

**PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI  
GUNUNG SIBUAL BUALI SUMATRA UTARA BERDASARKAN  
ANALISIS DATA GAYA BERAT DAN GEOKIMIA**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Sabrina Adelyra  
NPM 2215051032**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI  
GUNUNG SIBUAL BUALI SUMATRA UTARA BERDASARKAN  
ANALISIS DATA GAYA BERAT DAN GEOKIMIA**

**Oleh**

**Sabrina Adelyra**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

## ABSTRAK

### PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI GUNUNG SIBUAL BUALI SUMATRA UTARA BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYA BERAT DAN GEOKIMIA

Oleh

**Sabrina Adelyra**

Daerah penelitian terletak di lapangan panas bumi Gunung Sibual buali, Sumatra Utara, yang merupakan bagian dari Pegunungan Barisan dan dikontrol oleh Sesar Sumatra. Keberadaan manifestasi permukaan seperti mata air panas dan fumarol menunjukkan adanya sistem hidrotermal aktif. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem panas bumi serta mengidentifikasi struktur geologi, distribusi densitas bawah permukaan, dan zona prospek reservoir berdasarkan analisis data gaya berat. Metode yang digunakan meliputi pengolahan data *Global Gravity Model Plus* (GGMPlus) melalui tahap koreksi, pemisahan anomali regional dan residual menggunakan analisis spektrum dan *upward continuation*, serta analisis turunan *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengidentifikasi struktur sesar. Selanjutnya dilakukan pemodelan inversi 3D untuk memperoleh distribusi densitas bawah permukaan. Hasil penelitian menunjukkan nilai densitas berkisar antara 2,39 gr/cc hingga 2,78 gr/cc. Zona densitas rendah diinterpretasikan sebagai batuan teralterasi dan berpori yang berpotensi sebagai reservoir, sedangkan densitas tinggi menunjukkan batuan kompak atau basement. Analisis turunan mengidentifikasi sesar berarah barat-laut-tenggara (NW-SE) yang berperan sebagai jalur fluida dan mengontrol manifestasi panas bumi. Sistem panas bumi diinterpretasikan sebagai dikontrol oleh struktur, sehingga memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi.

Kata kunci : Panas bumi, gaya berat, struktur sesar, pemodelan inversi 3D

## **ABSTRACT**

### **GEOHERMAL SYSTEM MODELING OF MOUNT SIBUAL BUALI NORTH SUMATRA BASED ON GRAVITY AND GEOCHEMICAL DATA ANALYSIS**

By

**Sabrina Adelyra**

The study area is located in the geothermal field of Mount Sibual buali, North Sumatra, which is part of the Barisan Mountain Range and controlled by the Sumatran Fault system. The presence of surface manifestations such as hot springs and fumaroles indicates an active hydrothermal system. This study aims to model the geothermal system and identify geological structures, subsurface density distribution, and potential reservoir zones based on gravity data analysis. The methodology involves processing Global Gravity Model Plus (GGMPlus) data through correction, separation of regional and residual anomalies using spectral analysis and upward continuation, and derivative analysis using First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) to detect fault structures. A 3D inversion model is then applied to obtain the subsurface density distribution. The results show density values ranging from 2.39 g/cc to 2.78 g/cc. Low-density zones are interpreted as altered and porous rocks, indicating potential geothermal reservoirs, while high-density zones represent compact rocks or basement. Derivative analysis reveals faults trending northwest–southeast (NW–SE) that act as fluid pathways and control geothermal manifestations. The geothermal system is interpreted as structure-controlled, indicating promising geothermal energy potential in the study area.

Key words : Geothermal, gravity, fault structure, 3D inversion modeling

Judul : **Pemodelan Sistem Panas Bumi Gunung Sibual  
Buali Sumatra Utara berdasarkan Analisis  
Data Gaya Berat dan Geokimia**

Nama Mahasiswa : **Sabrina Adelyra**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215051032

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**

**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

Dosen Pembimbing 1



Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.,

IPU ASEAN Eng.

NIP 196271071987031002

Dosen Pembimbing 2

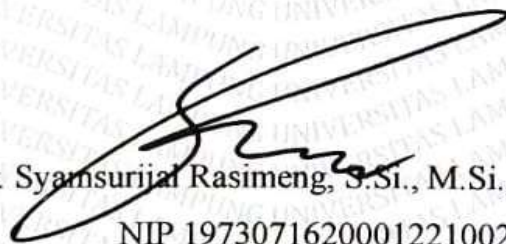


Dr. Alimuddin Muchtar, S. Si.,

M.Si., C.EIA.

NIP 197206262000121001

**2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika**



Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM.

NIP 1973071620001221002

## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

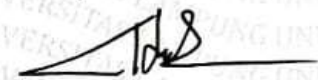
Ketua : Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU.,  
ASEAN Eng.



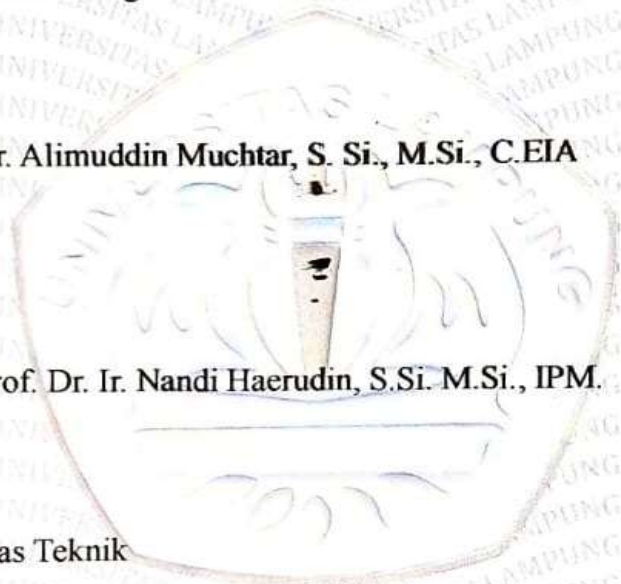
Sekretaris : Dr. Alimuddin Muchtar, S. Si., M.Si., C.EIA



Anggota : Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si. M.Si., IPM.



### 2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 10 April 2026

## PERNYATAAN

Dengan ini, saya menyatakan dengan sungguh-sungguh bahwa skripsi berjudul “Pemodelan Sistem Panas Bumi Gunung Sibual buali Sumatra Utara berdasarkan Analisis Data Gaya Berat dan Geokimia” adalah hasil karya saya sendiri dan murni merupakan buah pemikiran saya. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana.

Segala referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini, baik yang dikutip secara langsung maupun tidak, telah dicantumkan secara lengkap dan jelas dalam daftar pustaka sesuai dengan kaidah, prinsip, dan etika penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari terbukti adanya ketidaksesuaian atau pelanggaran terhadap pernyataan ini, saya bersedia menerima konsekuensi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 April 2026



Sabrina Adelya

NPM 2215051032

## RIWAYAT HIDUP



Nama lengkap penulis adalah Sabrina Adelyra, lahir di Bandar Lampung pada 27 September 2003 sebagai anak pertama dari empat bersaudara, putri Bapak Tarwi dan Ibu Eniyati. Pendidikan dasarnya ditempuh di SD Negeri 1 Sawah Lama dari tahun 2010 hingga 2016, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 5 Bandar Lampung hingga lulus pada 2019, dan menempuh pendidikan menengah atas di SMA Negeri 10 Bandar Lampung hingga tahun 2022.

Tahun 2022 menjadi awal studi di Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Saat ini tercatat sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, dengan NPM 2251501032. Sepanjang masa perkuliahan, aktivitas organisasi menjadi bagian penting, termasuk keanggotaan dan kepengurusan Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG Bhuwana). Peran yang dijalankan meliputi anggota Bidang Multimedia dan Informasi periode 2023–2024, Penanggung Jawab Publikasi Desain dan Dokumentasi (2023–2024), sekretaris pelaksana TGZine Edisi 6, serta bendahara TGZine Edisi 7. Selain itu, terlibat sebagai anggota *Public Relation* di *Geophysics Academic and Event* (GEAVENT) 2023, anggota Publikasi dan Dokumentasi pada *Geophysics Whiz Event and Seminar* (GWES) 2024, dan anggota Divisi Publikasi dan Dokumentasi *Society of Exploration Geophysicist* (SEG SC Unila) periode 2025–2026. Pada tahun 2025 penulis juga menyusun sebuah jurnal berjudul “Pemisahan Anomali Residual dan Regional Menggunakan

Metode *Moving Average* pada Zona Panasbumi Gunung Api Papandayan, Jawa Barat”. Pada tahun 2026, menjadi waktu pelaksanaan kegiatan Kerja Praktik (KP) di Pusat Sumber Daya Mineral dan Batubara (PSDMBP) dengan fokus penelitian berjudul “Identifikasi Bawah Permukaan Berdasarkan Data Resistivitas dan *Induced Polarization* (IP) pada Lapangan “Yz” Sumatra Utara”. Sebagai penutup masa studi, penulis menyelesaikan penelitian Tugas Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik dengan judul “Pemodelan dan Estimasi Potensi Panas Bumi Gunung Sibual buali Sumatra Utara berdasarkan Analisis Data Gaya Berat dan Geokimia.”

## **PERSEMBAHAN**

Penulis memanjatkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini penulis persembahkan kepada:

### **Papi dan Mami Tercinta**

Dengan penuh cinta dan hormat, karya ini kupersembahkan untuk Papi dan Mami. Terima kasih atas doa yang senantiasa mengiringi, pengorbanan yang ikhlas, serta kasih sayang yang selalu menjadi sumber kekuatan bagi penulis dalam setiap situasi. Tiada kata yang mampu membalas semua yang telah kalian berikan, semoga pencapaian ini menjadi salah satu kebahagiaan untuk kalian.

### **Adik – adikku Terkasih**

Untuk adikku tersayang, terima kasih telah memberi dukungan, semangat, serta doa. Semoga langkah kecil ini menjadi motivasi bagi kita untuk terus bermimpi dan berusaha meraih masa depan yang lebih baik. Semoga kita selalu menjadi kebanggaan bagi keluarga.

### **Untuk Diri Penulis Sendiri**

Terima kasih karena telah mampu bertahan hingga titik ini. Untuk setiap lelah, ragu, dan air mata yang pernah hadir dalam proses panjang ini, terima kasih karena tidak memilih menyerah. Karya ini menjadi bukti bahwa perjuangan, sekecil apa pun langkahnya, akan selalu menemukan hasilnya.

**Angkatan 2022 Teknik Geofisika Universitas Lampung**

serta

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

## MOTTO HIDUP

“Allah tidak memberikan beban kepada seseorang di luar batas kemampuannya.”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Wahai orang-orang yang beriman, mintalah pertolongan kepada Allah melalui kesabaran dan salat, karena sesungguhnya Allah selalu Bersama orang – orang yang bersabar.”

(QS. Al-Baqarah: 153)

“Janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah.”

(QS. Az-Zumar: 53)

“Jika kamu tidak mengambil risiko, kamu tidak bisa menciptakan masa depan.”

(Monkey D.Luffy)

“Kalau aku tidak bisa melakukan sesuatu, maka aku akan menjadi lebih kuat agar bisa melakukannya.”

(Roronoa Zoro)

*“Keep The Blue Flag Flying High”*

(Chelsea F.C.)

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan skripsi berjudul "Pemodelan Sistem Panas Bumi Gunung Sibual buali Sumatra Utara Berdasarkan Analisis Data Gaya Berat dan Geokomia" ini dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk memodelkan sistem panas bumi di wilayah Gunung Sibual buali, Sumatra Utara, melalui kajian data gaya berat, dengan fokus untuk memahami kondisi bawah permukaan serta mengidentifikasi zona prospek panas bumi.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan, sehingga saran dan masukan sangat diharapkan guna penyempurnaan di masa yang akan datang. Penulis juga berharap agar hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu geofisika, khususnya di bidang eksplorasi panas bumi, serta menjadi referensi yang berguna bagi para peneliti yang akan datang.

Bandar Lampung, 10 April 2026



Sabrina Adelyra

NPM 2215051032

## SANWACANA

Penulis mengucapkan puji serta syukur ke hadirat Allah SWT atas seluruh limpahan rahmat, karunia, nikmat, kesehatan, dan peluang yang diberikan, sehingga penulis bisa menuntaskan skripsi ini dengan baik. Skripsi yang berjudul “Pemodelan Sistem Panas Bumi Gunung Sibual buali Sumatra Utara berdasarkan Analisis Data Gaya Berat dan Geokimia” disusun syarat untuk diperolehnya gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penataan skripsi ini, penulis menyadari bahwa terdapat banyak pihak yang sudah memberikan bantuan dan dukungan. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM. Selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM. Selaku Sekertaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus Dosen Pembimbing Akademik, Dosen Pembimbing 1 Kerja Praktik, dan Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir Penulis. Penulis mengucapkan rasa hormat, penghargaan, dan terima kasih yang sebesar-besarnya atas perhatian dan kesediaan Bapak dalam meluangkan waktu, tenaga, serta pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, saran, motivasi, serta dorongan. Terimakasih karena bapak merupakan salah satu orang yang paling berjasa selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng. Selaku Pembimbing 1 Tugas Akhir Penulis yang dengan penuh ketersediaan meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk memberikan arahan, bimbingan, serta saran yang sangat berharga sepanjang proses penyusunan skripsi ini. Semoga bapak mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT.

4. Bapak Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si. M.Si., IPM., sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan kritik serta saran yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini, penulis mengucapkan banyak terimakasih.
5. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan pengetahuan, serta terimakasih kepada staf akademik Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
6. Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Papi dan Mami tercinta atas segala doa, kasih sayang, kerja keras, kesabaran, serta pengorbanan yang tiada henti. Dukungan, keteguhan, dan doa yang selalu menyertai setiap langkah menjadi kekuatan utama bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan ini. Skripsi ini tidak hanya menjadi wujud pencapaian akademik, tetapi juga merupakan hasil dari doa, harapan, dan ketulusan cinta Papi dan Mami yang senantiasa mengiringi perjalanan penulis. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan keberkahan, kesehatan, dan kebahagiaan kepada Papi dan Mami.
7. Adik – adikku terkasih dan tersayang Sarah, Syahnaz, dan Sheline. Terimakasih atas doa, dukungan, semangat, serta keceriaan yang selalu diberikan kepada penulis. Kehadiran dan kebersamaan kalian menjadi motivasi tersendiri dalam setiap proses penyusunan skripsi ini.
8. Kepada seseorang yang memiliki peran istimewa dalam perjalanan penulis, yaitu Ilyasa Zulyan. Penulis mengucapkan terima kasih atas kehadiran, dukungan, serta berkontribusi banyak dalam kehidupan penulis. Terima kasih atas doa, semangat, serta motivasi yang selalu diberikan, juga atas kesediaannya untuk mendengarkan keluh kesah, menghibur di saat sulit, dan menemani setiap proses yang dilalui penulis hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
9. Kepada Aryo saudara yang sudah seperti sahabat bagi penulis, yang selalu membantu penulis dalam hal apapun, dan membantu tanpa pamrih, saudara seperjuangan, terimakasih karena selalu mendukung dan membantu penulis.
10. Sahabatku sejak SMP Maulidya yang telah menjadi bagian dari perjalanan awal pendidikan penulis. Kenangan, kebersamaan, serta dukungan yang diberikan menjadi fondasi semangat hingga penulis dapat mencapai tahap ini.

11. Kepada Zahra dan Hanum. Terimakasih atas kebersamaan, semangat, serta motivasi yang diberikan selama masa SMA hingga Perkuliahan ini. Dukungan dan persahabatan yang terjalin memberikan banyak pelajaran berharga bagi penulis. Semoga kita selalu bersama dan berteman baik hingga tua nanti.
12. Kepada teman teman PKM seperjuangan Khalila, Yuniar, Salsa, Syeikha, Presti, Asda, Andien, Uliv, Fitra. Terima kasih atas kerja sama, diskusi, bantuan, serta kebersamaan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
13. Keluarga besar Teknik Geofisika 2022 yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Terimakasih atas setiap kenangan dan perjalanan yang berharga.
14. Terima kasih penulis sampaikan kepada diri sendiri, “Sabrina Adelyra”, yang telah mampu bertahan dan terus berjuang melewati setiap tantangan dalam proses penyusunan skripsi ini. Proses ini menjadi bagian dari pendewasaan dan pembelajaran tanggung jawab dalam kehidupan. Terima kasih karena tidak menyerah dan tetap berusaha hingga mencapai tahap ini. Semoga pencapaian ini menjadi pengingat bahwa setiap usaha tidak pernah sia-sia.
15. Dan terakhir penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu atas segala dukungan dan kontribusi yang diberikan.

Sebagai penutup, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan di masa depan. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu geofisika dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 01 April 2026



Sabrina Adelyra

## 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>x</b>
<b>MOTTO HIDUP .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>SANWACANA.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxi</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Lokasi Penelitian .....	5
2.2 Tektonik Regional .....	7

2.3 Geomorfologi Regional .....	9
2.4 Sejarah Geologi Gunung Sibual – Bali .....	10
2.5 Kondisi Geologi Daerah Penelitian .....	10
2.6 Geologi Regional.....	13
2.7 Stratigrafi Regional .....	16
2.8 Sistem Panas Bumi .....	21
2.9 Geokimia Daerah Penelitian.....	25
2.10 Penelitian Terdahulu.....	26
<b>III. TEORI DASAR .....</b>	<b>29</b>
3.1 Metode Gaya berat .....	29
3.2 Konsep Dasar Gaya berat .....	29
3.3 Koreksi dalam Metode gaya berat .....	33
3.3.1 Perhitungan Gaya Berat.....	34
3.3.2 Koreksi Lintang ( <i>Latitudo Correction</i> ) .....	34
3.3.3 Koreksi Udara Bebas ( <i>Free Air Correction</i> ) .....	35
3.3.4 Koreksi Bouguer ( <i>Bouguer Correction</i> ).....	35
3.3.5 Koreksi Medan ( <i>Terrain Correction</i> ) .....	36
3.3.6 Anomali bouguer lengkap .....	37
3.4 Analisis Spektrum .....	37
3.5 Filter <i>Upward Continuation</i> .....	40
3.6 <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD).....	41
3.7 <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	41
3.8 <i>Inverse Modelling</i> .....	43
<b>IV. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>44</b>
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	44
4.2 Alat dan Bahan.....	45
4.3 Prosedur Penelitian .....	45
4.4 Jadwal Kegiatan .....	53
4.5 Diagram Alir .....	54
<b>V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>55</b>
5.1 Hasil Penelitian.....	55
5.2 Pembahasan .....	56

5.2.1	<i>Anomali bouguer lengkap</i> .....	56
5.2.2	Peta Anomali Regional dan Residual .....	58
5.2.3	<i>Analisis Derivative</i> .....	61
	5.2.3.1 Metode <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD) .....	61
	5.2.3.2 Metode <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD) .....	63
5.2.4	Identifikasi Struktur Patahan .....	65
5.2.5	Pemodelan <i>Inverse</i> 3D.....	71
5.2.6	Analisis Geokimia Daerah Penelitian.....	75
5.2.7	Model Konseptual Panas Bumi Daerah Penelitian.....	76
<b>VI.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>79</b>
6.1	Kesimpulan.....	79
6.2	Saran .....	79

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta daerah penelitian.....	6
2. Peta tektonik regional sumatra (Peta rupa bumi indonesia, 2000).....	8
3. Peta geologi regional gunung Sibual buali.....	15
4. Litostratigrafi sumatra utara (Kamioli dan Naim, 1975).....	18
5. Sistem panas bumi sumber panas, reservoir, dan batuan penudung (Dickson & Fanelli, 2013).....	22
6. Perpindahan panas di bawah permukaan (Saptadji, 2001).....	23
7. Geokimia daerah penelitian (KESDM, 2017).....	25
8. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).....	30
9. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Telford dkk, 1990).....	31
10. Kurva $\ln A$ terhadap $k$ (Blakely, 1996).....	40
11. Ilustrasi cara kerja satelit GRACE (Johannessen dkk., 2003).....	46
12. Ilustrasi cara kerja satelit GOCE (Johannessen dkk., 2003).....	47
13. Situs <i>bureau gravimetrique internasional</i> .....	48
14. Data – data pada GGMPlus.....	48
15. Data <i>gravity accelerations</i> GGMPlus per luasan area.....	49
16. <i>Script</i> ekstrak data GGMPlus.....	49
17. Peta interpolasi <i>gravity</i> observasi dan data elevasi GGMPlus.....	50
18. Data analisis spektrum menggunakan metode RAPS.....	51
19. Grafik analisis spektrum.....	51
20. Diagram alir.....	54
21. Peta Anomali bouguer lengkap.....	57

22. Peta anomali regional .....	59
23. Peta anomali residual.....	60
24. Peta <i>first horizontal derivative</i> (FHD).....	62
25. Peta <i>second vertical derivative</i> (SVD) .....	64
26. Peta lintasan <i>derivative</i> anomali residual wilayah penelitian.....	67
27. Kurva hasil analisis <i>derivative slice</i> A – A' .....	68
28. Kurva hasil analisis <i>derivative slice</i> B – B' .....	68
29. Peta estimasi sesar baru dari analisis <i>derivative</i> .....	70
30. Model distribusi nilai densitas hasil inversi 3D data gaya berat gunung Sibual buali .....	72
31. Hasil model inversi 3D densitas ( <i>slice</i> C– C') .....	74
32. Model konseptual sistem panas bumi gunung Sibual buali ( <i>structure- controlled volcanic geothermal system</i> ) .....	77

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai densitas batuan (Telford, dkk., 1990) .....	33
2. Operator henderson dan zietz (1949).....	42
3. Operator elkins (1951).....	42
4. Operator rosenbach (1953) .....	43
5. Alat dan bahan .....	44
6. Jadwal kegiatan penelitian.....	53
7. Hasil analisis grafik <i>derivative</i> lintasan.....	68

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Panas bumi (*geothermal*) adalah sumber energi terbarukan yang memanfaatkan panas internal bumi dalam bentuk fluida panas dan/atau uap untuk keperluan pembangkit listrik dan pemanfaatan langsung. Fluida hidrotermal terbentuk ketika air permukaan atau air tanah bersirkulasi ke zona yang bersentuhan dengan tubuh magma atau batuan panas, mengalami pemanasan, dan kembali ke permukaan melalui rekahan dan sesar sebagai manifestasi *geothermal* (misalnya mata air panas, fumarol). Karena sifatnya yang relatif bersih dan berkelanjutan, panas bumi berpotensi menjadi sumber energi alternatif yang strategis bagi kebutuhan energi nasional (Sundhoro, dkk., 2006).

Pulau Sumatra terletak pada zona interaksi lempeng Eurasia dan Indo–Australia sehingga memiliki sesar aktif dan aktivitas vulkanik yang intens. Kondisi tektonik tersebut menghasilkan banyak prospek panas bumi di Pulau Sumatra, termasuk Gunung Sibual Buali di Sumatra Utara. Gunung Sibual buali berkembang pada struktur graben dan jalur sesar yang berperan sebagai jalur sirkulasi fluida hidrotermal; manifestasi permukaan seperti fumarol dan mata air panas menunjukkan adanya sistem hidrotermal aktif di kawasan ini. Untuk memanfaatkan potensi tersebut secara optimal diperlukan pemahaman mengenai struktur bawah permukaan, karakteristik batuan penyusun, dan sebaran zona yang berpotensi menjadi reservoir panas bumi.

Salah satu daerah di Indonesia khususnya yang memiliki potensi panas bumi (*Geothermal*) yang cukup besar adalah daerah Gunung Sibual buali yang dimana

Gunung ini terletak di Sumatra Utara dan memiliki potensi panas bumi relatif besar. Namun demikian, untuk dapat mengoptimalkan pemanfaatannya, diperlukan pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik reservoir panas bumi di kawasan Gunung Sibual buali

Struktur bumi terdiri dari berbagai jenis batuan dengan sifat serta karakteristik yang beragam. Karakteristik tersebut dapat dianalisis dengan menerapkan prinsip - prinsip fisika yang relevan sesuai dengan aspek yang diteliti. Salah satu cara untuk menyingkap fisik batuan adalah melalui pendekatan geofisika, seperti metode gaya berat. Metode ini termasuk dalam kategori geofisika pasif yang banyak dimanfaatkan dalam kajian geodinamika maupun eksplorasi, terutama dalam memperkirakan keberadaan struktur sesar. Melalui pengukuran gaya berat, diperoleh gambaran bawah permukaan yang berguna untuk menafsirkan kondisi struktur geologi, *basement*, maupun sesar. Metode gaya berat memiliki kepekaan tinggi terhadap variasi baik lateral maupun vertikal, sehingga kerap digunakan dalam kajian struktur geologi, batuan dasar, intrusi magmatik, cekungan sedimen, endapan sungai purba, dan lain sebagainya (Sarkowi, 2014).

Metode gaya berat merupakan teknik yang efektif untuk memetakan variasi densitas bawah permukaan dan mengidentifikasi struktur geologi seperti patahan, intrusi, dan batas litologi. Analisis anomali Bouguer, turunan horizontal dan vertikal (FHD, SVD), analisis spektral, serta pemodelan *forward* atau *inverse* memungkinkan penentuan pola struktur, estimasi kedalaman sumber anomali, dan pemodelan distribusi densitas yang relevan untuk identifikasi daerah dengan karakteristik reservoir (zona berdensitas relatif rendah yang berasosiasi dengan rongga atau litologi permeabel). Oleh karena itu, metode gaya berat sangat berguna pada tahap awal penyelidikan panas bumi karena mampu memetakan struktur geologi (seperti sesar atau intrusi batuan) pada area yang luas hingga menengah, sehingga membantu menentukan area prospek sebelum dilakukan survei yang lebih mendetail.

Dalam penelitian ini digunakan data sekunder *Global Gravity Model Plus* (GGMPlus), yaitu model gravitasi komposit yang menggabungkan data satelit (GRACE, GOCE, EGM2008) dan topografi resolusi tinggi (SRTM). Data

GGMPlus memiliki resolusi spasial yang relatif rapat sehingga efektif untuk memperoleh gambaran awal struktur gravimetri sebelum pengumpulan data terestrial yang lebih terperinci. Penggunaan data GGMPlus memungkinkan analisis awal mengenai pola anomali regional dan identifikasi fitur-fitur struktur yang memerlukan perhatian lebih lanjut pada tahap survei lapangan.

Namun demikian, interpretasi gaya berat tidak lepas dari ambiguitas *inherent* yang diakibatkan oleh non-uniknya solusi *inverse*. Untuk mengurangi ketidakpastian tersebut, diperlukan proses pengolahan dan analisis yang sistematis—meliputi koreksi pengamatan (koreksi lintang, *free-air*, Bouguer, dan *terrain*), pemisahan komponen regional-residual melalui analisis spektrum dan upward continuation, penerapan turunan untuk memperjelas batas lateral (FHD) serta kontak vertikal (SVD), dan pemodelan *forward* maupun *inverse* 2D/3D sebagai upaya *quantification* model bawah permukaan. Integrasi hasil geofisika dengan data geologi regional dan peta litostratigrafi juga penting untuk memperoleh interpretasi geologi yang lebih akurat.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi keberadaan patahan yang mengontrol sistem panas bumi di wilayah Gunung Sibual–Buali.
2. Menentukan densitas batuan penyusun bawah permukaan berdasarkan variasi densitas hasil analisis data gaya berat.
3. Mengestimasi lokasi dan kedalaman zona prospek reservoir panas bumi melalui integrasi hasil analisis struktur geologi dan distribusi anomali gaya berat.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pelaksanaan penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan berupa data sekunder *Global Gravity Model Plus* (GGMPlus) yang telah terkoreksi medan dan Bouguer.

2. Anomali regional–residual dianalisis menggunakan Analisis spektrum, Filter *Upward Continuation*, serta identifikasi patahan melalui SVD dan FHD.
3. Pemodelan bawah permukaan dilakukan dengan pemodelan struktur bawah permukaan dan inversi 3D menggunakan *Software Grablox*.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

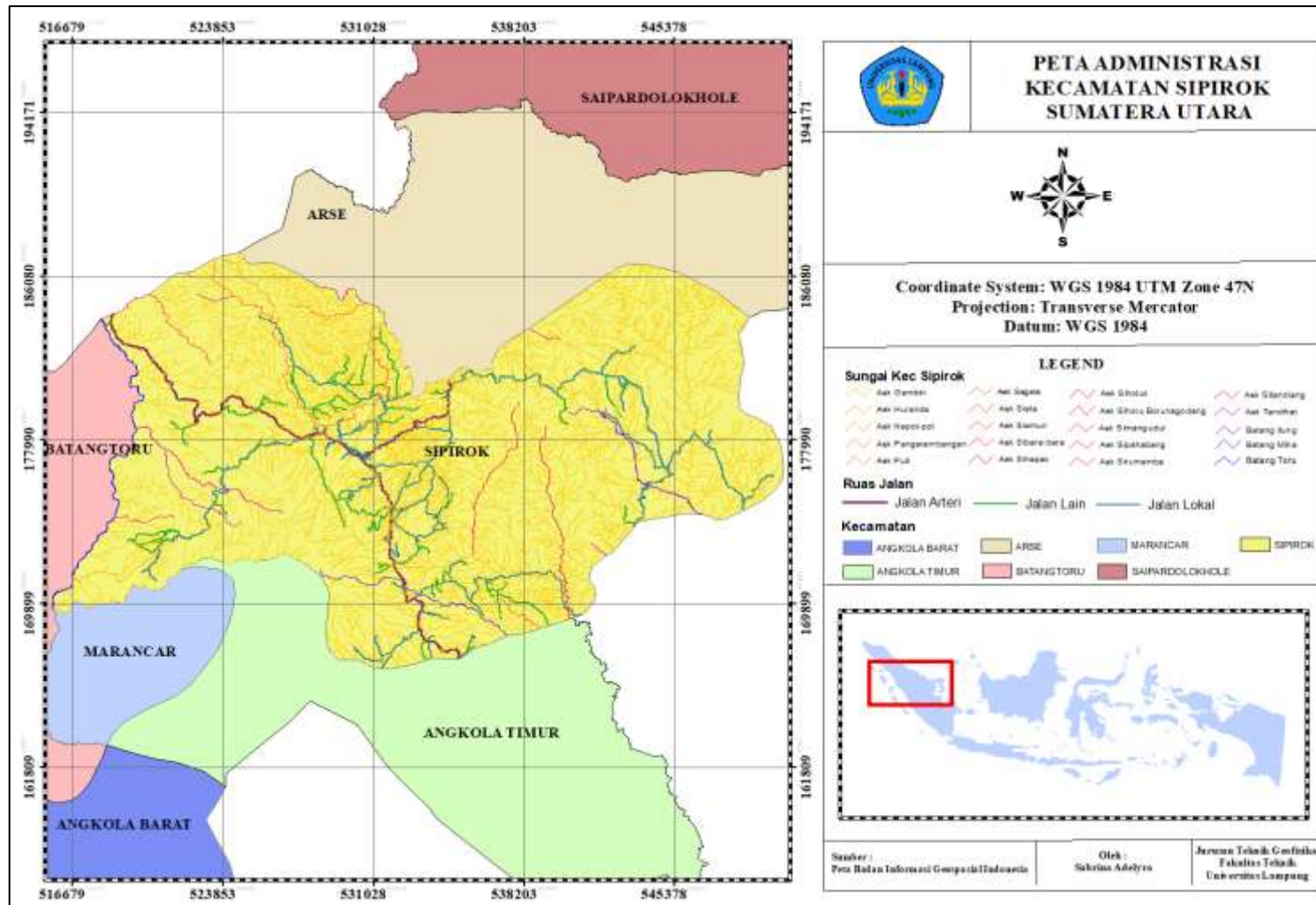
Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran mengenai model sistem panas bumi di Gunung Sibual–Buali berdasarkan analisis data gaya berat. Kajian mencakup identifikasi struktur geologi, distribusi densitas batuan bawah permukaan, serta estimasi lokasi dan kedalaman zona prospek reservoir panas bumi. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah sekaligus informasi awal untuk penelitian lanjutan maupun pengembangan potensi panas bumi di wilayah Gunung Sibual–Buali, Sumatra Utara.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian difokuskan pada daerah prospek panas bumi Gunung Sibual–Buali, yang berada di Kecamatan Sipirok, Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatra Utara. Gunung ini termasuk dalam kategori gunung api aktif tipe B, karena tidak tercatat adanya erupsi sejak abad ke-17. Dari sudut pandang geologi, Gunung Sibual–Buali merupakan bagian dari rangkaian Pegunungan Barisan dan memiliki dua puncak utama, dengan puncak tertinggi mencapai ketinggian 1.819 meter.

Kondisi morfologi kawasan ini umumnya dipengaruhi oleh struktur sesar yang berarah barat laut–tenggara. Berdasarkan Gambar 1, lokasi Gunung Sibual–Buali berada di wilayah Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatra Utara, dengan variasi topografi yang mencakup daerah dataran rendah hingga dataran tinggi. Selain itu, gunung stratovulkano ini memiliki dua titik fumarola yang terletak di bagian selatan (Primulyana & Prambada, 2011).

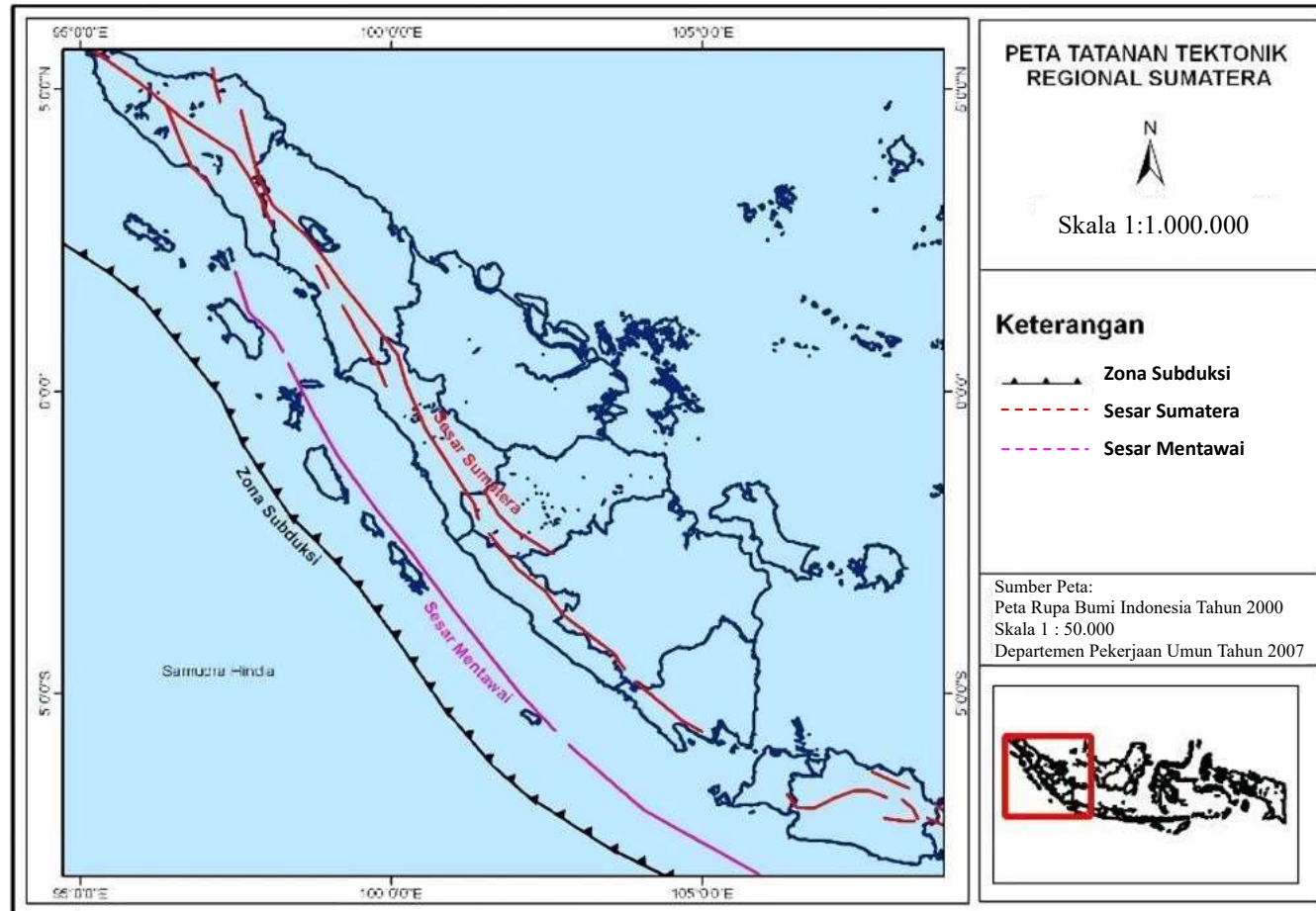


Gambar 1. Peta daerah penelitian

## 2.2 Tektonik Regional

Secara tektonik, Pulau Sumatra berada pada batas selatan lempeng Benua Eurasia dan mengalami interaksi tektonik dengan lempeng India – Australia. Proses subduksi yang masih berlangsung hingga kini menghasilkan jalur *Benioff* di bawah Sumatra serta zona akresi yang membentuk Kepulauan Mentawai (Barber & Crow, 2005). Secara geologi, terbentuknya Pulau Sumatra ialah hasil konvergensi antar Lempeng Indo - Australia dengan Lempeng Eurasia, di mana pola struktur tektonik yang muncul sangat dipengaruhi oleh sudut penunjaman serta laju konvergensi kedua lempeng tersebut. Pulau Sumatra memiliki keunikan dalam struktur tektoniknya sehingga menjadi salah satu wilayah yang mendapat perhatian besar dari para ahli geologi dan kebumihan. Kekhasan ini disebabkan oleh adanya dua kondisi geologi utama yang sangat memengaruhi dinamika tektonik sekaligus tingkat kegempaan di kawasan tersebut. Daerah tersebut merupakan zona subduksi yang berfungsi sebagai batas antar lempeng, di mana Lempeng Indo-Australia tersubduksi atau menekuk ke bawah lempeng eurasia. Aktivitas tektonik yang berlangsung di zona ini sering kali menghasilkan gempa bumi dengan kekuatan besar, bahkan dalam kondisi tertentu dapat memicu terjadinya tsunami. Selanjutnya, keberadaan zona sesar Sumatra atau *Sumatran Fault Zone* (SFZ), yang lebih dikenal sebagai Sesar Semangko (Gambar 2). Sesar ini memanjang sepanjang Pegunungan Barisan, dari Laut Andaman hingga Teluk Semangko, dan berperan dalam mengakomodasi gerakan *strike-slip* sebagai bagian dari mekanisme konvergensi oblique antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia (Farid, dkk., 2024).

Aktivitas tektonik di Sumatra yang dikendalikan oleh subduksi Lempeng Indo – Australia di bawah Lempeng Eurasia serta keberadaan Sesar Sumatra tidak hanya memengaruhi tingkat kegempaan, tetapi juga berperan penting dalam pembentukan sistem panas bumi di sepanjang jalur Pegunungan Barisan. Manifestasi *geothermal* yang muncul, seperti fumarol dan mata air panas, merupakan bukti keterkaitan erat antara tektonik lempeng, vulkanisme, dan potensi sumber daya panas bumi di wilayah ini (Hochstein & Sudarman, 2015).



Gambar 2. Peta tektonik regional sumatra (Peta rupa bumi indonesia, 2000)

### 2.3 Geomorfologi Regional

Gunung Sibual buali ( $\pm 1.819$  mdpl) merupakan gunung api Stratovolkano yang terletak di Kabupaten Tapanuli Selatan, Kecamatan Sipirok, Sumatra Utara. Secara geomorfologi, Kawasan ini berada dalam jalur Pegunungan Barisan, yang memanjang sejajar dengan Pantai barat Sumatra dari Aceh hingga Lampung (Van Bemmelen, 1949; Barber & Crow, 2005). Gunung Sibual buali terbentuk akibat aktivitas tektonik di sepanjang Sesar Besar Sumatra (*Sumatran Fault Zone/SFZ*), sebuah sistem patahan geser mendatar (*strike – slip fault*) yang menjadi struktur pengontrol utama vulkanisme kuartar di Sumatra bagian utara (Farid, 2018).

Morfologi Gunung Sibual buali memperlihatkan bentuk kerucut vulkanik dengan lereng relatif curam, disusun oleh lava andesit-basaltik, breksi vulkanik, dan endapan piroklastik muda. Bagian puncaknya menunjukkan sisa kawah vulkanik yang sudah mengalami erosi kuat, sedangkan di kaki gunung ditemukan perbukitan bergelombang hingga lembah sempit yang diisi oleh endapan aluvial dan hasil rombakan material vulkanik. Manifestasi panas bumi, seperti mata air panas dijumpai sekitaran kaki gunung, menandakan adanya sistem hidrotermal aktif yang dipengaruhi oleh struktur sesar lokal dan suplai panas dari tubuh magma di kedalaman (Direktorat Vulkanologi, 1994).

Secara regional, geomorfologi Sibual buali berasosiasi dengan beberapa gunungapi Kuartar lainnya di Sumatra bagian utara, seperti Gunung Lubukraya dan Gunung Sorik Marapi, yang juga berderet di sepanjang jalur Sesar Besar Sumatra. Pola sebaran gunungapi ini memperlihatkan keterkaitan erat antara aktivitas vulkanik dan struktur tektonik, dimana jalur sesar menjadi jalur pelemahan kerak yang memungkinkan naiknya magma ke permukaan (Barber & Crow, 2005).

Lereng barat Sibual buali umumnya lebih curam dan langsung berbatasan dengan depresi intermontan di sisi barat Pegunungan Barisan, sedangkan lereng timur lebih landai, terhubung dengan dataran tinggi Tapanuli yang banyak dipengaruhi endapan vulkanik muda. Karakteristik morfologi ini mencerminkan interaksi

antara proses tektonik, erupsi gunungapi, serta erosi intensif oleh air hujan di wilayah beriklim tropis.

#### **2.4 Sejarah Geologi Gunung Sibual buali**

Struktur geologi Gunung Sibual buali erat kaitannya dengan keberadaannya di dalam Sarulla Graben, suatu zona depresi tektonik di Tapanuli Utara yang dikontrol oleh aktivitas Sesar Besar Sumatra dan cabangnya, yakni Sesar Toru–Asik. Gunungapi ini berkembang sebagai stratovolkano yang sebagian besar tubuhnya tersusun oleh batuan andesit hingga dasit hasil erupsi Kuartar (Muksin, dkk., 2013). Aktivitas tektonik lokal berperan penting dalam pengendalian jalur magma dan manifestasi panas bumi, ditunjukkan dengan keberadaan kubah lava dan beberapa pusat erupsi sekunder di bagian selatan gunung yang berasosiasi dengan sistem sesar tersebut (Gunderson, dkk., 2013). Selain itu, proses tektonik yang terus berlangsung mengontrol keberadaan manifestasi *geothermal* berupa mata air panas dan fumarol di sekitar gunung. Kombinasi antara kerangka struktur graben, aktivitas sesar aktif, serta produk vulkanik Kuartar menjadikan Sibual - Buali sebagai contoh sistem gunung api–tektonik yang kompleks di Sumatra bagian utara (Suari & Fauzi, 1991).

#### **2.5 Kondisi Geologi Daerah Penelitian**

Gunung Sibual buali merupakan stratovolcano aktif yang terletak di Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatra Utara, yang termasuk dalam sistem Sarulla. Pembentukan gunung api ini erat kaitannya dengan aktivitas subduksi Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia, yang menghasilkan tekanan tektonik tinggi dan memicu aktivitas vulkanik serta manifestasi panas bumi. Gunung ini berkembang di atas kompleks vulkanik Kuartar dengan struktur graben yang dikontrol oleh sesar aktif, menjadikannya contoh sistem vulkanik–tektonik yang kompleks di Sumatra bagian utara. Interaksi antara kerangka struktur graben, aktivitas sesar aktif, dan produk vulkanik Kuartar menghasilkan pola endapan lava dan piroklastik yang khas, sekaligus memengaruhi distribusi fumarol, mata air panas, dan manifestasi hidrotermal lainnya (Muksin, 2013; Hidayat, dkk., 2023).

### **2.5.1 Pra-Kaldera**

Fase awal pembentukan Gunung Sibual buali ditandai oleh aktivitas vulkanik yang membentuk lava andesit hingga dasitik di bagian timur laut dan selatan gunung. Lava ini menunjukkan tekstur porfiritik dengan fenokris plagioklas, klinopiroksen, ortopiroksen, dan hornblende, serta massa dasar berbutir halus yang kadang mengandung kaca vulkanik. Beberapa aliran lava membentuk kubah lava yang terisolasi, sedangkan yang lain mengikuti arah sesar lokal dan membentuk endapan memanjang. Pelapukan spheroidal terlihat pada lava tua, dengan warna abu-abu tua hingga kekuningan. Endapan ini menindih batuan sedimen Neogen secara tidak selaras, menunjukkan bahwa aktivitas vulkanik Pra-Kaldera lebih tua dari lapisan sedimen tersebut. Lava diperkirakan berumur Pleistosen Awal, sekitar 1 juta tahun, dan merupakan fondasi bagi pembentukan topografi serta sistem panas bumi modern di Sibual buali (Hidayat, dkk., 2023).

### **2.5.2. Kaldera**

Pada fase ini, aktivitas vulkanik semakin intens, membentuk kaldera lokal dan menghasilkan endapan piroklastik yang lebih luas. Endapan piroklastik terdiri dari fragmen litik andesitik hingga basal, scoria vesikuler, batu apung, dan sedikit obsidian. Fragmen litik bersudut hingga sub-bersudut, menunjukkan transportasi relatif pendek sebelum pengendapan. Ketebalan endapan bervariasi antara 8–180 meter, tersebar di sisi timur laut dan selatan gunung. Lava yang dihasilkan pada fase ini dominan andesit masif hingga basaltik-andesitik, dengan struktur sambungan kolom dan permukaan kotak. Analisis petrografi menunjukkan komposisi  $\text{SiO}_2$  antara 53–63%, menandakan dominasi basaltik–andesitik. Endapan piroklastik sering mengandung material organik atau arang, yang memberikan penanggalan relatif hingga 38.000 tahun (Juliani, 2013). Fase kaldera ini menunjukkan interaksi kuat antara aktivitas vulkanik eksplosif dan deformasi tektonik, yang mengontrol distribusi endapan piroklastik dan lava. Struktur graben lokal dan sesar besar Sumatra memainkan peran penting dalam mengarahkan aliran lava dan menentukan lokasi manifestasi panas bumi.

### 2.5.3. Aktivitas Modern dan Manifestasi *Geothermal*

Fase modern di Gunung Sibual buali ditandai oleh aktivitas vulkanik yang masih berlangsung hingga saat ini. Lava modern menunjukkan sambungan platy di bagian bawah dan aliran lava kotak di puncak. Komposisi mineral meliputi plagioklas, piroksen, dan olivin minor dalam massa dasar berbutir halus. Endapan piroklastik modern tersebar di lembah dan anak sungai. Manifestasi *geothermal* sangat jelas, dengan fumarol, mata air panas, dan kolam lumpur yang tersebar di sisi timur laut, barat, dan selatan gunung. Aktivitas hidrotermal ini menunjukkan keberadaan sistem panas bumi aktif yang potensial untuk dimanfaatkan dalam proyek Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Sarulla dengan kapasitas hingga 330 MW (Juliani, 2013; Gunderson, dkk., 2017). Interaksi antara magma dangkal, sistem sesar aktif, dan permeabilitas batuan dasar mengontrol lokasi fumarol dan mata air panas, sehingga endapan hidrotermal tidak seragam tetapi terkonsentrasi di zona sesar dan retakan.

### 2.5.4. Karakteristik Batuan

Batuan Gunung Sibual buali menunjukkan variasi yang kompleks dan mencerminkan fase perkembangan vulkanik dari episode Pra-Kaldera hingga aktivitas modern. Lava andesit hingga dasit mendominasi, dengan kandungan  $\text{SiO}_2$  berkisar antara 53–63%, yang menunjukkan transisi dari basaltik-andesitik pada fase awal menuju andesit menengah pada fase kaldera dan modern. Secara petrografi, lava ini memiliki tekstur porfiritik dengan fenokris plagioklas, klinopiroksen, ortopiroksen, hornblende, dan olivin minor pada lava modern, serta massa dasar berbutir halus yang kadang mengandung kaca vulkanik (Juliani, 2013). Endapan piroklastik tersebar di lembah dan anak sungai, terdiri dari fragmen litik andesitik hingga basal, batu apung, scoria vesikuler, dan obsidian minor, dengan ukuran fragmen berkisar antara 1–25 cm (Gunderson, dkk., 2017). Fragmen litik bersudut hingga sub-bersudut, menunjukkan transportasi pendek sebelum pengendapan, dan lapisan piroklastik ini terstratifikasi dengan baik, berlapis tipis hingga tebal, dan terkonsolidasi sebagian di beberapa area (Hidayat, dkk., 2023). Kubah lava yang terbentuk di bagian selatan dan timur laut gunung memanfaatkan jalur sesar sebagai zona intrusi, menunjukkan hubungan kuat antara

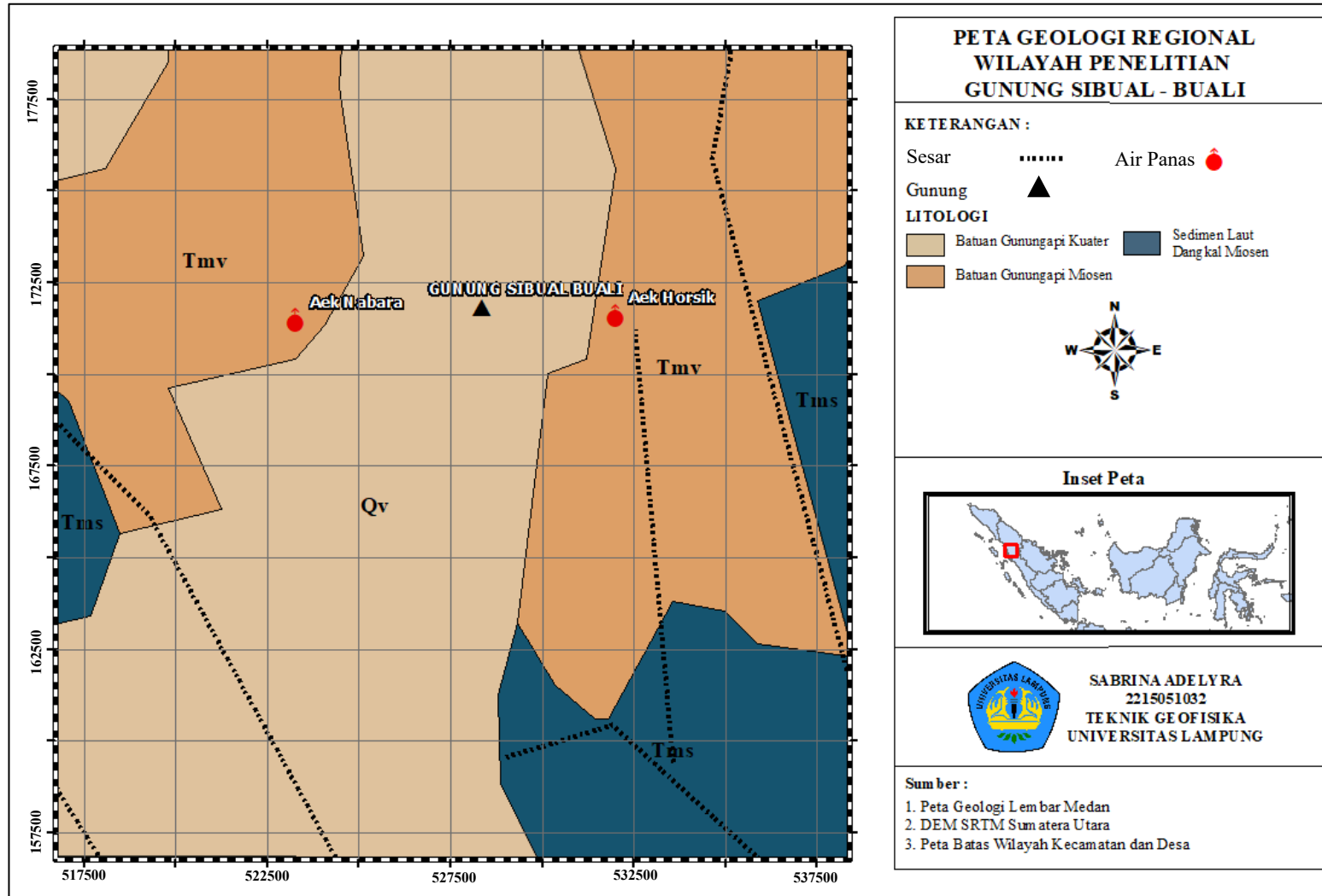
aktivitas vulkanik dan struktur tektonik lokal (Juliani, 2013). Struktur lava modern menampilkan aliran kotak di puncak dan sambungan platy di bagian bawah, memperlihatkan fase pendinginan berbeda. Kombinasi karakter lava, kubah, dan piroklastik ini tidak hanya membentuk morfologi stratovulkanik Gunung Sibual buali tetapi juga mengontrol distribusi manifestasi panas bumi (fumarol, mata air panas, dan kolam lumpur) terkonsentrasi di zona sesar dan retakan (Hidayat, dkk., 2023). Secara keseluruhan, karakteristik batuan ini mencerminkan interaksi kontinu antara proses vulkanik, tektonik, dan hidrotermal, yang menjadikan Gunung Sibual buali sebagai sistem gunung api–tektonik yang kompleks di Sumatra bagian utara.

## **2.6 Geologi Regional**

Gunung Sibual buali yang berada di dalam Blok Sarulla yang merupakan bagian dari busur vulkanik Sumatra dan berasosiasi erat dengan sistem Sesar Sumatra Besar (Great Sumatra Fault/GSF). Daerah ini terbentuk oleh graben komposit Plio–Pleistosen yang muncul sebagai respons terhadap segmentasi sesar geser mengangan (*dextral*) dan aktivitas busur vulkanik. Stratigrafi regional menampilkan urutan batuan dasar berupa batuan metamorf dan sedimen Paleozoikum yang terakresi sebelum terbentuknya busur vulkanik aktif, kemudian ditutupi oleh produk vulkanik berupa lava, tufa, dan endapan piroklastik yang mengisi ruang graben serta selaras dengan jalur-jalur sesar.

Pada tahap awal evolusi, injeksi magma basaltik–andesitik mulai melapisi batuan dasar, sementara sistem sesar menyediakan jalur intrusi magma dan permeabilitas awal. Perkembangan graben Sarulla kemudian mengakomodasi endapan tufa, abu vulkanik, serta lava hasil aktivitas gunung api, di mana Gunung Sibual buali berkembang sebagai stratovulkano andesitik dengan aktivitas sekitar 0,7–0,3 juta tahun lalu. Fase vulkanik utama ditandai dengan produksi lava dan piroklastik berlimpah yang mengisi bagian graben, disertai pembentukan pusat-pusat vulkanik seperti Sibual buali, Hopong, dan kubah Namora-I-Langit yang menghasilkan aliran lava, awan panas, dan ablasi material vulkanik.

Endapan tuf dan piroklastik terakumulasi di dalam cekungan, sedangkan lava andesitik membentuk lapisan padat di bagian atas struktur. Struktur sesar utama GSF beserta cabangnya mengontrol jalur pergerakan magma dan fluida, serta menjadi pengendali utama sistem panas bumi. Pada tahap akhir evolusi vulkanik, terjadi pembentukan kubah lava riyodasit–dasit yang muncul di sepanjang jalur sesar Toru-Asik, sebagaimana dicatat oleh *Global Volcanism Program* (2013), yang juga mengidentifikasi ventilasi retakan sebagai sumber erupsi muda. Saat ini, manifestasi panas bumi berupa solfatara, fumarol, dan mata air panas banyak ditemukan pada lereng-lereng gunung. Zona alterasi hidrotermal yang terbentuk di sepanjang sesar menyediakan jalur aliran fluida panas, di mana hasil pengeboran menunjukkan temperatur reservoir hingga 267 °C dengan zona produksi antara 218–248 °C di Sibual buali Timur, yang seluruhnya sangat dipengaruhi oleh aktivitas tektonik Sesar Sumatra Besar.



Gambar 3. Peta geologi regional gunung Sibual buali

Penunjaman lempeng Indo-Australia ke bawah Kraton Sunda dengan arah oblik di sepanjang zona barat daya Pulau Sumatra berperan penting dalam membentuk evolusi tektonik Sumatra pada masa Tersier. Pergerakan lempeng samudera Indo-Australia yang menyusup ke bawah lempeng benua Eurasia telah berlangsung sejak Oligosen akhir (Pulunggono & Cameron, 1984). Menurut Van Bemmelen (1949), wilayah Sumatra Utara dapat dibagi ke dalam lima satuan fisiografi, di antaranya Zona Barisan terletak di bagian tengah hingga selatan, Zona Semangko berada di bagian tengah, Zona Busur Luar mencakup kepulauan di sisi barat, serta Zona Dataran Rendah dan Perbukitan yang berkembang di bagian timur laut Sumatra Utara.

## **2.7 Stratigrafi Regional**

Daerah Gunung Sibual buali terletak pada bagian Pegunungan Bukit Barisan yang terbentuk akibat aktivitas tektonik sepanjang Sesar Besar Sumatra. Kawasan ini juga termasuk ke dalam zona magmatik Tersier–Kuarter yang berkembang di sepanjang jalur busur vulkanik barat Sumatra (Pulunggono & Cameron, 1984).

Berdasarkan pembagian stratigrafi regional Sumatra Utara, daerah penelitian termasuk dalam Cekungan Sumatra bagian tengah yang berkembang akibat pengaruh aktivitas Sesar Sumatra Besar dan proses pembentukan cekungan busur belakang. Stratigrafi regional daerah ini terlihat pada Gambar 4. Satuan tertua di daerah ini adalah Formasi Meucamplici dan Formasi Tampur yang berumur Eosen Akhir–Oligosen awal. Formasi Meucamplici tersusun oleh batupasir kuarsa, batulanau, serpih, dan batugamping napalan, dengan lingkungan pengendapan laut dangkal–deltaic. Formasi Tampur terutama terdiri dari batugamping masif berlapis, batugamping terumbu, serta sisipan batupasir karbonatan; lingkungan pengendapannya adalah laut dangkal karbonatan (Wilson, 2005).

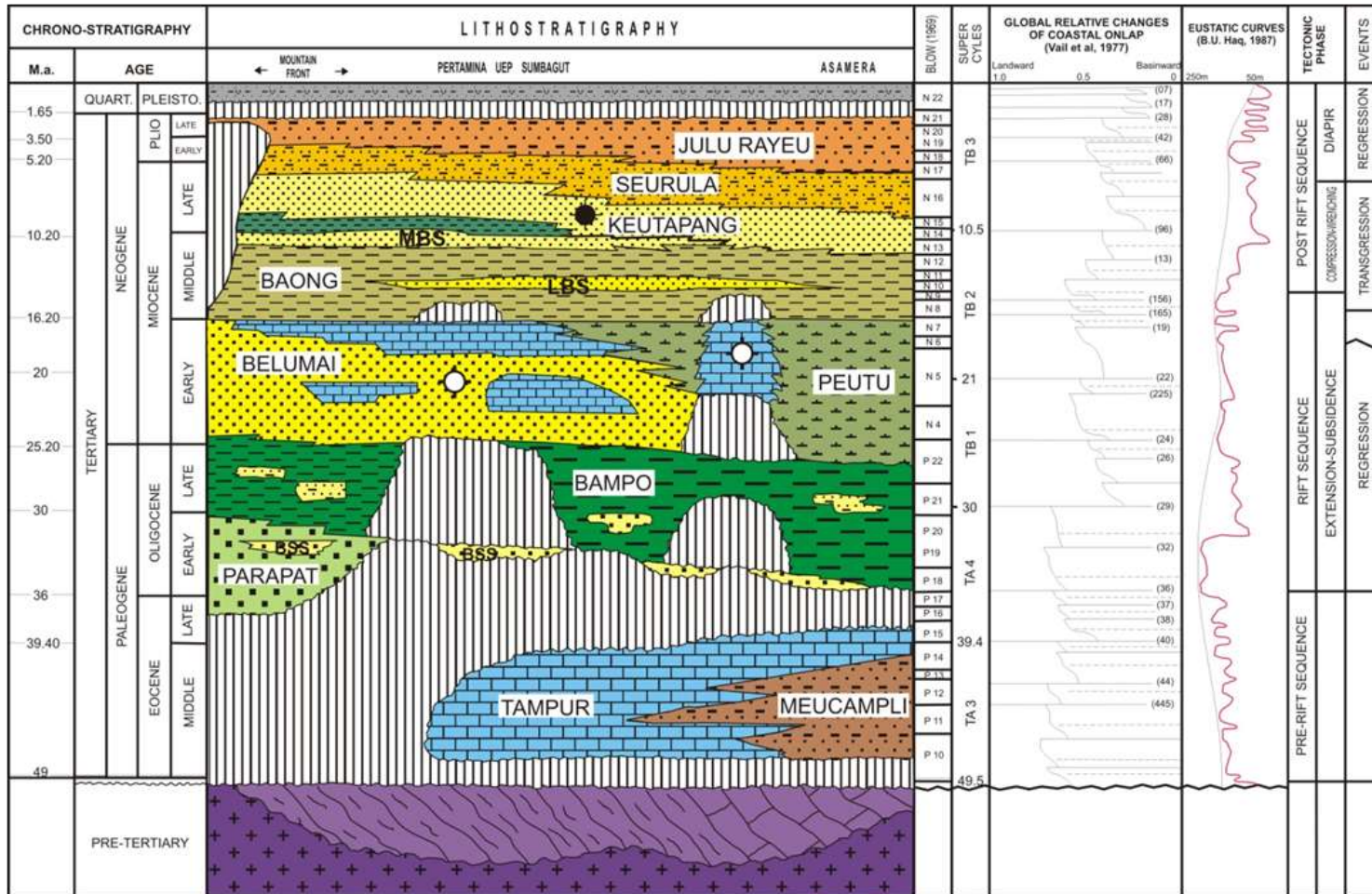
Lapisan atas secara selaras di endapkan Formasi Parapat yang berumur Oligosen Akhir–Miosen awal, tersusun oleh batupasir, serpih, dan konglomerat, yang diinterpretasikan sebagai endapan kipas bawah laut (submarine fan) dan sistem turbidit. Formasi ini kemudian tertindih oleh Formasi Bampo berumur Miosen

awal–tengah, terdiri dari serpih abu-abu gelap dengan sisipan batupasir tipis, yang diendapkan pada lingkungan laut dalam (bathyal).

Selanjutnya, di atas Formasi Bampo dijumpai Formasi Peutu berumur Miosen awal–tengah, terdiri dari batugamping masif hingga terumbu dengan sisipan batupasir karbonatan, yang diendapkan dalam lingkungan paparan karbonat. Di atasnya dijumpai Formasi Belumai berumur Miosen Tengah, terdiri dari serpih dengan sisipan batupasir tipis, yang diinterpretasikan sebagai endapan laut dalam.

Formasi Baong, yang menindih secara selaras, berumur Miosen Tengah–Akhir, tersusun oleh serpih tebal berwarna abu-abu kehitaman, dengan sisipan batupasir halus. Lingkungan pengendapannya berupa laut dalam dengan dominasi pengendapan sedimen halus. Stratigrafi muda ditandai dengan Formasi Keutapang berumur Miosen Akhir–Pliosen Awal, terdiri dari batupasir, serpih, dan konglomerat dengan karakteristik pengendapan kipas bawah laut (Cameron, dkk., 1983). Formasi ini diikuti oleh Formasi Seurula berumur Pliosen Awal–Tengah, tersusun dari batupasir tebal berselingan serpih, dengan lingkungan pengendapan transisi dari laut dangkal ke kipas bawah laut.

Formasi termuda adalah Formasi Julu Rayeu yang berumur Pliosen Akhir–Plistosen Awal, yang tersusun oleh batupasir, serpih, konglomerat, dan endapan deltaik. Lingkungan pengendapannya menunjukkan kondisi laut dangkal hingga delta depan, mencerminkan pengisian akhir cekungan sebelum aktivitas vulkanik Kuartar berkembang di sekitar zona patahan.



Gambar 4. Litostratigrafi sumatra utara (Kamioli & Naim, 1975)

### **2.7.1 Formasi Tampur**

Formasi Tampur berumur Eosen Awal, tersusun terutama oleh batugamping tebal dengan sisipan napal dan batulempung. Batugamping berwarna putih hingga abu-abu muda, keras, padu, sebagian bertekstur kristalin, mengandung foraminifera besar seperti Nummulites, Alveolina, dan Orbitolites. Sisipan napal berwarna kelabu pucat, mudah hancur, dan setempat mengandung fosil planktonik. Lingkungan pengendapannya ditafsirkan sebagai laut dangkal karbonatan dengan perkembangan terumbu. Tebal formasi ini diperkirakan mencapai lebih dari 1500 m, dan secara stratigrafi menindih langsung batuan Pra-Tersier.

### **2.7.2 Formasi Meucampli**

Formasi Meucampli berumur Eosen Akhir, tersusun atas batupasir kuarsa, batulempung, serta lapisan tipis batugamping sebagai sisipan. Batupasir umumnya berwarna abu – abu kecoklatan tekstur halus hingga sedang, membundar tanggung, setempat gampingan, dan mengandung glaukonit. Batulempung berwarna abu-abu gelap, agak karbonatan, kadang bersifat gampingan. Sisipan batugamping tipis berwarna putih keabu-abuan dengan kandungan foraminifera planktonik. Lingkungan pengendapan ditafsirkan sebagai laut dalam hingga bathial. Tebalnya diperkirakan sekitar 1200 m, menindih selaras Formasi Tampur.

### **2.7.3 Formasi Peutu**

Formasi Peutu (Oligosen Akhir - Miosen Awal), tersusun atas batugamping terumbu, batugamping pasiran, dan serpih karbonatan. Batugamping terumbu berwarna putih kotor, masif, padu, mengandung koral, alga, dan foraminifera besar. Batugamping pasiran berupa kalkarenit, keras, padat, berwarna abu-abu pucat. Serpih karbonatan berwarna abu-abu tua, mudah terlapukkan, berselingan dengan batugamping. Formasi ini di lingkungan laut dangkal karbonatan hingga neritik. Tebalnya berkisar antara 800–1000 m, menindih tidak selaras Formasi Meucampli.

### **2.7.4 Formasi Baong**

Formasi Baong berumur Miosen Tengah, didominasi oleh batulempung, serpih, dan sedikit batupasir halus. Batulempung berwarna abu-abu gelap hingga hitam, kaya

bahan organik, piiritan, kadang mengandung foraminifera planktonik. Batupasir berupa sisipan tipis, berwarna abu-abu pucat, berbutir halus, karbonatan, dan gampingan. Lingkungan pengendapannya adalah laut dalam hingga bathial, berasosiasi dengan sistem cekungan tertutup. Formasi ini penting secara regional sebagai batuan induk hidrokarbon utama di Sumatra Utara. Tebalnya diperkirakan lebih dari 3000 m.

#### **2.7.5 Formasi Keutapang**

Formasi Keutapang berumur Miosen Akhir dan tersusun atas batupasir, batulempung, serta konglomerat. Batupasir berwarna kelabu kekuningan dengan ukuran butir halus hingga kasar dan mengandung foraminifera planktonik. Batulempung berwarna abu-abu hingga coklat keabu-abuan, bersifat agak karbonatan dan diselingi lapisan batupasir tipis. Konglomerat terdiri atas fragmen kuarsa, batuan sedimen, dan sedikit batuan beku. Formasi tersebut terbentuk di lingkungan delta hingga fluvial dengan ketebalan berkisar 1.000 hingga 1.500 meter.

#### **2.7.6 Formasi Seurula**

Formasi Seurula diperkirakan berumur Pliosen dengan komposisi utama berupa batupasir, batulempung, serta sisipan serpih tipis. Batupasir umumnya berwarna abu-abu gelap berukuran butir halus hingga sedang, dan pada beberapa lokasi mengandung fragmen cangkang moluska serta bersifat karbonatan. Batulempung memiliki warna abu-abu gelap, tekstur agak berpasir, dan mudah mengalami pelapukan. Berdasarkan karakteristik litologinya, formasi ini diinterpretasikan terbentuk pada lingkungan pesisir hingga laut dangkal (neritik). Ketebalan lapisan diperkirakan berkisar antara 600 hingga 800 meter, dengan posisi stratigrafi yang menindih secara selaras Formasi Keutapang.

#### **2.7.7 Formasi Julu Rayeu**

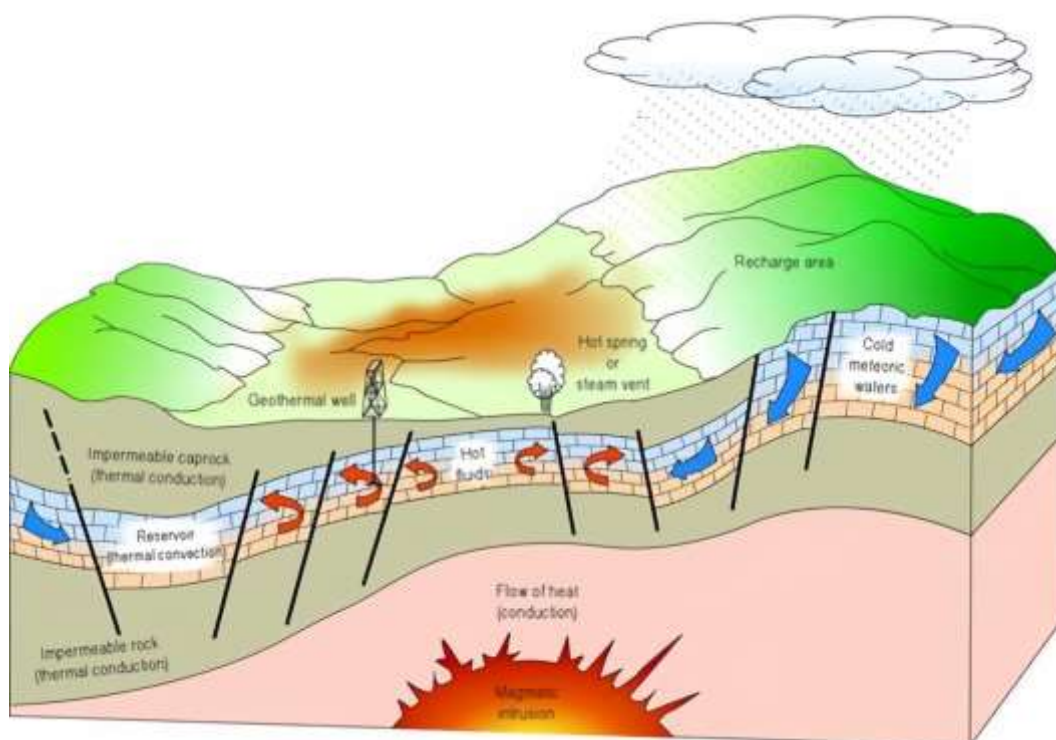
Formasi Julu Rayeu berumur Plistosen Awal–Tengah, tersusun dari batupasir, breksi, dan konglomerat. Batupasir berwarna abu-abu kecoklatan, berbutir sedang hingga kasar, umumnya bersifat gampingan. Breksi berwarna abu-abu pucat, keras,

padu, terdiri dari fragmen batuan beku, sedimen, dan metamorf yang disemen oleh matriks pasir dan lempung. Konglomerat berwarna coklat keabu-abuan, terdiri dari fragmen batuan yang membundar tanggung. Formasi ini menandai aktivitas tektonik dan pengangkatan di daerah Cekungan Sumatra Utara. Tebalnya diperkirakan lebih dari 500 m.

## **2.8 Sistem Panas bumi**

Sistem panas bumi ialah fenomena alami melibatkan perpindahan energi panas dari bagian dalam bumi ke permukaan melalui dua mekanisme utama, yaitu konduksi dan konveksi. Pada proses konduksi, panas ditransmisikan melalui medium batuan, sedangkan konveksi terjadi akibat pergerakan fluida yang dipicu oleh interaksi antara air dan sumber panas. Air bawah permukaan pada awalnya bergerak ke arah yang lebih dalam karena gaya gravitasi, namun setelah mengalami pemanasan, densitasnya berkurang sehingga fluida tersebut naik ke permukaan. Sebaliknya, fluida yang memiliki suhu lebih rendah akan turun, sehingga membentuk suatu sistem sirkulasi konveksi. Secara umum, sistem panas bumi tersusun dari tiga elemen utama, yaitu sumber panas, batuan reservoir yang memiliki permeabilitas, serta jalur aliran fluida yang menghubungkan ke permukaan (Franco & Donatini, 2017; Firdaus dkk., 2014).

Daerah panas bumi atau *geothermal field* merupakan wilayah yang memiliki potensi energi panas bumi dengan kondisi geologi dan hidrologi tertentu. Sumber energi ini berasal dari panas internal bumi, baik dari proses pembentukan planet maupun peluruhan unsur radioaktif seperti kalium, uranium, dan torium. Selain itu, aktivitas tektonik seperti subduksi lempeng turut berperan dalam pembentukan sistem panas bumi, di mana peningkatan suhu pada zona penunjaman menyebabkan batuan meleleh dan membentuk magma. Magma tersebut kemudian menjadi sumber panas yang memanaskan batuan dan fluida di sekitarnya. Fluida panas selanjutnya naik ke permukaan melalui struktur geologi seperti sesar dan rekahan, yang kemudian termanifestasi sebagai mata air panas atau *geyser* (Csanyi, dkk., 2010).



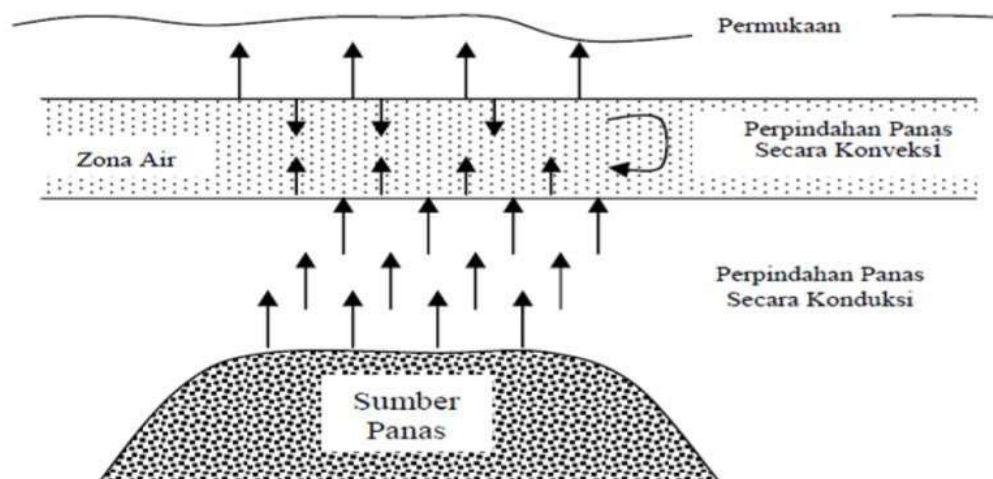
Gambar 5. Sistem panas bumi sumber panas, reservoir, dan batuan penudung (Dickson & Fanelli, 2013)

Secara umum, sistem panas bumi disusun dari tiga komponen utama, yaitu sumber panas, batuan reservoir, dan fluida sebagai media penghantar panas. Fluida panas yang bergerak menuju permukaan sering kali membawa uap yang terperangkap dalam batuan berpori dan permeabel, sehingga dapat muncul sebagai manifestasi di permukaan. Manifestasi tersebut merupakan indikasi awal aktivitas panas bumi di bawah permukaan. Pada bagian atas sumber panas biasanya didapati zona dengan porositas tinggi yang berfungsi sebagai reservoir, yang kemudian tertutup oleh lapisan batuan dengan permeabilitas rendah (*caprock*) sehingga mampu menahan fluida panas di dalamnya.

Manifestasi permukaan merupakan gejala alami yang mencerminkan keberadaan sistem panas bumi di bawah permukaan. Beberapa bentuk manifestasi yang umum dijumpai antara lain mata air panas (*hot spring*), tanah hangat (*warm ground*), keluarnya gas dari dalam tanah (*fumarole*), endapan mineral sulfur (*solfatara*), tanah beruap (*steaming ground*), kolam lumpur panas (*mud volcano*), serta

semburan air panas yang dapat memancar ke udara (*geyser*). Selain itu, interaksi antara fluida panas dan batuan juga dapat menyebabkan perubahan sifat batuan yang dikenal sebagai alterasi hidrotermal (Keam, dkk., 2005).

Perpindahan panas dalam sistem panas bumi terjadi melalui dua mekanisme utama, yakni konduksi dan konveksi. Pada mekanisme konduksi, panas ditransfer melalui medium batuan, sedangkan konveksi terjadi akibat interaksi antara fluida dan sumber panas. Dalam proses konveksi, gaya apung memegang peranan penting, di mana fluida yang dipanaskan akan mengalami penurunan densitas sehingga menjadi lebih ringan dan bergerak ke atas, sementara fluida yang lebih dingin akan bergerak turun ke bawah. Perbedaan gerakan ini menciptakan sirkulasi fluida yang membentuk arus konveksi dalam sistem panas bumi (Saptadji, 2001).



Gambar 6. Perpindahan panas di bawah permukaan (Saptadji, 2001)

Sistem panas bumi yang berkembang di kerak bumi pada dasarnya terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu :

### 2.8.1 Sumber Panas

Sumber energi panas bumi berasal dari panas dalam bumi yang menggerakkan sirkulasi fluida hidrotermal berupa campuran uap dan air panas. Panas ini dapat bersumber dari beberapa bentuk, yaitu:

1. Massa panas padat, umumnya berupa batuan hasil aktivitas vulkanik, baik intrusif maupun ekstrusif, yang berperan sebagai penghantar atau penyimpan panas.

2. Massa panas cair, yakni fluida yang mengalir membawa energi panas melalui proses aliran naik (*upflow*) maupun aliran keluar (*outflow*), serta berkaitan erat dengan interaksi air tanah dan struktur geologi yang mengendalikan jalur sirkulasinya.
3. Massa panas radioaktif, dihasilkan oleh peluruhan mineral-mineral radioaktif di dalam pluton yang melepaskan energi panas.
4. Reaksi kimia eksotermik, yaitu panas yang muncul akibat reaksi kimia tertentu di dalam kerak bumi.

### **2.8.2 Fluida**

Fungsi dari fluida sebagai medium penyimpan sekaligus pengangkut panas dari sumber ke permukaan. Manifestasi fluida panas dapat terlihat di permukaan sebagai mata air panas, fumarol, solfatara, atau gunung lumpur. Interaksi fluida hidrotermal dengan batuan menyebabkan perubahan mineralogi (alterasi) yang dipengaruhi oleh suhu, tekanan, komposisi fluida, jenis batuan asal, serta lamanya interaksi. Umumnya, fluida dari reservoir panas bumi berupa air klorida, yang mengandung ion klorida dominan, bersifat netral hingga sedikit asam akibat kandungan CO<sub>2</sub> terlarut (Browne, 1984).

### **2.8.3 Batuan Reservoir**

Reservoir merupakan zona batuan yang menyimpan akumulasi fluida panas bumi. Batuan ini harus memiliki porositas dan permeabilitas tinggi sehingga dapat menampung serta mengalirkan air panas atau uap. Reservoir yang baik memiliki ukuran besar, suhu tinggi, dan kandungan fluida yang mencukupi agar produktif.

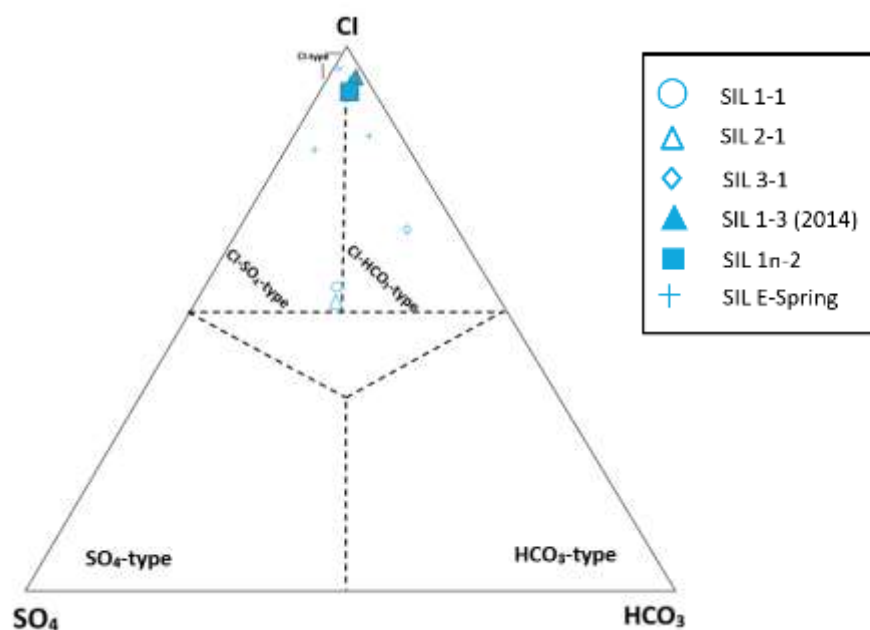
### **2.8.4 Batuan Penudung**

Batuan penudung (*cap rock* atau *clay cap*) adalah lapisan dengan permeabilitas rendah hingga kedap air yang menutupi reservoir. Perannya penting untuk mencegah keluarnya fluida panas ke permukaan secara langsung. Biasanya lapisan ini terbentuk karena proses alterasi hidrotermal intensif, sehingga sifat fisiknya seperti densitas, resistivitas, atau kemagnetan—berubah. lapisan ini dapat terbentuk akibat pengisian mineral-mineral ubahan, misalnya silika atau lempung

### 2.8.5 Permeabilitas

Permeabilitas batuan dapat menurun akibat pengisian atau terbentuknya mineral-mineral hidrotermal, namun proses tektonik berperan dalam membuka kembali rekahan sehingga jalur aliran fluida panas bumi tetap terbentuk sebagai zona permeabel.

### 2.9 Geokimia Daerah Penelitian



Gambar 7. Geokimia daerah penelitian (KESDM, 2017)

Berdasarkan diagram segitiga Cl–SO<sub>4</sub>–HCO<sub>3</sub>, sebagian besar titik data dari manifestasi SIL berada sangat dekat dengan puncak Cl, sehingga fluida di daerah penelitian didominasi oleh air bertipe klorida (*chloride water*) yang umumnya berasal dari reservoir panas bumi. Sebaran titik data yang jauh dari sudut SO<sub>4</sub> menunjukkan bahwa pengaruh air sulfat atau steam-heated water relatif kecil. Selain itu, beberapa titik yang sedikit bergeser menuju bidang Cl–HCO<sub>3</sub> mengindikasikan adanya pencampuran terbatas dengan air meteoritik atau air tanah dangkal, meskipun komposisi fluida tetap didominasi oleh komponen klorida. Kondisi ini menunjukkan bahwa fluida yang muncul di permukaan merepresentasikan fluida reservoir yang naik melalui rekahan atau struktur geologi (KESDM, 2017).

## **2.10 Penelitian Terdahulu**

Beberapa penelitian terdahulu di wilayah Sulawesi dan sekitarnya telah dilakukan untuk menelusuri aspek geologi, tektonik, serta struktur geologi yang berkembang di kawasan tersebut. Hasil dari berbagai studi tersebut menjadi landasan penting dalam memahami evolusi geologi regional serta pengaruhnya terhadap kondisi geologi setempat, termasuk di wilayah Sulawesi Utara yang menjadi fokus penelitian ini.

### **2.10.1 Analisis Potensi *Geothermal* Gunung Sibualbuali Menggunakan Metode *Gravity***

Penelitian oleh Singgih Hidayat, dkk (2023) menerapkan metode gravitasi untuk menelaah struktur bawah permukaan di daerah panas bumi Gunung Sibualbuali, Tapanuli Selatan, menggunakan data satelit TOPEX yang diolah dengan Surfer 13. Hasil analisis menunjukkan nilai anomali Bouguer lengkap antara 64–112 mGal, anomali regional 66–110 mGal, dan anomali residual –0,1 hingga 0,15 mGal. Distribusi anomali tinggi dari barat ke tenggara mengindikasikan keberadaan batuan berdensitas tinggi, yang kemungkinan merupakan basalt. Adanya manifestasi permukaan berupa tanah panas dan fumarol menunjukkan aktivitas hidrotermal, sehingga wilayah ini memiliki potensi panas bumi yang signifikan.

### **2.10.2 Pemetaan Potensi Energi Panas Bumi pada Provinsi Sumatra Utara Berbasis Digital Melalui *Quantum GIS***

Penelitian yang dilakukan oleh Laksono, dkk (2023) bertujuan untuk memberikan informasi spasial mengenai persebaran dan potensi panas bumi di Sumatra Utara. Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, dimana sekitar 40% potensi panas bumi di dunia berada di Indonesia, namun pemanfaatannya masih kurang optimal. Melalui metode *Systematic Literature Review* dan pemetaan menggunakan *Quantum GIS*, peneliti mengolah data lokasi yang masih berstatus prospek untuk kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta tematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah dengan potensi terbesar berada di Kabupaten Tapanuli Selatan pada Gunung Sibual buali dengan total kapasitas  $\pm 1.046$  MW, disusul Kabupaten

Mandailing dengan kapasitas  $\pm 240$  MW, sementara daerah lain seperti Samosir, Tapanuli Utara, Padang Lawas, Simalungun, dan Karo memiliki potensi yang tergolong sedang hingga rendah. Penelitian ini menegaskan bahwa potensi energi panas bumi di Sumatra Utara sangat menjanjikan untuk dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan, sehingga dapat mendukung pengurangan ketergantungan pada energi fosil sekaligus menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi di masa mendatang.

### **2.10.3 Magmatisme, Sumberdaya Mineral dan Energi di Tapanuli Selatan– Sumatra Utara**

Penelitian oleh Sulistyawan dan Harahap bertujuan untuk menganalisis keterkaitan antara aktivitas magmatisme dengan potensi sumber daya mineral dan energi di wilayah Tapanuli Selatan, khususnya sekitar Gunung Sibual buali. Kajian ini dilakukan melalui pengamatan geologi lapangan yang didukung analisis geokimia menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) terhadap 14 sampel batuan untuk mengidentifikasi kandungan unsur utama dan jejak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses magmatisme yang terjadi sejak Zaman Tersier hingga Kuartar Awal di kawasan ini berperan besar dalam pembentukan berbagai jenis sumber daya geologi. Aktivitas magmatisme tersebut berkaitan erat dengan subduksi Lempeng Samudra India–Australia di bawah Pulau Sumatra, yang menghasilkan batuan dengan afinitas kalk-alkali seperti granit, granodiorit, andesit, dan riolit, serta memicu terbentuknya mineralisasi logam seperti emas, tembaga (Cu), timbal (Pb), dan seng (Zn) yang tersebar di daerah Batang Toru, Sayurmatangi, dan Sibuhuan. Selain itu, produk vulkanik dari Gunung Sibualbuali menghasilkan material berupa zeolit, kaolin, andesit, dan tras, yang menjadi indikasi adanya aktivitas hidrotermal di bawah permukaan. Penelitian ini juga mengidentifikasi potensi energi panas bumi di daerah Sipirok yang berhubungan langsung dengan aktivitas vulkanik Gunung Sibualbuali berumur Plistosen–Holosen, serta menemukan adanya sumber daya hidrokarbon dan batubara pada Formasi Sihapas dan Formasi Barus yang terbentuk akibat proses magmatisme dan sedimentasi pasca-vulkanik. Dengan demikian, penelitian ini

menyimpulkan bahwa aktivitas magmatisme di wilayah Tapanuli Selatan, terutama yang berkaitan dengan Gunung Sibualbuali, memiliki peranan penting dalam pembentukan dan distribusi sumber daya mineral, energi panas bumi, serta bahan tambang strategis lainnya, yang menjadikan kawasan ini salah satu wilayah dengan potensi geologi dan energi paling signifikan di Sumatra Utara.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Metode Gaya Berat

Metode gaya berat merupakan metode yang memanfaatkan variasi medan gravitasi bumi untuk mengidentifikasi beda densitas batuan di bawah permukaan. Prinsip dasarnya adalah setiap massa batuan memiliki gaya tarik gravitasi sebanding dengan massa dan berkurang dengan kuadrat jarak. Variasi distribusi densitas batuan menyebabkan anomali gaya berat yang dapat diukur di permukaan bumi menggunakan gravimeter (Telford, dkk., 1990). Nilai anomali ini kemudian dikoreksi melalui beberapa tahapan, seperti koreksi lintang, udara bebas, dan bouguer, untuk mendapatkan anomali Bouguer lengkap yang merepresentasikan variasi densitas bawah permukaan. Analisis data gaya berat memungkinkan identifikasi struktur geologi seperti sesar, lipatan, intrusi batuan beku, cekungan sedimen, hingga sistem panas bumi. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam eksplorasi geologi dan geofisika, termasuk untuk eksplorasi sumber daya energi maupun pemetaan struktur regional (Kearey, dkk., 2002).

#### 3.2 Konsep Gaya berat

##### 3.2.1 Gaya berat Newton

Metode gaya berat berdasarkan prinsip hukum Newton, menjelaskan adanya gaya tarik antara dua massa, yaitu  $m_1$  dan  $m_2$  terpisah sejauh  $r$ , dapat dirumuskan sebagai berikut (Serway dan Jewett, 2009).

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

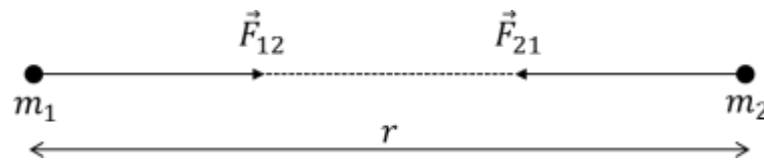
Dimana:

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

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

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

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



Gambar 8. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009)

### 3.2.2 Percepatan Gaya berat

Newton menjelaskan hubungan antara gaya dan percepatan dijelaskan melalui Hukum Kedua Newton. Hukum ini menyatakan bahwa gaya yang bekerja pada suatu objek sebanding dengan massa objek tersebut dan percepatan yang dialaminya, termasuk percepatan yang disebabkan oleh gaya gravitasi bumi.

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

Percepatan benda bermassa  $m_2$  akibat gaya tarik dari massa  $m_1$  pada jarak  $r$  dapat dinyatakan sebagai:

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

Dengan mensubstitusikan persamaan (1) ke dalam persamaan (2), serta menyatakan massa  $m$  sebagai  $m_2$  dan massa pada persamaan (1) sebagai  $m_1$  dan  $M$  diperoleh bentuk persamaan percepatan gravitasi sebagai berikut:

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

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

Keterangan pada persamaan tersebut adalah sebagai berikut dimana  $\vec{g}$  merupakan medan gaya berat bumi ( $\text{m/s}^2$ ),  $M$  adalah massa bumi (kg), dan  $m$  menyatakan massa benda (kg). Selanjutnya,  $\vec{F}$  merupakan gaya berat (N),  $r$  adalah jari-jari bumi (km), serta  $\hat{r}$  menunjukkan vektor satuan arah.

Berdasarkan persamaan (5), percepatan gravitasi rata-rata di permukaan bumi umumnya berkisar antara 9,6 hingga 10 m/s<sup>2</sup>. Besaran ini pertama kali diperkenalkan oleh Galileo, sehingga sebagai bentuk penghargaan, selain menggunakan satuan dalam sistem MKS (m/s<sup>2</sup>) dan CGS (cm/s<sup>2</sup>), juga dikenal satuan gal dan mGal. Konversi antar satuan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

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

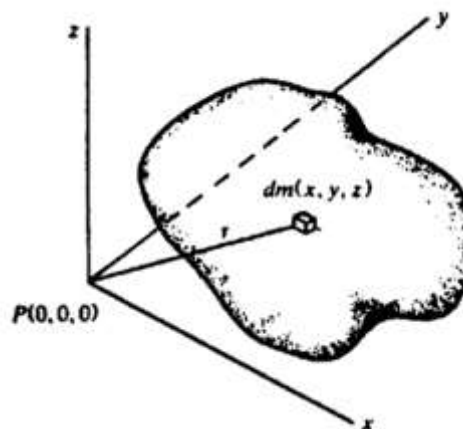
$$1 \text{ mGall} = 10^{-3} \text{ Gall}$$

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

$$1 \text{ mGall} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ (g.u. merupakan gaya berat unit)}$$

### 3.2.3 Potensial Gaya berat

Potensial gaya berat adalah bentuk energi yang muncul akibat keberadaan suatu massa di dalam medan gravitasi. Setiap objek yang memiliki massa akan membangkitkan medan potensial di lingkungan sekitarnya. Karakter medan ini bersifat konservatif, sehingga nilai usaha yang terjadi hanya ditentukan oleh perbedaan posisi awal dan akhir, tanpa dipengaruhi oleh jalur yang dilalui (Rosid, 2005).



Gambar 9. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Telford dkk, 1990)

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

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

Medan gaya berat yang dihasilkan dari rapat massa tersebut dapat diperoleh dengan melakukan diferensiasi persamaan (8) terhadap sumbu x, y, dan z, sehingga menghasilkan:

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

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

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

Berdasarkan persamaan (8), didapati variasi nilai medan gaya berat ( $\Delta g$ ) di permukaan bumi. Besaran ini dipengaruhi dari distribusi massa di bawah permukaan, yang direpresentasikan melalui fungsi densitas. Selain itu, bentuk permukaan bumi yang sesungguhnya dimasukkan ke dalam perhitungan melalui batas integral pada persamaan tersebut (Sarkowi, 2007).

### 3.2.4 Rapat Massa Batuan

Densitas atau rapat massa batuan termasuk salah satu parameter fisik yang memiliki peran penting dalam metode gaya berat. Penentuan densitas rata-rata di wilayah penelitian menjadi sangat krusial, khususnya saat menghitung anomali Bouguer. Besarnya densitas batuan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti komposisi mineral penyusunnya, adanya fluida dalam pori-pori, tingkat porositas, serta proses pepadatan akibat tekanan dan pelapukan yang dialami batuan tersebut (Brotopuspito, 2001). Variasi nilai densitas batuan menurut (Telford dkk, 1990) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai densitas batuan (Telford, dkk., 1990)

<b>Jenis Batuan</b>	<b>Rentang Densitas (g/cc)</b>	<b>Rata-rata (g/cc)</b>
<i>Clay</i>	1,63-2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	2,00
<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>Rhyolite</i>	2,35-2,70	2,52
<i>Andesit</i>	2,40-2,80	2,61
<i>Granite</i>	2,50-2,81	2,64
<i>Granodiorite</i>	2,67-2,79	2,73
<i>Porphyry</i>	2,60-2,89	2,74
<i>Quartz diorite</i>	2,62-2,96	2,79
<i>Diorite</i>	2,72-2,99	2,85
<i>Lavas</i>	2,80-3,00	2,90
<i>Diabase</i>	2,50-3,20	2,91
<i>Basalt</i>	2,70-3,30	2,99
<i>Syenite</i>	2,60-2,95	2,77
<i>Acid igneous</i>	2,30-3,11	2,61
<i>Basic igneous</i>	2,09-3,17	2,79
<i>Quartzite</i>	2,50-2,70	2,60
<i>Schists</i>	2,39-2,90	2,64
<i>Graywacke</i>	2,60-2,70	2,65
<i>Marble</i>	2,60-2,90	2,75
<i>Serpentine</i>	2,40-3,10	2,78
<i>Phylite</i>	2,68-2,80	2,74
<i>Granulite</i>	2,52-2,70	2,65

### 3.3 Koreksi dalam Metode Gaya berat

Pengolahan data gaya berat memerlukan serangkaian tahapan koreksi guna mengurangi pengaruh gangguan atau *noise* yang dapat memengaruhi hasil

pengukuran. Oleh karena itu, dilakukan beberapa jenis koreksi untuk memperoleh nilai anomali yang lebih akurat, di antaranya sebagai berikut:

### 3.3.1 Perhitungan Gaya berat

Gaya berat observasi didefinisikan sebagai nilai gaya berat yang terukur pada periode tertentu, dimana besarnya dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain posisi serta elevasi titik pengamatan, kondisi struktur, dan densitas batuan di bawah permukaan. Secara umum, nilai gaya berat memiliki hubungan terbalik dengan topografi, wilayah yang lebih rendah cenderung menunjukkan nilai gaya berat observasi yang lebih besar, sedangkan wilayah yang lebih tinggi akan memperlihatkan nilai gaya berat observasi yang lebih kecil (Setiadi, dkk., 2018).

### 3.3.2 Koreksi Lintang (*Latitudo Correction*)

Koreksi lintang diterapkan untuk menyesuaikan bentuk bumi yang tidak sempurna, yaitu pepat di kutub dan mengembang di khatulistiwa. Perbedaan jari-jari bumi ini menyebabkan variasi nilai gravitasi, di mana gaya berat di kutub lebih besar dibandingkan di khatulistiwa. Oleh karena itu, koreksi lintang diperlukan agar data menjadi lebih akurat. Nilai koreksi lintang ( $\theta$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Blakely, 1996).

$$g(\theta) = 978032,7(1 + 0,0053024\sin^2\theta - 0,0000058\sin^22\theta) \quad (10)$$

Keterangan:

$g(\theta)$  : Percepatan gaya berat pada lintang  $\theta$  (dalam  $\text{m/s}^2$ )

$g_0$  : Percepatan gaya berat standar pada ekuator ( $978032,7 \text{ m/s}^2$ )

$\theta$  : Lintang geografis (dalam radian)

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

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

Nilai percepatan gravitasi diperoleh dari pengukuran di ketinggian tertentu di atas permukaan laut rata-rata (*mean sea level*) umumnya lebih kecil dibandingkan nilai

sebenarnya. Kondisi ini menyebabkan perlunya dilakukan penyesuaian terhadap data hasil pengukuran. Salah satu bentuk penyesuaian tersebut adalah koreksi udara bebas, yang bertujuan untuk mengoreksi nilai gravitasi agar mendekati nilai absolut di lokasi pengamatan (Syamsuriadi, 2013). Secara matematis, perhitungan koreksi ini, sebagaimana dijelaskan oleh Brotopuspito (2001), dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Dimana:

$FAC$  : *Free Air Correction* (Koreksi Udara Bebas)

0,3086 : Konstanta konversi dari perubahan gaya berat per meter ketinggian (dalam mGal/m)

$h$  : Ketinggian (m)

Nilai anomali udara bebas (*free air anomaly*) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

Dimana:

$FAA$  : *Free Air Anomaly* (Anomali Udara Bebas)

$g_{obs}$  : Gravitasi Observasi

### 3.3.4 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi ini dilakukan untuk meminimalkan pengaruh massa batuan yang terletak antara titik pengukuran dan bidang referensi, sehingga nilai gravitasi yang diperoleh lebih mencerminkan kondisi sebenarnya. Besarnya koreksi ini dapat dihitung menggunakan persamaan tertentu.

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

Karena  $2\pi G = 0,04191$  maka (Brotopuspito, 2001),

$$BC = 0,04191\rho h \quad (14)$$

Dimana  $BC$  merupakan *Bouguer Correction* atau koreksi Bouguer dengan satuan mGal/m,  $G$  adalah konstanta gravitasi sebesar  $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$ ,  $\rho$  menyatakan

rapat massa batuan rata-rata sebesar 2,67 gr/cm<sup>3</sup>, dan  $h$  adalah ketinggian yang dinyatakan dalam meter.

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

Koreksi medan diterapkan untuk memperhitungkan pengaruh distribusi massa yang tidak merata di sekitar titik pengukuran. Pada koreksi Bouguer, titik pengamatan diasumsikan berada pada bidang datar yang luas dan homogen, namun kondisi nyata di lapangan sering berbeda akibat variasi topografi, seperti bukit atau pegunungan. Jika hanya menggunakan koreksi Bouguer, hasil pengukuran bisa kurang akurat karena material di sekitar titik pengamatan, baik di atas maupun di bawah permukaan, memengaruhi nilai gaya berat. Oleh karena itu, koreksi topografi menjadi penting, terutama di wilayah dengan relief yang kompleks, sementara pada daerah yang relatif datar, koreksi medan dapat diabaikan. Persamaan untuk koreksi medan diberikan sebagai berikut:

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

Dimana:

$g$  : Respons gaya berat (mGal)

$n$  : Jumlah kompartemen tiap zona

$\rho$  : Densitas (g/cc)

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

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

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

Perhitungan koreksi medan dapat dilakukan menggunakan alat bantu berupa pelat transparan yang dikenal sebagai *Hammer Chart*, yang diletakkan di atas peta topografi. Alat ini membagi area di sekitar titik pengukuran ke dalam beberapa zona berbentuk silinder konsentris.

### 3.3.6 Anomali bouguer lengkap

Berdasarkan Hinze (2013), anomali Bouguer lengkap dapat dipahami sebagai selisih antara nilai gravitasi hasil observasi dengan nilai teoritis yang dihitung pada lokasi yang sama. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi densitas batuan dibandingkan dengan lingkungan sekitarnya, baik secara vertikal maupun lateral. Pola anomali Bouguer mencerminkan perubahan densitas lateral, di mana anomali positif muncul apabila terdapat material berdensitas tinggi yang berada dalam medium dengan densitas lebih rendah. Sebaliknya, anomali negatif dihasilkan oleh keberadaan material berdensitas rendah yang berada di dalam lingkungan dengan densitas yang lebih besar (Reynolds, 1997).

Anomali Bouguer dimanfaatkan untuk merepresentasikan variasi medan gravitasi yang berkaitan dengan kondisi bawah permukaan, khususnya akibat perbedaan densitas batuan. Oleh karena itu, besaran anomali Bouguer dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Brotopuspito, 2001):

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

Dimana:

$g_{obs}$  : Harga gaya berat pengukuran di titik tersebut

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

$BC$  : *Bouguer Correction*/ koreksi Bouguer

$TC$  : *Terrain Correction*/ koreksi medan

### 3.4 Analisis Spektrum

Metode analisis spektrum diterapkan untuk memperkirakan kedalaman sumber anomali gravitasi di bawah permukaan. Teknik ini bekerja dengan menggunakan transformasi *Fourier* untuk mentransformasikan data dari domain ruang ke dalam domain frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1996). Selain itu, analisis spektrum juga berperan dalam memisahkan komponen anomali Bouguer menjadi regional dan residual pada daerah penelitian. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan ukuran jendela yang optimal pada proses filtering data gaya berat.

Transformasi *Fourier* bekerja dengan menguraikan suatu gelombang menjadi komponen gelombang sinus dengan berbagai frekuensi, di mana penjumlahan seluruh komponen tersebut akan membentuk kembali sinyal aslinya (Kadir, 2000). Spektrum yang didapat berasal dari nilai potensial pada suatu bidang horizontal. Secara matematis, transformasi *Fourier* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Blakely, 1996):

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (17)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (18)$$

Dimana:

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

$U$  : potensial gaya berat

$\Delta\rho$  : anomali densitas

$G$  : konstanta gaya berat

$\gamma$  : jarak

Dari kedua persamaan tersebut, diperoleh hasil sebagai berikut:

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi\gamma\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (19)$$

Transformasi Fourier anomali gaya berat pada lintasan yakni:

$$F(g_z) = 1G\Delta\rho F\left(\frac{\partial 1}{\partial z r}\right) \quad (20)$$

$$F(g_z) = G\Delta\rho \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (21)$$

$$F(g_z) = 2\pi G\Delta\rho e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (22)$$

Dimana:

$g_z$  : Anomali gaya berat

$k$  : Bilangan gelombang

$z_0$  : Ketinggian titik amat

$z_1$  : Kedalaman benda anomali

Jika distribusi densitas bersifat acak dan tidak menunjukkan adanya hubungan antara nilai-nilai gaya berat, maka nilai  $\mu = 1$ . Dalam kondisi ini, hasil transformasi Fourier dari anomali gaya berat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = Ce^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (23)$$

Dimana:

$A$  : Amplitudo

$C$  : Konstanta

Relasi antara amplitudo ( $A$ ), bilangan gelombang ( $k$ ), dan kedalaman ( $z_0 - z_1$ ) dapat diperoleh dengan melakukan transformasi logaritmik terhadap persamaan (23). Melalui proses ini, diperoleh bahwa bilangan gelombang ( $k$ ) memiliki hubungan linier dengan amplitudo spektral.

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (24)$$

Pada tersebut dapat ditafsirkan ke dalam bentuk persamaan garis lurus berikut:

$$y = mx + c \quad (25)$$

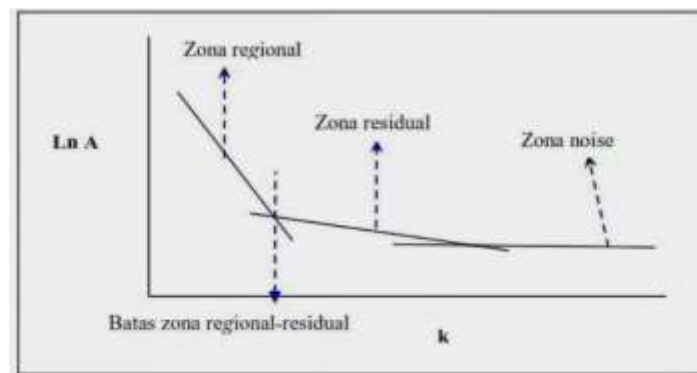
Dalam hubungan ini,  $\ln A$  ditempatkan sebagai sumbu  $y$ , sedangkan  $|k|$  sebagai sumbu  $x$ , dengan  $(z_0 - z_1)$  merepresentasikan gradien garis. Nilai gradien tersebut digunakan untuk estimasi kedalaman sumber anomali, baik bersifat dangkal atau dalam. Bilangan gelombang  $|k|$  dinyatakan sebagai  $2\pi/\lambda$  dengan satuan *cycle/meter*, di mana  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Estimasi kedalaman dapat dilakukan melalui grafik hubungan antara  $\ln A$  dan  $k$  (Gambar 10). Selain itu, keterkaitan antara panjang gelombang ( $\lambda$ ) dan interval data ( $\Delta x$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{k \Delta x} \quad (26)$$

Panjang gelombang  $\lambda$  sebanding dengan interval pengukuran  $\Delta x$ , namun terdapat faktor tambahan yang disebut konstanta pengali. Dengan demikian,  $\lambda = N\Delta x$  di mana konstanta  $N$  merepresentasikan lebar jendela. Oleh karena itu, lebar jendela dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$N = \frac{2\pi}{k_c} \quad (27)$$

Dimana  $\Delta x$  merupakan interval data yang dipakai dalam transformasi *Fourier*, sedangkan  $k_c$  merupakan bilangan gelombang *cutoff*. Semakin besar nilai  $k$ , semakin tinggi frekuensinya. Hubungan antara bilangan gelombang  $k$  dan frekuensi  $f$  dinyatakan dengan persamaan  $k = 2\pi f$ . Frekuensi rendah biasanya berasal dari sumber anomali regional, sedangkan frekuensi tinggi berhubungan dengan anomali residual, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kurva  $\ln A$  terhadap  $k$  (Blakely, 1996)

### 3.5 Filter *Upward Continuation*

Metode *Upward Continuation* umumnya diterapkan pada pengukuran gaya berat di medan datar atau *land survey*. Prinsip metode ini adalah “mengangkat” bidang pengukuran ke ketinggian tertentu ( $h$ ) untuk menonjolkan komponen anomali regional sekaligus mengurangi pengaruh *noise* dan efek anomali residual. Dengan cara mengurangi anomali regional dari anomali Bouguer, diperoleh anomali residual yang secara khusus merepresentasikan variasi lokal di wilayah pengukuran. Anomali residual ini berguna untuk menyoroti struktur atau fitur bawah permukaan yang berskala lebih kecil (Indrawati dkk., 2020).

Prinsip ini yang mendasari konsep *upward continuation* seperti pada persamaan berikut:

$$U(x', y', z_0 - h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\frac{h}{2\pi}}{\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2\}^{\frac{3}{2}}} U(x, y, z_0) dx dy \quad (28)$$

Di mana  $U(x', y', z_0 - h)$  menyatakan medan potensial total pada bidang hasil *upward continuation* yang berada pada ketinggian  $h$  di atas bidang pengukuran awal, dengan nilai medan awal  $U(x, y, z_0)$  telah diketahui. Metode *Upward Continuation* digunakan untuk mentransformasikan medan potensial dari suatu permukaan pengamatan ke permukaan lain yang posisinya lebih jauh dari sumber anomali. Proses ini menyebabkan penurunan amplitudo anomali, terutama pada komponen dengan panjang gelombang pendek, sehingga pengaruh sumber dangkal menjadi melemah, sementara kontribusi dari sumber yang lebih dalam tampak lebih dominan (Indrawati dkk., 2020).

### 3.6 First Horizontal Derivative (FHD)

*First Horizontal Derivative* (FHD) pada anomali gaya berat menunjukkan perubahan nilai gravitasi secara lateral antar titik dalam jarak tertentu. Turunan horizontal ini mampu menonjolkan bagian tepi suatu bodi, sehingga efektif digunakan untuk mengidentifikasi batas kontras densitas secara horizontal (Cordell & Grauch, 1982). Selain itu, metode ini juga berguna dalam interpretasi struktur bawah permukaan, baik pada kedalaman dangkal maupun lebih dalam. Nilai FHD dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Blakely, 1996):

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (29)$$

Dengan  $\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)$  merupakan turunan pertama anomaly gaya berat terhadap  $x$  dan  $\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)$  merupakan turunan pertama anomaly gaya berat terhadap  $y$ .

### 3.7 Second Vertical Derivative (SVD)

Metode SVD dimanfaatkan untuk memperjelas respon struktur dangkal dengan cara mengurangi pengaruh anomali regional, sehingga lebih efektif dalam mendeteksi anomali yang berkaitan dengan kondisi bawah permukaan. Secara konseptual, metode ini merupakan turunan dari persamaan *Laplace* yang diterapkan pada anomali gaya berat di permukaan, dan dapat dinyatakan dalam bentuk berikut:

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

atau :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (31)$$

sehingga SVD nya diberikan oleh :

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

Sebagai persamaan data 1D atau (data penampang) maka perumusannya adalah sebagai berikut :

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

Nilai nol pada turunan kedua anomali Bouguer menunjukkan batas antara lapisan batuan dengan perbedaan densitas, yang sering mengindikasikan adanya sesar atau intrusi (Sarkowi, 2010). Perhitungan SVD dilakukan menggunakan berbagai operator filter 2D, seperti yang disajikan pada Tabel 2, 3, dan 4.

Tabel 2. Operator henderson dan zietz (1949)

<b>Operator Filter SVD menurut Henderson dan 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	-0,083
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000

Tabel 3. 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 4. 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	0,0416
0,0000	-0,7500	4,0000	-0,7500	0,0000
0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	0,0416
0,0000	-0,0416	0,0000	0,0416	0,0000

### **3.8 Inverse modeling**

Pemodelan *inverse* atau inversi merupakan metode interpretasi yang bekerja secara otomatis untuk menyesuaikan data hasil perhitungan dengan data observasi. Dalam pendekatan ini, satu atau beberapa parameter model ditentukan langsung dari data pengamatan sehingga diperoleh respons yang sesuai. Oleh sebab itu, pemodelan *inverse* dikenal sebagai proses *data fitting*, karena berfokus pada penentuan parameter model yang menghasilkan respons paling mendekati data observasi (Grandis, 2009).

Tingkat kesesuaian antar respon model dan data observasi biasanya melalui sebuah fungsi objektif yang harus diminimalkan. Upaya meminimalkan fungsi objektif ini berkaitan dengan pencarian model yang paling optimum. Dengan kata lain, karakteristik minimum dari fungsi tersebut dimanfaatkan dalam menentukan parameter model. Secara umum, *inverse modelling* dilakukan dengan cara memodifikasi model secara bertahap hingga respon yang dihasilkan mampu menyesuaikan data observasi (Sarkowi, 2014).

## IV. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian ini adalah sebagai berikut:

Waktu : Oktober 2025 s.d. April 2026

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG),  
Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung

Alamat : Laboratorium Jurusan Teknik Geofisika Lt. 3 – Jl.  
Brojonegoro No. 1 Rajabasa, Gedung Meneng, Kec Rajabasa, Kota  
Bandar Lampung, Lampung 35142

### 4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sebagai berikut:

Tabel 5. Alat dan bahan

No	Alat dan bahan	Fungsi
1	Data GGMPPlus	Data yang digunakan dalam proses pengolahan penelitian.
2	<i>Softfile</i> Peta Lembar Geologi	Referensi Geologi Daerah Penelitian dan Korelasi terhadap SVD.
3	Laptop	<i>Hardware</i> yang digunakan dalam pengolahan data.
4	<i>Software</i> ArcMap 10.4	Berfungsi sebagai mengolah dan menampilkan data spasial dalam bentuk peta yang digunakan dalam penelitian.

5	<i>Microsoft Excel</i>	Berfungsi untuk membuat grafik hubungan dari amplitude sumbu $x$ terhadap bilangan gelombang ( $k$ ) yang digunakan untuk menentukan nilai dari regional, residual, dan <i>noise</i> .
6	<i>Software Oasis Montaj</i>	Dalam penelitian ini digunakan untuk melakukan pengolahan Data Gaya berat dan menghitung nilai koreksi medan serta melakukan <i>grid</i> data.
7	<i>Software Grablox</i>	pemodelan 3D data Gaya berat guna merepresentasikan bentuk serta kedalaman struktur bawah permukaan secara detail.

---

### 4.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang diterapkan dalam Tugas Akhir ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 4.3.1 Studi Literatur

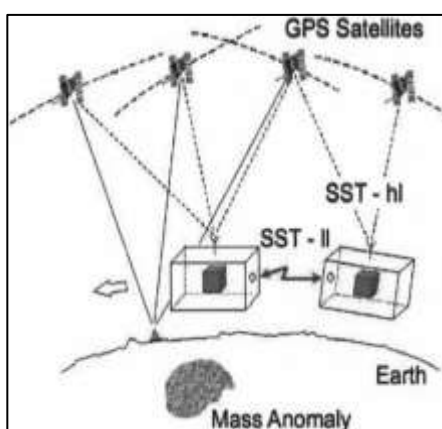
Tahapan awal penelitian setelah penentuan topik adalah melakukan studi literatur yang bertujuan untuk memahami dasar teori sebagai landasan penelitian. Pada penelitian ini, studi literatur dilakukan dengan mengkaji berbagai referensi, seperti buku, jurnal ilmiah, skripsi, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan identifikasi struktur dan analisis bawah permukaan pada prospek panas bumi.

#### 4.3.2 Data GGMPPlus

GGMPPlus (*Global Gravity Model Plus*) merupakan model gravitasi resolusi tinggi berbasis satelit yang dikembangkan melalui integrasi berbagai sumber data gravitasi global. Model ini memadukan data pelacakan satelit dari misi GRACE, GOCE, serta model geopotensial global seperti EGM2008, kemudian disempurnakan menggunakan informasi topografi resolusi tinggi dari SRTM untuk meningkatkan detail spasialnya (Hirt dkk., 2013).

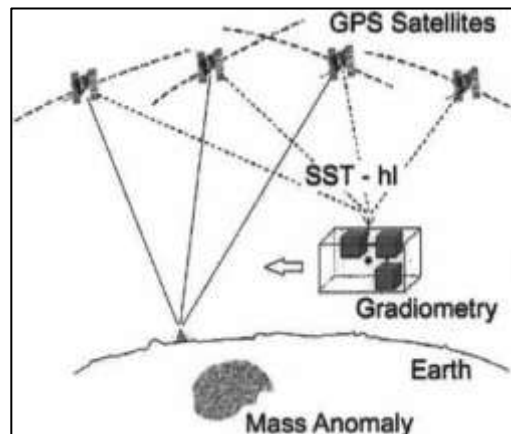
GGMPlus dikembangkan melalui kerja sama antara Universitas Curtin dan Universitas Teknik Munich. Model ini menyediakan berbagai turunan dari medan gravitasi, termasuk variasi gravitasi, percepatan gravitasi, arah defleksi vertikal ke utara–selatan dan barat–timur, serta bentuk permukaan quasigeoid. Dibandingkan dengan model gravitasi satelit sebelumnya, seperti TOPEX maupun kompilasi data BGI, GGMPlus memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi, dengan ukuran *grid* sekitar  $7,2 \text{ arc-second}$  atau setara  $\pm 220$  meter di wilayah ekuator (Hirt dkk., 2013).

Prinsip pengukuran medan gravitasi pada model ini mengacu pada data misi satelit GRACE dan GOCE yang menggunakan teknik *Satellite-to-Satellite Tracking* (SST). Metode ini mendeteksi variasi medan gravitasi bumi melalui perubahan posisi dan percepatan satelit akibat anomali massa di bawahnya (Floberghagen dkk., 2011). Satelit GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) terdiri atas dua satelit identik yang mengorbit bumi pada lintasan yang sama dengan jarak sekitar 220 km. Perubahan medan gravitasi bumi diukur melalui variasi jarak antar kedua satelit yang dipantau secara presisi menggunakan sistem gelombang mikro seperti Gambar 11. Ketika satelit terdepan melewati wilayah dengan massa lebih besar (anomali positif), satelit tersebut mengalami percepatan lebih dahulu sehingga jarak antar satelit berubah. Perubahan jarak inilah yang kemudian dikonversi menjadi informasi variasi medan gravitasi (Tapley dkk., 2004).



Gambar 11. Ilustrasi cara kerja satelit GRACE (Johannessen dkk., 2003)

Berbeda dengan GRACE, satelit GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) melakukan pengukuran medan gravitasi bumi menggunakan instrumen gradiometer Pada Gambar 12. Instrumen ini tersusun atas tiga pasang akselerometer identik yang dipasang pada tiga sumbu ortogonal, sehingga memungkinkan pengamatan simultan terhadap enam komponen independen tensor gradien gravitasi. Prinsip pengukurannya didasarkan pada deteksi perbedaan percepatan gravitasi yang terjadi di dalam badan satelit. Variasi sinyal yang terekam merepresentasikan perubahan gaya tarik gravitasi akibat distribusi massa di bawah permukaan bumi, seperti keberadaan pegunungan, lembah, zona subduksi, serta ketidakseragaman struktur mantel (Drinkwater dkk., 2003).



Gambar 12. Ilustrasi cara kerja satelit GOCE (Johannessen dkk., 2003)

#### 4.3.3 Anomali bouguer lengkap

Data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini diperoleh dari gravitasi satelit GGMPlus diperoleh melalui situs resmi *Bureau Gravimetrique International* (BGI) pada laman <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/grids-andmodels/modele-global-GGMPlus2013/> (BGI, 2013).

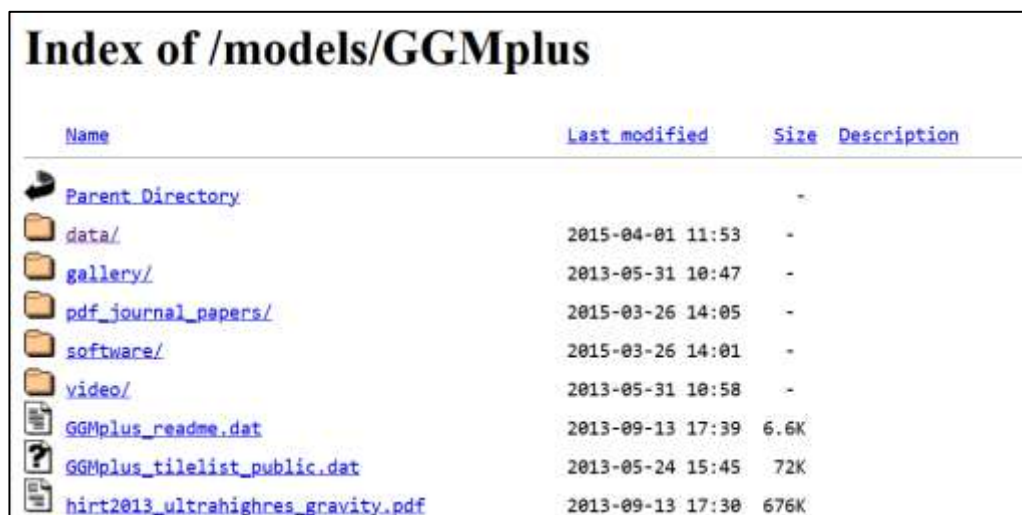
Model GGMPlus menyediakan beberapa jenis parameter. Namun, dalam penelitian ini parameter yang dimanfaatkan adalah data *gravity acceleration* dan data topografi. Selanjutnya, dilakukan proses ekstraksi data yang disesuaikan dengan batas wilayah penelitian.

Data yang tersedia pada situs GGMPPlus mencakup wilayah global dan telah dibagi ke dalam beberapa segmen area (Gambar 15). Oleh karena itu, diperlukan informasi batas koordinat lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*) secara tepat agar proses pengunduhan dan pemotongan data sesuai dengan cakupan area penelitian.



The screenshot shows the BGI website interface. At the top left is the BGI logo. The navigation menu includes 'ABOUT US', 'DATA & PRODUCTS', 'ACTIVITIES & PROJECTS', and 'PUBLICATION'. The main content area is titled 'GGMPPLUS2013 GLOBAL MODEL'. On the left, there is a 'TABLE OF CONTENT' with links for 'Download page', 'Summary', and 'Examples'. The main content area has a 'Download page' link and a 'Summary' section. The summary text describes GGMPPlus as a composite of GRACE and GOCE satellite gravity, EGM2008, and topographic gravity effects. It also mentions a research initiative involving Curtin University and the Technical University of Munich. A reference is provided at the bottom: 'For details see: Hirt, C., S.J. Claessens, T. Fecher, M. Kuhn, R. Pai, M. Rexer (2013) New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field, Geophysical Research Letters, Vol40(16), 4279-4283, doi: 10.1002/rgl.50838.'

Gambar 13. Situs *bureau gravimetrique international*



The screenshot shows a directory listing for '/models/GGMplus'. The listing includes a table with columns for Name, Last modified, Size, and Description. The entries are as follows:

Name	Last modified	Size	Description
<a href="#">Parent Directory</a>		-	
<a href="#">data/</a>	2015-04-01 11:53	-	
<a href="#">gallery/</a>	2013-05-31 10:47	-	
<a href="#">pdf_journal_papers/</a>	2015-03-26 14:05	-	
<a href="#">software/</a>	2015-03-26 14:01	-	
<a href="#">video/</a>	2013-05-31 10:58	-	
<a href="#">GGMplus_readme.dat</a>	2013-09-13 17:39	6.6K	
<a href="#">GGMplus_tilelist_public.dat</a>	2013-05-24 15:45	72K	
<a href="#">hirt2013_ultrahighres_gravity.pdf</a>	2013-09-13 17:30	676K	

Gambar 14. Data – data pada GGMPPlus

?	N00E045.dg	2013-05-24 07:14	12M
	N00E045.dg.png	2013-05-24 07:14	215K
?	N00E070.dg	2013-05-24 07:14	12M
	N00E070.dg.png	2013-05-24 07:14	161K
?	N00E095.dg	2013-05-24 07:15	12M
	N00E095.dg.png	2013-05-24 07:15	726K
	N00E100.dg	2013-05-24 07:15	12M
	N00E100.dg.png	2013-05-24 07:15	859K
?	N00E105.dg	2013-05-24 07:15	12M
	N00E105.dg.png	2013-05-24 07:15	258K
	N00E110.dg	2013-05-24 07:16	12M
	N00E110.dg.png	2013-05-24 07:16	1.2M

Gambar 15. Data *gravity accelerations* GGMPPlus per luasan area

Dalam penelitian ini, file *gravity acceleration* (GA) yang dipakai ialah file N00E095.ga, karena wilayah penelitian berada di rentang koordinat *latitude* 1,411118 hingga 1,624345 dan *longitude* 99,149365 hingga 99,344839, yang termasuk dalam cakupan grid N00E095. Selanjutnya, dilakukan proses ekstraksi data menggunakan *Software* MATLAB. Proses ini bertujuan untuk memperoleh data *gravity acceleration* dan topografi sesuai dengan batas koordinat daerah penelitian. Ekstraksi dilakukan dengan memanfaatkan *script* pada situs resmi GGMPPlus sehingga data yang diperoleh terbatas pada area penelitian yang telah ditentukan.

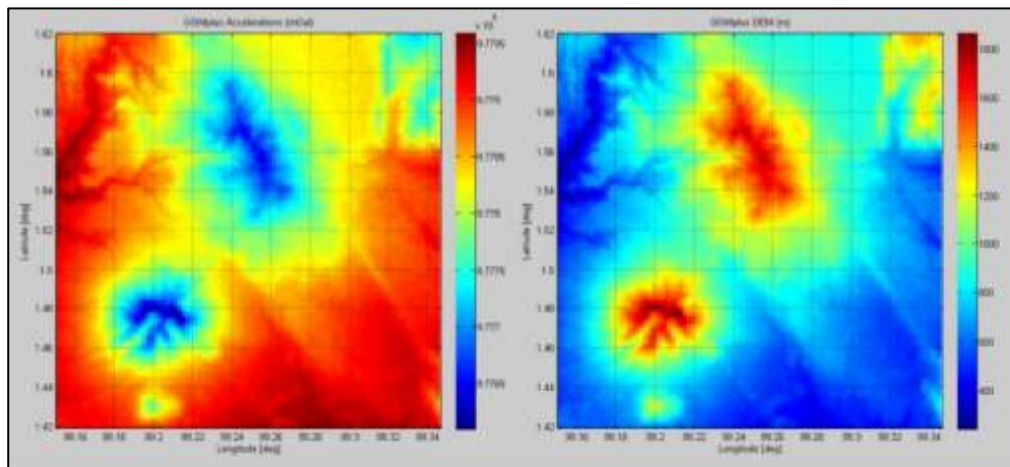
```

17 % INPUT SELECTION
18 %
19 %
20 % Insert path where GGPlus files are located
21 pathGGPlus = 'D:\matlab\2013\GGPlus\AS2013v_4';
22
23 % Choose an data value for points where GGPlus is unavailable
24 %> = RAW, %>= provides best results for plotting
25
26 % Define desired target area
27 lon1 = 99.893798; % Longitude of western edge (negative for western hemisphere)
28 lon2 = 99.344839; % Longitude of eastern edge (negative for western hemisphere)
29 lat1 = 1.234188; % geodetic latitude of southern edge (negative for southern hemisphere)
30 lat2 = 1.624329; % geodetic latitude of northern edge (negative for southern hemisphere)
31
32 % NB! In this example, the files H02010.ruffin are assumed to be available
33 % at the following locations
34 % 'E:\GGPlus\data\g\H02010.dg' (gravity disturbances)
35 % 'E:\GGPlus\data\g\H02010.ga' (gravity accelerations)
36 % 'E:\GGPlus\data\g\H02010.sl' (DS Dots)
37 % 'E:\GGPlus\data\g\H02010.eta' (DS Dots)
38 % 'E:\GGPlus\data\g\H02010.ha' (quasi-pole)
39
40 % Factor applied on GGPlus basis resolution of 0.002 deg
41 % Use fact=fac=1 to extract GGPlus data over target area "without"
42 % interpolation.
43 % Use fact=fac=2 to downsample GGPlus data by factor 2 using the
44 % interpolation method specified below. Other factors can also be used.
45
46 fact = 1;
47 fac = 1;
48 % Interpolation methods available are 'nearest', 'linear', 'spline' and
49 % 'cubic'.
50 method = 'spline';

```

Gambar 16. *Script* ekstrak data GGMPPlus

Tahap berikutnya adalah proses ekstrak data dengan memasukkan koordinat batas wilayah penelitian serta parameter perhitungan yang diperlukan ke dalam *script*. Melalui proses tersebut diperoleh peta hasil interpolasi *gravity acceleration* dan *terrain height* (Gambar 17). Serta keluaran berupa file berformat *.txt* yang memuat nilai percepatan gravitasi dan elevasi pada daerah penelitian yang dapat dilihat pada lampiran 2.



Gambar 17. Peta interpolasi *gravity* observasi dan data elevasi GGMPlus

Setelah proses ekstraksi data selesai, langkah berikutnya adalah menginput data tersebut ke dalam *Microsoft Excel* untuk dilakukan perhitungan lanjutan. Pengolahan data gaya berat dilakukan dalam dua tahapan, tahap pertama mencakup penentuan densitas Bouguer serta penerapan berbagai koreksi gravitasi hingga diperoleh data Anomali bouguer lengkap (ABL).

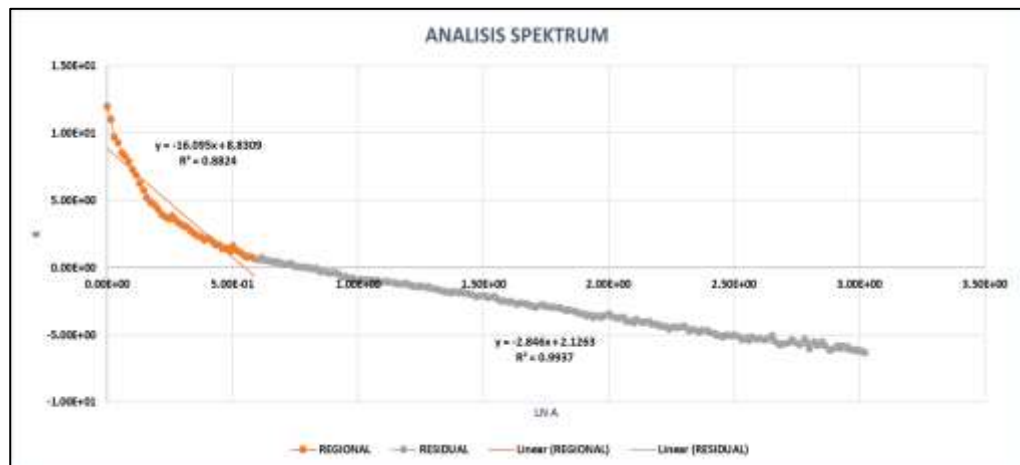
#### 4.3.4 Analisis Spektrum

Pada penelitian ini digunakan metode *Radially Averaged Power Spectrum* (RAPS) untuk mengestimasi kedalaman rata-rata sumber anomali serta memisahkan komponen regional dan residual pada data gaya berat. Metode ini mentransformasikan data anomali ke domain frekuensi menggunakan Transformasi Fourier, kemudian menghitung spektrum daya yang dirata-ratakan secara radial terhadap bilangan gelombang. Kemiringan kurva logaritma spektrum daya terhadap bilangan gelombang digunakan untuk memperkirakan

kedalaman sumber, dengan frekuensi rendah menunjukkan sumber dalam (regional) dan frekuensi tinggi menunjukkan sumber dangkal (residual).

2-D RADIALLY		AVERAGED POWER		SPECTRUM	
Average Spect	rum Density L	n(E) = 2.2407	8.00E+01		
CYC/K_unit	#_SAMP	Ln_P	3_DEPTH	5_DEPTH	
-----	-----	-----	-----	-----	
K		LN A			
0.00E+00	1.00E+00	1.20E+01	5.31E+00		*
1.44E-02	6.34E+00	1.10E+01	6.20E+00		*
2.88E-02	1.25E+01	9.72E+00	4.71E+00	4.71E+00	
4.31E-02	1.91E+01	9.30E+00	3.21E+00	3.56E+00	
5.75E-02	2.44E+01	8.56E+00	2.75E+00	2.59E+00	
7.19E-02	3.26E+01	8.31E+00	1.81E+00	2.47E+00	
8.63E-02	3.70E+01	7.91E+00	2.84E+00	2.49E+00	
1.01E-01	4.40E+01	7.28E+00	2.83E+00	2.80E+00	
1.15E-01	5.06E+01	6.89E+00	2.74E+00	2.87E+00	

Gambar 18. Data analisis spektrum menggunakan metode RAPS



Gambar 19. Grafik analisis spektrum

#### 4.3.5 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Anomali Bouguer dalam metode gaya berat muncul akibat perbedaan densitas batuan, baik yang dekat permukaan maupun yang terletak pada kedalaman lebih besar. Efek gravitasi yang disebabkan oleh batuan dangkal dikenal sebagai anomali residual, sedangkan pengaruh dari batuan yang lebih dalam disebut anomali regional.

Dalam penelitian ini, pemisahan antara anomali regional dan anomali residual dilakukan menggunakan *software* Oasis Montaj melalui metode *upward*

*continuation*. Metode ini umum diterapkan dalam analisis data geofisika untuk membedakan komponen anomali regional yang berskala panjang dari anomali residual yang berskala pendek. Prinsip dasarnya adalah memproyeksikan data anomali gravitasi ke ketinggian tertentu di atas permukaan pengukuran, sehingga pengaruh sumber dangkal berkurang lebih cepat dibanding sumber yang lebih dalam. Hasilnya berupa data anomali regional yang lebih halus, mencerminkan struktur bawah permukaan yang lebih dalam. Anomali residual kemudian diperoleh dengan mengurangi anomali regional dari anomali total. Dengan demikian, metode *upward continuation* memungkinkan pemisahan efek gravitasi antara struktur dangkal dan dalam, sehingga interpretasi kondisi bawah permukaan menjadi lebih akurat dan terfokus.

#### **4.3.6 First Horizontal Derivative (FHD) dan Second Vertical Derivative (SVD)**

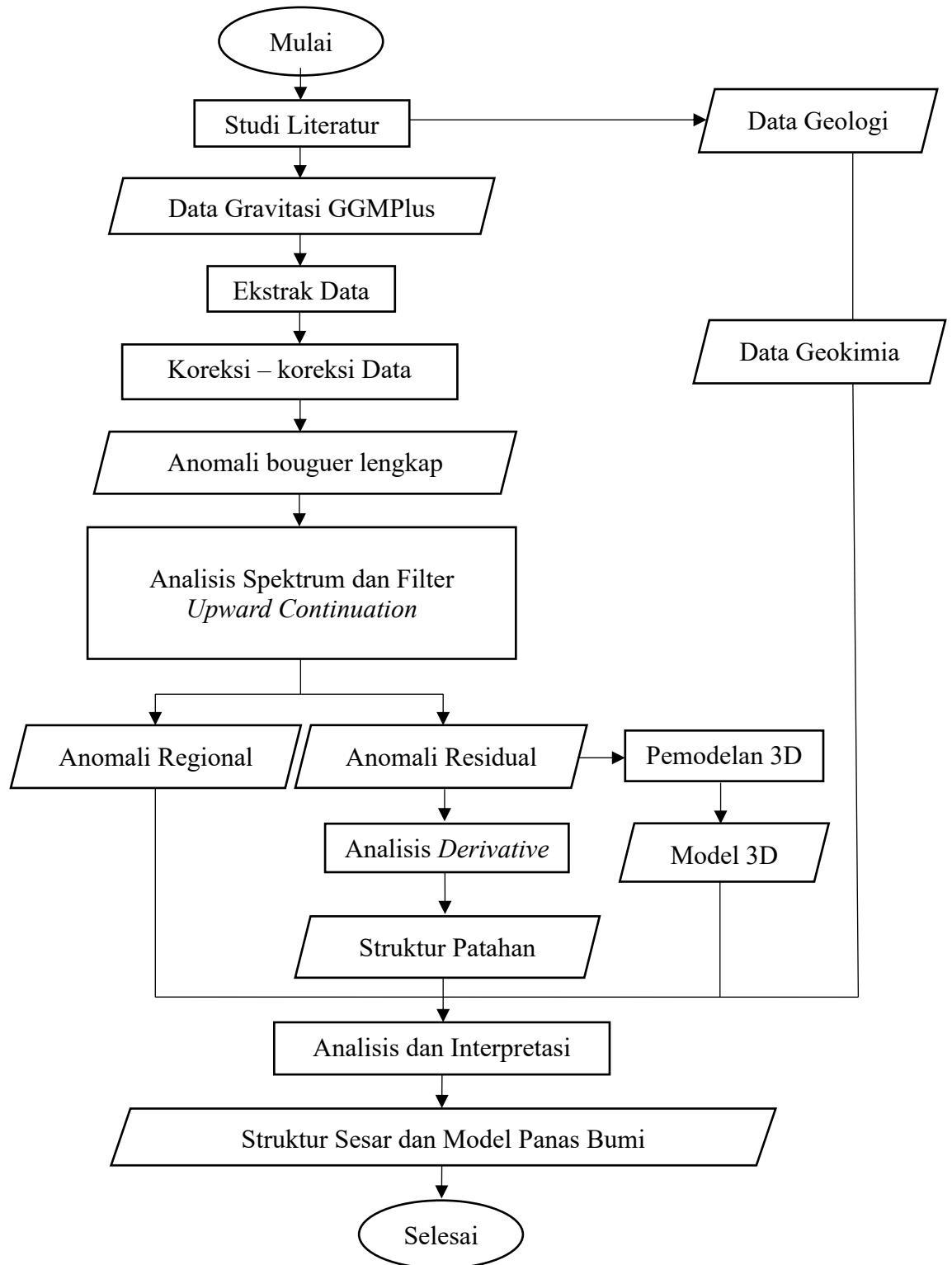
Pemrosesan FHD dan SVD menggunakan Oasis Montaj dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dengan mengimpor data geofisika ke dalam *software* kemudian membuat *grid* apabila diperlukan, dan selanjutnya menghitung turunan horizontal pertama serta turunan vertikal kedua dari data tersebut melalui fitur khusus yang tersedia di dalam *software*. Hasil perhitungan kemudian ditampilkan dalam bentuk visual untuk membantu mengidentifikasi batas-batas struktur geologi serta anomali lokal. Tahapan ini berperan penting dalam proses interpretasi data geofisika karena didapati gambaran yang lebih jelas mengenai karakteristik dan fitur geologi bawah permukaan. Setelah analisis selesai, hasilnya dapat diekspor dan disusun dalam laporan guna mendukung dokumentasi maupun penelitian lanjutan.

#### **4.3.7 Pemodelan Bawah Permukaan**

Pemodelan struktur bawah permukaan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan inversi untuk pemodelan 3D dengan bantuan *Software* Oasis Montaj dan Grablox. Pemodelan struktur bawah permukaan menggunakan *Software* Oasis Montaj dengan visualisasi yang memungkinkan profil bawah permukaan sepanjang lintasan tertentu melalui analisis gaya berat. Proses ini dilakukan dengan ekstraksi data, perhitungan derivatif untuk mendapatkan



## 4.5 Diagram Alir



Gambar 20. Diagram alir

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data, menunjukkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis turunan data gaya berat menggunakan metode FHD dan SVD menunjukkan adanya beberapa sesar naik dan sesar turun pada lintasan A–A', dan B–B'. Pola sesar umumnya berarah barat laut–tenggara (NW–SE) dan sebagian utara–selatan (N–S).
2. Hasil inversi 3D menunjukkan densitas batuan berkisar 2,39–2,78 gr/cc. Densitas rendah (2,39–2,54 gr/cc) diperkirakan berupa batu lempung (*clay*) (Tms) sebagai *cap rock*. Densitas menengah (2,56–2,63 gr/cc) berupa lava andesit–dasit, breksi, dan aglomerat (Tmv) yang berpotensi sebagai reservoir. Densitas tinggi (2,66–2,78 gr/cc) berupa andesit hingga dasit (Qv) yang diinterpretasikan sebagai batuan lebih padat yang berasosiasi dengan sumber panas.
3. Integrasi struktur geologi dan distribusi anomali densitas menunjukkan zona prospek reservoir panas bumi berada pada kedalaman sekitar 1 – 3 km, berkembang pada batuan vulkanik yang mengalami rekahan dan dikontrol oleh sistem sesar sebagai jalur pergerakan fluida panas dari sumber panas di kedalaman yang dapat dilihat pada Gambar 32.

### 6.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data gaya berat hasil survei ground dengan resolusi lebih tinggi untuk meningkatkan ketelitian interpretasi

struktur bawah permukaan. Selain itu, integrasi dengan metode geofisika lain seperti magnetotelurik (MT), magnetik, atau resistivitas perlu dilakukan guna mengurangi ambiguitas interpretasi dan memperoleh model sistem panas bumi yang lebih komprehensif. Kajian geologi dan geokimia pada manifestasi panas bumi juga penting untuk memperkuat identifikasi zona prospek reservoir.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. (2005). *Sumatra: geology, resources and tectonic evolution*. Geological Society of London.
- Blakely, R.J. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Brotopuspito, K.S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Browne, P. L. (1984). Subsurface stratigraphy and hydrothermal alteration of the eastern section of the Olkaria geothermal field, Kenya. *In New Zealand geothermal workshop*. vol.6, 33-41).
- Bureau Gravimetrique International. (2013). *GGMPlus2013Global Model*. <https://Bgi.Obs-Mip.Fr/Data-Products/Grids-and-Models/Modele-Global-GGMPlus2013/>. Diakses pada 18 september 2025.
- Csanyi, L., V. Kristof, S. Kusnir, M. Katin, & M. Marci. (2010). *Geothermal energy*. DSpacebat University of West Bohemia, 21-25.
- Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1982). Reconciliation of the discrete and integral Fourier transforms. *Geophysics*, 47(2), 237-243.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). *Geothermal Energi*. Routledge
- Direktorat Vulkanologi. (1994). *Data Dasar Gunung Api Indonesia*. Departemen Pertambangan dan Energi.
- Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., & Popescu, A. (2003). GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission, Earth Gravity Field from Space-from Sensors to Earth Sciences (Beutler GB, Drinkwater M, Rummel R, von Steiger R, eds.), *Space Sciences Series of ISSI*, vol. 18.

- Farid, M. (2018). Seismotektonik Sumatra dan implikasinya terhadap bahaya gempa bumi. *Jurnal Geosains Indonesia*, 3 (2), 95 - 107.
- Farid, M., Mase, L. Z., & Fathani, T. F. (2024). The investigation of beds using microtremor and geo-electric methods in a liquefied area in Bengkulu City after the Bengkulu-Mentawai earthquake. *Indonesian Journal on Geoscience*, 11(3), 377 - 390.
- Firdaus, A., U. Harmoko, & S. Widada. (2014). Pemodelan Steady State Sistem Panas Bumi Daerah Sumber Air Panas Diwak Derakan Dengan Menggunakan Software Hydrothrem. *Youngster Physics Journal*, vol 3, 243-250.
- Floberghagen, R., Fehringer, M., Lamarre, D., Muzi, D., Frommknecht, B., Steiger, C., Piñeiro, J., & da Costa, A. (2011). Mission design, operation and exploitation of the *gravity* field and steady-state ocean circulation explorer mission. *Journal of Geodesy*, 85, 749–758. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0498-3>
- Franco, A., & Donatini, F. (2017). Methods for the estimation of the energy stored in geothermal reservoirs. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 796, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.
- Gunderson, R., Ganefianto, N., Riedel, K., Sirad-Azwar, L., & Suleiman, S. (2000). Exploration results in the Sarulla block, north Sumatra, Indonesia. In *Proceedings of the World Geothermal Congress, Japan*, 1183 - 1188.
- Hidayat, S., Lubis, L. H., & Parera, A. F. T. (2023). Analisis Potensi Geothermal Gunung Sibualbuali Menggunakan Metode *Gravity*. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, 8(1), 1–10.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- Hirt, C., Kuhn, M., Claessens, S. J., Pail, R., Seitz, K., Gruber, T., & Featherstone, W. E. (2013). High-resolution surface *gravity* and *gravity* gradient fields from EGM2008 and SRTM topography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 1–15. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50129>.
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2015). Indonesian volcanic geothermal systems. *Proceedings world geothermal congress* . 19 - 25.

- Indrawati, Dwi Indriana, & Irham Nurwidyanto, M. (2020). Comparative Study on Separation of Regional and Residual Magnetic Anomalies Using the Upward Continuation, Moving Average, and Polynomial Methods. In *Journal of Physics and Its Applications* (Vol. 2, Issue 2). <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpa/index>
- Johannessen, J. A., Balmino, G., Le Provost, C., Rummel, R., Sabadini, R., Sünkel, H., ... & Drinkwater, M. (2003). The European *gravity* field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission its impact on geophysics. *Surveys in Geophysics*, 24(4), 339-386.
- Juliani, R. (2013). Analisa Air dan Pola Penyebaran Resistivitas Batuan Bawah Permukaan di Daerah Panas Bumi Sibual-Buai Tapanuli Selatan. *Jurnal Einstein*, 1(02), 48-56.
- Kadir, W. G. A. (2000). *Eksplorasi Gayaberat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung.
- Keam, R. F., Luketina, K. M., & Pipe, L. Z. (2005). Definition and listing of significant geothermal feature types in the Waikato Region. In *Proceedings World Geothermal Congress Antalya* (pp. 24-29).
- Kearey, P., M. Brooks., I. Hill. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration Third Edition*. Blackwell Science Ltd.
- KESDM. (2017). *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*. Direktorat Panas Bumi.
- Muksin, U., Bauer, K., & Haberland, C. (2013). Seismic Vp and Vp/Vs structure of the geothermal area around Tarutung (North Sumatra, Indonesia) derived from local earthquake tomography. *Journal of volcanology and geothermal research*, 27 - 42.
- Laksono, A. D., Habibi, A. A. S., Febiana, D. T., Bahri, N. A. M., Nisa, S. A., & Febriani, S. D. A. (2023). Pemetaan Potensi Energi Panas Bumi Pada Provinsi Sumatra Utara Berbasis Digital Melalui Quantum GIS. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 7(1), 01-07.
- Primulyana, S., & Prambada, O. (2011). Batuan Gunungapi Sibual buali, Sumatra Utara. *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*.
- Pulunggono, A., & Cameron, N.R. (1984). Sumbagut Basin Tectonics and Stratigraphy. *Proceedings Indonesian Petroleum Association*.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK.

- Rosid, S. (2005). *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Universitas Indonesia, Depok.
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panas Bumi*. Bandung, Penerbit ITB.
- Sarkowi, M. (2007). *Gayaberat mikro antar waktu untuk analisa perubahan kedalaman muka air tanah (Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang)*. [Disertasi, Institut Teknologi Bandung].
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi struktur daerah panasbumi ulubelu berdasarkan analisa data svd anomali bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16(2), 111-118.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Yogyakarta.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Fisika untuk sains dan teknik*. Jakarta, Salemba Teknika.
- 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.
- Suari, S., & Fauzi, A. (1991). Geothermal prospects in Sumatra. In *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association*.
- Sulistiyawan, I. H., & Harahap, B. H. (2013). Magmatisme, Sumberdaya Mineral dan Energi di Tapanuli Selatan-Sumatra Utara. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 23(3), 167-177.
- Sundhoro, H., Lim, D; Setiadarma, D., & Sulaeman, B. (2006). *Penyelidikan Geologi Dan Geokimia Di Daerah Panas Bumi Dolok Marawa, Kabupaten Simalungun*. Kelompok program penelitian panas bumi.
- Susilawati. (2005). *Pemodelan Metode Gayaberat*. Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia, Depok.
- Syamsuriadi, S. (2013). *Penentuan Struktur Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity)*.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9),
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Van Bemmelen, R. W. (1949). The Geology of Indonesia, Volume IA. *The Hague Martinus Nijhoff, Nedherland, 732.*

Wilson, M.E.J. (2005). Development of Equatorial Carbonate Systems: Palaeogene to Neogene of SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications.*