

**ANALISA DINAMIKA FLUIDA PADA *RESERVOIR* PANASBUMI
BERDASARKAN DATA *TIME-LAPSE MICROGRAVITY*
TAHUN 1987 DAN 2011**

(Skripsi)

Oleh

**RIZKA FADILLAH
2015051019**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISA DINAMIKA FLUIDA PADA *RESERVOIR* PANASBUMI
BERDASARKAN DATA *TIME-LAPSE MICROGRAVITY*
TAHUN 1987 DAN 2011**

Oleh

RIZKA FADILLAH

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISA DINAMIKA FLUIDA PADA *RESERVOIR* PANASBUMI BERDASARKAN DATA *TIME-LAPSE MICROGRAVITY* TAHUN 1987 DAN 2011

Oleh

RIZKA FADILLAH

Lapangan panasbumi Lahendong merupakan salah satu daerah eksplorasi panasbumi yang ada di Indonesia bagian timur. Lapangan panasbumi Lahendong ini terletak di Manado, Sulawesi Utara, proses eksplorasi panasbumi pada lokasi ini yaitu dilakukan dengan cara memproduksi fluida pada *reservoir* dengan menggunakan sumur produksi. Fluida yang terproduksi dari bawah permukaan bukan hanya uap, namun juga air. Oleh karena itu air yang ikut terproduksi dari bawah permukaan ini perlu dikembalikan kembali kedalam tanah dengan sumur injeksi, untuk menggantikan massa yang berkurang akibat dari proses produksi. Oleh karena itu, perlu dilakukan monitoring untuk mengetahui arah pergerakan fluida dan kondisi fluida di dalam *reservoir*. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengetahui arah pergerakan fluida di dalam *reservoir* adalah metode *microgravity*. Pada penelitian ini menggunakan data *microgravity* tahun 1987 dan 2011, dengan tujuan untuk mendapatkan model perubahan distribusi densitas bawah permukaan dan menganalisis pergerakan dinamika fluida pada *reservoir*. Hasil dari penelitian diketahui berdasarkan pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D di dapatkan bahwa nilai distribusi densitas di sekitar sumur produksi sekitar -0,003 g/cc hingga -0,002 g/cc sedangkan di sekitar sumur injeksi sekitar -0,0024 g/cc hingga -0,0014 g/cc. Fluida bergerak ke arah sumur produksi yang menyebabkan pengurangan massa akibat dari proses produksi, sedangkan dari sumur injeksi fluida bergerak secara dominan ke arah barat laut dan timur laut daerah penelitian yang mana karena hal ini di sekitar sumur injeksi masih memiliki anomali negatif, yang berarti proses injeksi ini belum mampu mengembalikan massa yang berkurang akibat dari produksi, sehingga perlu dilakukan injeksi tambahan.

Kata kunci: *microgravity*, *forward modeling*, inversi, panas bumi, sumur injeksi, sumur produksi, *reservoir*, Lahendong.

ABSTRACT

ANALYSIS OF FLUID DYNAMICS IN GEOTHERMAL RESERVOIRS BASED ON TIME-LAPSE MICROGRAVITY DATA IN 1987 AND 2011

Oleh

RIZKA FADILLAH

Lahendong geothermal field is one of the geothermal exploration areas in eastern Indonesia. The Lahendong geothermal field is located in Manado, North Sulawesi, the geothermal exploration process at this location is carried out by producing fluid in the reservoir using production wells. The fluid produced from the subsurface is not only steam, but also water. Therefore, the water that is produced from the subsurface needs to be returned back into the ground with injection wells, to replace the mass that is reduced as a result of the production process. Therefore, monitoring is necessary to determine the direction of fluid movement and fluid conditions in the reservoir. One of the geophysical methods that can be used to determine the direction of fluid movement in the reservoir is the microgravity method. This study uses microgravity data from 1987 and 2011, with the aim of obtaining a model of changes in subsurface density distribution and analyzing the movement of fluid dynamics in the reservoir. The results of the study are known based on 2D forward modeling and 3D inversion obtained that the density distribution value around the production well is around -0.003 g/cc to -0.002 g/cc while around the injection well is around -0.0024 g/cc to -0.0014 g/cc. The fluid moves towards the production well which causes a reduction in mass due to the production process, while from the injection well the fluid moves predominantly towards the northwest and northeast of the research area which because of this around the injection well still has a negative anomaly, which means that this injection process has not been able to restore the reduced mass due to production, so additional injection is needed.

Keywords: *microgravity, forward modeling, inversion, geothermal, injection well, production well, reservoir, Lahendong.*

Judul Skripsi : **ANALISA DINAMIKA FLUIDA PADA
RESERVOIR PANASBUMI BERDASARKAN
DATA TIME-LAPSE MICROGRAVITY
TAHUN 1987 DAN 2011**

Nama Mahasiswa : **Rieka Fadillah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015051019**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.
NIP. 19711210 199702 1001

Sandri Erfani, S.Si., M.Eng.
NIP. 19890215 201903 1016

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

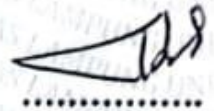
Ketua : **Prof. Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.**



Sekretaris : **Sandri Erfani, S.Si., M.Eng.**



Anggota : **Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 19750929/200112 1002

Tanggal Ujian Skripsi : **11 Januari 2024**

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Penulis



Rizka Fadillah

NPM. 2015051019

RIWAYAT HIDUP



Rizka Fadillah, lahir di Bandar Lampung pada tanggal 28 Juni 2002. Anak keempat dari empat bersaudara, dari pasangan Bapak Isro Majid (alm) dan Ibu Cunengsih. Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD N 03 Bumi Waras, lalu melanjutkan pada jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 16 Bandar Lampung, kemudian menempuh pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAS Perintis 2 Bandar Lampung. Pada tahun 2020 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai kegiatan organisasi, baik secara internal di lingkungan jurusan maupun secara eksternal, antara lain: Anggota Unit Kegiatan Mahasiswa Universitas (UKM-U) *English Society* (Eso) Unila (2020/2021), Anggota Bidang Sains dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (2021/2022 dan 2022/2023) dan Bendahara *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) SC Unila 2023.

Dalam bidang keilmuan dan akademik penulis aktif dan pernah melakukan publikasi jurnal. Selain itu, penulis dipercaya menjadi asisten pada mata kuliah *Microgravity*.

Pada tahun 2023 penulis pernah mengabdikan diri selama 40 hari di Desa Kembahang, Kecamatan Batu Brak, Kabupaten Lampung Barat dalam rangkaian kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN), penulis juga melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Pusat Survei Geologi (PSG), Bandung dengan judul “**Analisis Data Gravity Menggunakan Metode *Second Vertical Derivative* (SVD) Untuk Mengidentifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Palangkaraya, Kalimantan Tengah**”. Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul “**Analisa Dinamika Fluida Pada *Reservoir* Panasbumi Berdasarkan Data *Time-Lapse Microgravity* Tahun 1987 dan 2011**”.

PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk:

IBU DAN AYAH TERCINTA

ISRO MAJID (Alm)

&

CUNENSIH

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat, dan segala bentuk dukungan yang tidak terhingga.

KAKAK TERCINTA

ISNAENI, NURLAELI & RIZQY ROSADI

Yang telah memberikan doa, semangat dan dukungannya.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

**Semua yang terlibat dalam proses pembuatan dan penyusunan skripsi ini,
penulis ucapkan terima kasih.**

“Life can be heavy, especially if you try to carry it all at once, part of growing up and moving into new chapters of your life is about catch or release. What I mean by that is, knowing what things to keep and what things to release, you can’t carry all things.”

Efforts makes you. You will regret someday if you don’t do your best now. Don’t think it’s too late but keep working on it. It takes time, but there’s nothing that gets worse due to practicing.”

~Jeon Jungkook~

“No matter how hard it is right now, think of what the result will make you feel. You may get depressed, but it’s evidence that you are doing good.”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “**Analisa Dinamika Fluida Pada Reservoir Panasbumi Berdasarkan Data Time-Lapse Microgravity Tahun 1987 dan 2011**”. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan Skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selama penulisan Skripsi ini banyak sekali terdapat hambatan yang dialami. Namun berkat adanya bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak, hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa tidak tertutup kemungkinan di dalam Skripsi ini terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan Skripsi ini. Semoga Skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Penulis



Rizka Fadillah

NPM. 2015051019

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas rahmat dan karunia Allah SWT, yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada suri tauladan Rasulullah Muhammad SAW beserta para sahabatnya dan kita selaku umatnya akhir zaman.

Skripsi ini berjudul “**Analisa Dinamika Fluida Pada *Reservoir* Panasbumi Berdasarkan Data *Time-Lapse Microgravity* Tahun 1987 dan 2011**” merupakan skripsi dari penelitian yang dilakukan penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Adapun dalam penyelesaian Skripsi ini, terdapat banyak pihak yang terlibat, yang mana pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. **Pintu Surgaku, Ibunda tercinta** terima kasih sebesar-besarnya atas segala bentuk bantuan, semangat dan doa yang diberikan selama ini. Terima kasih atas nasihat yang selalu diberikan meski terkadang pikiran kita tidak sejalan, terima kasih atas semua kesabaran dan kebesaran hati yang selalu diberikan. Ibu telah menjadi pengingat dan penguat paling hebat “Ibu, terima kasih sudah menjadi tempatku untuk pulang”.

2. **Alm. Ayah**, banyak hal menyakitkan yang telah dilewati penulis tanpa sosok Ayah. Rasa iri dan rindu yang seringkali muncul yang terkadang membuat terjatuh tertampar oleh realita, namun itu semua tidak mengurangi rasa bangga dan terima kasih atas kehidupan yang telah Ayah berikan. Skripsi ini penulis persembahkan untuk engkau malaikat pelindung di surga “Ayah, terima kasih sudah menemani walau hanya lewat hati”.
3. **Ketiga kakakku tercinta Isnaeni, Nurlaeli dan Rizqy Rosadi**, terima kasih untuk segala doa dan dukungan yang telah kalian berikan. Terima kasih untuk waktu dan hal-hal yang telah kalian korbankan sebagai kakak untuk adik-nya.
4. **Bapak Karyanto, S.Si., M.T.** yaitu selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
5. **Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.** selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
6. **Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si. IPU.** selaku dosen Pembimbing I Skripsi pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengarahan, motivasi dan banyak masukan dalam pengerjaan Skripsi ini.
7. **Bapak Sandri Erfani, S.Si., M. Eng.** selaku dosen pembimbing II Skripsi, yang membantu dalam memberikan bimbingan dalam pengerjaan Skripsi ini.
8. **Bapak Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.** selaku penguji sekaligus Pembimbing Akademik yang telah meluangkan waktunya dan senantiasa memberikan masukan, kritik dan saran.
9. **Bapak dan Ibu dosen** Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan.

10. **Dhala, Merlin, Vina dan Ribka** terima kasih atas doa, semangat, dukungan serta kepercayaan yang telah diberikan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan Skripsi ini.
11. **Teman-teman Lab. Geofisika Geothermal**, terima kasih sudah menjadi teman bertukar pikiran dan menemani selama pengerjaan Skripsi ini.
12. **Keluarga Besar Teknik Geofisika 2020** (Patakis) yang telah banyak memberikan semangat dan dukungan selama ini.
13. Semua pihak yang terlibat selama penyusunan skripsi ini yang telah memberikan kesempatan, bantuan dan pengalaman yang sangat luar biasa. Sekali lagi penulis ucapkan terimakasih banyak.
14. Terakhir, terima kasih untuk diri saya sendiri yang sudah mampu berjuang untuk menyelesaikan Skripsi ini.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Penulis



Rizka Fadillah

NPM. 2015051019

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xx
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2. Geologi Regional Daerah Penelitian.....	4
2.3. Sistem Panasbumi Daerah Penelitian.....	7
2.3. Stratigrafi Daerah Penelitian.....	8
2.4. Manifestasi Permukaan Daerah Penelitian	9
2.5. Penelitian Terdahulu	10
III. TEORI DASAR.....	14
3.1. Metode Gayaberat.....	14
3.2. Konsep Dasar Gayaberat.....	14
3.2.1. Gayaberat Newton.....	14
3.2.2. Percepatan Gayaberat.....	15
3.2.3. Potensial Gayaberat.....	16
3.3. Koreksi–Koreksi dalam Metode <i>Time-Lapse Microgravity</i>	17

3.3.1. Koreksi Pasang Surut (<i>Tidal Correction</i>)	17
3.3.2. Koreksi Apungan (<i>Drift Correction</i>)	18
3.3.3. Koreksi <i>Subsidence</i>	18
3.3.4. Koreksi 4D <i>Microgravity</i>	19
3.4. Analisis Spektrum	20
3.5. Filter <i>Moving Average</i>	22
3.6. <i>Time-Lapse Microgravity</i>	23
3.7. <i>First Horizontal Derivative</i>	25
3.8. <i>Forward Modeling</i>	25
3.9. <i>Inverse Modeling</i>	26
IV. METODE PENELITIAN	29
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian	29
4.2. Alat dan Bahan	29
4.3. Prosedur Penelitian	29
4.3.1. Gayaberat Observasi (Gobs)	29
4.3.2. Perhitungan <i>Time-Lapse Microgravity</i>	30
4.3.3. Analisis Spektrum	30
4.3.4. <i>Filtering Data Time-Lapse Microgravity</i>	31
4.3.5. Analisis Derivatif	31
4.3.6. Pemodelan Bawah Permukaan	31
4.4. Jadwal Kegiatan	32
4.5. Diagram Alir	34
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
5.1 Data Penelitian	35
5.2 Gayaberat Observasi (Gobs)	35
5.3 Proses <i>Time-Lapse Microgravity</i>	37
5.4 Analisis Spektrum	38
5.5 <i>Filtering Anomali Time-Lapse Microgravity</i>	42
5.6 Analisis Derivatif	43
5.7 <i>Forward Modeling 2D</i>	47
5.7.1 Model Penampang Melintang Lintasan AB	48
5.7.2 Model Penampang Melintang Lintasan CD	49

5.7.3 Model Penampang Melintang Lintasan EF.....	50
5.8 <i>Inverse Modeling</i> 3D.....	51
5.8.1 Distribusi Densitas Anomali <i>Time-Lapse Microgravity</i>	52
5.8.2 Distribusi Densitas Anomali <i>Time-Lapse Microgravity</i> Dalam ..	58
VI. KESIMPULAN	61
6.1 Kesimpulan	61
DAFTAR PUSTAKA	63

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Stratigrafi daerah penelitian.....	8
2. Manifestasi permukaan daerah panasbumi Lahendong	10
3. Daftar Penelitian Terdahulu	12
4. Data Penelitian	29
5. <i>Software</i> yang digunakan dalam penelitian	30
6. Pelaksanaan kegiatan penelitian.....	33
7. Kedalaman anomali dalam dan anomali dangkal lintasan 1-3.....	42
8. Bilangan gelombang (k) dan lebar jendela (N).....	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	5
2. Peta geologi daerah penelitian	6
3. Komponen tektonik utama Sulawesi Utara.....	7
4. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	15
5. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi	16
6. Kurva $\ln A$ terhadap k	22
7. Teknik pemodelan dengan cara coba-coba	27
8. Diagram alir penelitian.....	35
9. Peta koordinat titik pengukuran, sumur injeksi dan sumur produksi.....	35
10. Peta kontur gayaberat observasi tahun 1987.....	35
11. Peta kontur gayaberat observasi tahun 2011.....	35
12. Peta kontur <i>time-lapse microgravity</i> tahun 1987-2011.....	35
13. Lintasan spektrum anomali <i>time-lapse microgravity</i>	40
14. Grafik $\ln A$ vs k pada lintasan 1.	41
15. Grafik $\ln A$ vs k pada lintasan 2.....	41
16. Grafik $\ln A$ vs k pada lintasan 3.....	42
17. Peta kontur anomali <i>time-lapse microgravity</i> dalam.	44
18. Lintasan analisis derivatif anomali <i>time-lapse microgravity</i>	45
19. Kurva analisis derivatif lintasan 1.....	46
20. Kurva analisis derivatif lintasan 2.....	46
21. Kurva analisis derivatif lintasan 3.....	47
22. Batas pergerakan dan penambahan fluida.....	48
23. Lintasan penampang melintang 2D.....	49
24. Model pengurangan fluida pada <i>reservoir</i> periode 2011-1987 hasil <i>forward modeling</i> lintasan AB.....	50

25. Model pengurangan fluida pada <i>reservoir</i> periode 2011-1987 hasil <i>forward modeling</i> lintasan CD.....	51
26. Model pengurangan fluida pada <i>reservoir</i> periode 2011-1987 hasil <i>forward modeling</i> lintasan EF.....	52
27. Model perubahan distribusi densitas hasil inversi 3D anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987.....	53
28. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987 pada kedalaman 500	54
29. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987 pada kedalaman 800	55
30. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987 pada kedalaman 1000	56
31. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987 pada kedalaman 1500	57
32. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> periode 2011-1987 pada kedalaman 1900	58
33. Model perubahan distribusi densitas hasil inversi 3D anomali <i>time-lapse microgravity</i> terkoreksi noise periode 2011-1987.	59
34. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> dalam periode 2011-1987 pada kedalaman 800	60
35. Model perubahan distribusi densitas anomali <i>time-lapse microgravity</i> dalam periode 2011-1987 pada kedalaman 1900	61

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem panas bumi adalah salah satu bentuk energi panas alami yang dihasilkan dari dalam bumi dengan fluida yang terkandung di dalamnya. Sumber daya energi panas bumi pada umumnya berkaitan dengan mekanisme pembentukan magma dan kegiatan vulkanisme, mekanisme tersebut diakibatkan karena adanya pergerakan lempeng yang terjadi di batas lempeng. Pada sistem panasbumi terdapat lima komponen yang harus dimiliki, yaitu *heat source*, *clay cap*, struktur geologi, zona *reservoir* dan *recharge area* (Cumming, 2009). Indonesia memiliki potensi panas bumi terbesar yaitu 40% dari potensi dunia, yang tersebar sekitar 265 lokasi di sepanjang jalur vulkanik yang membentang dari Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Maluku.

Di pulau Sulawesi, tepatnya di Sulawesi Utara memiliki potensi panas bumi yang berlokasi di daerah Lahendong. Yang mana sistem panas bumi yang terdapat pada daerah ini dikontrol oleh struktur lokal (vulkanik) berupa kaldera Pangolombian serta struktur regional (tektonik) berarah relatif Timur Laut-Barat Daya dan Barat Laut-Tenggara. Sistem ini mempunyai zona *upflow* di sekitar Desa Kasuratan dan Danau Linau dengan *outflow* ke arah barat Desa Lailem dan ke arah barat laut Desa Lahendong. Sistem panas bumi Lahendong merupakan sistem dominan air dengan kemungkinan zona uap. Lapangan panas bumi Lahendong ditemukan pada tahun 1982 dan telah dilakukan penelitian geologi, geokimia dan geofisika sejak saat itu. Tiga sumur dangkal dibor sekitar Danau Linau pada tahun yang sama. Dari tahun 1982 hingga tahun 1987, Pertamina mengebor 7 sumur eksplorasi LHD-1 dan LHD-5 dalam sistem waduk utara, LHD-4 dalam sistem selatan waduk dan

LHD-3, LHD-6 dan LHD-7 di margin batas prospek daerah (Siahaan, 2005). Sumur pengembangan LHD-8 untuk LHD-16 di lapangan Lahendong dibor 1991-1998 dan pembangkit listrik 20 MW pertama dimulai pada tahun 2001. Tahap pengembangan lanjutan dari tahun 2005 ke 2007 di mana 7 sumur produksi yang dibor yang dihasilkan listrik 2 X 20 MW untuk pembangkit listrik unit II dan III. Ada 7 sumur produksi di pad juga LHD-4 dan 13 yang terletak di blok selatan dan 5 sumur di pad LHD-5 di blok utara, sedangkan baik pada LHD-7 di bagian timur adalah sumur reinjeksi.

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi fluida pada lapangan panasbumi adalah metode *time-lapse microgravity*. Metode *time-lapse microgravity* (gayaberat-mikro antar waktu) itu sendiri merupakan pengembangan dari metode gayaberat (x,y,z) dengan menambahkan dimensi keempatnya yakni waktu (t), yang dicirikan oleh pengukuran gayaberat yang teliti secara berulang dengan interval. Pemantauan perubahan massa pada *reservoir* dengan metode *time-lapse microgravity* harus dilakukan secara berkesinambungan dengan periode tertentu. Kelebihan metode *time-lapse microgravity* selain dapat menduga arah pergerakan fluida juga dapat menduga jumlah pengurangan massa akibat produksi dan reinjeksi yang tidak bisa dideteksi dengan metode *monitoring* lainnya, seperti perunut isotop dan mikro seismik (MEQ).

Oleh karena itu, metode *time-lapse microgravity* ini sangat tepat digunakan pada penelitian ini karena dapat digunakan untuk pemantauan perubahan massa pada *reservoir* dan juga dapat menduga jumlah pengurangan massa akibat produksi dan reinjeksi yang telah dilakukan di lapangan panasbumi Lahendong. Dengan demikian penggunaan metode *time-lapse microgravity* pada penelitian ini diharapkan dapat mengetahui mengenai pergerakan dinamika fluida pada *reservoir* di lapangan panasbumi Lahendong dan dengan adanya penelitian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui kelebihan metode *time-lapse microgravity* untuk pemantauan perubahan massa pada *reservoir*.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan nilai *time-lapse microgravity* dari data gayaberat observasi dan topografi.
2. Mengestimasi kedalaman zona anomali dalam *time-lapse microgravity* menggunakan analisis spektrum.
3. Mendapatkan model perubahan distribusi densitas bawah permukaan daerah penelitian.
4. Menganalisa pergerakan dinamika fluida pada *reservoir* panasbumi berdasarkan analisis model perubahan distribusi densitas bawah permukaan.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan merupakan data sekunder hasil dari pengukuran *microgravity* sebanyak 23 stasiun titik pengukuran dan koordinat sumur injeksi dan sumur produksi tanpa data sumur (log).
2. Data yang digunakan adalah data pengukuran *microgravity* tahun 1987 dan 2011.
3. Penentuan batas kedalaman zona anomali dalam *time-lapse microgravity* menggunakan analisis spektrum.
4. Batas pergerakan fluida diidentifikasi dengan analisis derivatif.
5. *Monitoring* pergerakan dinamika fluida pada reservoir dilakukan dengan pemodelan 2D (*forward modelling*) dan identifikasi perubahan densitas dilakukan dengan pemodelan 3D (*inverse modelling*).

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam pelaksanaan penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai pergerakan dinamika fluida pada *reservoir* dan perubahan densitas *reservoir* pada lapangan panasbumi Lahendong berdasarkan data tahun 1987 dan 2011. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan suatu referensi ataupun acuan pada penelitian selanjutnya.

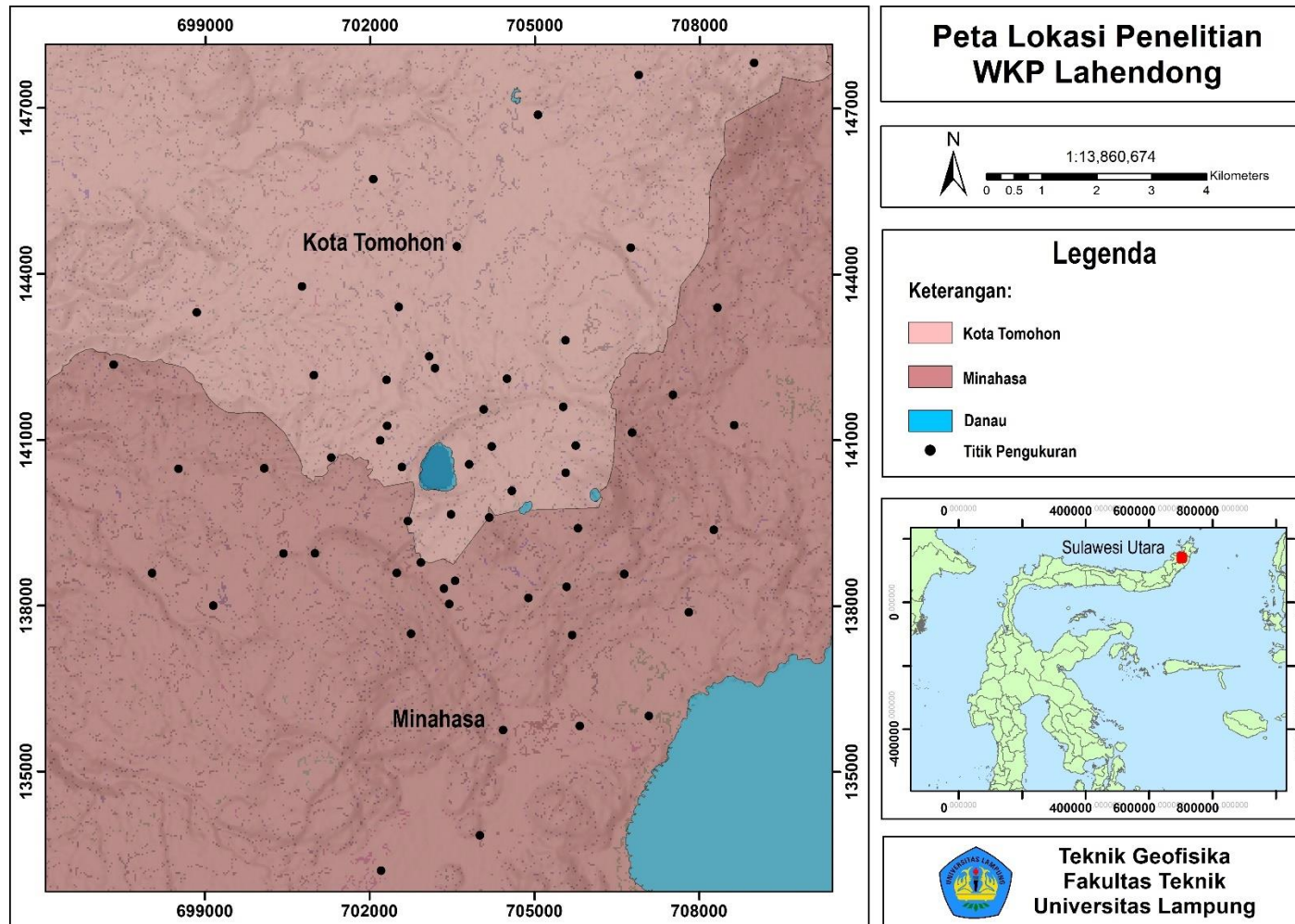
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Daerah Penelitian

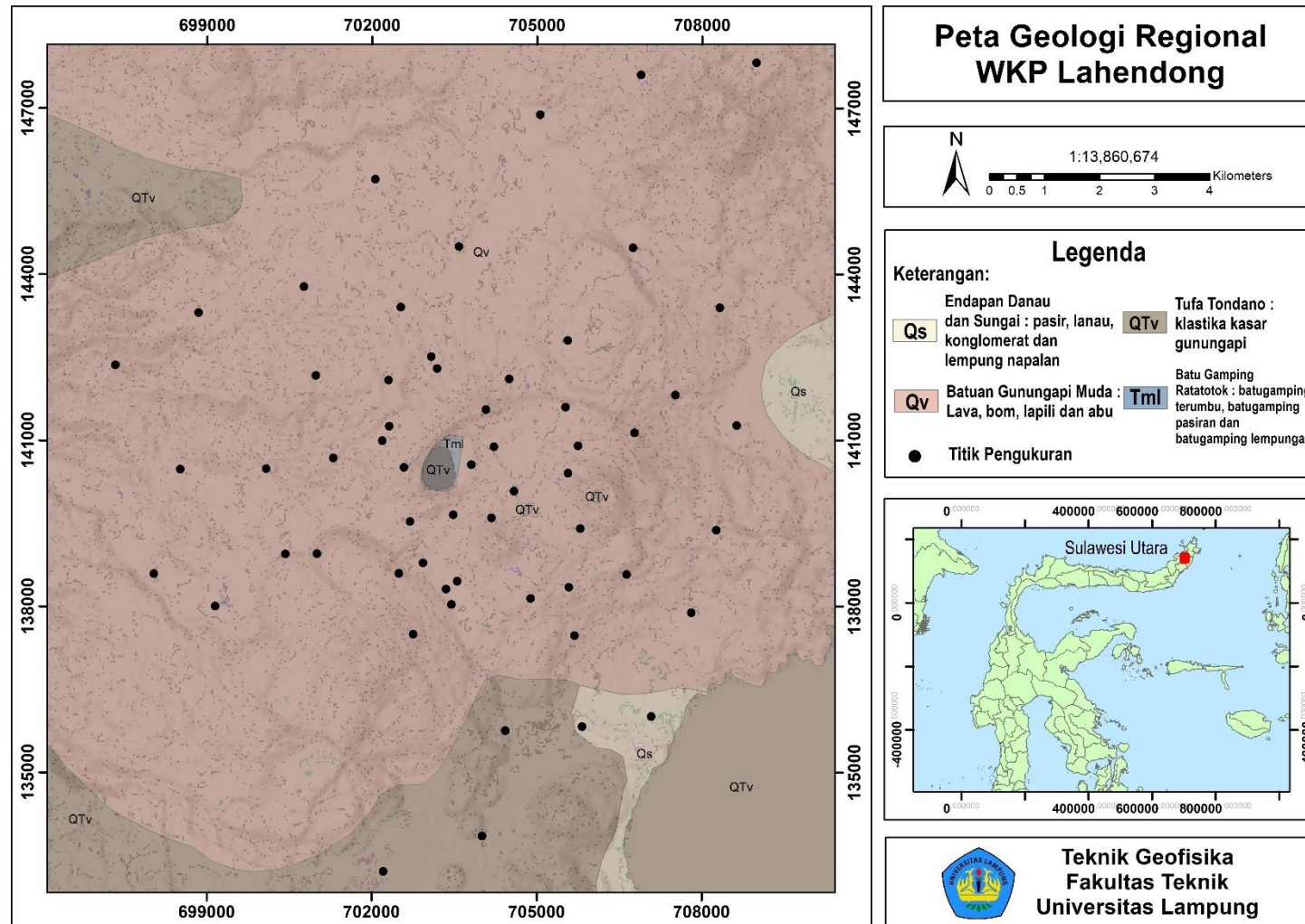
Lokasi daerah penelitian secara administratif terletak di Provinsi Sulawesi Utara, dimana terdiri dari 1 kota dan 1 kabupaten yaitu Kota Tomohon dan Kabupaten Minahasa. Lokasi ini terletak pada koordinat geografis $1^{\circ}22'00''$ LS - $1^{\circ}32'00''$ LS dan $124^{\circ}30'00''$ BT - $125^{\circ}00'00''$ BT atau pada koordinat 699000 – 708000 UTMX dan 135000 – 147000 UTM Y dalam UTM (*Universal Transverse Mercator*). Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada (**Gambar 1**).

2.2. Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah lokasi penelitian terdapat pada Lembar Manado, Sulawesi Utara yang dapat dilihat pada (**Gambar 2**). Pada daerah penelitian, geologi lembar Manado dimulai dengan satuan batuan tertua yang tersingkap di daerah Minahasa merupakan Batuan gunungapi berumur Tersier terdiri dari breksi, lava, dan tuf. Di dalam satuan ini juga terdapat sisipan batuan sedimen laut dangkal seperti yang dilaporkan oleh Siahaan (2005), yang dijumpai pada sumur pemboran. Diatasnya diendapkan satuan Tufa Tondano yang berumur Kuartar berupa tufa berkomposisi riolitik yang banyak mengandung pecahan batuapung (*pumice*) dan memiliki struktur aliran. Satuan ini diduga merupakan produk dari letusan G. Tondano Tua yang membentuk Kaldera Tondano. Selanjutnya merupakan batuan hasil letusan gunungapi Kuartar dari beberapa gunungapi yang muncul setelah letusan G. Tondano Tua seperti G. Pangolombian, G. Tampusu, G. Lengkoan, G. Riendengan, G. Sempu serta G. Lokon dan Soputan yang masih aktif hingga saat ini (Effendi dan Bawono., 1997).



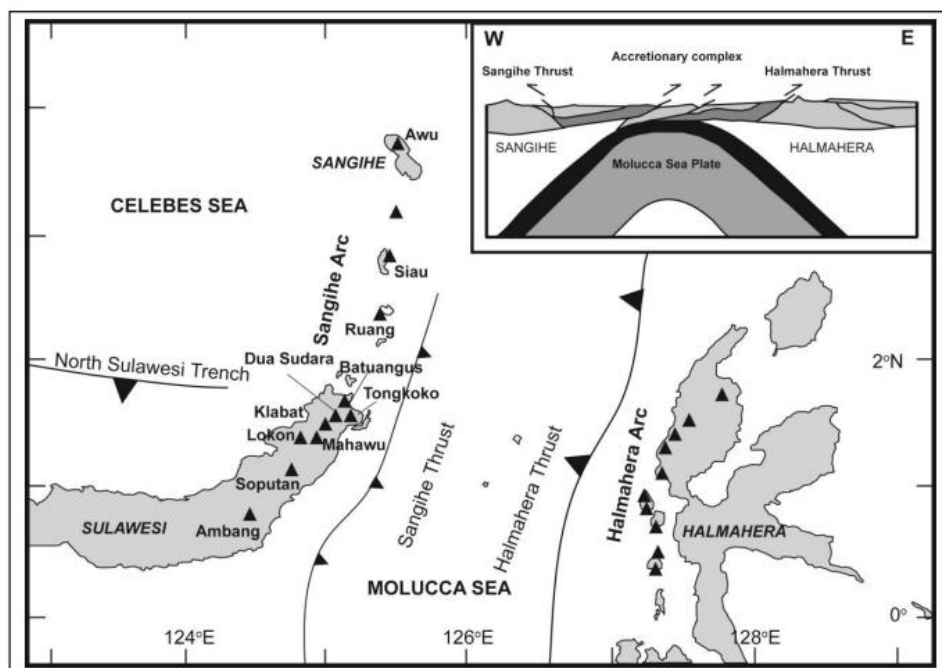
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (Badan Informasi Geospasial, 2018).



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (dimodifikasi dari Effendi dan Bawono., 1997).

2.3. Sistem Panasbumi Daerah Penelitian

Lahendong memiliki tatanan tektonik yang kompleks. Lahendong merupakan satu-satunya sistem panas bumi yang dikembangkan di dunia yang terletak di tumbukan busur-busur di mana busur Sangihe menindih busur Halmahera. Sistem panas bumi Lahendong merupakan bagian dari Busur vulkanik Sangihe. Beberapa gunung berapi Kuartar utamanya (Hochstein & Browne, 2000). Sistem tektonik bagian utara Sulawesi sangat kompleks dan dikendalikan oleh interaksi antara tiga lempeng utama, yaitu lempeng Laut Filipina yang bergerak ke arah barat laut, lempeng Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah NNE, dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah SE. Interaksi lempeng-lempeng tersebut mengakibatkan terbentuknya beberapa lempeng mikro, yaitu lempeng mikro Banggai-Sula, lempeng lempeng mikro Banggai-Sula, Laut Sulawesi, dan lempeng Laut Maluku. Hall (1997) menyebutkan bahwa Sulawesi (dan Asia Tenggara pada Asia Tenggara secara umum) mencapai bentuknya yang sekarang sekitar 10 Ma.



Gambar 3. Komponen tektonik utama Sulawesi Utara (Hall, 2000).

Gunung api tertua di Minahasa adalah kompleks gunung api Lembeyan yang sisa-sisa dinding kalderanya membentuk bukit-bukit di sebelah timur Danau Tondano. Effendi (1976) menyebutkan bahwa mereka secara

dominan tersusun atas breksi, lava, dan tufa yang bersusunan andesitik hingga basaltik, dan terbentuk pada dan terbentuk pada kala Miosen. Menurut Hamilton (1979) aktivitas-aktivitas batuan beku yang paling besar di busur Sangihe terjadi antara 14 - 5 Ma. Selama Miosen Akhir atau Pliosen Awal, sebuah letusan gunung berapi besar di Sulawesi Utara menghasilkan beberapa ratus kilometer kubik tufa, dan membentuk gunung berapi Tondano yang besar depresi tektonik yang besar (Suari, dkk., 1987).

2.4. Stratigrafi Daerah Penelitian

Menurut Effendi dan Bawono. (1997), urutan stratigrafi berdasarkan Peta Geologi Regional lembar Manado, Sulawesi Utara tersusun atas litologi dari yang termuda pada (**Tabel 1**) hingga yang tertua pada (**Tabel 1**), yang mana masing-masing litologi dapat dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 1. Stratigrafi daerah penelitian (Effendi dan Bawono., 1997)

Umur		Batuan Vulkanik	Batuan Sedimen dan Endapan Permukaan	
Kuartar	Holosen	Qv	Qs	
	Plistosen	Q _{Tv}		
Tersier	Pliosen			
	Miosen			
		Akhir		
		Tengah		
	Awal			
Oligosen	Tml			
Eosen				

- a. Endapan Danau dan Sungai (Qs):** pasir, lanau, konglomerat dan lempung napalan. Perselingan lapisan pasir lepas dan lanau, lapisan berangsur, setempat silang siur; konglomerat terusun dari pecahan batuan kasar menyudut tanggung, lempung napalan hitam mengandung moluska di Kayuragi mungkin termasuk satuan ini. Satuan ini membentuk undak dengan permukaan menggelombang. Umur satuan ini adalah Plistosen.

- b. Batuan Gunungapi Muda (Qv):** Lava, bom, lapili dan abu; membentuk gunungapi strato muda antara lain: G. Soputan, G. Mahawu, G. Lokon, G. Klabat, G. Tongkoko; lava yang dikeluarkan oleh G. Soputan dan G. Lokon terutama berkomposisi basal, sedangkan G. Mahawu dan G. Tongkoko berkomposisi andesit; di Kp. Tataaran dan Kp. Kiawa terdapat aliran obsidian, yang mungkin masing-masing berasal dari G. Tomposu dan G. Lengkoan. Satuan ini berumur plistosen – Holosen.
- c. Tufa Tondano (QTv):** klastika kasar gunungapi yang terutama berkomposisi andesit, tersusun dari komponen menyudut hingga menyudut tanggung, tercirikan oleh banyak pecahan batugamping; batupung lapili, breksi, ignimbrit sangat padat, berstruktur aliran. Satuan ini terdapat di sekitar Danau Tondano di bagian utara daerah Minahasa; membentuk punggung yang menggelombang rendah. Tuf bersifat trahit yang sangat lapuk, berwarna putih hingga kelabu kekuningan, terdapat di dekat Kp. Popontelan dan di S. Sinengkeian. Di daerah pantai antara Paslaten dan Sondaken, satuan ini juga membentuk punggung menggelombang rendah. Endapan piroklastika ini diperkirakan berasal dari dan terjadi sebagai hasil letusan hebat pada waktu pembentukan Kaldera Tondano. Satuan ini berumur Pliosen – Pleistosen.
- d. Batugamping Rataotok (Tml):** Batugamping terumbu, batugamping pasir dan batugamping lempungan. Satuan ini mungkin berupa lensa di dalam batuan gunungapi Tmv. Fosil yang dapat dikenali termasuk *Miogyssina thecidaeformis* (RUTTEN), *Lepidocyclina* sp., dan *Textularia* sp., menunjukkan umur antara Miosen Awal dan Miosen Tengah. Batugamping ini berumur Burdigalian atau Miosen Awal.

2.5. Manifestasi Permukaan Daerah Penelitian

Model tentatif sistem panas bumi Lahendong berdasarkan data geokimia menunjukkan bahwa zona *upflow* berada di daerah Kaldera Pangolombian. Hasil analisa kimia air dari manifestasi panas bumi di daerah Lahendong: terdapat dua tipe air yaitu Air Sulfat sebagai penciri *steam heated water* serta Air Bikarbonat sebagai penciri *peripheral water* dapat dilihat pada diagram plot C1-SO₄-HCO₃. **Tabel 2** menunjukkan manifestasi permukaan

yang terdapat adanya sistem panas bumi di Lahendong ini seperti sumber air panas, kolam lumpur, fumarol dan batuan ubahan. Kawasan panas bumi Lahendong dapat dibagi menjadi dua kelompok air panas berdasarkan sifat kimianya rasio Cl-B sebagai kelompok Lokon-Mahawu dan Lahendong-kelompok Tompaso. Kelompok Lokon-Mahawu terletak di bagian Utara dan dicirikan dengan kandungan silika rendah dan suhu rendah sedangkan konsentrasi Ca, Mg dan SO_4^{2-} relative tinggi. Rasio Cl/B pada golongan ini lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok kedua. Kelompok kedua adalah Lahendong-Tompaso kelompok. Kelompok ini terletak di bagian Tengah dan Selatan dari lapangan. Estimasi suhu berdasarkan gas geotermometri sekitar 322°C .

Tabel 2. Manifestasi permukaan daerah panas bumi Lahendong (Ditjen EBTKE, 2017)

Lokasi Sampel	Jenis	Elevasi (m)	Temperatur Permukaan ($^\circ\text{C}$)	Keasaman (pH)
Linau	Fumarol	812	92	2
Lailem	Fumarol	779	90	2
Lahendong	Fumarol, Mudpool	700	89	2

2.6. Penelitian Terdahulu

Ulfiana dkk. (2018) telah melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui keterkaitan dengan perubahan massa akibat ekstraksi fluida bernilai kecil dengan menggunakan metode 4D *microgravity*. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data dengan kurun waktu Juni 2011-Juli 2012, dan didapatkan hasil perbandingan antar hari pada bulan Juni 2011, Januari 2012 dan Juli 2012. Anomali gravitasi menunjukkan angka yang sebaliknya. Di arah timur laut yang merupakan letak sumur injeksi, nilai anomali gravitasi lebih besar dibandingkan dengan nilai anomali gravitasi di arah barat daya. Hal ini menandakan adanya kegiatan injeksi fluida, yang berakibat menambah massa pada area sekitar sumur injeksi. Penambahan massa ini berbanding lurus dengan nilai anomali gravitasi, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada bulan Juli 2012 dilakukan kegiatan injeksi fluida. Nilai anomali gravitasi pada bulan Januari 2012 menunjukkan nilai yang

paling kecil dibanding bulan Juni 2011 dan Juli 2012. Hal ini dapat menjadi studi kasus yang baik dalam mengidentifikasi perubahan nilai anomali gravitasi akibat keberadaan fluida di suatu tempat.

Setyorini dkk. (2021) melakukan penelitian mengenai analisis respon 4D *microgravity*, respon anomali gayaberat selang waktu merepresentasikan perubahan densitas fluida pada suatu *reservoir* dan dalam simulasi reservoir, pola pergerakan fluida dan kandungan fluida pori dapat diidentifikasi berdasarkan saturasi fluida pada periode waktu tertentu dan waktu mendatang, sehingga kedua metode tersebut dapat saling memperkuat satu dengan yang lainnya yang pada akhirnya dapat diperoleh model reservoir yang lebih komprehensif. Dan dapatkan hasil berupa anomali gayaberat mikro 4D pengukuran I dan anomali gayaberat mikro 4D pengukuran II, yang mana pada pengukuran I menunjukkan sebagian besar pada daerah penelitian didominasi oleh anomali negatif. Berdasarkan tren anomali gayaberat mikro, daerah ini dibagi menjadi tiga zona yang menarik yaitu Utara, Tengah dan zona Selatan. Zona Utara dan Selatan menunjukkan anomali negatif dibandingkan dengan zona tengah. Zona Tengah menunjukkan anomali kurang negatif. Gelombang anomali dapat dilihat sebagai salah satu amplitude negatif besar dengan beberapa gangguan di sekelilingnya. Sedangkan pada hasil pengukuran II kecenderungan ditemukan pada anomali pengukuran I juga ditemukan pada anomali pengukuran II. Utara dan zona Selatan juga menunjukkan lebih negatif dibandingkan dengan zona Tengah. Namun, zona Tengah menunjukkan anomali positif. Kontras antara zona Utara dan zona Tengah membuktikan perbatasan atau kompartemen yang ada antara zona tersebut. Serupa dengan anomali pengukuran I, zona selatan memiliki anomali relatif kurang negatif dibandingkan dengan zona Utara.

Ibrahim dkk. (2022) melakukan penelitian di lapangan panas bumi "X" untuk mengetahui dan analisis keberadaan struktur geologi (sesar) dengan menggunakan metode *second vertical derivative*. Dari hasil peta anomali SVD gravitasi memperlihatkan persebaran nilai anomali mempunyai rentang

nilai -5,5 hingga 3,5 mGal/km². Nilai anomali 0 mGal/km² antar *interface* maksimum dan minimum menunjukkan adanya batas bidang struktur. Sehingga dilakukan interpretasi struktur pada anomaly SVD sesuai dengan informasi kelurusan dan struktur geologi dari peta geologi daerah penelitian. Interpretasi tersebut juga dilakukan pada kemunculan manifestasi panas bumi aktif maupun tidak aktif. Hasil analisis struktur geologi pada penampang dan jenis struktur (sesar) yang berdasarkan respon anomali SVD gravitasi. Identifikasi struktur geologi (sesar) menggunakan respon kurva grafik amplitudo pada sayatan penampang sebanyak 8 di peta anomali SVD gravitasi. Berdasarkan analisis dan interpretasi struktur geologi menggunakan peta anomali SVD gravitasi bahwa keseluruhan struktur geologi merupakan patahan (sesar) normal secara lateral.

Tabel 3. Daftar Penelitian Terdahulu

No.	Penulis	Judul	Data dan Metode	Kesimpulan
1	Ulfiana dkk. (2018)	Analisis Arah Pergerakan Fluida Lapangan Panas Bumi Lahendong dengan Metode 4D <i>Microgravity</i>	Data yang digunakan data <i>microgravity</i>	Berdasarkan hasil dari keterkaitan perubahan massa akibat ekstraksi fluida dihasilkan adanya kegiatan injeksi fluida akan beraakibat menambah massa pada area sekitar sumur injeksi. Penambahan massa ini berbanding lurus dengan nilai anomali gravitasi.
2	Setyorini dkk. (2021)	Analisis Respon 4D <i>Microgravity</i> Berdasarkan Integritas Data Model Geologi dan Simulasi <i>Reservoir</i> pada Lapangan TBN	Data yang digunakan data <i>microgravity</i> dan data model geologi	Dari respon anomali gayaberat mikro selang waktu dapat merepresentasikan perubahan densitas fluida pada suatu reservoir dan dalam simulasi reservoir pola pergerakan fluida dan

				kandungan fluida pori dapat diidentifikasi berdasarkan saturasi fluida
3	Ibrahim dkk. (2022)	Analisis Struktur Geologi Berdasarkan data Gravitasi menggunakan Metode <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD) Pada Lapangan Panas Bumi 'X'	Data yang digunakan data gravity	Berdasarkan hasil pengolahan didapatkan peta anomali SVD, yang dimana dari peta ini dihasilkan bahwa keseluruhan struktur geologi pada daerah penelitian merupakan patahan normal secara lateral

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran variasi medan gayaberat di bumi. Variasi gayaberat di permukaan bumi tersebut dapat disebabkan oleh adanya variasi densitas batuan di bawah permukaan, jenis batuan di bawah permukaan, perbedaan jarak permukaan bumi ke pusat bumi dan adanya perbedaan topografi di permukaan bumi (Sarkowi, 2014). Menurut Djudjun (2005), metode gayaberat merupakan salah satu hal penting dalam banyak masalah yang melibatkan pemetaan bawah permukaan bumi dan studi geologi. Metode gayaberat didasarkan pada sifat massa, dimana besarnya massa tersebut akan menentukan besarnya gaya tarik-menarik di antara benda tersebut.

Metode gayaberat sangat tepat digunakan untuk pendugaan struktur bawah permukaan dikarenakan mampu mendeteksi kontras densitas tubuh batuan. Dalam hal ini, perbedaan kontras densitas yang beragam mengindikasikan bahwa struktur bawah permukaan yang beragam jenisnya. Atau dapat dikatakan bahwa distribusi densitas yang tidak seragam di bawah permukaan bumi dapat disebabkan oleh struktur geologi yang ada di dalamnya (Setiadi dkk., 2010).

3.2. Konsep Dasar Gayaberat

3.2.1. Gayaberat Newton

Gayaberat Newton memiliki prinsip teori yang didasari Hukum Newton dimana menjabarkan mengenai adanya gaya tarik menarik antara dua massa m_1 dan m_2 yang terpisah sejauh r , dapat dirumuskan sebagai berikut (Serway dan Jewett, 2009):

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

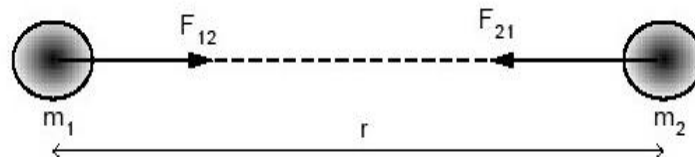
Dimana:

F : Gaya tarik menarik (N)

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

r : Jarak antara dua buah benda (m)

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



Gambar 4. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).

3.2.2. Percepatan Gayaberat

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

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

Percepatan sebuah benda bermassa m_2 yang disebabkan oleh tarikan benda bermassa m_1 pada jarak r secara sederhana dapat dinyatakan dengan :

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

Bila ditetapkan pada percepatan gaya tarik bumi persamaan di atas menjadi

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} = G \frac{M \cdot m}{m \times r^2} = G \frac{M}{r^2} \quad (4)$$

Dimana :

\vec{g} : Percepatan gaya tarik bumi (m/s^2)

M : Massa bumi (kg)

m : Massa benda (kg)

\vec{F} : Gayaberat (N)

r : Jari-Jari bumi (km)

Pengukuran percepatan gayaberat pertama kali dilakukan oleh Galileo, sehingga untuk menghormati Galileo, kemudian didefinisikan:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ (dalam c.g.s)} \quad (5)$$

Satuan anomali gayaberat dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligal (mGall) :

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

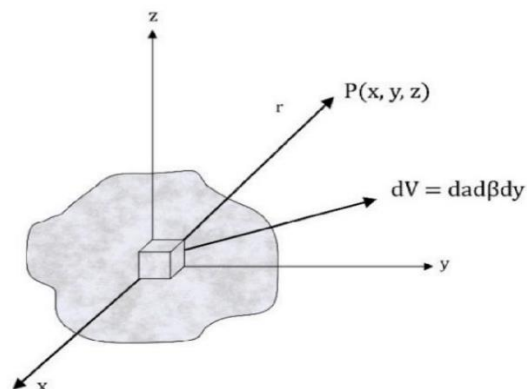
$$1 \mu\text{Gal} = 10^{-3} \text{ mGall} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 \quad (6)$$

$$1 \text{ mGal} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \quad (7)$$

Dalam satuan m.k.s, gayaberat diukur dalam g.u. (*gravity unit*) atau $\mu\text{m/s}^2$ (Octonovrilna dan Pudja, 2009).

3.2.3. Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat merupakan suatu energi yang digunakan untuk menempatkan suatu massa di suatu titik ke titik tertentu. Suatu benda yang memiliki massa tertentu pada sistem ruang akan menyebabkan adanya keberadaan medan potensial di sekitarnya. Medan potensial yang terbentuk memiliki sifat konservatif, artinya usaha yang terjadi dalam suatu medan gayaberat tidak berpengaruh pada lintasan yang ditempuhnya dan hanya terpengaruh pada posisi awal dan akhir (Rosid, 2005).



Gambar 5. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Maulana, 2012).

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

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (8)$$

Medan gayaberat akibat distribusi rapat massa di atas diperoleh dengan mendiferensialkan persamaan (8) terhadap x, y dan z yang hasilnya adalah,

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

$$\begin{aligned} \Delta g_y(x, y, z) &= \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} \\ &= -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)(y-\beta)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta g_z(x, y, z) &= \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} \\ &= -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta(\alpha, \beta, \gamma)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (11) \end{aligned}$$

Dari persamaan (11) akan didapatkan nilai medan gayaberat Δg pada permukaan bumi yang beragam. Medan gayaberat bumi diakibatkan pengaruh oleh distribusi massa di bawah permukaan yang digambarkan oleh fungsi densitas (ρ). Sedangkan bentuk dari permukaan bumi yang sebenarnya digambarkan oleh batas integral (Sarkowi, 2007).

3.3. Koreksi–Koreksi dalam Metode *Time-Lapse Microgravity*

Dalam mengolah data *microgravity* diperlukan beberapa koreksi-koreksi yang harus dilakukan untuk mengurangi besarnya *noise-noise* yang ditimbulkan. Adapun koreksi data *microgravity* meliputi beberapa koreksi diantaranya:

3.3.1. Koreksi Pasang Surut (*Tidal Correction*)

Koreksi Pasang Surut (*Tidal Correction*) merupakan koreksi yang dilakukan karena efek tarikan massa benda-benda langit seperti bulan dan matahari. Nilai dari koreksi ini berubah pada waktu tertentu secara

periodik bergantung pada kedudukan benda-benda langit tersebut. Jika dominan gaya tarik oleh bulan dan matahari pada permukaan bumi maka nilai tersebut ditambahkan pada nilai baca dan pengamatan. Sedangkan jika koreksi berlawanan dari gaya tarik maka nilai tersebut perlu dikurangkan. Perhitungan koreksi pasang surut yang didasarkan pada perumusan Longman (1959) dibuat dalam sebuah program komputer. Pada grafik hasil koreksi pasang surut memiliki nilai positif dan nilai negatif dimana jika positif maka bumi mengalami tarikan dari posisi normalnya dan sebaliknya.

3.3.2. Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Gravimeter dibangun dengan menggunakan sistem keseimbangan pegas dan dilengkapi massa yang tergantung bebas di ujungnya. Karena pegas memiliki sifat yang tidak elastis secara sempurna, maka sistem pegas tidak kembali ke posisi semula. Seringnya terjadi guncangan pada saat pengukuran (transportasi), mengakibatkan bergesernya pembacaan titik nol pada alat (pada alat *gravimeter* tidak diklem sehingga pegas tetap bekerja). Keadaan ini disebut *drift* (apungan) yang besarnya sebagai fungsi waktu. Koreksi apungan digunakan untuk mengoreksi kesalahan pembacaan *gravimeter* pada saat melakukan pengukuran nilai gayaberat di suatu tempat. Koreksi apungan dilakukan dengan prinsip membuat lintasan tertutup pada titik-titik pengukuran (*loop* tertutup). *Loop* tertutup merupakan pengukuran dengan cara pengukuran ulang pada stasiun awal (titik ikat pada tiap *loop*) setelah dilakukan pada titik akhir. Besarnya koreksi *drift* adalah (Brotopuspito, 2001):

$$D_n = \left\{ \frac{(g_b - g_a)}{(t_b - t_a)} (t_n - t_a) \right\} \quad (12)$$

Dimana:

D_n : Koreksi *drift* pada waktu pembacaan titik ikat

g_a : Pembacaan *gravimeter* di titik awal

g_b : Pembacaan *gravimeter* di titik akhir

t_a : Waktu pembacaan di titik awal

t_b : Waktu pembacaan di titik akhir

t_n : Waktu pembacaan di titik pengamatan

3.3.3. Koreksi *Subsidence*

Pada titik amat *monitoring* Microgravity dapat terjadi perubahan elevasi yang disebabkan oleh amblesan tanah. Perubahan nilai gaya berat akibat terjadinya amblesan tanah dapat diturunkan dari persamaan gravitasi normal:

$$g(\varphi) = 978032.7(1 + 0.0053024\sin^2\varphi - 0.0000058\sin^2 2\varphi) \quad (13)$$

$$g_{\varphi,h} = g_{\varphi} + \frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} h \quad (14)$$

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} = -\frac{2g_{\varphi}}{a}(1 + f + m - 2f\sin^2\varphi) \quad (15)$$

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} = -0.308765 \text{ mGall/m} \quad (16)$$

Dimana $g(\varphi)$ adalah nilai gaya berat teoritis pada lintang φ , h adalah elevasi atau ketinggian, a adalah sumbu minor bumi, f adalah perataan bumi, m adalah konstanta Clairaut, dan $\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h}$ adalah gradien gaya berat vertikal. Jadi perubahan gaya berat karena adanya penurunan posisi titik amat yang disebabkan adanya amblesan tanah adalah :

$$\Delta g = 3.08675h \text{ } \mu\text{Gall, dengan } h \text{ dalam satuan cm} \quad (17)$$

Demikian pula dengan posisi titik ukur, karena bumi tidak bulat sempurna tetapi berbentuk ellipsoid, maka nilai gaya berat juga dipengaruhi oleh posisi titik tersebut di permukaan bumi. Perubahan nilai gaya berat karena adanya perubahan posisi diberikan oleh persamaan :

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial \varphi} = 978032.700(0.0053024 - 0.0000058(4 \sin 2\varphi \cos 2\varphi)) \quad (18)$$

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial \varphi} = 3.153 \frac{\mu\text{Gall}}{m} \quad (19)$$

Berdasarkan persamaan di atas, maka setiap terjadi pergeseran titik amat sebesar 1 meter akan memberikan perubahan nilai gaya berat sebesar $3.153 \mu\text{Gal}$.

3.3.4. Koreksi 4D *Microgravity*

Pembacaan nilai gayaberat dari suatu ke titik permukaan dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kesalahan sistematis karena alat, variasi topografi variasi tinggi, pasang, lintang dan variasi densitas bawah permukaan. Dari beberapa faktor, target utama adalah variasi densitas bawah permukaan, sehingga faktor-faktor lain yang tidak perlu dalam pembacaan nilai gayaberat harus dihilangkan. Dengan kata lain pembacaan nilai gayaberat harus diperbaiki terlebih dahulu, sehingga nilai-nilai gayaberat yang diukur merupakan nilai gayaberat yang benar-benar mewakili sebuah anomali karena variasi densitas bawah permukaan. Dua koreksi penting yang diterapkan dalam survei mikro gayaberat adalah koreksi pasang surut dan koreksi apungan. Kedua koreksi diterapkan pada pengurangan tahap pertama setelah megkonversi skala nilai gayaberat menjadi mikroGal.

3.4. Analisis Spektrum

Analisis spektrum memiliki tujuan untuk mendapatkan nilai kedalaman suatu benda anomali gayaberat dari bawah permukaan. Metode analisis spektrum memanfaatkan transformasi Fourier guna mengubah suatu fungsi waktu dan jarak menjadi suatu fungsi frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1996). Analisis spektrum dalam *microgravity* dilakukan untuk mengetahui batas dinamika fluida pada *reservoir* dalam dan dangkal serta noise pada daerah penelitian. Hasil dari analisis spektrum ini selanjutnya digunakan untuk mengestimasi besar kedalaman untuk *filtering* anomali *microgravity*. Suatu transformasi Fourier digambarkan dengan proses memisahkan suatu gelombang ke dalam bentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang bervariasi. Hasil dari penjumlahan pada gelombang-gelombang tersebut adalah bentuk gelombang aslinya (Kadir, 2000). Spektrum diperoleh dari

nilai potensial yang terdapat pada suatu bidang horizontal. Dengan persamaan transformasi Fourier (Blakely, 1996) adalah:

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{R}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|K|} \quad (20)$$

Dimana

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

U : potensial gayaberat

μ : anomali rapat massa

γ : konstanta gayaberat

r : jarak

Gerak vertikal gravitasi yang disebabkan oleh suatu titik massa adalah turunan derivatif dari potensial gayaberatnya :

$$g_z = Gm \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (14)$$

$$F(g_z) = GmF \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (15)$$

$$F(g_z) = Gm \frac{\partial}{\partial z} F \frac{1}{r} \quad (16)$$

Transformasi Fourier pada lintasan yang diinginkan adalah

$$F(g_z) = 2\pi Gme^{|k|(z_0-z_1)}, \quad z_1 > z_0 \quad (21)$$

Jika distribusi rapat massa bersifat acak dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gayaberat, maka $m=1$ sehingga hasil transformasi Fourier anomali gayaberat menjadi :

$$A = C e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (22)$$

Dimana:

A = amplitudo

C = konstanta

Untuk memperoleh hubungan antara amplitudo (A) dengan bilangan gelombang (k) dan kedalaman (z_0-z_1) dilakukan dengan melogaritmakan persamaan $A = C e^{|k|(z_0-z_1)}$, sehingga bilangan gelombang k berbanding lurus dengan *spectral amplitude*.

$$\ln A = \ln 2\pi Gme^{|k|(z_0-z_1)} \quad (23)$$

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

Persamaan di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus:

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

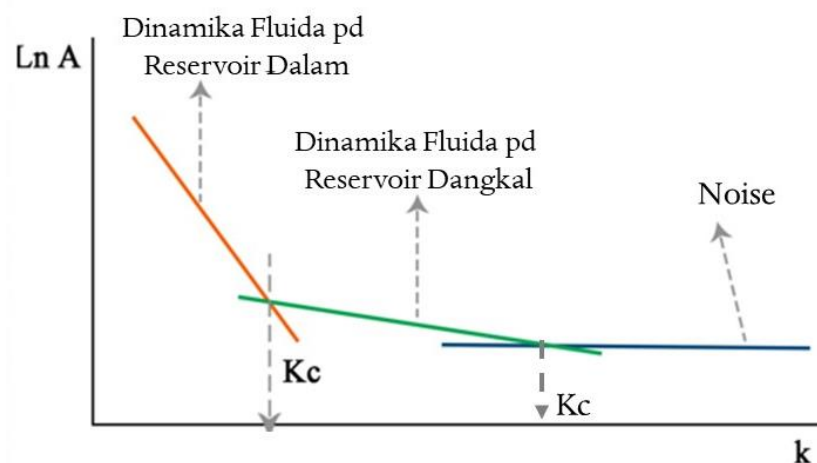
Dimana $\ln A$ sebagai sumbu y , $|k|$ sebagai sumbu x , dan $(z_0 - z_1)$ sebagai kemiringan garis (gradien). Oleh karena itu, kemiringan garisnya merupakan kedalaman bidang dalam dan dangkal $|k|$ sebagai sumbu x didefinisikan dengan bilangan gelombang yang besarnya $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan satuannya *cycle/meter*, dengan λ adalah panjang gelombang. Hubungan λ dengan Δx diperoleh dari persamaan:

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

Nilai λ sama dengan Δx , ada faktor lain pada Δx yang disebut konstanta pengali, sehingga $\lambda = N \cdot \Delta x$, konstanta N didefinisikan sebagai lebar jendela, jadi lebar jendela dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Dimana Δx adalah domain spasi yang akan digunakan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c adalah bilangan gelombang *cutoff*. Semakin besar nilai k , maka nilai frekuensi akan tinggi. Hubungan bilangan gelombang k dengan frekuensi f adalah $k = 2\pi f$, frekuensi yang sangat rendah berasal dari sumber anomali regional dan frekuensi tinggi berasal dari sumber anomali residual.



Gambar 6. Kurva $\ln A$ terhadap k (Blakely, 1996).

3.5. Filter *Moving Average*

Filter *moving average* merupakan salah satu metode penapisan *low pass filter*, dimana metode ini menghilangkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Data 4D *microgravity* ditapis menggunakan metode ini dengan lebar jendela merupakan rata-rata dari setiap lintasan yang telah melalui analisis spektrum. Hasil yang didapatkan disebut dengan anomali 4D *microgravity* yang telah bebas dari noise. Pada prinsipnya nilai lebar jendela yang digunakan semakin besar maka nilai anomali residual yang diperoleh akan semakin mendekati nilai Anomali Bouguer (Setiadi dkk., 2010).

Pemisahan Anomali 4D *microgravity* dengan noise digunakan untuk mempermudah proses interpretasi kualitatif. Salah satu filter yang digunakan dalam memisahkan anomali ini dapat dilakukan dengan filter *moving average*. Filter *moving average* memiliki perhitungan dengan cara mencari nilai rata-rata anomalnya. Hasil rata-rataan dari filter adalah anomali regional, sedangkan anomali residual diperoleh dengan mengurangkan data hasil pengukuran gayaberat atau Anomali Bouguer lengkap dengan anomali regional.

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

Keterangan :

i = nomor stasiun

N = lebar jendela

$$N = \frac{N-1}{2} \quad (29)$$

Δg_{reg} = besarnya anomali regional

Sedangkan penerapan *moving average* pada peta dua dimensi, harga pada suatu titik dapat dihitung dengan merata-ratakan semua nilai di dalam sebuah kotak persegi dengan titik pusat adalah titik yang akan dihitung harganya.

Misalnya *moving average* dengan lebar jendela 3, maka:

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{9} \sum_{N=1}^9 \Delta g(n) \quad (30)$$

Nilai anomali residual Δg_{res} dihitung dengan menggunakan persamaan :

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

Dimana Δg adalah Anomali Bouguer total (Diyanti, 2014).

Filter *moving average* sangat umum digunakan untuk filter pada DSP (*Digital Signal Processing*), secara umum dikarenakan filter *moving average* sangat mudah digunakan untuk dan mudah untuk dimengerti. Hasil akhir dari pengolahan Anomali Bouguer menggunakan filter *moving average* adalah anomali regional (Nugraha, 2016).

3.6. *Time-Lapse Microgravity*

Metode *timelapse microgravity* merupakan pengembangan dari metode Gravity, dengan dimensi keempatnya adalah waktu. *Timelapse microgravity* melibatkan pengukuran gaya berat berulang pada suatu *station* (dalam orde μGall) serta pengukuran elevasinya dengan ketelitian tinggi (dalam orde mm). *Timelapse microgravity* merupakan selisih antara gaya berat mikro pada periode t' dan t (Sarkowi, 2005):

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = g(x, y, z, t') - g(x, y, z, t) \quad (32)$$

Anomali *timelapse microgravity* merupakan gabungan dari beberapa sumber anomali yang harus diidentifikasi secara lengkap sebelum melakukan interpretasi, agar didapatkan nilai anomali gaya berat mikro yang benar-benar berasal dari dalam reservoir panasbumi, yang kemudian dapat diidentifikasi dan diinterpretasi lebih jauh perubahan sifat-sifat fisis yang terjadi di dalamnya. Sumber anomali tersebut meliputi:

- Amblesan tanah
- Perbedaan musim pengukuran
- Curah hujan
- Kedalaman muka air tanah
- Dinamika fluida dalam reservoir

Anomali *timelapse microgravity* disebabkan oleh perubahan densitas bawah permukaan dan perubahan ketinggian titik amat. Anomali *timelapse microgravity* merupakan selisih anomali Bouguer lengkap pada tiap periode

pengukuran. Anomali Bouguer lengkap merupakan selisih antara nilai gravity pengamatan dengan gravity teoritik yang didefinisikan pada titik pengamatan bukan pada bidang referensi, baik ellipsoid maupun muka laut rata-rata. Anomali Bouguer dinyatakan sebagai:

$$\Delta g(x, y, z) = g_{obs} - (g_{(\varphi)} - FAC + BC - TC) \quad (33)$$

$$\Delta g(x, y, z) = g_{obs} - g_{(\varphi)} + FAC - BC + TC \quad (34)$$

$$\Delta g(x, y, z) = g_{obs} - g_{(\varphi)} + (C_1 - C_2)h + C_3\Delta h \quad (35)$$

$$\Delta g(x, y, z) = g_{obs} - g_{(\varphi)} + (0,308765 - 0.04193 \rho)h + C_3\Delta h \quad (36)$$

Dimana:

- $\Delta g(x,y,z)$: anomali Bouguer lengkap,
- g_{obs} : gayaberat observasi,
- $g_{(\varphi)}$: gayaberat teoritis pada lintang φ ,
- φ : lintang,
- FAC : koreksi udara bebas (*free air correction*),
- BC : koreksi Bouguer (*Bouguer correction*),
- TC : koreksi medan (*terrain correction*),
- C_1 : konstanta koreksi udara bebas ($C_1 = 0,308765$ mGal/m)
- C_2 : konstanta koreksi Bouguer untuk lempeng terbatas,
- C_3 : konstanta koreksi medan (perubahan koreksi medan akibat perubahan tinggi),
- r : rapat massa,
- H : tinggi (meter),
- Δh : beda tinggi titik amat dengan topografi sekelilingnya,

Anomali *timelapse microgravity* merupakan selisih nilai anomali Bouguer tiap titik pengukuran pada interval waktu tertentu, yang dapat dituliskan:

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = \Delta g(x, y, z, t_2) - \Delta g(x, y, z, t_1) \quad (37)$$

3.7. *First Horizontal Derivative*

Pengertian *horizontal derivative* pada data anomali gayaberat adalah perubahan nilai anomali gayaberat dari satu titik ke titik lainnya dengan jarak tertentu. *Horizontal derivative* dari anomali gayaberat yang disebabkan oleh suatu bodi cenderung untuk menunjukkan tepian dari bodi-nya tersebut. Jadi metode *horizontal derivative* dapat digunakan untuk menentukan lokasi batas kontak densitas horisontal dari data gayaberat (Cordell dan Grauch, 1982). Metode ini dapat digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan yang dangkal maupun dalam. Untuk menghitung nilai FHD dapat dilakukan dengan persamaan (38) berikut (Blakely, 1996):

$$FHD = \frac{\Delta g}{\Delta x} = \frac{g_{(i+1)} - g_{(i)}}{\Delta x} \quad (38)$$

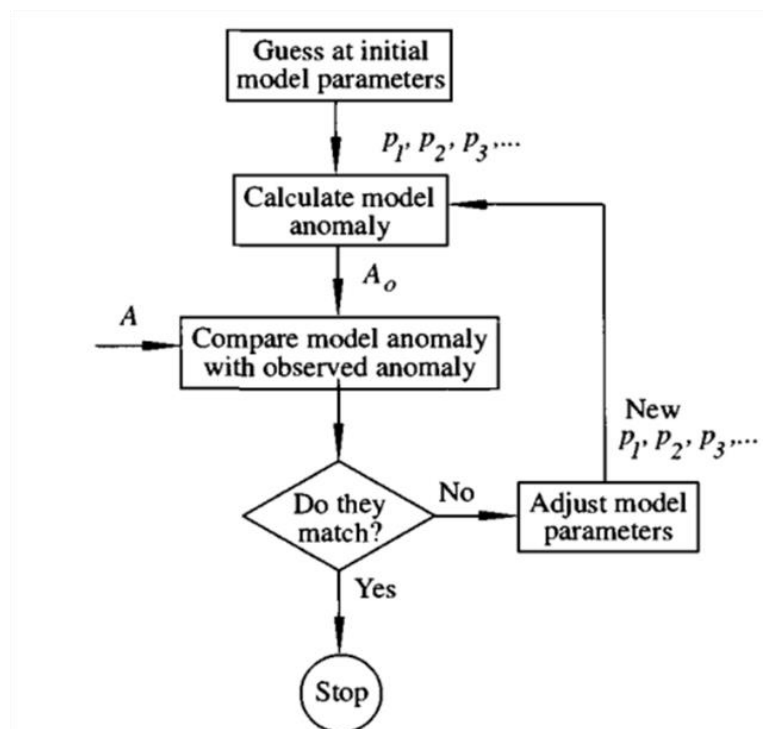
Dengan $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ merupakan turunan pertama perubahan nilai gravitasi pada arah x dan y dengan satuan mGal/m.

3.8. *Forward Modeling*

Forward modeling atau pemodelan ke depan merupakan suatu metode interpretasi untuk memprediksi atau memperkirakan nilai densitas bawah permukaan dengan membuat terlebih dahulu benda geologi yang terdapat di bawah permukaan. Pada *forward modeling* model awal dibangun berdasarkan perkiraan geologi dan geofisika. Anomali model dihitung dan dibandingkan dengan anomali yang diamati, serta parameter model disesuaikan untuk meningkatkan kesesuaian antara dua anomali. Proses penyesuaian model, perhitungan anomali, dan perbandingan anomali ini diulang sampai anomali yang dihitung dan diamati dianggap cukup mirip (Blakely, 1996).

Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respons model) dengan data lapangan dilakukan proses coba-coba dengan mengubah harga parameter model seperti pada **Gambar 6**. Istilah pemodelan ke depan atau *forward modeling* sering digunakan untuk menyatakan pemodelan data geofisika dengan cara coba-coba. Dengan kata lain, istilah pemodelan ke depan tidak

hanya mencakup perhitungan respon model tetapi juga proses coba-coba secara manual untuk memperoleh model yang memberikan respon yang cocok dengan data (Sarkowi, 2014).



Gambar 7. Teknik pemodelan dengan cara coba-coba dan modifikasi parameter model (Blakely, 1996).

3.9 Inverse Modeling

Inverse modeling adalah suatu metode interpretasi dimana mekanisme model untuk memperoleh kecocokan data perhitungan dan data pengamatan dilakukan secara otomatis. Pada pemodelan inversi, satu atau lebih parameter model dapat dihitung secara otomatis dari data pengamatan sehingga menghasilkan respon yang sesuai. Pemodelan inversi sering disebut *data fitting* atau pencocokan data karena tahapannya melakukan pencarian parameter model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan (Grandis, 2009).

Kesesuaian antara respons model dengan data pengamatan umumnya dinyatakan oleh suatu fungsi obyektif yang harus diminimumkan. Proses pencarian minimum fungsi obyektif tersebut berasosiasi dengan proses

pencarian model optimum. Karakteristik minimum suatu fungsi tersebut digunakan untuk pencarian parameter model. Secara lebih umum model dimodifikasi sedemikian hingga respons model menjadi *fit* dengan data (Sarkowi, 2014).

IV. METODE PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian Tugas Akhir ini dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika,
Universitas Lampung

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

Tanggal : Oktober 2023 – Januari 2024

4.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5** sebagai berikut:

Tabel 4. Data penelitian

No	Data	Sumber Data
1	Data <i>Microgravity</i>	Data ini berupa nilai Gobservasi dari pengukuran microgravity tahun 1987 dan 2011. Yang mana pada tahun 1987 berjumlah 65 titik, dan tahun 2011 berjumlah 88 titik.
2	Peta Lembar Geologi	Peta geologi yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari Peta Geologi Lembar Manado Effendi dan Bawono., (1997).
3	Data Sumur Injeksi dan Sumur Produksi	Data ini berupa titik koordinat sumur injeksi dan sumur produksi daerah penelitian.

Tabel 5. *Software* yang digunakan dalam penelitian

No	<i>Software</i>	Fungsi
1	Laptop	Digunakan dalam pengolahan data penelitian
2	ArcGIS 10.8	Berfungsi dalam pembuatan peta lokasi penelitian, peta geologi dan analisis SIG lainnya.
3	Numeri	Digunakan untuk analisis spektrum.
4	Surfer 13	Digunakan untuk mengolah data gayaberat yaitu dalam membuat peta kontur <i>time-lapse</i> 4D <i>Microgravity</i> , <i>filtering</i> anomali <i>time-lapse</i> 4D <i>Microgravity</i> , dan perhitungan FHD.
5	Microsoft Excel	Digunakan untuk menghitung nilai Ln A dan k dari hasil analisis spektrum pada Numeri.
6	Grav3D 2.0	Digunakan untuk membuat model distribusi densitas bawah permukaan dengan model inversi 3D.
7	Grav2Dc	Digunakan untuk membuat penampang melintang pemodelan ke depan 2D.

4.3. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

4.3.1. Gayaberat Observasi (Gobs)

Untuk mendapatkan gayaberat observasi (gobs) setiap stasion, koreksi yang diterapkan pada gayaberat pengukuran adalah koreksi apungan (*drift*) dan pasang surut (*tidal*). Gayaberat observasi ini merupakan nilai gayaberat tiap stasion pengukuran yang telah diikatkan dengan titik ikat yang diketahui nilai gayaberat absolutnya. Gayaberat observasi menunjukkan nilai gayaberat pada periode tertentu, nilai gayaberat observasi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti: posisi dan ketinggian titik amat, struktur dan densitas dibawah permukaan. Pada umumnya nilai gayaberat berbanding terbalik dengan topografi, daerah rendah akan mempunyai nilai gayaberat observasi lebih tinggi dan sebaliknya. Pada penelitian ini sudah didapatkan nilai Gobs pada semua stasiun dari setiap tahun 1987 dan 2011. Setelah diketahui

Gobs dari setiap tahun, selanjutnya kita dapat membuat peta kontur Gobs menggunakan *software* Surfer.

4.3.2. Perhitungan *Time-Lapse Microgravity*

Setelah didapatkan nilai Gobs dari masing-masing pengukuran dari semua tahun, kemudian langkah selanjutnya adalah penggabungan data sesuai dengan stasiun yang sama dari data pengukuran tahun 1987, 2011, sehingga pada tahap ini kita akan mendapatkan nilai Gobs pada tahun 1987 dan 2011. Kemudian anomali *time-lapse* microgravity didapatkan dengan mengurangkan anomali kedua dikurang anomaly pertama, yaitu: (2011-1987). Setelah mendapatkan nilai anomali *time-lapse microgravity* nya kita dapat melakukan gridding dengan *software* surfer untuk mendapatkan peta kontur *time-lapse microgravity*.

4.3.3. Analisis Spektrum

Setelah didapatkan peta kontur *time-lapse microgravity* langkah selanjutnya adalah analisis spektrum. Metode analisis spektrum menggunakan transformasi Fourier untuk mengubah domain data dari domain jarak menjadi domain frekuensi. Dengan analisis spektrum dapat diketahui kandungan frekuensi dari data sehingga kedalaman suatu benda anomali gayaberat di bawah permukaan dapat diperkirakan. Transformasi Fourier dilakukan untuk mendapatkan setiap penampang sehingga diperoleh grafik hubungan bilangan gelombang (k) dengan ln amplitudo (ln A). Dari grafik tersebut didapat nilai kedalaman yang merupakan batas anomali gayaberat mikro selang waktu yang berasal dari reservoir dengan noisenya.

4.3.4. Filtering Data *Time-Lapse Microgravity*

Informasi sinyal yang diberikan dari perubahan massa bawah permukaan tidak seutuhnya mengandung informasi-informasi mengenai perubahan massa bawah permukaan yang berasal dari reservoir yang kita inginkan, akan tetapi ada juga sinyal pengganggu

atau *noise* yang berasal dari luar reservoir. Oleh karena itu untuk mendapatkan informasi dari reservoir maka kita harus melakukan proses *filtering* terhadap nilai anomali gayaberat mikro selang waktu untuk menghilangkan *noise* yang ada sehingga mempermudah interpretasi. Metoda yang digunakan dalam proses *filtering* ini adalah metode *moving-average*.

4.3.5. Analisis Derivatif

Tahapan analisis derivatif dilakukan menggunakan korelasi pada hasil *slice first horizontal derivative* dan *second horizontal derivative* yang akan digunakan untuk mengidentifikasi sesar pada daerah penelitian. Dugaan adanya struktur sesar berdasarkan metode FHD dilihat dari kondisi puncak maksimum atau minimum. Sedangkan untuk nilai SHD berada pada batas nol yang menandakan adanya suatu batas struktur geologi.

4.3.6. Pemodelan Bawah Permukaan

Pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini menggunakan metode *forward modeling* (pemodelan ke depan) 2D dan *inverse modeling* (pemodelan ke belakang) 3D dengan menggunakan software Grav3D 2.0. Tahapan *forward modeling* dilakukan dengan melakukan input data jarak dan data anomali 4D *Microgravity* hasil *filtering* berdasarkan *slice* ataupun lintasan yang telah dibuat. Tahapan penentuan lintasan dilakukan dengan menarik lintasan yang melewati anomali tinggi dan anomali rendah yang diindikasikan sebagai daerah sesar. Tahapan *inverse modeling* 3D dilakukan dengan cara menginput data mesh serta data anomali 4D *Microgravity* hasil *filtering* untuk membuat suatu model 3D dari daerah penelitian yang mendekati model yang sebenarnya. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mengetahui reservoir dan pergerakan fluida daerah penelitian.

4.4. Jadwal Kegiatan

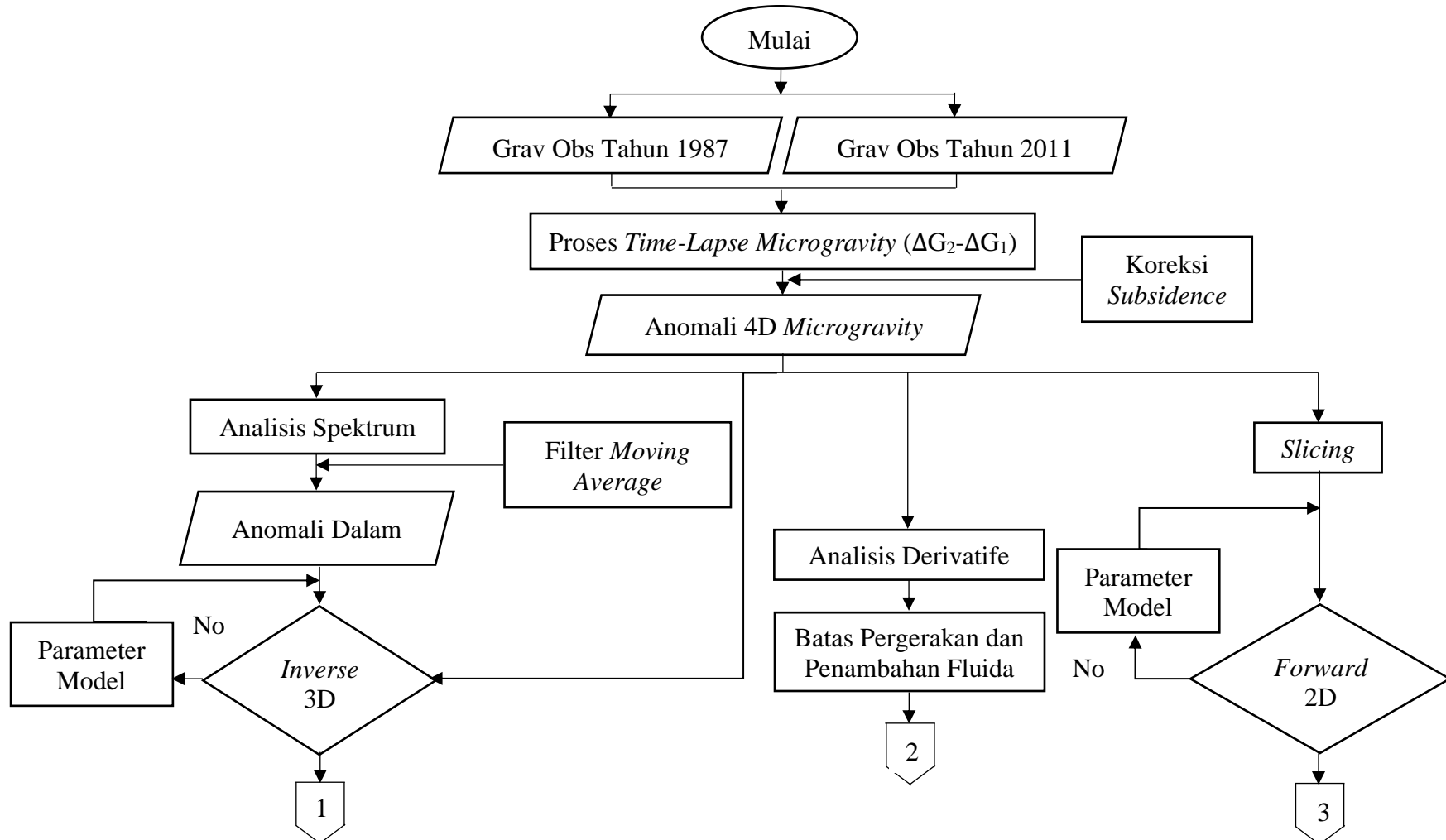
Adapun jadwal kegiatan pada penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat pada **Tabel 6** sebagai berikut:

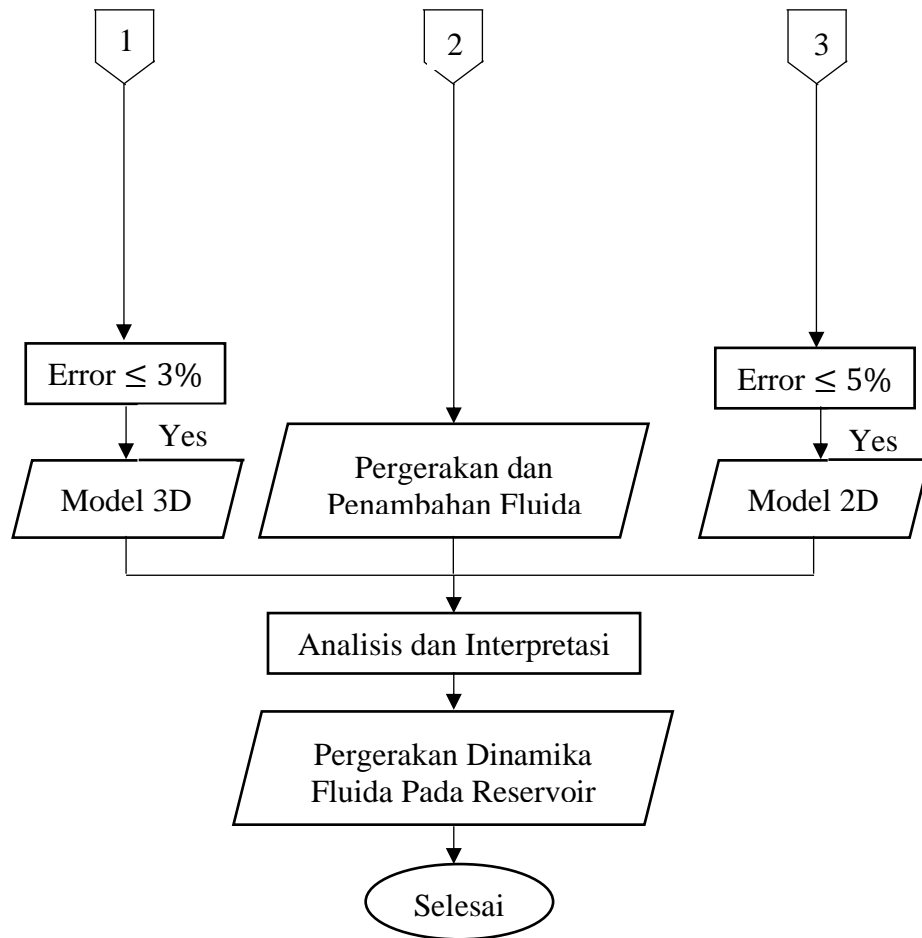
Tabel 6. Pelaksanaan kegiatan penelitian

Kegiatan	Oktober				November				Desember				Januari	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Studi Literatur														
Persiapan Data <i>Microgravity</i>														
Pengolahan Data <i>Microgravity</i>														
Penyusunan Laporan dan Bimbingan Usul														
Seminar Usul														
Bimbingan Hasil														
Seminar Hasil														
Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif														
Sidang Komprehensif														

4.5. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut pada **Gambar 7**.





Gambar 8. Diagram alir penelitian.

VI. KESIMPULAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan interpretasi data yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Anomali *time-lapse microgravity* merupakan selisih antara gayaberat observasi periode tahun 2011 dengan 1987 yang sudah terkoreksi perubahan topografi. Anomali *time-lapse microgravity* lapangan Lahendong periode tahun 2011 dengan 1987 mempunyai nilai -0,11 mGal sampai 0,016 mGal. Yang dimana pada perioded ini anomali time-lapse microgravity membuat klosur negatif dua buah dibagian selatan dan utara dari Danau Linau. Anomali negatif mengindikasikan adanya pengurangan massa (fluida) sedangkan anomali positif menunjukkan adanya penambahan massa (fluida) pada daerah penelitian.
2. Hasil analisis spektrum anomali *time-lapse microgravity* mendapatkan kedalaman anomali dalam pada kedalaman 900 – 1500 meter. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan dan penambahan fluida terjadi pada kedalaman 900 – 1500 m dibawah permukaan tanah.
3. Distribusi densitas bawah permukaan berdasarkan pemodelan ke depan 2D dan inversi 3D pada daerah penelitian berkisar -0,003 g/cc sampai -0,002 g/cc di sekitar sumur produksi. Hal ini menunjukkan terjadinya pengurang fluida pada reservoir sebesar antara 2% - 3%. Sedangkan pada sumur injeksi memiliki perubahan densitas -0,0024 g/cc hingga -0,0014 g/cc atau telah terjadi perubahan densitas sebesar 2,4% sampai 1,4%.
4. Berdasarkan model distribusi bawah permukaan daerah panasbumi Lahendong, didapatkan bahwa fluida bergerak kearah sumur produksi dan menyebabkan fluida mengalami pengurangan massa sebesar -0,02 hingga

-0,0075 g/cc pada *reservoir*. Sedangkan dari sumur injeksi, fluida bergerak secara dominan kearah barat laut dan timur laut daerah penelitian. Dan didapatkan pula bahwa di dekitar sumur injeksi masih memiliki anomali yang negatif, yang berarti bahwa proses injeksi ini belum mampu mengembalikan massa yang berkurang akibat dari produksi, sehingga perlu dilakukan injeksi pada daerah sebelah selatan.

DAFTAR PUSTAKA

- A.C. Effendi & S.S. Bawono. (1997). *Peta Geologi Lembar Manado*. Pusat Survei Geologi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Badan Informasi Geospasial. (2018). *Portal pencarian dan integrasi informasi geospasial melalui Ina-SDI*. <https://tanahair.indonesia.go.id>. Diakses pada tanggal 27 September 2023.
- Blakely, R.J. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Brotopuspito, K.S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada.
- Cumming, W., (2009). *Geothermal resource conceptual models using surface exploration data*. In: Proceedings 34th Workshop in Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, 6 pp.
- Ditjen EBTKE. (2017). *Buku Potensi Panas bumi Jilid 1*. Direktorat Panas Bumi.
- Diyanti. (2014). Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Leuwidamar Berdasarkan Analisis Spektrum Data Gayaberat. *Skripsi*. Prodi Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia.
- Djudjun, A. (2005). Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*. Pusat Sumber Daya Geologi.
- Dobrin, M.B. (1960). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Mc-Graw-Hill Book Company Inc.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.
- Hall, R. (1997), Cenozoic tectonics of SE Asia and Australasia, Petroleum System of SE Asia and Australasia: Jakarta, p. 47 – 62.

- Hall, R. (2000). Neogene history of collision in the the halmahera region, Indonesia, 27th Indonesian Petroleum Association Association Annual Convention: Jakarta, p. 487 - 493.
- Hochstein, M.P., and Browne, P.R.L. (2000). Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources, in Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of Volcanoes*: San Diego, Haraldur Sigurdsson, p. 835 – 855.
- Hinze, W.J. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications, 1 Ed.* Cambridge University Press.
- Ibrahim, M. M., Utami, P., Raharjo. I. B. (2022). Analisis Struktur Geologi Berdasarkan Data Gravitasi Menggunakan Metode Second Vertical Derivative (SVD) Pada Lapangan Panas Bumi "X". *Jurnal Geosains dan remote Sensing*. 3(2), 52-59. DOI: <https://doi.org/10.23960/jgrs.2022.v3i2.76>
- Kadir, W.G.A. (2000). *Eksplorasi Gayaberat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral. ITB.
- Kadir, W.G.A. 2004. Penerapan metode gayaberat mikro 4D untuk proses monitoring. *Journal JTM*, X, 3.p. 170-179.
- Kadir, W.G.A., 2003, Penerapan Metode Gayaberat Mikro Selang Waktu untuk Proses Monitoring. *Jurnal Teknologi Mineral*.
- Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ064i012p02351>.
- Maulana, I. (2012). Analisis 4D microgravity dan gradien vertikal 4D mikrogravity (Studi kasus amblesan semarang). *Tesis*. Universitas Indonesia.
- Octonovrilna, L. & Pudja, I.P. (2009). Analisa Perbandingan Anomali Gravitasi dengan persebaran intrusi air asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 10(1).
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Chichester*. John Wiley dan sons.
- Robert, D., 1987. *Geology Model of Lahendong Geothermal Field: A guide for the development of this field*, Report for Pertamina, Jakarta.
- Rosid, S. (2005). *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Department of Physics, University of Indonesia.
- Saptadji, N.M. 2001. *Teknik Panas Bumi*. ITB. Bandung.

- Sarkowi, M. (2007). Gaya berat mikro antar waktu untuk analisa perubahan kedalaman muka air tanah (Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang). *Disertasi*. ITB Bandung.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi Struktur Daerah Panas bumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16 (2), 111-118. <http://repository.lppm.unila.ac.id/id/eprint/22328>.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gaya Berat*. Graha Ilmu.
- Schon, J.H., 1995, Seismic Exploration, Physical Properties of Rock Fundamental Theory and Principles of Petrophysics: Pergamon.
- Serway, R.A. & Jewett, J.W. (2009). *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Salemba Teknik.
- Setyorini, D.A., Kadir, W.G.A., Widiyanto, E. (2021). Analisis Respon 4D Microgravity berdasarkan Integrasi Data Model Geologi dan Simulasi Reservoir pada Lapangan TBN. *PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*. 10(3): 111-124. Doi: <https://doi.org/10.25105/petro.v10i3.10861>.
- Sihombing, R.B. & Rustadi. (2020). Pemodelan Dan Analisa Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas bumi Kepahiang Berdasarkan Metode Gayaberat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(2), 47-61. <http://repository.lppm.unila.ac.id/id/eprint/11463>.
- Siahaan, E.E., (1999). *Fault structure evaluation in Lahendong Field based on aerial photo and landsat imagery*, Pertamina Internal Report (in Indonesian).
- Siahaan, E.E., (2000). *Mineral alteration study in Lahendong Geothermal Field*, Pertamina Internal Report (in Indonesian).
- Suari, S., Tandirerung, S.A., Buntaran, T., and Robert, D. (1987). Assessment of the Lahendong Geothermal Field, North Sulawesi, Indonesia, 16th Indonesian Petroleum Association Annual Convention, p. 385 - 398.
- Susilawati. (2005). *Pemodelan Metode Gayaberat*. Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Supriyanto. (2007). *Analisis Data Geofisika : Memahami teori Inversi*. Department Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Talwani, M. & Elwig, M. (1960). Rapid Computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape. *Journal Geophysics*, 23, 203-225.

Ulfiana E., Ainun, A. R., (2018). Analisis Arah Pergerakan Fluida Lapangan Panas Bumi Lahendong Dengan Metode 4D Gravity. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

Whitehead, N dan Musselman, C. (2007). *Tutorial: Montaj Magmap Filtering (2D Frequency Domain Processing of Potential Field Data Extention for Oasis Montaj 6.4)*. Geosoft Inc.