

**INTERPRETASI SUB-CEKUNGAN VERA, JAWA BARAT
UTARA BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D DATA
GAYABERAT
(Skripsi)**

Oleh

Annida Rifqoh Zakiyyah

1955051011



**FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2023

**INTERPRETASI SUB-CEKUNGAN VERA, JAWA BARAT
UTARA BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D DATA
GAYABERAT**

Oleh

ANNIDA RIFQOH ZAKIYYAH

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

ABSTRAK

INTERPRETASI SUB-CEKUNGAN VERA, JAWA BARAT UTARA BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D DATA GAYABERAT

Oleh

Annida Rifqoh Zakiyyah

Cekungan Vera merupakan wilayah cekungan laut yang berada pada koordinat 108.2°-109° BT dan 5.3°-5.8° LS. Dalam penelitian yang digunakan merupakan data anomali Bouguer terkoreksi Cekungan Vera tahun 2009. Selanjutnya data tersebut dilakukan analisis spektral untuk mengestimasi kedalaman basement pada daerah penelitian. Metode geofisika merupakan suatu cara untuk menentukan struktur bawah permukaan bumi berdasarkan parameter-parameter fisis. Salah satu metode geofisika yaitu metode gravity (gayaberat) yang didasarkan pada perbedaan massa jenis (densitas). Mempelajari pola sub-cekungan dan struktur geologi bawah permukaan terkadang sulit teridentifikasi melalui analisis kualitatif geologi. Hasil yang didapat pada analisis spektral menunjukkan bahwa kedalaman batuan dasar rata-rata pada Cekungan Vera ini adalah 2.1 km. Pemodelan 3D anomali residual menghasilkan densitas yang di komparasi dengan analisis derivatife yang menunjukkan adanya jebakan berupa *fault trap*, selain itu juga dapat di prediksi bahwa *seal rock* cekungan sedimen yang berupa shale dimana merupakan bagian Formasi Talang Akar yang berperan sebagai *intraformational seal*.

Kata Kunci: Gayaberat, Analisis Spektral, Analisis FHD, Analisis SVD, Pemodelan 3D, Formasi Talang Akar, Cekungan Vera.

ABSTRACT

INTERPRETATION OF VERA SUB-BASIN, NORTH-WEST JAVA BASED ON 2D AND 3D MODELING OF GRAVITY DATA

By:

Annida Rifqoh Zakiyyah

The Vera Basin is a marine basin area located at coordinates 108.2°-109° East Longitude and 5.3°-5.8° South Latitude. The research used is Bouguer anomaly data corrected for the Vera Basin in 2009. Spectral analysis is then used to estimate the basement depth of the data in the study area. The geophysical method is a way to determine the subsurface structure of the earth based on physical parameters. One of the geophysical methods is the gravity method which is based on differences in density. Studying the patterns of sub-basin and subsurface geological structures is sometimes difficult to identify through qualitative analysis of geology. The results obtained from the spectral analysis show that the average bedrock depth in the Vera Basin is 2.1 km. Residual anomaly 3D modeling produces a density that is compared with derivative analysis which shows a trap in the form of a fault trap, besides that it can also be predicted that the rock seal of the sedimentary basin in the form of shale which is part of the Talang Akar Formation which acts as an intraformational seal.

Keywords: Gravity, Spectral Analysis, FHD Analysis, SVD Analysis, 3D Modeling, Talang Akar Formation, Vera Basin.

Judul Skripsi : **INTERPRETASI SUB-CEKUNGAN VERA,
JAWA BARAT UTARA BERDASARKAN
PEMODELAN 2D DAN 3D DATA
GAYABERAT**

Nama : **Annida Rifqoh Zakriyyah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1955051011**

Jurusan : **Teknik Geofisika**

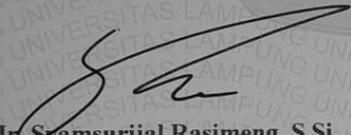
Fakultas : **Teknik**

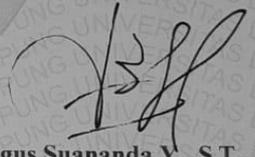
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

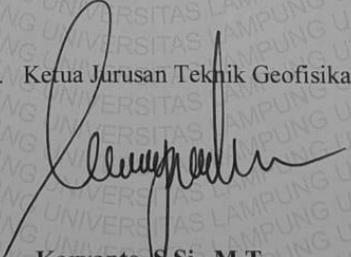
Pembimbing I

Pembimbing II


Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.
NIP. 19730716 200012 1002


Ida Bagus Suananda Y., S.T., M.T.
NIP. 19940729 201903 1010

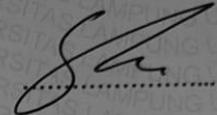
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


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

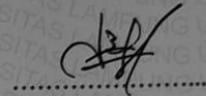
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

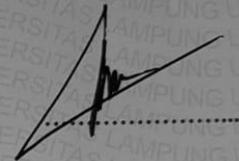
Ketua : Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Ida Bagus Suananda Y., S.T., M.T.



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



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Eng, Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 
NIP. 19750928 200112 1002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 31 Juli 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi dalam Skripsi dengan judul “Interpretasi Sub-Cekungan Vera, Jawa Barat Utara Berdasarkan Pemodelan 2D dan 3D Data Gayaberat” merupakan hasil karya mandiri dan tidak terdapat karya pihak lain yang diakui sebagai karya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka, saya bersedia diberikan sanksi sesuai dengan peraturan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 02 Agustus 2023

Annida Rifqoh Zakiyyah

NPM. 1955051011

RIWAYAT HIDUP



Penulis yaitu Annida Rifqoh Zakiyyah lahir di Subang, Jawa Barat pada tanggal 22 Maret 2001. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan ayah bernama Ahmad Zaenudin dan Ibu Mamah Salamah. Pendidikan yang pernah di tempuh oleh penulis yaitu dari taman Kanak-kanak (TK) di TK Miftahussa'adah, Sekolah Dasar di SD Negeri Purnama Alam (2007-2013), Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP IT Fitrah Insani Bandar Lampung (2013-2016) dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 9 Bandar Lampung (2016-

2019) dan pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung. Selama masa studi penulis aktif mengikuti organisasi kemahasiswaan yang ada seperti: Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika sebagai anggota bidang Sains dan Teknologi (Saintek) pada periode 2021-2022, Forum Silaturahmi dan Studi Islam (FOSSI-FT) sebagai anggota Kemuslimahan pada tahun 2021. Pada bulan Juni 2022 penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) Bandung dengan judul “Pemodelan dan Interpretasi Cekungan Vera Berdasarkan Model 2D Metode Gayaberat” dan penulis memulai Penelitian Tugas Akhir pada Bulan Januari 2023 Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) dengan judul penelitian “Interpretasi Sub-Cekungan Vera, Jawa Barat Utara Berdasarkan Pemodelan 2D dan 3D Data Gayaberat”. Dimana penulis berhasil lulus dengan gelar Sarjana Teknik pada tanggal 31 Juli 2023.

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan puji dan syukur kepada Allah SWT, atas berkat, rahmat serta karunia-Nya terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar.

Skripsi ini ku persembahkan kepada:

Bunda dan Ayah

Terimakasih sudah selalu menjadi tujuan utama penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Motivasi, kasih sayang, dan dukungan tiada henti menjadi penyemangat terbesar. Semoga kebahagiaan, keberkahan dan rasa syukur selalu mengiringi kehidupan kita. Aamiin.

Keluarga

Terimakasih sudah menjadi keluarga terbaik yang selalu memberikan dukungan dan semangat.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Terimakasih sudah menjadi tempat terbaik penulis selama berjuang mengejar gelar sarjana. Semoga semakin “Mak Kou Tanding”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“INTERPRETASI SUB-CEKUNGAN VERA, JAWA BARAT UTARA BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D DATA GAYABERAT”**. Adapun maksud dan tujuan dari penulis Skripsi ini yaitu untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selama penulisan Skripsi ini banyak sekali hambatan yang dialami, namun berkat adanya bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam Skripsi ini. 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 bagi pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 03 Agustus 2023

Penulis,

Annida Rifqoh Zakiyyah

NPM. 1955051011

SANWACANA

Puji dan syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat, hidayah dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Interpretasi Sub-Cekungan Vera, Jawa Barat Utara Berdasarkan Pemodelan 2D dan 3D Data Gayaberat”. Tak lupa shalawat serta salam yang selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad Shallallahu ‘Alaihi Wasallam yang selalu menjadi sari tauladan bagi kita semua.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, banyak pihak yang terlibat dan pada kesempatan ini penulis ingim mengucapkan rasa terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan anugerah-Nya dan memberikan kemudahan kepada penulis.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. dan ibu Mamah Salamah yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa kepada penulis.
3. Untuk diri sendiri, Annida Rifqoh Zakiyyah yang sudah berhasil dan mau berjuang sampai saat ini hingga bisa menyelesaikan pendidikan dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik.
4. Bapak Dr. Eng., Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Bapak Karyanto., S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
6. Bapak Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si. selaku pembimbing pertama penulis yang telah meluangkan waktu untuk banyak memberikan arahan, masukan serta koreksi sehingga penulis dapat menyelesaikan proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

7. Bapak Ida Bagus Suananda Yogi., S.T., M.T. selaku pembimbing kedua penulis yang juga telah banyak memberikan motivasi serta arahan dan juga waktunya kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Bapak Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU. Selaku penguji penulis yang telah memberikan waktu, saran serta masukannya.
9. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang penulis hormati, terimakasih atas semua ilmu yang telah diberikan.
10. Sahabat-sahabat perjuangan (Hayu, Aul, Emir) yang selalu memberikan semangat, bantuan, masukan, dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
11. Sahabat semasa maba hingga sekarang (Gita dan Adel) yang selalu memberikan motivasi, masukan dan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Adik-adik TG'20 (Tiara, Serly, Langnanda, Mala) yang selalu memberikan semangat, masukan dan motivasi dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
13. Kak Tata yang selalu meluangkan waktu untuk memberi semangat dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
14. Keluarga besar TG'19 Makoutanding (Keluarga Bapak Putra) yang menjadi bagian penting dalam masa kuliah, yang selalu kebersamai penulis dari sama maba, kemudian menjadi pengurus himpunan dan sampai pada masa-masa penyelesaian tugas akhir.
15. Kepada teman seperbimbingan dari mulai Kerja Praktik hingga Tugas Akhir di BBSPGL (Hayu dan Restu) yang selalu membantu dan memberikan semangat penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
16. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terimakasih.

Bandar Lampung, 03 Agustus 2023

Penulis

Annida Rifqoh Zakiyyah

NPM. 1955051011

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HUDUP	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Manfaat Penelitian.....	2
II. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Lokasi Daerah Penelitian.....	3
2.2. Tektonik dan Struktur Geologi Regional.....	4

2.3. Stratigrafi Regional.....	6
2.4. Sedimen dan Pengendapan	8
2.5. Sistem Petroleum.....	11
2.5.1. Batuan Induk (<i>Source Rock</i>)	11
2.5.2. Jalur Migrasi (<i>Migration Route</i>)	12
2.5.3. Batuan Reservoir (<i>Reservoir</i>)	12
2.5.4. Tipe Cebakan (<i>Trap</i>)	12
2.5.5. Batuan Penutup (<i>Seal Rock</i>)	13
III. TEORI DASAR.....	14
3.1. Metode Gayaberat.....	14
3.2. <i>Marine Gravity</i>	17
3.3. Anomali Bouguer	18
3.4. <i>Fast Fourier Transform (FFT)</i>	19
3.5. Analisis Spektrum.....	20
3.6. Pemisahan Anomali Regional dan Residual.....	23
3.7. Metode <i>Polynomial</i>	23
3.8. Densitas Gayaberat.....	25
3.9. <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i>	26
3.10. <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	27
3.11. <i>Forward Modelling</i>	29
3.12. <i>Inverse Modelling</i>	31
IV. METODELOGI PENELITIAN	34
4.1. Tempat dan Waktu Pelaksanaan.....	34
4.2. Alat dan Bahan	34
4.3. Jadwal Penelitian	35
4.4. Prosedur Penelitian	35
4.5. Diagram Alir.....	37

V. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
5.1. Data Pengamatan	38
5.2. Anomali Bouguer Lengkap	39
5.3. Analisis Spektrum.....	40
5.3.1.Lintasan 1 Analisis Spektrum	41
5.3.2.Lintasan 2 Analisis Spektrum	41
5.3.3.Lintasan 4 Analisis Spektrum	41
5.3.4.Lintasan 5 Analisis Spektrum	41
5.3.5.Lintasan 1 Analisis Spektrum	42
5.4. Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual.....	48
5.4.1. Anomali Regional	49
5.4.2. Anomali Residual.....	50
5.5. Analisis Derivatif.....	51
5.5.1. <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD)	51
5.5.2. <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	52
5.6. Pemodelan 3D.....	54
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	61
6.1. Kesimpulan.....	61
6.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai denditas batuan (Telford, dkk., 1990)	26
2. Operator Filter SVD	28
3. Jadwal pelaksanaan kegiatan penelitian	35
4. Kedalaman diskontinuitas pada Cekungan Vera berdasarkan analisis power spektrum	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	3
2. Pola Struktur Cekungan Vera dan Daerah Sekitarnya (Martodjojo, 1995)	5
3. Orientasi Struktur dan Patahan Paparan Sunda (Adnan and others, 1991).....	7
4. Stratigrafi Cekungan Vera ekuivalen dengan Cekungan Jawa Barat Utara... 10	
5. <i>Petroleum system</i> Cekungan Jawa Barat Utara	13
6. Gaya tarik menarik antar dua benda (Grandis, 2009)	16
7. Grafik hubungan antara LnA dan k (Toviatun, dkk., 2020)	22
8. Efek benda bentuk poligon gravitasi (Talwani dkk., 1959).....	30
9. Diagram alir	37
10. Peta sebaran data penelitian Cekungan Vera	38
11. Peta anomali Bouguer lengkap Cekungan Vera	39
12. Peta lintasan analisis analisis spektrum	40
13. Grafik LnA vs k lintasan 1	43
14. Grafik LnA vs k lintasan 2.....	44
15. Grafik LnA vs k lintasan 4.....	45
16. Grafik LnA vs k lintasan 5.....	46
17. Grafik LnA vs k lintasan 7.....	47
18. Peta anomali regional orde 3 Cekungan Vera.....	49
19. Peta anomali residual orde 3 Cekungan Vera	50
20. Peta overlay FHD gayaberat polinomial orde 3.....	51
21. Peta overlay SVD gayaberat polinomial orde 3 dengan menggunakan operator Elkins	52
22. Peta overlay residual dengan SVD kontur 0 dan FHD	53

23. Model 3D menggunakan <i>software</i> Grablox	54
24. Model 3D menggunakan <i>software</i> Geosoft Oasis Montaj	56
25. <i>Slicing</i> 2D Cekungan Vera.....	57
26. <i>Slicing</i> 2D dan penampang derivatif lintasan 1	58
27. <i>Slicing</i> 2D dan penampang derivatif lintasan 3	59

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Cekungan sedimen merupakan suatu depresi yang menjadi tempat terakumulasinya endapan sedimen dan dapat berperan sebagai wadah pengendapan serta pematangan sedimen yang mengandung hidrokarbon (Boggs, 2006). Struktur cekungan dapat diidentifikasi berdasarkan analisis geologi dan geofisika. Analisis geologi digunakan untuk memperkirakan keberadaan cekungan berdasarkan tektonika, fisiografi, serta tatanan geologi regional suatu wilayah. Sedangkan, analisis geofisika menggunakan data geofisika berdasarkan parameter fisis tertentu yang selanjutnya dilakukan interpretasi untuk pemodelan geologi bawah permukaan. Cekungan Jawa Barat Utara merupakan salah satu dari 128 cekungan sedimen yang dihasilkan oleh tim Badan Geologi pada tahun 2009 dan diketahui sebagai cekungan hidrokarbon.

Metode gayaberat merupakan metode geofisika non-destruktif yang telah digunakan secara luas untuk mengukur percepatan gravitasi bumi yang dipengaruhi oleh perbedaan densitas batuan dibawah permukaan. Metode ini sangat berguna dalam eksplorasi hidrokarbon, dan mineral dalam hal kemampuannya menentukan ketebalan mineral *overburden* yang membebani *bedrock* atau volume cadangan sedimen. Metode ini juga digunakan secara populer untuk mengeksplorasi sesar, cekungan sedimen, lembah sungai purba dan cadangan geothermal (Zaenudin dkk., 2020).

Analisis Derivatif merupakan salah satu metode pengolahan data untuk memudahkan dalam penentuan struktur dan batas kontak lapisan. Menurut Zaenudin dkk. (2013) dan Saibi dkk. (2006), Analisis Derivatif Gayaberat

mengobservasi perubahan nilai anomali gayaberat dari satu titik ke titik lain yang memiliki karakteristik tajam berupa nilai maksimum atau minimum pada kontak benda anomali serta metode yang sangat baik untuk mengetahui diskontinuitas dari suatu struktur bawah permukaan, khususnya patahan yang ada di daerah survei.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengidentifikasi Cekungan Vera berdasarkan anomali gayaberat.
2. Melakukan interpretasi kualitatif berdasarkan hasil analisis derivatif
3. Mendapatkan model Cekungan Vera berdasarkan model 2D dan 3D anomali gayaberat

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Data gayaberat yang digunakan merupakan data Anomali Bouguer terkoreksi Cekungan Vera yang merupakan data tahun 2009 hasil pengukuran Badan Geologi.
2. Penelitian ini dilakukan hingga analisis struktur geologi berdasarkan analisis derivatif dan pemodelan 3D data gayaberat.

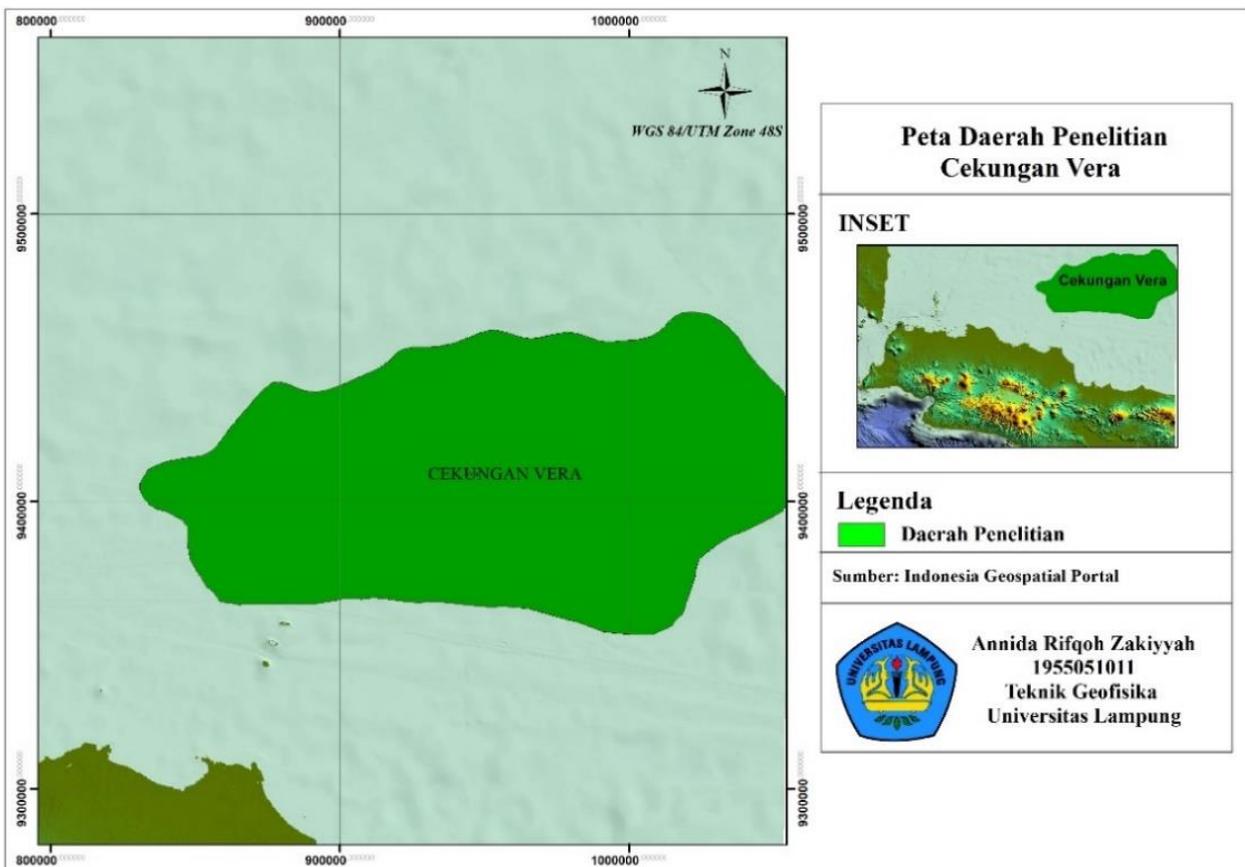
1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk mengetahui adanya struktur geologi dan Cekungan Vera yang berpotensi hidrokarbon yang dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Daerah Penelitian

Lokasi daerah penelitian yang digunakan pada penelitian ini terletak di Cekungan Vera. Cekungan ini termasuk kedalam Cekungan Jawa Barat Utara. Cekungan Vera terletak pada koordinat 108.2° - 109° BT dan 5.3° - 5.8° LS (**Gambar 1**). Cekungan ini terletak pada batas tenggara kraton Sunda (bersamaan dengan Cekungan Sunda dan Asri) yang terbentuk pada periode ekstensi Eosen – Oligosen dan periode kompresi pada saat Miosen Akhir.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

Cekungan Vera memiliki luas area sebesar 3.174 km², keseluruhannya merupakan daerah lepas pantai. Dasar penarikan batas cekungan yaitu deliniasi *isopach* pada 1.500 m. Dari data *isopach* tersebut terlihat ada dua buah sub-cekungan yang berada di sisi barat dan timur cekungan. Ketebalan sedimen berkisar antara 1.500 – 3.000 m dan yang paling tebal berada di sebelah timur cekungan (Bishop, 2000).

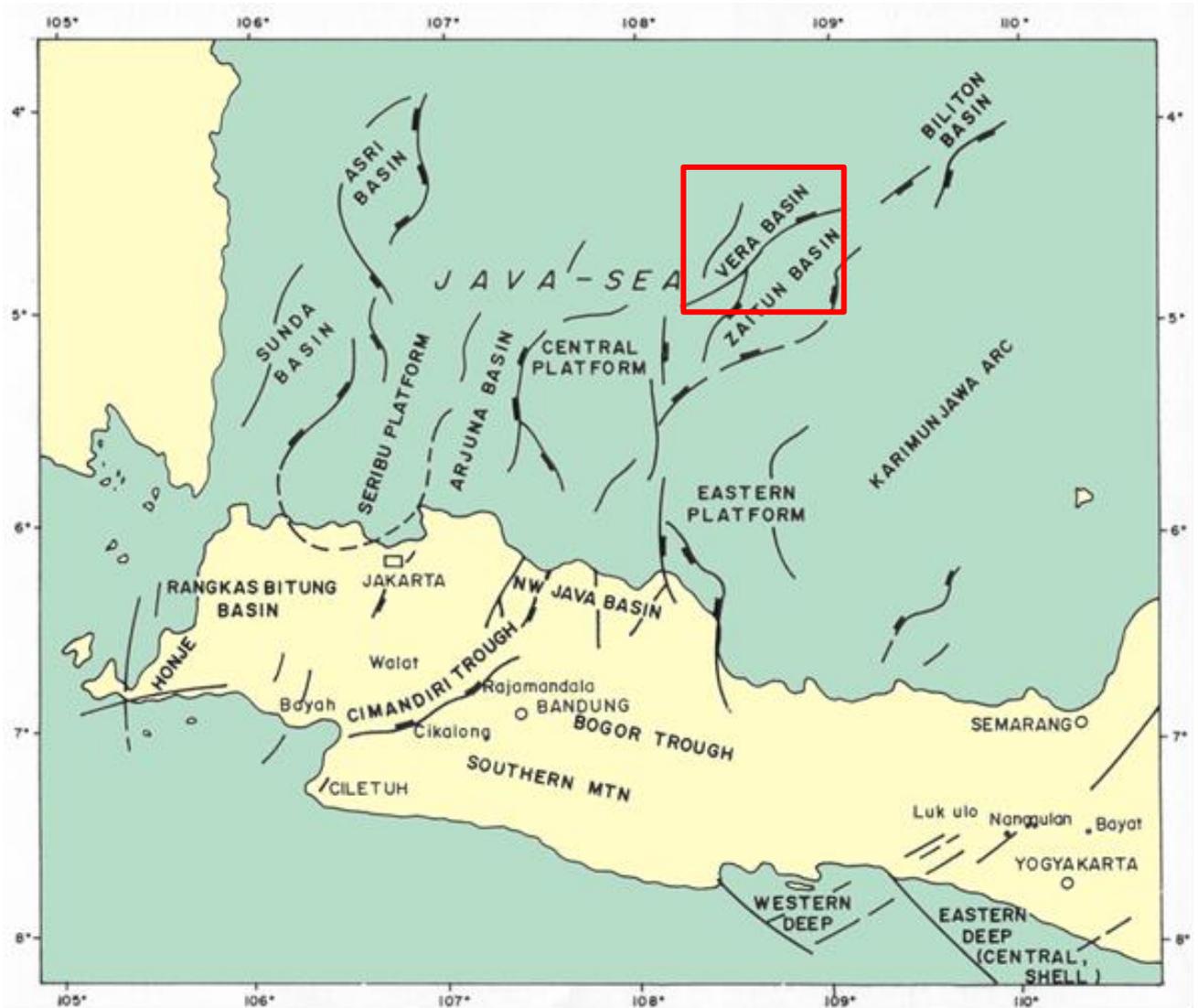
2.2. Tektonik dan Struktur Geologi Regional

Cekungan Vera terbentuk pada umur Mesozoikum, berupa depresi Tersier berarah timurlaut Sub-Cekungan Arjuna di Cekungan Sunda. Cekungan ini dibatasi oleh beberapa struktur sesar, khususnya di bagian selatan. Struktur sesar berarah baratdaya sampai baratdaya selatan, sama dengan arah struktur sesar Cekungan Biliton pada kala Mesozoikum.

Secara tektonik, Cekungan Vera merupakan depresi berarah timurlaut-baratdaya dengan sisi-sisi miringnya berarah barat dan diikat oleh sesar tajam di sebelah timur. Sedimen tertua berumur Oligosen, di atas sedimen Paleosen dan batuan dasar Pra-Tersier.

Pada **Gambar 2** tersebut merupakan pola struktur dari Cekungan Vera dan daerah sekitarnya. Secara umum, tatanan tektonik Cekungan Vera ekuivalen dengan Cekungan Jawa Barat Utara. Cekungan Jawa Barat Utara secara geodinamik saat ini berada diantara lempeng mikro Sunda dan lempeng India-Australia. Cekungan Jawa Barat Utara sebagian besar berada pada wilayah perairan Indonesia dan beberapa wilayah darat pulau Jawa. Bagian Cekungan Jawa Barat Utara yang berada di laut Jawa ini terdiri dari beberapa Sub-Cekungan seperti Sub-Cekungan Sunda, Asri, Vera dan Arjuna. Sedangkan untuk bagian yang berada di daratan Utara pulau Jawa seperti Sub-Cekungan Ciputat, Pasir Putih dan Jatibarang. Batas Selatan dari cekungan ini yang terletak pada daratan pulau Jawa dibatasi oleh palung Bogor (Bishop, 2000). Pembentukan struktur dan tektonik di daerah penelitian tidak lepas dari aktifitas lempeng Paparan Sunda yang dibatasi oleh kerak samudera di sebelah selatan dan pusat pemekaran kerak samudera di sebelah timurnya, di bagian barat dibatasi oleh kerak benua, di selatan dibatasi oleh batas

pertemuan kerak samudera dan benua yang berumur Kapur (ditandai adanya Komplek *Mélange* Ciletuh) dan tersingkap sejak Tersier. Sejak Tersier Awal, kerak secara umum miring ke selatan dan tersubduksi pada Oligosen Akhir.



Gambar 2. Pola struktur Cekungan Vera dan daerah sekitarnya.

Sejak umur tersier awal, lempeng ini miring ke arah selatan dan mengalami *subsiden*. Sistem subduksi yang terbentuk sejak Oligosen saat ini terletak pada *offshore* selatan Jawa. Stress kompresi dan ekstensi akibat dari pergerakan lempeng Australia dan India yang mengarah ke utara dan rotasi dari Borneo membentuk *rift* atau kompleks *half-graben* sepanjang tepi lempeng Paparan Sunda (sekarang Sumatera dan Jawa) pada umur Eosen hingga Oligosen. Kompleks ini mengarah utara selatan dan dibatasi oleh *plateau* yang tersesarkan.

Tektonik kompresi dan ekstensi dihasilkan oleh gaya tekan ke utara Lempeng Indo-Australia dan rotasi Kalimantan, membentuk *rift* atau *half-graben* sepanjang batas selatan Lempeng Paparan Sunda pada Eosen-Oligosen. Kompleks tersebut sejajar utara-selatan dan dipisahkan oleh dataran tinggi tersesarkan. Karakter struktur daratan terdiri atas perulangan struktur cekungan dan tinggian, dari barat ke timur, yaitu Tinggian Tangerang, Cekungan Ciputat, Tinggian Rengasdengklok, Cekungan Pasir Putih, Tinggian dan *Horst* Pamanukan-Kandanghaur, Cekungan Jatibarang, dan Cekungan Cirebon.

Pola struktur di lepas pantai termasuk Cekungan Sunda-Asri, Seribu *Platform*, Sub-cekungan Arjuna, Tinggian F, Cekungan Vera, Cekungan Jatibarang, *Eastern Shelf*, Cekungan Billiton, Busur Karimun Jawa, dan Palung Bawean. Beberapa bukti menunjukkan adanya gabungan antara *symmetrical sag* dan *half-graben* pada tektonik awal cekungan (Bishop, 2000).

Cekungan Vera dan sub-cekungan di sekitarnya, terletak di dalam Kraton Sunda. Cekungan-cekungan tersebut memiliki sejarah formasi yang lebih tua daripada Cekungan Jawa Barat Utara dan Sub-Cekungan *West Java Sea* (PERTAMINA-BEICIP, 1992).

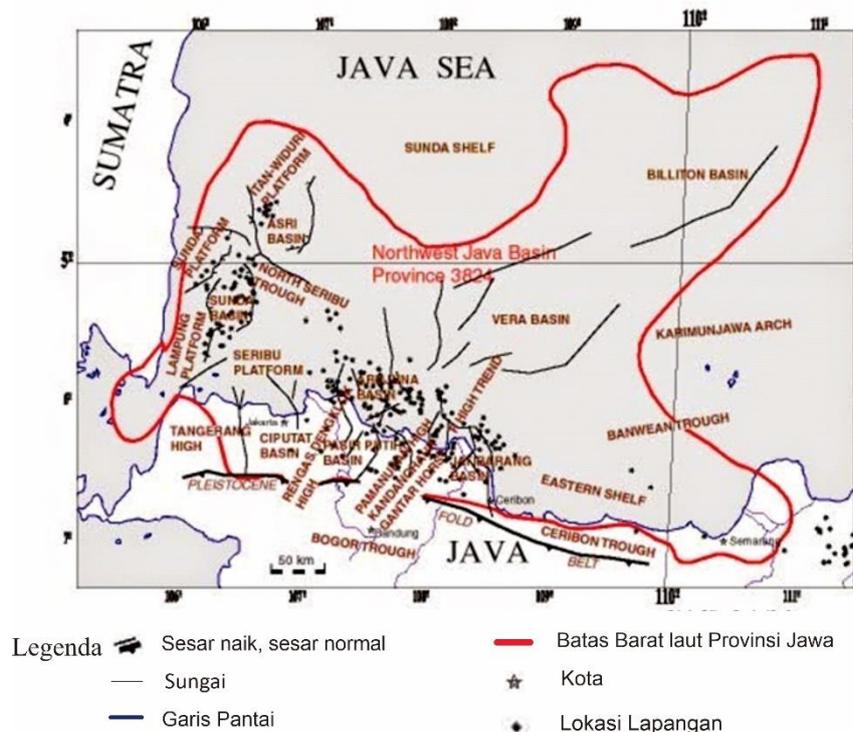
2.3. Stratigrafi Regional

Stratigrafi Cekungan Vera diasumsikan ekuivalen dengan stratigrafi Cekungan Jawa Barat Utara, yang terdiri dari dua kelompok sedimen, yaitu sedimen *syn-rift* yang didominasi oleh sedimen darat/non-marin dan sedimen *post-rift (sag)* yang didominasi oleh sikuen endapan marin dan transisi. Batuan dasar Pra-Tersier mewakili kerak benua Daratan Sunda, terdiri dari batuan beku dan metamorf berumur Kapur atau lebih tua, juga endapan klastik dan gamping yang terbentuk pada awal Tersier.

Endapan *syn-rift* (Paleosen/Eosen – Miosen Awal) diendapkan secara tidak selaras dengan ekuivalen Formasi Talang Akar, terdiri atas Anggota Zelda (bawah) yang berperan sebagai reservoir dan Anggota Gita (atas). Endapannya didominasi oleh sedimen non-marin yang terdiri atas fluviatil batupasir, serpih, dan batubara

(serpih dan batubara dari Anggota Zelda menjadi sumber batuan induk). Pengisian cekungan *post-rift/sag* (Miosen Awal – Plio-Plistosen) merupakan fase transgresif di daerah Laut Jawa, diendapkan secara selaras dengan batugamping ekuivalen Formasi Baturaja dan batupasir (merupakan bagian atas dari Anggota Gita). Selanjutnya berupa endapan laut dangkal yang terdiri dari Formasi Cibulakan Atas dan Formasi Parigi. Terakhir adalah Formasi Cisubuh yang berada di bawah endapan yang terjadi hari ini (**Gambar 3**).

Fasies laut dangkal pada akhir Oligosen dan awal Miosen muncul di Cekungan Vera, terpisahkan dan berkaitan dengan Sub-Cekungan Ardjuna. Pada saat terjadi endapan *pre-rift* dan *rift* Oligosen, terdapat sedimen yang tidak diketahui umurnya. Sedimen tersebut terendapkan tidak selaras di atas batuan dasar dan secara tidak selaras terendapkan pula di bawah endapan Oligosen Akhir dengan ketebalan 800-1.300 m, lingkungan pengendapan secara perlahan berubah dari lingkungan laut di bagian bawah dan menjadi lingkungan *non-marin*/delta di bagian atas (PERTAMINA-BEICIP, 1985).



Gambar 3. Orientasi struktur dan patahan Paparan Sunda (Adnan dkk, 1991).

2.4. Sedimen dan Pengendapan

Darman H & Sidi H (2000) menyebutkan bahwa stratigrafi dan sedimentasi Cekungan Jawa Barat dapat dibagi menjadi 2 kelompok besar, yaitu endapan yang terjadi pada fasa *rifting* dengan didominasi oleh endapan *non-marine* dan fasa setelah *rifting* yang didominasi oleh endapan laut.

Tektono stratigrafi Cekungan Jawa Barat secara umum dibagi menjadi lima, dari tua ke muda susunannya sebagai berikut:

a. Fasa Awal *Syn-Rift*

Pada fasa ini, batupasir fluvial dan fasies shale umumnya *onlap* terhadap fasies kipas alluvium, endapan fluvial diinterpretasikan sebagai endapan channel yang sejajar dengan jurus *rifting* dengan asosiasi endapan yang berupa sungai teranyam pada blok *rifting* yang turun (*hanging wall*). Fasies diatas endapan ini dijumpai berupa endapan transgressive dari *lacustrine* dengan komposisi shale hitam dan dicirikan dengan endapan yang menghalus ke atas. Lingkungan pengendapan darat (*continental*) dan *lacustrine* mendominasi sekuen ini. Tipe dari endapan ini adalah endapan klastik yang tertransformasi cukup dekat dengan batuan asalnya, seperti konglomeratik dan fanglomeratik alluvial, dan beberapa endapan batupasir fluvial.

b. Fasa *Syn-Rift*

Beberapa endapan pada fase ini diendapkan secara tidak selaras diatas endapan fasa awal *rifting*. Sedimen yang mengisi endapan ini adalah sedimen dari Formasi Talangakar. Formasi Talangakar ini memiliki dua anggota, yaitu *Lower Member* dan *Upper Member*. Umur dari sekuen ini berkisar antara Oligosen hingga Awal Miosen, dengan didominasi oleh sedimen *non marine* dan endapan interbeded dari batupasir fluvial, shale, dan batubara.

c. Fasa Awal Pembebanan (*sagging*)

Fasa ini dicerminkan dari dimulainya sekuen transgressif pada cekungan Jawa Barat, dimana terjadi kenaikan muka air laut selama Awal Miosen. Pada masa ini, tepi batas antara sub cekungan tidak dapat didefinisikan dengan jelas. Beberapa aktifitas tektonik yang bersifat lokal kemungkinan masih ada,

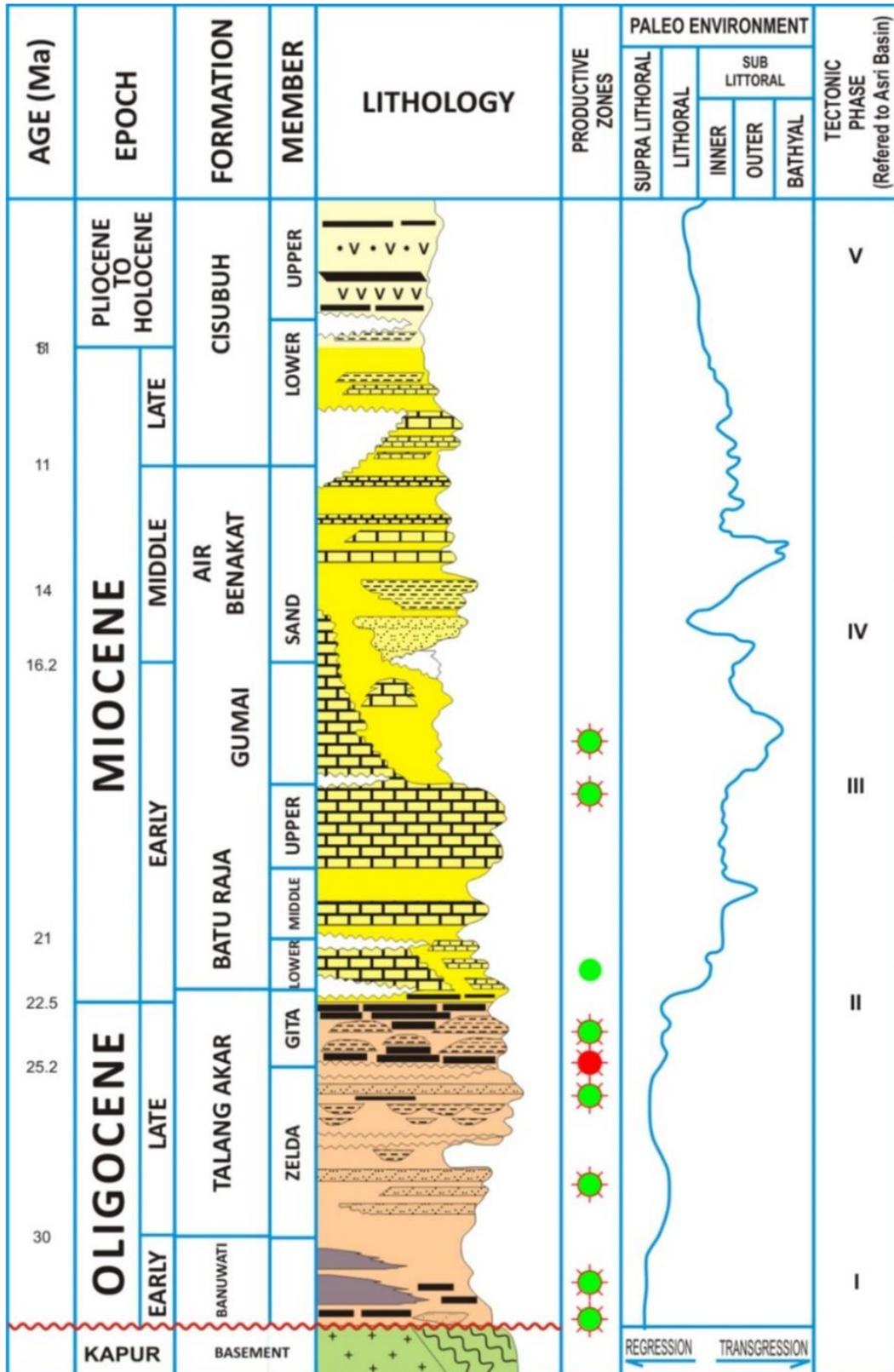
tetapi tidak terlalu signifikan. Akibatnya ruang pengendapan tidak terkontrol lagi oleh aktifitas *rifting*. Pada fasa ini, sedimen yang terendapkan merupakan sedimen dari Formasi Baturaja, dengan lingkungan pengendapan laut dan endapannya didominasi oleh batu gamping. Di beberapa lapangan batuan ini berfungsi sebagai reservoir yang menyimpan hidrokarbon.

d. Fasa Pembebanan

Pada fasa *sagging* ini didominasi oleh endapan sedimen laut dangkal (*neritic*) di Cekungan Utara Jawa Barat, sampai endapan deltaic di Cekungan Sumatera Selatan. Selama Miosen Tengah hingga Akhir Miosen, Cekungan Jawa Barat Utara tersambung oleh *sagging* yang besar. Di beberapa tempat secara local, terbentuk batugamping terumbu yang membentuk struktur build-up dan di Laut Jawa Barat bagian utara dikenal dengan Mid-Main Karbonat. Terbentuknya batuan karbonat ini merupakan awal dari transgresi system pada pengisian *sagging* selama Miosen Tengah hingga Miosen Akhir. Setelah terbentuknya sedimen ini, proses transgresi masih berlangsung hingga pembentukan batugamping reef pada bagian atas dari endapan utama *sagging* yang umumnya disebut dengan Formasi Pre-Parigi dan Parigi yang berisi batulumpur, serpih, batupasir glauconitic. Sedimen karbonat *build-up* ini terdiri dari packstone, wackstone.

e. Fasa Setelah Pembebanan

Akhir dari sekuen fasa *sagging* dicirikan dengan kehadiran sedimen yang berumur muda, yaitu batuan sedimen yang masuk dalam Formasi Cisubuh. Di area barat pengisian akhir *sagging* ini didominasi oleh batulumpur, batulempung laut dangkal dan kumpulan dari sedimen darat yang membentuk konglomerat, serta beberapa endapan vulkanik. Selain itu endapan darat yang umumnya dijumpai pada saat Pleistocene 1.5 Ma, adalah endapan batupasir fluvial dan batuan vulkanik klastik. Endapan pada fasa ini dicirikan oleh endapan yang *loose* dan belum terlitifikasi secara sempurna



Gambar 4. Stratigrafi Cekungan Vera ekuivalen dengan Cekungan Jawa Barat Utara

2.5. Sistem Petroleum

Sistem petroleum merupakan suatu sistem proses geologi minyak bumi yang memungkinkan hidrokarbon terkumpul dan terakumulasi. Jika salah satu elemen dari *petroleum system* tidak ada maka akumulasi hidrokarbon juga tidak dapat terbentuk.

Pada Cekungan Jawa Barat Utara hampir seluruh formasi dapat menghasilkan hidrokarbon yang mempunyai sifat berbeda, baik dari lingkungan pengendapan maupun porositas batuan.

Adapun *petroleum system* pada Cekungan Jawa Barat Utara diantaranya:

2.5.1. Batuan Induk (*Source Rock*)

Pada Cekungan Jawa Barat Utara terdapat tiga tipe utama batuan induk yaitu *lacustrine shale (oil prone)*, *fluvio deltaic coals*, *fluvio deltaic shale (oil dan gas prone)* dan *marine claystone (bacterial gas)* (Nobel dkk., 1997). Studi geokimia dari minyak mentah yang ditemukan di Pulau Jawa dan lapangan lepas Pantai Ardjuna menunjukkan bahwa *fluvio deltaic coals* dan serpih dari Formasi Talang Akar bagian atas berperan dalam pembentukan batuan induk yang utama.

1. *Lacustrin Shale*

Lacustrin Shale terbentuk pada suatu periode *syn rift* dan berkembang dalam dua macam fasies yang kaya mineral organik. Fasies pertama adalah fasies yang berkembang selama *initial-rift fill*. Fasies ini berkembang pada Formasi Banuwati dan ekuivalen Formasi Jatibarang sebagai *Lacustrin Shale* dan vulkanik klastik. Fasies kedua adalah fasies yang terbentuk selama akhir *syn rift* dan berkembang pada bagian bawah ekuivalen Formasi Talang Akar. Pada formasi ini batuan induk dicirikan oleh klastika npn marin berukuran kasar dan *interbedded* antara batupasir dengan *Lacustrin Shale*.

2. Fluvio Deltaic Coal dan Shale

Batuan induk ini dihasilkan oleh ekuivalen Formasi Talang Akar yang diendapkan selama post rift sag.

Fasies ini dicirikan oleh coal bearing sediment yang terbentuk pada sistem fluvial pada Oligosen Akhir. Batuan induk tipe ini menghasilkan minyak dan gas.

3. Marine Lacustrine

Batuan induk ini dihasilkan oleh Formasi Parigi dan Cisubuh pada cekungan laut. Batuan induk ini dicirikan oleh proses *methanogenic bacteria* yang menyebabkan degradasi material organik pada lingkungan laut.

2.5.2. Jalur Migrasi (*Migration Route*)

Migrasi hidrokarbon terbagi menjadi tiga, yaitu migrasi primer, sekunder, dan tersier. Migrasi primer merupakan perpindahan minyak bumi dari batuan induk dan masuk kedalam reservoir melalui lapisan penyalur. Migrasi sekunder dapat dianggap sebagai pergerakan fluida dalam batuan penyalur menuju trap. Sedangkan migrasi tersier yaitu pergerakan minyak dan gas bumi setelah pembentukan akumulasi yang nyata.

Jalur untuk perpindahan hidrokarbon mungkin terjadi dari jalur keluar yang lateral dan atau vertikal dari cekungan awal. Migrasi lateral mengambil tempat di dalam unit-unit lapisan dengan permeabilitas horizontal yang baik, sedangkan migrasi vertikal terjadi ketika migrasi yang utama dan langsung yang tegak menuju lateral. Jalur migrasi lateral berciri tetap dari unit-unit permeabel.

2.5.3. Batuan Reservoir (*Reservoir*)

Semua formasi dari Formasi Jatibarang sampai Formasi Parigi merupakan interval dengan sifat fisik reservoir yang baik. Minyak diproduksi dari rekahan volcanoclastic dari Formasi Jatibarang.

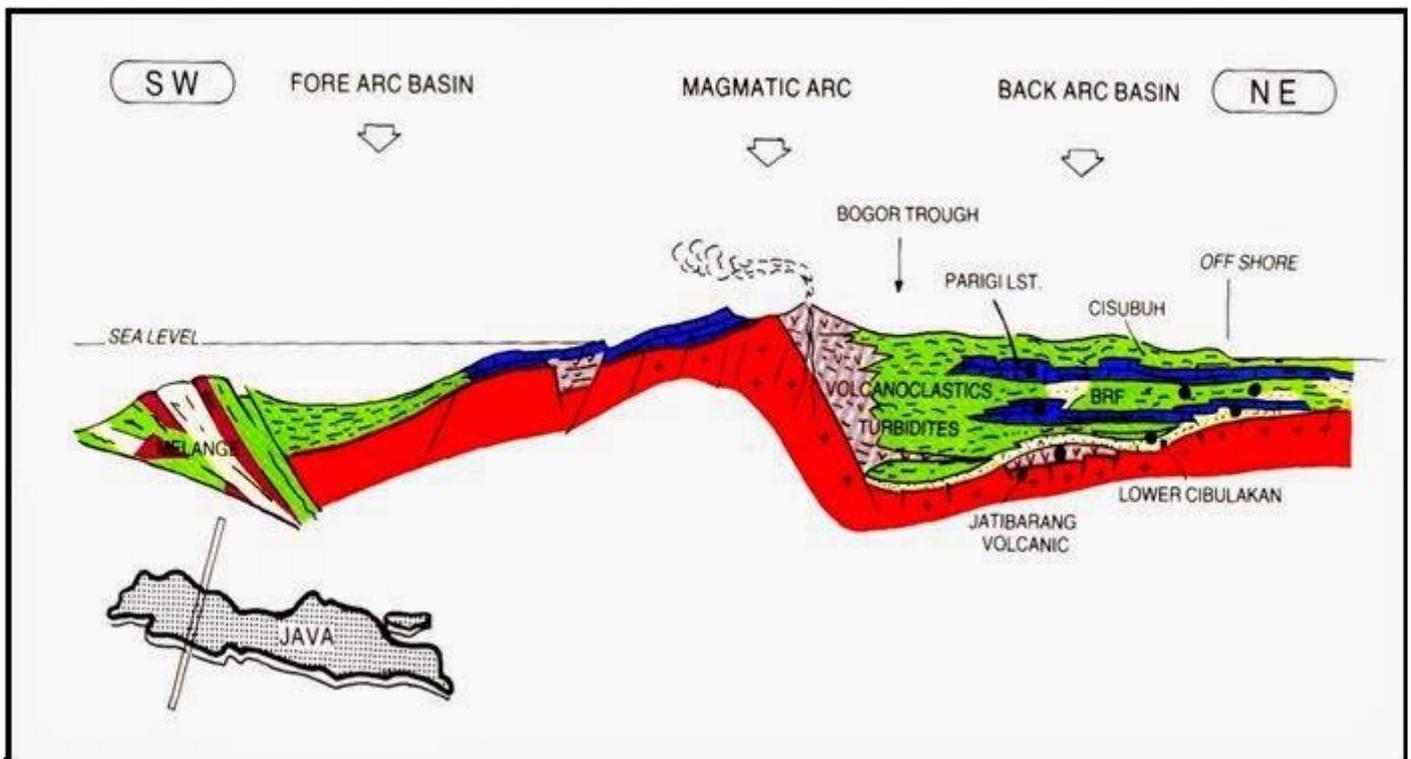
2.5.4. Tipe Cebakan (*Trap*)

Tipe cebakan (*Trap*) di semua sistem petroleum Jawa Barat Utara hampir sama, hal ini disebabkan evolusi tektonik dari semua cekungan sedimen sepanjang batas selatan dari Kraton Sunda, tipe struktur geologi dan mekanisme cebakan yang hampir sama. Bentuk utama struktur geologi adalah dome anticlinal yang lebar dan

cebakan dari blok sesar yang miring. Pada beberapa daerah reservoir *reefal built-up*, perangkat stratigrafi juga berperan. Perangkat stratigrafi yang berkembang umumnya dikarenakan terbatasnya penyebaran batugamping dan perbedaan fasies.

2.5.5. Batuan Penutup (*Seal Rock*)

Lapisan penutup atau lapisan tudung merupakan lapisan impermeabel yang dapat menghambat atau menutup jalannya hidrokarbon. Lapisan ini juga biasa disertakan dengan lapisan *overburden*. Litologi yang sangat baik adalah batulempung dan batuan evaporit. Pada Cekungan Jawa Barat Utara, hampir setiap formasi memiliki lapisan penutup yang efektif. Namun formasi yang bertindak sebagai lapisan penutup utama adalah Formasi Cisubuh, karena formasi ini memiliki litologi yang baik atau impermeabel.



Gambar 5. *Petroleum system* Cekungan Jawa Barat Utara

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gayaberat

Metode gravitasi atau gaya berat merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan berdasarkan perbedaan densitas suatu daerah penelitian ($\rho = \text{gram/cc}$), yang mana perbedaan densitas ini diakibatkan oleh ketidakseragaman struktur geologi pada bawah permukaan (Andari dkk, 2019). Ilmu yang mendasari konsep metode gravitasi adalah hukum Newton. Hukum ini menjelaskan bahwa gaya tarik-menarik antara dua partikel akan berbanding lurus dengan hasil kali dua massa dan berbanding terbalik dengan jarak (Telford, 1990). Pernyataan tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \gamma \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right) r_1 \quad (1)$$

dengan:

F = Gaya yang bekerja pada m_2 (N)

γ = Konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$)

r_1 = Arah vektor satuan

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

Dalam metode gravitasi, nilai yang terukur bukanlah nilai gaya gravitasi (F) melainkan nilai percepatan gravitasi (g). Hubungan antara keduanya dijelaskan pada hukum Newton II yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

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

$$g = \left(\gamma \frac{Me}{Re^2} \right) r_1$$

dengan:

F = Gaya yang bekerja pada m_2 (N)

r_1 = Arah vektor satuan

r = Jarak antar partikel massa (m)

g = Percepatan gravitasi ($\frac{m}{s^2}$)

Me = Massa bumi (kg)

Re = Jari-jari (m)

Respon anomali gravitasi terhadap densitas suatu massa biasa dilihat dari potensial gravitasi. Potensial gravitasi ini akan berkaitan dengan percepatan gravitasi, yang mana percepatan gravitasi merupakan suatu medan potensial yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$g = \left(\gamma \frac{Me}{Re^2} \right) r_1 \quad (3)$$

Prinsip dasar fisika yang menjadi dasar metode gravitasi adalah hukum Newton. **Gambar 6** menginformasikan hukum Newton yang menjelaskan tentang gaya tarik menarik antara dua buah massa yang terpisah dengan jarak r , dapat dituliskan dalam rumus berikut.

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \hat{r} \quad (4)$$

Dimana:

\vec{F} = Gaya tarik menarik (N)

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

\vec{r} = Jarak antara dua buah benda

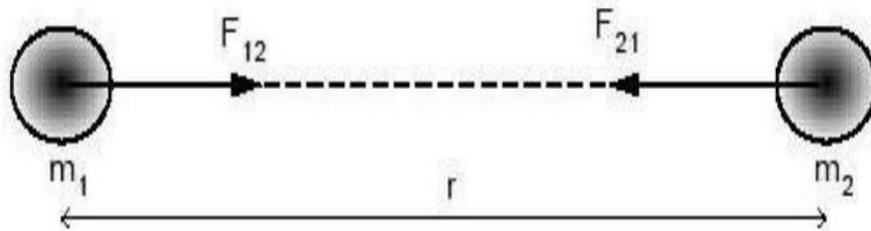
\hat{r} = Vector satuan yang arahnya dari m_1 dan m_2

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

Hukum gravitasi Newton menyatakan apabila \vec{F} adalah nilai gaya gayaberat; G merupakan konstanta gayaberat universal ($6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$); m_1 dan

m_2 adalah massa; r adalah jarak; \hat{r} adalah unit vektor pada arah koordinat r yang berasal dari pusat massa.

Adapun ilustrasi tersebut dapat dilihat pada **Gambar 6** berikut.



Gambar 6. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).

Metode gravitasi sering digunakan untuk mempelajari batuan dasar, lubang di dalam massa batuan dan shaft terpendam karena metode ini sensitif terhadap perubahan vertikal. Medan gravitasi yang bervariasi karena perbedaan massa batuan di bawah permukaan bumi merupakan hal yang diperhatikan dalam metode gravitasi. Medan gravitasi yang teramati dalam metode ini yaitu perbedaan antara titik observasi yang satu dengan yang lainnya. Sumber anomali di bawah permukaan bumi dapat berpengaruh terhadap nilai percepatan gravitasi bumi dan medan gravitasi.

Medan gravitasi akibat sumber anomali dengan arah vertikal yang bervariasi disebut sebagai kedudukan sumber anomali. Nilai medan gravitasi mengalami perubahan karena adanya sumber anomali yang nilainya lebih kecil dari nilai medan gravitasi bumi yang disebut anomali gravitasi Grant dan West (Purnomo, 2013). Struktur bawah permukaan bumi dapat digunakan karena adanya anomali gravitasi. Anomali gravitasi merupakan perbedaan nilai percepatan gravitasi jika dibandingkan dengan daerah disekitarnya. Anomali gravitasi ada karena beberapa faktor pendorong, diantaranya pengendapan mineral, alterasi hidrotermal, patahan, intrusi batuan, variasi porositas dan lain-lain (Purnomo, 2013).

3.2. *Marine Gravity*

Marine Gravity atau Gayaberat Laut merupakan sumber data penting untuk membangun model gravitasi bumi dan menyelidiki tektonik global dan struktur margin benua, yang dapat diturunkan dari pengukuran altimeter radar ketinggian permukaan laut atau kemiringan. Pengembangan model medan gravitasi laut terutama bergantung pada akurasi dan resolusi akumulasi data altimeter multisatelit. Pada penelitian Zhang dkk. Pada tahun 2016, yang terletak di Laut Cina, terutama Laut Cina Selatan, memiliki topografi dasar laut yang relatif kompleks.

Kualitas model medan gravitasi laut yang berasal dari altimeter satelit dimanifestasikan pada dua aspek sebagai akurasi dan resolusi, yang terutama tergantung pada faktor-faktor berikut: (1). Presisi rentang altimeter (2). Kepadatan lintasan spasial dan laju pengambilan sampel sepanjang lintasan (3). Orientasi lintasan yang beragam (4) Akurasi koreksi pasang surut air laut yang dimodelkan, terutama di atas wilayah pesisir, dan (5). Low pass filter yang diterapkan pada data profil. Keakuratan pengamatan altimeter dapat ditingkatkan melalui pelacakan ulang bentuk gelombang dan penyaringan low-pass yang cermat. Selain itu, persyaratan kepadatan dan keragaman dapat dipenuhi melalui pengambilan sampel ulang sepanjang jalur dan suplemen data baru dengan misi geodetik atau parameter orbital yang berbeda. Dalam beberapa tahun terakhir, algoritma untuk melacak kembali bentuk gelombang altimeter telah mengalami perkembangan yang cukup besar, yang memberikan peluang besar untuk meningkatkan ketepatan data altimeter yang ada (Zhang dkk., 2016).

Pengamatan gravitasi yang dilakukan pada *moving platform*, baik kapal maupun pesawat terbang memiliki peran penting dalam studi eksplorasi meskipun umumnya akurasi dan resolusi spasial yang lebih rendah dibanding dengan pengukuran darat. Keunggulan dari pengukuran *moving platform* adalah survei dapat dilakukan secara cepat dan efisien di wilayah laut dan di wilayah darat yang tidak mudah diakses untuk survei darat. Pengukuran diatas kapal umumnya dilakukan sebagai pengamatan tambahan pada kapal yang melakukan survei untuk

tujuan lain, sedangkan pengukuran udara dilakukan menggunakan helikopter atau pesawat terbang yang diterbangkan khusus untuk melakukan survei gravitasi.

Untuk meningkatkan resolusi pengukuran laut secara kasar terbatas pada urutan kedalaman air, gravimeter laut ditempatkan di kapal ditarik di belakang kapal laiut di sepanjang lintasan hanya beberapa puluh meter di atas dasar laut. Sistem ini memiliki kemampuan pengulangan kurang dari 0,4 mGal, digunakan untuk meningkatkan resolusi pengukuran gravitasi laut sambil tetap melakukan pengamatan dengan cepat dan terus menerus. Kedalaman dan lokasi *hidrophone*, dipantau dan digunakan untuk mengurangi pengamatan ke bentuk anomali dan menghilangkan efek Eotvos dari pengukuran.

Pengukuran gravitasi yang dibuat dari platform yang bergerak, seperti kapal atau pesawat terbang, diubah oleh komponen vertikal percepatan sentrifugal dan coriolis yang bekerja pada instrumen gravitasi karena gerakannya diatas permukaan bumi. Koreksi alterasi ini adalah koreksi Eotvos, Baron Roland von Eotvos merupakan yang pertama kali mengenali efek dalam pengukuran gravitasi pada awal abad kedua puluh. Efek ini penting karena bisa jauh lebih besar daripada kebanyakan anomali yang menarik. Pengamatan di kapal merupakan subjek efek Eotvos yang diukur dalam puluhan miligal. Yang dibuat di platform udara biasanya dalam ratusan miligal karena kecepatannya yang meningkat dengan cepat (Hinze, et.al., 2012).

3.3. Anomali Bouguer

Anomali Bouguer merupakan penjumlahan antara anomali regional dan anomali residual. Kedua anomali tersebut saling berinteraksi dan menimbulkan anomali yang saling tumpang tindih (Purnomo, 2013). Anomali Bouguer dihasilkan dari adanya perbedaan antara densitas batuan atau hal lain pada daerah dangkal dan dibawah permukaan bumi. Anomali Bouguer ini menggambarkan persebaran dari gayaberat untuk memperkirakan gambaran kondisi bawah permukaan berdasarkan kontras densitas batuan. Persamaan untuk mendapatkan nilai anomali Bouguer adalah (Kamilah, 2022):

$$\begin{aligned}
 ABL &= g_{obs} - (g_{\phi} - FAC + BC - TC) \\
 ABL &= g_{obs} - g_{\phi} + FAC - BC + TC
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

dengan:

ABL = Anomali Bouguer Lengkap

g_{obs} = Nilai gravitasi observasi (mGal)

g_{ϕ} = Nilai gravitasi koreksi lintang (mGal)

FAC = *Free Air Correction* (Koreksi Udara Bebas)

BC = *Bouguer Correction* (Koreksi Bouguer)

TC = *Terrain Correction* (Koreksi Medan)

3.4. *Fast Fourier Transform (FFT)*

Fast Fourier Transform, yaitu suatu algoritma untuk menghitung transformasi fourier diskrit dengan cepat dan efisien, *Fast Fourier Transform (FFT)* mengubah data dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. *Fast Fourier Transform (FFT)* adalah metode yang sangat efisien untuk menghitung koefisien dari Fourier diskrit ke suatu finite sekuen dari data yang kompleks. Karena substansi waktu yang tersimpan lebih dari metoda konvensional, *Fast Fourier Transform* merupakan aplikasi temuan yang penting dalam sejumlah bidang yang berbeda seperti analisis spektrum, *speech and optical signal processing*, serta desain filter digital. Algoritma FFT berdasarkan atas prinsip pokok dekomposisi perhitungan *Discrete Fourier Transform* dari suatu sekuen sepanjang N kedalam transformasi diskrit Fourier secara berturut-turut lebih kecil. Cara prinsip ini diterapkan memimpin ke suatu arah suatu variasi dari algoritma yang berbeda, dimana semuanya memperbandingkan peningkatan kecepatan perhitungan (Sipasulta, 2014).

Karena banyak sinyal-sinyal dalam sistem komunikasi yang bersifat kontinyu, sehingga untuk kasus sinyal kontinyu kita menggunakan transformasi fourier. Secara matematis hubungan antara gelombang $s(t)$ yang akan diidentifikasi gelombang sinusnya (*input*) dan $S(f)$ merupakan hasil dari transformasi Fourier. Transformasi Fourier didefinisikan pada rumus berikut:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

Dimana $S(f)$ merupakan sinyal dalam domain frekuensi (*frequency domain*), $s(t)$ merupakan sinyal dalam domain waktu (*time domain*), dan $e^{-j2\pi ft}$ merupakan konstanta dari sebuah sinyal, f adalah frekuensi dan t adalah waktu.

3.5. Analisis Spektrum

Analisis spektrum merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui kedalaman anomali. Analisis spektrum menggunakan prinsip transformasi fourier yaitu dengan mengubah data dari domain ruang menjadi domain bilangan gelombang. Gradien dari grafik analisis spektrum besarnya sebanding dengan kedalaman bidang anomali, dimana gradien yang bernilai besar mencerminkan anomali regional sedangkan gradien yang bernilai lebih kecil mencerminkan anomali residual (Zulfawati, 2019).

Untuk melakukan analisis spektrum terlebih dahulu dilakukan gridding data anomali. Selanjutnya, dibuat profil penampang lintasan yang dapat mewakili daerah penelitian yang selanjutnya akan dilakukan FFT (*Fast Fourier Transform*), dari hasil FFT tersebut akan dihasilkan grafik, dalam grafik tersebut terdapat 3 gradien yaitu gradien regional, residual, dan noise (Setiadi dkk, 2010)

Untuk analisis lebih lanjut, amplitudo gelombang-gelombang sinus tersebut dilanjutkan sebagai fungsi dari frekuensinya. Secara matematis hubungan antara gelombang $s(t)$ yang akan diidentifikasi gelombang sinus (input) dan $S(f)$ sebagai hasil dari transformasi Fourier diberikan oleh persamaan (6).

Pada metode gayaberat, spektrum diturunkan dari potensial gayaberat yang teramati pada suatu bidang horizontal dimana transformasi Fourier sebagai berikut sebagaimana menurut Blakely pada tahun 1995:

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|K|} \quad (7)$$

Dimana, $z_1 > z_0, |k| \neq 0$, U adalah potensial gayaberat, μ adalah anomali rapat massa, γ adalah konstanta gayaberat dan r adalah jarak. Percepatan gravitasi dihubungkan pada potensial gravitasi oleh persamaan $g = \nabla U$. Gerak vertikal gravitasi yang disebabkan oleh suatu titik massa adalah turunan dari potensial gayaberat:

$$g_z = G_m \frac{\partial 1}{\partial r} \quad (8)$$

$$F(g_z) = G_m F\left(\frac{\partial 1}{\partial r}\right) \quad (9)$$

$$F(g_z) = G_m \partial z \partial F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (10)$$

Transformasi Fourier pada lintasan yang diinginkan adalah:

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi G_m e^{\frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|}}, z_0 > z_1 \quad (11)$$

Jika distribusi rapat massa memiliki sifat random dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gaya berat, maka $m=1$ sehingga hasil transformasi fourier anomali gayaberat menjadi:

$$A = C e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (12)$$

Dimana A adalah amplitude dan C adalah 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.

$$\ln A = \ln (2\pi G_m e^{|k|(z_0-z_1)}) \quad (13)$$

$$\ln A = (z_0 - z_1) |k| + \ln C \quad (14)$$

Persamaan di atas dapat dirumuskan dalam persamaan garis lurus:

$$y = mx + c \quad (15)$$

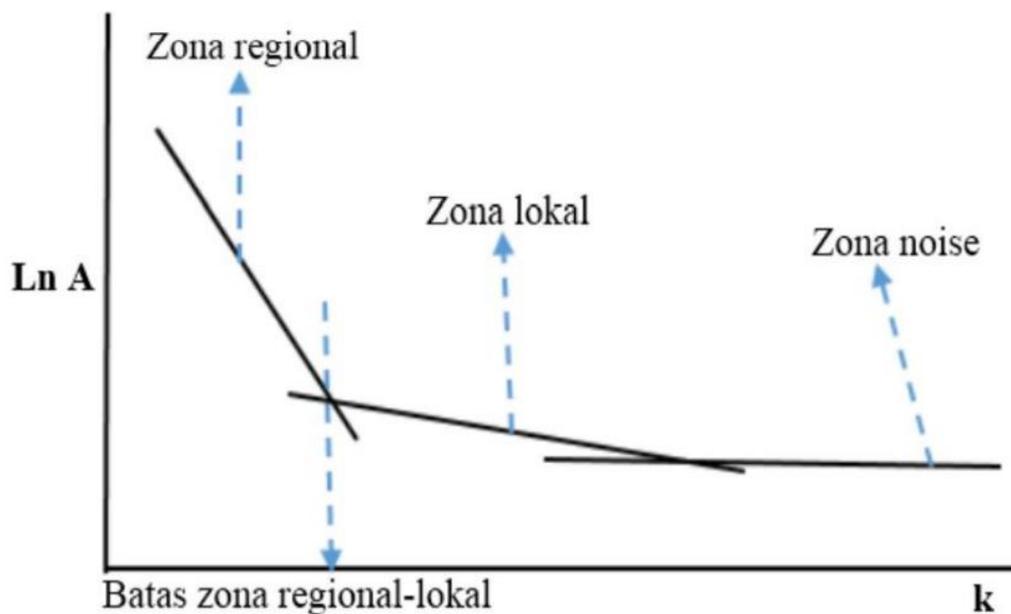
Dimana $\ln A$ sebagai sumbu y, $|k|$ sebagai sumbu x, dan $(z_0 - z_1)$ sebagai kemiringan garis (gradien). Oleh karena itu, kemiringan garisnya merupakan kedalaman bidang dalam dan dangkal. $|k|$ sebagai sumbu X didefinisikan sebagai bilangan gelombang yang besarnya $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan satuannya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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\lambda}{k_c \Delta x} \quad (16)$$

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

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (17)$$

Dimana Δx adalah domain spasi yang akan digunakan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c adalah bilangan gelombang *cut-off*. Dalam proses ini akan terbentuk kurva hubungan antara f (frekuensi) dan k (bilangan gelombang) seperti pada **Gambar 7**. Semakin besar nilai k maka nilai frekuensi akan tinggi.



Gambar 7. Grafik hubungan antara $\ln A$ dan k (Toviatun dkk., 2020).

3.6. Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Anomali Bouguer merupakan sinyal geofisika yang kompleks dimana merefleksikan kombinasi efek gravitasi dibawah permukaan yang diakibatkan oleh sumber yang berbeda pada kedalaman dan ukuran yang berbeda. Dari pengukuran metode gayaberat dapat menghasilkan anomali Bouguer yang merupakan superposisi dari anomali regional dan anomali residual (Blakely, 1995). Anomali Bouguer tidak dapat langsung untuk menginterpretasi sumber penyebab anomali tersebut sehingga perlu dilakukan pemisahan anomali regional dan anomali residual gayaberat (Abokhodair, 2011).

Anomali regional merupakan anomali gayaberat yang diakibatkan oleh sumber anomali pada kedalaman yang dalam dan memiliki ukuran yang besar (Nishijima dan Naritomi, 2017). Anomali residual merupakan anomali yang berhubungan dengan frekuensi tinggi, sedangkan anomali regional berhubungan dengan frekuensi rendah. Tujuan dari dilakukannya proses pemisahan anomali yaitu untuk memperoleh nilai anomali regional dan anomali residual yang representatif dengan keadaan bawah permukaan yang sebenarnya (Sari, 2012).

3.7. Metode *Polynomial*

Pada umumnya terdapat beberapa metoda dalam proses pemisahan regional residual yang akan digunakan untuk memperoleh nilai anomali regional, diantaranya:

1. *Low Pass Filter*
2. *Trend Surface Analysis* atau *Polynomial Fitting*
3. *Upward Continuation*

Pada dasarnya metode pemisahan dilakukan untuk memisahkan anomali berdasarkan frekuensi yang berhubungan dengan kedalaman sumber anomali tersebut. Anomali regional berhubungan dengan frekuensi rendah, sedangkan anomali residual berhubungan dengan anomali tinggi. Tujuan dilakukannya proses pemisahan ini adalah untuk memperoleh nilai anomali regional dan residual yang representatif dengan keadaan bawah permukaan yang sebenarnya (Sari, 2012).

Metode polinomial atau dikenal dengan *trend surface analysis* mengasumsikan bahwa persamaan polinomial dapat memodelkan bentuk bidang bumi yang kehalusannya dikontrol oleh orde polinomialnya. Metode polinomial merupakan sebuah metode yang berupaya memodelkan sebuah model dengan pendekatan persamaan matematis yaitu persamaan polinomial.

Metode *Polynomial* sering disebut dengan metode kuadrat terkecil yang mengasumsikan bahwa permukaan polinomial dapat menggambarkan model bidang regional yang lebih halus yang ditentukan oleh orde polinomial. Peta kontur anomali regional yang dihasilkan sudah cenderung tetap dan tidak mengalami perubahan ketika orde yang diberikan semakin besar. Pada umumnya *Polynomial fitting* mencakup bentuk konstan (Purnomo dkk., 2013).

Prinsip dasar pada penggunaan metode ini yaitu mencari koefisien nilai 'a' pada persamaan polinomial yang digunakan dengan membuat turunan pertama dari persamaan polinomial yang digunakan bernilai sama dengan nol. Sehingga akan dapat dihitung koefisien-koefisien nilainya. Setelah didapatkan nilai koefisien dari persamaan polinomial yang digunakan, maka akan dapat dihitung nilai anomali regional dengan persamaan polinomial yang sudah diketahui nilai-nilai koefisiennya. Kemudian akan dapat dihitung pula anomali residualnya dengan mengurangkan anomali Bouguer dengan anomali regional hasil perhitungan dengan metode polinomial yang digunakan. Persamaan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

$$T(x_i, y_i) = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + \varepsilon \quad (18)$$

Dimana:

$T(x_i, y_i)$ = nilai estimasi dari variabel dependen.

b_0 = titik perpotongan pada sumbu y.

x dan y = dua variabel independen yang dipertimbangkan.

b_1 = perubahan yang sesuai di $T(x_i, y_i)$ untuk setiap perubahan satuan dalam x; sedangkan y tetap konstan.

b_2 = perubahan yang sesuai di $T(x_i, y_i)$ untuk setiap unit perubahan dalam y; sementara x dipertahankan konstan.

Disini b_0, b_1, b_2 dikenal sebagai koefisien regresi.

Dari persamaan (18) kesalahan ε dinyatakan sebagai

$\varepsilon = \sum(T(x_i, y_i) - (b_0 + b_1x_i + b_2y_i))^2$ yang harus diminimalkan

Dari konsep kalkulus kita memiliki persamaan berikut;

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_0} = -2 \sum(T(x_i, y_i) - (b_0 + b_1x_i + b_2y_i)) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_1} = -2 \sum(T(x_i, y_i) - (b_0 + b_1x_i + b_2y_i))x_i = 0$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_2} = -2 \sum(T(x_i, y_i) - (b_0 + b_1x_i + b_2y_i))y_i = 0$$

Mengatur ulang dan menulis persamaan (19) dalam bentuk matriks $Am = d$

$$\begin{pmatrix} n & \sum x_i & \sum y \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y \\ \sum y & \sum x_i y & \sum y^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sum(T(x_i, y_i)) \\ \sum(T(x_i, y_i)x_i) \\ \sum(T(x_i, y_i)y) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Berikut merupakan persamaan dengan tiga yang tidak diketahui dan tiga persamaan yang dapat diselesaikan sebagai kuadrat terkecil dari masalah yang ditentukan.

$$m^{est} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = [A^T A]^{-1} A^T d \quad (21)$$

Persamaan (21) merupakan solusi parameter permukaan polinomial derajat pertama dua dimensi dari persamaan (18) atau persamaan (20). Pendekatan serupa dapat diikuti untuk mendapatkan solusi untuk orde kedua, ketiga dan yang lebih tinggi.

3.8. Densitas Gayaberat

Rapat massa (*density*) batuan merupakan besaran utama dalam menentukan nilai percepatan gravitasi. Variasi rapat massa pada batuan sedimen disebabkan oleh tekanan gaya tektonik. Densitas batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu rapat massa butir pembentuknya, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, serta pemadatan akibat tekanan dan pelapukan yang dialami batuan

tersebut (Kirbani dalam Sawitri, 2021). Berikut merupakan tabel densitas batuan (Tabel 1).

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

Jenis Batuan	Batas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Batuan Sedimen		
<i>Alluvium</i>	1.96 – 2.00	1.98
<i>Clay</i>	1.63 – 2.60	2.21
<i>Gravel</i>	1.70 – 2.40	2.00
<i>Loess</i>	1.40 – 1.93	1.64
<i>Silt</i>	1.80 – 2.20	1.93
<i>Soil</i>	1.20 – 2.40	1.92
<i>Sand</i>	1.70 – 2.30	2.00
<i>Sandstone</i>	1.61 – 2.76	2.35
<i>Shale</i>	1.77 – 3.20	2.40
<i>Limestone</i>	1.93 – 2.90	2.55
<i>Dolomit</i>	2.28 – 2.90	2.70
<i>Chalk</i>	1.53 – 2.60	2.01
<i>Halite</i>	2.10 – 2.60	2.22
<i>Glacier Ice</i>	0.88 – 0.92	0.90
Batuan Beku		
<i>Rhyolit</i>	2.35 – 2.70	2.52
<i>Granit</i>	2.50 – 2.81	2.64
<i>Andesit</i>	2.40 – 2.80	2.61
<i>Syenite</i>	2.60 – 2.95	2.77
<i>Basalt</i>	2.70 – 3.30	2.99
<i>Gabro</i>	2.70 – 3.50	3.03
Baruan Metamorf		
<i>Gneiss</i>	2.59 – 3.00	2.80
<i>Schist</i>	2.39 – 2.90	2.64
<i>Phylite</i>	2.68 – 2.80	2.74
<i>Slate</i>	2.70 – 2.90	2.79
<i>Granulite</i>	2.52 – 2.73	2.65
<i>Amphibolite</i>	2.90 – 3.04	2.96
<i>Eclogite</i>	3.20 – 3.54	3.37

3.9. *First Horizontal Derivative (FHD)*

First Horizontal Derivative atau FHD anomali gayaberat merupakan perubahan nilai anomali gayaberat dari suatu titik ke titik lain yang memiliki karakteristik tajam berupa nilai maksimum dan nilai minimum pada kontak

anomali, sehingga metode ini dapat digunakan untuk menunjukkan batas dari suatu struktur geologi berdasarkan anomali gayaberasat.

$$HG^{1ST} = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (22)$$

Dimana $\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)$ dan $\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)$ merupakan turunan horizontal gayaberasat pada arah x dan y satuan dari HG adalah mGal/m (Zaenudin dkk., 2013).

3.10. *Second Vertical Derivative (SVD)*

Second Vertical Derivative atau SVD merupakan metode yang digunakan untuk memunculkan sumber-sumber anomali yang bersifat dangkal atau lokal karena bersifat sebagai high pass filter. Metode ini sangat baik untuk mengetahui diskontinuitas dari suatu struktur bawah permukaan, khususnya terdapat patahan pada suatu daerah survei (Saibi, et al., 2006). Secara teoritis metode ini diturunkan dari persamaan Laplace untuk anomali gayaberasat dipermukaan yang persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (23)$$

Dalam domain x, y dan z menjadi:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta z^2} = 0 \quad (24)$$

Sehingga *second vertical derivative*-nya diberikan oleh:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta x^2} \right) \quad (25)$$

Karena nilai y bersifat konstan maka untuk data 1-D (data penampang) persamaannya sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta z^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial \Delta x^2} \quad (26)$$

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

derivatif orde dua horizon. Artinya bahwa nilai anomali *second vertical derivative* dapat diperoleh dari perhitungan matematis berdasarkan turunan dari persamaan Laplace. Untuk data anomali gayaberat dalam grid teratur, anomali *second vertical derivative* dapat diturunkan melalui proses filtering dimana persamaan konvolusi dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta G_{svd}(\Delta x, \Delta y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(x, y) F(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy \quad (27)$$

Dimana F adalah filter second vertical derivative sesuai persamaan diatas dan Δg adalah anomali gaya berat sebagai data input. terdapat beberapa filter SVD yang dapat digunakan, yaitu filter Henderson dan Zients (1949), Elkins (1951), Rosenbach (1953). Filter SVD tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Operator Filter SVD

SVD Tipe Henderson & Zietz (1949)				
0,00	0,00	-0,0838	0,00	0,00
0,00	1,00	-26,667	1,00	0,00
-0,0838	-26,667	17,00	-26,667	-0,0838
0,00	1,00	-26,667	1,00	0,00
0,00	0,00	-0,0838	0,00	0,00
SVD Tipe Elkins (1951)				
0,00	-0,0833	0,00	-0,0833	0,00
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,00	-0,0334	-1,0668	-0,0334	0,00
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,00	-0,0833	0,00	-0,0833	0,00
SVD Tipe Rosenbach (1953)				
0,00	-0,0416	0,00	-0,0416	0,00
-0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	-0,0416
0,00	-0,75	4,00	-0,75	0,00
-0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	-0,0416
0,00	-0,0416	0,00	-0,0416	0,00

Karakteristik SVD akibat struktur patahan dapat digunakan untuk menentukan jenis patahan, dengan analisis seperti berikut.

- a. Nilai SVD = 0 menunjukkan bahwa daerah tersebut adalah daerah patahan.
- b. Nilai $|SVD1| > |SVD2|$ mengindikasikan bahwa jenis sesar turun.

- c. Nilai $|SVD1| < |SVD2|$ mengindikasikan bahwa jenis sesar naik.
- d. Nilai $|SVD1| \cong |SVD2|$ mengindikasikan bahwa jenis sesar tegak.

Ide dari metode ini adalah mengambil nilai turunan kedua dari anomali Bouguer sama dengan nol sebagai kontak dari kontras densitas antara dua lapisan batuan, dalam hal ini kontak tersebut dapat dikatakan sebagai struktur patahan ataupun intrusi (Sarkowi, 2010).

Struktur patahan atau sesar naik maupun turun dapat ditentukan dari nilai anomali SVD dengan karakteristik sebagai berikut: Untuk sesar naik;

$$\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \max \right| < \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \min \right| \quad (28)$$

Sedangkan untuk sesar turun:

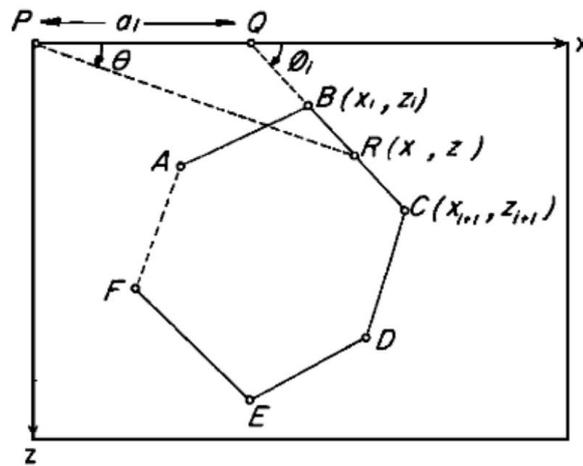
$$\left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \max \right| > \left| \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \min \right| \quad (29)$$

3.11. *Forward Modelling*

Menurut Talwani (1959) dan Grandis (2009), pemodelan kedepan atau Forward Modelling merupakan proses kalkulasi anomali dan metode interpretasi data dari hasil teori yang teramati di permukaan bumi, jika parameter model diketahui untuk memperkirakan densitas bawah permukaan. Pemodelan ke depan digunakan untuk menghitung efek gayaberat model benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang yang dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n dinyatakan sebagai integral garis sepanjang sisi-sisi poligon. Pada saat melakukan interpretasi, dicari model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan atau data lapangan. Sehingga diharapkan kondisi model tersebut bisa mewakili atau mendekati keadaan sebenarnya. Seringkali istilah *forward modelling* digunakan untuk proses *trial and error*.

Menurut Talwani, forward modelling untuk efek gravitasi benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang atau gaya tarik menarik dua benda terhadap 2D dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n dinyatakan sebagai integral garis sepanjang sisi-sisi poligon sebagai berikut:

$$2G_p \oint z d\theta \quad (30)$$



Gambar 8. Efek benda bentuk poligon gravitasi (Talwani dkk., 1959).

Apabila diasumsikan bahwa $PQ = a_i$, maka

$$z = x \tan \theta \quad (31)$$

Pada titik sepanjang garis BC (R) sehingga

$$z = (x - a_i) \tan \phi_i \quad (32)$$

Dari dua persamaan diatas dapat dibuat persamaan

$$z = \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} \quad (33)$$

Atau

$$\int_{BC} z d\theta = \int_B^C \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} d\theta \equiv Z_i \quad (34)$$

Untuk Z, dapat dibentuk serupa pada

$$\int_{BC} z d\theta = \int_B^C \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} d\theta \equiv X_i \quad (35)$$

Sehingga persamaan gaya tarik vertikal V dan horizontal H pada seluruh poligon ditunjukkan sebagai berikut:

$$V = 2G_{\rho} \sum_{n-1}^n Z_i \quad (36)$$

$$Z = 2G_{\rho} \sum_{n-1}^n X_i \quad (37)$$

Dengan sumasi sisi n pada poligon, maka persamaan Z_i dan X_i adalah

$$Z_i = a_i \sin \phi_i \cos \phi_i [\theta_i - \phi_{i+1} + \tan \phi_i \log_e \frac{\cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i)}{\cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i)}] \quad (38)$$

$$X_i = a_i \sin \phi_i \cos \phi_i [\tan \phi_{i+1} (\theta_i - \phi_i) + \log_e \frac{\cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i)}{\cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i)}] \quad (39)$$

Dimana

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{Z_i}{x_i} \quad (40)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{Z_{i+1} - Z_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (41)$$

$$\theta_{i+1} = \tan^{-1} \frac{Z_{i+1}}{x_{i+1}} \quad (42)$$

$$a_i = x_{i+1} + Z_{i+1} \frac{x_{i+1} - x_i}{Z_i - Z_{i+1}} \quad (43)$$

Untuk pemodelan 2D pada suatu poligon (Talwani, 1959).

3.12. Inverse Modelling

Inverse Modelling atau Pemodelan Inversi menurut Rahma dan Wahyudi (2004), dijelaskan bahwa Pemodelan Inversi merupakan kebalikan dari pemodelan kedepan dimana parametermodel didapatkan langsung dari data. Dasarnya, pemodelan inversi merupakan proses mekanisme dimodifikasi model agar diperoleh kecocokan data perhitungan dengan data pengamatan yang dilakukan secara otomatis. Kesesuaian antara respon model dengan data pengamatan umumnya dinyatakan oleh suatu fungsi mencapai minimum jika turunannya terhadap parameter atau variable yang tidak diketahui bernilai nol. Hal tersebut digunakan untuk memperkirakan parameter model.

Dalam pemodelan inversi gayaberat, Blakely memodifikasi persamaan 2D milik Talwani untuk pemodelan 3D yang mana ditunjukkan oleh Wulandari (2014) sebagai berikut:

$$\Delta g(x, y, z) = G \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho z dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (44)$$

Dengan $\Delta g(x, y, z)$ adalah tarikan vertikal gravitasi di titik pada benda homogen, G adalah konstanta gravitasi, dan ρ adalah densitas batuan (Wulandari, 2014). Persamaan diatas merupakan persamaan pemodelan 3D secara forward modelling.

Menurut Yudistira dan Grandis dalam Rasimeng dkk. (2020) untuk mengubah persamaan diatas menjadi pemodelan inversi, digunakan perhitungan Matriks Kernel dimana grid pengukuran bersesuaian dengan titik tengah prisma yang terletak di permukaan. Jika data hanya terdapat di permukaan ($z = 0$) maka jumlah data adalah $N = nx \times ny \times 1$ dan jumlah parameter model adalah $M = nx \times ny \times nz$ dimana nx , ny , dan nz masing-masing adalah jumlah grid dalam arah x , y , dan z . Dengan menggunakan data di permukaan maka inversi linier purely under determined ($N < M$) yang meminimumkan “norm” model menghasilkan model prisma m_e yang dapat berfungsi sebagai sumber ekuivalen 3D. Data pada level ketinggian tertentu ($z < 0$) diperoleh sebagai hasil kali sumber ekuivalen 3D tersebut dengan matriks kernel untuk kontinuitas keatas \underline{G}^U sebagai berikut:

$$d^u = \underline{G}^U + m_e \quad (45)$$

Alternatif lain untuk proses kontinuitas adalah melalui filtering menggunakan *Fast Fourier Transform*, meskipun untuk itu diperlukan cakupan data yang cukup luas.

Kontinuitas ke atas dilakukan pada sejumlah level ketinggian yang lebih besar dari pada jumlah prisma dalam arah vertikal. Dengan demikian, gabungan data di permukaan dan hasil kontinuitas ke atas menghasilkan 2 data dengan jumlah yang lebih besar dari pada jumlah parameter model ($N > M$). Permasalahan inversinya bersifat over-determined sehingga solusi inversi dinyatakan oleh

$$\hat{m} = [\underline{G}^U + \underline{G}^T]^{-1} \underline{G}^T d \quad (46)$$

Dimana matriks kernel G pada persamaan di atas sudah melibatkan keseluruhan data atau data dalam ruang 3D (Yudistira dan Grandis dalam Rasimeng, 2020). Maka dari itu, akan didapatkan nilai ρ , z , dan koordinat xyz dari model.

IV. METODELOGI PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika,
Teknik Geofisika, Universitas Lampung

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

Tanggal : 10 Januari – 28 Juni 2023

4.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data
2. *Software Geosoft Oasis Montaj*
3. Laptop
4. *Software Global Mapper 18*
5. *Software Corel Draw*
6. *Software Microsoft Word*
7. *Software Microsoft Excel*
8. *Software Surfer 13*
9. *Software Grablox*
10. *Software Bloxer*

4.3. Jadwal Penelitian

Tabel jadwal pelaksanaan Tugas Akhir yang dilaksana dapat dilihat pada **Tabel 3** di bawah ini.

Tabel 3. Jadwal pelaksanaan kegiatan penelitian

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengolahan Data					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Penyusunan Proposal Usul	■	■	■	■	■	■	■	■																
Bimbingan Usul					■	■	■	■	■	■	■	■												
Seminar Usul													■											
Penyusunan Laporan Hasil													■	■	■	■	■	■	■	■				
Seminar Hasil																					■			
Revisi																					■	■	■	■
Sidang Komprehensif																								■

4.4. Prosedur Penelitian

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

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan pada tahapan awal untuk mengumpulkan data yang berkaitan dengan penelitian yaitu seperti tinjauan teori dasar dan tinjauan anomali. Hal ini dilakukan untuk mempermudah penulis dalam melakukan penelitian. Pada tahap ini penulis mempelajari mengenai stratigrasi serta struktur geologi regional pada daerah penelitian, pengolahan data gaya berat menggunakan *software Microsoft Excel* dan Oasis Montaj.

2. Pengolahan Data

Data yang diolah pada penelitian ini merupakan data sekunder yang didapatkan dari Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL). Data yang didapat tersebut berupa *Complite Bouguer Anomali* (CBA). Tahap selanjutnya yaitu analisis anomali. Analisis anomali ini bertujuan untuk mengestimasi nilai kedalaman suatu anomali dan mengetahui lebar jendela yang digunakan untuk pemisahan anomali regional dan residual. Analisis anomali dilakukan dengan transformasi Fourier dari lintasan yang telah ditentukan.

Setelah didapatkan anomali residual dan regional dari proses filtering *Polynomial fitting*, maka dilakukan analisis derivatif untuk menentukan struktur patahan. Pada metode FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*) dilakukan identifikasi keberadaan patahan.

3. Pemodelan 3D dan 2D

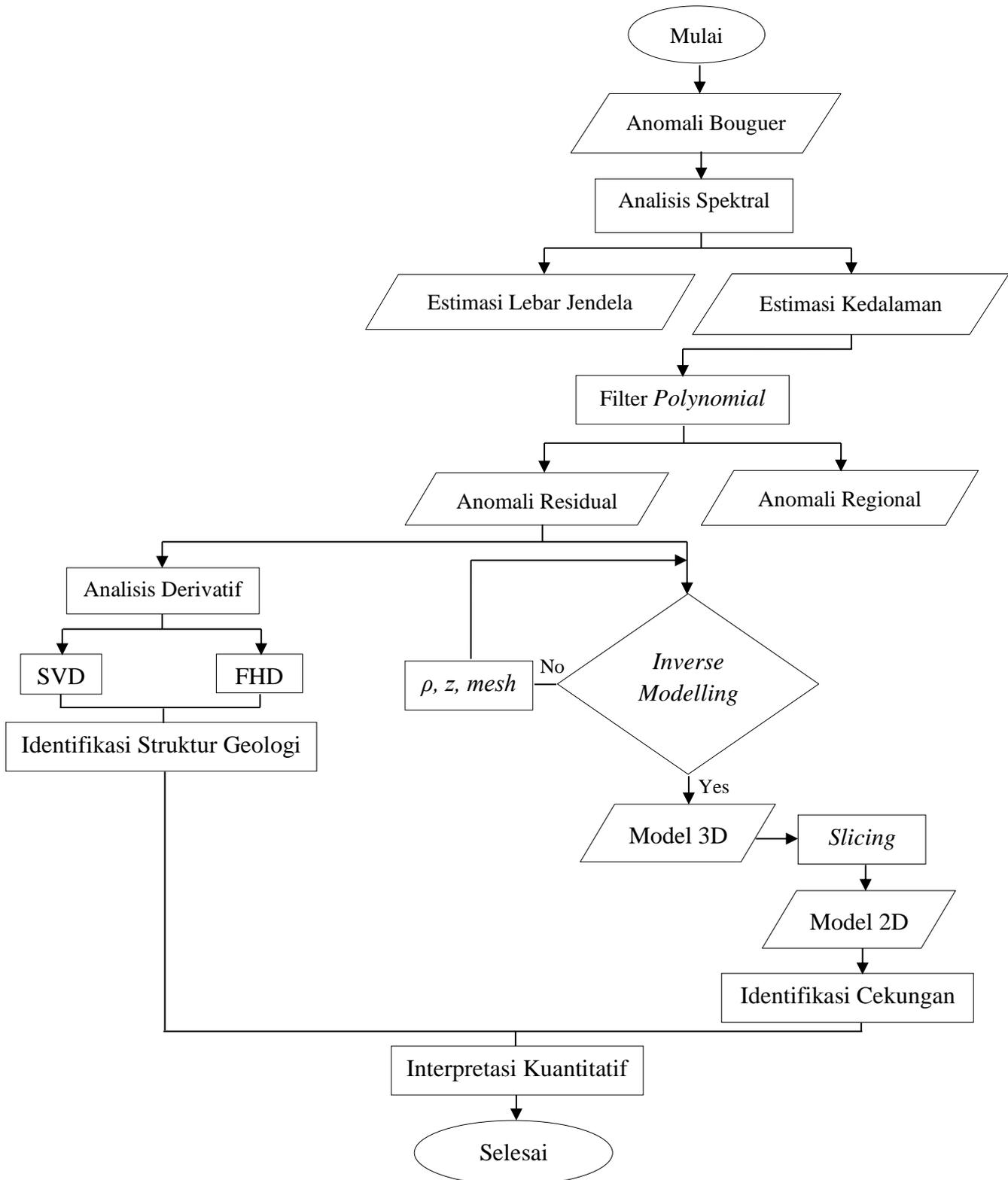
Pemodelan 3D dilakukan dengan menggunakan software Grablox. Langkah awal adalah memasukan nilai batas data dan spasi pada grablox untuk membuat *mesh* model. Selanjutnya adalah memasukan data kedalam grablox yang sudah diubah jaraknya dari meter menjadi kilometer. Lalu dilakukan inversi 3D sehingga dihasilkan model 3D densitas xyz yang selanjutnya dapat di import ke Oasis Montaj untuk slicing 3D. Untuk pemodelan 2D dilakukan dengan melakukan slicing pada model 3D.

4. Interpretasi

Interpretasi dilakukan pada overlay kurva SVD, FHD, penampang 2D dan slicing 3D untuk melihat struktur dengan menganalisa kurva SVD dan FHD terhadap slicing 3D densitas dan penampang 2D yang telah dibuat.

4.5. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada Tugas Akhir adalah sebagai berikut.



Gambar 9 . Diagram alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Anomali Bouguer yang didapat dari penelitian ini memiliki rentang anomali tinggi yang ditunjukkan dengan warna orange hingga merah muda dengan rentang nilai anomali 46.3 mGal hingga 60.3 mGal. Sedangkan anomali sedang memiliki rentang nilai 36.6 mGal hingga 45.6 mGal dan ditandai dengan warna hijau hingga kuning, dan anomali rendah memiliki rentang nilai 19.9 mGal hingga 35.4 mGal yang ditandai dengan warna biru tua hingga biru muda.
2. Berdasarkan hasil analisis derivatif Cekungan Vera dibatasi oleh beberapa struktur sesar, khususnya di bagian selatan. Struktur sesar berarah baratdaya sampai baratdaya selatan, sama dengan arah struktur sesar Cekungan Biliton pada kala Mesozoikum.
3. Pemodelan 3D anomali residual menghasilkan densitas yang di komparasi dengan analisis derivatife yang menunjukkan adanya jebakan berupa fault trap, selain itu juga dapat di prediksi bahwa seal rock cekungan sedimen yang berupa shale dimana merupakan bagian Formasi Talang Akar yang berperan sebagai *intraformational seal*.

6.2. Saran

Adapun saran dalam penelitian ini adalah dilakukannya metode geofisika eksplorasi lain yang lebih detail pada area penelitian agar diketahui dtruktur geologi yang terbentuk dan meningkatkan akurasi serta konfirmasi zona prospek hidrokarbon sehingga kedepannya dapat dilakukan eksplorasi lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abokhodair, A.A. 2011. *Constrained Polynomial Fitting for Recovery of Regional Gravity*. Geophysical Prospecting.
- Aditama, F., Jaya, M. N., Rasimeng, S., & Dani, I. Metode Polynomial Untuk Memisahkan Anomaly Residual dan Regional Pada Data Gayaberat Daerah Pasaman Barat, Sumatera Barat. *Jurnal Geocelbes*.
- Adnan, A., Sukowinto, dan Suprianto, 1991. *Jatibarang Sub Basin a Half Graben Model in the Onshore of Northwest Java*. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 20th Annual Convention.
- Andari, W., Karyanto, dan Kurniawan, R. 2019. Identifikasi batas sub-cekungan hidrokarbon menggunakan analisis SHD (*Second Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*) berdasarkan korelasi data gaya berat dan seismik. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*. 5(1) : 60–74.
- Blakely, R. J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Boggs, Jr. S 2006. *Principal of Sedimentology and Stratigraphy* 4th edition, Hal 550-553, Pearson Education, inc., Upper Saddle River New Jersey.
- Bishop, G.M., 2000, *Petroleum System of the Northwest Java Province, Java and Offshore Southeast Sumatra, Indonesia, Open-File Report 99-50R, Central*

- Region Energy Resources Team*, U.S Departement Of The Interior U.S. Geological Survey.
- Darman, H. dan Sidi, F.H.,. 2000. *An Outline of The Geology of Indonesia*. IAGI. Vol 20th. Indonesia.
- Elkins, T.A. 1951. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. *Geophysics*, Vol. 23, Hal. 97-127.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.
- Henderson, R.G. and Zietz, I. 1949. The Computation of Second Vertical Derivative of Geomagnetic Fields. *Geophysics Journal*, Vol. 14.
- Hinze, J. W., Frese, V. R. R. B., Saad, A. H. 2012. Gravity and Magnetic Exploration. Cambridge University. New York.
- Keating, P. and Pinet, N. 2011. Use of non linear filtering for the regional residual separation of potential field data. *Journal of Applied Geophysisc*.
- Nishijima, J. and Naritomi, K. 2017. Interpretation of gravity data to delineate underground structure in the Beppu geothermal field, central Kyushu, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*.
- Nugraha, P., dan Santoso, N. A. 2011. Penerapan Persamaan Trend Surface Analysis untuk Pemisahan Anomali Residual dan Regional pada Data Gayaberat. *Jurnal Geoelebes*, 102-115.
- PERTAMINA dan BEICIP, 1985, *Hydrocarbon Potential of Western Indonesia*, Pertamina, Jakarta.
- PERTAMINA dan BEICIP, 1992, *Global Geodynamics, Basin Classification and Exploration Play-types in Indonesia*, Volume I hal.81 – 82, PERTAMINA, Jakarta.

- Purnomo, J., Koesuma, S., dan Yuniarto, M. 2013. Pemisahan anomali regional-residual pada metode gravitasi menggunakan metode moving average, polynomial dan inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 3(1), 10-18.
- Rahma, M. dan Wahyudi. 2014. Pembentukan Karakter Melalui Aplikasi Sains (Pemodelan 3D Anomali Gravitasi Magma Gunungapi Merapi dengan Software Grablox, Bloxer dan Rockwork. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Karakter*, Vol. 1, No. 1.
- Rasimeng, S. Tarigan, J. L., Ferucha, I. dan Robbani, M. A. 2020. Identification of geothermal reservoir based on 3d modeling of data anomaly magnetic residual reduction to pole in the region of geothermal prospect Villamasin East Oku. *Prosiding SEG International Exposition and 90th Annual Meeting 2020*, 3407-3411.
- Reynolds, J.M. 1997. An Introduction to Applied and Environment Geophysics. John Wiley and Sons. Chichester.
- Rosenbach, O. 1953. A Contribution to The Computation of The Second Derivative From Gravity Data. *Geophysics*, Vol. 17, Hal. 894-911.
- Saibi, H. Nishijima, J. Ehara, S. dan Aboud, E. 2006. Integrated Gradient Interpretation Techniques for 2D and 3D Gravity Data Interpretation. *Earth Planet Spaces*, Vol. 58, 815-821.
- Sari, I.P. 2012. Study Komparasi Metode Filtering Untuk Pemisahan Regional dan Residual Dari Data Anomali Bouguer. *Skripsi Prodi Fisika FPMIPA Universitas Indonesia*. Depok.
- Sarkowi, M. 2010. Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, Vol. 16, No.2, 111-118.

- Sawitri, R. F. 2021. Identifikasi Daerah Prospek Reservoir Panasbumi Wai Selabung berdasarkan Analisis Data Gravity dan Korelasi Data Geologi Magnetotellurik serta Data Geokimia. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Setiadi, I., Setyanta. B., dan Widjono, B. S. 2010. Deliniasi Cekungan Sedimen Sumatera Selatan berdasarkan Analisis Data Gayabarat. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, vol. 20, No.2, 93-106.
- Setiadi, I., Purwanto, C., Kusnida, D., dan Firdaus, Y. (2019). Interpretasi Geologi Bawah Permukaan Berdasarkan Analisis Data Gayabarat Menggunakan Filter Optimum Upward Continuation dan Pemodelan 3D Inversi:(Studi Kasus: Cekungan Akimeugah Selatan, Laut Arafura). *Jurnal Geologi Kelautan*, 17(1).
- Sipasulta, Y. R., Lumenta, S. M. A., dan Sompie, R. U. A. S. 2014. Simulasi Sistem Pengacak Sinyal dengan Metode FFT (Fast Fourier Transform). *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 1-9.
- Talwani, M., Worzel, J. L., dan Landisman, M. 1959. Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 1, 49-59.
- Telford, W.M. 1990. *Applied Geophysics* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.
- Toviatun, T., Supriyadi, S., dan Supriyanto, Agus. 2020. Pemetaan Maar dan Cinder Cone Wilayah Gunung Lamongan Menggunakan Analisis Power Spectrum dan Upward Continuation. *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika*, 7 (2): 150-161.
- Wulandari, I. F. Setiawan, A. 2015. Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap. *Jurnal Fisika Indonesia*, Vol. 19, No. 57, 6-12.

Zaenudin, A., Dani, I., dan Amalia, N. 2020. Delineasi Sub-Cekungan Sorong berdasarkan Anomali Gayaberat. *Jurnal Geoelebes*, Vol. 4, No. 1, 14-22.

Zeng, H., Xu, D., & Tan, H. (2007). A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China. *Geophysics*, 72(4), I45-I50.

Zhang, S., Sandwell, D. T., Jin, T., dan Li, D. 2016. Inversion of Marine Gravity Anomalies over Southeastern China from Multi-Satellite Altimeter Vertical Deflections. *Internasional Journal of Applied Geophysics*, Vol. 12, No.14. 1-23.

Zulfawati, L., Minardi, S., dan Angraini, L. M. 2019. Analisis Spektrum pada Data Gayaberat daerah Lombok Tengah dan Lombok Timur untuk menentukan Estimasi Ketebalan Sedimen. *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika (JIPF)*, Vol. 6 No. 1, 34-44.

