

**INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI SUAWA BERDASARKAN
DATA GAYA BERAT**

(Skripsi)

Oleh

DIAN NUR RIZKIANI



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2016**

ABSTRAK

INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI SUWAWA BERDASARKAN DATA GAYA BERAT

Oleh

DIAN NUR RIZKIANI

Telah dilakukan penelitian gaya berat pada panas bumi daerah Kecamatan Suwawa, Gorontalo dengan tujuan untuk menentukan struktur sesar dengan menggunakan teknik *Second Vertical Derivative (SVD)*, membuat model bawah permukaan 2D dan model tentatif 3D menggunakan data anomali regional dan menginterpretasi sistem panas bumi Suwawa. Metode gaya berat digunakan untuk mengetahui atau mengidentifikasi sistem panas bumi dan struktur geologi bawah permukaan bumi berdasarkan nilai densitas batuan. Pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian meliputi : koreksi apungan, koreksi medan, anomali udara bebas, anomali *Bouguer* lengkap, analisis spektral, analisis *SVD*, pemodelan 2D dan pemodelan inversi 3D serta model tentatif untuk menginterpretasi sistem panas bumi Suwawa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: (1) Daerah penelitian memiliki anomali *Bouguer* rendah dengan rentang nilai 75.8 hingga 79.5 mGal berada pada bagian Barat dan Tenggara, sedangkan anomali tinggi dengan rentang nilai 90.9 hingga 111.2 mGal berada pada bagian Utara dan Selatan daerah penelitian. (2) Adanya korelasi sesar berdasarkan analisa *SVD* dengan sesar geologi yang menunjukkan keberadaan mata air panas Libungo. (3) Hasil inversi menunjukkan adanya densitas rendah ($\rho = 1,8 \text{ gr/cc}$) yang merupakan batuan aluvial dan densitas tinggi ($\rho = 2,9 \text{ gr/cc}$) yang merupakan batuan Lava Andesit Dasitan. (4) Pemodelan tentatif 3D menunjukkan keberadaan reservoir berada pada kedalaman 2 km dari permukaan tanah. (5) Berdasarkan model yang dibuat, *Cap Rock* berada pada batuan Lava Andesit Dasitan dengan $\rho = 2,9 \text{ gr/cc}$ pada kedalaman 1200 m dan *Heat Source* berada pada kedalaman $> 2000 \text{ m}$.

Kata Kunci: Gaya Berat, Sistem Panas Bumi, Model Tentatif

ABSTRACT

**INTERPRETATION OF SUAWA GEOTHERMAL SYSTEM BASED ON
GRAVITY DATA**

By

DIAN NUR RIZKIANI

Has done research of gravity on Suwawa Sub-District geothermal, Gorontalo for the purposes to determine fault structure using Second Vertical Derivative (SVD) technique, create a 2D subsurface model and 3D tentative model using regional anomaly data, and interpreting Suwawa geothermal system. Gravity methods used to determine or identify geothermal system and subsurface geological structure based on the density of the rock. Data processing is done in the research include: drift correction, terrain correction, free air correction, complete Bouguer anomaly, spectral analysis, SVD analysis, 2D modeling and 3D inversion modeling and tentative model. The research results showed that : (1) The research area has low Bouguer anomaly with a range of 75.8 to 79.5 mGal values in the West and Southeast, while high anomaly with a range of 90.9 to 111.2 mGal values in the Northern and Southern of research area. (2) There is correlation of fault based on SVD analysis with geological fault that indicate the presence of Libungo hot springs. (3) The inversion results indicate the presence of low density ($\rho = 1.8 \text{ g/cc}$) which is an alluvial rocks and high density ($\rho = 2.9 \text{ g/cc}$) which is Dasitan Andesite Lava rocks. (4) 3D tentative modeling indicate the presence of reservoir is at a depth of 2 km from the ground surface. (5) Based on the model created, Cap Rock is located on Andesite Dasitan Lava rocks with $\rho = 2.9 \text{ g/cc}$ at a depth of 1200 m and Heat Source located at a depth of $> 2000 \text{ m}$.

Keyword : Gravity, Geothermal System, Tentative Model

**INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI SUWAWA BERDASARKAN
DATA GAYA BERAT**

Oleh
DIAN NUR RIZKIANI

Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada
Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2016**

Judul Penelitian : **INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI
SUWAWA BERDASARKAN DATA GAYA
BERAT**

Nama : *Dian Nur Rizkiani*

No. Pokok Mahasiswa : 1115051012

Jurusan : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



Pembimbing I

Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720912 1999903 1 001

Pembimbing II

Rustadi, S.Si., M.T.
NIP 19720511 199703 1 000

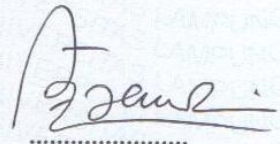
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.
NIP 19700120 200003 1001

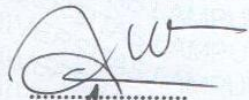
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

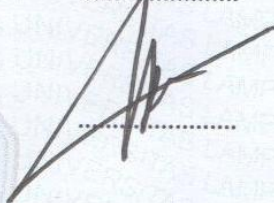
Ketua : Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.



Sekretaris : Rustadi, S.Si., M.T.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi:

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 2016



Dian Nur Rizkiani

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Jaya pada tanggal 18 Desember 1993. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Nur Salam dan Ibu Sugiati. Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak di TK Pamerdisiwi pada Tahun 2000, pendidikan Sekolah Dasar di SD Kristen No.3 Bandar Jaya, Lampung Tengah pada tahun 2005. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 3 Bandar Jaya, Lampung Tengah pada tahun 2008. Dan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Terbanggi Besar, Lampung Tengah pada tahun 2011.

Pada tahun 2011 penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur UM (Ujian Mandiri). Di dalam organisasi jurusan, penulis juga terdaftar sebagai anggota bidang kaderisasi pada periode 2012/2013 . Pada periode 2013/2014 penulis masih tetap terdaftar sebagai anggota Bidang Kaderisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana Universitas Lampung. Pada periode 2013/2014 penulis tercatat sebagai anggota SEG SC Universitas Lampung. Pada tahun 2014 penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata pada Desa Kedaton I, Kecamatan Batanghari Nuban, Kabupaten Lampung Timur.

Pada Tahun 2015 penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktek di PT. Geoservices Div. Eksplorasi dengan mengambil tema “**Akuisisi Gaya Berat Menggunakan Lacoste & Romberg Tipe G-778 Di Daerah Lembang, Bandung**”. Penulis melakukan Tugas Akhir (TA) untuk penulisan skripsi di Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) hingga akhirnya penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tanggal 20 Juli 2016 dengan skripsi yang berjudul “**Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gaya Berat**”.

PERSEMBAHAN

Aku persembahkan karya ini untuk:

ALLAH SWT

Ayahanda Jercinta Bapak Nur Salam

Ibunda Jercinta Ibu Sugianti

Adikku Jersayang Imam Nur Arifin

Keluarga Besar

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2011

Keluarga Besar Teknik Geofisika UNQLA

Almamater Jercinta Universitas Lampung

MOTTO

*"Kalau aku susah, cukuplah aku tangisi semalaman.
Semalam suntuk. Esoknya aku tak mau lagi menangis.
Aku bangun dan tegak kembali.
(Andrea Hirata)*

*"My job is to take care of the possible, and trust God
with the impossible"
(Anonim)*

*"Jika semua yang diimpikan terwujud, kita tidak akan
pernah belajar sabar"
(Dahlan Iskan)*

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Swt, Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan nikmatnya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Tak lupa shalawat serta salam mari kita haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah mengantarkan kita melewati masa jahiliyah sampai ke masa sekarang ini.

Skripsi ini mengangkat judul “Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gaya Berat”. Skripsi ini merupakan hasil dari Tugas Akhir yang penulis laksanakan di Pusat Sumber Daya Geologi, Kementerian ESDM RI.

Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan bermanfaat guna pembaruan ilmu di masa yang akan datang. Penulis sadar pada skripsi ini masih banyak kesalahan dan jauh dari kata sempurna, untuk itu jika ditemukan kesalahan pada penulisan skripsi ini, kiranya dapat memberikan saran maupun kritik pada penulis. Demikianlah kata pengantar yang dapat penulis sampaikan, apabila ada salah kata saya mohon maaf dan kepada Allah SWT saya mohon ampun.

Penulis

Dian Nur Rizkiani

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul **Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gaya Berat**. Penulis berharap, karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal serta didukung dengan bantuan dan keterlibatan berbagai pihak ini akan dapat bermanfaat di kemudian hari.

Banyak pihak yang terlibat dalam dan memberikan kontribusi ilmiah, spiritual, dan informasi baik secara langsung maupun tidak langsung hingga terbentuk skripsi ini. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada :

1. Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa dan Nabi Muhammad SAW atas segala rahmat dan hidayah-Nya selama penulis menjalankan Tugas Akhir;
2. Kedua orang tuaku **Bapak Nur Salam** dan **Ibu Sugiati** yang tiada henti membimbing dan menyayangi penulis;
3. Adikku **Imam Nur Arifin** yang terus memberikan semangat kepada penulis;

4. Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG), Kementerian ESDM sebagai institusi yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan Tugas Akhir;
5. **Bpk. Bagus Sapto Mulyatno, M.T.** selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung;
6. **Bpk. Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**, selaku pembimbing utama atas ketersediaannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
7. **Bpk. Rustadi, S.Si., M.T.**, selaku pembimbing atas bimbingan, saran dan masukan dalam proses penyelesaian skripsi ini;
8. **Bpk. Dr. Muh. Sarkowi. S.Si., M.Si.**, selaku pembahas dalam Tugas Akhir terima kasih atas kesediannya;
9. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati terima kasih untuk semua ilmu yang diberikan;
10. Teman-teman TG 11 “**Oouchh**” !!! **Achmadi, agung, alwi, asri, bagus, sibu, keto, doni, farid, mala, wahyu, guspri, hardeka, nanda, rika, syamsul, wilyan, yunita, hilda, leo, lia, mezzrin, wanda, ami, sari, ticun, tri cici, yeni, ucap, ratu, annisa.** Terima kasih untuk setiap kisah yang kita lalui bersama **AKU SAYANG KALIAN !!!**;
11. Doni “**Mbik**” Zulfafa sebagai teman dari SMP hingga sekarang dan satu metode terima kasih untuk segala bantuan dan nasehat dalam menyelesaikan skripsi ini;
12. Teman-teman di Kosan Reyfrisc, Ame, Iin, Winda, Maya, Irma, Nenok, Indah, Vivi, Hera, Bella, Ika, Deska, Mamik, Ega, Dema, dan **Defi** teman

seperjuangan di kosan dari awal hingga sekarang, terima kasih untuk semangat, dukungan, kritik, saran, dan masukan selama proses penyelesaian skripsi ini. Terima kasih untuk kebahagiaan yang diberikan selama ini;

13. Teman-teman YVML (Yamaha Vixion Modified Lampung) atas dukungan, semangat, nasihat, bahagia yang diberikan kepada penulis;
14. **Gusta, Enzo, Okta** terima kasih selalu ada di saat suka maupun duka;
15. **Lek Hadi dan Mbak Iin**, terima kasih atas dukungan, semangat, doa kepada penulis selama menyelesaikan skripsi ini;
16. **Bude Kas, Pakde Santo, Mas Edo, Mbak Diana**, terima kasih atas bantuan selama ini yang diberikan kepada penulis dari awal perkuliahan hingga sekarang;
17. Seseorang yang selalu memberikan dukungan, doa, semangat, nasihat, masukan, kritik, saran, bahagia, sedih dan hingga saat ini masih menemani, **Ryan Saputra**, terima kasih untuk semuanya;
18. Kalian semua yang membuat saya kuat dalam menghadapi hidup;
19. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Batasan Masalah.....	3

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional	5
2.2 Geologi.....	5
2.2.1. Morfologi daerah penelitian.....	5
2.2.2. Stratigrafi daerah penelitian	8
2.3. Struktur Geologi	14
2.4. Manifestasi Panas Bumi	17
2.4.1. Batuan ubahan.....	17
2.4.2. Mata air panas	17
2.5. Hidrologi dan Model Panas Bumi	20
2.5.1. Hidrologi	20
2.6. Sistem Panas Bumi	20
2.6.1. Sumber panas	23
2.6.2. Reservoir	23
2.6.3. Batuan lapis penudung.....	23

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gaya Berat	25
3.2. Konsep Dasar Gaya Berat.....	26
3.2.1. Gaya gravitasi	26
3.2.2. Percepatan gravitasi	27
3.2.3. Potensial gaya berat distribusi massa.....	28
3.2.4. Satuan gaya berat	30
3.2.5. Pengukuran gaya berat	31
3.3. Koreksi-Koreksi Pada Metode Gaya Berat.....	31

3.3.1. Koreksi apungan (<i>drift correction</i>)	32
3.3.2. Koreksi bacaan alat	32
3.3.3. Koreksi pasang surut (<i>tide correction</i>)	32
3.3.4. Koreksi lintang (G.normal)	33
3.3.5. Koreksi udara bebas (<i>free air correction</i>)	33
3.3.6. Koreksi <i>Bouguer</i>	34
3.3.7. Koreksi medan (<i>terrain correction</i>)	34
3.4. Anomali <i>Bouguer</i>	35
3.5. Analisis Spektrum.....	36
3.6. Pemisahan Anomali Regional dan Residual Dengan metode <i>Moving Average</i> dan <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD)	40
3.6.1. <i>Moving Average</i>	40
3.6.2. Metode <i>second vertical derivative</i> (SVD)	42
3.7. <i>Forward Modeling</i> (Pemodelan ke Depan)	43
3.8. <i>Inverse Modeling</i> (Pemodelan ke Belakang).....	44

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan	45
4.2. Alat dan Bahan	45
4.3. Diagram Pengolahan Data	46
4.4. Diagram Analisis Penelitian	47
4.5. Prosedur Penelitian	48

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Topografi Daerah Penelitian.....	49
5.2. Metode Gaya Berat	50

5.2.1. Anomali <i>Bouguer</i>	50
5.2.2. Analisis Spektrum.....	52
5.2.3. Pemisahan anomali regional dan residual.....	57
5.2.4. Analisis <i>Second Vertical Derivative</i>	60
5.2.5. Pemodelan 2D (<i>forward modelling</i>)	62
5.2.6. <i>Inverse Modelling</i>	67
5.2.7. Interpretasi Sistem Panas Bumi	68

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan	72
6.2. Saran	73

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1. Peta Lokasi Daerah Penelitian.....	6
Gambar 2. Peta Geologi Daerah Panas Bumi Suwawa.....	9
Gambar 3. Susunan Stratigrafi Daerah Panas Bumi Suwawa.....	14
Gambar 4. Skema Sebuah Sistem <i>Geothermal</i> yang Ideal	22
Gambar 5. Gaya Tarik-Menarik Antara 2 Benda.....	26
Gambar 6. Potensial Massa Tiga Dimensi	29
Gambar 7. Titik Amat P Pada Ketinggian h Terhadap Permukaan Acuan	34
Gambar 8. Kurva $\ln A$ Terhadap k	39
Gambar 9. Diagram Alir Pengolahan Data Gaya Berat	46
Gambar 10. Diagram Alir Analisis Data.....	47
Gambar 11. Sebaran Titik dan Topografi Daerah Penelitian.....	49
Gambar 12. Korelasi Antara Topografi, Gravitasi Normal dan Anomali <i>Bouguer</i> Lengkap	51
Gambar 13. Peta Anomali <i>Bouguer</i> yang <i>Dioverlay</i> Pada Peta Geologi.....	52
Gambar 14. Grafik Spektrum <i>Line 1</i>	53
Gambar 15. Grafik Spektrum <i>Line 2</i>	54
Gambar 16. Grafik Spektrum <i>Line 3</i>	55
Gambar 17. Grafik Spektrum <i>Line 4</i>	56
Gambar 18. Peta Anomali Regional yang <i>Dioverlay</i> Pada Peta Geologi	58

Gambar 19. Peta Anomali Residual yang Dioverlay Pada Peta Geologi.....	60
Gambar 20. Perkiraan patahan pada peta kontur <i>SVD</i> filter Elkins (1951)	61
Gambar 21. Pemodelan Lintasan A-B	63
Gambar 22. Pemodelan Lintasan E-F	65
Gambar 23. Tampilan <i>3D-view Forward Modelling</i>	66
Gambar 24. Pemodelan Ke Belakang Berdasarkan Anomali Regional	67
Gambar 25. Pemodelan Ke Belakang Berdasarkan Lintasan A-B dan Lintasan E-F.....	68
Gambar 26. Model Tentatif Lintasan A-B	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lebar Jendela <i>Moving Average</i>	halaman 57
--	---------------

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Suatu sistem panas bumi biasanya berasosiasi dengan sistem vulkanik yang terbentuk sepanjang busur kepulauan sebagai akibat pergerakan lempeng di permukaan bumi yang menyebabkan terjadinya gunung berapi. Keberadaan gunung berapi ini dapat menjadi sumber energi panas bumi. Sumber panas dalam suatu sistem panas bumi sangat penting, sehingga tidak hanya gunung api aktif yang dapat dimanfaatkan, tetapi juga gunung api tua yang masih memiliki sumber panas yang cukup yang terletak di wilayah *Ring of Fire* dapat dimanfaatkan. Indonesia dengan letak yaitu daerah pertemuan 3 lempeng tektonik (lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik) dan 1 lempeng tektonik kecil (lempeng Filipina). Lempeng-lempeng ini saling bergerak 1 sama lain dengan sangat lambat yaitu 0-20 cm per tahun (Gunawan, 2005).

Indonesia tercatat ke dalam negara-negara yang mempunyai vulkanik utama di dunia dan Indonesia adalah negara yang dianugerahi sumber energi panas bumi yang terbesar di dunia. Diperkirakan potensi panas bumi Indonesia memiliki cadangan potensi panas bumi terbesar yaitu sekitar 40% dari sumber potensi panas bumi di dunia adalah sekitar 27.000 Mwe (Daud dkk., 2000). Perkembangan panas bumi di Indonesia hanya terpusat di Sumatera, Jawa-Bali, dan Sulawesi

Utara karena wilayah tersebut mempunyai infrastruktur yang sesuai. Struktur geologi menjadi salah satu syarat utama dalam sistem panas bumi karena struktur geologi seperti sesar berguna sebagai sistem lolos air (*permeable*). Dalam mengeksplorasi panas bumi, untuk penentuan struktur geologi memiliki kekurangan. Karena saat dilakukan survei geologi untuk penentuan jenis batuan dan struktur geologi, yang terdeteksi hanyalah yang terlihat dipermukaan bumi saja. Untuk struktur yang tertutup sedimen di atasnya tidak terlihat. Dalam suatu eksplorasi panas bumi, metode geofisika merupakan salah satu metode utama yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan suatu sistem panas bumi. Metode geofisika yang digunakan biasanya adalah metode selain metode seismik aktif. Hal ini dikarenakan sebagian besar lapangan panas bumi berada pada daerah vulkanik dimana sebagian besar batuan penyusunnya adalah batuan beku dan metamorf. Selain itu, kondisi bawah permukaan daerah vulkanik yang umumnya tidak membentuk perlapisan sehingga sulit dideteksi menggunakan metode seismik aktif. Metode-metode yang umum digunakan diantaranya metode resistivitas, metode magnetik, metode gravitasi, dan juga metode elektromagnetik.

Metode gravitasi atau gaya berat digunakan untuk mengetahui atau mengidentifikasi sistem panas bumi dan struktur geologi bawah permukaan bumi berdasarkan nilai densitas batuan. Adanya struktur geologi ini bisa mengakibatkan adanya variasi massa jenis batuan yang ada dibawah permukaan. Penurunan struktur bawah permukaan ini didasarkan pada hubungan anomali Bouger gravitasi yang merefleksikan variasi rapat massa (*density*) di bawah permukaan ke arah horizontal dan geometri (bentuk) benda dari anomalnya

sendiri. Eksplorasi gaya berat dimulai pada awal abad 20, yang digunakan pada saat penemuan minyak dan gas bumi pertama kali. Sejak saat itu, metode gaya berat mengalami banyak pengembangan baik dalam hal instrumentasi, akuisisi data, pengolahan data, dan interpretasi data.

Penelitian menggunakan metode gaya berat dilakukan pada daerah panas bumi Suwawa, Kabupaten Bone Bolango, Propinsi Gorontalo. Dalam eksplorasi energi panas bumi, metode gaya berat dapat mendeteksi perbedaan densitas batuan di bawah permukaan yang membentuk suatu sistem panas bumi. Metode gaya berat juga dapat digunakan untuk membuat model struktur bawah permukaan yang akan digunakan sebagai acuan untuk melakukan interpretasi. Dengan melakukan interpretasi tersebut diharapkan dapat memberikan informasi dan gambaran yang lebih baik tentang kondisi daerah prospek panas bumi Suwawa.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan struktur sesar dengan menggunakan teknik *Second Vertical Derivative (SVD)* dari data anomali gaya berat
2. Membuat model bawah permukaan 2D dan model tentatif 3D menggunakan data anomali regional
3. Menginterpretasi sistem panas bumi Suwawa

1.3. Batasan Masalah

Batasan dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menitikberatkan pada interpretasi sistem panas bumi menggunakan metode gaya berat pada daerah penelitian.
2. Data topografi diambil dari data SRTM Indonesia area Gorontalo.
3. Interpretasi struktur ditentukan menggunakan *Second Vertical Derivative (SVD)*

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Regional

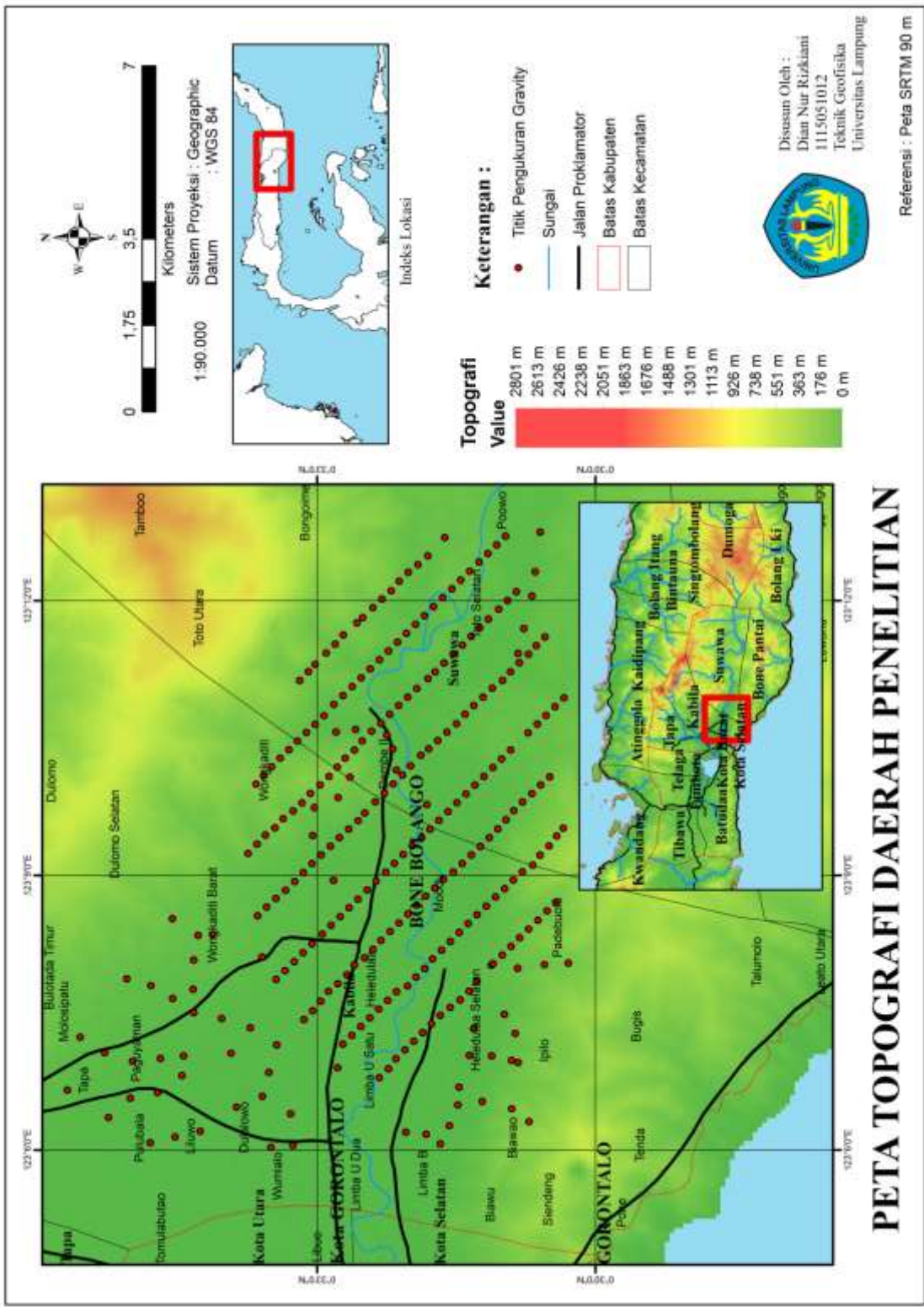
Daerah panas bumi ini berada di wilayah Kecamatan Suwawa dan Kabila (sebagian kecil) yang berjarak lebih kurang 30 km di sebelah Timur Kota Gorontalo yang secara administratif berada di dalam wilayah Kecamatan Suwawa, Kabupaten Bone Bolango, Propinsi Gorontalo. Luas daerah panas bumi Suwawa lebih kurang $17 \times 16 \text{ km}^2$, dengan posisi geografis antara $0^{\circ}28'13.7''$ - $0^{\circ}36'54.8''$ lintang utara dan $123^{\circ}06'00''$ - $123^{\circ}15'00''$ bujur timur atau 511.000 - 528.000 mT dan 52.000 - 68.000 mU pada sistem UTM zone 51 belahan bumi Utara pada datum horizontal WGS 84. Lokasi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.

2.2. Geologi

Adapun morfologi daerah penelitian dan susunan stratigrafi daerah penelitian adalah sebagai berikut.

2.2.1. Morfologi daerah penelitian

Berdasarkan bentuk bentang alam, pola aliran sungai, tingkat erosi dan jenis batuan di daerah panas bumi Suwawa, morfologi pada daerah ini dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) satuan morfologi, yaitu satuan morfologi dataran



Gambar 1. Peta distribusi titik pengukuran gaya berat di daerah penelitian

rendah (SDR), satuan morfologi vulkanik G. Balangga dan Pinogoe (SVBP) dan satuan morfologi vulkanik G. Mogi dan Lompotoo (SVML).

a. Satuan morfologi dataran rendah (SDR)

Secara umum, satuan morfologi dataran rendah tersebar di daerah-daerah sepanjang sungai Bone yang merupakan dataran graben hingga pinggir pantai selatan dengan ketinggian berkisar antara 0 - 150 m di atas permukaan air laut. Batuannya berupa satuan batuan endapan danau Limboto dan endapan pantai yang sebagian besar merupakan hasil dari erosi air dan abrasi laut. Satuan morfologi ini dibentuk oleh batu pasir, konglomerat, boulder-boulder lava lapukan batuan vulkanik dan lempung yang umumnya hasil longsoran dari batuan yang lebih tua (endapan aluvium). Lembah sungai ke arah hulu berbentuk "V" yang mencirikan stadium erosi vertikal lebih kuat dibandingkan dengan stadium erosi horizontal, sedangkan di sungai utama berbentuk melebar hingga berbentuk "U". Pola aliran sungai yang merupakan kelanjutan dari arah hulu umumnya setengah bercabang (*sub-dendritik*) dengan bantaran sungai tidak terlalu tinggi dan lembah sungai melebar, yang mencirikan tingkat pengikisan horizontal lebih dominan dibanding arah vertikal. Tingkat pengikisan seperti ini umumnya terjadi pada musim penghujan.

b. Satuan morfologi vulkanik G. Balangga dan Pinogoe (SVBP)

Satuan morfologi vulkanik G. Balangga - Pinogoe berada di bagian Selatan, Tenggara, dan Barat Daya yang mempunyai ketinggian antara 150-650 m dpl. Umumnya, satuan morfologi ini berupa areal kehutanan, namun sebagian kecil terdapat di lereng-lereng yang agak rendah berupa perkebunan dan ladang

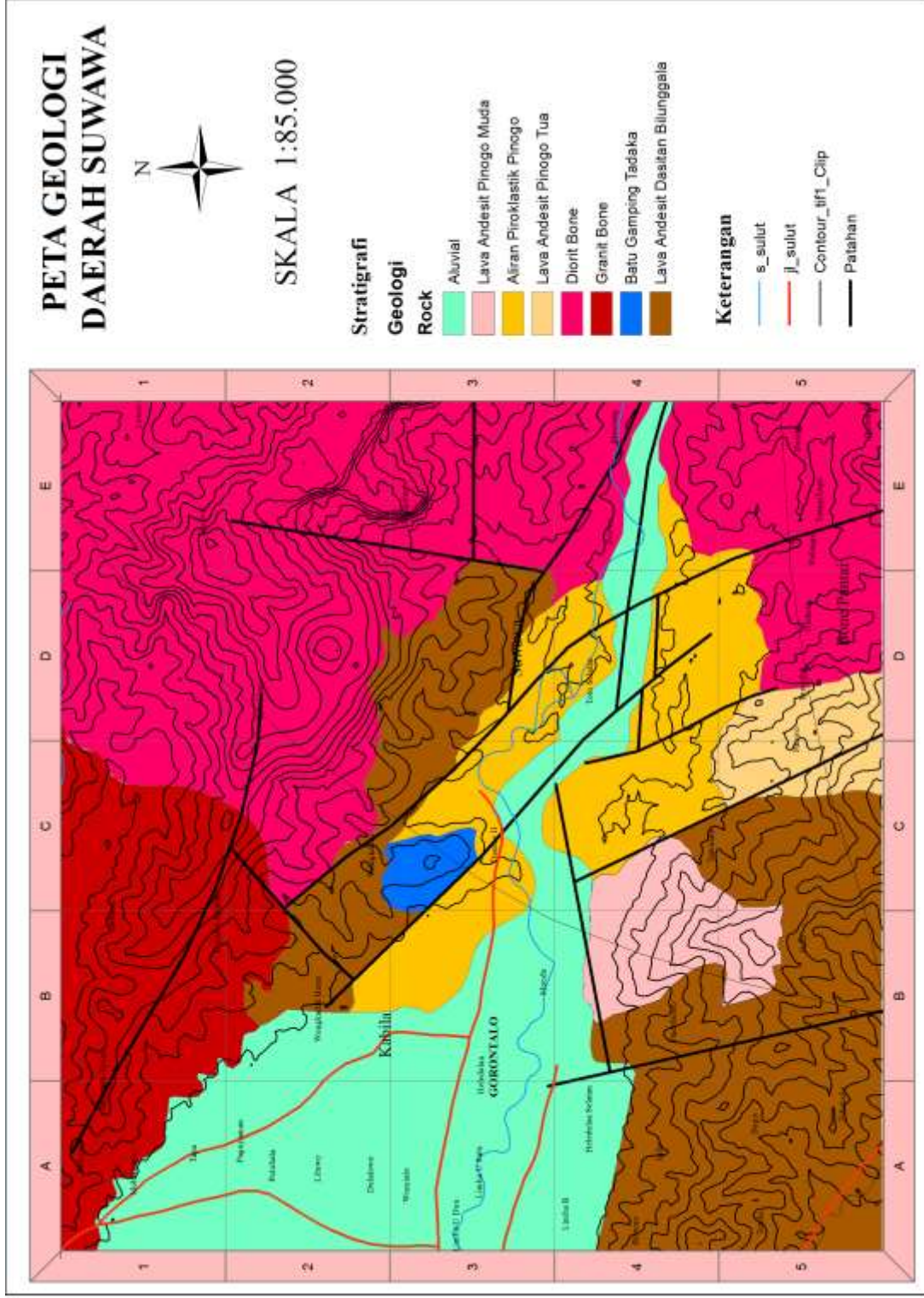
masyarakat setempat. Pola aliran pada jenis morfologi ini menunjukkan pola memancar (*radial*) dari hulunya dan selanjutnya ke arah hilir berpola sejajar (pararel) dan setengah mendaun (*sub-dendritik* hingga *dendritik*) serta setengah menangga (*sub-trellis*) pada saat memasuki sungai Bone. Lembah sungai umumnya berbentuk “V” di daerah hulu yang mencirikan stadium erosi vertikal lebih kuat dibandingkan dengan stadium erosi horizontal.

c. Satuan morfologi vulkanik G. Mogi dan Lompotoo (SVML)

Satuan morfologi vulkanik G. Mogi dan Lompotoo (SVML) mempunyai ketinggian antara 150-1400 m di atas permukaan laut (dpl). Satuan morfologi ini terdapat di bagian Utara yang memanjang dari Barat ke Timur yang berupa areal kehutanan dan perkebunan masyarakat setempat dan hutan lindung/suaka alam. Pola aliran sungai di bagian Utara daerah panas bumi Suwawa umumnya setengah memancar/menyebar (*subradial - radial*) di hulunya dan menjadi setengah bercabang (*sub-dendritik - dendritik*) hingga setengah menangga (*sub-trellis*) di sepanjang poros yang dilalui oleh aliran sungai Mogi dua, Tapadaa dan Ulanta yang mempunyai arah aliran rata-rata hampir Timur Laut – Barat Daya. Sungai tersebut cenderung mempunyai pola relatif agak lurus dengan lembah sungai membentuk huruf “V” dengan tingkat pengikisan vertikal lebih aktif dibandingkan dengan pengikisan lateral (Bammelen,1949). Untuk peta geologi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.

2.2.2. Stratigrafi daerah penyelidikan

Berdasarkan hasil penyelidikan di lapangan, urutan batuan di daerah panas bumi Suwawa dapat dibagi dalam 7 satuan batuan yang terdiri dari 4 (empat) batuan



Gambar 2. Peta geologi daerah panas bumi daerah Suwawa

vulkanik, 2 (dua) batuan Plutonik (Granit-Diorit), 1 (satu) batuan sedimen dan 1 (satu) batuan endapan permukaan. Batuan-batuan vulkanik di daerah panas bumi Suwawa tersebut diperkirakan berasal dari satu titik pusat erupsi, yaitu Pinogoe - Balangga. Batuan sedimen pada daerah ini berupa gamping kristalin (kalkarenit), sedangkan endapan permukaan yang terdapat di daerah ini digolongkan ke dalam satuan aluvium (Qa).

Urutan-urutan batuan dari tua ke muda yaitu sedimen/batu gamping, batuan vulkanik tua, batuan non vulkanik/plutonik, batuan vulkanik muda dan endapan permukaan sebagai berikut.

a) Satuan batu gamping Tadaka (Tmtl)

Satuan ini tersingkap di bagian tengah, atau sebelah Barat dari lokasi air panas Lombongo yang membentuk punggung bukit landai yang sebagian telah tertutupi oleh lapukan batuan vulkanik. Kehadiran Satuan Batu Gamping Kristalin (Tmtl) ini mengindikasikan bahwa daerah ini sebelumnya telah terpengaruh oleh gaya tektonik sehingga batuan ini terangkat ke permukaan. Sebaran satuan batuan ini kontak dengan batuan tua yang tersilisifikasi dan berada pada satuan morfologi batuan plutonik Mogi – Lompotoo. Batuan ini mencirikan adanya sifat karbonat, berwarna putih kekuningan sampai kuning kecoklatan dan fisiknya sedikit berongga (berlobang). Satuan ini merupakan satuan batuan tertua atau tersier bawah dan tidak selaras dengan batuan di atasnya.

b) Satuan lava Andesit-Dasitan Bilungala (Tmbu)

Satuan ini menyebar di bagian tengah dan Selatan yaitu daerah Lombongo Utara hingga ke arah Timur daerah Tapadaa pada satuan morfologi SVML. Lava

andesitik berwarna abu-abu terang-gelap hingga kemerahan dan keputih-putihan, bersifat menengah dan sebagian telah mengalami pelapukan dan berubah hingga tersilisifikasi dan oksidasi. Susunan mineralnya terdiri dari kuarsa, plagioklas, piroksen serta opak mineral, yang pada beberapa tempat mengandung urat-urat kuarsa dan oksida besi (Limonit).

c) Batuan granit Bone (Tmgb)

Batuan granit Bone ini menyebar di bagian Utara dan Barat Laut pada satuan morfologi sedang hingga tinggi. Batuan yang tersingkap baik, relatif segar dan pada bagian permukaan telah mengalami pelapukan, berkomposisi kuarsa, orthoklas, plagioklas, biotit serta mineral-mineral opak lainnya. Batuan granit ini berwarna abu-abu terang berbintik-bintik hitam, kompak, porfir (kasar), posisinya selaras di atas satuan batuan lava andesit-dasitan (Tmbu) dengan kontak soil dan lapukan batuan di antara keduanya dan diperkirakan berumur Miosen Atas.

d) Batuan diorite Bone (Tmdb)

Satuan batuan diorit Bone ini tersingkap di bagian Utara dan Timur Laut daerah penelitian pada satuan morfologi sedang hingga tinggi (SVML). Umumnya, singkapan batuan ini kompak dan segar yang merupakan batuan plutonik dengan penyebaran sekitar 30% daerah. Batuan ini bersifat asam, dilihat dari komposisi silika dan pada bagian permukaan mulai lapuk, berwarna putih ke abu-abuan hingga hitam serta berbintik-bintik hitam, berkomposisi kuarsa, orthoklas, plagioklas, biotit dan mineral gelap lainnya. Kedudukannya berada di atas satuan lava andesit-dasitan Bilungala (Tmbu) yang diperkirakan berumur Miosen Atas.

e) Aliran lava Andesit Pinogoe Tua (Tqpu₁)

Aliran lava andesit piroksen G. Pinogoe tua ini penyebarannya berada di bagian Selatan dan Tenggara pada satuan morfologi landai hingga tinggi. Singkapannya relatif segar berupa aliran lava berkomposisi andesitik-piroksen. Lava andesit ini berwarna abu-abu gelap - kehitaman, vesikular - padu, afanitik, kompak. Susunan mineralnya terdiri dari plagioklas, piroksen dan mengandung gelas vulkanik serta mineral opak. Batuan ini posisinya tak selaras berada di atas satuan batuan lava Bilungala (Tmbu). Aliran lava ini diduga merupakan hasil erupsi awal G. Pinogoe yang berupa lava andesit, tersingkap baik, kondisi segar dengan membentuk punggung yang melandai ke arah sungai Bone. Dan umur dari aliran ini diperkirakan Tersier Atas (Pliosen).

f) Aliran piroklastik G. Pinogoe (Tqpu₂)

Aliran piroklastik mempunyai pusat erupsi yang diduga kuat berasal dari G. Pinogoe (di Selatan) yang tersingkap ke daerah bagian tengah hingga di seberang sungai Bone yang berupa aliran piroklastik (*ash flow*) dan terletak pada satuan morfologi landai sampai di pinggir sungai Bone. Satuan aliran piroklastik ini berukuran abu (*ash flow*) - agak kasar sampai ukuran pasir dengan komposisi gelas vulkanik, berlokasi di bagian timur, bersifat menengah-asam (andesitik-dasitik), berwarna putih keabu-abuan-terang, retas, segar, massif. Semakin ke arah tengah penyebaran aliran piroklastik ini bertekstur breksi yang terkonsolidasi dengan baik, mengandung fragmen lava andesitik - andesit piroksen, menyudut tanggung berukuran halus – kasar (antara 0.1 - 30 cm). Matriksnya terdiri dari tufa-abu pasir yang berwarna abu-abu terang (bersifat getas), dan berporositas baik. Kedudukan satuan aliran piroklastik Pinogoe (Tqpu₂) ini relatif muda,

berada selaras di atas satuan aliran lava Pinogoe tua (T_{qpu_1}) dengan umurnya diperkirakan Tersier Akhir.

e) Aliran lava G. Pinogoe Muda (T_{qpu_3})

Aliran lava andesit - piroksen ini umumnya masih segar dengan pusat erupsinya diduga berasal dari G. Pinogoe - Balangga. Penyebaran satuan ini berada di bagian tengah Selatan pada satuan morfologi bergelombang rendah sampai sedang. Satuan lava ini berwarna abu-abu gelap, vesikuler-masif, afanitik, kompak, keras, berkomposisi andesit-piroksen dengan mineral utama terdiri dari kuarsa, plagioklas, piroksen, hornblende dan gelas vulkanik serta opak. Satuan ini kedudukannya selaras berada di atas aliran piroklastik Pinogoe hasil aktifitas terakhir. Umur batuan diperkirakan Kuartar Bawah (Pleistosen), relatif lebih muda apabila dibandingkan terhadap aliran piroklastik dan aliran lava Pinogoe awal dengan kontak selaras.

f) Endapan permukaan (Qal)

Endapan ini terbentuk oleh batuan aluvium yang terdiri dari pasir, kerikil, kerakal dan bolder-bolder yang merupakan hasil erosi, banjir bandang dan longoran. Endapan permukaan ini berada pada satuan morfologi dataran rendah (SDR) yang meluas ke arah bagian Barat. Di bawah satuan aluvium ini diduga ada satuan endapan danau Limboto yang tidak tersingkap dan kemungkinan menjemari (*interfingering*) dengan satuan aluvium (Dutro, 1989).

Adapun susunan stratigrafi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**.

KORELASI SATUAN BATUAN

UMUR	KALA	BATUAN TEROBOSAN	BATUAN GUNUNG API	BATUAN GAMPING	BATUAN SEDIMEN ENDAPAN PERMUKAAN	
KUARTER	HOLOSEN				Qal	
	PLEISTOSEN		Tqpu3			
TERSIER	PLIOSEN		Tqpu2			
			Tqpu1			
	MIOSEN	ATAS	Tmgb Tmdb			
		TENGAH		Tmbv		Tmtl
BAWAH						

Gambar 3. Susunan stratigrafi daerah panas bumi Suwawa

Keterangan :

Qal	= Aluvial
Tqpu3	= Lava andesit Pinogo Muda
Tqpu2	= Aliran Piroklastik Pinogo
Tqpu1	= Lava andesit Pinogo Tua
Tmdb	= Diorit Bone
Tmgb	= Granit Bone
Tmbv	= Lava andesit dasitan Bilungala
Tmtl	= Batu gamping Tadaka

2.3. Sruktur Geologi

Pola struktur geologi di daerah panas bumi Suwawa dicerminkan oleh bentuk-bentuk volcanic trend, fault trap, zona depresi, kelurusan, paset segi tiga, dinding/

tebing patahan (gawir sesar), kekar gerus, *offset* batuan dan topografi, kelurusan sungai, bukit dan topografi, zona hancuran batuan, *slicken side*, dan adanya manifestasi panas bumi yang berupa batuan alterasi bertipe argilik (montmorilonit - kaolinit) dan munculnya kelompok-kelompok mata air panas, yang merupakan jejak sesar yang berkembang.

Berdasarkan data-data dan bukti yang terdapat di lapangan, ada sekitar 8 buah sesar utama yang merupakan struktur kontrol geologi panas bumi yang berkembang di beberapa tempat akibat dari proses tektonik. Berdasarkan periode pembentukan sesar, sebagai kontrol geologi dan pemunculan manifestasi panas bumi, struktur-struktur tersebut diuraikan menjadi 10 struktur yaitu sebagai berikut.

a. Sesar Lombongo, sesar ini mengarah dari barat laut - tenggara sampai barat-timur dan merupakan zona lemah yang membentuk pola sebaran batuan plutonik tersier. Sesar ini juga merupakan sesar tertua yang dicirikan dengan tersingkapnya batuan plutonik tersier.

b. Sesar Gorontalo, sesar ini mengarah dari barat laut - tenggara (N330°E), membentuk *fault trap* tempat terakumulasinya endapan danau yang tersingkap pada bagian barat. *Fault trap* yang dihasilkan oleh sesar ini membentuk zona depresi yang mengarah dari barat-timur sebagai proses mengikuti berkembangnya sesar Gorontalo ini. Salah satu sesar yang terbentuk akibat zona depresi ini adalah sesar Libungo yang membatasi munculnya air panas Libungo. Sesar ini sangat berperan sebagai pengontrol adanya manifestasi panas bumi Libungo serta kondisi geologi sebagai hasil dari aktivitas G. Pinogoe yang berumur Kuartar bawah.

c. **Sesar Libungo**, sesar ini mengarah dari barat–timur yaitu searah aliran sungai Bone dan merupakan bidang graben bagian selatan dengan blok selatan sebagai blok yang relatif naik. Di lapangan, sesar ini tidak muncul ke permukaan akibat tertimbun oleh endapan yang lebih muda, akan tetapi dari bentuk aliran sungai yang berubah-ubah mencirikan keberadaan sebuah struktur sesar.

d. **Sesar Normal Pangi**, sesar ini mengarah dari timur-barat dimana blok bagian selatan relatif naik terhadap blok bagian utara yang dicirikan oleh perbedaan topografi dan pembelokan sungai. Sesar ini terbentuk pada periode ke 2 dan diperkirakan sebagai sesar normal.

e. **Sesar Duano**, sesar ini diperkirakan terbentuk pada periode ke 3 dan merupakan sesar normal yang mengarah dari barat laut-tenggara ($N330^{\circ}E$) dimana blok bagian timur relatif turun terhadap blok bagian barat. Indikasi yang terlihat pada lapangan adalah gawir patahan, kekar gerus, pemunculan batu gamping kristalin, dan bentuk topografi yang menyolok serta zona rekahan yang menyebabkan munculnya mata air dingin yang terdapat di sepanjang sesar di lokasi ini. Di samping adanya sesar primer yang terbentuk pada daerah ini, sesar sekunder juga banyak terbentuk pada daerah ini yang secara umum arahnya agak berlawanan dan adapula yang hampir sejajar dengan sesar Duano.

f. **Sesar Lombongoo Periode Lanjut**, merupakan sesar utama yang terletak pada bagian timur atau sebelah utara sungai Bone yang pada periode awal merupakan zona lemah munculnya batuan plutonik. Indikasi yang terlihat pada lapangan adalah adanya pola kekar gerus, *slicken side*, dan gawir.

g. Sesar Batunobatuo, yang merupakan sesar normal dan terdapat di bagian selatan daerah penelitian dengan arah N330°E. Indikasi yang terlihat pada lapangan adalah adanya kekar gerus pada singkapan batuan, disamping adanya gejala penorehan bukit dan pengekar.

h. Sesar Biluango, sesar ini diperkirakan sesar mendatar ke kiri yang memotong batuan vulkanik tua dengan arah barat laut-tenggara (N345°E) yang terdapat di bagian barat daya daerah penelitian. Pemunculan di lapangan diindikasikan dengan adanya gawir dan kekar gerus. Indikasi lainnya adalah *triangular facet* dan zona rekahan.

i. Sesar Tapadaa, sesar ini mengarah dari hampir utara-selatan, dimana blok bagian barat relatif naik terhadap blok bagian timur. Sesar ini dicirikan dengan banyaknya gawir patahan, kekar gerus, *slicken side*, bentuk topografi dan mineralisasi dan breksiasi pada batuan tua dengan diorit.

2.4. Manifestasi Panas Bumi

2.4.1. Batuan ubahan

Beberapa lokasi batuan ubahan ditemukan di sekitar Desa Tapadaa yang tersusun oleh mineral argilik, propilitik dan kaolinit.

2.4.2. Mata air panas

Hasil penyelidikan menunjukkan beberapa manifestasi panas bumi yang berupa mata air panas di beberapa lokasi yang termasuk ke dalam wilayah Kecamatan Suwawa (meliputi Desa Libungo, Duano, Lombongo dan Lumbaya bulan), Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo yaitu:

a. Mata air panas Libungo-1, manifestasi ini berada di Dusun Air Panas, Desa Libungo yang berada di dalam zona Graben Limboto. Secara geografis, mata air panas tersebut terletak pada posisi $113^{\circ}35'40''$ Bujur Timur dan $07^{\circ}55'14''$ Lintang Selatan atau koordinat UTM ($x = 516102$, $y = 57425$) ditemukan pada ketinggian 44 m diatas permukaan laut (dpl). Pemunculan mata air panas ini berada pada dinding/tebing dengan temperatur air panas terukur di lapangan sekitar $82,6^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur udara setempat $30,0^{\circ}\text{C}$, pH terukur di lapangan 7,80 dengan debit sekitar 1,20 liter/detik dan tercium bau belerang (H_2S) yang menyengat pada pagi hari. Mata air panas ini muncul melalui rekahan-rekahan yang ada pada batuan vulkanik. Kondisi fisik dari air panas ini adalah jernih, tidak berbau, tidak berasa, dijumpai endapan oksida besi warna kuning kecoklatan dan sinter serta endapan garam yang berwarna keputih-putihan. Manifestasi panas bumi Libungo ini diduga berhubungan dengan struktur tua Libungo yang bersumber dari panas magma sisa aktivitas terakhir dari kerucut Pinogoe.

b. Mata air panas Libungo-2, mata air panas ini berada di Dusun Air Panas dan berdekatan dengan mata air panas Libungo-1. Secara geografis, mata air panas tersebut terletak pada posisi $113^{\circ}35'40''$ Bujur Timur dan $07^{\circ}55'14''$ Lintang Selatan atau koordinat UTM ($x = 5175520$, $y = 57988$), yang ditemukan pada ketinggian 30 m dpl. Temperatur air panas yang terukur di lapangan sekitar $81,0^{\circ}\text{C}$ pada temperatur udara setempat yaitu $32,0^{\circ}\text{C}$, pH terukur di lapangan 7,80 dengan debit sekitar 4,50 liter/detik. Mata air panas ini muncul melalui rekahan batuan vulkanik dan menyebar dengan luas lebih kurang dari $30 \times 20 \text{ m}^2$. Kondisi fisik dari air panas ini adalah jernih, tidak berbau, tidak berasa dan endapan

oksida besi warna kecoklatan muncul di sepanjang aliran mata air panas serta dijumpai adanya sinter dan endapan garam warna keputih-putihan.

c. Mata air panas Lombongo-1, secara geografis mata air panas ini terletak di Dusun Lombongo, Desa Lombongo pada posisi $113^{\circ}35'40''$ Bujur Timur dan $07^{\circ}55'14''$ Lintang Selatan atau koordinat UTM ($x= 520184$, $y=60711$) yang ditemukan pada ketinggian 81 m dpl. Mata air panas ini muncul di dinding sungai Lombongo dengan temperatur air panas terukur di lapangan sekitar 48.7°C pada temperatur udara setempat 28.0°C dengan pH terukur di lapangan 7.70 dan debit sekitar 6.20 liter/detik. Mata air panas ini muncul melalui rekahan-rekahan yang ada pada batuan vulkanik dan ditampung dalam bak penampungan oleh pemerintah daerah setempat untuk dialirkan ke kolam rekreasi pemandian air panas. Kondisi fisik dari air panas ini adalah jernih, tidak berbau, tidak berasa dan dijumpai sedikit endapan oksida besi warna kuning kecoklatan. Pemunculan manifestasi panas bumi ini diperkirakan dikontrol oleh sesar Lombongo yang berarah Barat Laut– Tenggara.

d. Mata air panas Lombongo-2, mata air panas ini berada dekat dengan mata air panas Lombongo-1 yang secara geografis terletak pada posisi $113^{\circ}35' 40''$ Bujur Timur dan $07^{\circ}55'14''$ Lintang Selatan atau koordinat UTM ($x= 5519842$, $y= 60578$) pada ketinggian 85.00 m dpl. Temperatur air panas yang terukur di lapangan sekitar 41.4°C pada temperatur udara setempat 27°C , dengan $\text{pH} = 7.8$ (terukur di lapangan) dan debit sekitar 2.40 liter/detik. Mata air panas ini muncul melalui rekahan batuan vulkanik dan mengalir masuk ke sungai Lombongo.

Kondisi fisik dari air panas ini adalah jernih, tidak berbau, tidak berasa dan endapan oksida besi berwarna kuning kecoklatan (Hochstein,1982).

2.5. Hidrogeologi dan Model Panas Bumi

2.5.1. Hidrologi

Daerah penelitian panas bumi Suwawa termasuk daerah subur karena masa turun hujan mulai dari bulan Oktober sampai bulan Juni setiap tahun dengan tingkat curah hujan di atas 1500 mm per tahun. Daerah resapan air hujan terdapat di sekitar perbukitan bergelombang lemah sampai kuat yang menghuni kurang lebih 65% areal. Hal ini menyebabkan cadangan air permukaan dan bawah tanah yang tersedia cukup banyak. Sebagian air terjebak pada lapisan dangkal yang merembas dan kemudian mengalir sepanjang sungai Bone hulu, Bolango, Lombongo, Tapadaa, dan Wulo yang seluruhnya bermuara ke sungai besar Bone. Sebagian lagi dari air hujan itu terus meresap ke bawah melalui zona lemah yang ada sehingga sampai pada lapisan yang dalam, air tersebut kemudian bertemu dengan fluida yang berasal dari magma dan akhirnya membentuk suatu sistem panas bumi. Akhirnya air panas ini terjebak dalam suatu lapisan batuan yang mempunyai kesarangan cukup besar dan menjadi reservoir panas bumi.

2.6. Sistem Panas Bumi

Energi panas bumi merupakan energi yang tersimpan dalam bentuk air panas atau uap pada kondisi geologi tertentu pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Daerah panas bumi (*geothermal area*) atau medan panas bumi

(*geothermal field*) adalah daerah di permukaan bumi dalam batas tertentu dimana terdapat energi panas bumi dalam suatu kondisi hidrologi batuan tertentu.

Sedangkan sistem panas bumi adalah terminologi yang digunakan untuk berbagai hal tentang sistem air dan batuan dalam temperatur tinggi di laboratorium atau lapangan (Santoso, 2004). Komponen utama pembentuk suatu sistem panas bumi (Suharno, 2011) adalah:

1. Sumber panas (*heat source*)

Gunung api merupakan sumber panas potensial dari suatu sistem panas bumi, sehingga daerah yang berada di jalur gunung api akan berpotensi besar memiliki sistem panas bumi temperatur tinggi. Itulah sebabnya Indonesia yang terletak pada jalur cincin api (*ring of fire*) diklaim memiliki potensi panas bumi atau *geothermal* terbesar di dunia.

2. Batuan reservoir (*permeable rock*)

Reservoir panas bumi adalah formasi batuan dibawah permukaan yang mampu menyimpan dan mengalirkan *fluida thermal* (uap dan atau air panas). Reservoir lazimnya merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik. Porositas berfungsi menyimpan fluida termal sedangkan permeabilitas berperan dalam mengalirkan fluida termal. Harus diketahui disini bahwa permeabilitas setiap batuan berbeda-beda.

3. Batuan penudung (*cap rock*)

Lapisan batuan di bagian atas dari reservoir dinamakan batuan penudung (*cap rock*) yang bersifat impermeabel atau teramat sulit ditembus oleh fluida. Lapisan penudung ini biasanya berupa batuan lempung karena batuan lempung ini mampu mengikat air, tetapi sulit untuk meloloskannya (*swelling*).

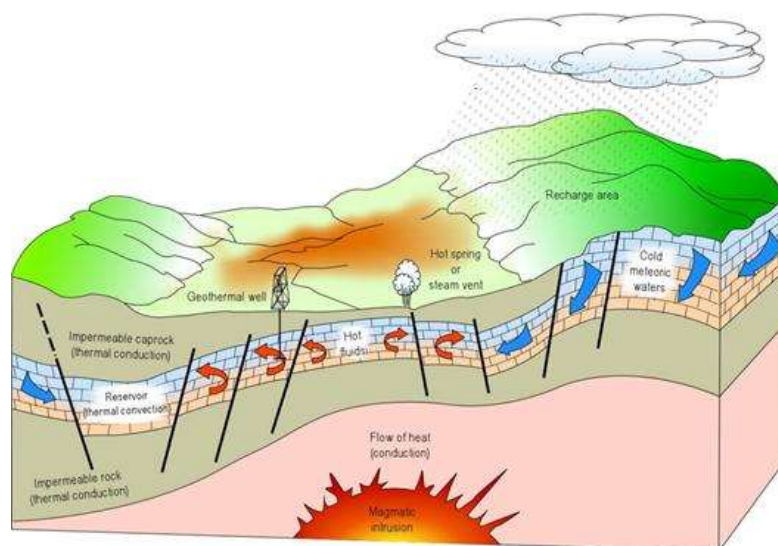
4. Struktur Geologi

Struktur geologi bawah permukaan bumi merupakan salah satu komponen utama suatu sistem panas bumi, seperti adanya patahan dan sesar yang merupakan tempat munculnya manifestasi panas bumi.

5. Manifestasi air panas

Manifestasi yang nampak di permukaan berupa mata air panas.

Skema suatu sistem panas bumi yang ideal dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Skema sebuah sistem *geothermal* yang ideal (Dickson, 2004).

Sistem panas bumi daerah Suwawa dibagi menjadi tiga sistem dilihat dari tipe fluida, pemunculan manifestasi, kontrol struktur, dan perkiraan sumber panas. Sistem panas bumi yang pertama pada daerah manifestasi Lombongo adalah kelompok Lombongo. Sistem panas bumi yang kedua berada di daerah mata air panas Pangi yang disebut kelompok Pangi. Sistem panas bumi yang ketiga adalah sistem panas bumi kelompok Libungo yang terdapat di sekitar mata air panas Libungo.

2.6.1. Sumber panas

Sumber panas untuk kelompok Libungo diperkirakan berasal dari magma sisa panas yang berada di bawah tubuh vulkanik muda Pinogoe muda yang merambat ke atas melalui zona struktur yang menyebar di sekitar mata air panas Libungo dan sungai Bone. Sumber panas dari kelompok panas bumi Lombongo diperkirakan berasal dari tubuh plutonik muda yang tidak muncul di permukaan pada kedalaman yang terdapat di sekitar mata air panas Lombongo. Hal ini dibuktikan dengan kandungan fluida sulfat, serta dijumpainya beberapa lokasi batuan ubahan hidrotermal. Tetapi kemungkinan sistem panas bumi Lombongo ini hanya merupakan fosil dari aktivitas gunung api di jaman Tersier yang sudah padam. Adapun kelompok panas bumi Pangi diduga masih berhubungan erat dengan pembentukan sistem panas bumi Hungoyono yang berada ke arah timur.

2.6.2. Reservoir

Reservoir panas bumi yang dibahas di sini hanyalah yang menjadi bagian dari sistem panas bumi Libungo, karena untuk sistem panas bumi Lombongo dan Pangi diduga merupakan sisa panas. Batuan wadah tempat berakumulasinya fluida panas bumi (reservoir), diperkirakan berupa rekah-rekah pada tubuh vulkanik Pinogoe tua dan formasi Tinombo yang memiliki permeabilitas tinggi. Batuan wadah ini diperkirakan memiliki *top reservoir* pada kedalaman ± 600 meter di bawah pemunculan manifestasi Libungo ke arah selatan-tenggara.

2.6.3. Lapisan batu penudung

Batuan vulkanik kuartar maupun tersier diperkirakan sebagai batuan penudung bagian atas. Di bawah lapisan ini diperkirakan terdapat *claycap* sebagai hasil

ubahan dari hidrothermal pada daerah Libungo yang membentuk batuan berukuran lempung dengan sifat permeabilitas dan porositas kecil, (Lawless, 1995).

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gaya Berat

Gaya berat adalah salah satu metode dalam geofisika yang dipilih dalam penelitian ini karena aplikasi metode ini adalah studi geologi regional bawah permukaan sehingga dapat menggambarkan struktur geologi bawah permukaan yang lebih baik dibandingkan metode geofisika lainnya. Prinsip metode ini berdasarkan anomali gaya berat yang muncul karena adanya variasi rapat massa batuan yang menggambarkan adanya struktur geologi di bawah permukaan bumi.

Adanya variasi rapat massa batuan di suatu tempat dengan tempat lain, akan menimbulkan medan gaya gravitasi yang tidak merata dan perbedaan inilah yang terukur di permukaan bumi. Perbedaan medan gaya berat yang relatif kecil inilah maka digunakan alat ukur yang mempunyai ketelitian yang cukup tinggi. Alat ukur yang sering digunakan adalah Gravimeter.

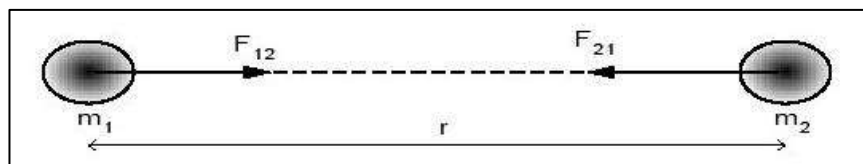
Di setiap tempat di permukaan bumi, nilai percepatan gravitasi bumi dipengaruhi oleh 5 faktor seperti lintang, ketinggian, topografi di setiap titik pengukuran, interaksi bumi dengan matahari dan bulan (pasang-surut), serta perbedaan (variasi) rapat massa batuan di bawah permukaan bumi. Perbedaan (variasi) rapat massa batuan di bawah permukaan bumi merupakan satu-satunya faktor yang

signifikan dalam eksplorasi gaya berat dan pada umumnya memiliki yang sangat kecil dibandingkan kombinasi keempat faktor lainnya. Dasar teori yang digunakan dalam metode gaya berat ini adalah Hukum Newton tentang gravitasi bumi.

3.2. Konsep Dasar Gaya Berat

3.2.1. Gaya gravitasi

Teori yang paling mendasar dalam metode gaya berat adalah hukum Newton tentang gaya tarik menarik antara benda dengan masa tertentu yang dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Gaya tarik menarik antara dua benda (Rosid, 2005)

Kedua benda tertentu yang dipisahkan oleh jarak tertentu akan memiliki gaya tarik menarik yang besarnya dinyatakan oleh persamaan berikut (Grandis,2009):

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

dimana :

$\vec{F}(r)$: gaya tarik menarik (N)

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

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

R : jarak antara dua buah benda (m)

\hat{r} : vector satuan (m)

3.2.2. Percepatan gravitasi

Newton juga mendefinisikan hubungan antara gaya dan percepatan. Hukum II Newton tentang gerak menyatakan gaya sebanding dengan perkalian massa benda dengan percepatan yang dialami benda tersebut.

$$F = ma \quad (2)$$

Dimana a adalah percepatan yang indentik dengan percepatan gravitasi g , sehingga **persamaan (1)** dapat ditulis :

$$\vec{F}(r) = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \hat{R} = m_2 g(r) \quad (3)$$

Besarnya medan gayaberat di titik m_2 akibat massa titik m_1 yang berjarak r adalah:

$$g(r) = G \frac{m_1}{R^2} \hat{r} \quad (4)$$

Terlihat bahwa besarnya gayaberat g berbanding lurus dengan massa m , yaitu perkalian antara densitas ρ dengan volume benda, sehingga besarnya gaya berat terukur merupakan pencerminan dari densitas dan volume massa tersebut.

Dalam kenyataannya, bentuk bumi tidak bulat, tetapi berbentuk elipsoid (agak gepat pada kutubnya). Dengan demikian, variasi gaya berat di setiap titik permukaan bumi dipengaruhi oleh 4 faktor, yaitu:

1. Lintang
2. Topografi
3. Pasang surut
4. Variasi rapat massa bawah permukaan

3.2.3. Potensial gaya berat distribusi massa

Potensial gaya berat adalah energi yang diperlukan untuk memindahkan suatu massa dari suatu titik ke titik tertentu. Suatu benda dengan massa tertentu dalam sistem ruang akan menimbulkan medan potensial di sekitarnya. Dimana medan potensial bersifat konservatif, artinya usaha yang dilakukan dalam suatu medan gravitasi tidak tergantung pada lintasan yang ditempuhnya tetapi hanya tergantung pada posisi awal dan akhir (Rosid, 2005).

Gaya berat merupakan sebuah vektor yang arahnya sepanjang garis yang menghubungkan pusat dari dua buah massa. Gaya ini menimbulkan suatu medan yang konservatif yang dapat diturunkan dari suatu potensial skalar dengan hubungan sebagai berikut.

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

Persamaan diatas mengikuti konvensi oleh Kellog tahun 1953, yang menyatakan potensial gaya berat ialah usaha yang dilakukan oleh medan gaya berat pada partikel uji dan negatif dari energi potensial partikel. Beberapa buku menetapkan potensial gaya berat sebagai usaha yang dilakukan partikel uji, sehingga dalam persamaan (5) ditulis:

$$\mathbf{g} = -\nabla U(\vec{r}) \quad (6)$$

Fungsi U pada persamaan di atas disebut potensial gravitasi, sedangkan percepatan gaya berat g merupakan medan potensial. Tanda minus menandakan bahwa arah gaya berat menuju ke titik yang dituju.

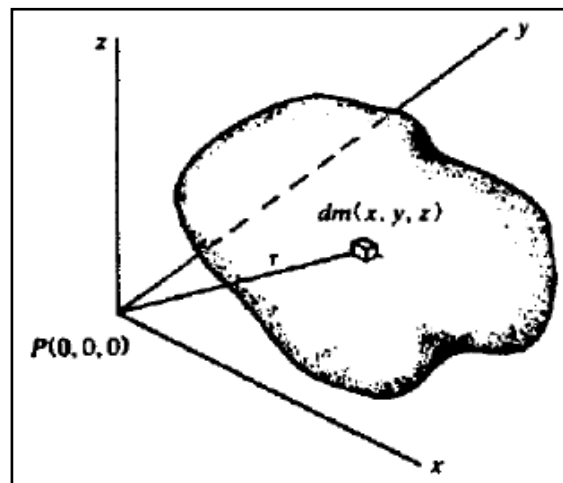
Dengan mengasumsikan bumi dengan massa M bersifat homogen dan berbentuk bola dengan jari-jari R , potensial gravitasi di permukaan dapat didefinisikan dengan persamaan:

$$\nabla U(\vec{r}) = -\frac{F(\vec{r})}{m_2} = -\mathbf{g}(\vec{r}) \quad (7)$$

$$U(\vec{r}) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot d\mathbf{r} = -\int_{\infty}^r \mathbf{g} \cdot d\mathbf{r} \quad (8)$$

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (9)$$

Potensial total gaya berat bersifat penjumlahan sedangkan potensial gaya berat distribusi massa yang kontinu atau benda yang berdimensi yaitu dalam ruang bervolume V dengan rapat massa dengan rapat massa yang konstan ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Potensial massa tiga dimensi (Telford dkk.,1990)

Berdasarkan Persamaan (9), potensial yang disebabkan oleh elemen massa dm pada titik (x, y, z) dengan jarak r dari $P(0, 0, 0)$ adalah:

$$dU = G \frac{dm}{r} = G\rho \frac{dxdydz}{r} \quad (10)$$

dimana:

$\rho(x,y,z)$ adalah densitas

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Potensial total dari massa adalah:

$$U = G \int_x \int_y \int_z \frac{\rho}{r} dxdydz \quad (11)$$

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

$$g = -\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right) = G\rho \int_x \int_y \int_z \frac{z}{r^3} dxdydz \quad (12)$$

3.2.4. Satuan gaya berat

Satuan gaya berat g yang menyatakan percepatan gravitasi dalam sistem MKS adalah m/s^2 dan dalam sistem CGS adalah cm/s^2 . Pengukuran percepatan gravitasi pertama kali dilakukan oleh *Galileo*.

Untuk menghormati *Galileo*, kemudian didefinisikan :

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

Satuan anomali gaya berat dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligall ($mGall$):

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

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

Dalam satuan MKS, gravitasi diukur dalam g.u. (*gravity unit*) atau $\mu\text{m/s}^2$ (Octonovrilna, 2009):

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

3.2.5. Pengukuran Gaya Berat

a. Pengukuran absolut

Pengukuran absolut biasanya dilakukan di laboratorium-laboratorium. Pengukuran ini jarang sekali dilakukan karena banyak kendala-kendala yang sangat mempengaruhi hasil pengukuran dan juga melibatkan banyak faktor maupun alat. Cara mengukur menggunakan pengukuran absolut : pendulum, jatuh bebas, gravimeter.

b. Pengukuran relatif

Pada penelitian gaya berat, pengukuran relatif merupakan pengukuran yang lebih umum dan mudah dilakukan. Pengukuran ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran titik yang tidak diketahui nilai gaya beratnya dengan titik yang sudah diketahui yang telah diikat pada titik-titik referensi (Postdam, IGSN dsb).

3.3. Koreksi-Koreksi Pada Metode Gaya Berat

Dalam memproses data metode gaya berat, terdapat beberapa koreksi-koreksi yang harus dilakukan untuk mereduksi noise-noise yang ditimbulkan. Adapun koreksi-koreksi tersebut antara lain sebagai berikut.

3.3.1. Koreksi apungan (*drift correction*)

Koreksi ini dilakukan akibat adanya perbedaan pembacaan nilai gaya berat di stasiun yang sama pada waktu yang berbeda karena adanya guncangan pegas alat gravimeter selama proses transportasi dari suatu stasiun ke stasiun lainnya.

$$D_n = \frac{gst(n) - gst(1)}{T_N - T_1} (T_n - T_1) \quad (13)$$

dimana :

D_n = *drift* pada stasiun ke - n

$gst(n)$ = gravitasi terkoreksi tidal pada stasiun ke - n

$gst(1)$ = gravitasi terkoreksi tidal pada stasiun ke - 1

T_N = waktu pengukuran stasiun akhir loop

T_1 = waktu pengukuran stasiun awal

T_n = waktu pengukuran stasiun ke - n

3.3.2. Koreksi bacaan alat

Koreksi bacaan alat adalah koreksi yang dilakukan apabila terjadi kesalahan dalam pembacaan alat gaya berat yang digunakan. Rumus umum dalam pembacaan alat dapat ditulis:

$$\text{Read (mGal)} = ((\text{Read (scale)-Interval}) \times \text{Counter Reading}) + \text{Value in mGal}$$

3.3.3. Koreksi pasang surut (*tide correction*)

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan pengaruh gravitasi benda-benda di luar bumi seperti bulan dan matahari yang berubah terhadap lintang dan waktu. Untuk mendapatkan nilai pasang surut ini maka dilihatlah perbedaan nilai

gravitasi stasiun dari waktu ke waktu terhadap base. Gravitasi terkoreksi tidal dapat ditulis:

$$g_{st} = g_s \pm t \quad (14)$$

Dimana :

g_{st} = gravitasi terkoreksi pasang surut (tidal)

g_s = gravitasi pada pembacaan alat

t = nilai koreksi pasang surut (tidal)

3.3.4. Koreksi lintang (G.normal)

Koreksi ini dilakukan karena bentuk bumi yang tidak sepenuhnya bulat sempurna, tetapi pepat pada daerah ekuator dan juga karena rotasi bumi. Hal tersebut membuat adanya perbedaan nilai gravitasi karena pengaruh lintang yang ada di bumi. Secara umum gravitasi terkoreksi lintang dapat ditulis:

$$g(\theta) = 978031,846 (1 + 0,0053024 \sin^2 \theta + 0,0000058 \sin^2 2\theta) \quad (15)$$

3.3.5. Koreksi udara bebas (*free air correction*)

Koreksi ini dilakukan untuk mengkompensasi ketinggian antara titik pengamatan dan datum (*mean sea level*). Koreksi ini dapat ditulis:

$$FAC = -0,3086 \times h \quad (16)$$

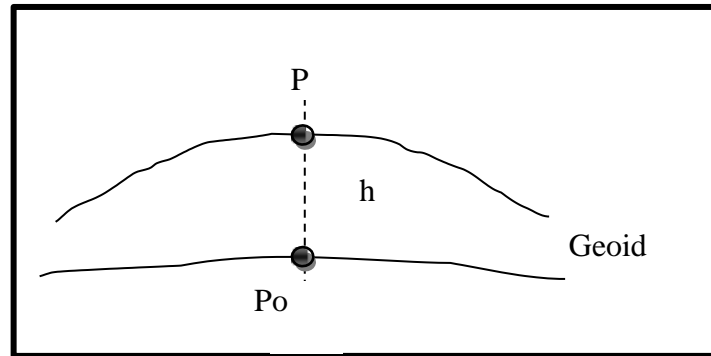
dimana :

FAC = koreksi udara bebas

h = ketinggian permukaan dari datum (msl) satuan meter

Titik amat P pada ketinggian h terhadap permukaan acuan dapat dilihat pada

Gambar 7.



Gambar 7. Titik amat P pada ketinggian h terhadap permukaan acuan (Sutopo,2008)

3.3.6. Koreksi *Bougeur*

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan pengaruh adanya massa dari datum sampai ketinggian titik pengukuran. Koreksi ini dapat ditulis dengan rumus :

$$BC = 0,04193 \times \rho \times h \quad (17)$$

dimana :

BC = koreksi *Bougeur*

ρ = densitas batuan (gr/cc)

h = ketinggian dari atas permukaan laut (meter)

3.3.7. Koreksi medan (*terrain correction*)

Koreksi medan mengakomodir ketidakaturan pada topografi sekitar titik pengukuran. Pada saat pengukuran, elevasi topografi di sekitar titik pengukuran, biasanya dalam radius dalam dan luar diukur elevasinya. Sehingga koreksi ini (Telford dkk.,1990) dapat ditulis :

$$TC = G\rho\theta[(r^2 - r^1) + \sqrt{r_1^2 + H^2} - \sqrt{r_2^2 + H^2}] \quad (18)$$

dimana :

TC = gravitasi terkoreksi medan

G = konstanta gaya berat umum

ρ = densitas batuan

\emptyset = sudut sektor (radian)

r_1 = jari-jari radius dalam

r_2 = jari-jari radius luar

H = beda tinggi titik amat dengan tinggi rata-rata sektor

3.4. Anomali *Bouguer*

Anomali *Bouguer* (dinamai oleh Pierre Bouguer) pada metode gaya berat disebabkan oleh benda anomali baik yang berada dekat dengan permukaan maupun yang jauh dari permukaan bumi. Karena tujuan eksplorasi geofisika pada umumnya untuk mempelajari struktur yang dekat permukaan (cekungan hidrokarbon, reservoir panas bumi, sumber daya alam, struktur geologi), maka berbagai usaha telah dilakukan untuk memisahkan efek residual dari efek regional.

Anomali *Bouguer* merupakan selisih antara harga gravitasi pengamatan (g_{obs}) dengan harga gravitasi teoritis (g_n) yang didefinisikan pada titik pengamatan bukan pada bidang referensi, baik elipsoid maupun muka laut rata-rata. Selisih tersebut merefleksikan variasi rapat massa yang terdapat pada suatu daerah dengan daerah sekelilingnya ke arah lateral maupun ke arah vertikal.

Anomali *Bouguer* dapat bernilai positif ataupun negatif. Nilai anomali positif mengindikasikan adanya kontras densitas yang besar pada lapisan bawah permukaan biasanya ditemukan pada survey di dasar samudera. Anomali negatif

menggambarkan perbedaan densitas yang kecil dan pada umumnya didapat pada saat survei gaya berat di darat.

Setelah dilakukan koreksi terhadap data percepatan gaya berat hasil pengukuran maka akan diperoleh persamaan anomali percepatan gaya berat (Blakely, 1995), yaitu:

1. Anomali *Bouguer* Sederhana (ABS)

$$ABS = g_{ob} - g_n + 0.3086h - 0.04193\rho h \quad (19)$$

2. Anomali *Bouguer* Lengkap (ABL)

$$ABL = g_{ob} - g_n + 0.3086h - 0.04193\rho h + TC \quad (20)$$

3.5. Analisis Spektrum

Analisis spektrum dilakukan untuk mengestimasi lebar jendela (digunakan pada *moving average*) serta estimasi kedalaman anomali gaya berat. Analisis spektrum dilakukan dengan cara mentransformasi Fourier lintasan yang telah ditentukan pada peta kontur Anomali *Bouguer* Lengkap. Secara umum, suatu transformasi Fourier adalah menyusun kembali/mengurai suatu bentuk gelombang sembarang ke dalam gelombang sinus dengan frekuensi bervariasi dimana hasil penjumlahan gelombang-gelombang sinus tersebut adalah bentuk gelombang aslinya (Kadir, 2002). Untuk analisis lebih lanjut, gelombang-gelombang sinus tersebut didisplay sebagai fungsi dari frekuensinya. Secara otomatis, hubungan antara gelombang $s(t)$ yang akan diidentifikasi gelombang

sinusnya atau *input* dan $S(f)$ sebagai hasil *transformasi Fourier* diberikan oleh persamaan berikut :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (21)$$

dimana $j = \sqrt{-1}$

Pada metode gaya berat, spektrum diturunkan dari potensial gaya berat yang teramati pada suatu bidang horizontal dimana transformasi Fouriernya sebagai berikut (Blakely, 1996) :

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{R}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z^1)}}{|k|} \quad (22)$$

Dimana, U = potensial gaya berat

γ = konstanta gayaberat

μ = anomali rapat massa

r = jarak

sehingga persamaannya menjadi :

$$F(U) = 2\pi \gamma \mu \frac{e^{|k|(z_0-z^1)}}{|k|} \quad (23)$$

Berdasarkan persamaan 20, transformasi Fourier anomali gaya berat yang diamati pada bidang horizontal diberikan oleh:

$$\begin{aligned}
 F(g_z) &= \gamma \mu F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \\
 &= \gamma \mu \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right)
 \end{aligned}$$

$$F(g_z) = 2\pi \gamma \mu e^{|k|(z_0 - z^1)} \quad (24)$$

dimana, g_z = anomali gaya berat

z_0 = ketinggian titik amat

k = bilangan gelombang

z = kedalaman benda anomali

Jika distribusi rapat massa bersifat random dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gaya berat, maka $\mu = 1$, sehingga hasil *transformasi Fourier* anomali gaya berat menjadi :

$$A = C e^{|k|(z_0 - z^1)} \quad (25)$$

dimana, A = amplitudo

C = konstanta

Estimasi lebar jendela dilakukan untuk menentukan lebar jendela yang akan digunakan untuk memisahkan data regional dan residual. Untuk mendapatkan estimasi lebar jendela yang optimal dilakukan dengan cara menghitung logaritma spektrum amplitudo yang dihasilkan dari *transformasi Fourier* pada persamaan 14

sehingga memberikan hasil persamaan garis lurus. Komponen k berbanding lurus dengan spektrum amplitudo.

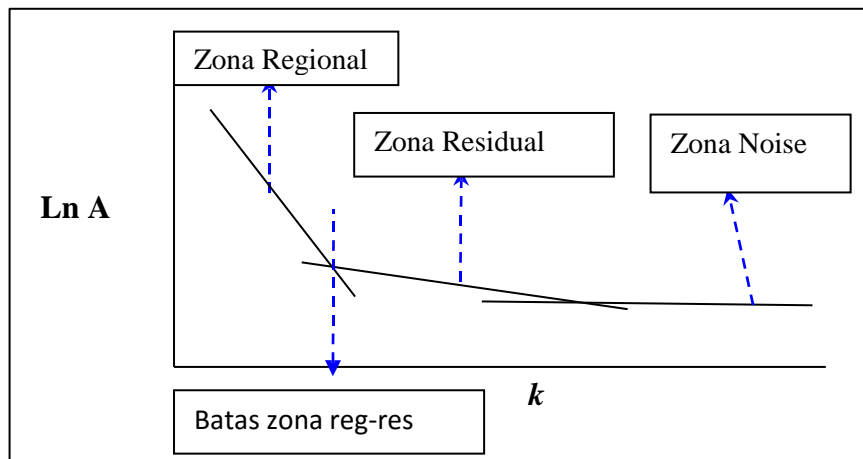
$$\ln A = (z_0 - z^1)|k| \quad (26)$$

Dari persamaan garis lurus di atas, melalui regresi linier diperoleh batas antara orde 1 (regional) dengan orde 2 (residual), sehingga nilai k pada batas tersebut digunakan sebagai batas penentu lebar jendela. Hubungan panjang gelombang λ dengan k diperoleh dari persamaan (Blakely, 1996) :

$$k = \frac{a\pi}{\lambda}$$

$$k = (N - 1)\Delta x \quad (27)$$

dimana, N = lebar jendela, maka didapatkan nilai estimasi lebar jendela.



Gambar 10. Kurva Ln A terhadap k (Blakely, 1996)

Untuk estimasi kedalaman didapatkan dari nilai gradien persamaan garis lurus dari masing-masing zona.

3.6 Pemisahan Anomali Regional dan Residual dengan metode *Moving Average* dan *Second Vertical Derivative* (SVD)

Anomali gaya berat yang terukur dipermukaan merupakan penjumlahan dari semua kemungkinan sumber anomali yang ada di bawah permukaan dimana salah satunya merupakan target 'event' dari eksplorasi. Sehingga untuk kepentingan interpretasi, target 'event' harus dipisahkan dari target lainnya. Jika target 'event' adalah anomali residual, maka target lainnya adalah anomali regional dan noise-nya. Secara sederhana, dari segi lebar anomali, noise akan memiliki lebar anomali lebih kecil dari target (residual), sedangkan regional lebih besar dari residual berdasarkan kedalaman, noise akan lebih dangkal dari residual, sedangkan regional lebih dalam.

Anomali regional berasosiasi dengan kondisi geologi umum yang dominan pada daerah penelitian, biasanya dicirikan oleh anomali berfrekuensi rendah. Anomali local/residual yang umumnya berfrekuensi tinggi mengandung informasi mengenai sumber anomali dangkal. Penelitian ini mengaplikasikan kontinuitas ke atas (*upward continuation*) dan filter panjang gelombang pada data geomagnetic sintetis (Effendi, 1976).

Untuk memisahkan anomali regional dan residual dari anomali bouguer lengkap, dilakukan beberapa metode yang akan dijelaskan yakni metode *moving average* dan metode *second vertical derivative*.

3.6.1. *Moving Average*

Penurunan dengan metode ini adalah secara tidak langsung karena keluaran dari *moving average* adalah regionalnya. Sehingga residual didapat dengan

mengurangkan regionalnya terhadap anomali hasil pengukurannya (data ini sebagai input dalam prosesnya). Jika dianalisa dari spektrum nya, karakter dari teknik *moving average* sama dengan '*low pass filter*', sehingga output dari proses ini adalah frekuensi rendah dari anomali *bouguer* yang memperlihatkan anomali regionalnya. Selanjutnya anomali residual dihasilkan dengan mengurangkan anomali regional terhadap anomali bouguernya.

Secara matematis persamaan *moving average* untuk 1 dimensi adalah sebagai berikut :

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n)+\dots+\Delta g(i)+\dots+\Delta g(i+n)}{N} \quad (28)$$

dimana, i = nomor stasiun

N = lebar jendela

Δg_{reg} = besarnya anomali regional

Setelah didapatkan ΔT_{reg} , maka harga $\Delta T_{residual}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Delta T_{residual} = \Delta T - \Delta T_{reg} \quad (29)$$

dimana, $\Delta T_{residual}$ = besarnya anomali residual

ΔT = besarnya anomali *bouguer*

ΔT_{reg} = besarnya anomali regional.

Persamaan tersebut merupakan dasar dari metode ini, dari persamaan tersebut akan dapat dihitung nilai anomali regional pada sebuah titik penelitian. Dimana nilai anomali regional pada sebuah titik penelitian, sangat tergantung pada nilai anomali yang terdapat di sekitar titik penelitian. Sehingga nilai anomali regional pada sebuah titik merupakan hasil rata-rata dari nilai anomali-anomali di sekitar daerah penelitian (Purnomo, 2013).

3.6.2. Metode *Second Vertical Derivative (SVD)*

Metode ini digunakan untuk memunculkan sumber-sumber anomali yang bersifat dangkal/lokal. Metode ini sangat bagus untuk mengetahui diskontinuitas dari suatu struktur bawah permukaan, khususnya adanya patahan pada suatu daerah survey. Secara teoritis metode ini diturunkan dari Persamaan Laplace untuk anomali gaya berat di permukaan yang persamaannya dapat ditulis :

$$\nabla^2 \cdot \Delta g = 0 \quad (30)$$

Atau :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2}$$

Sehingga *second vertical derivativenya* diberikan oleh :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2}\right) \quad (31)$$

Untuk data 1-D (data penampang) persamaannya diberikan oleh :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (32)$$

Persamaan SVD dan 1-D diatas menunjukkan bahwa *second vertical derivative* dari suatu anomali gaya berat permukaan adalah sama dengan negatif dan

derivatif orde dua horizon. Artinya bahwa anomali *second vertical derivative* dapat melalui derivatif horizontal yang secara praktis lebih mudah dikerjakan.

Beberapa filter *second vertical derivative* mempunyai respon amplitudo (Elkins, 1951) seperti contoh dibawah ini :

1. SVD tipe Henderson & Zietz (1949)

0.00	0.00	-0.0838	0.00	0.00
0.00	1.00	-2.6667	1.00	0.00
-0.0838	-2.6667	17.00	-2.6667	-0.0838
0.00	1.00	-2.6667	1.00	0.00
0.00	0.00	-0.0838	0.00	0.00

2. SVD tipe Elkins (1951)

0.00	-0.0833	0.00	-0.0833	0.00
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0.00	-0.0334	1.0668	-0.0334	0.00
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0.00	-0.0833	0.00	-0.0833	0.00

3. SVD tipe Rosenbach (1953)

0.00	-0.0416	0.00	-0.0416	0.00
-0.0416	-0.3332	-0.75	-0.3332	-0.0416
0.00	-0.75	4.00	-0.75	0.00
-0.0416	-0.3332	-0.75	-0.3332	-0.0416
0.0	-0.0416	0.00	-0.0416	0.00

3.7. Forward Modeling (Pemodelan ke Depan)

Forward modeling (pemodelan ke depan) adalah suatu metode interpretasi yang memperkirakan densitas bawah permukaan dengan membuat terlebih dahulu benda geologi bawah permukaan. Kalkulasi anomali dari model yang dibuat kemudian dibandingkan dengan anomali Bouger yang telah diperoleh dari survey gaya berat. Prinsip umum pemodelan ini adalah meminimumkan selisih anomali pengamatan untuk mengurangi ambiguitas.

Yang dimaksud benda dua dimensi di sini adalah benda tiga dimensi yang mempunyai penampang yang sama dimana saja sepanjang tak berhingga pada satu koordinatnya. Pada beberapa kasus, pola kontur anomali bouger adalah bentuk berjajar yang mengidentifikasi bahwa penyebab anomali tersebut adalah benda yang memanjang. Pemodelan dinyatakan dalam bentuk dua dimensi karena efek gravitasi dua dimensi dapat ditampilkan dalam bentuk profil tunggal.

3.8. *Inverse Modeling* (Pemodelan ke Belakang)

Inverse Modelling adalah pemodelan berkebalikan dengan pemodelan ke depan. Pemodelan inversi berjalan dengan cara suatu model dihasilkan langsung dari data. Pemodelan jenis ini sering disebut data fitting atau pencocokan data karena proses di dalamnya dicari parameter model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan. Diharapkan untuk respon model dan data pengamatan memiliki kesesuaian yang tinggi, dan ini akan menghasilkan model yang optimum (Supriyanto, 2007).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei sampai dengan Juni 2015 di **Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG)** dengan alamat **Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254**

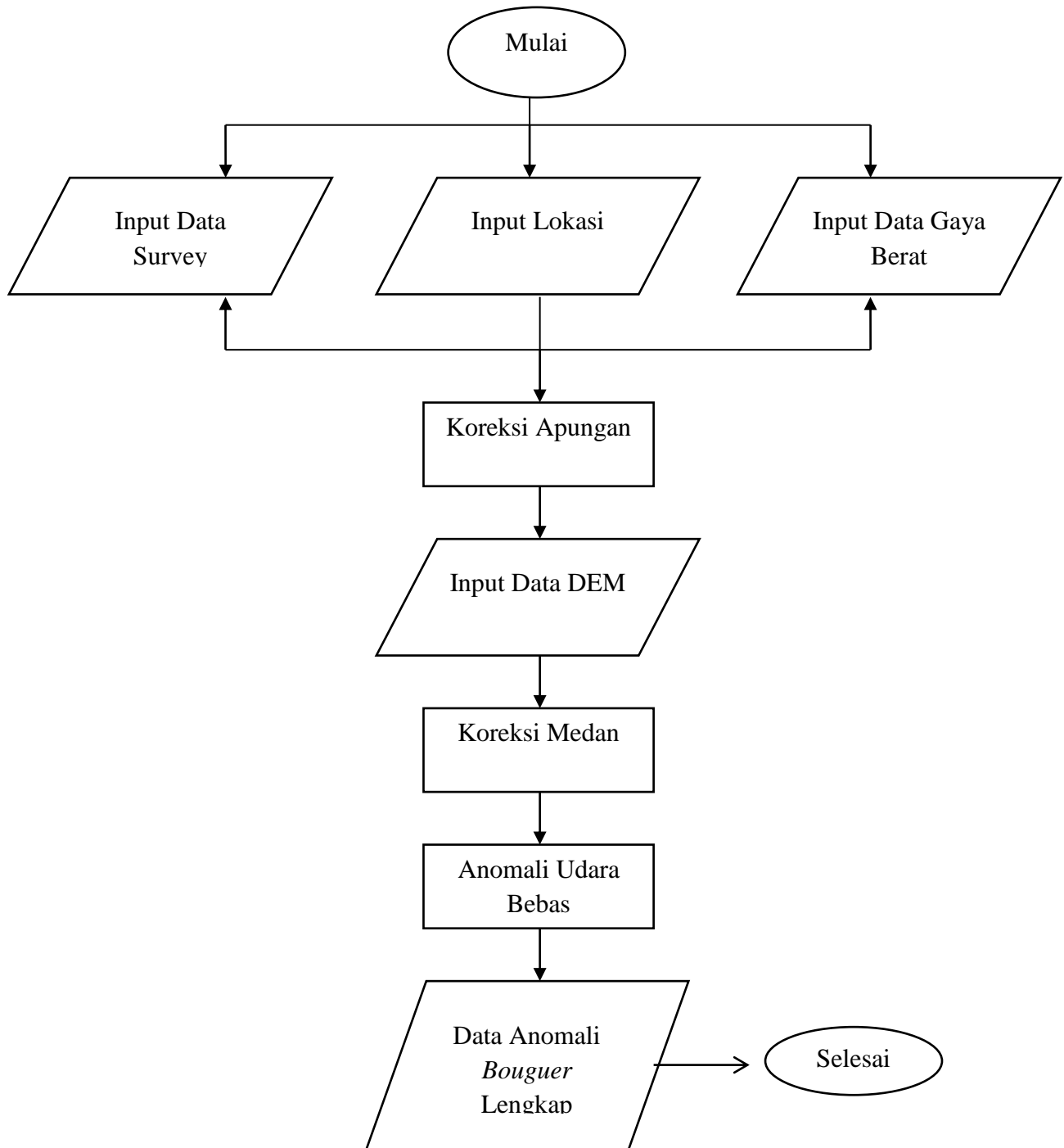
4.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Laptop dan data gaya berat
2. Peta geologi daerah panas bumi Suwawa, Kabupaten Gorontalo
3. Peta SRTM daerah penelitian
4. Software ArcGis 10.1
5. Software Geosoft Oasis Montaj 8.4
6. Software Ms.Excel
7. Software Numeri
8. Software Surfer 10

4.3. Diagram Pengolahan Data

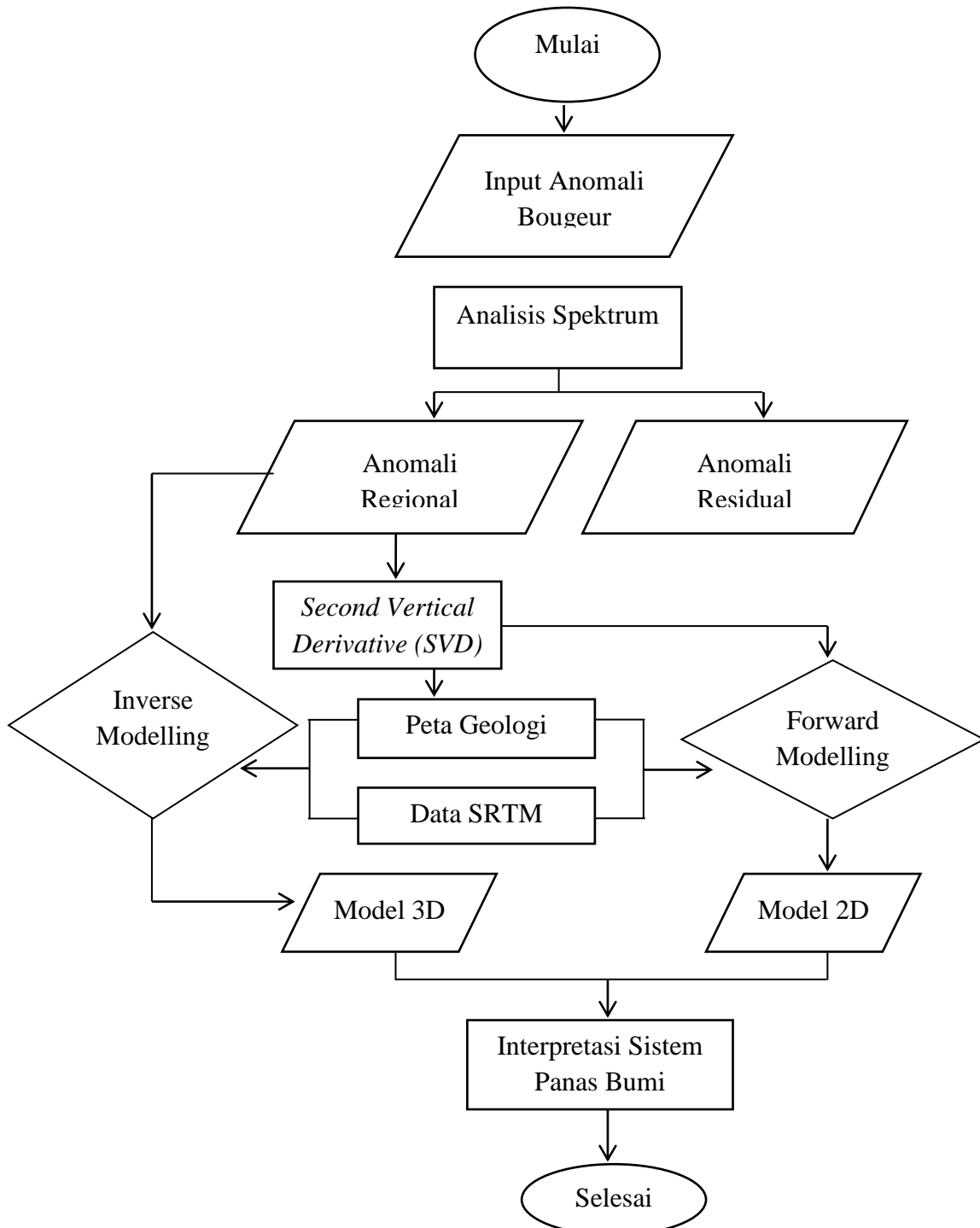
Adapun diagram pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 9. Diagram alir pengolahan data gaya berat

4.4. Diagram Analisis Penelitian

Adapun diagram analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 10. Diagram alir analisis data

4.5. Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini, prosedur untuk melaksanakan penelitian dibagi menjadi dua bagian yaitu :

1. Prosedur pengolahan data

Dalam pengolahan data gaya berat, kita harus mereduksi *Noise* yang terjadi selama pengukuran maupun medan sekeliling titik pengukuran. Yang pertama kita lakukan adalah mereduksi pengaruh benda benda luar bumi. Seperti matahari atau bulan. Kemudian mereduksi nilai ini dengan cara menambahkan nilai bacaan alat dengan pengaruh gravitasi matahari atau bulan. Kemudian mereduksi pengaruh pegas alat. Akibatnya bacaannya membesar dari yang seharusnya. Dalam mereduksi pengaruh kelelahan pegas alat, bacaan alat dikurangkan dengan pengaruh kelelahan pegas alat.

Kemudian kita hitung nilai gaya berat absolut tiap stasiun, berlanjut mereduksi ke nilai gaya berat normal di titik tersebut. Gravitasi normal berasumsi besar gravitasi bumi hanya berubah ke arah lintangnya saja. Karena jari-jari bumi hanya berubah ke arah lintangnya saja. Sedangkan kearah bujuranya selalu sama. Setelah direduksi dengan gravitasi normal, data tersebut direduksi lagi dengan *Free Air Correction*. Pengaruh *FAC* mengakibatkan gravitasi bumi mengecil karena jari jari bumi bertambah dengan ketinggian di titik ukur. Terakhir data tersebut direduksi karena pengaruh massa dibawah permukaan agar mendapatkan data Anomali *Bouguer* Lengkap.

2. Prosedur pemisahan dan pemodelan

Dalam tahap ini data Anomali Bougeur Lengkap di tranformasi *Fourier* untuk merubah dari spasial jarak ke spasial frekuensi dimana akan dipisahkan zona regional dan zona residual dengan filter *Low Pass* dan *High Pass*. Setelah didapat kedua zona tersebut, keduanya di analisis menggunakan *Second Vertical Derivativ (SVD)* untuk mengetahui diskontinuitas dari suatu struktur bawah permukaan, khususnya adanya patahan pada suatu daerah.. Pemodelan kedepan 2D (*Forward Modeling*) dibuat berdasarkan data residual. Yang terakhir adalah pembuatan model kebelakang (*Inverse Modeling*) 3D data data Anomali Bougeur Lengkap Interpretasi sistem panas bumi berdasarkan model 2D dan 3D.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan, kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Daerah penelitian memiliki nilai anomali *Bouguer* 75.8 hingga 111.2 mGal. Anomali rendah dengan rentang nilai 75.8 hingga 79.5 mGal berada pada bagian Barat dan Tenggara daerah penelitian, sedangkan anomali tinggi dengan rentang nilai 90.9 hingga 111.2 mGal berada pada bagian Utara dan Selatan daerah penelitian.
2. Adanya korelasi sesar berdasarkan analisa *SVD* dengan sesar geologi yang menunjukkan keberadaan mata air panas Libungo.
3. Hasil pemodelan 2D menunjukkan:
 - a. Daerah penelitian memiliki stratigrafi dari batuan termuda yaitu batuan aluvial dengan $\rho = 1.8$ gr/cc hingga batuan tertua yaitu batu gamping yang muncul di permukaan karena terpengaruh gaya tektonik dengan $\rho = 2.6$ gr/cc.
 - b. Hasil inversi menunjukkan adanya densitas rendah ($\rho = 1,8$ gr/cc) yang merupakan batuan aluvial dan densitas tinggi ($\rho = 2,9$ gr/cc) yang merupakan batuan Lava Andesit Dasitan berdasarkan geologi.
4. Pemodelan tentatif 3D menunjukkan keadaan bawah permukaan dan model sistem panas bumi pada lintasan A-B dengan keberadaan reservoir berada pada

kedalaman 2 km dari permukaan tanah sebagai pengontrol adanya 1 mata air panas yang muncul ke permukaan.

5. *Heat Source* berada pada kedalaman > 2000 m, *Cap Rock* terbentuk dari batuan Lava Andesit Dasitan dengan ketebalan 100 m berada pada kedalaman 1200 m dan sesar Gorontalo mengontrol sirkulasi air yang masuk ke dalam reservoir.

6.2. Saran

Penelitian lanjutan gaya berat difokuskan pada area yang lebih luas khususnya pada bagian Tenggara karena pola patahan pada bagian Tenggara memungkinkan terdapatnya prospek panas bumi lainnya serta bukaan sesar yang mengindikasikan mata air panas Pangi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bammelen, van R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. I A. The Hague, Netherlands.
- Daud, Y., 2000. *Geophysical Studies Over A Difficult Geothermal Area (A Case Study)*. Program Geofisika, Departemen Geofisika, Universitas Indonesia, Depok.
- Dickson, Mary H., dan Mario, Fanelli., 2004. *What is Geothermal Energy?*, www.iga.igg.cnr.it, diakses pada 26 September 2014.
- Dutro, J.T, 1989. *AGI Data Sheet for Geology In the Field, Laboratory and Office*, Alexandria, US.
- Elkins, T.A., 1951. *The Second Derivative Method of Gravity Interpretation*, *Geophysics*, v.23, h.97-127.
- Grandis, H., 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*, HAGI, Jakarta.
- Hochstein, MP., 1982. *Introduction to Geothermal Prospecting*, Geothermal Institute, University of Auckland, New Zealand.
- Lawless, J., 1995. *Guidebook: An Introduction to Geothermal System*. Short course. Unocal Ltd. Jakarta.
- Rosid, S., 2005. *Gravity Method in Exploration Geophysics*, Universitas Indonesia, Depok
- Octonovrihya, L., 2009. *Analisa Perbandingan Anomaly Gravitasi dengan persebaran intrusi air asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007)*. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* Vol.10 No.1 : AMG
- Santoso, D., 2004. *Catatan Kuliah "Eksplorasi Energi Geothermal"*, ITB, Bandung.
- Suharno, 2011. *Eksplorasi Panas Bumi*, Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung

Supriyanto. 2007. *Analisis Data Geofisika : Memahami teori Inversi*. Department Fisika FMIPA UI : Depok.

Telford, W.M., Goldrat, L.P., dan Sheriff, R.P., 1990. *Applied Geophysics 2nd ed*, Cambridge University Pres, Cambridge.

Tim Survei Terpadu, 2010. *Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Suwawa Kab Bone Bolongo Propinsi Gorontalo* . Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.