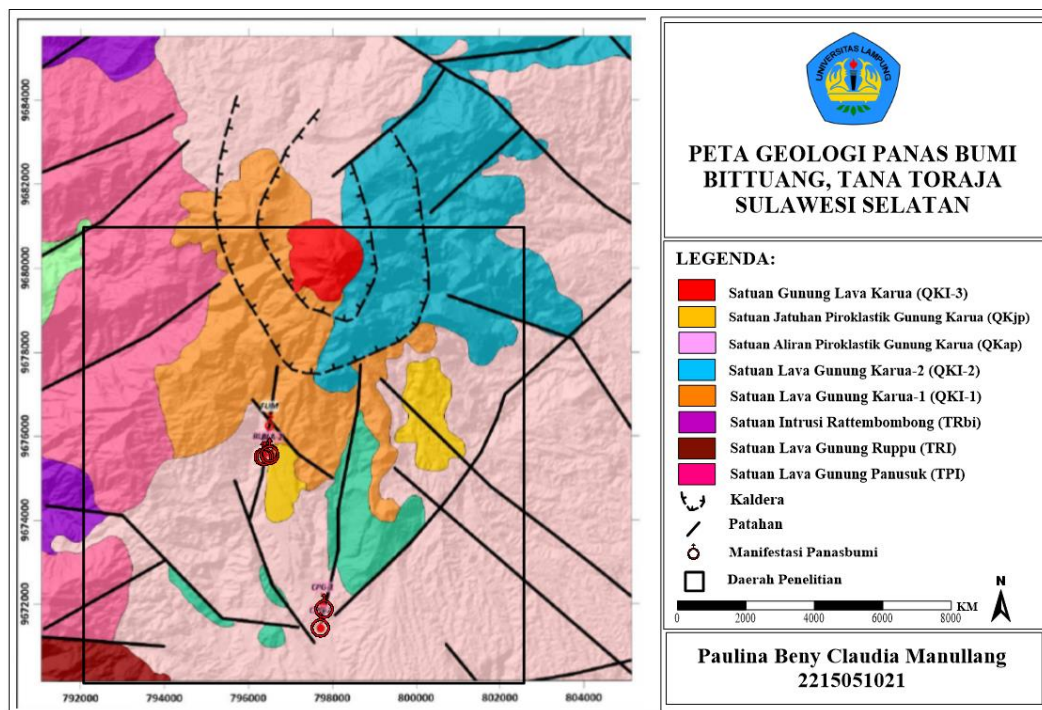
Geomorfologi Non-vulkanik Karua satuan geomorfologi ini menempati bagian barat, selatan dan sedikit di tengah daerah penelitian yang meliputi sekitar 26% luas daerah penelitian. Ketinggian daerah penelitian ini diantara 1075-2350 meter dengan pola aliran sungai sub-dendritik hingga sub-paralel. Satuan ini merupakan bentuk morfologi bagian bawah dari kompleks Gunung Karua. Batuan penyusun satuan ini adalah batuan malihan, batupasir, granit, dan lava.



Gambar 2. Peta Geomorfologi Penelitian (Modifikasi dari Soetoyo dkk., 2009).

2.2.2 Stratigrafi

Stratigrafi pada daerah Bittuang tersusun karena adanya hubungan relatif antara tiap-tiap satuan batuan dan penamaannya berdasarkan terhadap pusat erupsi (Gambar 3), mekanisme, dan genesa pembentukan batuan. Berdasarkan penyelidikan lapangan, batua di daerah tersebut dapat dikelompokkan dalam 11 satuan malihan, satu batuan sedimen, satu batuan terobosan, dan delapan satuan batuan vulkanik (Soetoyo, 2009). Stratigrafi atau satuan batuan diurutkan dari tua hingga muda diantaranya satuan Batuan Malihan (Kbm), Batupasir (Tps), Lava Gunung Panusuk (TPI), Intrusi Rettembombong (TRbi), Lava Gunung Karua-1 (QKI-1), Lava Gunung Karua-2 (QKI-2), Aliran Piroklastik Gunung Karua (QKap), Jatuhan Piroklastik Gunung Karua (QKjp), Lava Gunung Malibu (QMI), dan Lava Gunung Karua-3 (QKI-3).



Gambar 3. Peta Geologi Daerah Penelitian (Modifikasi dari PSG, 2009).

Satuan Batuan Malihan (Kbm) merupakan satuan batuan tertua pada daerah penelitian, singkapan satuan ini berada pada bagian utara Gunung Tandung. Litologi penyusunnya terdiri atas batusabak dan filit yang termasuk batuan malihan dengan tingkat etamorfisme lemah hingga sedang. Satuan batuan ini diinterpretasikan sebagai hasil metamorfisme dari Formasi Latimojong yang berumur Kapur (Ratman dan Atmawinata, 1993).

Satuan Batuanpasir (Tps) tersebar pada bagian selatan dan tengah daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh batupasir sebagai litologi utama, disertai batulempung, breksi, dan tuf. Satuan batuan tersebut diperkirakan terbentuk sebagai endapan sedimen bawah laut pada saat daerah penelitian belum berkembang menjadi daratan. Selain itu, satuan ini telah mengalami aktivitas tektonik berulang, yang ditunjukkan oleh keberadaan struktur berupa kekar-kekar pada batuan. Satuan batuan ini diinterpretasikan sebagai batuan sedimen Formasi Sekala yang berumur Miosen (Ratma dan Atmawinata, 1993).

Satuan Lava Gunung Panusuk (TPI) tersebar dibagian barat daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh lava yang berkomposisi andesit. Secara megaskopis, batuan andesit menunjukkan warna abu-abu dengan tekstur porfiritik hingga afanitik, serta disusun oleh mineral plagioklas, piroksen, biotit, dan hornblende. Satuan ini diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik yang termasuk dalam Formasi Talaya dan berumur Miosen (Ratman dan Atmawinata, 1993).

Satuan Lava Gunung Rupp (**TRI**) tersebar di bagian barat daya daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh lava yang berkomposisi basalt. Secara megaskopis, basalt berwarna abu-abu kehitaman dengan tekstur afanitik, serta tersusun oleh mineral biotit, piroksen, dan hornblende. Satuan batuan ini diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik yang termasuk dalam Formasi Walimbong dan berumur Miosen (Ratman dan Atmawinata, 1993).

Satuan Intrusi Rattembombong (TRbi) tersebar di bagian selatan, barat, dan barat laut daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh batuan terobosan berupa granit yang menerobos satuan batuan lain yang lebih tua. Secara megaskopis, batuan ini berwarna putih keabuan dengan tekstur faneritik, serta disusun oleh mineral kuarsa, biotit, muskovit, dan plagioklas. Berdasarkan hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan intrusi ini diperkirakan berumur Pliosen.

Satuan Lava Gunung Karua-1 (QKI-1) tersebar di bagian tengah daerah penelitian, khususnya pada lereng barat Gunung Karua. Satuan ini tersusun oleh lava yang berkomposisi andesit. Secara megaskopis, andesit berwarna abu-abu hingga abu-abu kehijauan dengan tekstur porfiritik hingga afanitik, serta disusun oleh mineral plagioklas, piroksen, hornblende, dan kuarsa. Satuan ini merupakan fase lava pertama yang membentuk Gunung Karua. Berdasarkan hubungan relatif terhadap satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.

Satuan Lava Gunung Karua-2 (QKI-2) tersebar dibagian utara dan tengah daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh lava berkomposisi dasit. Secara megaskopis, batuan dasit berwarna abu-abu keputihan dengan tekstur afanitik hingga porfiritik, dan disusun oleh mineral plagioklas, piroksen, serta kuarsa. Satuan ini merupakan fase lava kedua dalam pembentukan Gunung Karua. Berdasarkan hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.

Satuan Aliran Piroklastik Gunung Karua (QKap) tersebar di bagian tengah, utara, dan timur wilayah penyelidikan yang merupakan satuan dengan sebaran terluas di daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh tuf berukuran debu (*ash*) hingga lapili dengan komposisi riolit-dasitik, mengandung fragmen batuapung (*pumice*), bersifat *sticky*, serta setempat dijumpai breksi. Secara megaskopis, tuf berwarna putih kecoklatan, tersusun oleh gelas vulkanik dan kuarsa, memiliki

tingkat pemilahan sedang dengan kemas tertutup. Breksi berwarna abu-abu, tersusun oleh fragmen andesit–dasitik berukuran kerakal dengan bentuk butir membulat tanggung hingga menyudut tanggung, serta bermatriks tuf. Satuan ini merupakan produk letusan Gunung Karua yang menutupi sebagian besar daerah penelitian dengan ketebalan tersingkap mencapai sekitar 30 meter. Satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.

Satuan Jatuhan Piroklastik Gunung Karua (QKjp) tersebar di bagian tengah dan timur daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh tuf berukuran debu (*ash*) hingga lapili dengan komposisi riolit-dasitik, serta mengandung fragmen batupung (*pumice*) yang bersifat *sticky*. Secara megaskopis, tuf berwarna putih kecoklatan, tersusun oleh gelas vulkanik dan kuarsa, dengan tingkat pemilahan sedang serta kemas tertutup. Berdasarkan hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen dan terbentuk setelah pengendapan satuan aliran piroklastik.

Satuan Lava Gunung Malibu (QMI) tersebar di bagian timur daerah penelitian. Satuan ini diperkirakan merupakan kubah lava yang berperan sebagai gunung parasit dari Gunung Karua. Secara megaskopis, batuan penyusunnya tidak tersingkap dengan baik karena sebagian besar telah mengalami pelapukan dan tertutup oleh vegetasi. Berdasarkan hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.

Satuan Lava Gunung Karua-3 (QKI-3) tersebar di puncak kompleks Gunung Karua. Satuan ini tersusun oleh lava berkomposisi basalt. Secara megaskopis, basalt berwarna abu-abu tua dengan tekstur porfiritik hingga afanitik, serta disusun oleh mineral plagioklas, piroksen, dan biotit. Satuan ini merupakan satuan vulkanik termuda di daerah penelitian yang terbentuk di dalam struktur rim kaldera. Keberadaan satuan ini diperkirakan memiliki keterkaitan erat dengan

pembentukan sistem panas bumi di daerah penelitian. Berdasarkan hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.

2.2.3 Struktur Geologi

Berdasarkan peta regional daerah panas bumi, wilayah Bittuang terletak pada zona pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Pasifik, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Indo-Australia (Gambar 3). Interaksi ketiga lempeng ini mengakibatkan struktur tektonik di daerah tersebut menjadi kompleks (Van Leeuwen, 1994). Daerah penelitian memiliki aktivitas tektonik dengan perkiraan terjadi di zaman Pra-Tersier ditandai dengan beberapa rim kaldera yang terbentuk setelah erupsi Gunung Karua dan beberapa struktur sesar dengan sesar normal mengarah pada Barat Laut-Tenggara, Barat Daya-Timur Laut, dan mengarah hampir Utara-Selatan (Sesar Ballard dan Sesar Tombilangi) yang mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi Balla dan Cepeng, lalu sesar mendatar dari Barat Daya-Timur Laut yang memotong dan mengakibatkan pergeseran pada batuan dan struktur yang sudah terbentuk sebelumnya (PMG, 2009). Terdapat pula beberapa aktivitas vulkanik akibat dari erupsi Gunung Karua diantaranya terdapat singkapan lava, batuan vulkanik yang tersebar merupakan berupa aliran lava dan piroklastik yang mendominasi pada daerah timur, utara, dan tengah.

Manifestasi panas bumi pada daerah penelitian, muncul sebagai hasil dari sistem panas bumi vulkanik-hidrotermal yang dikontrol oleh keterkaitan antara sumber panas, fluida, dan struktur geologi bawah permukaan. Berdasarkan laporan dan jurnal geologi panas bumi yang peneliti terdahulu wilayah ini, sumber panas utama diinterpretasikan berasal dari sisa panas magmatik yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik Kuartar, khususnya Gunung Karua, yang masih menyisakan gradien panas tinggi di bawah permukaan. Panas tersebut memanaskan air meteorik yang meresap ke dalam batuan permeabel dan membentuk *reservoir*

hidrotermal, kemudiann fluida panas tersebut bergerak naik menuju permukaan melalui zona-zona lemah berupa sesar dan rekahan yang berkembang akibat aktivitas tektonik regional. Keberadaan struktur geologi ini berperan penting sebagai jalur aliran fluida (*upflow* dan *outflow*), sehingga manifestasi panas bumi seperti mata air panas, zona alterasi hidrotermal, dan keluaran fluida panas lainnya muncul secara lokal dan terkontrol secara struktural. Interaksi berkelanjutan antara fluida panas dan batuan induk juga menyebabkan proses alterasi hidrotermal yang menjadi indikator aktifnya sistem panas bumi di daerah Bittuang, sebagaimana dijelaskan dalam berbagai studi panas bumi vulkanik di Indonesia dan literatur geotermal internasional.

2.3 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan di wilayah penelitian dan sekitarnya untuk mengkaji dari aspek geologi, tektonik, hingga struktur geologi yang berkembang pada daerah penelitian. Penelitian-penelitian ini menjadi dasar penting dalam memahami dari segi geologi regional dan implikasinya terhadap kondisi geologi lokal pada daerah penelitian ini. Adapun penelitian terdahulu terdapat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian, Nama dan Tahun Terbit	Deskripsi
1.	Analisis Zona Potensi Panas bumi Di Daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan Berdasarkan Anomali Magnetik-	Bertitik pada interpretasi kondisi bawah permukaan daerah panas bumi Bittuang berdasarkan anomali magnetik residual, transformasi pseudogayaberat, dan gradient horizontal untuk mengidentifikasi struktur geologi dan zona potensi panas bumi. Hasil

	Pseudogayaberat (Qomariyah, 2011)	pengolahan data magnetik menunjukkan adanya dua karakter utama anomali, yaitu anomali magnetik tinggi yang diinterpretasikan sebagai batuan bersifat magnetik dan relatif belum teraltrasi, dan anomali rendah yang berkisar dari nilai 0 hingga -700nT diinterpretasikan sebagai batuan demagnetisasi akibat proses alterasi hidrotermal terutama pada bagian tenggara dan barat laut daerah penelitian, dan berasosiasi erat dengan keberadaan struktur sesar. Lalu pada penelitian kali ini dijelaskan bahwa manifestasi panas bumi berupa mata air panas dan fumarola di Desa Bittuang pada zona anomali magnetik rendah dan berasosiasi langsung dengan sesar berarah tenggara-barat laut yang mengindikasikan bahwa struktur tersebut berfungsi sebagai jalur keluarnya fluida panas bumi.
2.	Simulasi Numerik Sistem Panas Bumi Bittuang Kabupaten Tanatoraja, Sulawesi Selatan (Risdianto, dkk., 2013)	Difokuskan pada hasil simulasi numerik kondisi alami <i>reservoir</i> panas bumi yang dikembangkan dari model konseptual geologi, geokimia, geofisika, dan data pengeboran landaian suhu sumur BTG-1. Sistem panas bumi pada daerah penelitian berasal dari aktivitas vulkanik Kuartar Gunung Karua, dengan zona <i>upflow</i> berada di lereng gunung dan aliran fluida panas

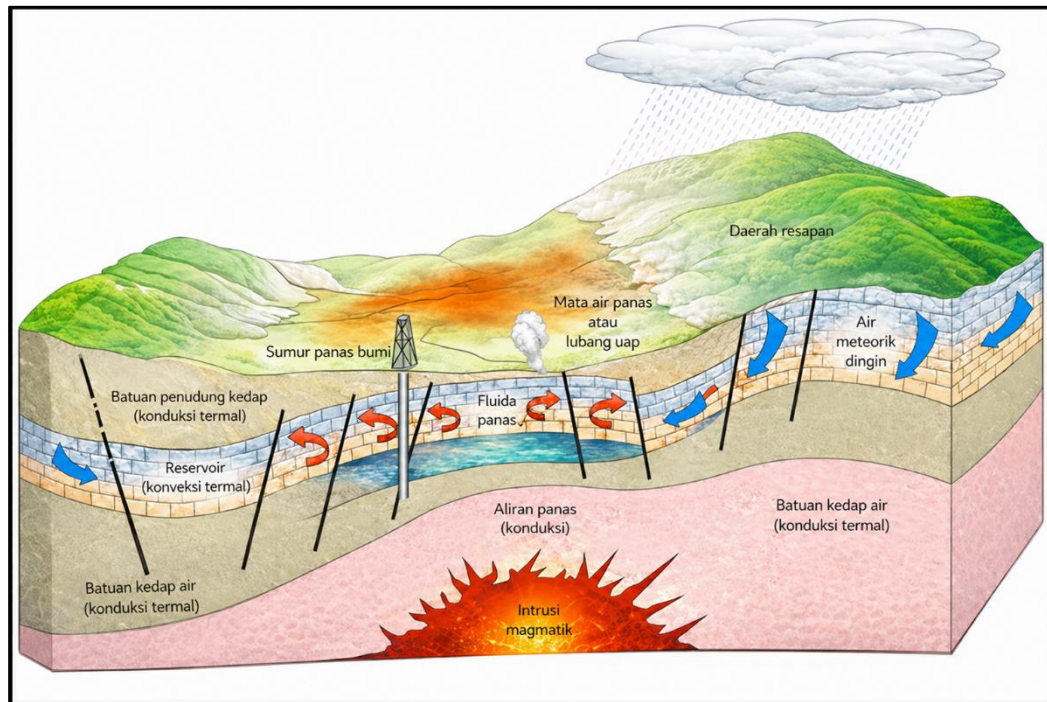
		<p>dikontrol oleh struktur geologi utama berarah relatif utara- selatan. Simulasi menggunakan TOUGH2 satu fasa menunjukkan bahwa distribusi tempertur bawah permukaan mecapai kisaran 180-210 °C dan terkonsentrasi di bagia barat daya Gunung Karua, sejalan dengan lokasi manifestasi permukaan seperti mata air panas, fumarole, silica sinter, dan zona alterasi.</p>
3.	<p>Identification of Panas bumi Prospect Zones in Bittuang Area Based on Remote Sensing and Geochemical Data (Imran, 2024)</p>	<p>Penelitian ini difokuskan pada hasil interpretasi citra Landsat 7, DEM, dan data geologi yang menunjukkan bahwa daerah penelitian istem panas bumi di daerah Bittuang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik Kuarter dan dikontrol oleh struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian. Berdasarkan hasil interpretasi, struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian berupa sesar mendatar berarah baratdaya-timurlaut dan sesar normal berarah utara-baratlaut hingga selatan-tenggara yang mengontrol kemunculan manifestasi mata air panas di daerah penelitian. Suhu bawah permukaan diperkirakan berkisar antara 176 °C hingga 198 °C yang berkaitan dengan keberadaan <i>reservoir</i> sistem panas bumi dan</p>

		dikategorikan sebagai sistem panas bumi bertemperatur sedang hingga tinggi. Luas daerah prospek diperkirakan sekitar 3 km ² dengan zona aliran naik (<i>upflow</i>) berada di bagian tengah daerah penelitian, sedangkan zona aliran keluar (<i>outflow</i>) berkembang di bagian selatan daerah penelitian.
4.	Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Bittuang, Berdasarkan Analisis <i>Second Horizontal Dervative</i> , <i>Second Vertical Derivative</i> , Pemodelan 2.5D dan 3D Anomali Gayaberat (Sirait, 2015)	Didapatkan berdasarkan data Anomali <i>Bouguer</i> , SHD, dan SVD, bahwa struktur sesar didaerah penelitian didapatkan mendominasi oleh sesar berarah NW-SE. Dan hasil dari pemodelan <i>forward 2.5D</i> dan <i>Inverse 3D</i> bahwa manifestasi panas bumi Daerah Bittuang melewati zona patahan, yang menunjukkan daerah tersebut terdapat <i>reservoir</i> panas bumi yang diduga berada di utara penelitian dekan dengan manifestasi Balla.

III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi merupakan siklus perpindahan panas secara alami pada volume tertentu yang mengalir ke permukaan lalu ke sumber panas. Sistem panas bumi terbentuk karena perpindahan panas secara konveksi karena adanya kontak antara air dan sumber panas. Sistem panas bumi umumnya terdiri dari tiga komponen utama yang bisa dilihat pada (Gambar 4) yaitu terdapat sumber panas, batuan *reservoir*, dan fluida pembawa panas (Bertani, 2016). Air panas yang muncul ke permukaan memiliki uap yang terperangkap dalam batuan *permeable* yang akan muncul ke permukaan sebagai manifestasi permukaan, contohnya *fumarole* (gas dari tanah), *hot spring* (mata air panas), *solfatra* (akumulasi kristal sulfur), dan sebagainya (Keam dkk., 2005). Sumber panas biasanya berasal dari intrusi magma dangkal yang memanaskan batuan di sekitarnya. Batuan *reservoir* adalah batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas cukup untuk menyimpan dan mengalirkan fluida panas. Sedangkan fluida panas bumi biasanya berupa air panas atau uap air yang terperangkap di dalam *reservoir* dan dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik atau keperluan langsung seperti pemanasan.



Gambar 4. Sistem Panas Bumi (Dickson dan Fanelli, 2003)

3.2 Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan variasi medan gayaberat bumi untuk mengidentifikasi perbedaan densitas batuan di bawah permukaan. Prinsip dasarnya adalah setiap massa batuan memiliki gaya tarik gayaberat yang sebanding dengan massa dan berkurang dengan kuadrat jarak. Variasi distribusi densitas batuan menyebabkan anomali gayaberat yang dapat diukur di permukaan bumi menggunakan gravimeter (Telford dkk., 1990). Metode gayaberat adalah suatu pendekatan geofisika yang memanfaatkan pengukuran variasi medan gayaberat di permukaan bumi. Variasi gayaberat ini dapat disebabkan oleh perubahan densitas batuan di bawah permukaan, jenis batuan, jarak relatif dari permukaan bumi ke pusat bumi (Sarkowi, 2014). Metode gayaberat tepat untuk digunakan untuk melakukan pendugaan struktur bawah permukaan dikarenakan mampu mendekati kontras densitas tubuh batuan. Pada

hal ini, perbedaan kontras densitas yang beragam jenisnya, atau dapat dikatakan bahwa distribusi densitas yang tidak seragam di bawah permukaan bumi dapat disebabkan oleh struktur geologi yang ada di dalamnya (Setiadi dkk., 2010).

3.3 Konsep Dasar Metode Gayaberat

3.3.1 Gayaberat Newton

Prinsip dasar dari gayaberat newton didasari pada hukum newton (Gambar 5) dimana adanya gaya Tarik menarik antara dua massa m_1 dan m_2 yang terpisah sejauh r (Serway dan Jewett, 2009) dapat dirumuskan sebagai Persamaan (1):

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

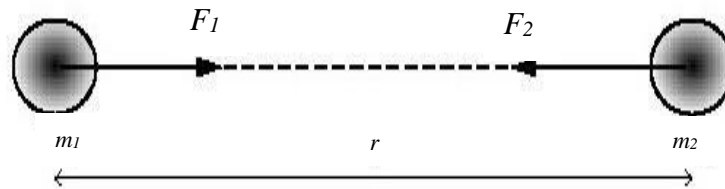
Keterangan:

\vec{F} : Gaya Tarik menarik (N)

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

r^2 : Jarak antara dua buah benda (m)

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



Gambar 5. Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda (Grandis, 2009)

3.3.2 Percepatan Gayaberat

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

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

Dimana percepatan sebuah benda yang bermassa m disebabkan oleh tarikan benda yang memiliki massa m pada r , dapat dinyatakan dengan:

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

Massa m_1 pada Persamaan (1) adalah m (massa benda) dan m_2 adalah M (massa bumi), dan dilakukan substitusi Persamaan (2) ke Persamaan (1) maka didapatkan Persamaan (4) dan (5) sebagai berikut:

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

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

Keterangan:

\vec{g} : Medan gayaberat bumi (m/s^2)

M : Massa bumi (kg)

m : Massa benda (kg)

\vec{F} : Gayaberat (N)

r : Jari-jari bumi (km)

\hat{r} : Vektor satuan arah

Pengukuran percepatan gayaberat pertama kali diperkenalkan oleh Galileo Galilei. Sebagai penghormatan, satuan percepatan gayaberat diberi nama gal, yang dalam sistem CGS bernilai sama dengan 1 cm/s^2 . Dalam aplikasi geofisika, khususnya pada survei gayaberat, variasi medan gayaberat bumi yang relatif kecil dinyatakan menggunakan satuan turunan yang lebih halus, yaitu (mGal) dan (μGal). Hubungan konversi antara satuan-satuan tersebut adalah sebagai berikut:

$$1 \text{ Gal} \quad : 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

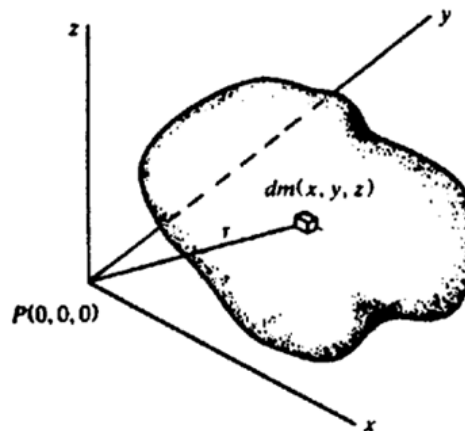
$$1 \text{ mGal} \quad : 10^{-3} \text{ Gal}$$

$$1 \mu\text{Gal} : 10^{-3} \text{ mGal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

Dalam sistem MKS, gayaberat juga diukur dalam gayaberat unit (g.u.), di mana $1 \text{ mGal} : 10 \text{ g.u} : 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (Octonovrilna dkk., 2009).

3.3.3 Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat dapat diartikan sebagai energi yang dibutuhkan untuk memindahkan suatu massa dari satu lokasi ke lokasi lain di dalam medan gayaberat. Setiap benda yang memiliki massa akan menghasilkan medan potensial di sekelilingnya. Medan gayaberat ini bersifat konservatif, sehingga besarnya usaha yang dilakukan hanya ditentukan oleh posisi awal dan posisi akhir perpindahan, serta tidak bergantung pada jalur yang dilalui selama perpindahan tersebut (Rosid, 2005).



Gambar 6. Potensial dan Kuat Medan Massa 3D (Telford dkk., 1990)

Apabila terdapat suatu massa dengan bentuk sembarang dalam ruang tiga dimensi dan memiliki distribusi kontinu dengan kerapatan massa $\Delta\rho (\alpha, \beta, \gamma)$, maka nilai potensial gayaberat di suatu titik P (x, y, z) (Gambar 6) dapat dihitung berdasarkan distribusi tersebut:

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (6)$$

Medan gayaberat akibat suatu distribusi densitas diperoleh dengan mendefensialkan persamaan (5) terhadap x,y, dan z yang hasilnya adalah:

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

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

$$\Delta g_z(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(z - \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (9)$$

Berdasarkan persamaan (9), nilai medan gayaberat Δg pada permukaan bumi tidak bersifat konstan, melainkan mengalami variasi. Perubahan ini dipengaruhi oleh penyebaran massa di bawah permukaan bumi yang dinyatakan melalui fungsi densitas. Selain itu, kondisi dan bentuk nyata permukaan bumi turut menentukan batas integral yang digunakan dalam proses perhitungannya (Sarkowi, 2007). Nilai medan gayaberat Δg pada permukaan bumi menunjukkan variasi yang menggambarkan sebaran massa di bawah permukaan. Variasi tersebut terjadi akibat perbedaan densitas batuan yang berpengaruh terhadap medan gayaberat. Di samping itu, ketidakraturan bentuk permukaan bumi juga berperan dalam menentukan batas integral pada perhitungan medan gayaberat (Sarkowi, 2014).

3.3.4 Rapat Massa Batuan

Densitas atau rapat massa batuan merupakan salah satu parameter fisik yang sangat penting dalam metode gayaberat. Penentuan anomali *Bouguer* yang tepat memerlukan perkiraan densitas rata-rata batuan di wilayah survei. Nilai densitas ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain densitas butiran penyusun batuan, keberadaan fluida di dalam pori-pori, tingkat porositas, pemadatan akibat tekanan,

serta proses pelapukan yang dialami batuan. Setiap jenis batuan memiliki karakteristik densitas yang berbeda. Pada batuan sedimen, variasi densitas dapat terjadi akibat pengaruh aktivitas tektonik yang mengubah struktur dan komposisi batuan tersebut (Telford dkk., 1990).

Tabel 2. Nilai Densitas Batuan Sedimen (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (gr/cc)	Rata-Rata (gr/cc)
Batuan Sedimen		
<i>Alluvium</i>	1,96 – 2,00	1,98
<i>Clay</i>	1,63 – 2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70 – 2,40	2,00
<i>Loess</i>	1,40 – 1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80 – 2,20	1,93
<i>Soil</i>	1,20 – 2,40	1,92
<i>Sand</i>	1,70 – 2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61 – 2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77 – 3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93 – 2,90	2,55
<i>Dolomit</i>	2,28 – 2,90	2,70
<i>Chalk</i>	1,53 – 2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10 – 2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88 – 0,92	0,90

Tabel 3. Nilai Densitas Batuan Beku (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (gr/cc)	Rata-Rata (gr/cc)
Batuan Beku		
<i>Rhyolit</i>	2,35 – 2,70	2,52
<i>Andesit</i>	2,50 – 2,81	2,64
<i>Granit</i>	2,40 – 2,80	2,61
<i>Syenite</i>	2,60 – 2,95	2,77
<i>Basalt</i>	2,70 – 3,30	2,99
<i>Gabro</i>	2,70 – 3,50	3,03

Tabel 4. Nilai Densitas Batuan Metamorf (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (gr/cc)	Rata-Rata (gr/cc)
Batuan Metamorf		
<i>Gneiss</i>	2,59 – 3,00	2,80
<i>Schist</i>	2,39 – 2,90	2,64
<i>Phyllite</i>	2,68 – 2,80	2,74
<i>Slate</i>	2,70 – 2,90	2,79
<i>Granulite</i>	2,52 – 2,73	2,64
<i>Amphibolite</i>	2,90 – 3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20 – 3,54	3,37

3.4 Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat

Pada pengolahan gayaberat diperlukan beberapa koreksi-koreksi yang perlu dilakukan untuk mengurangi besarnya *noise-noise* yang ditimbulkan. Adapun beberapa koreksi data gayaberat diantaranya:

3.4.1 Koreksi Lintang

Koreksi lintang dilakukan untuk memperhitungkan pengaruh bentuk bumi yang tidak sepenuhnya bulat. Bumi memiliki jari-jari yang lebih pendek di daerah kutub dan lebih panjang di daerah khatulistiwa, sehingga nilai gayaberat di kutub lebih besar dibandingkan di khatulistiwa. Perbedaan jari-jari bumi tersebut menyebabkan variasi nilai gayaberat pada berbagai lintang, sehingga diperlukan koreksi lintang agar data gayaberat dapat dibandingkan secara konsisten. Koreksi lintang (θ) dapat dihitung menggunakan Persamaan (10) (Blakely, 1995).

$$g\theta = 978032,7(1 + 0.0023024 \sin^2\theta - 0,0000058 \sin^2 2\theta) \quad (10)$$

Keterangan:

$g\theta$: Percepatan gayaberat standar pada ekuator (m/ s²)

θ : Lintang geografis (dalam radian)

$\sin \theta$: Fungsi sinus dari lintang θ

3.4.2 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Pengukuran gayaberat yang dilakukan pada elevasi h terhadap mean sea level menyebabkan nilai percepatan gravitasi (g) menjadi semakin kecil, sehingga diperlukan koreksi terhadap hasil pembacaan alat. Koreksi udara bebas diterapkan untuk mendapatkan nilai gayaberat absolut pada titik pengamatan (Syamsuriadi, 2013). Menurut Brotopuspito (2001), persamaan yang digunakan untuk menghitung koreksi udara bebas ditunjukkan pada Persamaan (11):

$$FAC = 0,3086 \times h \quad (11)$$

Keterangan:

FAC : *Free Air Correction*

0.3086 : Konstanta konversi dari perubahan gayaberat per meter ketinggian (dalam mGal/m)

h : Ketinggian (m)

Untuk mendapatkan nilai *Free Air Anomali* (FAA) atau anomali udara bebas, dapat menggunakan persamaan:

$$FAA = g_{obs} - g_{\phi} + 0,3086 h \quad (12)$$

3.4.3 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer digunakan untuk menghilangkan pengaruh massa batuan yang mengisi ruang di antara titik pengukuran dan bidang acuan. Besarnya nilai koreksi ini dapat dihitung menggunakan Persamaan (13) berikut:

$$BC = 2\pi G \rho h \quad (13)$$

Karena $2\pi G$: 0,04192 maka (Brotopuspito, 2001),

$$BC = 0,04192 \rho h \quad (14)$$

Keterangan:

BC : *Bouguer Correction* (mGal)

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

ρ : Rapat massa batuan rata-rata daerah penelitian ($2,24 \text{ gr/cm}^3$)

h : Ketinggian (m)

3.4.4 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Keberadaan bukit dapat meningkatkan percepatan gayaberat akibat adanya tambahan massa batuan. Oleh karena itu, dalam koreksi medan, pengaruh massa bukit perlu dikurangkan agar nilai gayaberat yang diperoleh menjadi lebih akurat. Sebaliknya, pada daerah lembah, koreksi medan dilakukan dengan menambahkan pengaruh massa yang hilang sehingga hasil pengukuran lebih merepresentasikan kondisi bawah permukaan yang sebenarnya (Dobrin, 1960). Koreksi medan ini sangat penting untuk menghilangkan pengaruh topografi yang tidak beraturan di sekitar titik pengukuran. Pada koreksi *Bouguer*, titik pengukuran diasumsikan berada pada suatu bidang datar yang sangat luas. Namun, kondisi lapangan pada umumnya memiliki topografi yang tidak rata, seperti adanya gunung, bukit, maupun lembah. Jika hanya menggunakan koreksi *Bouguer* tanpa mempertimbangkan kondisi topografi, data gayaberat yang dihasilkan dapat menjadi kurang akurat. Hal ini disebabkan oleh pengaruh massa batuan di sekitar titik pengukuran, baik yang berada di atas maupun di bawah titik tersebut, yang turut memengaruhi hasil pengukuran. Oleh karena itu, koreksi topografi atau koreksi medan perlu dilakukan, terutama pada daerah dengan topografi yang tidak beraturan seperti kawasan pegunungan atau perbukitan (Susilawati, 2005). Apabila area pengukuran memiliki topografi yang relatif datar, maka koreksi medan dapat diabaikan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung koreksi medan adalah sebagai Persamaan (15) berikut:

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \left\{ (r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \right\} \quad (15)$$

Keterangan:

g : Respons gayaberat (mGal)

n : Jumlah kompartemen tiap zona

p : Densitas (gr/cm^3)

r : Jari-jari radius dalam (m)

r_2 : Jari-jari radius luar (m)

L : Selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

3.4.5 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap (ABL) didefinisikan sebagai selisih antara nilai gayaberat hasil observasi (g_{obs}) dengan penjumlahan secara aljabar berbagai koreksi, yaitu koreksi drift, koreksi pasang surut, koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi *Bouguer*, dan koreksi medan (terrain). Variasi nilai Anomali Bouguer Lengkap mencerminkan perubahan densitas secara lateral. Sebagai contoh, keberadaan tubuh batuan berdensitas tinggi di dalam medium dengan densitas lebih rendah akan menghasilkan nilai Anomali Bouguer Lengkap positif. Sebaliknya, tubuh batuan dengan densitas rendah yang berada di dalam medium berdensitas lebih tinggi akan menimbulkan nilai Anomali Bouguer Lengkap negatif (Reynolds, 1997).

Menurut Hinze dkk., (2013), Anomali Bouguer Lengkap merupakan perbedaan antara gayaberat teramati dengan nilai gayaberat teoritis yang didefinisikan pada suatu titik pengamatan tertentu. Selisih tersebut merepresentasikan perbedaan densitas atau rapat massa antara suatu daerah dengan daerah di sekitarnya, baik secara vertikal maupun lateral. Tujuan utama penerapan metode gayaberat, baik dalam eksplorasi sumber daya alam maupun kajian ilmiah, adalah memperoleh gambaran kondisi bawah permukaan berdasarkan variasi distribusi densitas batuan.

Dengan demikian, Anomali Bouguer Lengkap menggambarkan pola sebaran gayaberat yang digunakan untuk menginterpretasikan kondisi bawah permukaan berdasarkan kontras rapat massa batuan. Nilai Anomali Bouguer Lengkap selanjutnya dapat dirumuskan dengan Persamaan (16) berikut (Brotospito, 2001):

$$ABL = g_{obs} - g_{\phi} + FAC + BC + TC \quad (16)$$

Keterangan:

g_{obs} : Harga gayaberat pengukuran di titik tersebut

FAC : *Free Air Correction*/ koreksi udara bebas

BC : *Bouguer Correction*/ koreksi *Bouguer*

TC : *Terrain Correction*/ koreksi medan

Nilai anomali yang diperoleh adalah nilai anomali pada ketinggian titik amat.

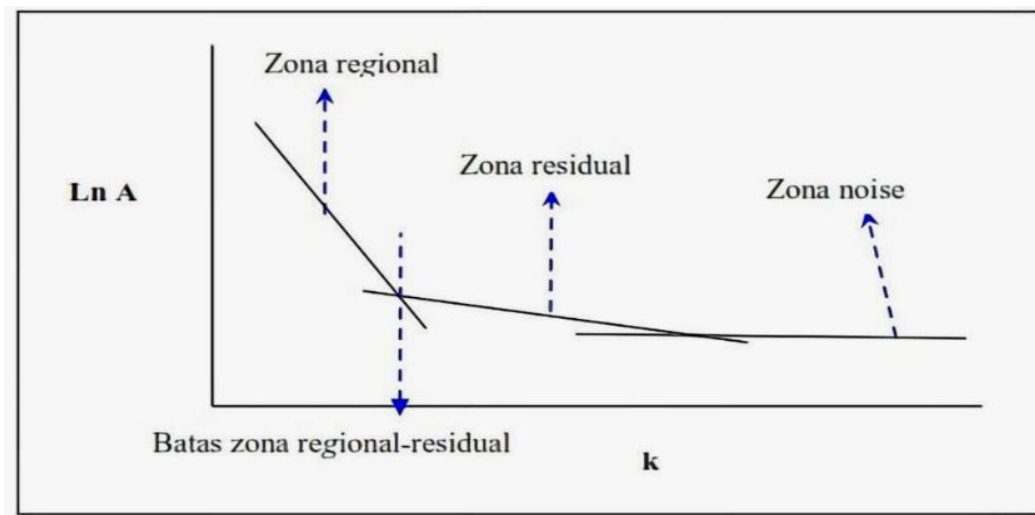
3.5 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Pemisahan anomali regional dan anomali residual merupakan tahap yang sangat penting dalam pengolahan dan interpretasi data geofisika, khususnya pada kegiatan eksplorasi. Anomali total yang diperoleh dari pengukuran di lapangan pada umumnya tersusun atas dua komponen utama, yaitu anomali regional dan anomali residual. Proses pemisahan ini bertujuan untuk memisahkan pengaruh struktur geologi berskala luas dari pengaruh struktur geologi lokal, sehingga interpretasi kondisi bawah permukaan dapat dilakukan dengan lebih tepat (Blakely, 1995).

Analisis spektrum adalah metode untuk mengetahui kedalaman anomali. Prinsip yang digunakan oleh analisis spektrum adalah prinsip transformasi Fourier yaitu dengan mengubah data domain ruang menjadi domain bilangan gelombang. Gradien dari grafik analisis spektrum besarnya sebanding dengan kedalaman

bidang anomali. Gradien bernilai besar mencerminkan anomali regional, sedangkan gradien bernilai kecil mencerminkan anomali residual (Apriani, dkk, 2018).

Anomali regional adalah bagian dari data geofisika yang merepresentasikan variasi dengan skala besar dan umumnya berasal dari struktur geologi yang dalam atau memiliki sebaran luas. Anomali ini dapat dipengaruhi oleh keberadaan cekungan sedimen yang luas, perubahan ketebalan kerak bumi, maupun struktur geologi besar lainnya yang memberikan pengaruh gayaberat atau magnetik secara menyeluruh. Dalam proses pemisahan anomali, anomali regional dianggap sebagai tren latar belakang yang perlu dihilangkan untuk menonjolkan anomali residual (Gambar 7). Secara umum, anomali regional dicirikan oleh amplitudo yang relatif kecil dengan panjang gelombang yang lebih panjang dibandingkan anomali residual (Blakely, 1995).



Gambar 7. Pemisahan Regional dan Residual (Blakely, 1995).

Anomali residual merupakan komponen data geofisika yang menunjukkan variasi berskala lokal dan umumnya berkaitan dengan struktur geologi yang lebih

dangkal. Anomali ini diperoleh setelah komponen anomali regional dikurangkan dari anomali total hasil pengukuran. Anomali residual biasanya memiliki amplitudo yang lebih besar dan panjang gelombang yang lebih pendek, serta berasosiasi dengan fitur geologi lokal seperti intrusi batuan, zona patahan, atau akumulasi mineral.

Estimasi nilai kedalaman tiap anomali didapatkan dengan melakukan regresi linear pada masing-masing zona. Pada (Gambar 7). Kedalaman regional dapat didapatkan dengan melakukan regresi linier pada zona regional, berlaku juga terhadap kedalaman residual dan *noise*. Spektral diturunkan dari potensi gayaberat yang teramati pada bidang horizontal, Persamaan (17) dan (18) transformasi Fouriernya yaitu sebagai berikut (Nursalam, 2021).

$$F(U) = \gamma\mu F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (17)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z)}}{|k|} \quad (18)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka didapatkan Persamaan (19),

$$(U) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0-z)}}{|k|} \quad (19)$$

Keterangan:

- U : Potensial gayaberat
- μ : Anomali rapat massa
- γ : Konstanta gayaberat
- r : Jarak
- z_0 : Ketinggian titik amat
- z : Kedalaman benda anomali
- k : bilangan gelombang

Dari persamaan tersebut, maka transformasi Fourier dari anomali gayaberat di suatu lintasan yaitu,

$$F(g_z) = \gamma\mu F \left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \right) = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F \frac{1}{r} \quad (20)$$

Diperoleh persamaan (21) menjadi,

$$F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{k|z_0 - z|} \quad (21)$$

Keterangan:

F : Gaya

g_z : Anomali gayaberat

μ : Anomali rapat massa

γ : Konstanta gayaberat

$\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)$: Turunan parsial terhadap variabel z

$\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \right)$: Turunan parsial dari $\frac{1}{r}$ terhadap z

Ketika distribusi massa memiliki sifat *random* dan tidak memiliki korelasi antara masing-masing nilai gayaberat, maka $\mu=1$, sehingga hasil transformasi Fourier anomali gayaberat menjadi persamaan (22),

$$A = C e^{k|z_0 - z|} \quad (22)$$

Keterangan:

A: Amplitudo

C : Konstanta

Hubungan yang terjadi antara A (amplitudo), K (bilangan gelombang), dan $(z_0 - z)$ dapat melakukan logaritma dari Persamaan (23),

$$y = ax + b \quad (23)$$

Maka diketahui persamaan garis lurus antara spektrum amplitudo ($\ln A$) dan bilangan gelombang (K). Komponen K berbanding lurus dengan spektral *amplitude*,

$$\ln A = (Z_0 - Z)|K| + \ln C \quad (24)$$

3.6 *Filtering Moving Average*

Filter *moving average* merupakan salah satu teknik penapisan yang termasuk ke dalam *low pass filter*, yaitu metode yang berfungsi meredam komponen frekuensi tinggi dan mempertahankan komponen frekuensi rendah. Pada penelitian ini, data Anomali Bouguer Lengkap ditapis menggunakan metode *moving average* dengan lebar jendela yang ditentukan berdasarkan nilai rata-rata setiap penampang hasil analisis spektrum. Semakin besar lebar jendela yang digunakan, maka anomali residual yang dihasilkan akan semakin mendekati nilai Anomali Bouguer Lengkap (Setiadi dkk., 2010). Sebelum dilakukan interpretasi terhadap data anomali gayabarat, diperlukan pemisahan antara anomali regional dan anomali lokal. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh gambaran kondisi tatanan geologi yang lebih akurat pada saat proses interpretasi (Haerudin dan Karyanto, 2007). Pemisahan anomali dilakukan untuk mempermudah interpretasi data gayabarat secara kualitatif, salah satunya dengan menerapkan filter *moving average*.

Metode *moving average* dilakukan dengan cara menghitung nilai rata-rata dari data anomali pada suatu jendela tertentu. Hasil dari proses ini merupakan anomali regional. Selanjutnya, anomali residual diperoleh dengan mengurangkan Anomali Bouguer Lengkap terhadap anomali regional, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (25).

$$\Delta g_{reg}(i,j) = \frac{\Delta g(i-n,j-n) + \dots + \Delta g(i,j) + \dots + \Delta g(i-n,j-n)}{N} \quad (25)$$

Keterangan:

$\Delta g_{reg}(i,j)$: Nilai anomali regional di titik *grid* (i, j).

n : Separuh dari ukuran jendela rata-rata bergerak.

N : Jumlah total elemen dalam jendela yang digunakan untuk perhitungan rata-rata

i dan j : Indeks untuk posisi dalam *grid*

3.7 *First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD)*

Pada penelitian ini dilakukan interpretasi data secara kuantitatif dan kualitatif. Interpretasi kuantitatif dilakukan melalui penerapan analisis *derivative* yang mencakup *First Horizontal Derivative (FHD)* dan *Second Vertical Derivative (SVD)*, serta analisis spektrum. Metode-metode tersebut digunakan untuk mengidentifikasi batas kontak antar batuan dan mengestimasi kedalaman sumber anomali gayabarat. FHD dan SVD merupakan teknik pemrosesan data geofisika yang umum diterapkan pada data gayabarat dan magnetik untuk menonjolkan serta memperjelas keberadaan fitur geologi lokal yang tidak tampak secara langsung pada data mentah, sehingga membantu meningkatkan ketelitian dalam proses interpretasi struktur bawah permukaan (Nabighian, 1987).

3.7.1 *First Horizontal Derivative (FHD)*

First Horizontal Derivative (FHD) pada data anomali gayabarat merupakan representasi perubahan nilai anomali gayabarat dari satu titik pengamatan ke titik lainnya yang dipisahkan oleh jarak tertentu. Metode ini dicirikan oleh munculnya nilai maksimum dan minimum yang tajam pada zona kontak anomali, sehingga mampu menandai batas suatu struktur geologi berdasarkan respon anomali gayabarat (Zaenudin dkk., 2021). Turunan horizontal dari anomali yang dihasilkan oleh suatu bodi bawah permukaan umumnya menunjukkan nilai puncak pada bagian tepi bodi tersebut, sehingga metode *horizontal derivative* dapat dimanfaatkan untuk menentukan posisi batas kontak densitas secara lateral (Cordell dan Grauch, 1982). Selain itu, metode ini efektif digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan baik yang bersifat dangkal maupun yang berada pada kedalaman lebih besar. Perhitungan nilai FHD selanjutnya dapat dilakukan menggunakan Persamaan (26) yang dikemukakan oleh Blakely (1995).

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

Keterangan:

$\frac{\partial \Delta g}{\partial x}$: Adalah turunan parsial anomali terhadap x.

$\frac{\partial \Delta g}{\partial y}$: Adalah turunan parsial anomali terhadap y.

3.7.2 *Second Vertical Derivative (SVD)*

Second Vertical Derivative (SVD) merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan struktur patahan karena mampu menampilkan adanya diskontinuitas pada struktur bawah permukaan. Metode ini berperan penting dalam membantu interpretasi jenis struktur geologi berdasarkan data anomali *Bouguer*, khususnya yang disebabkan oleh keberadaan patahan naik maupun patahan turun (Sarkowi, 2011). Setelah dilakukan pemisahan antara anomali regional dan anomali residual, efek dangkal yang terkandung dalam data anomali residual dapat ditingkatkan melalui teknik *anomaly enhancement*, salah satunya dengan menerapkan metode SVD. Metode ini dinilai sangat efektif dalam mendelineasi struktur patahan secara lebih jelas (Handyarso dan Padmawidjaja, 2017).

Secara matematis, SVD dari anomali gayaberat di permukaan setara dengan nilai negatif dari *Second Horizontal Derivative (SHD)*. Anomali yang dihasilkan oleh struktur cekungan umumnya memiliki nilai mutlak minimum SVD yang lebih besar dibandingkan nilai maksimumnya, sedangkan pada struktur intrusi berlaku sebaliknya, di mana nilai mutlak minimum lebih kecil daripada nilai maksimumnya. Penerapan metode SVD mampu mempertajam tampilan struktur-struktur lokal yang sebelumnya terlihat samar, sehingga kurva anomali menjadi

lebih tajam dibandingkan struktur regional yang cenderung lebih lebar. Hal ini disebabkan oleh karakteristik data gayaberat yang mengalami perubahan secara vertikal pada proses penurunan kedua, sehingga respons SVD lebih merepresentasikan pengaruh gayaberat dari struktur yang luas dan berada pada kedalaman yang lebih besar.

$$SVD = \frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial^2 g_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_z}{\partial y^2} \right) \quad (27)$$

Keterangan:

$\frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2}$: Adalah turunan kedua dari anomali total terhadap arah vertikal z.

Untuk anomali memanjang disepanjang sumbu y, SVD dapat diperkirakan dengan turunan *horizontal* kedua dari gayaberat disepanjang sumbu x dalam Persamaan (28) (LaFehr dan nabighian, 2012).

$$\frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2} \approx \frac{\partial^2 g_z}{\partial x^2} \quad (28)$$

Persamaan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk data satu dimensi menunjukkan bahwa anomali SVD dapat diperoleh melalui perhitungan *derivative* horizontal, yang secara praktis lebih sederhana untuk diterapkan. Nilai nol dari turunan kedua anomali *Bouguer* dapat diinterpretasikan sebagai zona kontak akibat adanya kontras densitas antara dua lapisan batuan. Kontak tersebut selanjutnya dapat diasosiasikan sebagai keberadaan struktur geologi berupa patahan maupun intrusi (Sarkowi, 2010).

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa untuk patahan tegak menunjukkan bahwa daerah patahan akan memberikan nilai $SVD = 0$. Sedangkan sifat dari patahan naik ditunjukkan oleh nilai dari SVD nya, untuk patahan tegak bahwa nilai $|SVD_1| \cong |SVD_2|$ (Sarkowi, 2010).

Dari pemodelan sintetik tentang karakteristik SVD akibat struktur patahan diperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Nilai $SVD : 0$ menunjukkan bahwa di daerah tersebut merupakan daerah patahan.
- b. Nilai $|SVD|_{min} < |SVD|_{max}$ mengindikasikan bahwa jenis patahan di daerah tersebut adalah patahan turun.
- c. Nilai $|SVD|_{min} > |SVD|_{max}$ mengindikasikan bahwa jenis patahan di daerah tersebut adalah patahan naik.
- d. Nilai $|SVD|_{min} \cong |SVD|_{max}$ mengindikasikan bahwa jenis patahan di daerah tersebut adalah patahan tegak/mendatar

3.8 *Inverse Modelling*

Inverse modelling atau pemodelan inversi merupakan metode interpretasi di mana proses penyesuaian model untuk mencapai kesesuaian antara data hasil perhitungan dan data hasil pengamatan dilakukan secara otomatis. Dalam pemodelan inversi, satu atau beberapa parameter model ditentukan langsung dari data pengamatan sehingga menghasilkan respon yang sesuai dengan data tersebut. Metode ini sering disebut sebagai data *fitting* atau pencocokan data karena prinsip utamanya adalah mencari kombinasi parameter model yang mampu menghasilkan respon paling mendekati data hasil pengamatan (Grandis, 2009).

Proses pencarian nilai minimum dari fungsi objektif tersebut berkaitan langsung dengan upaya memperoleh model yang paling optimum. Karakteristik minimum fungsi ini selanjutnya dimanfaatkan sebagai dasar dalam penentuan parameter model. Secara umum, model dimodifikasi secara bertahap hingga respon yang dihasilkan menunjukkan tingkat kecocokan yang memadai terhadap data pengamatan (Sarkowi, 2014).

3.9 *Global Gravity Model plus (GGMPlus)*

Global Gravity Model plus (GGMPlus) merupakan data *gayaberat open source* yang dikembangkan dengan mengintegrasikan model *gayaberat* satelit resolusi menengah dengan model *gayaberat* global EGM2008 disertai dengan kontribusi topografi dan batimetri beresolusi tinggi, sehingga menghasilkan data anomali *gayaberat* dengan resolusi spasial yang sangat tinggi hingga mencapai sekitar 200 meter di wilayah daratan dan pesisir. Keunggulan utama GGMplus dibandingkan data *gayaberat open source* seperti *topex*, EGM2008, maupun data GOCE, GGMPlus terletak pada kemampuannya merepresentasikan variasi medan *gayaberat* skala regional hingga semilokal dengan detail yang jauh lebih baik, karena model-model satelit lain umumnya hanya efektif untuk analisis regional berskala besar akibat resolusi spasial yang relatif kasar. Dengan resolusi tinggi tersebut, GGMplus lebih sensitif terhadap variasi densitas batuan dangkal, struktur geologi seperti sesar, dan batas litologi, sehingga sangat efektif digunakan sebagai data awal dalam studi geologi dan geofisika, termasuk eksplorasi panas bumi, terutama di daerah yang sulit dijangkau atau minim data pengukuran lapangan. Selain itu, sifatnya yang gratis dan *open source*, cakupan wilayah yang luas, dan kemudahan akses menjadikan GGMplus lebih unggul secara praktis dan ekonomis dibandingkan data *gayaberat open source* lainnya yang umumnya membutuhkan pengolahan tambahan atau hanya merepresentasikan komponen *gayaberat* berskala regional.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian Tugas Akhir dilakukan pada:

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG)

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

Waktu : Januari 2026- Mei 2026

4.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada (Tabel 6) berikut:

Tabel 6. Alat dan Bahan

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Data Gayaberat	Merupakan data GGMPPlus, yang digunakan dalam pengolahan
2	Lembar Peta geologi	Berfungsi mendapatkan informasi geologi daerah penelitian. Peta geologi yang digunakan bersumber dari Peta Geologi lembar Mamuju, Sulawesi Selatan 2010
3	Laptop	<i>Hardware</i> yang digunakan selama melakukan pengolahan
4	<i>Microsoft Excel</i>	Berfungsi dalam melakukan pengolahan data gayaberat, dan berfungsi membuat grafik untuk menentukan nilai regional, residual, dan <i>noise</i>
5	<i>Software QGIS</i>	Berfungsi untuk membuat peta yang dibutuhkan selama penelitian
6	<i>Software Oasis Montaj</i>	Digunakan untuk menghitung nilai koreksi medan dan melakukan pengolahan data gayaberat mulai dari proses <i>gridding</i> , <i>filtering</i> , <i>derivative</i> , <i>forward modelling 2d</i> data gayaberat.
7	<i>Software Global Mapper</i>	Untuk menggabungkan data DEM dan membuat <i>area of interest</i> dari daerah penelitian
8	<i>Software Numeri</i>	Digunakan untuk membuat parameter dan proses inversi 3D data gayaberat

9	<i>Software Surfer 13</i>	Digunakan membuat peta kontur <i>Anomali Bouguer Lengkap</i> , membuat penampang analisis spektrum, pemisahan anomali <i>Bouguer regional</i> dan residual
10	<i>Software Grav3D</i>	Befungsi untuk pemodelan 3D data Gayaberat untuk menggambarkan bentuk serta kedalaman struktur bawah permukaan secara detail.

4.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini sebagai berikut:

4.4.1 Studi Literatur

Tahap pertama yaitu melakukan studi literatur untuk mempelajari ilmu dasar yang digunakan dalam melakukan sebuah penelitian. Studi literatur yang dilakukan pada penelitian kali ini yaitu mencari refrensi dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, skripsi, maupun penelitian yang berkaitan pada penelitian.

4.4.2 Koreksi Data

Tahapan koreksi data yang dilakukan diawali dengan koreksi lintang, yaitu menggunakan nilai *latitude* untuk memperoleh nilai gayaberat normal, yang tujuannya untuk memperhitungkan perbedaan nilai gayaberat diberbagai daerah akibat bentuk bumi yang tidak sepenuhnya bulat. Kemudian dilakukan koreksi udara bebas (*Free Air Correction*) untuk menghilangkan efek topografi tanpa memerhatikan efek dari massa batuan, selanjutnya diperoleh nilai *Free Air Anomaly*. Tahap berikutnya adalah koreksi *Terrain Correction* untuk memperhitungkan pengaruh topografi sekitar titik pengukuran, yang dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak Global Mapper melalui penggunaan data DEM SRTM wilayah Lampung, kemudiann pengolahan dilanjutkan

menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj untuk memperoleh nilai koreksi medan.

4.4.3 Penentuan Nilai Densitas

Penentuan nilai densitas anomali *Bouguer* sangat penting dalam pengolahan data gayabarat. Nilai densitas digunakan pada penelitian ini ditentukan melalui dua metode, yaitu metode Parasnis dan metode Nettleton. Kedua metode ini digunakan untuk mendapatkan nilai densitas yang paling representatif dalam area pengukuran. Metode Parasnis, langkah pertama yaitu mengumpulkan data gayabarat dan elevasi pada berbagai titik pengamatan. Setelah itu, dilakukan perhitungan anomali *Bouguer* berdasarkan data gayabarat terukur dan elevasi, kemudiann dianalisis menggunakan regresi linear dalam menentukan hubungan antara anomali *Bouguer* dan elevasi. Dari hasil regresi ini, nilai densitas diperoleh melalui gradien garis regresi. Sedangkan metode Nettleton, yang dilakukan dengan memilih profil pengukuran yang memiliki variasi topografi yang signifikan. Data gravitasi dan elevasi di sepanjang profil tersebut, kemudiann dilakukan perhitungan anomali menggunakan nilai densitas awal. Proses dilakukan pengulangan dengan beberapa variasi densitas sehingga diperoleh nilai yang membuat anomali *Bouguer* mendekati nol sepanjang profil. Nilai densitas dianggap sebagai yang paling representatif untuk area dengan variasi topografi.

4.4.4 Anomali *Bouguer* Lengkap

Dari tahapan sebelumnya, kemudiann data gayabarat yang sudah dilakukan koreksi-koreksi. Dalam memperoleh nilai *Anomali Bouguer Lengkap* (ABL) kemudiann dilakukan *gridding* data untuk mendapatkan kontur *Anomali Bouguer Lengkap* menggunakan Surfer 13.

4.4.5 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Anomali *Bouguer* pada metode gayaberat muncul akibat adanya perbedaan densitas batuan, baik yang berasal dari sumber dangkal maupun dari sumber yang berada pada kedalaman lebih besar. Pengaruh yang ditimbulkan oleh batuan dangkal dikenal sebagai anomali residual, sedangkan pengaruh yang berasal dari struktur yang lebih dalam disebut sebagai anomali regional. Pemisahan antara anomali regional dan residual dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel dan Numeri. Proses ini diawali dengan analisis spektrum terhadap data *Anomali Bouguer Lengkap* (ABL) untuk mengestimasi kedalaman sumber anomali sekaligus menentukan lebar jendela yang sesuai.

Penentuan zona *cut-off* pada spektrum didasarkan pada perubahan kemiringan kurva yang paling signifikan, yang merepresentasikan batas antara komponen anomali regional dan residual. Nilai lebar jendela hasil analisis spektrum selanjutnya digunakan dalam penerapan filter *moving average*. Proses pemisahan anomali regional dan residual penelitian kali ini dilakukan menggunakan metode *moving average filter* yang ditentukan berdasarkan hasil analisis spektrum. *Moving average filter* merupakan salah satu teknik penapisan sinyal yang berfungsi sebagai *low-pass filter*, yaitu metode yang meredam komponen frekuensi tinggi dan meloloskan komponen frekuensi rendah. Melalui proses ini diperoleh sinyal frekuensi rendah yang telah tersaring sesuai dengan batasan tertentu, sehingga merepresentasikan anomali regional. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software* Surfer.

Tahapan pemisahan anomali diawali dengan memasukkan data *Anomali Bouguer Lengkap* pada *software* Surfer, kemudiann nilai lebar jendela yang diperoleh dari estimasi kedalaman anomali residual berdasarkan analisis spektrum digunakan sebagai parameter input dalam proses pemisahan anomali. Besarnya lebar jendela berpengaruh terhadap hasil pemisahan, di mana jendela yang lebih besar

menghasilkan anomali regional yang lebih halus, sedangkan jendela yang lebih kecil mampu mempertahankan detail anomali lokal. Anomali regional diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata ABL di sekitar setiap titik pengukuran, kemudiann anomali residual ditentukan melalui pengurangan nilai anomali regional dari nilai ABL.

4.4.6 *First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD)*

Pemrosesan *First Horizontal Derivative (FHD)* dan *Second Vertical Derivative (SVD)* pada data gayabarat dilakukan menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj. Tahapan pengolahan diawali dengan mengimpor data anomali residual ke dalam perangkat lunak, kemudiann data tersebut diubah menjadi bentuk grid dengan ukuran sel (*cell size*) yang disesuaikan dengan jarak antar titik pengukuran agar representasi spasialnya optimal. Setelah proses gridding selesai, perhitungan FHD dan SVD dilakukan melalui fasilitas pemrosesan turunan (*derivative filtering*) yang tersedia pada Oasis Montaj.

Metode FHD diterapkan untuk menonjolkan perubahan nilai gayabarat secara lateral, sehingga efektif dalam mempertegas batas antar satuan geologi maupun struktur seperti sesar. Sementara itu, SVD berfungsi untuk memperkuat respon anomali lokal yang bersifat dangkal dan berfrekuensi tinggi, sehingga mampu mendeteksi fitur-fitur geologi yang berada dekat permukaan. Hasil pengolahan kedua turunan tersebut selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk peta kontur dan dianalisis untuk mengidentifikasi pola struktur geologi, seperti sesar dan batas formasi batuan. Visualisasi ini memberikan dukungan yang signifikan dalam interpretasi kondisi geologi bawah permukaan, khususnya pada daerah dengan kompleksitas tektonik yang tinggi. Seluruh hasil pemrosesan kemudiann dapat diekspor dalam berbagai format digital, seperti *.map*, *.grd*, atau *.tif*, untuk keperluan analisis lanjutan.

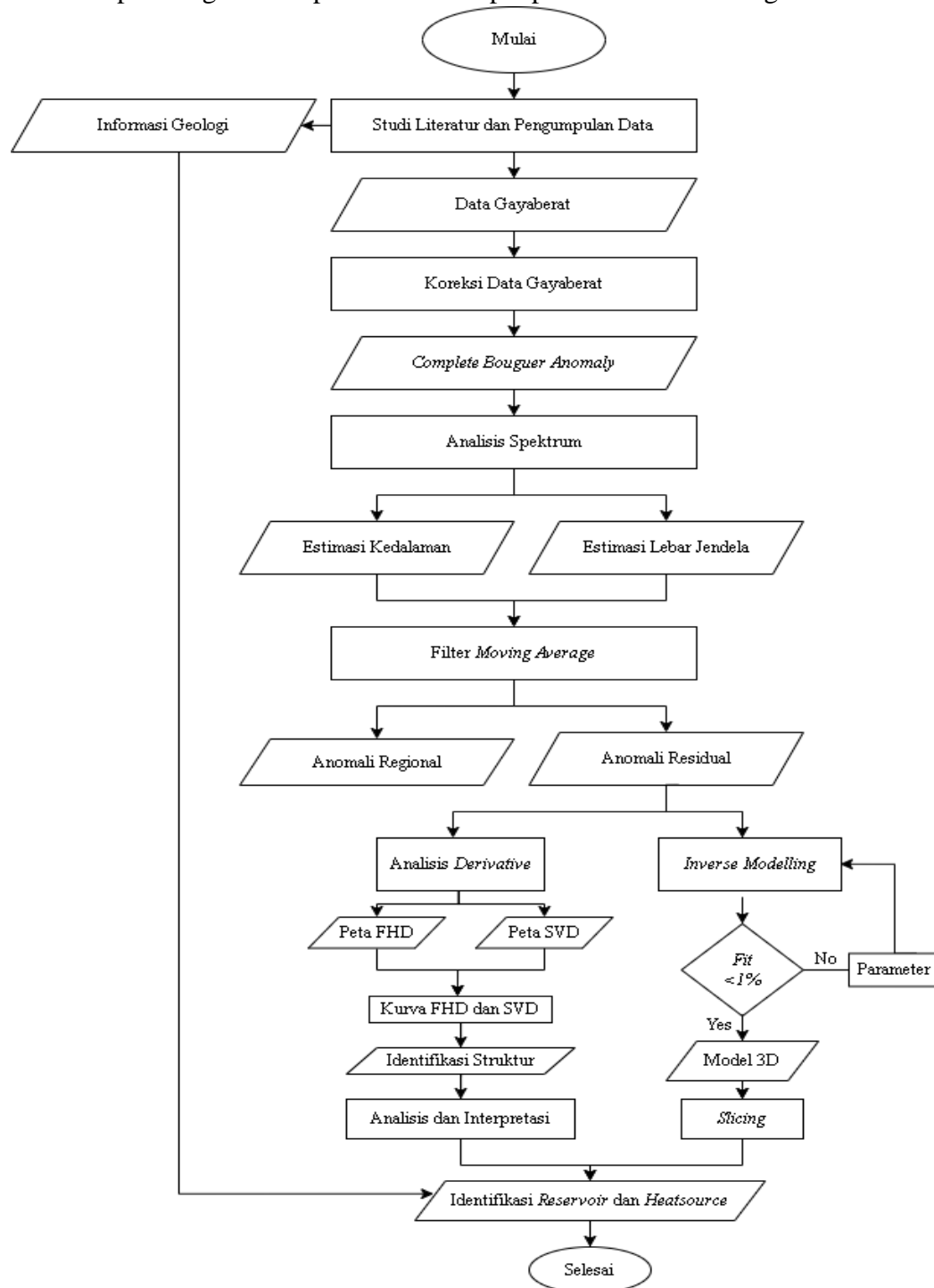
4.4.7 Pemodelan Bawah Permukaan

Pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *inverse modelling* dalam tiga dimensi (3D) untuk merepresentasikan distribusi densitas berdasarkan data gayaberat.

Pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak Grav3D dengan pendekatan *block model* yang disesuaikan dengan distribusi titik pengukuran di lapangan. Setiap blok dimodelkan menggunakan parameter awal berupa nilai densitas serta toleransi kesalahan yang ditentukan oleh pengguna. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan ketidakpastian data sehingga hasil pemodelan lebih mendekati kondisi geologi yang sebenarnya. Hasil pemodelan 3D tersebut kemudian dapat divisualisasikan dan dianalisis lebih lanjut menggunakan fasilitas tampilan tiga dimensi yang tersedia pada perangkat lunak Surfer.

4.5 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian terdapat pada Gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian berikut:

1. Berdasarkan analisis *derivative* diperoleh bahwa struktur sesar pada daerah penelitian mendominasi oleh sesar berarah SW-SE. Sesar pada daerah penelitian memiliki korelasi yang baik antara data pengolahan dengan struktur sesar dari geologi.
2. Model distribusi densitas dari pemodelan inversi 3D menunjukkan bahwa nilai densitas pada daerah penelitian dibatasi dengan nilai densitas rendah hingga tinggi dengan nilai 1,9 gr/cc sampai 2,9 gr/cc dengan rentang kedalaman 2600 m. Berdasarkan hasil analisis *derivative* yang telah dilakukan kemudiann dibandingkan dengan penampang *slicing* pemodelan inversi 3D sehingga dapat mengidentifikasi struktur sesar pada penampang 3D.
3. Keberadaan *reservoir* berada disekitar titik manifestasi air panas yang mengalir dari zona *upflow* yang berada dekat dengan Gunung Karua, sedangkan heatsource berada tepat dibawah permukaan Gunung Karua yang diinterpretasikan pada model inversi memiliki nilai densitas yang tinggi berkisar dari 2,7 gr/cc hingga 2,9 gr/cc. Data geokimia membenarkan dengan analisis geokimia pada daerah penelitian Bittuang, air panas yang mengalir ke arah baratdaya dari Gunungapi Karua, kemudiann masuk ke zona *upflow*nya dimana pada zona ini memiliki permeabilitas dan gradien suhu bawah permukaan yang paling tinggi. Air panas dari zona *upflow* kemudiann mengalir lateral ke baratdaya-selatan ke zona *outflow*. Pada zona lateral *flow*

teridentifikasi manifestasi berupa air panas kelompok Balla sedangkan pada zona *outflow* ditemukan manifestasi berupa air panas kelompok Cepeng.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut terkait sistem panas bumi Bittuang dengan melakukan pengukuran MEQ untuk mengetahui keberadaan *heatsource* dan *reservoir*, sehingga dapat membuat model konseptual sistem panas bumi secara lengkap dan detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakrun, Soetoyo, Kusnadi, D., dan Hermawan, D. (2009). Penyelidikan terpadu geologi, geokimia dan geofisika daerah panas bumi Bittuang-Kabupaten Tana Toraja Sulawesi Selatan. *Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun 2009*. Pusat Sumber Daya Geologi, 111–124.
- Bertani, R. (2016). Panas bumi Power Generation InThe World 2010–2014 Update Report. *Journal Geothermics*, 31–43.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory In Gravity And Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Brotospito, K.S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravity*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Fournier dan Truesdell, (1973). *An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters*. *Geochim. Cosmochim.*
- Fournier, R.O., (1981). *Application of Water Geochemistry Panas bumi Exploration and Reservoir Engineering, Panas bumi System: Principles and Case Histories*. John Willey dan Sons. New York.
- Imran, A. (2024). Identification of Panas bumi Prospect Zones in Bittuang Area Based on Remote Sensing and Geochemical Data. *Journal of Geology and Exploration*, 3(1), 1-12. <https://doi.org/10.58227/jge.v3i1.136>
- Giggenbach, W.F., (1991). *Chemical techniques in panas bumi exploration*, Application of Geochemistry in Panas bumi, Roma, UNITAR.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.

- Haerudin, N. dan Karyanto. (2007). Aplikasi Metode Polinomial Least Square Berbasis Matlab untuk Memisahkan Efek Residual Anomali Regional pada Data Gayaberat. *Jurnal FMIPA Universitas Lampung*, 32-36.
- Haerudin, N. dan Suharno, S. (2022). Pemisahan Menggunakan Polynomial Fitting dan Analisis Second Vertical Derivative untuk Mengidentifikasi Patahan pada Lapangan Panas bumi Pulau Pantar, Kabupaten Alor. *Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 23(2), 81-89.
<https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23i2.549>
- Handyarso, A., dan Padmawidjaja, T. (2017). Struktur geologi bawah permukaan Cekungan Bintuni berdasarkan data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 18(2), 53-65.
<https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v18i2.125>
- Hinze, W. J., von Frese, R. R. B., dan Saad, A. H. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- Kusnadi, D, dan Setiawan, D. I. (2009). Penyelidikan Geokimia Daerah Panas bumi Bittuang Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan. *Geological Agency, MEMR, Bandung*.
- LaFehr, T. R., dan Nabighian, M. N. (2012). *Fundamentals of Gravity Exploration*. Society of Exploration Geophysicists.
- Leeuwen, V. N. T. M. (1994). 25 years of mineral exploration and discovery in Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1-3), 13-90.
- Manalu, M. (2019). Identifikasi Struktur Sesar Bawah Permukaan Daerah Panas bumi Barru Sulawesi Selatan Berdasarkan Analisis SVD dan Pemodelan Anomali Gayaberat. *Skripsi*. Universitas Lampung (tidak terbit).
- Mangala, A., Yobel, Y., & Alfadli, M. K. (2017). Pemodelan Struktur Geologi Dan Analisis Sumber Panas Menggunakan Metode Gravitasi, Magnetik Dan Fault Fracture Density (FFD) Pada Daerah Panas Bumi Bittuang, Sulawesi Selatan. *Proceeding Seminar Nasional Kebumian Ke-10, September*.

- Nabighian, M. N. (1987). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Theory*. Society of Exploration Geophysicists. 1(1).
- Nicholson, K., (1993). *Panas bumi Fluids Chemistry and Exploration Technique*. Springer Verlag, Inc. Berlin
- Putra, U. G., dan Jhanesta, W. (2021). Interpretation of Subsurface Fault Through Multi-Level Second Vertical Derivative Gravitational Data in Bittuang Panas bumi Working Area, South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 6(4), 184-191. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2021.6.4.7744>
- Prasetya, I, P, Haryanto, A. D, dan Hutabarat, J. (2019). Pola Aliran Air Panas Bumi Daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan Menggunakan Metode Densitas Kelurusan dan Geoindikator Air Panas. *Geoscience Journal*, 3(4), 303-311. <https://doi.org/10.24198/pgj.v3i4.23197>
- Qomariyah, N. (2011). Analisis Zona Potensi Panas bumi Di Daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan Berdasarkan Anomali Magnetik Pseudogayaberat. *Skripsi* .Universitas Brawijaya (tidak terbit).
- Ratman, N, dan Atmawinata, S. (1993). Geological map of the Mamuju Quadrangle, Sulawesi, (scale 1: 250.000). *Geological Research and Development Centre. Bandung*.
- Rinanda, S. T. (2024). Identification of the Subsurface Structure of the Great Sumatra Fault Dikit Segment Based on First Horizontal Derivative (FHD), Second Vertical Derivative (SVD), and Forward Modelling Analyses Forward Modelling of 2D Gravity Anomaly Data. *Jurnal Geofisika*, 22(2), 13-21. <http://dx.doi.org/10.36435/jgf.v22i2.631>
- Risdianto, D, Hermawan, D, Kusnadi, D, Kholid, M, dan Rezky, Y. (2013). Simulasi Nuerik Sistem Panas Bumi Bittuang Kabupaten Tanatoraja, Sulawesi Selatan. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 8(3), 110-118.

- Sarkowi, M. (2007). *Gayaberat Mikro Antar Waktu Untuk Analisis Perubahan Kedalaman Muka Air Tanah: Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang. Disertasi*. Institut Teknologi Bandung.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi Struktur Daerah Panas bumi Ulubelu Berdasarkan Analisis Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16(2), 111-118.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat. Graha Ilmu*. Yogyakarta.
- Setiawan, D. I. (2010). Sistem Panas Bumi Gunung Karua Daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan. *Disertasi*. Institut Teknologi Bandung.
- Sirait, T.A.W. (2020). Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Bittuang, Berdasarkan Analisis Second Horizontal Derivative, Second Vertical Derivative, Pemodelan 2.5D dan 3D Anomali Gayaberat. *Skripsi*. Univeristas Lampung (tidak terbit).
- Soekarno, H, Pranoto, B, Azzahra, A. F, Emo, S, Hidayat, N, dan Widhiatmaka. (2024). Application of Gravity Data GGMPLUS for Identification of Geological Fault in The Bittuang Panas bumi Prospect Area, Tana Toraja. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3069, No. 1, p. 020055). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0207865>
- Suleman, W. A., Hermawan, D., dan Susanto, H. (2021). Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan. *Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi Tahun Anggaran 2021*. Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 137-144.
- Rezky, Y., Hermawan, D., dan Risdianto, D. (2013). Survei landaian suhu Bittuang. *Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun*. Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, 278–284
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Tim Survei Geofisika Terpadu. (2009). *Laporan Survei Terpadu Daerah Panas Bumi Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan*. Bandung: Departemen

Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) Badan Geologi, Pusat Sumber Daya Geologi.

Zaenudin, A., Karyanto, K., Kurniasih, A., dan Wibowo, R. C. (2021). Analisis Struktur Patahan Daerah Suoh Menggunakan Metode Gayaberat Dan Penentuan Kerapatan Patahan. *Jurnal Positron*, 11(2), 95–103.
<https://doi.org/10.26418/positron.v11i2.48461>

Zarkasyi, A, Syaifuddin, F, dan Setiawan, N. S. (2019). Aplikasi Metode Magnetotelurik Dalam Interpretasi Struktur Panas Bumi: Daerah Panas Bumi Gunung Karua, Tana Toraja Sulawesi Selatan. *Jurnal Geosaintek*, 5(1), 1-6.
<https://doi.org/10.12962/j25023659.v5i1.5062>