

**IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI
RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI
BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY**

(Skripsi)

Oleh

**Irma Nurliza Lumbantoruan
1915051003**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI
RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI
BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY**

Oleh

IRMA NURLIZA LUMBANTORUAN

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY

Oleh

Irma Nurliza Lumbantoruan

Penelitian pada Lapangan Panasbumi G.Ciremai, Provinsi Jawa Barat, bertujuan untuk memperoleh peta anomali Bouguer berdasarkan analisis data gravity GGMPlus. Kemudian pemisahan anomali regional dan residual dengan menggunakan filter moving average. Selanjutnya analisis SVD untuk menganalisis patahan, dan pemodelan 3D untuk menggambarkan secara jelas penampang bawah permukaan untuk melihat sebaran densitas bawah permukaan. Dari hasil pengolahan diperoleh densitas anomali Bouguer sebesar 22-50mGal dengan densitas rata-rata 2,314 gr/cc. Dari hasil analisis spektrum diperoleh kedalaman rata-rata anomali regional 4250 meter dan untuk kedalaman rata-rata residual 350 meter. Nilai nol pada analisis SVD menunjukkan batas karakteristik geologi yaitu adanya sesar dan perbedaan fisis dari densitas tinggi ke rendah pada densitas batuan. Struktur sesar yang teridentifikasi merupakan sesar mendatar yang berarah hampir NW-SE yang membedah Ciremai Muda prodik vulkanik. Terdapat juga sesar berarah barat-timur sebagai kelurusan lama kaldera Ciremai yang menghasilkan prospek panasbumi Sangkanhurip dan Pejambon di bagian timur G.Ciremai. Berdasarkan peta geologi struktur geologi merupakan sesar aktif Cilacap-Kuningan yang berperan sebagai jalur manifestasi panasbumi Ciniru. Dari hasil pemodelan 3D ditemukan zona reservoir pada kedalaman 3-4 km dengan nilai densitas 2,2-2,3 gr/cc dan zona heat source pada kedalaman 4-5 km dengan nilai densitas 2,6-2,7 gr/cc dan untuk zona cuprock pada kedalaman 1,5-3 km dengan nilai densitas 2,7-2,8 gr/cc.

Kata kunci: Ciremai; Gravity; Patahan; Panasbumi; Reservoir

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF FAULT STRUCTURE AND LOCATION OF THE GEOTHERMAL RESERVOAR IN MOUNT CIREMAI AREA BASED ON GRAVITY DATA ANALYSIS

By

IRMA NURLIZA LUMBANTORUAN

GGMPlus gravity data analysis will be used to create a Bouguer anomaly map for the G.Ciremai Geothermal Field in West Java Province. The regional and residual anomalies are then separated using a moving average filter. In addition, SVD analysis was used to examine the fracture, and 3D modeling was used to properly represent the subsurface cross-section in order to see the subsurface density distribution. The Bouguer anomaly density is 22-50mGal, with an average density of 2.314 gr/cc based on the processing findings. According to the spectrum analysis results, the average depth of the regional anomaly is 4250 meters, with a residual average depth of 350 meters. The zero value in the SVD analysis reveals the geological border, meaning the presence of faults and physical changes in density from high to low density. The detected fault structure is a horizontal fault that cuts across the Ciremai Muda volcanic product. In the eastern part of Ciremai Mountain, there is also a west-east trending fault like the former straight line of the Ciremai caldera, which generates the Sangkanhurip and Pejambon geothermal possibilities. The geological structure, according to the geological map, is an active Cilacap-Kuningan fault that serves as a conduit for Ciniru geothermal manifestations. According to the results of 3D modeling, the reservoir zone is at a depth of 3-4 km with a density value of 2.2-2.3 gr/cc, the heat source zone is at a depth of 4-5 km with a density value of 2.6-2.7 gr/cc, and for the cuprock zone at 1.5-3 km deep with a density of 2.7-2.8 gr/cc.

Keywords : Ciremai; Fault; Geothermal; Gravity; Reservoir

Judul Skripsi : **IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY**

Nama Mahasiswa : **Irma Nurliza Lumbantoruan**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915051003**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

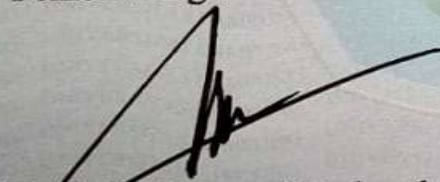
Fakultas : **Teknik**

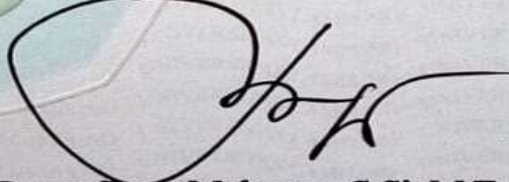


1. Komisi Pembimbing

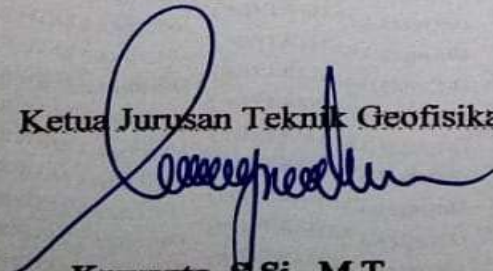
Pembimbing 1

Pembimbing 2


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


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

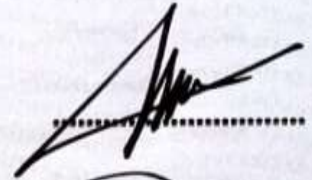
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

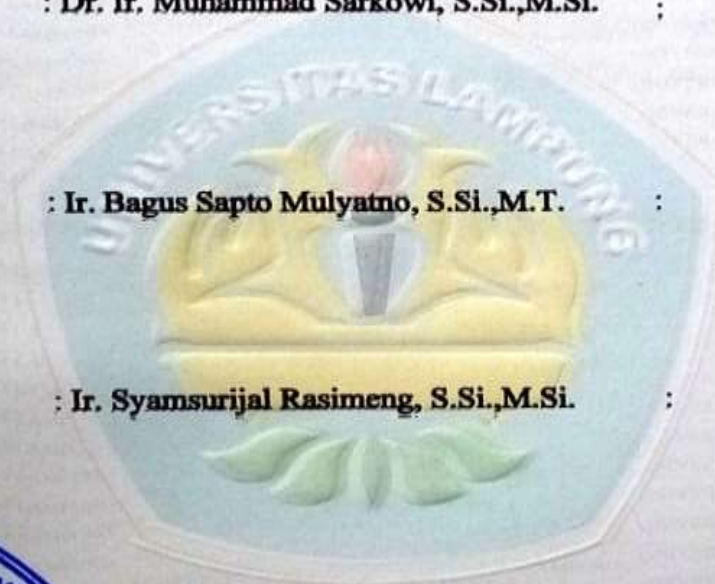
Ketua : Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si.,M.Si. :




Sekretaris : Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si.,M.T. :



Anggota : Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si.,M.Si. :



Dekan Fakultas Teknik
Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 
NIP. 197509282001121002

Tanggal lulus ujian skripsi : 26 Mei 2023

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 01 Juni 2023

Yang membuat Pernyataan



Irma Nurliza Lumbantoruan

NPM. 1915051003

RIWAYAT HIDUP



IRMA NURLIZA LUMBANTORUAN, dilahirkan di Sitabotabo Toruan pada tanggal 29 September 2000. Anak kedua dari lima bersaudara pasangan dari Bapak Lintong Mangampin Lumbantoruan dan Ibu Repina Siahaan. Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 173273 Siborongborong diselesaikan pada tahun 2013, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Siborongborong diselesaikan pada tahun 2016, Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Siborongborong diselesaikan pada tahun 2019.

Pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung Fakultas Teknik Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi asisten praktikum Sistem Informasi Geografis dan praktikum Eksplorasi Geothermal. Pada tahun 2022 penulis melakukan Kerja Praktik (KP) dengan judul “**IDENTIFIKASI SEBARAN ANOMALI BOUGUER DAERAH GUNUNG CIREMAI DENGAN METODE GRAVITY MENGGUNAKAN DATA GGMPLUS**”. Penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana) Universitas Lampung sebagai anggota Bidang Sosial Budaya Masyarakat pada tahun 2020, Unit Kegiatan Mahasiswa Kristen (UKM-Kristen) Universitas Lampung sebagai anggota divisi 1 pada tahun 2020, Unit Kegiatan Mahasiswa Kristen (UKM-Kristen) Universitas Lampung sebagai sekretaris divisi 1 pada tahun 2022, dan aktif dalam kepanitiaan selama menjadi pengurus.

Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul “**IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY**”.

PERSEMBAHAN

Puji syukur saya panjatkan pada Tuhan Yesus atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk:

BAPAK DAN IBU TERCINTA

LINTONG MANGAMPIN LUMBANTORUAN
&
REPINA SIAHAAN

Yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat kepada Irma selama menempuh pendidikan. Irma bersyukur dilahirkan sebagai putri mereka karena mereka selalu mengajarkan Irma untuk berjuang jika ingin mencapai sebuah kesuksesan. Irma juga bersyukur karena mereka memberikan rumah yang bahagia dan kasih sayang yang tulus. Molo boi mamillit ise na gabe natua-tua ku, ikkon hupillit Among dohot Inong muse di masa depan. Mauliate Among dohot Inong di tangiangmuna dohot holong muna tu au.

KAKAK DAN ADIK TERCINTA

RENATA ANGRAINY LUMBANTORUAN
SARI TOMBUS ROSONDANG LUMBANTORUAN
BENDRO PIRTON LUMBANTORUAN
BINHOT PARDAMEAN LUMBANTORUAN

Yang selalu mendoakan dan menjadi *support system* selama ini. Terimakasih atas segala dukungan, doa dan semangatnya. Semoga kita semua menjadi anak yang sukses dan bisa sama-sama membahagiakan ayah dan ibu.

Teknik Geofisika Unila 2019

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Semua yang terlibat dalam proses pembuatan skripsi ini, saya ucapkan terimakasih

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat dan rahmatnya serta karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY”**. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan Skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis juga menyadari bahwa terdapat hambatan selama proses penyusunan Skripsi ini, namun berkat bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak, hingga Skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam Skripsi ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam Skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada siapapun, baik kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung. 01 Juni 2023

Penulis



Irma Nurliza Lumbantoruan
NPM. 1915051003

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat dan rahmatnya serta karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.

Skripsi dengan judul “**IDENTIFIKASI STRUKTUR PATAHAN DAN LOKASI RESERVOAR PANASBUMI DAERAH GUNUNG CIREMAI BERDASARKAN ANALISIS DATA GRAVITY**” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
2. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si.,M.Si. selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan bimbingan dari awal penyusunan Skripsi hingga selesainya Skripsi ini.
4. Bapak Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si.,M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan dari awal penyusunan Skripsi hingga selesainya Skripsi ini.
5. Bapak Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si. selaku penguji yang telah memberikan kritik dan saran hingga selesainya Skripsi ini.
6. Bapak Ida Bagus Sunanda Yogi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang senantiasa membimbing dalam proses perkuliahan.

7. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati terima kasih untuk semua ilmu yang bermanfaat yang telah diberikan selama proses perkuliahan di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
8. Kedua orang tua tercinta bapak Lintong Mangampin Lumbantoruan dan ibu Repina Siahaan yang senantiasa memberikan dukungan dan doa.
9. Kakakku tersayang Renata Anrainy Lumbantoruan yang selalu memberi semangat dan menjadi teman curhat, Adikk-adikku tercinta Sari Tombus Rosondang Lumbantoruan, Bendro Pirton Lumbantoruan, Binhot Pardamean Lumbantoruan, yang selalu memberi semangat dan dukungan.
10. Tri Putra Simangunsong yang memberi dukungan dan semangat selama penyusunan Skripsi ini.
11. Teman seperjuangan Yolanda Nababan dan Citra Naibaho yang menjadi teman cerita selama penyusunan Skripsi ini.
12. Keluarga Besar Teknik Geofisika 2019 yang menjadi teman seperjuangan dalam menjalani perkuliahan di Teknik Geofisika Universitas Lampung, semoga kita semua menjadi orang yang sukses.
13. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandar Lampung, 01 Juni 2023

Penulis,



Irma Nurliza Lumbantoruan

NPM. 1915051003

DAFTAR ISI

	halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iii
PERSETUJUAN	iv
PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Letak Geografis Daerah Penelitian	5
2.2 Geologi dan Tektonik Daerah Penelitian	6
2.2.1 Periode I	9
2.2.2 Periode II	9

2.2.3 Periode III.....	11
2.2.4 Periode IV.....	12
2.3 Fisiografi	12
2.4 Sistem Vulkanik dan Manifestasi Daerah Penelitian	13
2.5 Stratigrafi.....	15
2.5.1 Formasi Cisaar	15
2.5.2 Formasi Cinambo	16
2.5.3 Formasi Cantayan.....	16
2.5.4 Formasi Bantarujeg.....	16
2.5.5 Formasi Subang.....	17
2.5.6 Formasi Kaliwangu	17
2.5.7 Formasi Citalang	17
2.6. Geokimia Daerah Penelitian	18
2.7 Magnetotellurik Daerah Penelitian	25
III. TEORI DASAR.....	27
3.1 GGMplus (<i>Global Gravity Model plus</i>).....	27
3.2 Satelit Gravitasi GRACE dan GOCE.....	27
3.2.1 Satelit GRACE.....	28
3.2.2 Satelit GOCE.....	29
3.3 Metode Gayaberat	30
3.4. Konsep Dasar Metode Gaya Berat.....	31
3.4.1 Gaya Gravitasi (Hukum Newton I).....	31
3.4.2 Percepatan Gravitasi (Hukum Newton II)	32
3.4.3 Potensial Gravitasi	33
3.4.4 Rapat Massa Batuan.....	34
3.5 Koreksi – Koreksi dalam Metode Gaya Berat	34
3.5.1 Koreksi Lintang (<i>Latitude Correction</i>).....	35
3.5.2 Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>).....	35
3.5.3 Koreksi Bouguer (<i>Bouguer Corretion</i>)	36
3.5.4 Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>).....	37
3.5.5 Perhitungan Densitas Permukaan dengan Metode Parasnis.....	38
3.6 Analisis Spektrum	38

3.7 <i>Moving Average Filter</i>	41
3.8 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual	42
3.9 <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i>	43
3.10 <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	44
3.11 <i>Second Horizontal Derivative (SHD)</i>	46
3.12 Inversi Data	46
3.13 Sistem Panasbumi	48
IV. METODE PENELITIAN.....	51
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	51
4.2 Alat dan Bahan	52
4.3 Tahapan Penelitian	52
4.3.1 Anomali <i>Bouguer</i> Lengkap	52
4.3.2 Analisis Spektral	52
4.3.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual	53
4.3.4 Analisis <i>Derivative</i>	53
4.3.5 Pemodelan Bawah Permukaan	54
4.3.6 Interpretasi Kualitatif	54
4.4 Diagram Alir	55
V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	56
5.1 Data Penelitian	56
5.2 Anomali <i>Bouguer</i> Lengkap	62
5.3 Analisis Spektrum	63
5.3.1 Lintasan A-A'	65
5.3.2 Lintasan B-B'	71
5.3.3 Lintasan C-C'	72
5.4 Pemisahan Anomali Regional dan Residual	69
5.4.1 Anomali Regional	70
5.4.2 Anomali Residual.....	71
5.5 <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	72
5.6 Inversi 2D.....	75
5.6.1 Pemodelan 2D pada Lintasan A-A'	75
5.6.2 Pemodelan 2D pada Lintasan B-B'	76
5.6.3 Pemodelan 2D pada Lintasan C-C'	77

5.7 Invers Model 3D	78
5.7.1 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman 0m	79
5.7.2 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -500m	80
5.7.3 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -1000m.....	81
5.7.4 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -1500m	82
5.7.5 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -2000m	83
5.7.6 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -2500m	84
5.7.7 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -3000m	85
5.7.8 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -3500m	86
5.7.9 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -4000m	90
5.7.10 <i>Slicing</i> horizontal untuk kedalaman -4500m	91
5.8 <i>Slicing</i> 3D.....	90
5.8.1 <i>Slicing</i> Litasan A-A'	90
5.8.2 <i>Slicing</i> Litasan B-B'	93
5.8.3 <i>Slicing</i> Litasan C-C'	96
5.9 Sistem Panasbumi Gunung Ciremai.....	99
VI. KESIMPULAN	102
6.1 Kesimpulan.....	102
6.2 Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar	halaman
1. Peta administrasi Kabupaten Provinsi Jawa Barat	5
2. Peta geologi daerah penelitian (sumber: P3TEBTEK)	6
3. Anatomi dari gunung berapi aktif yang mendemonstrasikan konsep aktivitas vulkanik dan kemungkinan bahayanya (Indyo Pratomo, 2008).....	9
4. Tataan tektonik dan sebaran gunungapi Kuarter di pulau Jawa bagian barat (Katili & Sudradjat, 1984).....	10
5. Model umum sistem panasbumi daerah Gunung Ciremai (Ninieck, dkk., 2010)	14
6. Diagram Cl-HCO ₃ -SO ₄ (Yuda dan Rina, 2022).....	22
7. Diagram Na-K-Mg (Yuda dan Rina, 2022)	22
8. Hubungan isotop $\delta^{2}\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ pada mata air panas dan dingin (Yuda dan Rina, 2022).....	23
9. Diagram Cl-Li-B (Yuda dan Rina, 2022).....	24
10. Distribusi data dan jalur MT (Sumintadireja, 2011)	25
11. Penampang MT 2-D dengan model batas tajam (Sumintadireja, 2011)	26
12. Ilustrasi gerak dan posisi satelit GPS dengan satelit GRACE dan antar satelit GRACE (Johannessen, 1999).....	28
13. Ilustrasi SST satelit GPS dengan satelit GOCE (Johannessen, 1999).....	29
14. Gaya tarik menarik antara dua buah benda (Grandis, 2009).....	31
15. Koreksi udara bebas terhadap gaya berat	36
16. Koreksi Bouguer terhadap gayaberat	37
17. Koreksi medan (terrain correction) terhadap gaya berat	38
18. Hubungan kurva Ln A dengan k (Blakely, 1996)	41
19. Sistem Panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004).....	49

20. Diagram alir.....	55
21. Data yang digunakan dalam penelitian	56
22. Script yang digunakan dalam ekstraksi data GGMPPlus	57
23. Peta topografi daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat.....	58
24. Peta geoid daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat.....	59
25. Peta gravity disturbance daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat.....	60
26. Peta gravity acceleration daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat....	61
27. Peta ABL daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat.....	62
28. Garis lintasan pada kontur Anomali <i>Bouguer</i>	64
29. Grafik Ln A vs K pada lintasan A-A'	66
30. Grafik Ln A vs K pada lintasan B-B'	67
31. Grafik Ln A vs K pada lintasan C-C'	68
32. Peta anomali regional daerah panasbumi Gunung Ciremai, Jawa Barat.....	69
33. Peta anomali residual daerah panasbumi Gunung Ciremai, Jawa Barat	72
34. Peta (SVD) daerah panasbumi Gunung Ciremai Jawa Barat.....	73
35. Peta geologi daerah penelitian.....	74
36. Model distribusi densitas bawah permukaan hasil inversi 2D anomali Residual penampang 2D pada lintasan A-A'	75
37. Model distribusi densitas bawah permukaan hasil inversi 2D anomali Residual penampang 2D pada lintasan B-B'	76
38. Model distribusi densitas bawah permukaan hasil inversi 2D anomali Residual penampang 2D pada lintasan C-C'	77
39. Model distribusi densitas bawah permukaan hasil inversi 3D	78
40. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 0 m	77
41. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 500 m	78
42. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 1000 m ...	79
43. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 1500 m ...	82
44. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 2000 m ...	83
45. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 2500 m ...	84
46. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 3000 m ...	85
47. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 3500 m....	86
48. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 4000 m....	87

49. Model distribusi densitas hasil slicing horizontal pada kedalaman 4500 m ...	88
50. Profil penampang FHD dan SHD pada lintasan A-A', pada slicing 3D inversi model, hasil interpretasi keberadaan patahan dan prospek reservoir di daerah penelitian dan model penampang MT 2-D.....	88
51. Profil penampang FHD dan SHD pada lintasan B-B', pada slicing 3D inversi model dan hasil interpretasi keberadaan patahan dan prospek reservoir di daerah penelitian	94
52. Profil penampang FHD dan SHD pada lintasan C-C', pada hasil slicing 3D inversi model dan hasil interpretasi keberadaan patahan dan prospek reservoir di daerah penelitian	97
53. Model distribusi densitas slicing horizontal pada kedalaman 1500 meter....	100

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Analisis kimia Air Panas Gunung Ciremai (sumber : PVMBG, 2008).....	18
2. Kandungan relatif Cl-SO ₄ ²⁻ -HCO ₃ , dan Na/1000-K/100- Mg (Sumber : PVMBG, 2008)	19
3. Nilai fluktuasi densitas batuan (Telford, dkk., 1990).....	34
4. Operator Elkins pada filter SVD (Sarkowi, 2010).	45
5. Jadwal pelaksanaan kegiatan penelitian	51
6. Kedalaman Anomali Bouger Regional dan Residual.....	68
7. Bilangan gelombang (k) dan lebar jendela N	69
8. Operator filter SVD (Sarkowi, 2010).	110

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia terletak di atas lempeng vulkanik yang dikenal sebagai Eurasia-Australia-Pasifik (*Ring of Fire*), yang juga melintasi Kepulauan Maluku, Pulau Sulawesi, Jawa, dan Pulau Sumatera. Menurut Widarto dkk. (2003), sebagian besar jalur vulkanik ini memiliki potensi untuk menghasilkan energi panasbumi yang signifikan. Suatu sistem panas bumi harus memperhatikan tiga hal yaitu keberadaan sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, dan batuan penutup (*seal*). Kemunculan mata Air panas atau uap air disebabkan oleh arus konveksi yang melewati zona lemah atau zona rekahan pada batuan, sehingga menyebabkan kemunculan manifestasi panasbumi di permukaan.

Salah satu faktor yang mendukung potensi panasbumi di Pulau Jawa adalah gerakan konvergen di selatan Pulau Jawa atau Lempeng Indo-Australia dan di utara Pulau Jawa atau Lempeng Eurasia. Zona lemah pada batuan biasanya merupakan tempat keluarnya energi panas bumi. Hal ini disebabkan oleh struktur geologi yang menciptakan zona kehancuran, patahan, dan rekahan batuan yang selanjutnya menjadi jalur naiknya fluida panasbumi ke permukaan. Hasil fluida panasbumi yang keluar mampu menyebabkan batuan yang dilaluinya mengalami alterasi. Batuan alterasi tersebut nantinya berpotensi menjadi batuan penutup (*seal*). Lapangan panasbumi sering dijumpai di lingkungan busur vulkanik yang masih memiliki ruang magma di dalamnya.

Salah satu gunungapi aktif di Pulau Jawa adalah gunungapi Ciremai. Gunungapi Ciremai juga menjadi salah satu daerah yang berpotensi menjadi wilayah prospek panas bumi. Dalam pengembangan wilayah yang berpotensi menjadi daerah prospek panasbumi, maka diperlukan eksplorasi yang baik. Sehingga pemanfaatan panasbumi dalam kehidupan sehari-hari menjadi maksimal. Dalam pengembangan panasbumi terdapat beberapa metode yang bisa digunakan salah satunya adalah metode geofisika. Metode geofisika umumnya digunakan dalam memetakan kondisi di bawah permukaan, namun dalam kegiatan eksplorasi dapat menggunakan metode magnetik, geolistrik, dan magnetotellurik.

Dalam penelitian ini digunakan metode gaya berat. Alasan pemilihan metode ini dikarenakan metode gaya berat dapat memetakan struktur di bawah permukaan yang didasarkan pada sebaran densitas batuan. Diharapkan bahwa struktur yang mendasari daerah penelitian akan diketahui sebagai hasil dari penelitian ini. Sebagai hasilnya, temuan penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai data atau informasi awal mengenai sebaran nilai densitas bawah permukaan di kawasan Gunung Ciremai, yang selanjutnya akan dianalisis keberadaan sumber panas (*heat source*) dan sesarnya.

Perlu diketahui bahwa dalam penelitian ini memerlukan data gravity. Data satelit, seperti data satelit gravitasi GGMPlus (*Global Gravity Model Plus*) 2013, merupakan salah satu jenis data yang sering digunakan dalam penelitian gaya berat. Data satelit ini memiliki resolusi spasial yang rapat dimana jarak resolusi spasialnya sekitar 200 meter, sehingga data ini baik digunakan dalam pemetaan awal suatu daerah.

Dari penjelasan di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan anomali *Bouguer* di kawasan Gunung Ciremai Jawa Barat dengan berdasarkan analisis data gravty *GGMPlus*, memperkirakan kedalaman zona regional dan residual dari anomali *Bouguer* lengkap dengan menggunakan analisis spektrum, untuk memperoleh struktur patahan berdasarkan analisis gradien anomali *Bouguer*, dan untuk mendapatkan model bawah permukaan kawasan Gunung Ciremai

menggunakan pemodelan 3D gaya berat dan untuk menentukan lokasi reservoir panasbumi berdasarkan analisis data gravity yang dikomplikasikan dengan data geologi, geokimia, dan magnetotellurik. Temuan penelitian ini diharapkan dapat mendukung temuan sebelumnya sekaligus memberikan gambaran tentang struktur bawah permukaan panas bumi Gunung Ciremai.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan anomali *Bouguer* di kawasan Gunung Ciremai Jawa Barat dengan menggunakan analisis data gravity *GGMPlus*,
2. Dengan menggunakan analisis spektrum untuk perkiraan kedalaman zona regional dan residual dari anomali *Bouguer*.
3. Menentukan struktur patahan dengan menggunakan analisis *gradient* anomali *Bouguer*,
4. Membuat model bawah permukaan kawasan Gunung Ciremai menggunakan pemodelan 3D anomali gaya berat dan memperkirakan posisi reservoir panasbumi menggunakan analisis data gaya berat dan komplikasi dengan data geologi, geokimia, dan magnetotellurik.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa faktor yang membatasi penelitian ini adalah:

1. Daerah penelitian terletak di sekitar Gunung Ciremai,
2. Data yang digunakan berupa data gravity *GGM Plus*,
3. Anomali regional dan residual dipisahkan menggunakan filter *moving average* dan lebar jendela dengan analisis spektrum,
4. Pemodelan 3D bawah permukaan dilakukan untuk mengidentifikasi densitas batuan di bawah permukaan,

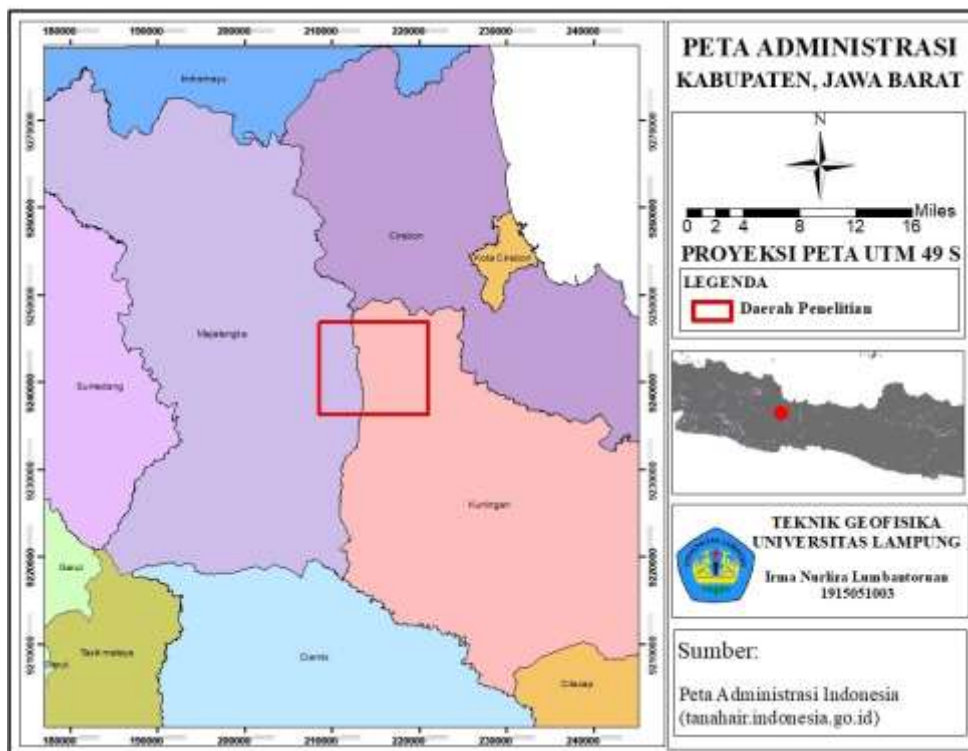
1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui informasi struktur patahan dan lokasi reservoir panasbumi di daerah Gunung Ciremai berdasarkan data gravity *GGMPlus* yang didukung oleh data Geologi, Geokimia dan Magnetotellurik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Letak Geografis Daerah Penelitian

Secara administratif Gunung Ciremai terletak diantara dua kabupaten, yaitu Kabupaten Kuningan dan Kabupaten Majalengka, Provinsi Jawa Barat. Posisi geografis puncaknya terletak pada $6^{\circ}50'30''$ LS dan $108^{\circ}24'00''$ BT, dengan ketinggian 3,078 mdpl. Gunung tersebut merupakan gunung tertinggi di Jawa Barat. Posisi Gunung Ciremai dapat dilihat di wilayah Jawa Barat seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 1**.

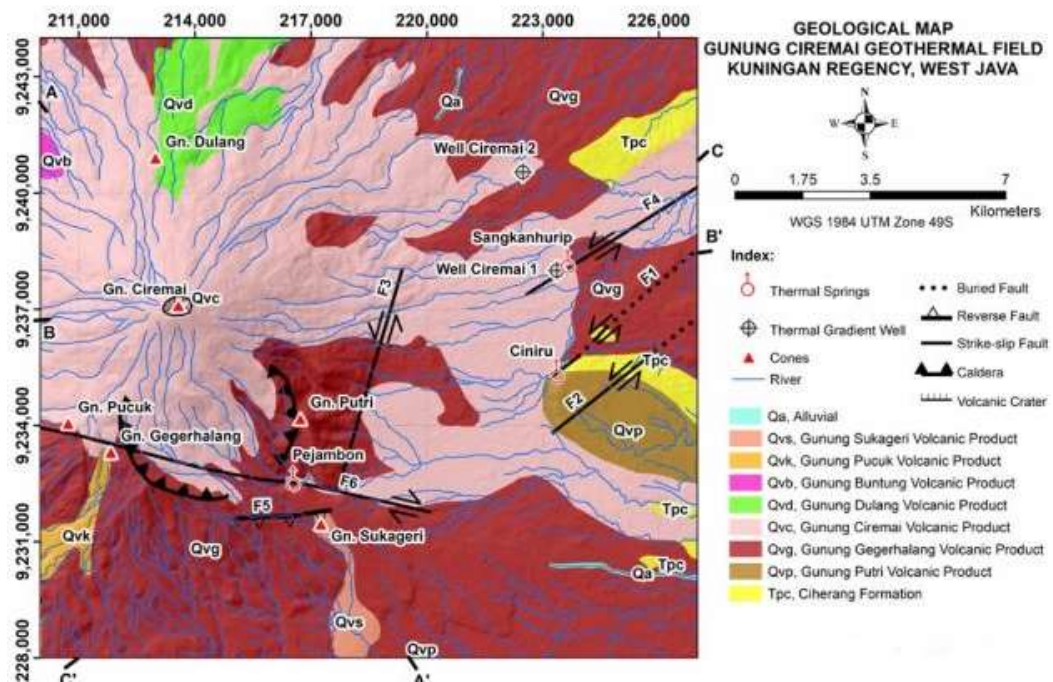


Gambar 1. Peta administrasi Kabupaten, Provinsi Jawa Barat

2.2 Geologi dan Tektonik Daerah Penelitian

Gunung Ciremai termasuk gunungapi aktif bertipe strato dengan ketinggian 3,078 mdpl. Secara morfologi terbagi atas morfologi puncak yang ditempati oleh produk vulkanik muda dengan kemiringan lereng 25-40⁰, morfologi lereng yang ditunjukkan oleh pusat erupsi parasit di bagian utara dan tenggara dengan kemiringan 10-25⁰, dan lereng kaki dengan kemiringan 5-10⁰, elevasi antara 100 – 300 mdpl diendapkan terutama produk aliran piroklastik.

Aktivitas vulkanik Gunung Ciremai tua di kawasan tersebut pada awalnya adalah Kuartar Tua yang terdiri dari produk vulkanik aliran piroklastik dan lava intrusi sedimen klastik Oligosen-Miosen. Sisa ledakan kaldera vulkanik tua berarah ke utara Gunung Ciremai yang sebagian besar terdiri dari aliran piroklastik dan lava. Struktur geologi utama di Gunung Ciremai adalah, patahan yang membedah depresi di mana gunung berapi Ciremai muda muncul. Namun, terdapat juga sesar barat timur sebagai kelurusan kaldera Ciremai lama, sehingga menghasilkan prospek panasbumi Sangkanhurip dan Pejambon di bagian timur.



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (sumber: P3TEBTEK)

Gunung Ciremai menjulang di atas formasi batuan Tersier yang sebagian besar terlihat di barat laut dan utara. Formasi tersebut terdiri dari Formasi Halang (Miosen; batupasir, batupasir dan breksi), Formasi Cinambo (Oligo-Miosen; batupasir serpih dan breksi), Formasi Ciherang (Oliosen Atas; breksi bergantian dan batupasir), Formasi Kaliwangu (Pliosen; batulempung), Formasi Citalang (Pliosen Atas; konglomerat, breksi, batupasir dan batugamping), Formasi Kalibiuk (Pliosen Atas; batupasir tufan, batugamping, dan lensa batugamping). Banyak formasi Tersier telah diterobos oleh intrusi andesitik. Sekitar sepuluh intrusi ditemukan di wilayah barat laut Gunung Ciremai, yang diyakini muncul sebelum aktivitas Ciremai Tua. Beberapa intrusi tersebut ditemukan di kawasan Maja serta di sebelah utara kompleks Gunung Ciremai, tepatnya di kawasan Gunung Kromong.

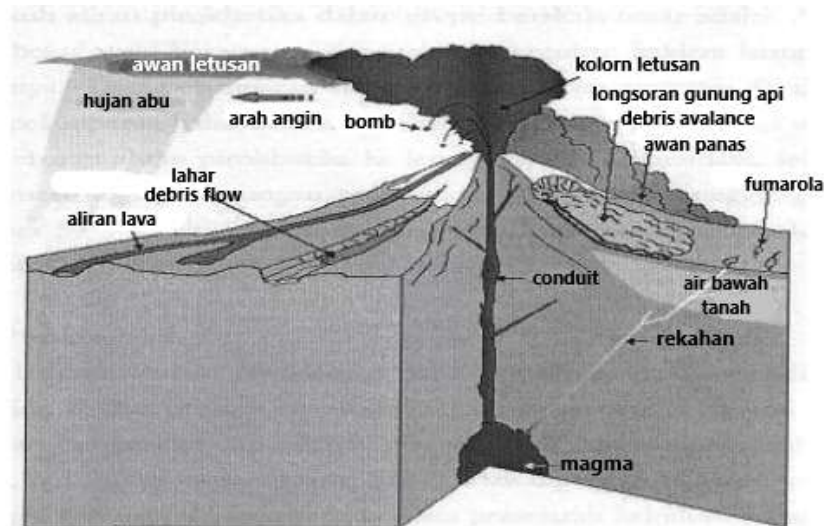
Situmorang dkk. (1984) menemukan bahwa Gunung Ciremai memiliki empat fase aktivitas yaitu letusan Gunung Putri, letusan Gunung Gegerhalang, letusan Gunung Ciremai, dan letusan celah. Aktivitas Gunung Putri memicu perluasan aktivitas vulkanik di sekitar Gunung Ciremai, yang diikuti oleh aktivitas Gunung Gegerhalang, aktivitas Gunung Ciremai, dan letusan celah.

Kegiatan pertama dimulai dari erupsi Gunung Putri yang menimbulkan lava andesitik dan aliran piroklastik. Produk letusan Gunung Putri mendominasi bagian selatan dan tenggara Gunung Ciremai. Aktivitas kedua adalah meletusnya Gunung Gegerhalang, sekaligus menjadi awal vulkanisme Gunung Ciremai. Gunung Gegerhalang terkenal karena dua tanggul besar yang terletak di selatan dan tenggara puncak Ciremai, pada ketinggian 1200 - 1900 meter di atas permukaan laut. Era aktivitas ini menandakan bahwa Gunung Ciremai memiliki titik erupsi yang bergeser. Mula-mula magma tampak bersifat basaltik, kemudian terjadi proses diferensiasi yang menghasilkan magma andesitik seperti produk Gunung Putri. Proses diferensiasi menciptakan magma yang semakin asam, menghasilkan letusan yang sangat eksplosif dan terbentuknya Kaldera Gegerhalang. Gunung Ciremai yang masih aktif saat ini berada di tepi utara kaldera yang terbuka. Bagian utara/barat laut kaldera diperkirakan sudah hancur oleh aktivitas vulkanik terakhir

dari letusan Gegerhalang dan tertutup oleh peristiwa letusan Gunung Ciremai. Letusan dua sisi, yang dikenal sebagai Telaga Sangiang dan Batukarang - Dataran Tinggi Batukarang-Barujaksi, terjadi pada zaman gunung berapi Gegerhalang. Erupsi Gunung Gegerhalang didominasi oleh aliran piroklastik asam dan lava andesitik. Aliran piroklastik tersebut membentang dari Gunung Gegerhalang ke arah barat daya, selatan, dan tenggara. Letusan tersebut menghasilkan aliran piroklastik dari Wanahayu, Pasirbatang, Pasirgibug, dan Puncak. Lava tersebut terdiri dari Lava Gegerhalang Picung Barat, Pucuk, dan Putri. Gunung Ciremai sekarang berada pada perbatasan utara Kaldera Gegerhalang, menghasilkan lava yang beragam, terutama basalt, andesit basaltik, dan andesit. Selanjutnya, aliran piroklastik, jatuhan piroklastik, dan lava dihasilkan.

Aktivitas Gunung Putri menghasilkan aliran lahar porfiritik, sedangkan aktivitas Gunung Gegerhalang menghasilkan aliran lahar, awan panas, dan jatuhan piroklastik. Aktivitas vulkanik Gunung Gegerhalang disusul aktivitas Gunung Ciremai yang banyak menghasilkan aliran lahar serta endapan awan panas, serta jatuhan piroklastik dan endapan sekunder berupa endapan lava yang tersebar di kaki timur Gunung Ciremai. Selain itu, ditemukan pula letusan sampingan yang menimbulkan aliran lava andesit, antara lain letusan Gunung Sukageri, Gunung Buntung, Gunung Pucuk, dan Gunung Dulang.

Kompleks Gunung Ciremai ditopang oleh batuan sedimen tersier, yang sebagian dapat ditemukan di utara Gunung Ciremai. Selain itu, ditemukan intrusi ganda komposisi andesit di kawasan Maja, Kabupaten Majalengka, dan di sebelah utara kompleks Gunung Ciremai, yakni di kawasan Gunung Kromong. Perluasan aktivitas vulkanik di sekitar Gunung Ciremai diawali oleh aktivitas Gunung Putri yang kemudian disusul dengan aktivitas Gunung Gegerhalang yang diperkirakan masih aktif dan tergolong gunungapi kategori A seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Anatomi dari gunung berapi aktif yang mendemonstrasikan konsep aktivitas vulkanik dan kemungkinan bahayanya (Indyo Pratomo, 2008).

Berdasarkan tanda-tanda struktur gunung api dan karakteristik material vulkanik yang timbul dari letusan gunung berapi, dapat diklasifikasikan menjadi empat periode yang masing-masing memiliki ciri khas dan mewakili asal-usul dan sumber letusannya. Aktivitas Gunung Ciremai dapat dibagi menjadi empat fase (Situmorang et al. 1995; Surmayadi et al. 2005), yaitu:

2.2.1 Periode I

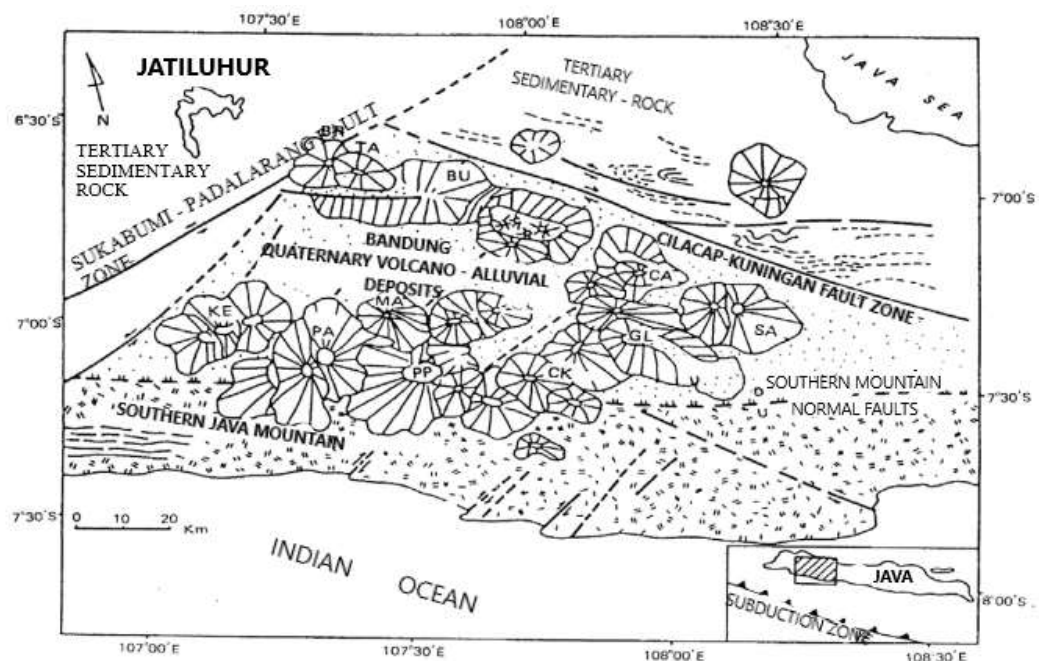
Periode pertama diawali dengan erupsi Gunung Putri, dengan pusat erupsi berada di tenggara Gunung Ciremai. Hasilnya adalah lava andesit bertekstur porfiritik dengan mineral utama berupa piroksen, plagioklas, dan *hornblende* pada massa dasar mikrolit feldspar dan partikel hitam. Aliran lahar telah menyebar ke arah timur, selatan, dan barat daya Gunung Ciremai.

2.2.2 Periode II

Letusan yang terkonsentrasi di Gunung Gegerhalang pada era kedua aktivitas Gunung Ciremai menghasilkan aliran lava, aliran piroklastik, dan jatuhan

piroklastik. Produk letusan Gunung Gegerhalang terletak di wilayah selatan, barat daya, barat, dan barat laut tubuh Gunung Ciremai. Satuan sedimen yang terbentuk akibat letusan Gunung Gegerhalang merupakan endapan aliran piroklastik yang tersusun dari fragmen batuan *glassy* dan batu apung dalam massa dasar abu dan lapili kemerahan yang relatif padat. Konstruksi pipa gas dapat ditemukan. Satuan sedimen ini dapat ditemukan di puncak Gunung Gegerhalang dan di lereng selatannya. Endapan jatuhan piroklastik sangat terstratifikasi dan terpilah, dan secara lokal bercampur dengan endapan aliran piroklastik.

Endapan lava Gegerhalang terpilah buruk, terdiri dari kombinasi fragmen batuan vulkanik berukuran kerikil hingga bongkah dalam lapisan dasar abu, pasir, dan lanau. Satuan sedimen ini dapat ditemukan di Kuningan dan Mandiracan. Dengan demikian, aktivitas vulkanik yang berpusat di Gunung Gegerhalang atau Gunung Ciremai purba telah ada setidaknya sejak Pleistosen akhir.



Gambar 4. Tatanan tektonik dan sebaran gunungapi Kuarter di pulau Jawa bagian barat (Katili & Sudradjat, 1984)

2.2.3 Periode III

Periode ketiga dibedakan oleh satuan sedimen erupsi yang berhubungan dengan pembentukan kaldera Ciremai, dengan produk utama letusan berupa batu apung. Satuan pengendapan terdiri dari dua pengendapan aliran atas dan bawah. Satuan sedimen atas terdiri dari fragmen juvenil dalam bentuk fragmen batu apung litik.

Sedimen dasar terdiri dari potongan batu apung juvenil, litik, dan massa dasar lapili, pasir vulkanik, dan abu kemerahan. Satuan tersebut sangat terekspos di Cigowong, tebalnya lebih dari 30 meter, dan mengandung arang kayu di area tertentu. Endapan jatuhan piroklastik Ciremai tergolong terpilah baik, terstratifikasi, dan relatif baru, terdiri dari fragmen juvenil dengan ukuran berkisar antara 1 sampai 5 cm dan fragmen litik yang berasal dari batuan samping. satuan sedimentasi

Satuan sedimen tersebut tersingkap dengan baik di sekitar Argalingga. Endapan aliran piroklastik 2 terbentuk dari batu apung dan kepingan litik dengan massa dasar berupa abu dan pasir vulkanik berwarna abu-abu kecoklatan. Satuan sedimen tersebut sedalam 2-4 meter, setengah padat, berstruktur pipa gas, serta mengandung arang kayu. Endapan jatuhan Ciremai 2 terdiri dari potongan juvenil (batu apung, scoria, obsidian) dan fragmen litik dengan ukuran mulai dari lapili hingga kerikil, dengan massa dasar pasir dan abu vulkanik. Di sekitar Tegalmuju, endapan ini terpilah dengan baik, berlapis, dan terurai.

Struktur aliran dapat dilihat pada endapan lahar Ciremai yang tersusun dari partikel batuan vulkanik mulai dari kerikil hingga bongkahan batu. Endapan jatuhan piroklastik Ciremai terdiri dari batu apung dan litik dalam massa dasar pasir dan abu vulkanik. Satuan sedimen tersebut, terstratifikasi, terpilah dan terkonsolidasi secara ekstensif, dan tersingkap dengan baik di dekat puncak Gunung Ciremai, merupakan akibat dari letusan freato-magmatik. Umur arang kayu yang terkandung dalam satuan sedimen aliran piroklastik ditentukan dengan menggunakan teknik Radiokarbon (C_{14}) yaitu 13.350 ± 330 tahun BP. Hasil perhitungan tersebut diduga menunjukkan umur pembuatan kaldera Ciremai.

2.2.4 Periode IV

Fenomena letusan sisi mendominasi periode keempat, karena terbentuknya sistem rekahan di kawasan puncak Gunung Ciremai selaras dengan tekanan kubah lava yang terkandung di dalam *crypto-dome*. Aktivitas tersebut dibedakan dengan terbentuknya aliran lava yang mengelilingi puncak gunung, termasuk Lava Dulang, yang tersusun oleh basalt porfiritik dengan fenokris plagioklas dan piroksen yang terkubur dalam lapisan mikrolit feldspar. Aliran lava yang menyebar ke utara tersingkap jelas di sekitar Gunung Dulang. Buntung adalah massa dasar *glassy* yang terdiri dari basal porfiritik dengan fenokris plagioklas, piroksen, dan olivin. Aliran lava yang tersingkap di sekitar kawah dan Gunung Buntung memiliki struktur bongkah bersifat vesikuler menghasilkan lubang gas seperti sarang lebah.

Lava Pucuk tersusun atas basalt kehitaman, fenokris plagioklas porfiritik, dan piroksen. Lava Sukageri yang tersusun atas basalt hitam, porfiritik dengan fenokris plagioklas, piroksen, dan sedikit olivin. Aliran lava dengan struktur bongkah, vesikuler, tersingkap dengan baik di sekitar Sukageri. Tersusun pula oleh endapan jatuhan piroklastik Sukageri, yang tersusun atas fragmen juvenil seukuran bongkahan lava basaltik hingga fragmen pasir, *glassy* dan fragmen litik, pada massa dasar abu vulkanik dan pasir. Satuan sedimen tersebut diselingi dengan lava dan membentuk kerucut vulkanik Sukageri.

2.3 Fisiografi

Secara fisiografis, kawasan Gunung Ceremai masuk kedalam zona Bogor (Soejono 1984). Zona ini menurut Koesoemadinata dan Martodjojo (1974) merupakan cekungan laut dalam yang menghasilkan sedimen turbidit terendapkan di dalamnya. Menurut Soejono (1984), karakteristik sedimen merupakan sistem sedimen kipas laut dalam. Penyebaran kipas lateral biasanya dibatasi dalam model kipas laut dalam. Lebih dari satu kipas laut dalam dapat muncul pada saat yang bersamaan. Karena setiap kipas memiliki karakteristiknya masing-masing, maka

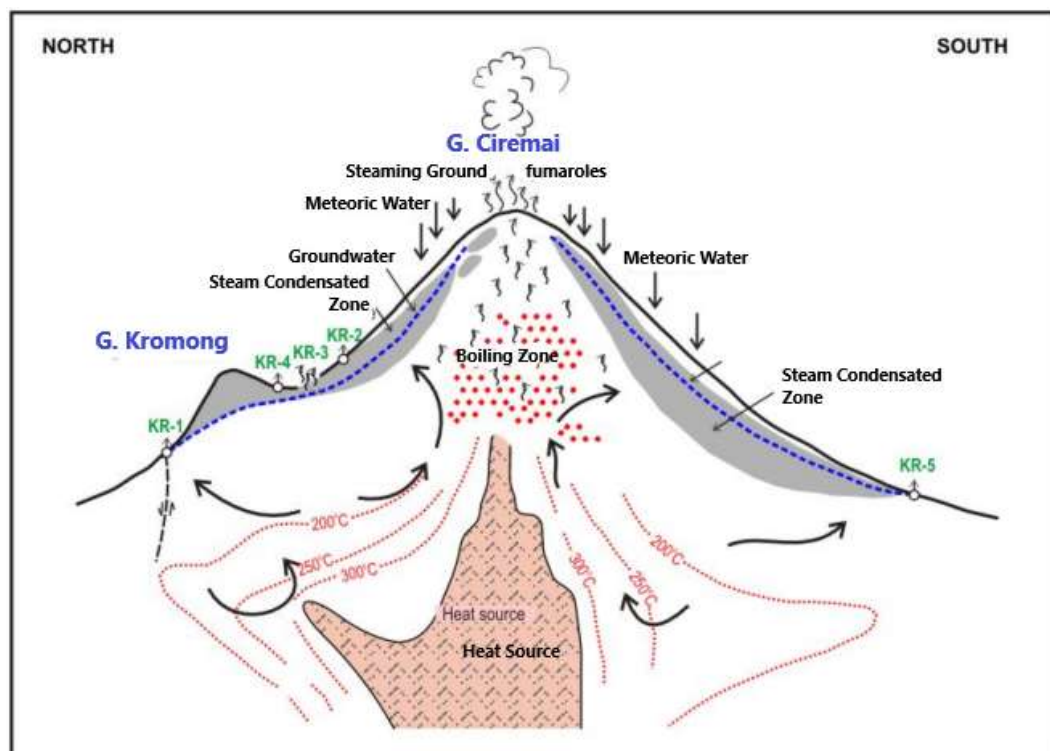
pembentukan endapan batuan dapat diurutkan sesuai dengan ruang dan waktu geologis. Menurut Sandi Stratigrafi Indonesia, batuan sedimen yang dimaksud adalah kumpulan batuan yang dikelompokkan sebagai formasi dengan umur, sebaran, dan batas satuan yang jelas.

2.4 Sistem Vulkanik dan Manifestasi Daerah Penelitian

Daerah panasbumi Gunung Ciremai terletak di Kabupaten Cirebon (Gunung Kromong) dan Kabupaten Kuningan (Ciremai, Sangkanhurip dan Cibingbin) Sistem panasbumi di Ciremai ditunjukkan oleh mata air hangat dan Fumarol di Gunung Ciremai (Gunung Kromong, Sangkanhurip dan Cibingbin) dengan kisaran suhu 42– 55⁰C dan pH 6-7. Manifestasi tersebut terletak NW-SE mengikuti arah yang sama dengan patahan di daerah Gunung Kromong, Sangkanhurip dan Cibingbin. Jenis air di Sangkanhurip, Ciniru dan Subang adalah Klorida, sedangkan di Pejambon adalah Sulfat Klorida dengan banyak air Bikarbonat. Dari geotermometer air ditemukan bahwa kisaran suhu reservoir adalah 115–180⁰C. Gradien sumur di Sangkanhurip adalah 8⁰C/100 m dan di Kaliaren adalah 3⁰C/100 m. Zona *upflow* ditunjukkan dengan adanya fumarol di Gunung Ciremai dan zona *outflow* di Ciniru dan Sangkanhurip.

Manifestasi permukaan panasbumi Ciremai terjadi di Gunung Kromong di bagian utara dan di Liang Panas di sisi selatan gunung berapi. Gunung Kromong adalah kerucut parasit Ciremai. Hal ini menyebabkan hidrogeologi fluida termal di Gunung Kromong lebih rumit daripada di sisi selatan. Saat air meteorik mengisi kembali ke bawah permukaan Ciremai, air dipanaskan oleh aktivitas vulkanik-magmatik Ciremai. Baik cairan magmatik maupun air bawaan tidak bercampur dengan air meteorik yang dipanaskan. Karena penurunan densitas fluida termal, air panas keluar ke permukaan. Fluida dalam keluar secara lateral sebagai mata air panas di Palimanan (Gunung Kromong) dan aliran keluarnya disebabkan oleh struktur geologi atau kontak litologi antara batugamping dan andesit atau keduanya. Di bagian selatan Ciremai, cairan kaya Cl dalam mengalir di Liang Panas.

Di daerah tersebut muncul permukaan air tanah, alih-alih kontrol struktur dan litologi, tampaknya menjadi penyebab aliran keluar di Liang Panas. Fluida dalam juga mengalir ke atas dan mengisi reservoir. Selanjutnya di reservoir fluida dalam mendidih pada suhu kesetimbangan 190 - 210°C, tetapi di bagian selatan Ciremai, reservoir mengalami kesetimbangan pada suhu yang sedikit lebih rendah daripada di bagian utara, yaitu pada 160-180°C. Mendidih menyebabkan fluida termal terpisah menjadi fase cair dan fase uap. Fase uap atau *steam* lebih *mobile* daripada fase cair. Itu bisa mencapai puncak Ciremai dan keluar sebagai fumarol dan mengepul. Manifestasi permukaan panasbumi juga ditemukan di dekat kawah Ciremai. Manifestasinya didominasi oleh *steaming ground* yang bersuhu sekitar 90°C dengan deposit belerang yang sangat intensif dan fumarol kaya CO₂ yang bersuhu 210°C . Model umum sistem panasbumi daerah Gunung Ciremai dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Model umum sistem panasbumi daerah Gunung Ciremai (Rina, dkk., 2010)

2.5 Stratigrafi

Djuhaeni dan Martodjojo (1989) menjelaskan pengelompokan satuan batuan yang terungkap di sekitar Gunung Ceremai yang teridentifikasi sebagai batuan dasar gunung berapi aktif. Lapisan batuan dasar yang menjadi dasar Gunung Ceremai berkembang dari yang lama ke yang baru.

2.5.1 Formasi Cisaar

Formasi Cisaar dicirikan secara litologi oleh batulempung gampingan dengan kenampakan serpih. Batulempung berwarna kehijauan sampai abu-abu dan mengandung sejumlah besar foraminifera kecil. Sisipan batu pasir berkapur dapat dilihat di daerah sekitarnya. Pada tahap batulempung yang lebih tinggi, sisipan batupasir tufan lebih berkembang. Globorotalia dapat ditemukan di bagian bawah rangkaian batulempung.

Kumpulan fosil berasal dari Miosen Tengah (N9 hingga N14). Kehadiran *foraminifera bentos*, *Gyrodina soldani*, *Eponides umbonatus*, *Karreriella bradyi*, dan *Cyclamina canvcellata* menunjukkan bahwa batulempung berkembang 17-10 juta tahun yang lalu di perairan dalam (zona batial). Ketebalan keseluruhan satuan kurang dari 650 meter.

Kehadiran beberapa sisipan batupasir tufan di seri batulempung atas menyiratkan transisi progresif ke satuan geologis yang lebih muda, Formasi Cinambo. Atau disebut Seri Cimanuk (Koolhoven 1936), Lapisan Pemali Bawah (Bemmelen 1949), Lapisan Pemali (Marks 1957), Formasi Cinambo (Djuri 1973), atau Formasi Cinambo Bawah (Cisaar Lempung: Soejono 1984) adalah nama-nama sebelumnya untuk Formasi Cisaar.

2.5.2 Formasi Cinambo

Satuan Formasi Cinambo tersusun atas lapisan batulempung dan batupasir yang berselang-seling. Djuri (1973) menawarkan nama satuan, yang selanjutnya didefinisikan sebagai endapan turbidit oleh Soejono (1984). Semua satuan memiliki ketebalan 1.500-1.800 meter. Bagian bawah Formasi Cinambo berselang-seling antara batulempung berbutir halus sampai sedang dan batupasir tufan. Umumnya memiliki ketebalan 2-6 cm dengan perbandingan lempung pasir 1:1 sampai 3:1. Dalam sekuensnya banyak ditemukan struktur sedimen dari sekuen Bouma.

Formasi Cinambo berasal dari Miosen Tengah-Akhir (sekitar 10-5 juta tahun yang lalu) dan terletak di zona N14-N15. Kehadiran foraminifera kecil menentukan rentang usia relatif. Formasi Cinambo merupakan endapan turbidit yang berkembang dalam sistem kipas menengah ke bawah, berdasarkan tekstur batuan dan kenampakan sedimennya.

2.5.3 Formasi Cantayan

Satuan Formasi Cantayan dicirikan oleh suksesi breksi tebal (675-750 m) diselingi oleh batupasir tufan dan batulempung serpih. Breksi tersusun atas andesit, batupasir, dan batugamping, pada masa dasar batupasir kasar. Breksi semakin mendominasi lapisan atas, dan gugusan batuan ini berdampingan dengan Formasi Cinambo di bawahnya.

2.5.4 Formasi Bantarujeg

Satuan Formasi Bantarujeg tersusun oleh batupasir dan batugamping serpih yang berselang-seling. Umumnya dibagi menjadi bagian atas dan bagian bawah. Bagian bawah terbuat dari batu pasir (tufan, batugamping) dan batu lempung (batugamping, serpih), dengan sisipan batupasir konglomerat yang mencirikannya. Seri Bouma adalah formasi sedimen yang paling umum dijumpai. Formasi

Bantarujeg terhubung ke Formasi Cantayan di bawahnya oleh ujung-ujung breksi yang digantikan oleh batulempung dan batupasir yang berselang-seling, dan ketebalannya berkisar antara 700 hingga 750 meter.

2.5.5 Formasi Subang

Formasi Subang merupakan deretan tebal batugamping berwarna abu-abu atau kehijauan. Satuan Formasi Subang menindih Formasi Bantarujeg yang lebih tua di bawahnya. Batulempung Formasi Subang mengandung *Globorotalia tumida*, *Pulleniatina primalis*, *Gt. acostaensis*, *Sphaeroidinella subdehiscens*, dan *Globigerina reveroae* semuanya berumur Pliosen. Kumpulan *Quinqueloculina sp.*, *Rotalia becarrii*, *Bolivina sp.*, dan *Textularia sp.* menunjukkan bahwa satuan ini berkembang di lingkungan laut dangkal (*neritic mid-periphery*) dimana formasi Subang dan fasies Cidadap utara serupa (Koolhoven 1936).

2.5.6 Formasi Kaliwangu

Satuan Formasi Kaliwangu tersusun oleh batulempung hijau yang mengandung moluska, diselingi oleh batupasir dan batupasir tufan lignit. Sisipan batupasir mengalami penebalan dan pengkasaran ke atas. Kondisi ini ditandai dengan *offshore bar*. Moluska pada satuan formasi Kaliwangu tinggal di laut dangkal (zona neritik perifer). Keterkaitan stratigrafi antara satuan Formasi Subang dengan Formasi Kaliwangu di bawahnya selaras dengan perubahan yang terjadi secara bertahap.

2.5.7 Formasi Citalang

Pada tatanan terestrial, satuan formasi Citalang merupakan endapan aliran. Batupasir konglomerat dan tufan membentuk kerdil. Silitonga & Masria (1978) mengenal adanya gugusan batuan yang hampir identik dengan Formasi Citalang

dan Formasi Gintung di wilayah sebelah timur Gunung Ceremai. Menurut Silitonga & Masria (1978), konglomerat Formasi Gintung setebal sekitar 90 meter dan mengandung kayu pasir dan sisa-sisa vertebrata Kuarter.

2.6. Geokimia Daerah Penelitian

Komposisi andesit ke andesit yang lebih tradisional dari rangkaian kapur alkali mendominasi keluaran Gunung Ciremai. Batuan tersebut termasuk seri magma yang kaya akan alumina. Empat bentuk lava andesit yang berbeda, termasuk andesit aegirin-augite hyperstene, andesit anthophyllite aegirin, andesit horblende, dan andesit anthophyllite augit, dapat diidentifikasi berdasarkan analisis petrografi dari sejumlah lava Gunung Ciremai terpilih. Petrokimia Gunung Api Ciremai menurut Rakimin II et al. (1984), adalah andestesia hiperstenik augit yang mengandung olivin menyusun batuan di bagian puncak dan kaki. Dalam memberikan khasiatnya tentunya air panasbumi tidak lepas dari kandungan kimia dalam air tersebut. Peneliti geosain kepanasbumian di Sangkanhurip telah dilakukan oleh Direktorat Vulkanologi sejak tahun 1987 dengan melakukan penyelidikan geokimia di sekitar kemunculan manifestasi panasbumi pada bagian timur Gunung Ciremai (DESDM, 2010). Adapun hasil analisis geokimia air panasbumi Gunung Ciremai ditunjukkan oleh **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Analisis kimia Air Panas Gunung Ciremai (sumber : PVMBG, 2008)

Unsur	Satuan	Ap. Cisabuk	Ad. Cisabuk	Ap. Ciniru	Ap. Sangka nhurip	Ad. Sangka nhurip	Ad. Cilongkrang
pH, Lab		6,55	7,38	6,91	6,94	6,53	6,63
DHL	µmhos/cm	1300	370	1600	5800	270	220
Na	ppm	265,6	46,8	772	1274	21,48	14,6
K	ppm	40,58	6,54	90,65	171,2	3,48	2,06
Ca	ppm	191,4	30,39	176,75	302,5	21,57	18,46
Mg	ppm	38,2	7,81	31,15	83,5	6,08	4,37
HCO ₂	ppm	218,26	120,22	254,39	195,55	68,86	64,44
Cl	ppm	379,92	34,03	1314,04	2378,5	25,13	22,14
SO ₄	ppm	257,27	29,51	0,58	0,73	2,69	2,78
B	ppm	0,56	0,57	9,8	9,38	0,31	0,54
NH	ppm	0,49	0,5	1,64	1,32	0,34	0,37
H ₂ S	ppm	1,28	3,21	0	2,57	1,78	0
SiO ₂	ppm	147,9	53,49	78,45	102,7	52,39	41,95

Menurut DESDM (2010), kehadiran manifestasi panasbumi berupa mata air panas di Sangkanhurip memiliki suhu $42^{\circ}\text{C} - 56,3^{\circ}\text{C}$ dengan sumber yang sama yaitu sisa magma yang berada di bawah kerucut Gunung Ciremai, dimana dalam prosesnya, air meteorik masuk ke dalam *recharge* (lereng kerucut Gunung Ciremai), kemudian terpanasi di kedalaman dan muncul sebagai mata air panas berupa air klorida (Cl) dengan kandungan bikarbonat (HCO_3^-) yang cukup tinggi. Kandungan klorida (Cl) yang tinggi tersebut diduga akibat pengaruh dari batuan reservoir berupa batuan sedimen marin di bawah lapisan tahanan jenis rendah yang terdeteksi pada kedalaman 400-700 m di bawah permukaan laut. Lapisan tahanan jenis rendah ini diduga berasosiasi dengan batuan vulkanik teralterasi hidrotermal. Untuk kandungan relatif $\text{Cl-SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$, dan $\text{Na/1000-K/100-}\sqrt{\text{Mg}}$, yang diambil pada bulan November tahun 2008 dapat dilihat pada **Tabel 2** di bawah ini

Tabel 2. Kandungan relatif $\text{Cl-SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$, dan $\text{Na/1000-K/100-}\sqrt{\text{Mg}}$ (Sumber : PVMBG, 2008)

Lokasi	Persentase (%)					
	Na/1000	K/100	$\text{Mg}^{1/2}$	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Ap. Cisabuk, Ci Lengkang	4	6	90	44	26	30
Ap. Ciniru	11	12	77	84	16	0
Ap. Sangkanhurip	11	14	75	92	8	0
Ad. Cisabuk	2	2	96	19	65	16
Ad. Sangkanhurip	1	1	98	26	71	3
Ad. Cilengkang	1	1	98	26	72	3

Menurut data DESDM (2010), penemuan sinter silika dan manifestasi panas bumi di Sangkanhurip berupa mata air panas yang tersebar di kaki Gunung Ciremai, diduga mendukung teori bahwa waduk Gunung Ciremai merupakan reservoir dengan sistem dominan air panas.

Gunung Ciremai merupakan gunung berapi aktif dengan litologi batuan sedimen Pliosen Formasi Ciherang dan batuan vulkanik kuarter produk Gunung Ciremai serta sisi letusan Gunung Gegerhalang, Dulang, Buntung, Pucuk, dan Sukageri. Batuan vulkanik dominan basaltik hingga andesitik; batuan dasit ditemukan pada produk vulkanik Gegerhalang. Struktur geologi yang ada di lapangan panasbumi

Gunung Ciremai meliputi sesar NE-SW, NW-SW, dan ESE-WNW, dan fitur melingkar yang diidentifikasi sebagai kawah dan kaldera Gunung Ciremai. Mata air panas dengan suhu kurang dari 60°C dapat ditemukan di Pejambon, Sangkanhurip, Ciniru, Gunung Kromong, dan Liang Panas sebagai manifestasi panas bumi di permukaan (Yuda dan Rina, 2022).

Diagram Cl-HCO₃-SO₄ dan Na-K-Mg (Yuda dan Rina, 2022) seperti pada **Gambar 6** dan **Gambar 7** menggambarkan karakteristik pelepasan air panas sebagai manifestasi permukaan di lapangan panas bumi Gunung Ciremai, yang menunjukkan bahwa:

1. Pejambon (GC 1-4)

Pelepasan (*discharging*) air panas di Pejambon adalah air HCO₃, Cl, dan SO₄ yang belum matang (*immature*), menunjukkan campuran cairan hidrotermal dan air meteorik. Sumber sulfat (hingga 582 mg/L) kemungkinan berasal dari air formasi di horizon batuan sedimen. Sebelum keluar sebagai wujud permukaan, fluida mengalami pengenceran dengan air meteorik atau air tanah.

2. Ciniru (CC 5-6)

Mata air panas Ciniru termasuk jenis air klorida yang belum matang (*immature*). Diplot pada zona sudut Cl air matang (*mature water*) pada diagram Cl-HCO₃-SO₄, tetapi pada zona *immature* pada diagram Na-KMg. Walaupun mata air Ciniru termasuk dalam jenis air klorida, namun mata air ini bukanlah air penampung air asin. Kandungan klorida di Ciniru tergolong tinggi (hingga 1.442,40 mg/L) dan natrium (hingga 858,83 mg/L). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh pencampuran dengan air sedimen yang terperangkap di dalam batuan. Kemungkinan ini didukung oleh jumlah boron yang signifikan (hingga 11,10 mg/L); menunjukkan pengaruh batuan sedimen.

3. Sangkanhurip (GC 7-12)

Discharging (pelepasan) air panas di mata air Sangkanhurip merupakan air klorida yang belum matang (*immature*). Untuk air termal tidak mewakili fluida

reservoir yang dalam, meskipun termasuk dalam jenis air klorida. Ini termasuk menunjukkan pencampuran antara cairan hidrotermal dan konat atau air formasi. Tampaknya mata air tersebut memiliki konsentrasi boron yang tinggi (10,43-12,71 mg/L) dan amonium (0,9-2,31 mg/L) dengan karakteristik air asin. Kondisi ini didukung oleh adanya singkapan formasi batuan sedimen di kaki Gunung Ciremai (dekat daerah Sangkanhurip) yaitu Formasi Ciherang.

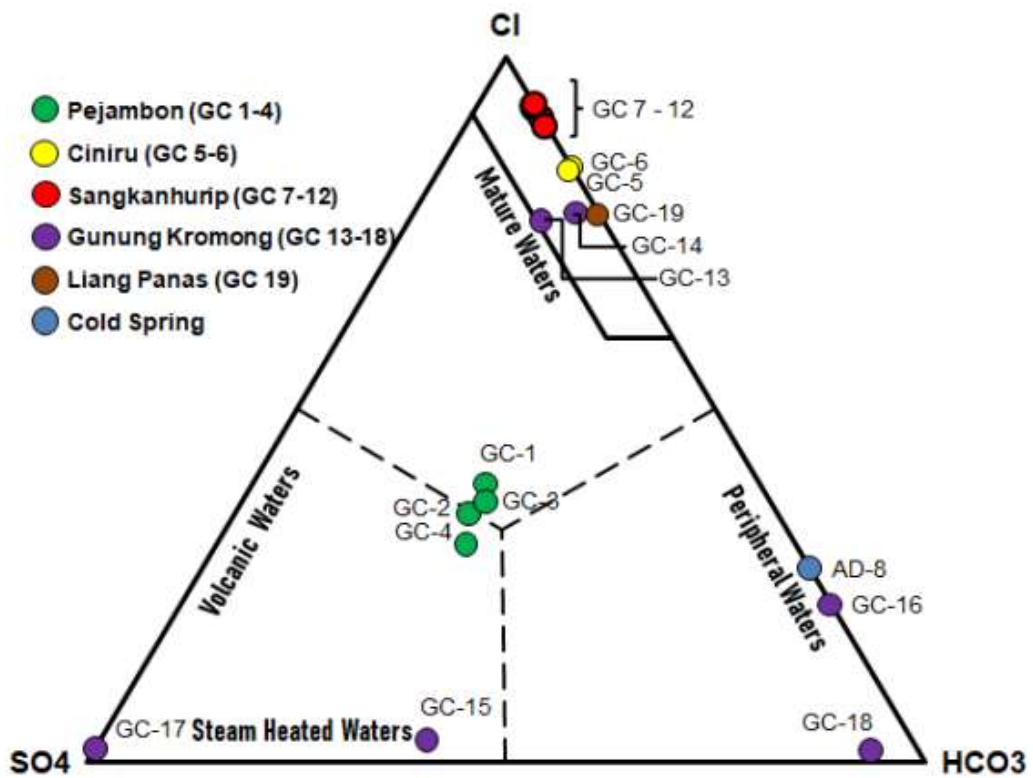
4. Gunung Kromomng

Pengembangan air panas di kawasan Gunung Kromong (sebelah utara Gunung Ciremai) terbagi menjadi empat jenis air, yaitu air klorida (Palimanan; GC-13 dan GC-140), air sulfat (Cipanas; GC-17), air sulfat-bikarbonat air (Palimanan; GC 15), dan air bikarbonat (Gunung Kuda dan Kedondong; GC-16 dan GC-18). Semua mata air adalah air yang belum matang. Jenis air klorida pada mata air Palimanan dihasilkan dari pencampuran fluida hidrotermal dengan air konat atau air formasi. Hal ini didukung oleh konsentrasi amonium yang tinggi (hingga 14 mg/L) dan endapan travertine.

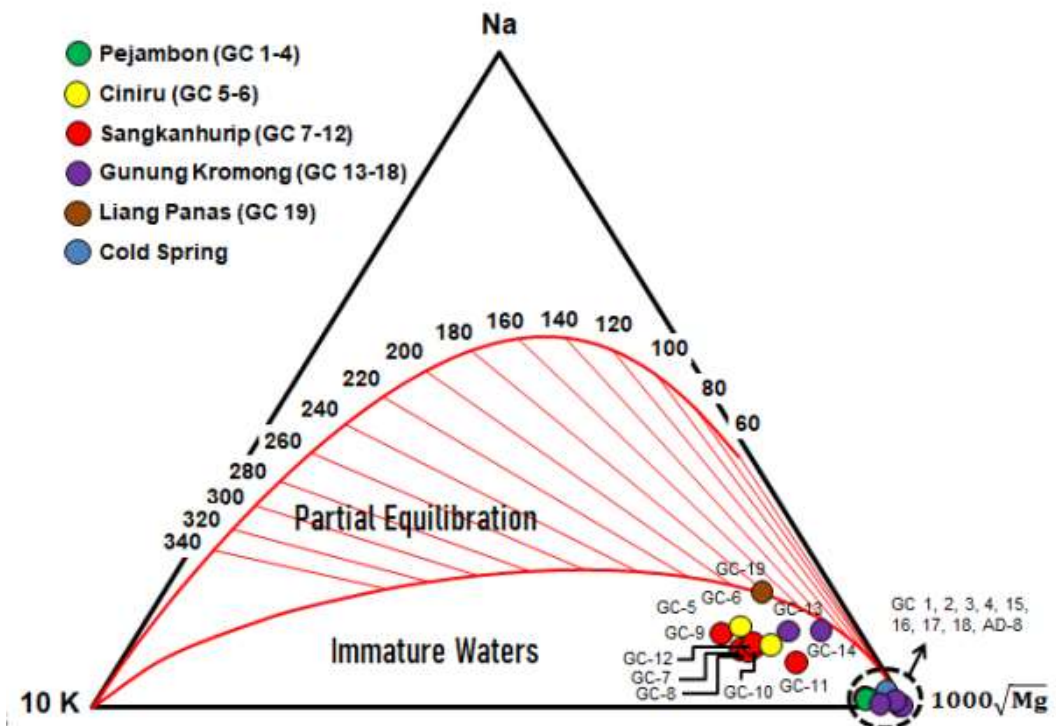
Proses kondensasi yang terjadi di kawasan ini menghasilkan air sulfat asam di mata Cipanas (pH 2,6). Di dekat permukaan, air kondensat dapat mengalami pencampuran dengan air meteorik atau air tanah, sehingga menghasilkan air sulfat-bikarbonat di mata air Palimanan. Sedangkan jenis air bikarbonat di mata air Gunung Kuda dan Kedondong disebabkan oleh pencampuran fluida hidrotermal dengan air meteorik atau air tanah.

5. Liang Panas (GC 19)

Mata air Liang Panas adalah jenis air klorida kesetimbangan parsial. Air ini memiliki konsentrasi natrium yang tinggi (2.269 mg/L) dan klorida (3.616 mg/L); menunjukkan asal cairan bawaan. Namun mata air panas Liang Panas mungkin tidak berkorelasi dengan sistem panasbumi Gunung Ciremai karena lokasi mata air ini jauh (sekitar 19 km) di sebelah tenggara Gunung Ciremai dan dipisahkan oleh fitur melingkar.

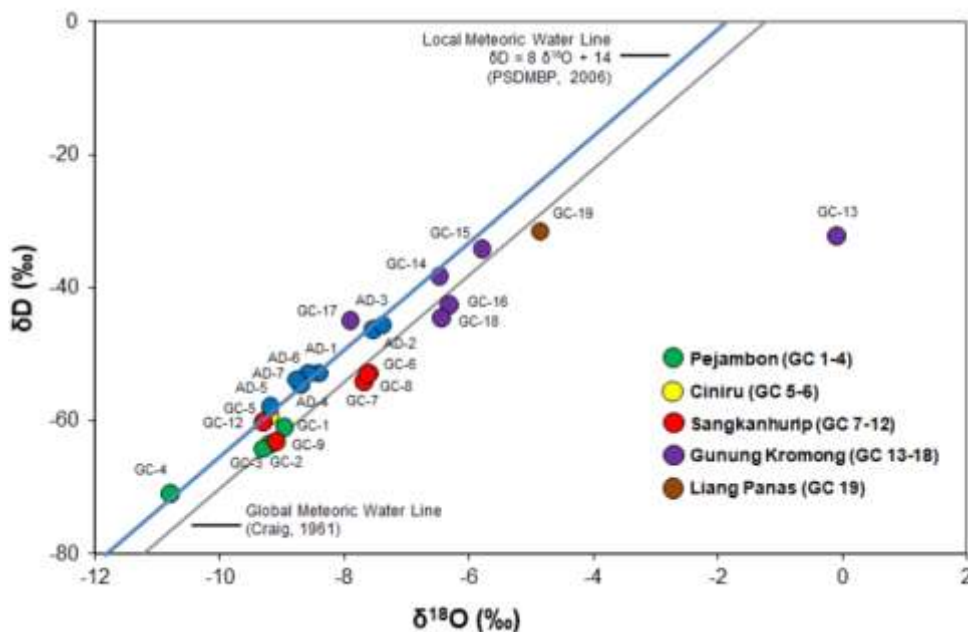


Gambar 6. Diagram Cl-HCO₃-SO₄ (Yuda dan Rina, 2022)



Gambar 7. Diagram Na-K-Mg (Yuda dan Rina, 2022)

Berdasarkan tren isotop stabil pada pada **Gambar 8**, semua mata air panas berada digaris air meteorik, menunjukkan proses pencampuran dengan air meteorik atau air tanah, kecuali GC-13 (Palimanan). Terdapat pergeseran $\delta^{18}\text{O}$ yang signifikan di mata air panas Palimanan (GC-13). Kondisi ini disebabkan adanya pencampuran dengan air konat atau air formasi dari batuan sedimen. Oleh karena itu, diartikan bahwa fluida hidrotermal di kawasan panasbumi Gunung Ciremai berasal dari air meteorik. Fluida juga mengalami pencampuran dengan air konat atau formasi, kemudian bercampur dengan air meteorik atau air tanah di dekat permukaan.

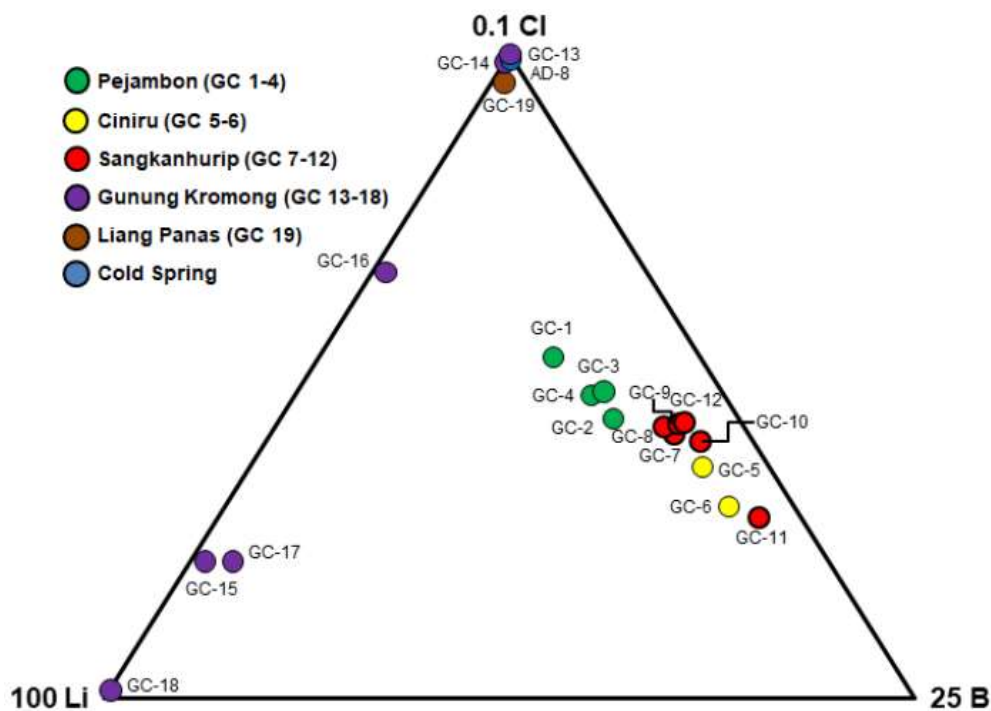


Gambar 8. Hubungan isotop $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ pada mata air panas dan dingin (Yuda dan Rina, 2022)

Menurut Yuda dan Rina (2022), secara umum terdapat tiga kluster dengan rasio Cl/B (Gambar 9), yaitu pada kluster pertama adalah manifestasi termal Gunung Kromong (GC-13 hingga GC-18) dan Liang Panas (GC-19) yang memiliki rasio Cl/B tinggi. Tingginya nilai Cl/B, khususnya di mata air Palimanan (GC-13 dan GC-14), disebabkan adanya proses pencampuran dengan air konat atau air formasi. Oleh karena itu, rasio Cl/B Gunung Kromong dan Liang Panas terletak jauh di tenggara Gunung Ciremai.

Klaster kedua adalah mata air panas Sangkanhurip dan Ciniru yang kemungkinan berasal dari sistem atau reservoir yang serupa. Mata air panas Pejambon (GC-1 sampai GC-4) nampaknya memiliki klaster yang berbeda dengan Sangkanhurip dan Ciniru. Hal ini menunjukkan bahwa mata air panas Pejambon mungkin bersumber dari reservoir yang berbeda dengan mata air panas Sangkanhurip dan Ciniru. Oleh karena itu, diperkirakan bahwa lapangan panasbumi Gunung Ciremai terdiri dari empat sistem hidrotermal, yaitu Gunung Kromong, Sangkanhurip-Ciniru, Pejambon, dan Liang Panas.

Beberapa geotermometer digunakan untuk menentukan suhu reservoir untuk meningkatkan interpretasi bawah permukaan. Geotermometer konduktif kuarsa di mata air Pejambon (GC-1 hingga GC-4) memperkirakan suhu sekitar 176°C sampai 186°C. Dalam sistem mata air Sangkanhurip-Ciniru (GC-9 sampai GC-12), diukur dengan menggunakan geotermometer kuarsa konduktif, dan suhu yang terukur sekitar 136°C sampai 151°C. Sedangkan Na-K-Ca, Na-K Fourier (1979), dan Na-K Giggenbach (1988) geotermometer dari mata air ini menunjukkan estimasi suhu masing-masing sekitar 194°C, 164°C, dan 183°C.

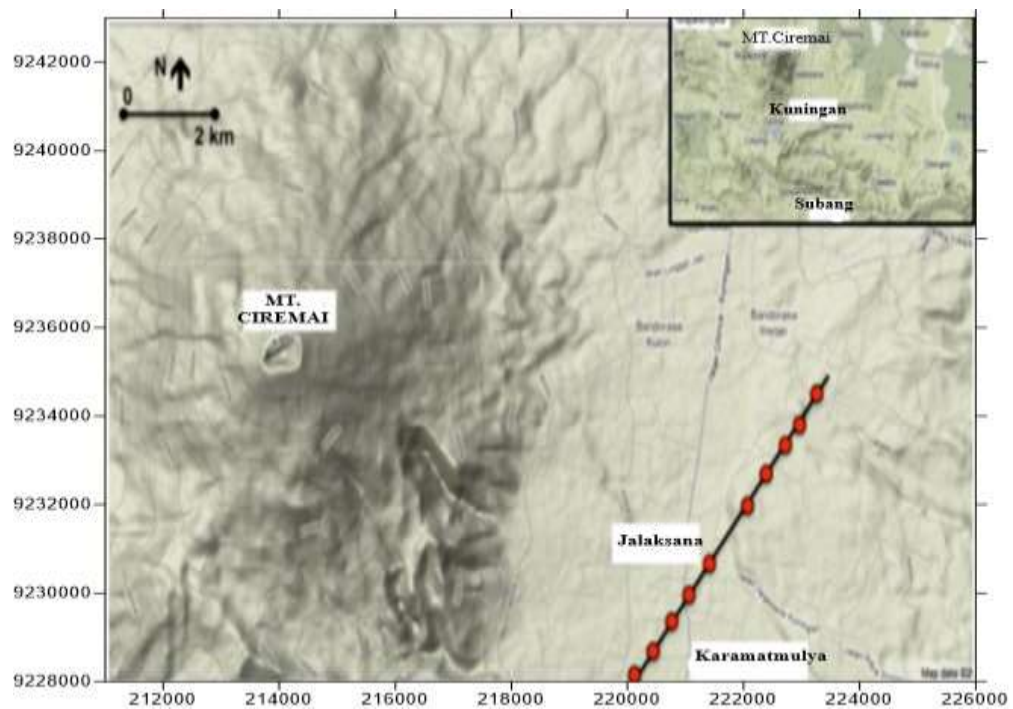


Gambar 9. Diagram Cl-Li-B (Yuda dan Rina, 2022)

2.7 Magnetotellurik Daerah Penelitian

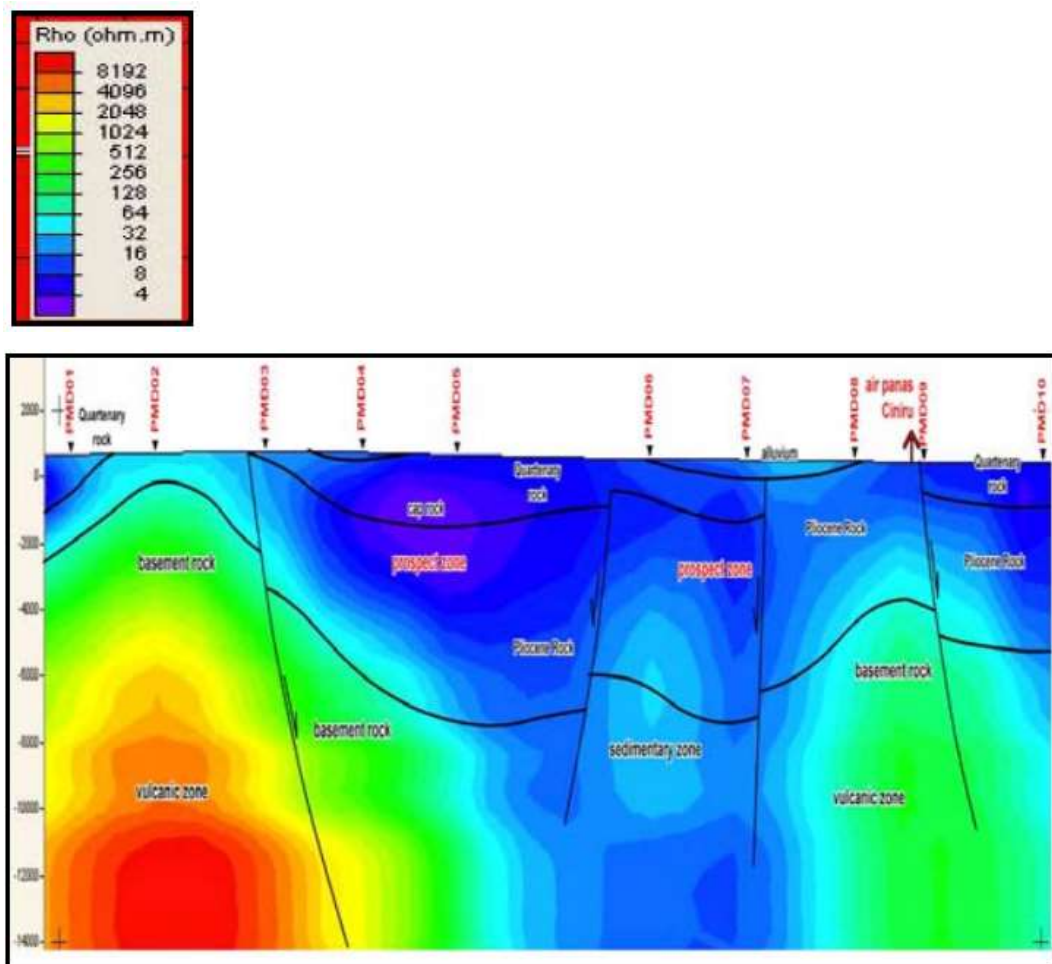
Gunung Ciremai adalah stratovolcano aktif di Indonesia. Empat letusan gunung berapi yang menghasilkan volume lava, piroklastik, dan endapan vulkanik lainnya yang signifikan inilah yang menyebabkan terbentuknya endapan vulkanik yang ditemukan di sekitar Gunung Ciremai. Metode magnetotellurik merupakan salah satu teknik geofisika yang banyak digunakan untuk menunjukkan keberadaan energi panas bumi.

Pendekatan metode magnetotellurik memanfaatkan medan elektromagnetik alami. Survei magnetotellurik memperoleh data deret waktu elektromagnetik (E_x , E_y , H_x , dan H_y) dari komponen bidang horizontal yang diukur pada permukaannya. Rentang frekuensi pengukuran ini adalah 400 Hz hingga 0,0000129 Hz, mewakili durasi 21,5 jam. Rentang frekuensi yang lebih rendah dikaitkan dengan tingkat bawah tanah yang lebih dalam. Data MT terdiri dari fluktuasi medan listrik dan magnet, seperti pada **Gambar 10** terlihat total titik yang diperoleh pada survei ini adalah 10 titik (Sumintadireja, 2011).



Gambar 10. Distribusi data dan jalur MT (Sumintadireja, 2011)

ESDM pada tahun 2010 tentang pemodelan MT inversi 2-D hasil interpretasi ditunjukkan oleh **Gambar 11**. Proses inversi mencapai 15 kali iterasi dengan RMS eror kurang dari 5%. Interpretasi untuk bagian 2-D didasarkan pada nilai resistivitas lapisan, yang bervariasi mulai kurang dari 100 ohm-m sampai lebih dari 1000 ohm-m. Lapisan 1 berkorelasi dengan produk kuarter yang memiliki kandungan air jenuh yang tinggi bahkan pada produk vulkanik muda Gunung Ciremai. Lapisan 2 dengan resistivitas kurang dari 1000 ohm-m menunjukkan zona akuifer yang lebih dalam dan kontak karena tekstur batuan yang berbeda antara produk vulkanik dan sedimen. Lapisan 3 adalah batuan dasar dengan nilai resistivitas lebih dari 1000 ohm-m yang berasosiasi dengan batuan vulkanik dan batuan sedimen teralterasi.



Gambar 11. Penampang MT 2-D dengan model batas tajam (Sumintadireja, 2011)

III. TEORI DASAR

3.1 GGMplus (*Global Gravity Model plus*)

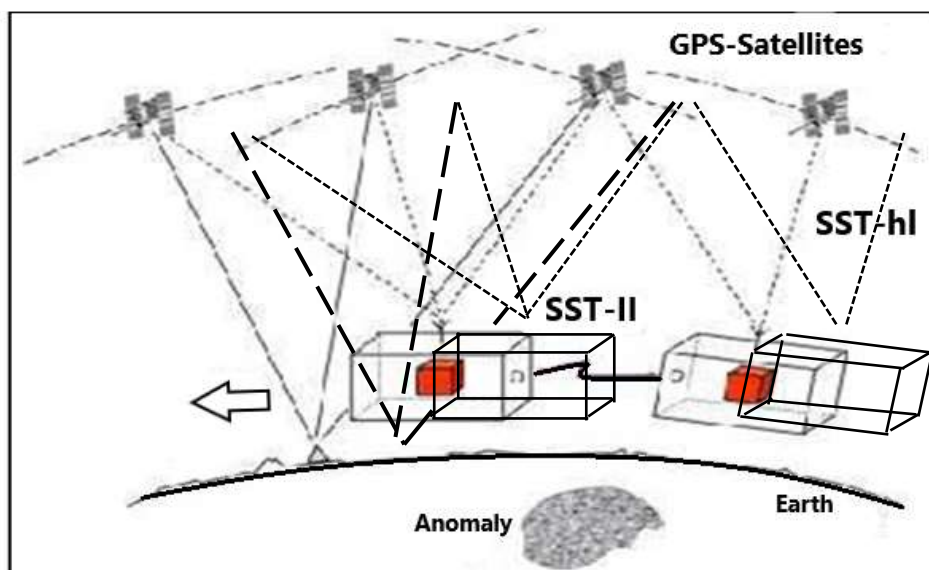
Dengan penambahan data gravitasi topografi beresolusi tinggi yang diperoleh dari data topografi SRTM, model komposit GGMplus (*Global Gravity Model plus*) menyempurnakan model gravitasi sebelumnya berdasarkan pelacakan satelit dan data terestrial (GRACE, GOCE, dan EGM2008). Universitas Curtin di Perth, Australia Barat, dan Universitas Teknik Munich di Jerman berkolaborasi dalam penelitian yang menghasilkan pengembangan model gravitasi GGMplus. Gravity GGMPlus menyediakan data grid untuk percepatan gravitasi, *gravity disturbance*, undulasi *quasigeoid*, dan komponen defleksi vertikal utara-selatan dan barat-timur semuanya disediakan oleh Gravity GGMplus. Jika dibandingkan dengan data pengukuran lapangan, menggunakan data satelit memiliki keuntungan karena gratis.

3.2 Satelit Gravitasi GRACE dan GOCE

Medan gravitasi bumi diukur secara pasif oleh satelit gravitasi GRACE dan GOCE. Melalui penggunaan teknik *Satellite to Satellite Tracking* (SST) dalam kaitannya dengan bumi, pengukuran pasif memanfaatkan respons alami sumber. Untuk menentukan lokasi satelit saat mengukur medan gravitasi bumi, teknik SST memanfaatkan dua satelit, yaitu satelit gravitasi dan satelit Global Positioning System (GPS) (Hinze et al., 2012).

3.2.1 Satelit GRACE

Satelit GRACE adalah pesawat ruang angkasa gravimetri dengan tujuan misi lima tahun untuk menghasilkan model medan gravitasi bumi. Dua satelit identik yang terhubung ke sistem gelombang mikro K-band digunakan oleh satelit GRACE untuk mempelajari medan gravitasi bumi (Tapley et al., 2004). Dengan jarak sekitar 220 km di antara keduanya, kedua pesawat luar angkasa itu mengelilingi Bumi dengan arah yang sama. Orbit satelit GRACE setinggi 485–300 km. Mode SST *high-low* (h-l) adalah dasar untuk pengukuran yang dilakukan dengan satelit GRACE. Seperti diilustrasikan pada **Gambar 12**, mode SST *low-low* (l-l) menampilkan posisi satelit GRACE pada orbit yang sama dan berada di bawah satelit GPS, sedangkan mode SST tinggi-rendah menunjukkan posisi satelit GRACE berada di bawah satelit GPS.



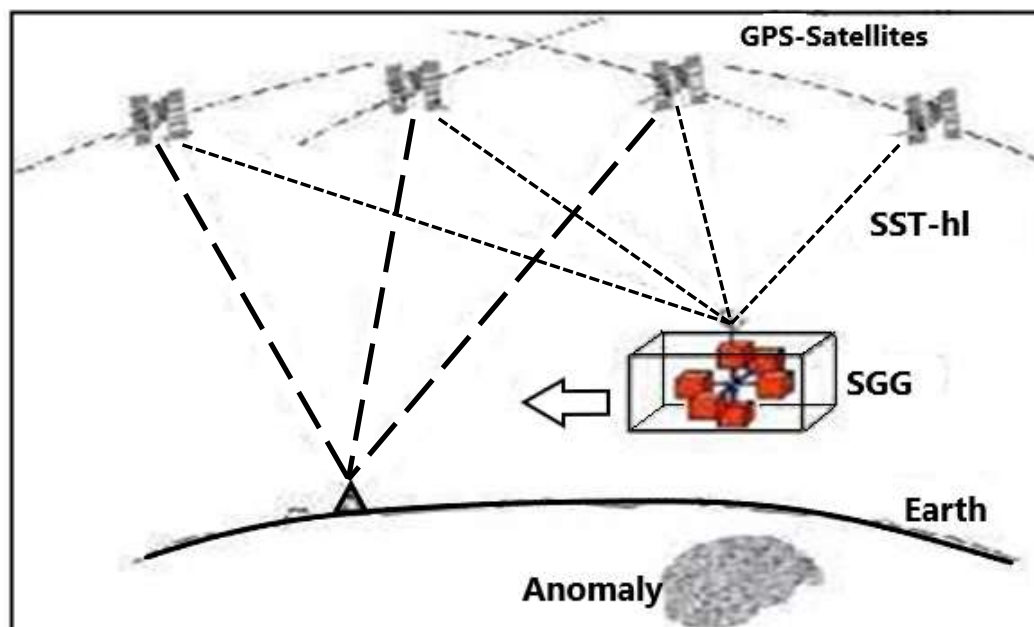
Gambar 12. Ilustrasi gerak dan posisi satelit GPS dengan satelit GRACE dan antar satelit GRACE (Johannessen, 1999)

Gagasan di balik pengukuran satelit GRACE adalah untuk melacak perubahan jarak yang terjadi pada satelit GRACE untuk menemukan perubahan medan gravitasi bumi. Jarak antara dua pesawat ruang angkasa GRACE akan bertambah jika satelit GRACE depan tiba di sumber anomali lebih awal dari satelit GRACE belakang.

Akibatnya, satelit GRACE bagian depan akan mengalami tarikan gravitasi yang lebih kuat. Ketika satelit GRACE belakang mendekati sumber anomali dan kedua satelit berada di antara sumber anomali, jarak di antara keduanya akan tertutup. Pemisahan antara satelit meningkat saat pesawat ruang angkasa GRACE depan menjauh dari sumber anomali dan satelit GRACE belakang mendekati sumber anomali. Ketika kedua satelit berada jauh dari sumber anomali, maka kedua satelit GRACE akan berada pada ketinggian yang sama (Bettadpur, 2015).

3.2.2 Satelit GOCE

Dengan ketinggian orbit 250 km dan resolusi spasial 100 km, satelit GOCE berupaya mengukur medan gravitasi bumi dengan ketelitian 1 mGal dan geoid dengan ketelitian 1 cm (Drinkwater et al., 2003). Gradiometri Gravitasi Satelit (SGG) dan mode *high-low* (h-l) SST membentuk dasar untuk pengamatan satelit GOCE. SST *high-low* (hl) mengacu pada letak satelit GOCE yang berada di bawah satelit GPS seperti terlihat pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Ilustrasi SST satelit GPS dengan satelit GOCE (Johannessen, 1999)

Gradiometer digunakan oleh satelit GOCE untuk mengukur medan gravitasi bumi. Tiga pasang akselerometer identik ditempatkan pada tiga lengan ortogonal membentuk gradiometer. Hal ini memungkinkan pengukuran simultan dari enam komponen medan gravitasi yang berbeda namun terkait. Sinyal gravitasi mewakili tarikan medan gravitasi variabel yang disebabkan oleh adanya pegunungan, lembah, zona subduksi, dan ketidakhomogenan mantel. Sinyal yang diukur adalah variasi percepatan gravitasi di dalam pesawat ruang angkasa (Drinkwater et al., 2003).

3.3 Metode Gayaberat

Salah satu teknik untuk memvisualisasikan pemetaan bawah permukaan bumi adalah dengan metode gravitasi. Dasar pencitraan bawah permukaan adalah validasi kerapatan massa batuan. Metode gravitasi menurut Sarkowi (2014) adalah metode geofisika yang didasarkan pada pengamatan perubahan medan gravitasi bumi. Variasi kerapatan batuan dasar, jenis batuan bawah permukaan, variasi jarak antara permukaan bumi dan intinya, dan variasi medan di permukaan bumi semuanya dapat mempengaruhi gravitasi permukaan bumi.

Metode gayaberat didasarkan pada Hukum II Newton yang menyatakan bahwa besar kecilnya gaya tarik-menarik antara dua benda di alam pada dasarnya ditentukan oleh massanya (Djujun, 2005). Komponen vertikal percepatan gravitasi diukur dengan menggunakan metode gayaberat. Bentuk bumi yang tidak bulat menghasilkan variasi percepatan yang dibawa oleh gravitasi tergantung di mana Anda berada. Posisi bumi dalam tata surya, kerapatan massa batuan di bawah permukaan bumi, ketinggian tempat pengukuran, perbedaan garis lintang, perbedaan ketinggian atau topografi, perbedaan tempat pengukuran, dan faktor lain seperti bangunan dan penghalang lainnya semuanya dapat memengaruhi perbedaan akselerasi di bumi (Untung 2001).

3.4. Konsep Dasar Metode Gaya Berat

3.4.1 Gaya Gravitasi (Hukum Newton I)

Menurut hukum Newton, prinsip dasar teori gravitasi, yang menjelaskan gaya tarik-menarik antara dua massa benda, m_1 dan m_2 , yang dipisahkan oleh jarak r atau jarak, dinyatakan sebagai berikut (Serway, 2009) :

$$\vec{F}(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}, G = 6.67 \times 10^{-11} \quad (1)$$

Di mana:

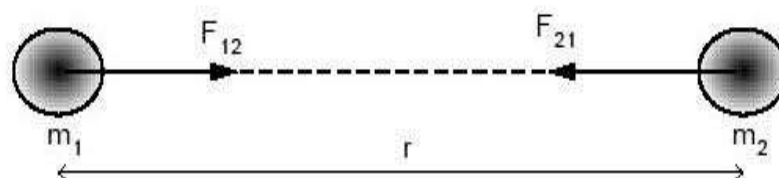
$F(r)$ = Gaya tarik menarik (N)

m_1, m_2 = Massa benda 1 dan 2 (kg)

r = Jarak antara dua buah benda (m)

G = Konstanta gravitasi bumi ($G = 6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg s}^{-2}$)

Gambar 14 mengilustrasikan bagaimana hukum kedua Newton menggambarkan gaya tarik-menarik antara dua benda.



Gambar 14. Gaya tarik menarik antara dua buah benda (Grandis, 2009)

Menurut Hukum Pertama Newton, kecepatan atau percepatan suatu benda tidak akan berubah jika tidak ada gaya eksternal yang bekerja padanya. Dengan kata lain, jika ada sesuatu yang diam, ia akan tetap diam dan benda yang bergerak akan terus bergerak. Selain itu, objek yang bergerak akan mempertahankan kecepatannya saat ini (Halliday, 2005).

3.4.2 Percepatan Gravitasi (Hukum Newton II)

Hubungan antara gaya dan percepatan didefinisikan oleh Newton. Menurut persamaan gerak kedua Newton, gaya adalah hasil dari massa dikalikan dengan percepatan.

$$F = m \cdot a \quad (2)$$

Dimana percepatan benda bermassa m yang dihasilkan oleh tarikan benda bermassa M pada jarak r dapat ditulis sebagai berikut:

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

Ketika percepatan gaya gravitasi bumi diperhitungkan, persamaannya menjadi:

$$g = \frac{F}{m} \quad (4)$$

$$g = \frac{G \frac{m_1 m_2}{R^2}}{m} \quad (5)$$

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (6)$$

Di mana,

a = Percepatan (m/s^2)

g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

M = Massa bumi (kg)

m = Massa benda (kg)

F = Gaya gravitasi (Newton)

R = Jari-jari bumi (mmeter)

Menurut persamaan di atas, besar percepatan gravitasi (g) berbanding terbalik dengan kuadrat jari-jari bumi (r) dan berbanding lurus dengan massa bumi (M). Percepatan yang disebabkan oleh gravitasi pada mulanya diukur oleh Galileo, dan beginilah penjelasannya:

$$1 \text{ Gall} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ (dalam c.g.s)} \quad (7)$$

Dalam kegiatan eksplorasi, satuan anomali gravitasi dinyatakan dalam miligal (mGall):

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

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

$$1 \text{ mGall} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \quad (9)$$

Gravitasi dinyatakan dalam satuan $\mu\text{m/s}^2$ atau g.u. (satuan gaya berat) dalam satuan m.k.s (Optonovrilna, 2009).

3.4.3 Potensial Gravitasi

Energi yang dibutuhkan untuk mentransfer massa dari satu lokasi ke lokasi lain dikenal sebagai potensial gravitasi. Dalam sistem ruang, suatu benda dengan massa tertentu menciptakan medan potensial di sekitarnya. Ketika medan potensial konservatif, usaha yang dilakukan dalam medan gravitasi hanya bergantung pada posisi awal dan akhir yang artinya medan gravitasi tidak bergantung lintasan tempuhnya (Rosid, 2005).

Upaya yang diperlukan untuk memindahkan satu massa (m) dari jarak tak terhingga ke lokasi tertentu dalam medan gravitasi bumi dengan massa M adalah potensi pada titik tertentu di medan gravitasi, dan direpresentasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V &= Gm \int_0^r \frac{dr}{r^2} \\ V &= G \frac{m}{r^2} r \\ V &= G \frac{m}{r} \end{aligned} \quad (10)$$

di mana:

V = Potensial gravitasi; M = Massa benda (kg); r = Jarak (m); G = Konstanta universal gravitasi ($6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$) (Blakely, 1996).

3.4.4 Rapat Massa Batuan

Faktor utama dalam menghitung nilai percepatan gravitasi adalah kerapatan massa atau densitas batuan. Banyak faktor, termasuk kerapatan massa, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-pori batuan, tekanan yang menyebabkan pemadatan, dan pelapukan batuan, mempengaruhi densitas batuan (Kirbani, 2001).

Tabel 3 menampilkan fluktuasi densitas batuan.

Tabel 3. Nilai fluktuasi densitas batuan (Telford, dkk., 1990)

Jenis Batuan	Batas (g/cc)	rata-rata (g/cc)	Jenis Batuan	Batas (g/cc)	rata-rata (g/cc)
Batuan sedimen	1,96-2,00	1,98	Batuan Metamorf	2,39-2,90	2,64
aluvium			Schist		
Clay	1,63-2,60	2,21	Gneiss	2,59-3,00	2,80
Gravel	1,70-2,40	2,00	Phylite	2,68-2,80	2,74
Loess	1,40-1,93	1,64	Slate	2,70-2,90	2,79
Silt	1,80-2,20	1,93	Granulite	2,52-2,7	2,65
Soil	1,20-2,40	1,92	Amphibolite	2,90-3,04	2,96
Sand	1,70-2,30	2,00	Eclogite	3,20-3,54	3,37
Sandstone	1,61-2,76	2,35	Shale	1,77-3,20	2,40
Limestone	1,93-2,90	2,55	Dolomit	2,28-2,90	2,70
Chalk	1,53-2,60	2,01	Halite	2,10-2,60	2,22
Glacier Ice	0,88-0,92	0,90			

3.5 Koreksi – Koreksi dalam Metode Gaya Berat

Nilai percepatan gravitasi di permukaan bumi bervariasi ketika menggunakan metode gaya berat untuk mengukurnya. Ini disebabkan oleh bentuk ellipsoid Bumi, bukan karena bentuknya yang bulat. Garis lintang, ketinggian, medan, pasang surut, dan perubahan kerapatan massa atau densitas batuan di bawah permukaan adalah

beberapa variabel yang mungkin memengaruhi besarnya percepatan yang disebabkan oleh gravitasi. Untuk mengurangi gangguan, hasil pengukuran yang dilakukan di lapangan dengan menggunakan metode gaya berat harus dikoreksi terlebih dahulu. Adapun koreksi-koreksi pada metode gaya berat yaitu:

3.5.1 Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Karena bentuk bumi ellipsoid atau bentuk non-bulatnya berpengaruh terhadap gravitasi di berbagai lintang geografis, maka perlu dilakukan koreksi gravitasi di setiap lintang (spheroid dan geoid). Ada dua metode untuk koreksi lintang yaitu dengan menggunakan IGRF 67 (untuk derajat garis lintang) dan IGRF 84 (untuk radian).

IGRF 67:

$$g_{\theta} = 978031.8 (1 + 0.0053924 \sin^2\theta - 0.0000059 \sin^2 2\theta) \quad (11)$$

IGRF 84:

$$g_{\theta} = 978032.7 (1 + 0.0053024 \sin^2\theta - 0.0000058 \sin^2 2\theta) \quad (12)$$

3.5.2 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Lowrie (2007) menegaskan bahwa ketinggian titik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai gravitasi yang diamati, dengan nilai titik yang lebih tinggi menghasilkan nilai gravitasi yang diamati lebih rendah dan titik pengamatan yang lebih rendah menghasilkan nilai gravitasi yang diamati lebih besar. Penyesuaian udara bebas yang disediakan dalam perhitungan persamaan untuk perbedaan gravitasi antara mereka yang berada di permukaan laut rata-rata dan yang berada di elevasi h (meter) (Reynolds, 1997):

$$\partial g_F = g_h - g_0 = - \left(\frac{2g_0 h}{R} \right) = 0.3086h \text{ mGal} \quad (13)$$

di mana:

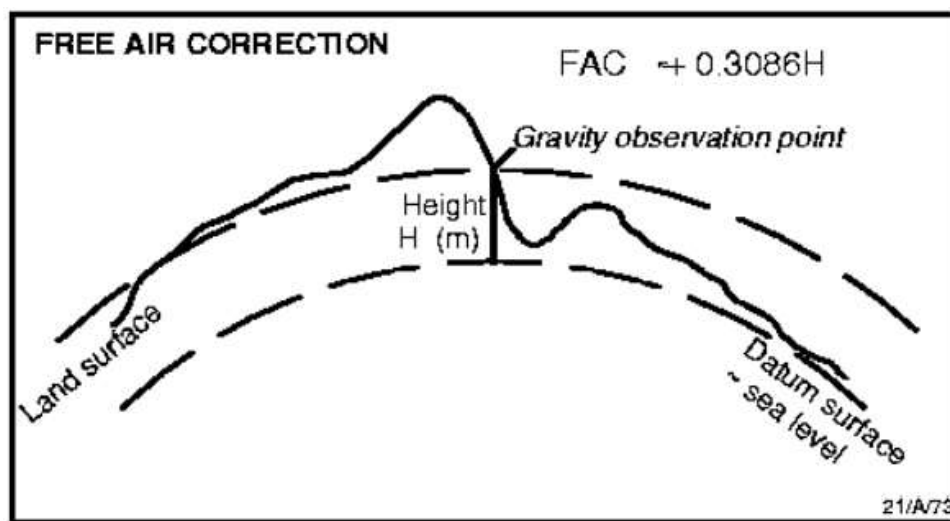
$g_0 = 981785 \text{ mGal}$, dan $R = 6371000 \text{ meter}$

Sehingga, koreksi udara bebas mengikuti rumus berikut:

$$FAC = 0.3086 \cdot h \text{ (mGal)} \quad (14)$$

dimana h adalah ketinggian stasiun pengukuran dalam meter. Sedangkan FAA, atau anomali udara bebas, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$FAA = g_{obs} - g_{intang} + FAC \quad (15)$$



Gambar 15. Koreksi udara bebas terhadap gaya berat

3.5.3 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Pengaruh massa benda antara stasiun dan bidang datum yang belum diperkirakan pada koreksi udara bebas menjadi alasan koreksi Bouguer. Menggunakan strategi yang melibatkan pendekatan benda dalam bentuk lempengan tak berujung dengan benda lempengan yang memiliki ketebalan dan kerapatan yang sama, maka koreksi Bouguer dilakukan. Rumus untuk koreksi Bouguer adalah:

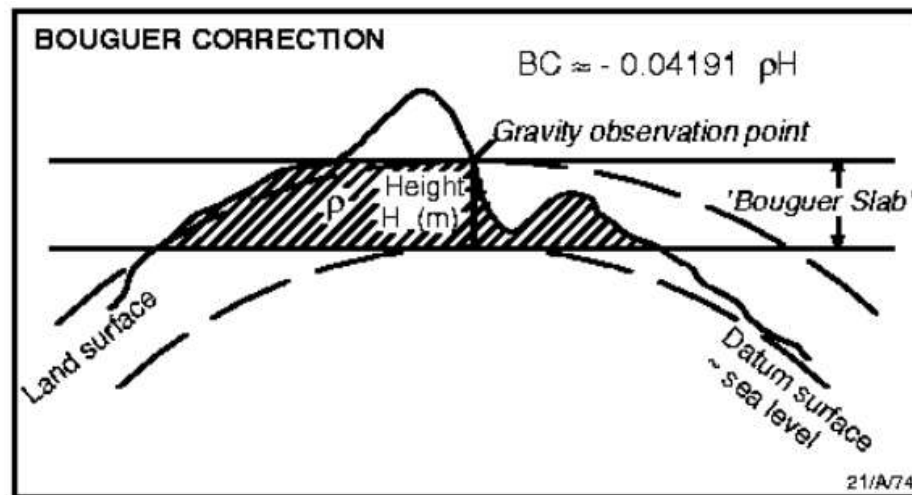
$$BC = 2\pi\gamma\rho h$$

$$BC = 0.04192 \rho h \quad (16)$$

di mana:

ρ = densitas, dan h = ketinggian/elevasi

Konsep koreksi *Bouguer* dapat dilihat pada **Gambar 16**.



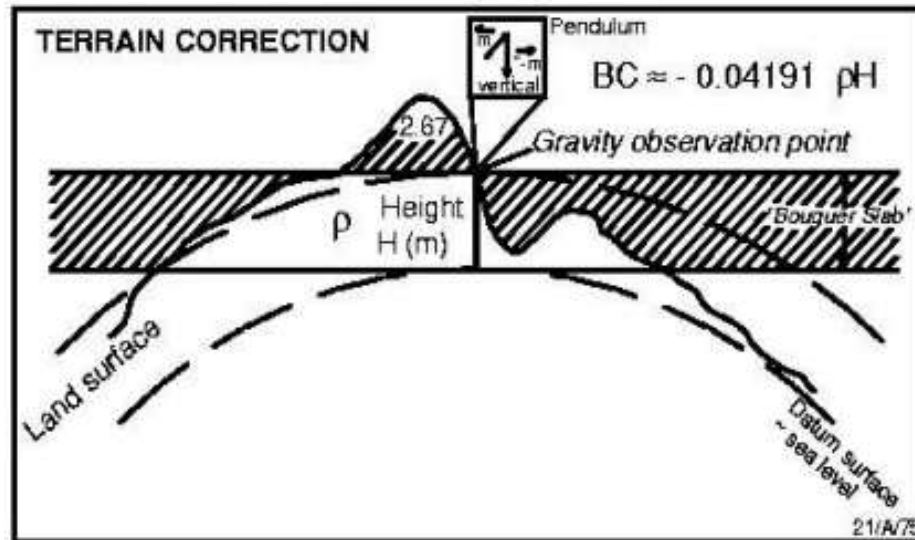
Gambar 16. Koreksi *Bouguer* terhadap gayaberat

Mengikuti penerapan koreksi *Bouguer* dan anomali udara bebas, yang juga disebut sebagai Anomali *Bouguer* Sederhana, anomali gravitasi berikut dapat dihasilkan:

$$SBA = FAA = BC \quad (17)$$

3.5.4 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Pada titik pengukuran memiliki topografi yang tidak beraturan, sehingga bisa mempengaruhi nilai gaya beratnya. Contohnya jika terdapat bukit di sekitar pengukuran, maka bukit tersebut memiliki medan yang dapat menekan *gravimeter* untuk menaikkan percepatan gaya berat. Sebaliknya, adanya lembah akan memberikan efek penurunan hasil pengukuran gaya berat. Koreksi medan didapatkan dengan melakukan pengolahan data menggunakan *hammer chart* (Telford, dkk., 1990). **Gambar 17** di bawah mengilustrasikan bagaimana koreksi medan bekerja dalam bentuknya yang paling dasar.



Gambar 17. Koreksi medan (*terrain correction*) terhadap gaya berat

3.5.5 Perhitungan Densitas Permukaan *Bouguer* Menggunakan Metode Parasnis

Anomali gravitasi digunakan untuk menghitung kerapatan massa, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$CBA = g_{obs} - gL + 0.3085h - 2\pi\gamma\rho h \quad (18)$$

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

$$(g_{obs} - gL + 0.3085h) = (2\pi\gamma h) \rho \text{ atau } y = \rho x \quad (19)$$

3.6 Analisis Spektrum

Untuk menghitung lebar jendela dan kedalaman anomali gaya berat, dilakukan analisis spektrum. Dengan memanfaatkan transformasi Fourier dari lintasan yang diidentifikasi pada peta kontur Anomali *Bouguer* Lengkap, analisis spektrum dilakukan. Menurut Kadir (2000), transformasi Fourier pada dasarnya mereduksi

atau menyusun kembali gelombang arbitrer menjadi serangkaian gelombang sinus dengan frekuensi yang berubah, di mana total gelombang sinus mewakili bentuk gelombang aslinya. Amplitudo gelombang sinus ditampilkan sebagai fungsi frekuensi untuk memungkinkan analisis tambahan. Transformasi Fourier menghasilkan hubungan antara gelombang $s(t)$, yang akan disebut gelombang sinus (input), dan $S(f)$, memungkinkan persamaan berikut dituliskan sebagai berikut:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (20)$$

Di mana $j = \sqrt{-1}$

Menurut metode gaya berat, transformasi fourier dari potensi gravitasi terukur pada bidang horizontal menghasilkan spektrum berikut (Blakely, 1996).

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{R}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0 - z_1)}}{|k|} \quad (21)$$

Dalam persamaan ini, $Z_1 > Z_0$, $|k| \neq 0$, U adalah potensial gaya berat, μ adalah anomali kerapatan massa, γ adalah konstanta gravitasi, dan r adalah jarak.

Persamaan $g = \Delta U$ menghubungkan potensial gravitasi dengan percepatan gravitasi. Turunan derivatif dari gaya gravitasi potensial massa titik menentukan gerak vertikalnya karena gravitasi:

$$g_z = Gm \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (22)$$

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

$$F(g_z) = Gm \partial z \partial F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (24)$$

Transformasi Fourier pada lintasan yang dimaksud adalah:

$$F(g_z) = 2\pi Gm e^{|k|(z_0 - z_1)}, \quad z_1 > z_0 \quad (25)$$

Karena tidak ada korelasi antara nilai gravitasi dan distribusi kerapatan massa acak, $m=1$ dan transformasi Fourier anomali gravitasi adalah sebagai berikut:

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (26)$$

Di mana A adalah amplitudo serta C merupakan konstanta.

Dengan melogaritma persamaan $A = C e^{|k|(z_0 - z_1)}$ dimungkinkan untuk menentukan hubungan antara amplitudo (A), bilangan gelombang (k), dan kedalaman ($z_0 - z_1$), memastikan bahwa bilangan gelombang k berbanding lurus dengan amplitudo spektral.

$$\ln A = \ln 2\pi G m e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (27)$$

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln \ln C \quad (28)$$

Dimungkinkan untuk menulis persamaan sebelumnya sebagai persamaan garis lurus, dimana:

$$y = mx + c \quad (29)$$

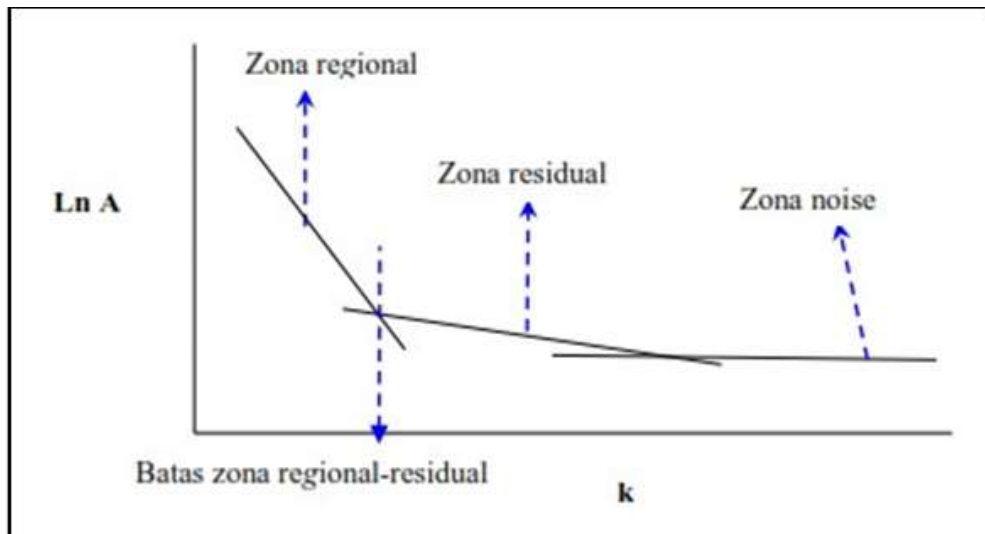
Dimana $|k|$ berfungsi sebagai sumbu x , $\ln A$ berfungsi sebagai sumbu y , dan $(z_0 - z_1)$ berfungsi sebagai kemiringan gradien. Oleh karena itu, kedalaman bidang yang dalam dan dangkal ditentukan oleh kemiringan garis. Bila digunakan sebagai sumbu x , bilangan gelombang $|k|$ didefinisikan memiliki besaran $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan satuan *cycle/meter* di mana λ adalah panjang gelombang. Sehingga hubungan panjang gelombang λ dengan k menurut persamaan (Blakely 1996):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{n \cdot \Delta x} \quad (30)$$

Nilai $\lambda = n \cdot \Delta x$, sehingga n ditentukan sebagai lebar jendela, maka lebar jendela dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$n = \frac{2\lambda}{\Delta x} \quad (31)$$

Di mana domain ruang *Fast Fourier Transform* (FFT), dan kc adalah bilangan gelombang *cut off*. Dalam proses ini akan terbentuk kurva hubungan antara f (frekuensi) dan k (bilangan gelombang) seperti pada **Gambar 18**.



Gambar 18. Hubungan kurva Ln A dengan k (Blakely, 1996)

Nilai frekuensi meningkat dengan meningkatnya nilai k . Frekuensi yang sangat rendah diyakini berasal dari anomali regional, sedangkan frekuensi tinggi diyakini berasal dari sumber anomali residual. Hubungan antara bilangan gelombang k dan frekuensi f adalah $k = 2\pi f$.

3.7 Moving Average Filter

Anomali *Bouguer* merupakan gabungan dari beberapa sumber anomali dan struktur karena nilai gravitasi yang diukur di permukaan merupakan penjumlahan dari berbagai jenis anomali dan struktur yang memanjang dari permukaan hingga inti bumi. Superposisi anomali residual atau lokal dan regional dikenal sebagai anomali *Bouguer*. Sementara anomali residual dicirikan oleh anomali frekuensi tinggi, dan anomali regional dicirikan oleh frekuensi rendah dan terkait dengan kondisi geologi umum di daerah yang bersangkutan. Memisahkan anomali regional dan residual penting untuk memastikan bahwa anomali yang diperoleh konsisten dengan anomali target yang dicari. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan anomali yang terkait dengan prediksi kondisi geologis dan untuk meningkatkan resolusi sebelum dievaluasi secara kuantitatif. Interpretasi kualitatif gaya berat adalah tujuan lain dari

pemisahan anomali. Menggunakan filter *moving average* adalah salah satu teknik untuk memisahkan anomali. Nilai anomali dirata-ratakan dalam metode *Moving average*. Anomali regional dihasilkan sebagai hasil dari rata-rata ini, dan anomali residual dihasilkan dengan mengurangkan data dari pengukuran gaya berat dengan anomali regional.

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (32)$$

keterangan:

i = nomor stasiun pengukuran

N = lebar jendela

Δg_{reg} = besarnya anomali regional

Harga pada suatu titik dapat ditentukan dengan merata-ratakan semua nilai dalam kotak persegi, dengan titik tengah berfungsi sebagai titik di mana harga dihitung, sedangkan *moving average* diterapkan pada peta dua dimensi. Misalnya, jika lebar jendela *moving average* adalah 3, maka:

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{9} \sum_{N=1}^9 \Delta g(n) \quad (33)$$

Sehingga anomali residual dapat dihitung dengan mengurangkan anomali *Bouguer* dengan anomali regionalnya (Diyanti, 2014):

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (34)$$

3.8 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual

Setelah dilakukan koreksi, diperoleh data anomali *Bouguer*. Nilai keseluruhan dari anomali residual dan regional, dinyatakan sebagai anomali *Bouguer*, sehingga dapat dinyatakan secara sistematis sebagai berikut:

$$g_{Bouguer} = g_{reg} + g_{res} \quad (35)$$

Di mana $g_{Bouguer}$ merupakan nilai anomali *Bouguer*, g_{reg} merupakan nilai anomali regional dan g_{res} merupakan nilai anomali residual.

Oleh karena itu, perlu dilakukan pemisahan anomali regional dan residual dengan cara mengurangi nilai anomali *Bouguer* dari anomali regional, sehingga diperoleh anomali residual yang mewakili objek anomali pada kedalaman yang dangkal.

$$g_{res} = g_{Bouguer} - g_{reg} \quad (36)$$

Secara umum, beberapa pendekatan akan digunakan dalam proses pemisahan regional dan residual untuk menghasilkan nilai anomali regional, seperti filter *low pass*, *Trend Surface Analysis* atau *Polynomial Fitting*, dan *Upward Continuation*.

Pada intinya, metode pemisahan digunakan untuk mengkategorikan anomali berdasarkan frekuensi yang terhubung dengan kedalaman sumber anomali. Sementara anomali residual terkait dengan frekuensi tinggi, anomali regional terkait dengan frekuensi rendah. Dengan penggunaan metode pemisahan ini, dapat diperoleh data anomali regional dan residual yang secara akurat mencerminkan kondisi bawah permukaan (Sari, 2012).

3.9 First Horizontal Derivative (FHD)

Pergeseran nilai anomali gravitasi dari satu lokasi ke lokasi lain dengan jarak tertentu dikenal sebagai turunan horizontal dalam gravitasi. Tepi benda sering muncul pada turunan horizontal dari anomali gravitasi akibat benda. Untuk menemukan batas tipikal berupa kerapatan horizontal dengan menggunakan data gaya berat, pendekatan *Horizontal Derivative* dapat digunakan. Dimungkinkan untuk mengkarakterisasi struktur bawah tanah dangkal dan dalam menggunakan teknik ini. Menurut Cordell dan Graunch (1985), amplitudo turunan horizontal terlihat seperti berikut :

$$HG^{1ST} = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (37)$$

Di mana $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ merupakan turunan horizontal gaya berat pada arah x dan y dan satuan HG dinyatakan dalam mGal.m^{-1} .

3.10 *Second Vertical Derivative (SVD)*

Saat mencari sumber anomali dangkal atau lokal, metode *Second Vertical Derivative* dapat digunakan. Menurut Saibi dkk. (2006), pendekatan ini sangat baik untuk menentukan diskontinuitas struktur bawah permukaan, khususnya keberadaan sesar di wilayah survei.

Dimungkinkan untuk mengembangkan pendekatan *Second Vertical Derivative* yang didasarkan pada turunan persamaan *Laplace* untuk anomali gaya berat di permukaan:

$$\nabla^2 \times \Delta g = 0 \quad (38)$$

Atau:

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

Akibatnya, turunan *Second Vertical Derivative* dapat ditulis seperti berikut ini:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} = -\left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2}\right) \quad (40)$$

Untuk persamaan pada data 1-D (data penampang) ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (41)$$

Second Vertical Derivative dari anomali gaya berat di permukaan setara dengan nilai negatif dari derivatid horizon orde kedua, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan SVD dan 1-D di atas. Karena turunan horizontal lebih mudah dan praktis untuk dikerjakan, berarti bahwa anomali *Second Vertical Derivative (SVD)* dapat

melewatinya. Anomali *Second Vertical Derivative* untuk data anomali gaya berat pada grid reguler dapat diperoleh dengan melakukan *filtering*, di mana persamaan konvolusi dituliskan dengan:

$$\Delta G_{svd}(\Delta x, \Delta y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(x, y) F(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy \quad (42)$$

Dimana Δg adalah input data untuk anomali gravitasi, dan F adalah filter *Second Vertical Derivative* menurut persamaan di atas. **Tabel 4** kemudian menampilkan filter *Second Vertical Derivative* (SVD) menggunakan operator Elkins.

Tabel 4. Operator Elkins pada filter SVD (Sarkowi, 2010).

SVD Tipe Elkins (1951)				
0.00	-0.0833	0.00	-0.0833	0.00
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.00	-0.0334	-1.0668	-0.0334	0.00
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.00	-0.0833	0.00	-0.0833	0.00

Konsep di balik pendekatan ini adalah menganggap kontak densitas antara dua strata batuan sebagai turunan kedua nilai anomali *Bouguer* sama dengan nol, dalam hal ini kontak tersebut dapat dianggap sebagai struktur sesar atau intrusi (Sarkowi, 2010). Nilai anomali SVD dengan ciri-ciri berikut dapat digunakan untuk mendeteksi struktur patahan atau patahan naik atau turun:

Untuk struktur patahan naik:

$$\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \max \right| < \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \min \right| \quad (43)$$

Sedangkan untuk sesar turun:

$$\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \max \right| > \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \min \right| \quad (44)$$

Kurva anomali gaya berat, FHD, dan SHD dapat digunakan untuk menentukan arah patahan (dip). Kemiringan kurva anomali SVD dan gaya berat akan menentukan arah (dip) sesar. Arah patahan akan menurun ke kiri bawah jika kurva anomali gaya berat dan kurva SVD keduanya menurun ke arah kiri, dan arah patahan akan menurun ke kanan bawah jika keduanya menurun ke arah kanan bawah.

3.11 *Second Horizontal Derivative (SHD)*

Sifat *high-pass* filter pada *Second Horizontal Derivative* (SVD) dapat mengkarakterisasi anomali residual yang berasosiasi dengan struktur dangkal yang dapat digunakan untuk menentukan jenis patahan turun atau naik. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung nilai SHD:

$$SHD = g(i+1) - 2g(i) + g(i-1) : \Delta x^2 \quad (45)$$

SHD adalah untuk derivatif horizontal kedua, g adalah nilai anomali dalam mGal, dan Δx adalah perbedaan jarak di lintasan dalam meter.

Analisis *Second Horizontal Derivative* (SVD) dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis kenampakan geologi bawah permukaan, seperti patahan naik atau turun, dan untuk mengidentifikasi penyebabnya. Pendekatan gradien horizontal merupakan salah satu cara untuk melakukan analisis *Second Horizontal Derivative*. Dari data gaya berat, metode gradien horizontal dapat digunakan untuk menentukan di mana batas kontak kontras densitas horizontal berada (Cordei, 1985).

3.12 **Inversi Data**

Proses inversi adalah suatu metode pengolahan data lapangan yang menggunakan metode statistik dan matematis untuk memecahkan masalah untuk mendapatkan data yang dapat digunakan untuk memetakan distribusi fisis bawah permukaan.

Analisis data lapangan dilakukan selama fase inversi dengan pencocokan kurva antara data lapangan dan model matematika. Proses inversi digunakan untuk membuat estimasi karakteristik fisik batuan yang tidak diketahui. Parameter model (M) dan jumlah data (N) selalu relevan dalam inversi, dan rasio keduanya menentukan bagaimana masalah inversi dikategorikan dan diselesaikan. *Overdetermination* terjadi ketika jumlah parameter model (MN) lebih kecil dari jumlah data lapangan (N). Menggunakan pencocokan (*best fit*) dengan data lapangan adalah solusinya. Disebut sebagai *problem underdetermined* ketika jumlah parameter yang dapat dicari melebihi jumlah data. Tetapi jika banyak model sesuai dengan datanya, ini disebut sebagai *non-uniqueness* (Supriyanto, 2007).

Pemodelan inversi (*inversion modelling*) merupakan suatu metode dalam memodelkan bawah permukaan dari data hasil pengukuran. Parameter model untuk simulasi ini diturunkan langsung dari data pengukuran. Untuk menentukan informasi sistem berdasarkan pengamatan sistem, inversi adalah perhitungan matematis dan statistik. (Grandis, 2009).

Persamaan dapat ditulis sebagai matriks menggunakan perkalian berikut dalam keadaan ketika fungsi yang menghubungkan data ke parameter model adalah linier:

$$d = \underline{A} m \quad (46)$$

Atau

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_M \end{bmatrix} \quad (47)$$

Di mana A adalah matriks (N x M), juga dikenal sebagai matriks kernel. Matriks A pada dasarnya berfungsi sebagai fungsi *forward modeling* tanpa komponen parameter model. Berikut adalah estimasi solusi inversi linier dari parameter model:

$$m = [\underline{A}^T \underline{A}]^{-1} \underline{A}^T d \quad (48)$$

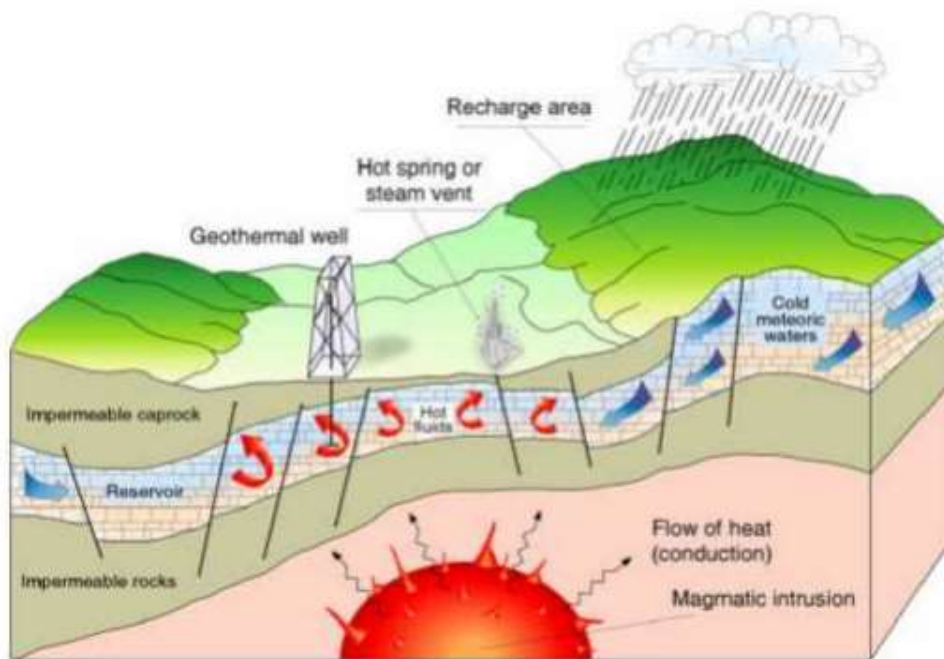
Bentuk penampang objek anomali berada pada arah x dan z dalam pemodelan gravitasi untuk teknik pemodelan 2-D, di mana seharusnya tetap atau sama sepanjang arah struktur. Media didiskritisasi menjadi grid atau blok berukuran seragam (homogen) dengan kerapatan berbeda untuk menggambarkan distribusi kerapatan massa dalam dua dimensi. Karena geometri grid adalah tetap dan diketahui, sehingga rapat massa setiap blok berfungsi sebagai parameter model dan dapat dihitung menggunakan pemodelan inversi linier (Grandis, 2009).

3.13 Sistem Panasbumi

Secara umum, sistem panas bumi dianggap sebagai pergerakan panas di dalam area terisolasi di kerak bumi. Reservoir menerima perpindahan panas dari sumber panas (*heat source*) (Hochstein dan Browne, 2000).

Secara umum, komposisi sistem panas bumi yang ideal terdiri dari batuan penutup yang dihasilkan dari lempung sebagai hasil dari proses alterasi hidrotermal yang disebabkan oleh interaksi fluida dan perpindahan panas dari reservoir, sehingga batuan bersifat impermeabel seperti mineral argilitik. Energi panasbumi (*heat source*) dihasilkan oleh magma, yang memanaskan batuan di sekitarnya.

Struktur seperti retakan atau patahan memungkinkan air permukaan memasuki pori-pori batuan; lokasi di mana air permukaan masuk dikenal sebagai daerah resapan. Air akan menembus batuan yang dipanaskan (*conductive heat*), menciptakan gerakan konveksi fluida hidrotermal. Cairan yang dipanaskan kemudian secara konvektif mentransmisikan panas ke batuan di sekitarnya. Ketika suhu naik, volume dan tekanan naik bersamanya. Cairan yang dipanaskan akan menekan batuan di sekitarnya dalam upaya mencari jalan keluar dan mengurangi tekanan. Cairan kemudian dapat keluar sebagai manifestasi permukaan.



Gambar 19. Sistem Panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004)

Di bagian tepi lempeng, di mana gradien panas bumi sering memiliki rentang suhu yang lebih tinggi daripada suhu rata-rata, sistem panas bumi sangat umum dan dapat ditemukan di daerah dengan gradien panas bumi yang cukup normal (Dickson dan Fanelli, 2003).

Sistem panas bumi, menurut Suharno (2010), diatur dengan adanya:

1. Sumber panas bersifat plutonik,
2. Batuan berpori atau reservoir yang menampung uap panas yang terperangkap,
3. Lapisan penutup terbuat dari batu lempung,
4. Adanya struktur geologi yang meliputi patahan, keruntuhan, rekahan, dan ketidakselarasan,
5. Daerah resapan air atau daerah resapan aliran air bawah permukaan (*recharge area*),

Sistem panas bumi terdiri dari tiga komponen dasar: sumber panas, aliran fluida yang membawa panas dari reservoir ke permukaan bumi, dan batuan reservoir

permeabel. Pada kenyataannya, berbagai jenis batuan dapat menampung reservoir panas bumi, dan sebagian besar kerak bumi ditutupi dengan air tanah, yang seringkali terdiri dari air purba atau air laut yang diendapkan hingga saat ini, yang mengalir hingga kedalaman beberapa kilometer. Mata air panas dan fumarol biasanya dihasilkan oleh sistem panas bumi dan berfungsi sebagai indikator kandungan panas reservoir. Belerang dan mineral lain yang berasal dari zaman prasejarah berlimpah di daerah dengan mata air panas dan fumarol (Goff dan Janik, 2000).

4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Laptop
2. Data *Gravity* Satelit (*GGM Plus*)
3. *Softfile* peta geologi
4. *Software Arcgis V 10.3*
5. *Software Surfer 13*
6. *Software Geosoft Oasis Montaj V 8.3.4*
7. *Software Global Mapper V 18*
8. *Software Microsoft Excel 2019*

4.3 Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini, beberapa proses pengolahan yang dilakukan diantaranya sebagai berikut:

4.3.1 Anomali *Bouguer* Lengkap

Data gaya berat yang digunakan pada penelitian ini merupakan data satelit *GGMPlus* yang diperoleh dalam bentuk data *gravity acceleration*, dan data DEM. Sehingga dalam pengolahannya perlu dilakukan koreksi untuk mendapatkan nilai Anomali *Bouguer* Lengkap (ABL) di mana dalam perhitungannya dilakukan dengan menggunakan *Software Geosoft 8.3.4*. Koreksi yang digunakan adalah koreksi lintang, FAC, FAA, koreksi *Bouguer* dan koreksi medan atau *terrain corection*.

4.3.2 Analisis Spektral

Selama tahap analisis, domain data diubah dari jarak spasial menjadi frekuensi spasial menggunakan analisis transformasi *Fourier* pada data Anomali *Bouguer*

Lengkap. *Software* numerik adalah perangkat lunak yang digunakan. Keluaran dari tahapan FFT merupakan nilai real dan imajiner setiap lintasan, yang diproses menggunakan program *Ms. Excel* untuk memperoleh bilangan gelombang k , frekuensi, dan nilai amplitudo (A). Dengan menghitung akar kuadrat dari nilai real dan imajiner untuk menghasilkan nilai amplitudo (A). Kemudian nilai amplitudo (A) dilogaritma untuk memperoleh nilai $\ln A$. Domain geografis yang dipilih menentukan bagaimana nilai frekuensi dihitung dengan menetapkan nilai k . *Plotting* dilakukan terhadap nilai k dan nilai $\ln A$ setelah nilai tersebut ditentukan untuk menentukan nilai *cut-off* pada daerah tersebut yang nantinya akan digunakan untuk menentukan lebar jendela.

4.3.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Pendekatan *Moving Average* digunakan untuk pemisahan dalam penelitian ini. *Moving Average* adalah rata-rata data anomali gaya berat; hasilnya adalah anomali regional, dan anomali residual dihasilkan dengan mengurangkan anomali *Bouguer* dari anomali residual. Program *Surfer* digunakan dalam proses ini. Proses pemisahan anomali diawali dengan memasukkan data anomali *Bouguer* ke dalam *software Surfer*, kemudian nilai lebar jendela ideal yang dihasilkan selama proses analisis spektral dimasukkan sebagai nilai masukan pemisahan.

4.3.4 Analisis Derivative

Dari filter *moving average* didapatkan anomali residual dan anomali regional yang kemudian dapat memperlihatkan adanya kontras rapat massa batuan yang rendah ke tinggi. *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) merupakan analisis *derivative* yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil dari analisis *derivative* digunakan untuk data pendukung analisis struktur bawah permukaan agar mengetahui sebaran patahan daerah penelitian.

4.3.5 Pemodelan Bawah Permukaan

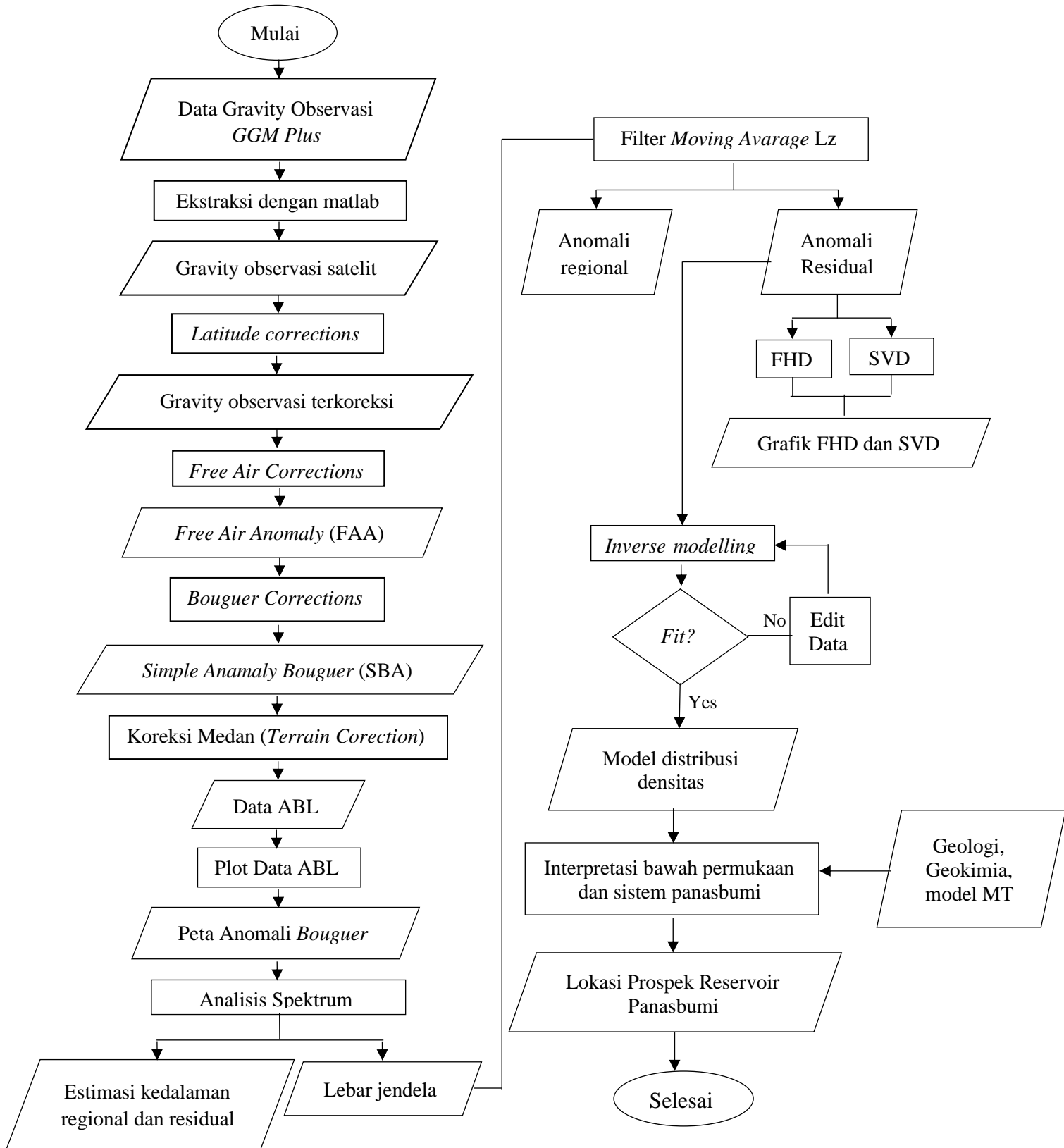
Selanjutnya dilakukan *inverse modeling* pemodelan 3D menggunakan *software Geosoft Oasis Montaj* dan *software grablox* untuk memodelkan bawah permukaan daerah penelitian. Model awal pada *inverse modeling* dibuat menggunakan *software Grablox 1.7* yang dibagi menjadi 20 blok sumbu X, 20 blok sumbu Y dan 10 blok sumbu Z, sehingga menghasilkan sebanyak 4000 blok. Model daerah penelitian dimodelkan ke arah sumbu X sejauh 14 km dan ke arah sumbu Y sejauh 16 km dengan kedalaman model adalah 4 km ke arah vertikal (sumbu Z). Pemodelan ini di dasarkan pada suatu model langsung yang dihasilkan dari data yang dilakukan dengan memadukan informasi geologi seperti struktur geologi, geologi permukaan, dan stratigrafi pada daerah penelitian.

4.3.6 Interpretasi Kualitatif

Setelah mendapatkan anomali residual dan regional dari filteri *moving average*, akan terlihat bahwa nilai anomali yang rendah mengindikasikan adanya batuan dengan kontras densitas massa batuan yang lebih rendah (batuan sedimen), sedangkan anomali yang tinggi mengindikasikan adanya batuan dengan kontras densitas massa yang lebih besar (batuan beku). Density tinggi akan berhubungan dengan keberadaan *heatsource* atau batuan intrusi di daerah tersebut. Density rendah kemungkinan disebabkan oleh keberadaan batuan reservoir yang pada umumnya mempunyai porositas tinggi dan density rendah.

4.4 Diagram Alir

Adapun tahapan dalam penelitian ini dijelaskan seperti diagram alir dibawah ini:



Gambar 20. Diagram Alir

VI. KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan analisa yang telah dilakukan pada daerah penelitian maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Anomali *Bouger* daerah Gunung Ciremai mempunyai rentang nilai 22-50 mGal dan densitas rata-rata permukaan 2,314 *gr/cm*, sebaran anomali tinggi ditemukan di baratdaya dan baratlaut yaitu di sekitar Gunung Gegerhalang dan Gunung Dulang dan anomali rendah ditemukan dibagian timur, barat, dan timurlaut dari Gunung Ciremai. Sebaran anomali rendah mendominasi daerah manifestasi Sangkanhurip, Ciniru, dan Pejambon.
2. Berdasarkan hasil analisis spektrum pada daerah penelitian diperoleh kedalaman rata-rata anomali regional di daerah Gunung Ciremai adalah 4250 meter dan untuk kedalaman residual sebesar 350 meter.
3. Hasil analisis *Second Vertical Derivative* (SVD) menunjukkan nilai nol sebagai batas karakteristik geologi yaitu adanya sesar serta perbedaan sifat fisis dari densitas batuan. Struktur sesar yang teridentifikasi merupakan sesar mendatar yang berarah pada bagian barat Gunung Ciremai dan sesar normal yang bearah baratlaut-tenggara. Berdasarkan korelasi dengan peta geologi, struktur geologi tersebut merupakan sesar aktif Cilacap-Kuningan serta manifestasi yang dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar normal pada daerah penelitian berupa mata air panas yang terdapat pada mata air panas Ciniru.
4. Berdasarkan pemodelan 3D ditemukan zona prospek reservoir dalam dan dangkal di daerah panasbumi Gunung Ciremai. Zona reservoir dalam terdapat pada kedalaman 3-4 km hingga dengan densitas 2,2-2,3 *gr/cc* dan reservoir

dangkal pada kedalaman 1-1,5 km, zona *heat source* berada pada kedalaman 4-5 km dengan densitas 2,6-2,7 gr/cc, sedangkan untuk zona *cuprock* terdapat pada kedalaman 1,5-3 km dengan nilai densitas 2,7-2,8 gr/cc. Dari hasil pengolahan, maka manifestasi panasbumi Gunung Ciremai terdapat pada tiga titik yaitu manifestasi Pejambon, Ciniru, dan Sangkanhurip.

6.2 Saran

Adapun saran yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini adalah perlu dilakukan survei dan pengukuran secara langsung ke lapangan, juga perlu dilakukan survei lanjutan dengan metode geofisika yang lain seperti geolistrik untuk mendukung keberadaan reservoir dan survei lebih detail di daerah penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bettadpur, S., Ries, J., Eanes, R., Nagel, P., Pie, N., Poole, S., Richter, T., Save, H., 2015. Evaluation of the GGM05 Mean Earth Gravity Models. *Geophy. Res. Abs.*, Vol. 17, EGU2015-4153
- Blakely, R. J., 1996, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cordell, L., and V.J.S. Grauch, 1985. *Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin*. New Mexico. The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps: SEG.
- DESDM. 2010. *Profil Potensi Panasbumi Daerah Gunung Ciremai dan Sekitarnya Kabupaten Kuningan Provinsi Jawa Barat*. Pemprov Jawa Barat. Bandung.
- Dickson, M.H. and Fanelli, M., 2003. *Geothermal Energy: Utilization and Technology*, Unesco Publishing, Paris
- Diyanti, 2014, Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Leuwidamar Berdasarkan Analisis Spektral Data Gaya Berat. (*Skripsi*) Prodi Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung
- Djuhaeni & S., Martodjojo, 1989. Stratigrafi Daerah Majalengka dan Hubungannya dengan Tatanama Satuan Litostratigrafi di Cekungan Bogor. *Geol. Indon.*, Volume Khusus 60 Tahun Prof. Dr. J.A. Katili 12(1): 227-252.
- Djuri, M., 1973. *Geologi Lembar Arjawinangun, Jawa, Skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Drinkwater, M.R., R. Floberghagen, R. Haagmans, D. Muzi, dan A. Pospescu, 2003. GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission. *Space Science Reviews*. 108(1-2): 419-432.

- ESDM. 2017. *Potensi Panasbumi Indonesia Jilid 1. Direktorat Panasbumi*. Jakarta.
- Goff, F., dan Janik, C.J. 2000. "Sistem Panasbumi, *Ensiklopedia Gunung Berapi*", Academic Press, San Diego, 817-834.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta
- Halliday, R. 2005. *Fisika Dasar Edisi 7 Jilid 1*. Erlangga. Jakarta.
- Herdianita, N.R., Julinawati, T., & Amorita, I.E., 2010. Hydrogeochemistry of Thermal Water from Surface Manifestation at Gunung Ciremai and Its Surrounding, Cirebon, West Java-Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Hinze, W.J., von Freses, R.R.B., and Saad, A.H. 2012. *Gravity and Magnetic Exploration*. Edinburgh: Cambridge University Press.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>
- Hochstein, M.P. and Browne, P.R.L., 2000. *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*, Academic Press, San Diego.
- Kadir, W.G.A., 2000, *Eksplorasi Gaya Berat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB.
- Katili, JA & A. Sudradjat, 1984. *Galunggung, The 1982-1983 Eruption*. Vulcanological Survey of Indonesia
- Kirbani, S.B, 2001, *Panduan Workshop Eksplorasi Geofisika: Metode Gravitasi, Laboratorium Geofisika Universitas Gadjah Mada*, Yogyakarta.
- Koesoemadinata, RP., & S., Martodjojo, 1974. Penelitian Turbidit di P. Jawa. *Laporan Penelitian*, No. 1295/74, Badan Penelitian, Institut Teknologi Bandung.
- Koolhoven, WBC. 1936. *Report on a Trip in Cirebon (sheet 48 Madjalengka, 53 Cirebon)*. Direktorat Geologi Bandung (tidak diterbitkan).

- Lowrie, W., 2007. *Fundamentals of Geophysics, 2nd ed. x + 381 pp.* Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Marks, P., 1957. Stratigraphic lexicon of Indonesia, *Publikasi Keilmuan Seri Geologi*. 31. Jawatan Geologi, Bandung
- Octonovriya, 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
- Pratomo, I., 2008. Kegiatan Gunung Api Ciremai Jawa Barat dan Pengaruhnya Terhadap Lingkungan di Sekitarnya, *Jurnal Biologi Indonesia* 4(5): 261-278
- PVMBG. 2008. *Gunung Ciremai, Jawa Barat*. Direktorat Vulkanologi. Bandung.
- Reynolds, J. M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester John Wiley and Sons Ltd. 796p
- Rina Herdianita, N., Julinawati, T., & Edria Amorita, I. (2010). Hydrogeochemistry of Thermal Water from Surface Manifestation at Gunung Ciremai and its Surrounding, Cirebon, West Java - Indonesia. In *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Saibi, H., Nishijima, J., Ehara, S., dan Aboud, E., 2006. Integrated Gradient Interpretation Techniques for 2D and 3D Gravity Data Interpretation, *Earth Planets Space*, 58, 815-821
- Sari, I.P. 2012. Study Komparasi Metode Filtering Untuk Pemisahan Regional dan Residual Dari Data Anomali Bouguer. (*Skripsi*) Prodi Fisika FPMIPA Universitas Indonesia. Depok.
- Sarkowi, M., 2010, Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer, *Jurnal Sains MIPA*, Vol. 16, No.2, Hal.; 111-118
- Sarkowi, M., 2014, Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer, *Jurnal Sains MIPA*, Vol. 16, No.2, Hal.:111-118.
- Serway, R. dan John, W., 2009, *FISIKA Untuk Sains dan Teknik Buku 1 Edisi 6*. Jakarta: Salemba Teknika.

- Silitonga, PH., & M., Masria, 1978. *Geologi Lembar Cirebon, Jawa, Skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Situmorang, T., Hadisantono, R.D., & Asmoro, P. 1984. *Peta Geologi Gunungapi Ciremai, Jawa Barat*. Direktorat Vulkanologi
- Situmorang, 1995. *Peta Geologi Gunung Ciremai Skala 1:50.000*. Geologis Pusat Penelitian dan Pengembangan, Bandung.
- Soejono, M., 1984. *Evolusi Cekungan Bogor, Jawa Barat. Disertasi Doktor*. Institut Teknologi Bandung, (tidak diterbitkan).
- Sudjatmiko, 1972. *Geologi Lembar Cianjur, Jawa, Skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Suharno, 2010. *Pengembangan Prospek Panasbumi*. Universitas Lampung
- Sumintadireja, P., Saepuloh, A., Irawan, D., dan Junursyah, L. 2011. Temporal Analysis of Visible-Thermal Infrared Band and Magnetotelluric Method to Simulate a Geothermal Siting at MT.Ciremai, West Java, Indonesia. *Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford California, January 31- February 2, 2011 SGP-TR-191*
- Suprianto, A., Supriyadi, Priyantari, N., & Cahyono, B. E. (2021). Correlation between GGMPlus, topex and BGI gravity data in volcanic areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(012023), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/01202>
- Supriyanto. 2007. *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia, Depok.
- Surmayadi, M., D. Suhadi, R. Tofiqurrachman, Riyadi & M. Fathoni. 2005. *Inventarisasi Prakiraan Bahaya Gunungapi Ciremai, Jawa Barat*. Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Laporan Internal (tidak diterbitkan)
- Susilawati. 2005. *Pemodelan metode Gayaberat*. Depok: Departement Fisika FMIPA Universitas Indonesia
- Tapley, B. D., S., Bettadpur, M., Watkins, dan C., Reigber, 2004. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results. *Geophysical Research Letter* 31.

- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*. USA: Cambridge University.
- Untung, M., 2001. *Dasar-Dasar Magnet dan Gayaberat Serta Beberapa Penerapannya (Seri Geofisika)*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Widarto, D.S., Indarto, S., dan Gaffar, E.Z. 2003. “Hasil Awal Geotermometri Kimia Air Panas Lapangan Panasbumi Gedongsongo di Lereng Selatan Gunung Ungaran, Jawa Tengah”, *Buletin Geologi*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Yuda Kencana, A., & Rina Herdianita, N., (2022). Geochemical Characteristics of Non-Volcanic Geothermal System in the Quaternary Volcano Area: Case Studies on Gunung Ugaran, Gunung Endut, and Gunung Ciremai Indonesia. *Peoceedings, the 8th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE)*