

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI GUNUNG LAWU,  
JAWA TENGAH BERDASARKAN ANALISIS PEMODELAN  
DATA GAYABERAT**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ZENOBIYA PITTADA SILVERA**

**2215051016**



**FAKULTAS TEKNIK  
BANDAR LAMPUNG  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI GUNUNG LAWU,  
JAWA TENGAH BERDASARKAN ANALISIS PEMODELAN  
DATA GAYABERAT**

**Oleh  
Zenobiya Pittada Silvera**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
BANDAR LAMPUNG  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI GUNUNG LAWU, JAWA TENGAH BERDASARKAN ANALISIS PEMODELAN DATA GAYABERAT

Oleh

**ZENOBIYA PITTADA SILVERA**

Gunung Lawu merupakan salah satu kawasan yang memiliki potensi panas bumi di Pulau Jawa, ditandai kemunculan fumarol, mata air panas, dan alterasi hidrotermal. Tujuan penelitian untuk mengidentifikasi struktur geologi yang berperan dalam mengontrol sistem panas bumi, menganalisis distribusi densitas bawah permukaan, menyusun model sistem panas bumi Gunung Lawu berdasarkan interpretasi data gayaberat. Data gravitasi satelit GGMPlus diolah melalui serangkaian tahapan yang meliputi koreksi gayaberat, pemisahan anomali regional dan residual, analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), serta inversi tiga dimensi (3D) menggunakan perangkat lunak Grav3D. Hasil analisis FHD dan SVD menunjukkan keberadaan sejumlah struktur sesar yang didominasi oleh sesar normal, dan beberapa sesar naik dengan orientasi utama baratlaut–tenggara. Struktur tersebut berperan sebagai jalur permeabilitas yang mengontrol pergerakan fluida hidrotermal menuju permukaan. Pemodelan inversi 3D menghasilkan distribusi densitas batuan berkisar 1,8–2,9 gr/cc. Zona berdensitas rendah 1,8–2,0 gr/cc diidentifikasi sebagai *reservoir* panas bumi yang tersusun oleh batuan vulkanik berpori dan permeabel. Di atasnya berkembang lapisan batuan penudung (*caprock*) dengan densitas 2,1–2,3 gr/cc, sedangkan zona berdensitas tinggi >2,4 gr/cc pada kedalaman lebih dari ±3000 m diinterpretasikan sebagai sumber panas (*heat source*) berupa intrusi andesit dan sisa dapur magma Gunung Lawu. Model konseptual yang dihasilkan menunjukkan bahwa sistem panas bumi Gunung Lawu dikontrol oleh interaksi antara aktivitas magmatisme, struktur sesar, distribusi batuan vulkanik, dan proses alterasi hidrotermal.

Kata kunci: Panas bumi, Gunung Lawu, gayaberat, FHD, SVD, inversi 3D.

## ABSTRACT

### IDENTIFICATION OF THE GEOTHERMAL SYSTEM OF MOUNT LAWU, CENTRAL JAVA BASED ON GRAVITY DATA MODELING ANALYSIS

By

ZENOBIYA PITTADA SILVERA

Mount Lawu is one of the geothermal prospect areas in Java, characterized by the presence of fumaroles, hot springs, and hydrothermal alteration zones. This study aims to identify the geological structures controlling the geothermal system, analyze subsurface density distribution, and develop a conceptual model of the Mount Lawu geothermal system based on gravity data interpretation. GGMPPlus satellite gravity data were processed through several stages, including gravity corrections, regional and residual anomaly separation, First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) analyses, and three-dimensional (3D) inversion modeling using Grav3D software. The FHD and SVD results reveal the presence of several fault structures dominated by normal faults, accompanied by a number of reverse faults trending predominantly northwest–southeast. These structures act as permeability pathways that facilitate the upward migration of hydrothermal fluids. The 3D inversion model indicates rock density values ranging from 1.8 to 2.9 g/cm<sup>3</sup>. Low-density zones of 1.8–2.0 g/cm<sup>3</sup> are interpreted as geothermal reservoirs composed of porous and permeable volcanic rocks. Overlying these zones is a *caprock* layer with densities between 2.1 and 2.3 g/cm<sup>3</sup>, while high-density zones exceeding 2.4 g/cm<sup>3</sup> at depths greater than approximately 3,000 m are interpreted as the heat source, represented by andesitic intrusions and remnants of the Mount Lawu magma chamber. The resulting conceptual model suggests that the Mount Lawu geothermal system is controlled by the interaction of magmatic activity, fault structures, volcanic rock distribution, and hydrothermal alteration processes.

Keywords: Geothermal, Mount Lawu, gravity, FHD, SVD, 3D inversion.

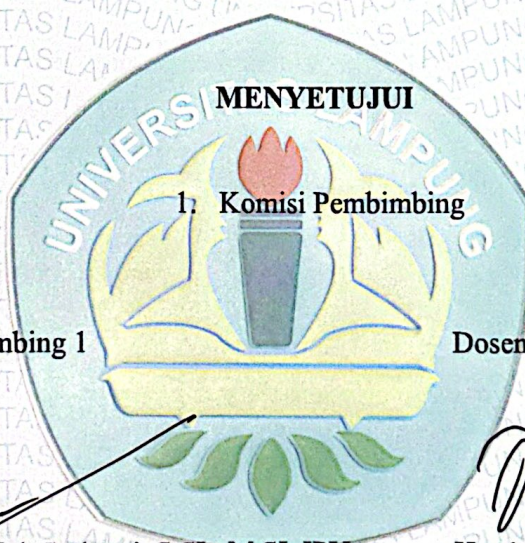
**Judul Skripsi** : Identifikasi Sistem Panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat

**Nama Mahasiswa** : Zenobiya Pittada Silvera

**Nomor Pokok Mahasiswa** : 2215051016

**Program Studi** : Teknik Geofisika

**Fakultas** : Teknik



**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

**Dosen Pembimbing 1**

**Dosen Pembimbing 2**

**Prof. Dr. H. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.**  
**NIP. 197112101997021001**

**Hesti, S.Si, M.Eng.**  
**NIP. 198606192019032014**

**2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

**Dr. Ir. Syamsurijal R, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM.**  
**NIP. 197307162000121002**

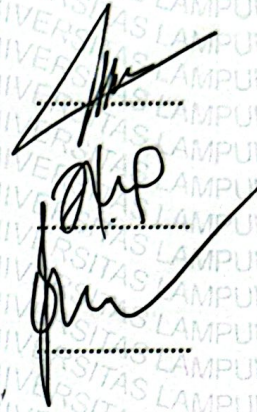
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

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

**Sekretaris : Hesti, S.Si, M.Eng.**

**Anggota : Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA.**



**2. Dekan Fakultas Teknik**



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

**NIP. 196910302000031001**

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 04 Juni 2026**

## PERNYATAAN

Dengan ini penulis menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Identifikasi Sistem Panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat” merupakan hasil pemikiran, penelitian, dan karya saya sendiri yang disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana. Seluruh sumber informasi yang digunakan dalam menyusun skripsi ini, baik yang dikutip secara langsung maupun yang dijadikan rujukan secara tidak langsung, telah dicantumkan dengan benar pada bagian daftar pustaka sesuai dengan kaidah, aturan, dan etika penulisan karya ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran, ketidaksesuaian, atau pernyataan yang tidak benar terkait isi deklarasi ini, maka saya bersedia menerima segala bentuk konsekuensi dan sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 17 Juni 2026



Zenobiya Pittada Silvera

NPM. 2215051016

## RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Zenobiya Pittada Silvera dan lahir di Bandar Lampung pada tanggal 28 Agustus 2004. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, putri dari pasangan Idrus Majid dan Mediawati. Dukungan, doa, serta kasih sayang dari kedua orang tua menjadi motivasi utama bagi penulis dalam menempuh pendidikan hingga saat ini. Pendidikan formal penulis dimulai di TK Al-Azhar 16 Bandar Lampung pada tahun 2009. Setelah pendidikan taman kanak-kanak, penulis melanjutkan pendidikan dasar di SDN 3 Kemiling Permai pada tahun 2010, kemudian pendidikan menengah pertama di SMPN 14 Bandar Lampung tahun 2016, dan melanjutkan ke SMA YP Unila Bandar Lampung tahun 2019. Tahun 2022, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif berbagai kegiatan organisasi kemahasiswaan maupun aktivitas yang mendukung pengembangan akademik. Penulis merupakan anggota Divisi Sosial Budaya Masyarakat Bidang Eksternal di Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Universitas Lampung. Penulis juga berpartisipasi sebagai anggota Divisi *Education* pada SEG SC Universitas Lampung dan mengikuti kegiatan penelitian bagian dari program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Universitas Lampung. Tahun 2025, penulis melakukan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bangun Sari, Kecamatan Branti, Lampung Tengah. Penulis juga menjalani kegiatan Kerja Praktik di Tim Observasi Gempabumi, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kelas I Bandung pada tahun 2025. Berbekal pengalaman akademik dan organisasi yang telah diperoleh, penulis menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir pada Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.)

## **PERSEMBAHAN**

Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya yang senantiasa tercurah tanpa henti. Berkat izin, pertolongan, serta kekuatan yang diberikan-Nya, penulis dapat menyelesaikan karya ini dengan baik. Atas rasa syukur dan ketulusan hati, karya ini penulis persembahkan kepada:

### **AYAH DAN BUNDA TERCINTA**

Yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang serta dukungan setiap saat. Terima kasih atas seluruh pengorbanan dan ketulusan dalam membimbing, mendidik dan mencintai penulis pada setiap keadaan. Bahkan selalu menjadi garda terdepan penulis sehingga sampai di titik ini.

### **ABANG TERSAYANG**

Yang senantiasa mendukung dan mendoakan penulis dalam setiap hal dan selalu memberikan nasihat yang tiada henti agar bersama sama bisa membanggakan kedua orang tua, melewati setiap suka dan duka kehidupan. Semoga apa yang penulis capai pada hari ini, bisa menjadi kebanggaan untukmu.

### **DIRI PENULIS SENDIRI**

Terima kasih sudah bertahan sejauh ini dari segala rintangan dan terus mencoba semangat sehingga tidak ada kata menyerah. Terima kasih atas segala usaha, keyakinan, konsistensi dan kekuatan sehingga mampu menyelesaikan pendidikan ini dengan baik.

**Keluarga Besar Granit Teknik Geofisika 2022**

Serta

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

## MOTTO HIDUP

**"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya."**

***(QS. Al-Baqarah: 286)***

**"Apa yang tertakar tidak akan tertukar, dan apa yang ditakdirkan akan menemukan jalannya."**

***(QS. An-Najm: 39)***

**"Karena sesungguhnya setelah kesulitan itu ada kemudahan, setelah kesulitan itu ada kemudahan"**

***(QS Al- Insyirah ayat 5-6)***

***"Wheel is turning, life is changing"***

## KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan berkah, karunia, serta nikmat yang senantiasa diberikan, sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi yang berjudul “Identifikasi Sistem Panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat” dengan baik. Penyusunan skripsi ini dilakukan sebagai salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penelitian ini berfokus pada analisis dan interpretasi data anomali gayaberat yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik sistem panas bumi serta membangun model konseptual kondisi bawah permukaan di wilayah Gunung Lawu, Jawa Tengah. Dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi geologi bawah permukaan daerah penelitian, agar hasil yang diperoleh dapat menjadi sumber informasi yang bermanfaat untuk mendukung kegiatan eksplorasi, pengembangan, maupun penelitian lanjutan terkait pemanfaatan potensi energi panas bumi di Indonesia.

Bandar Lampung, 17 Juni 2026



Zenobiya Pittada Silvera

NPM. 2215051016

## SANWACANA

Penulis mengucapkan segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, berkah, dan petunjuk yang senantiasa dianugerahkan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dalam keadaan sehat, penuh kekuatan, dan tanpa hambatan. Tesis ini, yang berjudul "*Identifikasi Sistem Panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah Berdasarkan Analisis Pemodelan Data Gayaberat*" disusun sebagai salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi pada jenjang sarjana. Penyusunan skripsi ini merupakan bagian penting dari perjalanan akademik penulis yang memberikan banyak pengalaman dan pembelajaran berharga. Penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan berkat dukungan, bantuan, arahan, serta doa dari berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi dan perhatian selama proses penelitian hingga penulisan. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU., selaku Dosen Pembimbing I tugas akhir, beliau membimbing penulis dengan kesabaran serta memberikan arahan, saran, masukan, dan koreksi selama proses penyusunan skripsi berlangsung. Beliau juga senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan dukungan, motivasi, dan dorongan semangat kepada penulis, tidak hanya dalam penyelesaian tugas akhir ini, tetapi juga selama menjalani masa perkuliahan.
4. Ibu Hesti, S.Si., M.Eng., selaku dosen pembimbing II tugas akhir saya yang selalu memberikan arahan, saran, masukan dan nasihat, serta selalu membimbing dan mendukung perkembangan penulis dari mulai seminar kerja praktik, PKM, sampai proses penyelesaian skripsi ini.

5. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, dan juga sekaligus sebagai dosen penguji tugas akhir saya yang senantiasa memberikan saran serta masukan guna penyempurnaan skripsi ini.
6. Seluruh dosen dan civitas akademika Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan banyak sekali ilmu, pembelajaran serta motivasi yang bermanfaat dan berharga untuk penulis selama penulis berkuliah.
7. Kepada Ayah tercinta, penulis tidak mampu mengungkapkan secara sempurna rasa terima kasih atas segala kasih sayang, pengorbanan, doa, serta dukungan yang selalu menyertai setiap langkah kehidupan penulis. Perjuangan, ketulusan, dan kerja keras beliau menjadi fondasi utama yang membawa penulis hingga pada tahap ini. Berbagai nasihat, didikan, serta nilai-nilai kehidupan yang telah diberikan turut membentuk karakter penulis menjadi pribadi yang lebih tegar, berani, dan tidak mudah menyerah. Keberanian yang dimiliki penulis saat ini tidak terlepas dari sosok Ayah yang telah membesarkan dan mendidik dengan penuh cinta dan ketulusan.
8. Bunda tercinta, terima kasih atas cinta, doa, kasih sayang, dan pengorbanan yang tak pernah putus untuk penulis. Penulis meyakini bahwa setiap kemudahan dan pertolongan yang Allah berikan hingga hari ini tidak terlepas dari ridho dan doa Bunda. Terima kasih karena selalu menjadi sumber kekuatan, memberikan ketenangan di saat penulis menghadapi kesulitan. Terima kasih karena selalu menerima segala kekurangan penulis dengan hati yang lapang serta mengajarkan arti kesabaran, keteguhan, dan keikhlasan. Semoga Allah membalas seluruh kebaikan dan pengorbanan Bunda dengan keberkahan serta kebahagiaan yang tiada henti. Jika setiap doa dapat menjadi jalan menuju keabadian, maka nama Bunda akan selalu menjadi yang pertama penulis panjatkan. Keberhasilan ini penulis persembahkan untuk Bunda.
9. Abang tersayang, terima kasih atas segala dukungan, doa, perhatian, dan nasihat yang senantiasa diberikan kepada penulis. Terima kasih karena selalu menjadi tempat berbagi cerita, memberikan semangat di setiap proses, serta mengingatkan penulis untuk terus berusaha dan membanggakan kedua orang tua. Kehadiran dan dukungan Abang menjadi salah satu kekuatan bagi penulis

dalam melewati berbagai suka dan duka selama menempuh pendidikan. Semoga pencapaian yang diraih penulis hari ini dapat menjadi kebanggaan bagi Abang sebagaimana Abang selalu menjadi kebanggaan bagi penulis.

10. Adikku tersayang, Ghaniyy dan Ghoffur, terima kasih atas doa, dukungan, serta kebahagiaan yang selalu kalian hadirkan dalam kehidupan penulis. Terima kasih telah menjadi penyemangat di setiap proses yang penulis jalani dan menjadi pengingat untuk terus berjuang meraih cita-cita. Semoga pencapaian ini dapat menjadi motivasi bagi kalian untuk terus belajar, berusaha, dan menggapai impian yang diinginkan. Penulis berharap kita dapat terus tumbuh bersama, saling mendukung, dan menjadi kebanggaan bagi keluarga.
11. Keluarga besar Abdul Majid dan R. Sisworaharjo yang senantiasa memberikan doa serta dukungan kepada penulis, sehingga berkat doa dan dukungan tersebut penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
12. Sahabat saya semua Kelas TG-A, terima kasih sudah menemani dari awal semester 1 hingga sekarang, terima kasih sudah membuat penulis merasakan suka duka, canda dan tawa yang mewarnai masa masa penulis selama berada di bangku perkuliahan.
13. Sahabat SMA saya yaitu “Rumpip” dan “Muli Lampung” yang saat ini juga sama-sama berjuang menempuh studi untuk mendapatkan gelar sarjana, terimakasih atas dukungan dan doa, serta selalu hadir dalam segala seminar penulis. Terima kasih sudah menjaga persahabatan ini dengan baik dari awal masuk SMA 2019 sampai saat ini, semoga kita sukses bersama ya.
14. Sahabat dan juga sepupu penulis dari penulis lahir hingga saat ini “Five Z” Zenara, Zhefira, Zevima, Zevana terima kasih sudah kebersamai dari kecil hingga sekarang. Terima kasih atas semua dukungan, *support*, doa, dan tawa kalian. Terima kasih telah menjadi tempat di mana saya bisa berbagi cerita dan kekhawatiran saya, serta telah bersabar menghadapi tingkah laku penulis selama ini. Semoga kebahagiaan dan kesuksesan senantiasa menyertai kalian.
15. Sahabat saya “Rafha Shalsabila” yang saat ini juga sama-sama berjuang menyelesaikan masa studi untuk mendapatkan gelar S.T., terima kasih ya sa atas semua kebaikan dan dukungan yang sudah diberikan, mau menjadi tempat keluh kesah penulis, teman main, yang juga selalu memberikan nasihat dan me

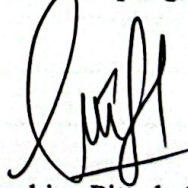
ngajarkan penulis sabar dalam menghadapi apapun.

16. “Anak Embung” terima kasih kepada Paulina dan Shatila dimulai dari semester 4 hingga jalan penyusunan skripsi ini telah membantu penulis saat kesulitan. Terima kasih atas segala kebaikan, canda tawa, bahkan kesalahpahaman yang terjadi. Banyak yang sudah kita lalui bersama sampai kerja praktik bersama sebulan penuh di Bandung. Terima kasih juga untuk penghuni Lab PPDG yaitu bang rehan, nadia, dini, ika dan semuanya atas dukungannya.
17. Teman-teman terkasihku, Syeikha, Salsa, Presti, Khalila, Asda, Amal, Tyas, Simut, dan seluruh anggota angkatan Laboratorium Instrumentasi Geofisika 2022 yang telah setia menemani saya sepanjang perjalanan akademik saya. Saya ingin mengucapkan terima kasih atas segala dukungan, kebaikan, persahabatan, dan doa yang telah kalian berikan. Terima kasih juga karena telah menjadi tempat untuk berbagi cerita, keluh kesah, kegembiraan, dan kesedihan, serta selalu ada untuk memberikan dorongan, nasihat, dan pelajaran berharga dalam menghadapi berbagai tantangan. Kehadiran kalian telah membuat perjalanan akademik ini terasa lebih bermakna dan menyenangkan. Semoga persahabatan ini terus berkembang, dan semoga kita semua mencapai aspirasi serta kesuksesan yang kita harapkan.
18. Terima kasih untuk sahabatku yeni marsela yang sudah selalu membantu penulis dari awal penulis melaksanakan seminar Kerja Praktik hingga Seminar Tugas Akhir, dan juga sudah bersedia menjadi tempat bercerita, mendengarkan keluh kesah, selalu saling mendukung dan mendoakan satu sama lain, semoga pertemanan ini akan tetap berjalan baik ya yen, semoga kelak kita akan menemui kesuksesan kita atas apa yang sudah kita lewati.
19. Keluarga besar Teknik Geofisika 2022 “Granit“, yang telah menemani dan menjadi bagian dari perjalanan penulis sejak awal hingga akhir masa perkuliahan. Terima kasih atas segala kebersamaan, cerita, dan kenangan indah yang telah terukir selama bertahun-tahun menempuh pendidikan bersama.
20. Untuk laki laki yang bernama Myckho Arinaldo, terima kasih tidak hanya penulis ucapkan sebagai pasangan, tetapi terima kasih sudah menjadi partner terbaik penulis dari awal pertemuan sampai saat ini yang dimana telah membersamai dan membantu segala sesuatu penulis saat menjalani penyusunan

skripsi dalam situasi dan kondisi apapun, terima kasih sudah selalu ada, menjadi *support system* dalam mendengarkan keluh kesah, menghibur dikala penulis sedih, memberi arahan saat penulis mendapat kesulitan, menjadi garda terdepan setiap saat, memberikan saran dan motivasi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

21. Kepada diriku Zenobiya Pittada Silvera. Terima kasih telah bertahan, berjuang, dan tidak menyerah dalam menghadapi berbagai tantangan selama perjalanan ini. Terima kasih karena tetap melangkah meskipun sering dihadapkan pada rasa takut dan kekhawatiran tentang masa depan. Tetaplah percaya bahwa setiap usaha akan menemukan hasilnya pada waktu yang tepat, serta terus menjadi pribadi yang kuat, berani, dan penuh kebaikan. Jangan ragu untuk melangkah selama disertai keyakinan, doa, dan restu orang tua.
22. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dorongan, dan doa selama proses penulisan tesis ini, meskipun tidak mungkin untuk menyebut nama satu per satu. Setiap bentuk perhatian dan kontribusi yang diberikan sangat berarti bagi penulis. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat, berkah, dan pahala yang berlipat ganda atas segala ketulusan dan bantuan yang telah diberikan..

Bandar Lampung, 17 Juni 2026



Zenobiya Pittada Silvera

NPM. 2215051016

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>ix</b>
<b>MOTTO HIDUP</b> .....	<b>x</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xx</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Lokasi Penelitian .....	5
2.2 Geologi Regional.....	6
2.3 Geomorfologi Regional.....	9
2.4 Stratigrafi .....	10
2.5 Sistem Panas Bumi.....	12
2.6 Penelitian Terdahulu .....	13

### III. TEORI DASAR

3.1 Metode Gayaberat .....	16
3.2 Konsep Dasar Gayaberat.....	17
3.2.1 Gayaberat Newton.....	17
3.2.2 Percepatan Gayaberat.....	18
3.2.3 Potensial Gayaberat.....	19
3.2.4 Rapat Massa Batuan.....	21
3.3 Koreksi Metode Gayaberat.....	22
3.3.1 Koreksi Bouguer.....	23
3.3.2 Koreksi udara Bebas ( <i>Free Air Correction</i> ).....	23
3.3.3 Koreksi Medan ( <i>Terrain Correction</i> ) .....	24
3.3.4 Koreksi Lintang.....	24
3.4 Anomali Bouguer .....	25
3.5 Analisis Spektrum .....	26
3.6 <i>Moving Average</i> .....	28
3.7 <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD) .....	29
3.8 <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	30
3.9 Pemodelan Gayaberat.....	32

### IV. METODOLOGI

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	35
4.2 Alat dan Bahan .....	37
4.3 Prosedur Penelitian .....	37
4.3.1 Studi literatur.....	37
4.3.2 Persiapan dan pengumpulan data .....	38
4.3.3 Koreksi Bouguer .....	39
4.3.4 Estimasi Densitas Batuan Rata-rata .....	40
4.3.5 Koreksi Medan.....	40
4.3.6 Anomali Bouguer Lengkap.....	41
4.3.7 Pemisahan Anomali Regional dan Residual .....	41
4.3.8 Analisis Derivative.....	42
4.3.9 Pemodelan Bawah Permukaan.....	42
4.4 Diagram Alir .....	44

<b>V. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
5.1 Topografi Daerah Penelitian.....	46
5.2 Anomali Bouguer Lengkap .....	47
5.3 Analisis Spektrum .....	49
5.3.1 Lintasan A – A’ .....	50
5.3.2 Lintasan B – B’ .....	51
5.3.3 Lintasan C – C’ .....	51
5.3.4 Lintasan D – D’ .....	52
5.3.5 Lintasan E – E’ .....	53
5.4 Anomali Regional.....	54
5.5 Anomali Residual .....	56
5.6 Analisis Derivative .....	57
5.6.1 <i>First Horizontal Derivative</i> .....	58
5.6.2 <i>Second Vertical Derivative</i> .....	59
5.7 Inverse Modelling.....	60
5.7.1 Model 3D Lintasan A – A’ .....	66
5.7.2 Model 3D Lintasan B – B’ .....	69
5.7.3 Model 3D Lintasan C – C’ .....	72
5.8 Model Sistem Panas bumi .....	75
<b>VI. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
6.1 Kesimpulan.....	80
6.2 Saran .....	81
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Lokasi Daerah Penelitian .....	5
2. Peta Geologi Regional Gunungapi Lawu .....	8
3. Peta Vulkanostratigrafi .....	11
4. Penampang vulkanostratigrafi Gunung Lawu dan hubungannya dengan sistem panas bumi Gunung Lawu .....	13
5. Konsep Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda .....	18
6. Potensial Gayaberat tiga dimensi .....	20
7. Grafik $\ln A$ Terhadap Bilangan Gelombang ( $K$ ).....	28
8. Diagram Alir .....	44
9. Peta topografi daerah penelitian.....	47
10. Peta Anomali Bouguer Lengkap .....	49
11. Lintasan analisis spektrum anomali bouguer lengkap (ABL) .....	50
12. Grafik $\ln A$ terhadap $k$ pada lintasan A – A' .....	51
13. Grafik $\ln A$ terhadap $k$ pada lintasan B – B' .....	51
14. Grafik $\ln A$ terhadap $k$ pada lintasan C – C' .....	52
15. Grafik $\ln A$ terhadap $k$ pada lintasan D – D' .....	52
16. Grafik $\ln A$ terhadap $k$ pada lintasan E – E' .....	53
17. Peta anomali regional.....	55
18. Peta anomali residual .....	57
19. Peta First Horizontal Derivative .....	59
20. Peta <i>Second Vertical Derivative</i> .....	60
21. Lintasan Analisis Derivative .....	61
22. Lintasan Analisis Derivative lintasan A – A' .....	62
23. Lintasan Analisis Derivative lintasan B – B' .....	63
24. Lintasan Analisis Derivative lintasan C – C' .....	64
25. Model distribusi densitas 3D (a) Model 3D dilihat dari arah selatan, (b) Model Model 3D dilihat dari arah timur, (c) Model 3D hasil slice dari arah barat daya sampai timur laut.....	66

26. Penampang anomali Bouguer residual, penampang gradien horizontal orde 1 dan orde 2 anomali Bouguer residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur sesar dan sistem panas bumi lintasan A-A' .....	67
27. Penampang anomali Bouguer residual, penampang gradien horizontal orde 1 dan orde 2 anomali Bouguer residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur sesar dan sistem panas bumi lintasan B-B' .....	70
28. Penampang anomali Bouguer residual, penampang gradien horizontal orde 1 dan orde 2 anomali Bouguer residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur sesar dan sistem panas bumi lintasan C-C' .....	73
29. Peta indikasi patahan dan zona reservoir .....	76
30. Model konseptual panas bumi Gunung Lawu .....	79

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Daftar penelitian terdahulu.....	14
2. Nilai densitas batuan .....	22
3. Operator Henderson & Zietz (1949) .....	31
4. Operator Elkins (1951).....	31
5. Operator Rosenbach (1953).....	31
6. Pelaksanaan kegiatan penelitian.....	36
7. Alat dan bahan yang digunakan.....	37
8. Kedalaman anomali regional dan anomali residual dari analisis spektrum .....	53
9. Analisis derivative lintasan A – A' .....	62
10. Analisis <i>derivative</i> lintasan B – B' .....	63
11. Analisis <i>derivative</i> lintasan C – C' .....	64

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia terletak diantara tiga lempeng tektonik utama dunia yakni Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik yang menyebabkan tingkat aktivitas tektonik dan vulkanik sangat tinggi. Hal ini mengakibatkan banyaknya gunung berapi aktif yang tersebar di berbagai wilayah di Indonesia, yang berkontribusi terhadap kekayaan sumber daya panas bumi. Aktivitas magmatisme di bawah permukaan menjadi sumber panas utama dalam pembentukan sistem panas bumi. Berdasarkan berbagai kajian, Indonesia diperkirakan memiliki potensi energi panas bumi sekitar 40% dari total potensi dunia (Helmi dkk., 2020). Walaupun memiliki sumber daya panas bumi yang melimpah, pemanfaatannya di Indonesia masih belum optimal. Dari total potensi sekitar 23.742 MW, kapasitas yang telah dikembangkan baru mencapai sekitar 2.710 MW. Potensi tersebut tersebar di berbagai daerah vulkanik, seperti Sumatra, Jawa, Sulawesi, dan Nusa Tenggara. Pulau Jawa menjadi wilayah kebutuhan energi terbesar karena tingginya jumlah penduduk, sehingga kebutuhan terhadap sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan terus meningkat (Robawa, 2016).

Panas bumi merupakan sumber energi panas alami yang berasal dari aktivitas magmatisme di dalam kerak bumi sehingga memanaskan batuan dan fluida bawah permukaan. Pemanfaatannya dilakukan melalui kegiatan eksplorasi dan eksploitasi untuk menghasilkan uap panas, air panas, atau campurannya sebagai sumber energi. Pada dasarnya, energi yang dimanfaatkan dalam sistem panas bumi berupa air panas dan uap air. Selain itu, panas bumi termasuk energi ramah lingkungan dimana memiliki dampak lingkungan yang relatif kecil dan masih berada dalam batas yang

diperbolehkan. Panas bumi merupakan sumber energi panas dengan ciri terbarukan karena proses pembentukannya terus-menerus sepanjang masa selama kondisi lingkungan dapat terjaga keseimbangannya (Wowa & Wiloso, 2017). Energi ini memiliki berbagai keunggulan, salah satunya adalah sifatnya yang bersih dan ramah lingkungan. Di samping itu, energi panas bumi tidak dapat didistribusikan secara langsung dalam bentuk energi panas, melainkan harus dikonversi terlebih dahulu menjadi energi listrik, sehingga sangat sesuai untuk dimanfaatkan dalam memenuhi kebutuhan energi lokal, khususnya untuk penyediaan energi listrik di suatu wilayah (Robawa, 2016).

Salah satu wilayah yang memiliki potensi panas bumi yang besar namun belum dimanfaatkan secara optimal adalah kawasan Gunung Lawu yang berada di perbatasan Jawa Tengah dan Jawa Timur. Gunung api bertipe strato ini saat ini berada dalam kondisi tidak aktif, tetapi masih menunjukkan manifestasi vulkanik berupa keluarnya gas fumarol dan solfatara dari beberapa kepundan. Dominasi batuan vulkanik serta kondisi geotektonik yang dipengaruhi interaksi Lempeng Indo-Australia dan Eurasia menjadikan wilayah ini berpotensi mendukung terbentuknya sistem panas bumi di bawah permukaan (Amalisana dkk., 2017). Sistem panas bumi dengan temperatur tinggi umumnya berkembang pada kawasan vulkanik yang berkaitan erat dengan aktivitas tektonik dan magmatik, terutama pada daerah subduksi maupun zona pertemuan lempeng tektonik. Salah satu manifestasi aktivitas magmatik yang berkembang di Pulau Jawa adalah terbentuknya Gunung Lawu sebagai bagian dari rangkaian gunung api di wilayah tersebut.

Gunung Lawu adalah gunung berapi yang terletak di perbatasan antara Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi Jawa Timur. Keberadaan indikasi panas bumi di wilayah Gunung Lawu ditandai oleh munculnya berbagai manifestasi permukaan seperti fumarol, mata air panas, serta adanya batuan yang telah mengalami proses alterasi, yang menunjukkan adanya sistem panas bumi di bawah permukaan (Hermawan & Adhitya, 2018). Secara geologis, wilayah panas bumi Gunung Lawu berada di Pulau Jawa yang termasuk dalam zona subduksi, yaitu wilayah pertemuan antara

dua lempeng tektonik utama di dunia, yaitu Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia. Daerah Gunung Lawu sendiri terdiri dari batuan vulkanik zaman Kuartar yang komposisinya bervariasi dari andesit hingga basalt. Manifestasi geotermal di daerah Candradimuka, yang terletak di lereng selatan Gunung Lawu termasuk fumarol, mata air panas, dan batuan yang mengalami alterasi menunjukkan adanya sistem geotermal bersuhu tinggi di wilayah tersebut (Qahhar dkk., 2015).

Metode geofisika yang digunakan untuk mengkaji kondisi bawah permukaan berdasarkan perbedaan nilai rapat massa batuan ( $\rho = \text{gr/cc}$ ) terhadap batuan di sekitarnya dikenal sebagai metode gayaberat. Metode ini telah banyak diterapkan dalam berbagai studi geologi untuk mengidentifikasi kontak intrusi, keberadaan batuan dasar, struktur geologi, endapan sungai purba, rongga bawah permukaan, serta berbagai fitur geologi lainnya (Sarkowi, 2014). Selain itu, metode gayaberat juga dapat dimanfaatkan untuk mengetahui distribusi densitas magma yang mengisi pipa magma maupun kantong magma, serta terbukti efektif dalam memetakan deformasi struktur bawah permukaan pada gunung api (Ilmi & Karyanto, 2020). Dalam penelitian ini, metode gayaberat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi bawah permukaan sistem panas bumi di wilayah prospek Gunung Lawu melalui analisis anomali Bouguer lengkap. Analisis tersebut dilengkapi dengan pengolahan data menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengidentifikasi keberadaan struktur sesar dan rekahan. Selanjutnya, dilakukan pemodelan inversi tiga dimensi distribusi densitas untuk menginterpretasikan keberadaan zona *reservoir*, lapisan penudung (*caprock*), patahan, serta sumber panas (*heat source*) yang berperan dalam sistem panas bumi Gunung Lawu.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana struktur geologi bawah permukaan sistem panas bumi Gunung Lawu berdasarkan analisis *derivative* data gayaberat?
2. Bagaimana model persebaran densitas bawah permukaan yang diperoleh dari hasil pemodelan inversi 3D data gayaberat pada daerah penelitian?

3. Bagaimana interpretasi sistem panas bumi berdasarkan hasil analisis struktur geologi dan distribusi densitas bawah permukaan?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan Penelitian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi sistem panas bumi menggunakan analisis *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative*.
2. Membuat pemodelan sistem panas bumi bawah permukaan dari pemodelan 3D data gayabarat.
3. Menginterpretasi sistem panas bumi dari analisis pemodelan distribusi densitas bawah permukaan dan struktur bawah permukaan hasil pengolahan data gayabarat.

### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada daerah prospek panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah, sesuai dengan batas wilayah penelitian yang telah ditentukan.
2. Data yang digunakan berupa data anomali gayabarat sekunder (GGMPlus) tanpa dilakukan pengukuran lapangan secara langsung.
3. Memodelkan sistem panas bumi berdasarkan hasil interpretasi densitas, struktur geologi, dan kaitannya dengan lokasi Gunung Lawu.

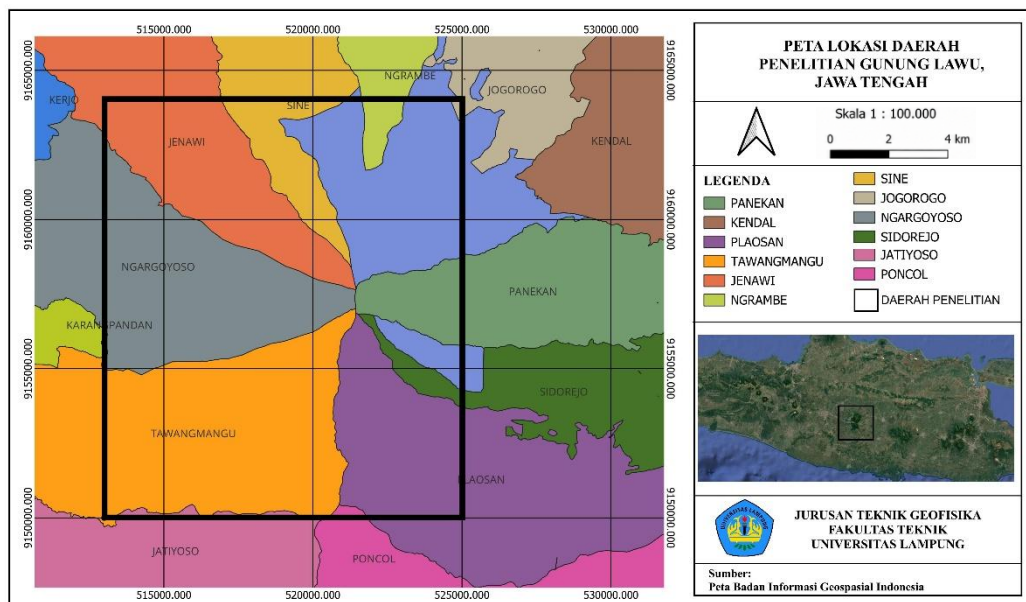
### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi sistem panas bumi bawah permukaan serta distribusi densitas batuan di wilayah prospek panas bumi Gunung Lawu. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan metode gayabarat, khususnya melalui analisis turunan (*derivative*) dan pemodelan tiga dimensi (3D), dalam kegiatan eksplorasi panas bumi. Hasil penelitian juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya serta mendukung kajian potensi energi panas bumi di kawasan Gunung Lawu.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di kawasan Gunung Lawu yang mencakup sebagian besar wilayah Kecamatan Matesih, Karangpandan, Jenawi, Tawangmangu, dan Ngargoyoso yang berada di Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. Selain itu, area penelitian juga meliputi sebagian wilayah Kecamatan Plaosan dan Poncol yang termasuk dalam Kabupaten Magetan, Provinsi Jawa Timur (Gambar 1). Secara geografis, daerah penelitian memiliki batas koordinat pada rentang 513000–525000 mT dan 9150000–9164000 mU berdasarkan sistem koordinat Universal Transverse Mercator (UTM) zona 49 di belahan bumi selatan.



Gambar 1. Peta Lokasi Daerah Penelitian (Badan Informasi Geospasial, 2018).

Daerah penelitian merupakan kawasan gunung api yang terletak di wilayah perbatasan antara Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur tepatnya pada Kabupaten

Magetan, Kabupaten Ngawi dan Kabupaten Karanganyar. Secara astronomis wilayah Gunung Lawu terletak di  $07^{\circ}37'30''\text{S}$   $111^{\circ}11'30''\text{E}$ . Gunung Lawu sendiri dikenal sebagai gunung tertinggi ketiga di Pulau Jawa dengan ketinggian mencapai sekitar 3.265 meter di atas permukaan laut. Wilayahnya membentang dari Kabupaten Ngawi di bagian utara hingga Kabupaten Wonogiri di bagian selatan (Amalisana dkk., 2017).

## **2.2 Geologi Regional**

Berdasarkan peta geologi regional daerah penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 2, wilayah Gunung Lawu didominasi oleh batuan vulkanik Kuartar yang menutupi batuan sedimen dan batuan intrusi berumur Tersier. Secara umum, urutan stratigrafi daerah penelitian dari tua ke muda terdiri atas satuan batuan sedimen Tersier, batuan intrusi andesit, satuan vulkanik Gunung Jobolarangan (Lawu Tua), dan satuan vulkanik Gunung Lawu Muda yang membentuk morfologi Gunung Lawu saat ini.

### **1. Satuan Batulempung Tersier**

Satuan ini merupakan batuan tertua di daerah penelitian dan tersusun atas batulempung, serpih, serta sisipan batupasir halus. Satuan batulempung ini berumur Miosen Awal dan diinterpretasikan sebagai hasil sedimentasi lingkungan laut dangkal hingga laut tenang. Satuan ini berperan sebagai batuan dasar (basement) bagi satuan batuan di atasnya.

### **2. Satuan Intrusi Andesit**

Satuan ini tersusun oleh batuan beku intrusif berkomposisi andesit yang menerobos batuan sedimen Tersier. Intrusi andesit diperkirakan terbentuk pada Kala Miosen Tengah sebagai hasil aktivitas magmatik regional. Keberadaan intrusi ini berperan penting dalam perkembangan struktur rekahan dan sesar yang kemudian menjadi jalur fluida hidrotermal.

### **3. Satuan Batugamping**

Satuan batugamping tersusun atas batugamping masif hingga berlapis yang terbentuk pada Kala Miosen Akhir hingga Pliosen. Satuan ini menindih tidak selaras batuan sedimen yang lebih tua dan terbentuk pada lingkungan laut dangkal. Pada beberapa lokasi, batugamping mengalami rekahan dan pelapukan yang

cukup intensif.

#### 4. Satuan Vulkanik Gunung Jobolarangan (Lawu Tua)

Satuan ini tersusun oleh lava andesit–basaltik, breksi vulkanik, serta aliran piroklastik yang bersifat lebih silisik. Satuan Gunung Jobolarangan terbentuk pada Kala Pliosen–Plistosen Awal dan mewakili fase awal aktivitas vulkanisme di daerah Gunung Lawu. Produk vulkanik ini membentuk morfologi perbukitan yang kini sebagian telah tererosi.

#### 5. Satuan Vulkanik Gunung Lawu Muda

Satuan ini merupakan satuan vulkanik termuda yang mendominasi daerah penelitian. Litologi penyusunnya meliputi lava andesit–basaltik, breksi vulkanik, tuf, dan aliran piroklastik. Satuan ini terbentuk pada Kala Plistosen dan membentuk tubuh utama Gunung Lawu dengan pola aliran radial dari puncak gunung.

#### 6. Kubah Lava dan Kerucut Samping

Satuan ini tersusun oleh lava andesit–basaltik yang membentuk kubah lava muda di puncak Gunung Lawu serta kerucut samping seperti Gunung Purung dan Gunung Anak. Satuan ini merupakan hasil erupsi akhir Gunung Lawu dan menunjukkan aktivitas vulkanik yang relatif muda.

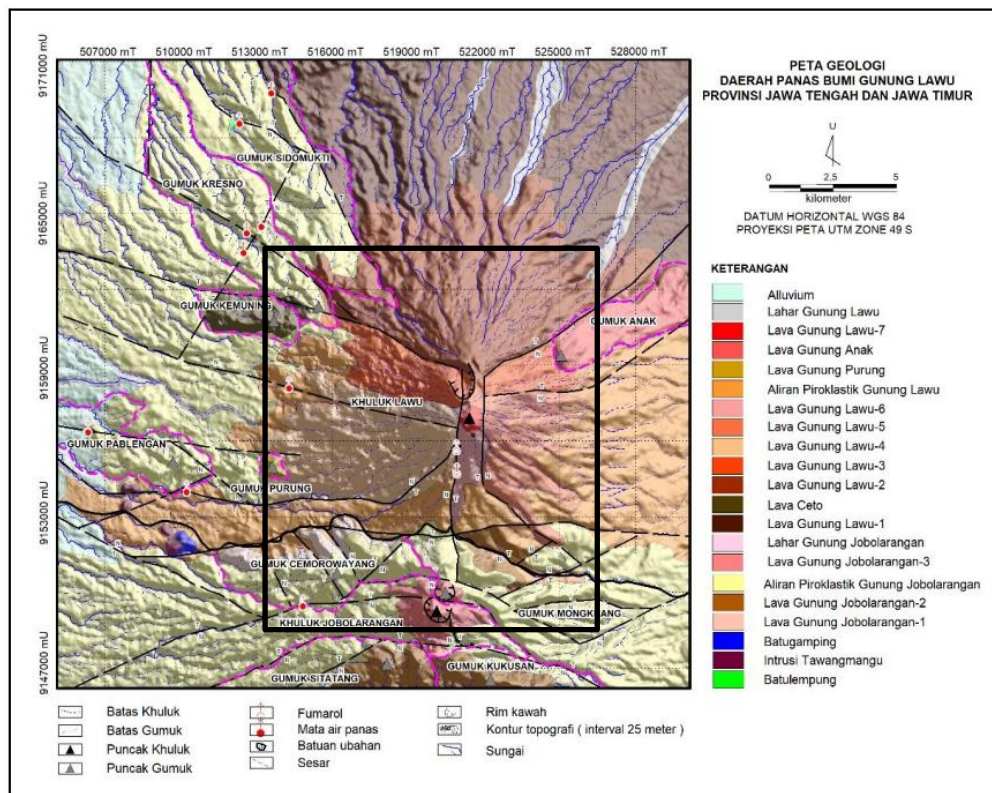
#### 7. Endapan Lahar dan Aluvium

Satuan ini merupakan endapan termuda yang tersusun atas material rombakan berupa pasir, kerikil, bongkah, dan lempung. Endapan lahar dan aluvium tersebar di sepanjang lembah sungai dan dataran rendah di sekitar kaki Gunung Lawu sebagai hasil proses erosi dan sedimentasi yang masih berlangsung hingga saat ini.

Berdasarkan Peta Geologi Daerah Penelitian pada Gambar 2, secara struktural wilayah Gunung Lawu dikontrol oleh sistem sesar dan rekahan yang berarah dominan barat–timur (W–E), baratlaut–tenggara (NW–SE), serta utara–selatan (N–S). Sesar-sesar tersebut berkembang akibat aktivitas tektonik regional dan vulkanisme intensif sejak Kala Tersier hingga Kuartar. Pola kelurusan sesar dapat dikenali dari citra topografi berupa lembah lurus dan pola aliran sungai yang terpotong. Sesar berarah barat–timur dan baratlaut–tenggara berperan sebagai

struktur utama yang mengontrol migrasi fluida hidrotermal. Struktur ini berasosiasi langsung dengan kemunculan manifestasi panas bumi berupa fumarol, mata air panas, dan zona alterasi hidrotermal di lereng selatan serta barat Gunung Lawu. Sementara itu, sesar berarah utara–selatan diinterpretasikan sebagai struktur yang relatif lebih muda dan masih berpotensi aktif secara tektonik.

Batuan intrusi andesit serta aktivitas vulkanik termuda Gunung Lawu berperan sebagai sumber panas (*heatsource*) sistem panas bumi. Keberadaan sesar dan rekahan yang berkembang intensif menciptakan zona permeabilitas tinggi yang memungkinkan fluida panas bermigrasi dari kedalaman menuju permukaan. Kondisi geologi regional ini mendukung terbentuknya sistem panas bumi Gunung Lawu dengan zona *upflow* yang diperkirakan berada di sekitar Kawah Candradimuka dan zona *outflow* yang berkembang di lereng barat dan barat laut gunung.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Gunungapi Lawu (Helmi dkk., 2020)

Perkembangan geologi Gunung Lawu bermula dari aktivitas tektonik regional yang berlangsung pada Kala Pliosen hingga Plistosen, yang kemudian memicu

terbentuknya Gunung Jobolarangan atau dikenal sebagai Lawu Tua. Gunung ini tersusun oleh lava berkomposisi andesit-basaltik serta batuan piroklastik yang bersifat silisik. Seiring berjalannya waktu, pusat aktivitas vulkanik mengalami pergeseran ke arah utara sehingga membentuk Gunung Lawu Muda yang menjadi penyusun utama morfologi Gunung Lawu saat ini. Tahap akhir aktivitas vulkanisme ditandai oleh terbentuknya kubah lava muda pada puncak Gunung Lawu, disertai kemunculan kerucut parasit berupa Gunung Purung dan Gunung Anak. Proses pelapukan dan erosi yang terus berlangsung hingga saat ini menghasilkan endapan lahar dan aluvium yang tersebar pada daerah dataran maupun sepanjang alur sungai. Manifestasi panas bumi di kawasan Gunung Lawu umumnya ditemukan pada lereng bagian selatan, yang ditandai oleh keberadaan fumarol, mata air panas dengan suhu sekitar 90°C, serta batuan alterasi bertipe argilik hingga argilik lanjut. Selain itu, mata air panas dengan kisaran temperatur 32–40°C juga ditemukan di bagian kaki gunung sebelah barat dan barat laut Gunung Lawu (Hermawan & Adhitya, 2018). Karakteristik geologi, aktivitas vulkanik, serta keberadaan berbagai manifestasi panas bumi tersebut menjadikan kawasan Gunung Lawu sebagai salah satu daerah yang memiliki prospek tinggi untuk pengembangan energi panas bumi di Indonesia.

### **2.3 Geomorfologi Regional**

Secara geomorfologi, daerah panas bumi Gunung Lawu termasuk satuan gunungapi strato (*stratovolcano*) yang terbentuk akibat aktivitas vulkanisme Kuartar. Morfologi wilayah dicirikan oleh kerucut gunungapi utama dengan puncak Khuluk Lawu serta gumuk vulkanik parasit seperti Purung, Kemuning, Sidomukti, dan Anak, yang menunjukkan aktivitas erupsi berulang melalui pusat erupsi utama maupun rekahan samping.

Bagian puncak dan lereng atas memiliki relief curam dengan pola aliran sungai radial sentrifugal yang berkembang menjauhi pusat gunungapi. Zona ini banyak dijumpai kawah, sesar, fumarol, mata air panas, dan batuan ubahan yang berperan sebagai jalur fluida panas bumi. Pada lereng tengah hingga bawah, morfologi berubah menjadi bergelombang hingga landai dan tersusun oleh lava, aliran piroklastik, serta endapan lahar. Sementara itu, kaki gunungapi didominasi oleh

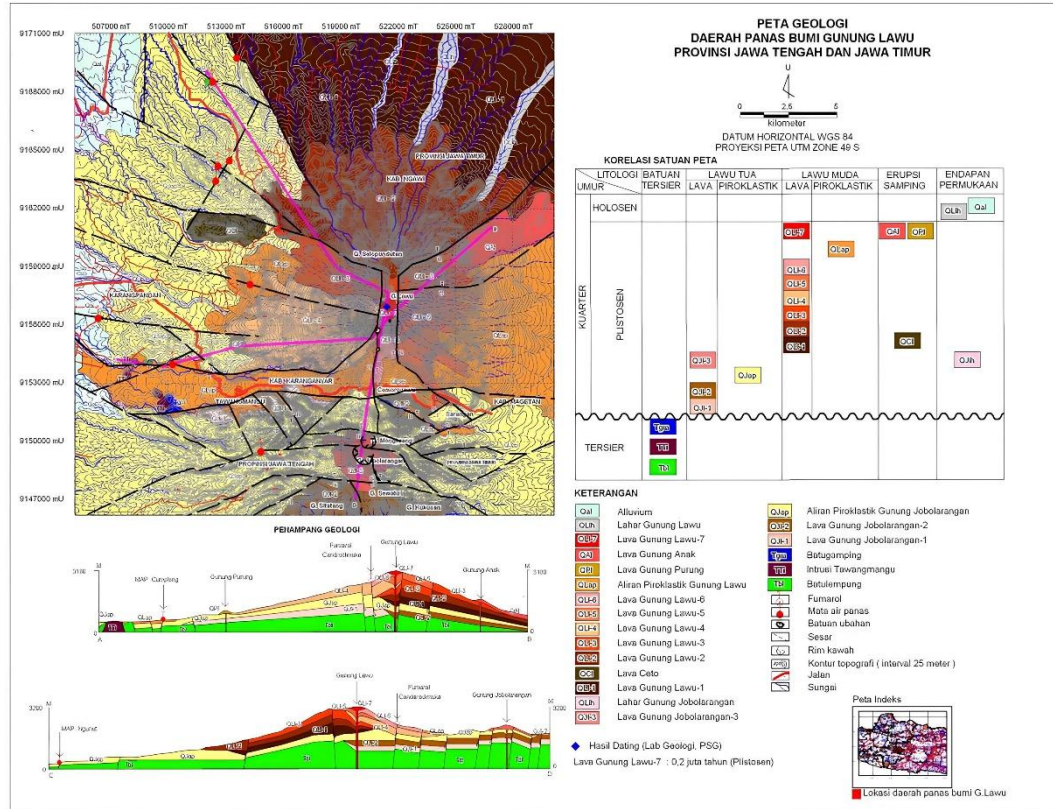
endapan lahar dan aluvium dengan relief relatif datar. Geomorfologi Gunung Lawu dipengaruhi oleh interaksi aktivitas vulkanik, struktur geologi, dan proses erosi yang membentuk sistem panas bumi vulkanik. Manifestasi panas bumi umumnya berkembang pada zona puncak dan lereng yang berasosiasi dengan sesar dan alterasi hidrotermal.

Secara geologi, batuan tertua di daerah kajian berupa batu lempung berumur Miosen Awal, kemudian diikuti intrusi andesit pada Miosen Tengah dan pembentukan batu gamping pada Miosen Akhir–Pliosen. Aktivitas tektonik Pliosen–Plistosen memicu pembentukan vulkanik Lawu Tua yang tersusun oleh lava andesit-basaltik dan batuan piroklastik silisik. Aktivitas vulkanik kemudian bergeser membentuk Lawu Muda yang menyusun morfologi Gunung Lawu saat ini. Tahap akhir vulkanisme menghasilkan kubah lava muda di puncak serta kerucut samping Gunung Purung dan Gunung Anak, sedangkan proses erosi selanjutnya membentuk endapan lahar dan aluvium di daerah pedataran dan sungai.

#### **2.4 Stratigrafi**

Stratigrafi pada daerah prospek Gunung Lawu disusun berdasarkan hubungan relatif antar satuan batuan yang berkembang di wilayah tersebut. Penentuan nama setiap satuan batuan dilakukan dengan memperhatikan lokasi pusat erupsi, mekanisme pengendapan, serta proses geologi yang membentuknya. Berdasarkan klasifikasi yang disusun oleh Pusat Sumber Daya Geologi (2009), batuan yang terdapat di daerah prospek Gunung Lawu dikelompokkan ke dalam 21 satuan batuan pada Gambar 3 . Kelompok tersebut terdiri atas dua satuan batuan sedimen, satu satuan batuan intrusi, lima belas satuan batuan vulkanik, dan tiga satuan endapan permukaan. Secara stratigrafi, urutan satuan batuan dari yang tertua hingga termuda di kawasan Gunung Lawu meliputi Satuan Batu Lempung (Tbl), Intrusi Tawangmangu (TTi), Batu Gamping (Tgm), Lava Gunung Jobolarangan-1 (QJl-1), Lava Gunung Jobolarangan-2 (QJl-2), Aliran Piroklastik Gunung Jobolarangan (QJap), Lava Gunung Jobolarangan-3 (QJl-3), Lahar Gunung Jobolarangan (QJlh), Lava Gunung Lawu-1 (QLl-1), Lava Ceto (QCl), Lava Gunung Lawu-2 (QLl-2), Lava Gunung Lawu-3 (QLl-3), Lava Gunung Lawu-4 (QLl-4), Lava Gunung Lawu-5 (QLl-5), Lava Gunung Lawu-6 (QLl-6), Aliran Piroklastik Gunung Lawu (QLap),

Lava Gunung Purung (QPI), Lava Gunung Anak (QAI), Lava Gunung Lawu-7 (QL1-7), Lahar Gunung Lawu (QLh), serta Alluvium (Qal) (Kementerian ESDM, 2017).



Gambar 3. Peta Vulkanostratigrafi (Qahhar dkk., 2015)

Dominasi satuan vulkanik pada stratigrafi Gunung Lawu menunjukkan bahwa perkembangan geologi daerah ini sangat dipengaruhi oleh aktivitas vulkanisme yang berlangsung secara berulang sejak pembentukan Gunung Jobolarangan hingga Gunung Lawu muda. Keberadaan satuan lava, aliran piroklastik, dan lahar mencerminkan tahapan evolusi gunung api yang kompleks serta berperan penting dalam pembentukan sistem panas bumi, khususnya sebagai batuan reservoir maupun batuan penutup yang mengontrol sirkulasi fluida hidrotermal di bawah permukaan. Satuan lava andesit-basaltik yang banyak dijumpai di kawasan Gunung Lawu berpotensi memiliki rekahan akibat proses tektonik dan vulkanik, sehingga dapat meningkatkan permeabilitas batuan dan menjadi media penyimpanan serta aliran fluida panas bumi. Hubungan antara berbagai satuan batuan tersebut menunjukkan bahwa kondisi geologi Gunung Lawu mendukung terbentuknya

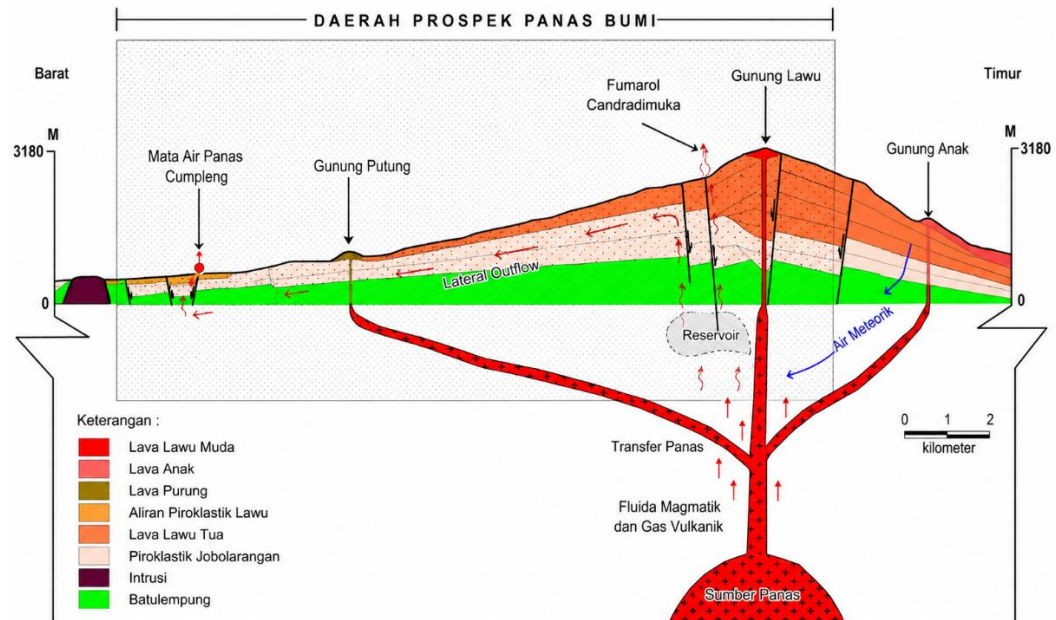
sistem panas bumi yang lengkap. Oleh karena itu, pemahaman terhadap stratigrafi dan persebaran satuan batuan menjadi aspek penting dalam interpretasi sistem panas bumi serta penentuan zona prospek yang berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut.

## 2.5 Sistem Panas Bumi

Keberadaan jalur vulkanik yang memanjang di Pulau Jawa menciptakan kondisi geologi yang sangat mendukung terbentuknya sistem panas bumi di berbagai wilayah, termasuk kawasan Gunung Lawu yang berada di perbatasan Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi Jawa Timur. Pada Gambar 4, sistem panas bumi yang berkembang di daerah ini diduga memiliki keterkaitan erat dengan aktivitas vulkanik termuda Gunung Lawu yang masih menyimpan sisa panas dari aktivitas magmatik di bawah permukaan bumi. Panas magmatik berfungsi sebagai sumber panas utama yang memanaskan fluida bawah permukaan hingga membentuk sistem hidrotermal. Fluida panas tersebut kemudian bergerak ke arah permukaan melalui rekahan, sesar, atau batuan yang permeabel. Interaksi antara fluida dan batuan selama proses pergerakannya menyebabkan perubahan mineral serta terbentuknya zona alterasi hidrotermal. Keberadaan zona alterasi ini menjadi salah satu indikasi penting adanya sistem panas bumi di kawasan Gunung Lawu (Permana dkk., 2020).

Fluida dalam sistem panas bumi umumnya berasal dari air meteorik, yaitu air hujan yang meresap ke bawah permukaan melalui rekahan dan lapisan batuan yang permeabel. Air tersebut kemudian mengalami pemanasan akibat keberadaan sumber panas di kedalaman sehingga terbentuk sistem sirkulasi hidrotermal. Perpindahan panas terjadi melalui mekanisme konduksi pada batuan dan konveksi pada fluida. Ketika fluida menerima panas, densitasnya menurun sehingga bergerak naik akibat gaya apung (*buoyancy*), sedangkan fluida yang lebih dingin bergerak turun menggantikannya. Proses ini menghasilkan sirkulasi fluida yang berlangsung secara terus-menerus di dalam sistem panas bumi. Secara umum, sistem panas bumi tersusun atas empat komponen utama, yaitu sumber panas (*heat source*), fluida panas bumi, batuan reservoir yang berfungsi sebagai tempat

penyimpanan dan aliran fluida, serta batuan penudung (*caprock*) yang berperan menahan fluida dan panas agar tetap terakumulasi di bawah permukaan (Ilmi dkk., 2014).



Gambar 4. Penampang vulkanostratigrafi Gunung Lawu dan hubungannya dengan sistem panas bumi Gunung Lawu (Hermawan & Adhitya, 2018).

## 2.6 Penelitian Terdahulu

(Setyawan dkk., 2021) meneliti manifestasi mata air panas di Gunung Lawu menggunakan data gravitasi satelit GGMplus untuk mengidentifikasi struktur geologi pengontrol sistem hidrotermal. Data diolah hingga Anomali Bouguer Lengkap dan dianalisis melalui pemodelan ke depan 2D pada lintasan yang memotong zona manifestasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemunculan mata air panas dikontrol oleh sesar yang berperan sebagai jalur migrasi fluida dari kedalaman, dengan susunan litologi bawah permukaan berupa tuff berdensitas rendah–sedang, lava andesit, dan batuan dasar lava basal berdensitas tinggi.

(Sari dkk., 2023) mengkaji potensi panas bumi Gunung Lawu melalui pemodelan 3D berbasis anomali gravitasi untuk mengkarakterisasi sistem panas bumi secara volumetrik. Analisis FHD dan SVD mengungkap keberadaan beberapa sesar normal yang berperan penting dalam sistem hidrotermal. Hasil inversi 3D hingga kedalaman 8000 m mengidentifikasi lapisan lempung sebagai batuan penudung,

lava piroklastik sebagai *reservoir*, serta lava masif dalam sebagai sumber panas utama sistem panas bumi Gunung Lawu.

Amalisan dkk. (2017) menggunakan citra Landsat 8 untuk mengidentifikasi potensi panas bumi berdasarkan anomali suhu permukaan tanah dan hubungannya dengan kondisi geologi. Zona suhu tinggi ditemukan berasosiasi dengan manifestasi panas bumi, kerapatan kelurusan, serta satuan lava dan piroklastik. Pendekatan ini efektif untuk eksplorasi awal, namun masih terbatas pada analisis permukaan.

Hermawan & Hermana (2018) Penelitian keprospekan panas bumi berbasis vulkanostratigrafi menekankan peran evolusi gunung api dalam pembentukan sistem panas bumi Gunung Lawu. Susunan lava dan piroklastik diinterpretasikan mengontrol permeabilitas dan potensi *reservoir* panas bumi. Penelitian ini kuat dari sisi stratigrafi, tetapi belum terintegrasi dengan analisis geofisika kuantitatif.

Tabel 1. Daftar penelitian terdahulu

No	Nama Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Setyawan. dkk. (2021)	Mendeteksi manifestasi mata air panas berdasarkan data satelit gravitasi di Gunung Lawu.	Pemodelan 2D menunjukkan kemunculan mata air panas di Gunung Lawu dikendalikan oleh struktur patahan. Bawah permukaan terdiri dari tiga lapisan utama: Tuff (densitas 1,27-2,66 gr/cc), lava andesit (2,90 gr/cc), dan lava basal (2,99 gr/cc).
2.	Sari. dkk. (2023)	Analisis potensi panas bumi menggunakan pemodelan 3D struktur bawah permukaan berdasarkan	Berdasarkan analisis <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD), ditemukan tiga sesar normal pada sumber panas bumi. Model inversi 3D mengidentifikasi tiga lapisan: batuan lempung

---

		Anomali Gravitasi di Kawasan Gunung Lawu, Jawa Tengah	sebagai <i>caprock</i> (kedalaman 500-2500 m), lava piroklastik sebagai <i>reservoir</i> (3000-4500 m), dan lava sebagai sumber panas (5000-8000 m).
3	Amalisana dkk. (2017)	Penentuan Potensi Panas Bumi Menggunakan Landsat 8 dan Hubungannya dengan Kondisi Geologi Gunung Lawu	Zona suhu tinggi berasosiasi dengan manifestasi panas bumi, kelurusan struktur, serta satuan lava dan piroklastik
4	Hermawan & Hermana (2018)	Keprospekan Panas Bumi Gunung Lawu Berdasarkan Kajian Vulkanostratigrafi	Penelitian keprospekan panas bumi berbasis vulkanostratigrafi menekankan peran evolusi gunung api dalam pembentukan sistem panas bumi Gunung Lawu. Susunan lava dan piroklastik diinterpretasikan mengontrol permeabilitas dan potensi <i>reservoir</i> panas bumi. Penelitian ini kuat dari sisi stratigrafi, tetapi belum terintegrasi dengan analisis geofisika kuantitatif.

---

### III. TEORIDASAR

#### 3.1 Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode dalam geofisika yang didasarkan pada pengukuran variasi medan gravitasi bumi pada suatu wilayah tertentu. Perbedaan nilai medan gravitasi yang terukur di permukaan bumi dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya variasi densitas batuan di bawah permukaan, perbedaan jenis batuan penyusun bawah permukaan, perubahan jarak antara permukaan bumi terhadap pusat bumi, serta kondisi topografi yang beragam seperti adanya lembah dan perbukitan (Sarkowi, 2014). Faktor-faktor tersebut menyebabkan terjadinya variasi medan gayaberat yang dapat dimanfaatkan untuk menginterpretasikan kondisi geologi dan struktur bawah permukaan suatu daerah.

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang dimanfaatkan untuk mengidentifikasi serta menggambarkan kondisi geologi bawah permukaan melalui analisis variasi medan gravitasi bumi. Pengukuran gayaberat dilakukan dengan mengamati perubahan nilai medan gravitasi yang muncul akibat adanya perbedaan densitas batuan secara lateral di bawah permukaan. Prinsip dasar metode ini berkaitan dengan Hukum Gravitasi Newton yang menyatakan bahwa gaya tarik-menarik antara dua benda berbanding lurus dengan massa masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak yang memisahkan pusat massa kedua benda tersebut. Oleh karena itu, metode gayaberat dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi dan struktur geologi bawah permukaan, sehingga membantu dalam interpretasi berbagai fenomena geologi yang terdapat di suatu wilayah (Sugita dkk., 2020).

Metode gayaberat banyak digunakan karena memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi perbedaan densitas antara sumber anomali dan batuan yang berada

di sekitarnya. Variasi nilai densitas tersebut dapat dimanfaatkan untuk menggambarkan bentuk serta karakteristik struktur bawah permukaan pada suatu wilayah. Ketidakteraturan distribusi densitas di bawah permukaan bumi umumnya berkaitan dengan keberadaan berbagai struktur geologi yang berkembang di dalamnya, sehingga informasi mengenai kondisi geologi bawah permukaan dapat diinterpretasikan melalui analisis data gayaberat (Setiadi dkk., 2014).

### 3.2 Konsep Dasar Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengkaji kondisi geologi bawah permukaan dengan memanfaatkan parameter fisik berupa rapat massa (densitas) batuan. Melalui metode ini, perubahan kondisi geologi baik secara lateral maupun vertikal dapat diidentifikasi berdasarkan variasi nilai densitas yang terdapat pada batuan penyusun bawah permukaan (Setiadi dkk., 2010).

#### 3.2.1 Gayaberat Newton

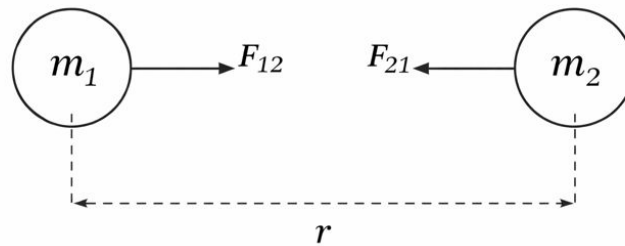
Menurut (Rizkiani & Rustadi, 2020), prinsip dasar yang mendasari metode gayaberat adalah Hukum Gravitasi Newton yang menjelaskan adanya gaya tarik-menarik antara dua benda yang memiliki massa tertentu dan dipisahkan oleh suatu jarak. Hubungan tersebut dapat dinyatakan secara matematis melalui persamaan (1):

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

Keterangan:

- $\vec{F}$  : gaya tarik menarik (N)
- $m_1 m_2$  : massa benda 1 dan massa benda 2 (kg)
- $r$  : jarak antara dua benda (m)
- $\hat{r}$  : Vektor satuan arah
- $G$  : konstanta Gravitasi Universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg s}^{-2}$ )

Ilustrasi konsep gayaberat Newton ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Konsep Gaya Tarik Menarik Antara Dua Benda (Setyawan dkk.,2020).

### 3.2.2 Percepatan Gayaberat

Hukum Kedua Newton menyatakan bahwa percepatan suatu benda berbanding lurus dengan gaya resultan yang bekerja padanya dan berbanding terbalik dengan massa benda tersebut. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan dalam persamaan (2):

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

Karena adanya gaya tarik yang ditimbulkan oleh suatu benda bermassa  $M$  pada jarak  $r$ , maka benda lain yang memiliki massa  $m$  akan mengalami percepatan, yang dapat dinyatakan sebagai persamaan (3) berikut:

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

Interaksi antara bumi (dengan massa  $M$ ) dengan benda di permukaan bumi (dengan massa  $m$ ) sejauh jarak  $r$  dari pusat keduanya juga memenuhi hukum tersebut, maka dari persamaan (1) dan (2) didapatkan:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1}{m} \vec{F} = \frac{1}{m} \left( G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \right) \quad (4)$$

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

Pada persamaan (4), vektor  $\vec{g}$  menyatakan percepatan gravitasi bumi yang sering disebut sebagai medan gayaberat bumi. Parameter  $M$  menunjukkan massa bumi yang dinyatakan dalam satuan kilogram (kg),  $r$  merepresentasikan jari-jari bumi dalam satuan meter (m), sedangkan  $G$  merupakan konstanta gravitasi universal yang memiliki nilai sebesar  $6,67 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg s}^{-2}$ . Berdasarkan hubungan matematis tersebut, dapat dijelaskan bahwa besar percepatan gravitasi dipengaruhi

secara langsung oleh massa bumi dan dipengaruhi secara berlawanan oleh kuadrat jari-jari bumi. Dengan kata lain, semakin besar massa bumi maka nilai percepatan gravitasinya akan semakin besar, sedangkan semakin besar jari-jari bumi maka nilai percepatan gravitasinya akan semakin kecil.

$$\rho = \frac{M}{V} \rightarrow M = \rho \cdot V \quad (6)$$

Keterangan:

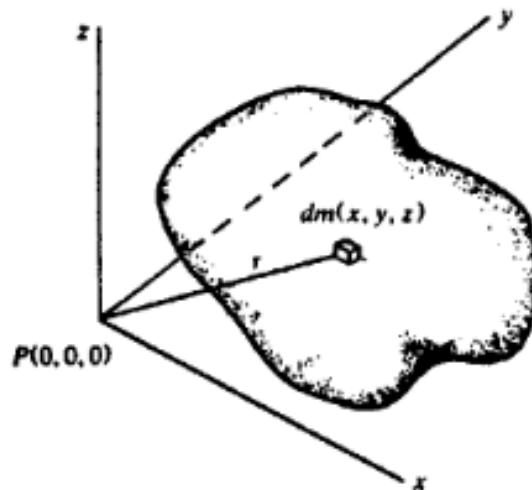
- $\rho$  : Densitas (gr/cc)  
 $M$  : Massa benda (kg)  
 $V$  : Volume benda (m<sup>3</sup>)

Substitusi persamaan (4) dengan persamaan (5) dimana Massa suatu benda sama dengan hasil kali massa jenis/rapat massa dengan volume, sehingga kita bisa mendapatkan persamaan rapat massa atau densitas pada persamaan (7).

$$\vec{g} = G \frac{\rho \cdot V}{R^2} \rightarrow \rho = \frac{\vec{g} \cdot R^2}{G \cdot V} \quad (7)$$

### 3.2.3 Potensial Gayaberat

Energi potensial adalah energi yang dimiliki suatu benda akibat pengaruh suatu gaya yang bergantung pada posisi atau konfigurasi benda tersebut relatif terhadap lingkungannya. Salah satu bentuk energi potensial adalah energi potensial gravitasi, yaitu energi yang dimiliki suatu benda akibat gaya gravitasi Bumi. Energi ini dinyatakan sebagai hasil kali antara berat benda dan ketinggiannya terhadap suatu titik acuan tertentu, misalnya permukaan tanah (Maison dkk., 2020). Potensial gravitasi timbul sebagai akibat adanya gaya tarik-menarik antara dua massa dan termasuk dalam medan konservatif, sehingga besarnya usaha yang dilakukan tidak dipengaruhi oleh lintasan perpindahan, melainkan hanya ditentukan oleh posisi awal dan posisi akhir benda. Konsep potensial gayaberat dalam tiga dimensi ditunjukkan pada Gambar 6 dan dapat dinyatakan secara matematis melalui persamaan (8).



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

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

$$\vec{\nabla}u(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{m} = -\vec{g}(\vec{r}) \quad (9)$$

$$U(\vec{r}) = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \frac{\vec{F}}{m} \cdot d\vec{r} \quad (10)$$

$$U(\vec{r}) = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \vec{g} \cdot d\vec{r} \quad (11)$$

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (12)$$

Untuk memindahkan suatu massa dari jarak tak hingga ( $\infty$ ) menuju suatu titik yang berjarak ( $r$ ) dari pusat massa diperlukan usaha, sehingga terbentuk potensial gayaberat sebagaimana dinyatakan pada persamaan (12). Gambar 6 menunjukkan bahwa potensial dan percepatan gayaberat dari suatu benda bermassa tiga dimensi pada titik di luar benda dapat dihitung dengan membagi massa tersebut menjadi elemen-elemen kecil ( $dm$ ). Selanjutnya, kontribusi dari setiap elemen massa diintegrasikan sehingga diperoleh total potensial dan percepatan gayaberat yang dihasilkan oleh seluruh distribusi massa tersebut. Potensial gravitasi bumi tidak seragam karena distribusi massa bawah permukaan yang berbeda-beda. Perbedaan ini menciptakan variasi gayaberat dan energi potensial di berbagai wilayah, yang

penting dalam pemetaan struktur geologi bawah tanah.

Potensial yang dihasilkan oleh elemen massa  $dm$  pada titik  $(x,y,z)$  yang berjarak  $r$  dari titik pengamatan  $P(0,0,0)$  dinyatakan pada persamaan (13).

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (13)$$

Dimana  $\rho(x, y, z)$  menyatakan densitas massa dan  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$  sehingga potensial total dari total massa sebagai berikut

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (14)$$

Karena  $g$  merupakan percepatan gayaberat pada arah sumbu  $z$  (vertikal) dan dengan asumsi densitas  $\rho$  konstan, maka

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (15)$$

### 3.2.4 Rapat Massa Batuan

Kepadatan batuan ( $\rho$ ) adalah perbandingan antara massa batuan dengan volumenya, yang umumnya dinyatakan dalam gram per sentimeter kubik (g/cc). Nilai kepadatan mencerminkan tingkat kepadatan batuan dan merupakan parameter utama dalam interpretasi data geofisika. Semakin padat struktur batuan, semakin tinggi nilai kepadatan batuan tersebut. Metode gravitasi didasarkan pada variasi lateral kepadatan batuan di bawah permukaan Bumi. Distribusi massa bumi yang tidak seragam secara lateral akan menyebabkan perbedaan nilai gayaberat pada setiap lokasi pengukuran di permukaan. Meskipun perbedaan nilai tersebut relatif kecil, pengukurannya memerlukan instrumen yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi agar variasi yang terjadi dapat terdeteksi dengan baik. Hasil utama dari survei gayaberat umumnya berupa peta gayaberat yang menggambarkan sebaran variasi medan gravitasi akibat ketidakseragaman distribusi rapat massa batuan. Variasi tersebut akan menghasilkan penyimpangan terhadap nilai gayaberat normal di sekitarnya yang dikenal sebagai anomali gayaberat (Setyanta, 2015). Adapun

kisaran nilai variasi densitas batuan menurut Telford dkk. (1990) disajikan pada Tabel 2.

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

<b>Jenis Batuan</b>	<b>Batas (gr/cc)</b>	<b>Rata-rata (gr/cc)</b>
<b>Batuan Sedimen</b>		
<i>Aluvium</i>	1,96-2,00	1,98
<i>Clay</i>	1,63-2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	2,00
<i>Loess</i>	1,40-1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80-2,20	1,93
<i>Soil</i>	1,20-2,40	1,92
<i>Sand</i>	1,70-2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61-2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77-3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93-2,90	2,55
<i>Dolomit</i>	2,28-2,90	2,70
<i>Chalk</i>	1,53-2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10-2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88-0,92	0,90
<b>Batuan Beku</b>		
<i>Riolit</i>	2,35-2,70	2,52
<i>Granit</i>	2,50-2,81	2,64
<i>Andesit</i>	2,40-2,80	2,61
<i>Syenite</i>	2,60-2,95	2,77
<i>Basalt</i>	2,70-3,30	2,99
<i>Gabro</i>	2,70-3,50	3,03
<b>Batuan Metamorf</b>		
<i>Schist</i>	2,39-2,90	2,64
<i>Gneiss</i>	2,59-3,00	2,80
<i>Phylite</i>	2,68-2,80	2,74
<i>Slate</i>	2,70-2,90	2,79
<i>Granulite</i>	2,52-2,70	2,65
<i>Amphibolite</i>	2,90-3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20-3,54	3,37

### 3.3 Koreksi Metode Gayaberat

Koreksi metode gayaberat adalah serangkaian penyesuaian data pengukuran gravitasi supaya nilai yang diperoleh benar-benar mencerminkan variasi gravitasi akibat struktur bawah permukaan, bukan karena pengaruh lain yang tidak diinginkan.

### 3.3.1 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer adalah salah satu tahapan koreksi dalam metode gayaberat yang dilakukan untuk menghilangkan pengaruh perbedaan elevasi tanpa mengabaikan keberadaan massa batuan yang terletak di bawah titik pengamatan. Variasi ketinggian suatu lokasi dapat memengaruhi nilai percepatan gayaberat yang terukur, sehingga diperlukan koreksi untuk memperoleh nilai yang lebih representatif. Nilai Koreksi Bouguer (BC) dapat dihitung dengan persamaan (16) (Liana dkk., 2020).

$$BC = 2\pi G\rho h \quad (16)$$

Nilai  $2\pi G = 0,04192$  maka,

$$BC = 0,04192\rho h \quad (17)$$

Keterangan:

$BC$  : *Bouguer Correction* (mGal/m)

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

$\rho$  : Rapat massa batuan rata-rata (gr/cc)

$h$  : Ketinggian (m)

### 3.3.2 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas (*Free Air Correction* atau FAC) merupakan koreksi yang dilakukan untuk menghilangkan pengaruh perbedaan ketinggian terhadap nilai gravitasi bumi yang terukur. Variasi elevasi suatu titik pengamatan dapat menyebabkan perubahan nilai percepatan gravitasi, sehingga diperlukan koreksi agar data yang diperoleh lebih akurat dan dapat dibandingkan dengan titik pengamatan lainnya. Nilai *Free Air Correction* (FAC) dapat dihitung menggunakan persamaan (18) (Sugita dkk., 2020).

$$FAC = 0,3086 h \quad (18)$$

Keterangan:

$FAC$  : *Free Air Correction* (mGal)

$h$  : Ketinggian (m)

Agar mendapatkan nilai *Free Air Anomaly* (FAA) atau anomali udara bebas, bisa diterapkan pada rumus (19):

$$FAA = g_{obs} - g_{\varphi} + 0,3086 h \quad (19)$$

Keterangan:

$FAA$  : *Free Air Anomaly* (mGal)

$g_{obs}$  : Gravitasi observasi (mGal)

$g_{\varphi}$  : Gravitasi teoritis (mGal)

$h$  : Ketinggian (m)

### 3.3.3 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan (*terrain correction*) merupakan koreksi yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh topografi yang tidak diperhitungkan dalam koreksi Bouguer. Pada koreksi Bouguer, permukaan bumi diasumsikan sebagai lapisan horizontal tak berhingga sehingga variasi bentuk lahan seperti bukit, lereng, dan lembah diabaikan. Padahal, ketidakteraturan topografi tersebut menyebabkan distribusi massa batuan tidak seragam dan memengaruhi nilai gayaberat terukur. Pengaruh akibat kondisi topografi ini disebut efek medan (*terrain effect*). Oleh karena itu, koreksi medan diperlukan untuk mengurangi pengaruh tersebut agar data gayaberat memiliki ketelitian yang lebih baik (Afni & Kusmita, 2021). Koreksi medan dapat ditulis sebagai persamaan (20):

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \left\{ (r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \right\} \quad (20)$$

Keterangan:

$g$  : Respon Gayaberat (mGal)

$n$  : Jumlah kompartemen tiap zona

$\rho$  : Densitas (gr/cc)

$r_1$  : Jari-jari radius dalam (m)

$r_2$  : Jari-jari radius luar (m)

$L$  : Selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

### 3.3.4 Koreksi Lintang

Koreksi lintang merupakan koreksi yang diterapkan pada data gravitasi teramati ( $g_{obs}$ ) untuk menghilangkan pengaruh variasi nilai gravitasi yang disebabkan oleh

bentuk elipsoid bumi dan efek rotasi bumi (Manik dkk., 2020). Perbedaan nilai gayaberat pada tiap lintang geografis disebabkan oleh gaya sentrifugal akibat rotasi bumi serta bentuk bumi yang menyerupai elipsoid. Oleh karena itu, koreksi lintang dilakukan untuk mengurangi pengaruh kedua faktor tersebut dengan menyesuaikan nilai gayaberat terhadap kondisi geografis. Koreksi ini umumnya digunakan dalam penentuan nilai gayaberat teoritis sebagai acuan dalam analisis data gayaberat (Liana dkk., 2020).

$$G\theta = 978032,7(1 + 0,0053024 \sin^2 \theta - 0,0000058 \sin^2 2 \theta) \quad (21)$$

Keterangan:

$G\theta$  : Percepatan gayaberat pada lintang  $\theta$  ( $m/s^2$ )

$\theta$  : Lintang geografis (radian)

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

### 3.4 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap pada dasarnya merupakan selisih antara nilai gayaberat hasil pengukuran yang telah direduksi ke suatu bidang referensi tertentu dengan nilai gayaberat teoritis yang dihitung pada bidang referensi yang sama di lokasi pengamatan (Liana dkk., 2020). Dalam metode gayaberat, kondisi bawah permukaan dapat diinterpretasikan melalui pengamatan variasi nilai gravitasi yang dinyatakan sebagai anomali Bouguer (*Bouguer anomaly*) dengan satuan mGal. Analisis terhadap distribusi anomali tersebut memungkinkan identifikasi berbagai kenampakan geologi bawah permukaan, termasuk indikasi keberadaan struktur patahan yang ditunjukkan oleh perubahan atau kecenderungan nilai anomali gayaberat (Manik dkk., 2020). Anomali Bouguer mencerminkan variasi kepadatan batuan di bawah permukaan Bumi. Oleh karena itu, perbedaan kepadatan batuan di bawah permukaan merupakan faktor utama dalam pembentukan pola anomali gravitasi, yang dimanfaatkan dalam kegiatan eksplorasi geofisika (Sugita dkk., 2020). Secara matematis anomali Bouguer dihitung dengan menggunakan persamaan (22) (Liana dkk., 2020).

$$ABL = FAC - BC + TC \quad (22)$$

Keterangan:

ABL : Anomali Bouguer Lengkap (mGal)

*FAC* : *Free Air Correction* (mGal)

*BC* : *Bouguer Correction* (mGal)

*TC* : *Terrain Correction* (mGal)

Anomali Bouguer yang diperoleh akan dijadikan sebagai dasar dalam pemodelan untuk interpretasi kuantitatif. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui distribusi densitas di bawah permukaan serta mengidentifikasi struktur geologi yang berperan dalam sistem panas bumi.

### 3.5 Analisis Spektrum

Analisis spektrum dilakukan untuk menentukan ukuran jendela filter yang akan digunakan dalam proses pemisahan antara anomali regional dan anomali residual. Pada tahap ini, digunakan transformasi Fourier yang berfungsi untuk menguraikan suatu sinyal menjadi sejumlah komponen gelombang sinusoidal dengan berbagai nilai frekuensi. Hasil dari transformasi Fourier tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk spektrum amplitudo maupun spektrum fase. Melalui penerapan transformasi Fourier terhadap data gayaberat pada lintasan yang dianalisis, dapat diperoleh parameter berupa bilangan gelombang (wave number,  $k$ ) dan amplitudo ( $A$ ). Kedua parameter ini kemudian dimanfaatkan untuk memperkirakan ukuran jendela filter yang selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam proses filtering guna memisahkan komponen anomali regional dan residual (Sarkowi, 2014). Selain itu, Blakley (1996) juga mengembangkan spektrum dari potensial gayaberat yang teramati pada suatu bidang horizontal.

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (23)$$

Berdasarkan Persamaan 30 diatas maka diperoleh Persamaan 24.

$$F(U) = 2\pi G\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (24)$$

Menentukan lintasan dapat dilakukan dengan Transformasi Fourier anomali gayaberat dapat dilakukan menggunakan Persamaan 26.

$$F(g_z) = G\Delta\rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) = G\Delta\rho \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (25)$$

$$F(g_z) = -2\pi G\Delta\rho e^{k|z_0-z_1|} \quad (26)$$

Keterangan :

$U$  : Potensial gayaberat

$\Delta\rho$  : Anomali densitas

$G$  : Konstanta gayaberat

$r$  : Jarak

$z$  : Kedalaman benda anomali

$z_0$  : Ketinggian titik amat

$k$  : Bilangan gelombang

$g_z$  : Anomali gayaberat

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

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

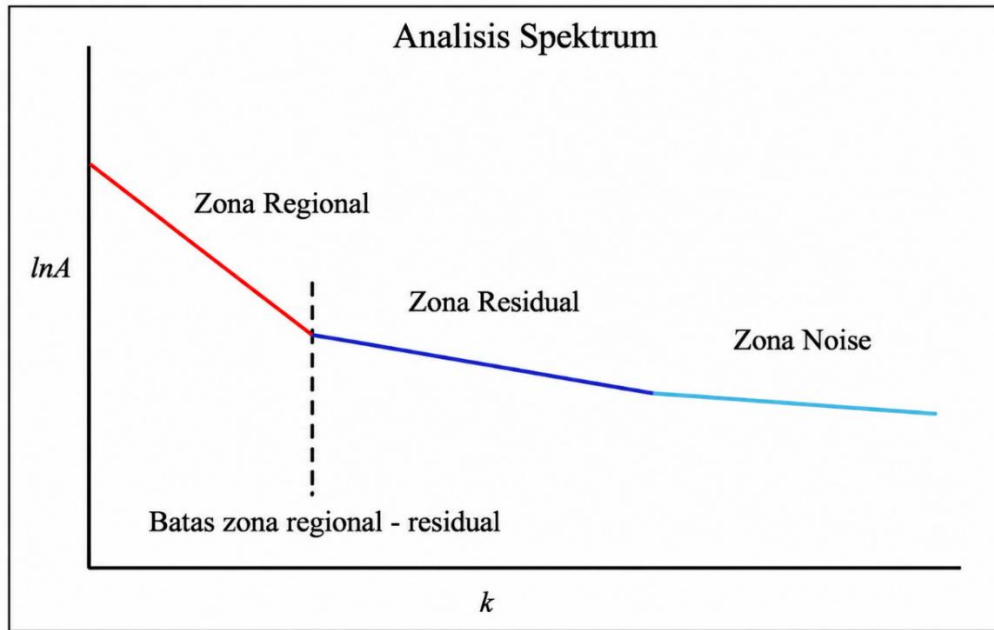
Jika sebaran massa jenis tidak berpola (random) dan tidak terdapat korelasi antara nilai-nilai anomali gayaberat, maka dianggap bahwa faktor magnetisasi atau faktor koreksi  $2\pi G\Delta\rho = 1$ . Dengan kondisi tersebut, Transformasi Fourier dari anomali gayaberat dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 27:

$$A = C e^{k|z_0-z_1|} \quad (27)$$

Keterangan:

$A$  : amplitudo

$C$  : konstanta



Gambar 7. Grafik  $\ln A$  Terhadap Bilangan Gelombang ( $K$ ) (Sarkowi, 2014).

Untuk melakukan analisis spektrum, langkah pertama yang dilakukan adalah gridding terhadap data anomali gayaberat dan pembuatan kontur. Berdasarkan kontur anomali tersebut, dibuat profil penampang lintasan yang mewakili daerah penelitian. Selanjutnya, data tersebut ditransformasikan ke dalam domain spasial ( $\Delta X$  tertentu) menggunakan *Transformasi Fourier* (FFT). Analisis transformasi Fourier ini mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Brigham (1988). Hasil dari proses FFT kemudian digunakan untuk membuat grafik hubungan antara  $K$  dan  $\ln A$ , di mana gradien dari fungsi ini merepresentasikan kedalaman. Grafik tersebut selanjutnya dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu gradien anomali regional, gradien anomali sisa (residual), dan noise (Safa & Praromadani, 2020).

### 3.6 *Moving Average*

Dalam penelitian ini, proses pemisahan antara anomali regional dan anomali residual dilakukan menggunakan metode *Moving Average* atau rata-rata bergerak. Metode *Moving Average* merupakan salah satu teknik filtering data yang bekerja dengan cara menghitung nilai rata-rata dari sejumlah data yang berada dalam suatu jendela (*window*) tertentu. Prinsip kerja metode ini adalah meratakan nilai anomali Bouguer pada area pengamatan sehingga diperoleh pola anomali yang lebih halus. Hasil proses perataan tersebut dianggap sebagai anomali regional, sedangkan pada

anomali residual diperoleh dengan mengurangi nilai anomali regional dari nilai anomali Bouguer. Dengan demikian, anomali residual merepresentasikan pengaruh sumber anomali yang bersifat lebih lokal dibandingkan anomali regional .(Setiaswan dkk., 2019). Secara matematis Persamaan *Moving average* diberikan pada persamaan (28).

$$\Delta g_{\alpha}(x_i) = \Delta g(x_i) - \frac{1}{N} \sum_{i=n/2}^{n/2} \Delta g(x_i - l) \quad (28)$$

Pemisahan anomali regional dan residual menggunakan dua jendela dapat dilakukan dengan persamaan (29).

$$\Delta \bar{g}_{\alpha,\beta}(x) = \Delta \bar{g}_{\alpha}(x) - \Delta \bar{g}_{\beta}(x) \quad (29)$$

Keterangan:

$\alpha, \beta$  : Lebar jendela *filter*

$\Delta g$  : Harga gayaberat pada titik amat

$\Delta \bar{g}_{\alpha}$  : Anomali residual sisa *filter* jendela  $\alpha$

$N$  : Jumlah data yang diproses

Persamaan *moving average* 2D untuk lebar jendela  $N \times N$  dapat dilihat pada persamaan (30).

$$\Delta g_{reg} \left( \frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2} \right) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\Delta g(i,j)}{N^2} \quad (30)$$

Dan anomali residualnya pada persamaan (31).

$$\Delta g_{res}(i, j) = \Delta g(i, j) - \Delta g_{reg}(i, j) \quad (31)$$

### 3.7 *First Horizontal Derivative (FHD)*

*First Horizontal Derivative (FHD)* merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis perubahan nilai anomali gravitasi secara horizontal antara dua titik pengamatan yang dipisahkan oleh jarak tertentu. Penerapan metode ini menghasilkan pola karakteristik berupa nilai maksimum maupun minimum yang umumnya muncul pada bagian tepi atau batas objek penyebab anomali. Oleh karena itu, FHD banyak dimanfaatkan untuk mengidentifikasi dan menentukan batas-batas struktur geologi berdasarkan data anomali gayaberat. Analisis

menggunakan pendekatan FHD memungkinkan interpretasi batas struktur geologi dengan memperhatikan distribusi nilai maksimum dan minimum hasil turunan horizontal pertama tersebut (Safira dkk., 2024). Secara matematis, metode FHD dinyatakan dalam persamaan (36).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (36)$$

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

### 3.8 *Second Vertical Derivative (SVD)*

Metode Second Vertical Derivative (SVD) digunakan untuk mempertegas keberadaan sumber-sumber anomali yang bersifat lokal atau berada pada kedalaman yang relatif dangkal. Metode ini terbukti efektif dalam mengidentifikasi adanya ketidakterusan (discontinuity) pada struktur bawah permukaan, khususnya dalam mendeteksi keberadaan sesar atau patahan di suatu wilayah penelitian. Secara teoritis, metode SVD diturunkan dari Persamaan Laplace yang berlaku pada anomali gayaberat di permukaan bumi.. Penerapan turunan vertikal orde kedua mampu memperkuat respons anomali dangkal sehingga interpretasi struktur geologi bawah permukaan menjadi lebih jelas. Bentuk matematis metode ini ditunjukkan pada persamaan (32) (Sarkowi, 2014):

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (32)$$

atau:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \quad (33)$$

Sehingga “Second Vertical Derivative” ditunjukkan oleh:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} \right) \quad (34)$$

Untuk data 1D (data penampang) persamaannya ditunjukkan oleh:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (35)$$

Persamaan (33) maupun persamaan (34) menunjukkan bahwa *Second Vertical Derivative* (SVD) dari suatu anomali gayaberat di permukaan memiliki nilai yang setara dengan negatif turunan horizontal orde kedua. Hal ini mengindikasikan bahwa anomali SVD dapat diperoleh melalui pendekatan turunan horizontal, yang dalam praktiknya lebih mudah untuk diterapkan dibandingkan perhitungan turunan vertikal secara langsung (Sarkowi, 2014). Oleh sebab itu, analisis SVD sering dilakukan menggunakan pendekatan derivatif horizontal yang lebih sederhana. Dalam interpretasi data, nilai nol pada turunan kedua anomali Bouguer umumnya dianggap sebagai batas kontak antara dua jenis batuan yang mempunyai perbedaan densitas. Keberadaan batas kontak tersebut dapat menunjukkan adanya struktur geologi tertentu, seperti patahan maupun intrusi batuan (Sarkowi, 2010). Untuk menghitung nilai SVD, dapat digunakan beberapa jenis operator filter dua dimensi (2D) yang ditampilkan pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Operator Henderson & Zietz (1949)

<b>Operator Filter SVD menurut Henderson &amp; Zietz (1949)</b>				
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0838	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0838
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000

Tabel 4. Operator Elkins (1951)

<b>Operator Filter SVD menurut Elkins (1951)</b>				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0334	1,0668	-0,0334	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000

Tabel 5. Operator Rosenbach (1953)

<b>Operator Filter SVD menurut Rosenbach (1953)</b>				
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0426
0,0000	-0,7500	4,000	-0,7500	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0426
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000

Berdasarkan hasil pemodelan sintetik mengenai karakteristik *Second Vertical*

*Derivative* (SVD) terhadap struktur patahan, diperoleh beberapa interpretasi sebagai berikut:

- a. Nilai  $SVD = 0$  menunjukkan bahwa area tersebut merupakan zona patahan.
- b. Apabila nilai ( $|SVD|_{\{min\}} < |SVD|_{\{max\}}$ ), maka struktur sesar yang berkembang di daerah tersebut diinterpretasikan sebagai sesar turun.
- c. Sebaliknya, jika nilai ( $|SVD|_{\{min\}} > |SVD|_{\{max\}}$ ), maka struktur sesar di daerah tersebut diinterpretasikan sebagai sesar naik.

### 3.9 Pemodelan Inversi

Pemodelan gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk menginterpretasikan serta menggambarkan kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan variasi nilai densitas batuan. Melalui pendekatan ini, distribusi massa di bawah permukaan bumi dapat diperkirakan dari data anomali gayaberat yang diperoleh melalui pengukuran di permukaan. Secara khusus, pemodelan gayaberat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi struktur geologi dengan memanfaatkan perbedaan densitas antar lapisan batuan penyusunnya. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah pemodelan inversi (*inverse modeling*), yang merupakan kebalikan dari pemodelan maju (*forward modeling*). Pada pemodelan inversi, parameter model ditentukan berdasarkan data hasil pengamatan yang tersedia, sedangkan pada pemodelan maju parameter model ditetapkan terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan responnya. Dengan demikian, pemodelan inversi memungkinkan estimasi parameter bawah permukaan secara langsung dari data observasi yang diperoleh (Sarkowi, 2014). Hubungan antara data pengamatan dan parameter model tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$d = Gm \quad (36)$$

Dimana  $d$  adalah vektor data pengamatan,  $G$  adalah matriks kernel, dan  $m$  adalah vektor model yang merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan. Komponen vertikal percepatan gayaberat yang dihasilkan oleh distribusi densitas  $\rho(\vec{r}')$  pada suatu volume  $V$  dinyatakan pada persamaan (36).

$$g_z(\vec{r}) = G \iiint_V \rho(\vec{r}') \frac{z-z'}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3} dV' \quad (37)$$

Sementara itu *error* atau ketidaksesuaian antar data dapat dilihat pada persamaan (37).

$$\phi_d = \|Wd(Gm - d^{obs})\|^2 \quad (37)$$

Fungsi objektif model secara lebih spesifik untuk keperluan inversi gayaberat tiga dimensi. Perumusan tersebut menggunakan fungsi pembobotan kedalaman  $w(z)$  untuk mengoreksi penurunan sensitivitas data gayaberat terhadap kedalaman, serta komponen yang mengontrol kehalusan model ke arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Fungsi objektif model tersebut dinyatakan pada Persamaan 38.

$$\begin{aligned} \phi_m(\rho) = & a_s \int_V w_s \{w(z)[\rho(r) - \rho_0]\}^2 dv \quad (38) \\ & + a_x \int_V w_x \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial x} \right\}^2 dv \\ & + a_y \int_V w_y \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial y} \right\}^2 dv \\ & + a_z \int_V w_z \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned}$$

Dalam persamaan tersebut,  $w_s$ ,  $w_x$ ,  $w_y$ , dan  $w_z$  menunjukkan fungsi pembobotan untuk masing-masing komponen, sedangkan  $a_s$ ,  $a_x$ ,  $a_y$ , dan  $a_z$  merupakan koefisien yang mengatur besarnya kontribusi relatif tiap komponen pada fungsi objektif. Selain itu,  $w(z)$  menyatakan fungsi pembobotan kedalaman, sementara  $\rho_0$  adalah model densitas acuan yang dijadikan referensi awal pada proses inversi. Solusi inversi diperoleh melalui proses minimisasi fungsi objektif terhadap vektor model ( $m$ ), yaitu dengan mensyaratkan turunan pertama fungsi objektif terhadap model bernilai nol ( $\partial\Phi/\partial m = 0$ ). Hasil dari penyelesaian persamaan tersebut memberikan solusi inversi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 39.

$$m = (G^T G + \lambda w_m^T w_m)^{-1} G^T d^{obs} \quad (39)$$

Tahap *inverse modelling* bertujuan untuk mendapatkan model bawah permukaan secara langsung dari data hasil pengamatan atau penelitian. Dalam proses ini, dicari

parameter model yang mampu menghasilkan respon yang sesuai dan mendekati kondisi sebenarnya berdasarkan data observasi yang tersedia. Hasil akhir dari proses pemodelan inversi ini adalah model yang optimal, yaitu model yang memiliki respon teoritis dengan tingkat kesesuaian tinggi terhadap data pengamatan lapangan. Dengan demikian, *inverse modelling* berperan penting dalam memperkirakan karakteristik bawah permukaan yang paling mungkin mewakili kondisi geologi sesungguhnya (Ilmi & Karyanto, 2020).

## **IV. METODOLOGI PENELITIAN**

### **4.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Adapun waktu dan tempat pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Tempat	: Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG), Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung
Alamat	: Gedung Teknik Geofisika – Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142
Waktu	: Desember 2025 – Juni 2026



## 4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Alat dan Bahan yang Digunakan

No.	Alat dan Bahan	Keterangan
1.	Data <i>gravity acceleration</i> GGMplus	Data yang digunakan adalah data GGMPlus sebanyak 3392.
2.	<i>Laptop</i>	Alat yang digunakan untuk mengolah data penelitian
3.	Lembar Peta Geologi	Digunakan sebagai informasi geologi daerah penelitian.
4.	<i>Software</i> Surfer	Digunakan untuk melakukan olah data gayabera dan membuat peta CBA
5.	<i>Software</i> Geosoft Oasis Montaj	Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan koreksi medan
6.	<i>Software</i> Numeri	Digunakan untuk proses analisis spektrum
7.	<i>Software Ms.Word</i> 2021	Digunakan dalam proses penyusunan laporan dan bentuk laporan kegiatan.
8.	<i>Software Ms.Excel</i> 2021	Digunakan dalam proses pengolahan korekai gayabera.
9.	<i>Software QGIS</i>	Digunakan untuk membuat peta daerah penelitian.
10.	<i>Software Grav3D</i>	Perangkat lunak yang digunakan dalam pembuatan model tiga dimensi (3D)

## 4.3 Prosedur penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### 4.3.1 Studi literatur

Panas bumi Gunung Lawu pada perbatasan Provinsi Jawa Tengah (Kabupaten Karanganyar, Kecamatan Jenawi, Tawangmangu, Ngargoyoso) dan Jawa Timur (Kabupaten Magetan), merupakan prospek geotermal vulkanik bertemperatur

tinggi dengan luas area penelitian sekitar 168 km<sup>2</sup> dan potensi energi spekulatif hingga 275 MWe berdasarkan estimasi temperatur *reservoir* 250°C, ditandai oleh berbagai manifestasi hidrotermal aktif seperti fumarol di puncak Condrodimuka dan mata air panas bicarbonate di Nglarak dengan suhu 32-60°C yang tersebar di lereng barat dan baratlaut. Secara geologi regional, Gunung Lawu sebagai gunung api strato berstatus istirahat dengan ketinggian puncak 3.265 m dpl terbentuk dari aktivitas vulkanik kuartar di zona subduksi lempeng Indo-Australia dan Eurasia, didominasi batuan vulkanik andesit-basaltik dari fase Lawu Muda (lava QLI-1 hingga QLI-7, aliran piroklastik QLap), Jobolarangan Tua (QJI-1 hingga QJI-3, lahar QJIh), serta litologi dasar berupa batulempung Miosen Akhir (Tb1), intrusi andesit Tawangmangu (TTi), dan batugamping Pliosen (Tgm), dengan struktur pengontrol utama berupa sesar barat-timur, baratlaut-tenggara, serta minor baratdaya-timurlaut yang membentuk jalur *upflow* dan *outflow* fluida panas bumi. Sistem panas bumi gunung lawu diduga berasal dari sisa panas dapur magma vulkanik Lawu sebagai *heat source* utama yang memanaskan fluida meteorik (air hujan) melalui proses konveksi di batuan permeabel vulkanik, membentuk *reservoir* hidrotermal dangkal di bawah *caprock* lava dan piroklastik, dengan aliran fluida naik melalui rekahan sesar dan berinteraksi dengan batuan *reservoir* menghasilkan alterasi argilik hingga argilik lanjut serta mineralisasi silika. Eksplorasi geofisika mengandalkan pemodelan data gravimetri satelit GGMPPlus dengan analisis anomali Bouguer, *first horizontal derivative* (FHD), *second vertical derivative* (SVD), serta inversi 3D untuk mendeteksi distribusi densitas rendah (anomali negatif) yang mengindikasikan zona *reservoir* (densitas 1,8-2,9 gr/cc).

#### 4.3.2 Persiapan dan Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data gravitasi satelit GGMPPlus, data DEM, serta peta geologi regional yang mencakup wilayah prospek panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah. Data DEM berperan penting sebagai informasi topografi dan digunakan dalam proses koreksi *Bouguer*, *Free Air Correction*, serta koreksi medan *terrain* untuk memperhitungkan pengaruh relief permukaan terhadap nilai anomali gravitasi. Data gayaberat GGMPPlus diun-

duh berdasarkan koordinat UTM zona 49S wilayah penelitian 513000 – 525000 mT dan 9150000 – 9164000 mU pada sistem koordinat UTM, dalam format sekunder tanpa pengukuran lapangan langsung, yang kemudian diekstraksi dan diproses menggunakan perangkat lunak geofisika seperti Surfer dan Oasis Montaj untuk analisis spektrum, *filtering* regional-residual, serta pemodelan 3D inversi densitas menggunakan Grav3D. Data DEM dengan resolusi sesuai wilayah gunung lawu juga diunduh dari sumber publik (misalnya SRTM) dan diproses dengan cara serupa untuk memperoleh elevasi rata-rata guna koreksi Bouguer serta *terrain correction*, sementara peta geologi regional dari Pusat Sumber Daya Geologi (2017) menyediakan stratigrafi vulkanik Lawu (Tb1, TTi, QJl-1 hingga QLI-7, QLIh, Qal) sebagai basis interpretasi struktur sesar dan zona *reservoir*.

### 4.3.3 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer merupakan tahapan koreksi dalam pengolahan data gayaberat yang bertujuan untuk memperhitungkan kontribusi gravitasi dari massa batuan yang berada di antara titik pengamatan dan bidang referensi berupa permukaan laut rata-rata, sehingga pengaruh massa batuan di atas datum dapat dieliminasi dari data pengukuran. Penerapan koreksi ini didasarkan pada asumsi bahwa titik observasi terletak di atas suatu bidang horizontal yang sangat luas dan homogen, yang dimodelkan sebagai lempeng Bouguer dengan ketebalan setara elevasi titik pengamatan ( $h$ ) dan rapat massa batuan tertentu ( $\rho$ ), sehingga kontribusi gravitasinya dapat dihitung secara analitis. Pada penelitian ini, perhitungan Koreksi Bouguer dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, dengan nilai rapat massa batuan tidak diasumsikan secara umum melainkan ditentukan melalui analisis metode Parasnis, yang menghasilkan nilai densitas sebesar 1,91 gr/cc, sedangkan nilai elevasi setiap titik pengamatan diperoleh dari data *Digital Elevation Model* (DEM) yang telah disesuaikan dengan koordinat pengukuran gayaberat. Nilai Koreksi Bouguer dihitung menggunakan persamaan lempeng *Bouguer* yang merepresentasikan hubungan antara rapat massa batuan dan ketinggian titik observasi terhadap kontribusi percepatan gravitasi, kemudian digunakan untuk menghilangkan efek massa batuan di atas permukaan referensi sehingga variasi gayaberat yang tersisa lebih mencerminkan

perbedaan rapat massa bawah permukaan. Hasil utama dari penerapan koreksi ini adalah diperolehnya Anomali Bouguer Sederhana (Anomali Bouguer Sederhana/ABS), yang dihitung dengan mengurangi nilai Koreksi Bouguer (BC) dari nilai Anomali Udara Bebas (*Free Air Anomaly*/FAA), dan selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam tahap interpretasi geologi bawah permukaan karena telah terbebas dari pengaruh elevasi dan massa batuan di atas datum.

#### 4.3.4 Estimasi Densitas Batuan Rata-rata

Densitas batuan merupakan parameter fisis yang sangat penting dalam metode gayaberas karena berpengaruh langsung terhadap perhitungan koreksi Bouguer serta nilai anomali yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan estimasi nilai densitas rata-rata batuan yang representatif untuk wilayah penelitian. Pada penelitian ini, estimasi densitas batuan dilakukan menggunakan metode Parasnis, yang didasarkan pada hubungan linier antara Anomali Udara Bebas (*Free Air Anomaly*/FAA) dan Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*/BC). Proses estimasi dilakukan dengan memplot nilai FAA pada sumbu Y dan nilai BC pada sumbu X menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*, kemudian dilakukan regresi linier dengan garis yang dipaksakan melalui titik nol, di mana kemiringan (*slope*) garis regresi merepresentasikan nilai densitas batuan rata-rata ( $\rho$ ). Berdasarkan hasil analisis tersebut diperoleh nilai densitas sebesar 1,91 gr/cc, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan Koreksi Bouguer untuk menghasilkan Anomali Bouguer Sederhana (*Simple Bouguer Anomaly*/ABS), sehingga nilai anomali yang dihasilkan diharapkan lebih mencerminkan variasi rapat massa bawah permukaan dan lebih andal untuk tahap interpretasi geologi.

#### 4.3.5 Koreksi Medan

Koreksi medan dalam pengolahan data digunakan untuk menghilangkan pengaruh faktor-faktor non-geologi yang timbul akibat kondisi pengukuran, lingkungan, dan karakteristik instrumen, sehingga data geofisika yang diperoleh benar-benar merepresentasikan respon fisis bawah permukaan. Melalui penerapan koreksi medan, seperti koreksi waktu, posisi, elevasi, topografi, dan pengaruh eksternal lainnya, data hasil pengukuran dinormalisasi ke suatu datum yang sama agar dapat

dibandingkan antar titik pengamatan. Dengan demikian, koreksi medan geofisika berperan penting dalam meningkatkan akurasi dan keandalan data, sehingga hasil pengolahan selanjutnya, seperti perhitungan anomali, pemodelan, dan interpretasi kondisi geologi bawah permukaan, dapat dilakukan secara lebih tepat dan objektif.

#### **4.3.6 Anomali Bouguer Lengkap**

Pengolahan data gayaberasat dilakukan melalui dua tahapan utama. Tahap pertama diawali dengan penentuan densitas Bouguer yang digunakan sebagai parameter dalam koreksi pengaruh massa batuan di permukaan bumi. Tahap berikutnya adalah penerapan berbagai jenis koreksi gravitasi, yang meliputi koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, koreksi topografi, serta koreksi drift instrumen dan pasang surut. Seluruh proses ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh non-geologi sehingga data gayaberasat yang semula mentah dapat dinormalisasi dan disesuaikan terhadap kondisi ideal. Hasil akhir dari tahapan ini berupa *Complete Bouguer Anomaly (CBA)*, yaitu data anomali gravitasi yang telah dikoreksi secara menyeluruh dan siap digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti pemodelan bawah permukaan, interpretasi geologi, dan identifikasi struktur geologi yang signifikan.

#### **4.3.7 Pemisahan Anomali Regional dan Residual**

Anomali Bouguer pada metode gayaberasat terjadi akibat adanya perbedaan densitas batuan di bawah permukaan bumi, baik yang berasal dari lapisan dangkal maupun dari lapisan yang lebih dalam. Untuk memahami karakteristik bawah permukaan secara lebih spesifik, diperlukan proses pemisahan antara anomali regional dan anomali residual, yang masing-masing merepresentasikan pengaruh sumber gravitasi dari kedalaman berbeda. Dalam penelitian ini, proses pemisahan dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dengan menerapkan metode *moving average filter*. Metode ini secara umum digunakan dalam analisis data geofisika untuk memisahkan komponen anomali regional (berkala panjang) dari komponen anomali residual (berkala pendek). Prinsip dasar teknik ini adalah dengan memproyeksikan data anomali medan gravitasi ke ketinggian tertentu di atas permukaan pengukuran.

#### 4.3.8 Analisis Derivative

Analisis turunan (*derivative analysis*) pada penelitian ini dilakukan untuk memperjelas batas serta sebaran struktur geologi di bawah permukaan bumi dengan memanfaatkan dua pendekatan utama, yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Metode FHD digunakan untuk menonjolkan perubahan horizontal pada nilai anomali gravitasi, sehingga mampu mengidentifikasi batas-batas struktur geologi sekunder seperti sesar atau zona kontak batuan berdasarkan variasi gradien horizontal medan gravitasi. Hasil pengolahan FHD kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik dan peta anomali FHD, yang menunjukkan zona dengan perubahan nilai anomali paling signifikan sebagai indikasi adanya perbedaan densitas antar satuan batuan. Sementara itu, metode SVD diterapkan untuk menekankan perubahan vertikal medan gravitasi, yang berguna dalam mendeteksi keberadaan dan kedalaman sumber anomali di bawah permukaan. Analisis ini menghasilkan grafik dan peta anomali SVD yang memperlihatkan pola-pola anomali dengan resolusi tinggi, membantu dalam menginterpretasikan posisi serta orientasi struktur sekunder secara lebih rinci. Kombinasi antara analisis FHD dan SVD memungkinkan peneliti memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai geometri, batas, dan penyebaran struktur bawah permukaan, sehingga hasil interpretasi geofisika menjadi lebih komprehensif dan mendukung pemahaman terhadap kondisi geologi daerah penelitian.

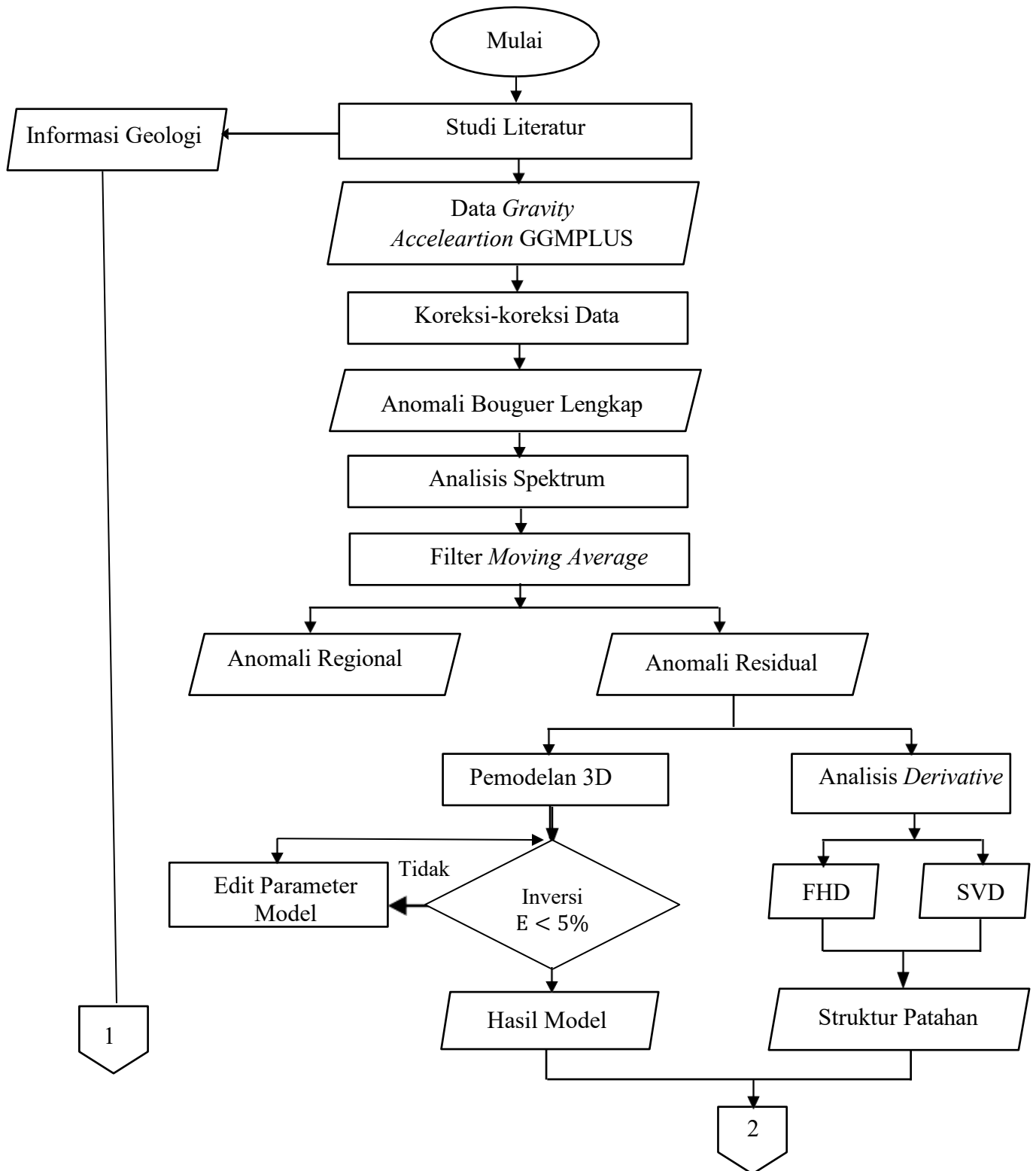
#### 4.3.9 Pemodelan Bawah Permukaan

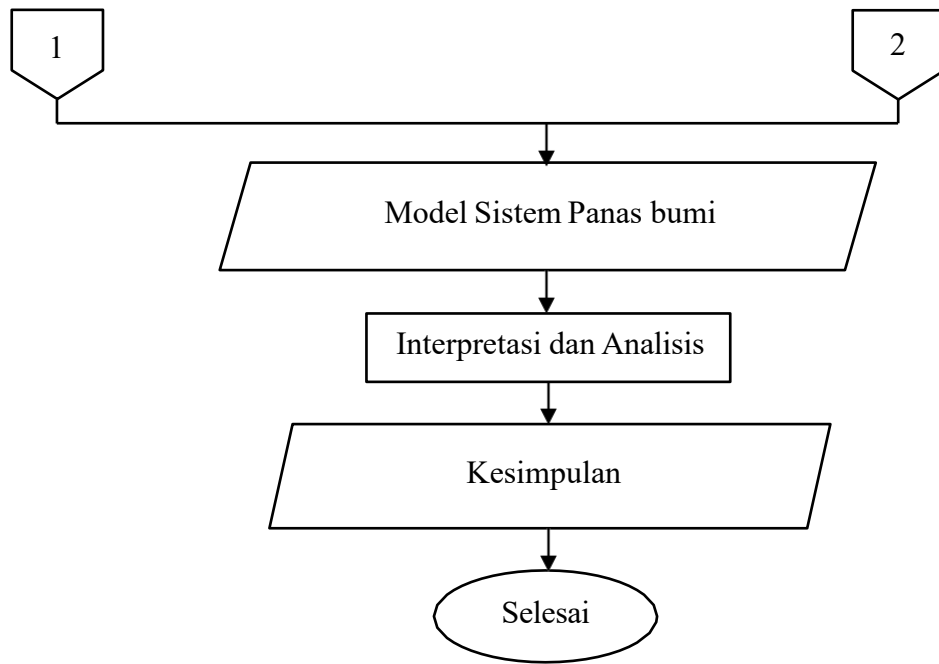
Pemodelan bawah permukaan tiga dimensi (3D) dalam penelitian ini dilakukan melalui proses *inverse modelling* dengan menggunakan perangkat lunak *Surfer* dan *Grav3D*, yang secara khusus dirancang untuk analisis dan visualisasi data gayaberat. Tahapan ini bertujuan untuk membangun representasi spasial yang realistis dari kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan data anomali residual yang telah diperoleh dari hasil pengolahan sebelumnya. Proses pemodelan dimulai dengan pembuatan mesh atau grid 3D, yang berfungsi sebagai kerangka ruang bagi penyusunan distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Selanjutnya, dilakukan proses iterasi atau penyetelan model (*inversion*) secara bertahap, di mana nilai densitas pada setiap sel model disesuaikan hingga respon gravitasi hasil

perhitungan mendekati data observasi lapangan. Melalui pendekatan ini, diperoleh model 3D yang mampu menggambarkan sebaran variasi densitas batuan, struktur geologi, serta kemungkinan keberadaan zona-zona penting seperti *reservoir*, jalur fluida, dan sumber panas yang menjadi komponen utama dalam sistem panas bumi di daerah penelitian. Hasil pemodelan 3D ini tidak hanya memberikan pemahaman visual terhadap konfigurasi bawah permukaan, tetapi juga berperan penting dalam memperkirakan karakteristik fisik dan geometri sistem panas bumi, yang kemudian dapat digunakan sebagai dasar dalam interpretasi geologi dan perencanaan eksplorasi lanjutan secara lebih akurat dan efisien.

#### 4.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada Kerja Praktik ini dapat dilihat pada Gambar 8.





Gambar 8. Diagram Alir

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dijabarkan dari penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) berhasil mengidentifikasi keberadaan struktur sesar yang berkembang pada lintasan A–A', B–B', dan C–C'. Struktur yang terdeteksi didominasi oleh sesar normal serta sebagian sesar naik dengan arah utama baratlaut–tenggara. Keberadaan struktur tersebut berperan sebagai jalur permeabilitas yang memungkinkan pergerakan fluida hidrotermal dari kedalaman menuju permukaan, serta memiliki keterkaitan dengan kemunculan manifestasi panas bumi seperti fumarol dan mata air panas.
2. Pemodelan inversi tiga dimensi (3D) data gayaberasat berhasil merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan dengan rentang nilai sekitar 1,8–2,9 gr/cc. Zona dengan densitas rendah (1,8–2,0 gr/cc) diinterpretasikan sebagai reservoir panas bumi yang tersusun atas batuan vulkanik berpori dan permeabel, seperti lava andesit yang telah mengalami rekahan, breksi vulkanik, tuf, serta endapan aliran piroklastik. Di bagian atasnya terdapat lapisan batuan penudung (*caprock*) dengan densitas sekitar 2,1–2,3 gr/cc yang bersifat relatif kedap, sedangkan pada kedalaman ±3000 meter teridentifikasi zona berdensitas tinggi >2,9 gr/cc yang diinterpretasikan sebagai sumber panas (*heat source*) berupa intrusi andesit serta sisa dapur magma Gunung Lawu.
3. Hasil interpretasi sistem panas bumi Gunung Lawu menunjukkan bahwa sistem hidrotermal terbentuk akibat interaksi antara sumber panas magmatik, keberadaan struktur sesar, distribusi batuan vulkanik, serta proses alterasi

hidrotermal yang berkembang. Zona upflow diinterpretasikan berada di sekitar area fumarol Candradimuka, sedangkan zona outflow berkembang ke arah barat daya menuju manifestasi mata air panas Nglarak. Integrasi antara analisis struktur dan distribusi densitas menunjukkan bahwa zona prospek utama panas bumi berada di bagian barat hingga barat daya Gunung Lawu, sehingga wilayah tersebut memiliki potensi yang baik untuk pengembangan energi panas bumi.

## **6.2 Saran**

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan metode gayaberat dengan metode geofisika lain, seperti magnetotelurik (MT), geolistrik resistivitas, atau seismik guna meningkatkan keakuratan interpretasi bawah permukaan. Metode gayaberat memiliki keterbatasan dalam membedakan batuan dengan densitas yang serupa serta tidak dapat mengidentifikasi kondisi fluida, temperatur, dan permeabilitas reservoir secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan data pendukung geologi, geokimia, dan geofisika lainnya untuk memvalidasi hasil pemodelan sehingga model sistem panas bumi yang dihasilkan menjadi lebih akurat dan komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afni, G. N., & Kusmita, T. (2021). Penentuan Sesar Daerah Geothermal Non-Vulkanik Daerah Nyelanding dan Permis Bangka Selatan Berdasarkan Analisis Anomali Gravitasi. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 2(1), 1-6. <http://journal.ubb.ac.id/index.php/jrfi/3210>
- Amalisana, B., Pin, T., & Saraswati, D. R. (2017). Penentuan potensi panas bumi menggunakan Landsat 8 dan hubungannya dengan kondisi geologi Gunung Lawu. *Proceedings of the Industrial Research Workshop and National Seminar*, 300–305. Politeknik Negeri Bandung.
- Hariyanto, T., & Robawa, F. N. (2016). Identifikasi potensi panas bumi menggunakan landsat 8 serta penentuan lokasi pembangkit listrik tenaga panas bumi (Studi Kasus: Kawasan Gunung Lawu). *Geoid*, 12(1), 36-42.
- Helmi, H., Kurniawan, H., & Adam, W. (2020). Kontrol Geologi Terhadap Pemunculan Manifestasi Panas bumi Di Kawasan Gunung Lawu. *KURVATEK*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v5i1.1790>
- Hermawan, D., & Adhitya, L. (2018). Makalah Ilmiah Keprospekan Panas Bumi Gunung Lawu Berdasarkan Kajian Vulkanostratigrafi. *In Buletin Sumber Daya Geologi* 13(3), 199-213. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v13i3.232>
- Ilmi, N., & Karyanto. (2020). Pemodelan 3d Struktur Bawah Permukaan

Gunungapi Agung Provinsi Bali Menggunakan Metode Gayaberat. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 5(2), 154–161. <https://doi.org/10.23960/jge.v5i2.30>

Ilmi, S., Harmoko, U., & Sugeng, W. (2014). Interpretasi Bawah Permukaan Sistem Panas Bumi Diwak Dan Derekan Berdasarkan Data Gravitasi. *In Youngster Physics Journal*, 3( 2), 165-170.

Liana, Y. R., Wea, T. M. M., Syarifah, W., Supriyadi, S., & Khumaedi, K. (2020a). Analisis Anomali Bouguer Data Gayaberat Studi Kasus di Kota Lama Semarang. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 4(2), 63. <https://doi.org/10.30595/jrst.v4i2.6301>

Maison, M., Lestari, N., & Widaningtyas, A. (2020). Identifikasi Miskonsepsi Siswa Pada Materi Usaha Dan Energi. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 6(1), 32–39. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v6i1.314>

Manik, H. J. J. S., Bujung, C. A. N., & Tumangkeng, J. V. (2020). Anomali Medan Gravitasi Untuk Identifikasi Patahan Daerah Manifestasi Panas Bumi Di Sekitar Gunung Tampusu. *Jurnal Fista: Fisika Dan Terapannya*, 1(2), 73-79. <https://doi.org/10.53682/fista.v1i2.94>

Noly Shofiyah, O., & Eka Wulandari, F. (2020). *Buku Ajar Gerak dan Perubahan Jilid 1*, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.

Permana, L. A., Sastrawijaya, C. W., & Dudi, H. (2020). Karakteristik Mineral Lempung Hasil Ubahan Pada Sumur Lw-1 Dan Lw-2 Dengan Menggunakan Metode Difraksi Sinar-X Pada Sistem Panas Bumi Gunung Lawu. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 15(1), 1-17. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v15i1.293>

Qahhar, M. R. A., Daud, Y., Pratama, S. A., Zarkasyi, A., Sugiyanto, A., & Suhanto, E. (2015). *Modeling of Geothermal Reservoir in Lawu Field Using 2-D Inversion of Magnetotelluric Data*. Prosiding Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2015,

Jakarta Convention Center, Jakarta, 19–21 Agustus 2015.

- Rizkiani, D. N., & Rustadi, R. (2020). Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gayaberat. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 5(2), 130–140. <https://doi.org/10.23960/jge.v5i2.28>
- Robawa, F. N. (2016). Identifikasi Potensi Panas Bumi Menggunakan Landsat 8 Serta Rekomendasi Lokasi PLTP Dengan Analisis Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus : Kawasan Gunung Lawu). *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Safa, Z., & Praromadani, a. (2020). Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Berdasarkan Updating Data Gayaberat Cekungan Banyumas, Jawa. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 21(3), 111-118. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.21.3.111-118p>
- Safira, A., Saipuddin, M., Andita, A, Z., Karyanto, K., Catur W, R., & Dani, L. (2024). Identifikasi Struktur Geologi Daerah Panas Bumi Way Panas Kecamatan Wonosobo Menggunakan Analisis First Horizontal Derivative dan Second Vertical Derivative Berdasarkan data Gayaberat GGMPLUS. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 5(1), 28–35. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v5i1.240>
- Sari, F. P., Restiana, A., & Wardhianty, N. F. (2023). Geothermal potential analysis using 3d modeling of subsurface structures based on the Gravity Anomaly in the Mount Lawu area, Central Java. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 9(1), 38-49.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Setiadi, I., Diyanti, A., & Ardi, N. D. (2014). Interpretasi struktur geologi bawah permukaan daerah Leuwidamar berdasarkan analisis spektral data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 15(4), 205-214.

- Setiadi, I., Aryanto, N. D., & Nurdin, N. (2021). Delineasi batuan granit dan sedimen daerah Bintan dan sekitarnya, Kepulauan Riau berdasarkan analisis data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 22(3), 143-152. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i3.594>
- Setiadi, I., Purwanto, C., Kusnida, D., & Firdaus, Y. (2019). Geological Interpretation Based On Gravity Analysis Using Optimum Upward Continuation And 3d Inversion Model Filters (Case Study: South Akimeugah Basin, Arafura Sea). *Jurnal Geologi Kelautan*, 17( 1), 33-48. <https://doi.org/10.32693/jgk.17.1.2019.579>
- Setiadi, I., Setyanta, B., & Widijono, B. S. (2010). Delineasi cekungan sedimen sumatra selatan berdasarkan analisis data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 20(2), 93-106.
- Setyanta, B. (2015). Mengurangi Ambiguitas Dalam Pemodelan Bawah Permukaan Gayaberat Untuk Geologiawan. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 16(1), 33-34.
- Setyawan, A., Khusna, L. M., Suseno, J. E., Rina, D. I., Yulianto, T., & Aribowo, Y. (2021). Detecting hot spring manifestations based on gravity data satellite on mountain Lawu. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1943, No. 1, p. 012034). IOP Publishing. <https://doi:10.1088/1742-6596/1943/1/012034>
- Setyawan, H. (2020). Modul pembelajaran SMA Kelas X fisika: hukum Newton tentang gravitasi dan hukum Kepler.
- Sugita, I, M., Furtakhul Janah, A., Rahmawati, D., & Khumaedi, dan. (2020). Analisis Data Gayaberat Di Daerah Bendan Duwur Semarang. *Journal of Research and Technology* 6(1), 81-90. <https://doi.org/10.55732/jrt.v6i1.143>
- Setiaswan, F, Khumaedi, K., Sugiyanto, S., & Supriyadi, S. (2019). Pemisahan Anomali Regional dan Residual Data Gayaberat Studi Kasus

di Kota Lama Semarang. *Physics Education Research Journal*, 1(1), 29-36. <https://doi.org/10.21580/perj.2019.1.1.3927>

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Wowa, F., & Wiloso, D. A. (2017). *Studi geokimia untuk pendugaan suhu reservoir panas bumi berdasarkan analisis solute geothermometer di Desa Pablengan, Kecamatan Matesih, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah*. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Kebumian ke-10: Peran Penelitian Ilmu Kebumian dalam Pembangunan Infrastruktur di Indonesia* (hlm. 1499–1532). Yogyakarta, Indonesia, 13–14 September 2017.