

**STUDI IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN
UNTUK MENGETAHUI SISTEM SESAR BERDASARKAN ANALISIS
*FIRST HORIZONTAL DERIVATIVE (FHD), SECOND VERTICAL
DERIVATIVE (SVD), DAN 2,5D FORWARD MODELING*
DI DAERAH MANOKWARI PAPUA BARAT**

(Skripsi)

Oleh

SHISKA YULISTINA



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2017**

ABSTRAK

STUDI IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN UNTUK MENGETAHUI SISTEM SESAR BERDASARKAN ANALISIS *FIRST HORIZONTAL DERIVATIVE (FHD), SECOND VERTICAL DERIVATIVE (SVD), 2,5D FORWARD MODELING* DI DAERAH MANOKWARI PAPUA BARAT

Oleh

SHISKA YULISTINA

Secara garis besar Manokwari memiliki struktur geologi yaitu berupa daerah lipatan yang terdapat di kawasan dataran tinggi pegunungan. Di antara lipatan tersebut terdapat sesar naik dan sesar turun. Di kawasan pantai atau laut banyak dijumpai batuan terumbu karang dan koral. Penelitian gravitasi telah dilakukan di daerah Manokwari Papua Barat dengan tujuan untuk mengetahui struktur geologi bawah permukaan berdasarkan analisis FHD (*First Horizontal Derivative*), SVD (*Second Vertical Derivative*) dan pemodelan 2,5D *Forward Modeling* pada peta anomali residual daerah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah penelitian memiliki nilai Anomali Bouguer antara 4 mGal sampai 96 mGal dengan anomali rendah pada bagian kiri daerah penelitian yang memanjang dengan arah relatif barat laut-tenggara, anomali bernilai sedang beradapada bagian tengah daerah penelitian yang tersebar di daerah barat-timur, sementara untuk anomali tinggi tersebar pada bagian utara daerah penelitian. Hasil pemodelan bawah permukaan 2,5D serta analisis SVD dan FHD menunjukkan adanya sesar naik (*Thrust Fault*) pada penampang C-C', pada penampang B-B' terdapat adanya intrusi batuan Diorit Lembai dengan nilai densitas sebesar 2,75 gr/cc, sedangkan untuk penampang A-A' yang memotong sesar Sorong tidak ditemukan adanya sesar maupun intrusi batuan berdasarkan data observasi gravitasi daerah penelitian tersebut.

Kata Kunci: *Gravitasi, Anomali Bouguer, Pemodelan 2,5D, SVD, FHD, Manokwari Area*

ABSTRACT

STUDY IDENTIFICATION OF THE SUBSURFACE GEOLOGICAL STRUCTURE TO KNOW THE FAULT SYSTEM BASED ON FIRST HORIZONTAL DERIVATIVE ANALYSIS (FHD), SECOND VERTICAL DERIVATIVE (SVD), 2.5D FORWARD MODELING IN WEST PAPUA MANOKWARI AREA

By

SHISKA YULISTINA

In general, Manokwari has a geological structure that is in the form of a folding area found in the highlands of the mountains. Among the creases, there is a fault up and the fault down. In coastal or marine areas found many reefs and corals. The study of gravity was conducted in the Manokwari area of West Papua with the aim to know the subsurface geological structures based on FHD (First Horizontal Derivative), SVD (Second Vertical Derivative) and 2.5D Forward Modeling on the residual anomaly maps of the study area. The results showed that the research area has Bouguer Anomaly value ranged from 4 mGal to 96 mGal with the low anomaly at the left side of the research area lengthwise relatively in north-west to south-east direction, the middle-value anomaly spreads in the west-east area of research area, high anomaly scattered in the northern part of the research area. The results of the 2.5D subsurface modeling and the SVD and FHD analysis indicated the presence of a Thrust Fault on the C-C' cross-section, on the B-B' cross-section there is a Diorite Lembai intrusion with the density value is 2.75 gr/cc, whereas the A-A' cross-section which intersects with Sorong fault were not found any fault or rock intrusion based on observed gravity data of the research area.

Keywords: Gravity, Bouguer Anomaly, Modeling 2.5D, SVD, FHD, Manokwari Area

**STUDI IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN
UNTUK MENGETAHUI SISTEM SESAR BERDASARKAN ANALISIS
*FIRST HORIZONTAL DERIVATIVE (FHD), SECOND VERTICAL
DERIVATIVE (SVD), DAN 2,5D FORWARD MODELING*
DI DAERAH MANOKWARI PAPUA BARAT**

Oleh

SHISKA YULISTINA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2017**

Judul Skripsi : **STUDI IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN UNTUK MENGETAHUI SISTEM SESAR BERDASARKAN ANALISIS *FIRST HORIZONTAL DERIVATIVE (FHD)*, *SECOND VERTICAL DERIVATIVE (SVD)*, DAN *2,5D FORWARD MODELING* DI DAERAH MANOKWARI PAPUA BARAT**

Nama Mahasiswa : **Shiska Yulistina**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1315051052

Jurusan : Teknik Geofisika

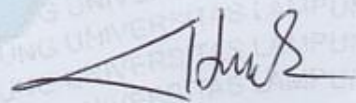
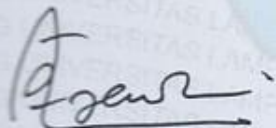
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

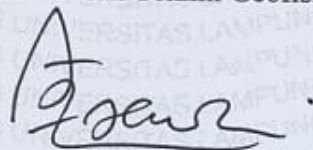
Pembimbing II



Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720912 199903 1 001

Dr. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.
NIP 19750911 200012 1 002

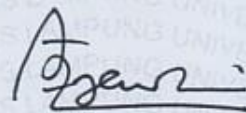
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

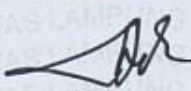


Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720912 199903 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.** 

Sekretaris : **Dr. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.** 

Penguji
Bukan Pembimbing : **Syamsurijal Rasimeng, S.Si, M.Si.** 

2. Dekan Fakultas Teknik




Prof. Drs. Suharno, M.Sc, Ph.D
NIP. 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **23 November 2017**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, Desember 2017



Shiska Yulistina

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pagaralam, Sumatera Selatan pada tanggal 12 Juli 1996. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Hermansyah dan Ibu Juidah. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD MII Pagaralam, Sumatera Selatan pada tahun 2007. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 8 Pagaralam, Sumatera Selatan pada tahun 2010. Dan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA N 4 Pagaralam, Sumatera Selatan pada tahun 2013.

Pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi dan terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN Undangan. Pada tahun 2013/2014 dan tahun 2014/2015 penulis terdaftar sebagai anggota bidang sosial budaya masyarakat (SBM) yang merupakan salah satu bidang yang ada di organisasi himpunan mahasiswa jurusan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana Universitas Lampung.

Pada periode 2014/2015 penulis juga tercatat sebagai anggota AAPG SC Universitas Lampung. Pada periode 2016/2017 penulis juga tercatat sebagai anggota SEG SC Universitas Lampung divisi *Public Relations*. Pada tahun 2016 penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata di Desa Purwodadi, Kecamatan Bangunrejo, Kabupaten Lampung Tengah. Didalam pengaplikasian ilmu di bidang Geofisika penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktek di PT. Dizamatra Powerindo Lahat Sumatera Selatan dengan mengambil tema “Interpretasi Litologi dan Analisis Struktur Geologi Bawah Permukaan dengan Menggunakan Data Outcrop Di Lapangan SH Lahat Sumatera Selatan”. Penulis Melakukan Tugas Akhir (TA) untuk penulisan skripsi di Pusat Survei Geologi (PSG) Bandung. Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tanggal Oktober 2017 dengan skripsi yang berjudul “**Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis *First Horizontal Derivative (FHD)*, *Second Vertical Derivative (SVD)*, dan *2,5D Forward Modeling* Di Daerah Manokwari Papua Barat**”.

PERSEMBAHAN

Aku persembahkan karyaku ini untuk:

ALLAH SWT

Ayahanda Tercinta Bapak Hermansyah

Ibunda Tercinta Ibu Juidah

Kakakku Terkasih Shinta Wahyuni, Shanti Maryati, Sherli

Aprini dan Adikku Tersayang Shelva Ayu Niza

*Keluarga Besarku yang selalu mensupport, Teman-teman
sekaligus sahabat-sahabat terkasih*

Keluarga ke-2 ku keluarga Teknik Geofisika Universitas

Lampung 2013 'Joss'

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

**“Every ACTION has a REACTION, every ACT has a CONSEQUENCE,
and every KINDNESS has KIND REWARD”**

مسلم ه ا رو لحنست ا الى يف طر به الله سهل علم فيه يلتمس يف طر منسملك

Barang siapa menempuh suatu jalan untuk mencari ilmu,
maka Allah memudahkannya mendapat jalan ke syurga
(H.R Muslim)

سُعَهَا لَأِيكَافُ

“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan
kesanggupannya”

يُسْرًا

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Swt, Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan nikmatnya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Tak lupa shalawat serta salam mari kita haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah mengantarkan kita melewati masa jahiliyah sampai ke masa sekarang ini.

Skripsi ini mengangkat judul “Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis *First Horizontal Derivative (FHD)*, *Second Vertical Derivative (SVD)*, dan *2,5D Forward Modeling* Di Daerah Manokwari Papua Barat”. Skripsi ini merupakan hasil dari Tugas Akhir yang penulis laksanakan di Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM RI.

Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan bermanfaat guna pembaruan ilmu di masa yang akan datang. Penulis sadar pada skripsi ini masih banyak kesalahan dan jauh dari kata sempurna, untuk itu jika ditemukan kesalahan pada penulisan skripsi ini, kiranya dapat memberikan saran maupun kritik pada penulis. Demikianlah kata pengantar yang dapat penulis sampaikan, apabila ada salah kata saya mohon maaf dan kepada Allah SWT saya mohon ampun.

Penulis

Shiska Yulistina

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul **Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis *First Horizontal Derivative (FHD)*, *Second Vertical Derivative (SVD)*, dan *2,5D Forward Modeling* Di Daerah Manokwari Papua Barat**. Penulis berharap, karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal serta didukung dengan bantuan dan keterlibatan berbagai pihak ini akan dapat bermanfaat di kemudian hari.

Banyak pihak yang terlibat dalam dan memberikan kontribusi ilmiah, spiritual, dan informasi baik secara langsung maupun tidak langsung hingga terbentuk skripsi ini. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada :

1. Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa dan rasullullah Muhammad SAW atas segala rahmat dan hidayah-Nya selama penulis menjalankan Tugas Akhir;
2. Kedua orangtuaku Bapak Hermansyah dan Ibu Juidah yang tiada henti membimbing dan memberikan dukungan kepada penulis;
3. Kakakku Shinta Wahyuni, Shanti Maryati, Sherli Aprini dan Adikku Shelva Ayu Niza yang terus memberikan semangat kepada penulis;

4. Pusat Survey Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM sebagai institusi yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan Tugas Akhir;
5. Bpk. Dr. Ahmad Zaenudin S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus pembimbing utama atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
6. Bpk. Indragiri, selaku pembimbing Tugas Akhir di Pusat Survei Geologi, Badan Geologi Kementrian ESDM;
7. Bpk. Dr. Nandi Haerudin S.Si., M.Si. Selaku pembimbing kedua atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
8. Bpk. Syamsurijal Rasimeng S.Si., M.Si. selaku pembahas dalam Tugas Akhir dan sekaligus Pembimbing Akademik selama penulis menjadi mahasiswa aktif terimakasih atas kesediannya, bimbingan dan masukannya;
9. Dosen-Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati yaitu Bpk. Bagus Sapto Mulyatno S.Si., M.T., Bpk Ordas Dewanto., Bpk Prof. Suharno., Bpk Sarkowi., Bpk Karyanto., Bpk Rustadi., terimakasih untuk semua ilmu yang telah diberikan;
10. Teman-teman keluarga TG 13 “**Joss**” !!! Agung, Abdi, Afis, Ale, Aloy, Aji, Atikuy, Bangja, Bunga, Cahaya, Colil, Ndeswiti, Dian, Dody, Donok, Dwik, Ecik, Edy, Egik, Endah, Farhan, Fajri, Fenik, Sule, Hanun, Jujun, Harris, Elin, Hetlon, Imbron, Kubel, Nico, Noyis, Mpit, Prista, Putu, Rafi,

Ravide, Ririn, Suryadi, Bana, Udin, Ujep, Ulfe, Widia, Winda, Wici, Yase, Sunge. Terimakasih untuk setiap kisah yang kita lalui bersama **AKU SAYANG KALIAN !!!**;

11. Sahabat-sahabat tercinta dan orang-orang tersayang Akbar, Uci, Yanda, Ferga, Galih, Eko, Evan, Nanda, Zultra, Notra, Zilla, Ririn, Rini, Helen, Tiara, Resa, Rafid dan yang lainnya yang selama ini telah memberi semangat dan tempat berbagi senyuman persahabatan kita takkan pernah berakhir;
12. Kak Doni Zulfafa dan Kak Dimas Putra Suendra terimakasih untuk segala bantuan dan nasehat dalam menyelesaikan skripsi ini;
13. Sahabat seperjuangan Tugas Akhir Ujep, Ririn, Imbron selaku tempat berbagi pusing dan bingung bersama selama tugas akhir;
14. Teman-teman KKN Purwodadi Squad Mba Disti, Melia, Dwi, Gagah, Ibram, Fajarian tetap jalin silaturahmi yang baik. Sayang kalian!!!
15. Kakak-kakak kesayangan kak Bejo, kak Alwi, kak Farid, Bang Ram, kak Sari, kak Deddi, kak Bella, kak Dilla, kak Edo, kak Kevin, kak Esha, kak Aldo, kak Onoy, kak Bagas, kak Agus, kak Elen dan yang lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu;
16. Adik-adik kesayangan Indra, Bombom, Ikhwan, Ridho, Fitria, Delvia, Gaffar, Galang, Rani, Nopi, Ayu, Renaldi dan yang lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu;
17. Adik-adik dan rekan-rekan IPMB Pagaram Meka, Taufiq Suni, Resta, Sinta, Rini, Helen, Mutia, Jean, Agung, Deka, Thessa, Defri, Olpa, Nopa,

Erine, Dina, Belly, Suci, Azam, Rizky, Ilham, Ismadiyah dan yang lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu;

18. Kakak serta adik tingkat Teknik Geofisika yang terus memberi semangat, nasehat dan yang sangat saya banggakan;

19. Bude kantin, MbK Ita dan Kak Edo terimakasih untuk makanan, minuman, canda tawa dan semangat kepada penulis;

20. Kalian semua yang membuat saya kuat dalam menghadapi hidup;

21. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan dan Manfaat.....	2
C. Batasan Masalah	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Lokasi Penelitian	4

B. Geologi Regional Daerah Penelitian	6
1. Fisiografi Daerah Penelitian	6
2. Stratigrafi Daerah Penelitian.....	8
III. TEORI DASAR	
A. Konsep Dasar Gayaberat	12
1. Gaya Gravitasi (Hukum Newton I)	12
2. Percepatan Gravitasi (Hukum Newton II).....	13
B. Anomali Bouguer	14
C. Analisis Spektral.....	14
D. Proses Pemisahan Anomali Regional-Residual	18
E. <i>Filter Moving Average</i>	19
F. <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i>	20
G. <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	21
H. Pemodelan Maju (<i>Forward Modeling</i>).....	23
I. Struktur Geologi	26
IV. METODE PENELITIAN	
A. Waktu dan Tempat Penelitian	29
B. Alat dan Bahan	30
C. Pengolahan Data	30
D. Diagram Alir Penelitian.....	35
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Anomali Bouguer	36
B. Analisis Spektral.....	38
C. Penapisan (<i>filter moving average</i>).....	48
D. Anomali Regional.....	49
E. Anomali Residual	51
F. Interpretasi Kualitatif	53
1. <i>Analisis Derivative</i>	53
G. Interpretasi Kuantitatif	57
1. Pemodelan Maju 2,5 (<i>Forward Modeling</i>).....	57
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan	68
B. Saran	69

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian.....	5
Gambar 2. Stratigrafi Daerah Penelitian	9
Gambar 3. Gaya Tarik Menarik Antar Dua Benda	12
Gambar 4. Kurva Ln A terhadap k	17
Gambar 5. Nilai Gradien Horizontal Pada Model Tabular	21
Gambar 6. Efek Benda Bentuk Poligon Anomali Gravitasi Talwani	25
Gambar 7. Arah tegasan yang bekerja pada patahan	28
Gambar 8. Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 9. Peta Anomali Bouguer Lengkap Daerah Penelitian.....	38
Gambar 10. Lintasan Pada Peta Anomali Bouguer Lengkap.....	39
Gambar 11. Grafik Ln A vs k Lintasan A-A'	41
Gambar 12. Grafik Ln A vs k Lintasan B-B'	42
Gambar 13. Grafik Ln A vs k Lintasan C-C'	43
Gambar 14. Grafik Ln A vs k Lintasan D-D'	45
Gambar 15. Grafik Ln A vs k Lintasan E-E'	46
Gambar 16. Peta Anomali Regional Daerah Penelitian.....	50
Gambar 17. Peta Anomali Residual Daerah Penelitian	52
Gambar 18. Peta slicing <i>FHD</i> , <i>SVD</i> dan <i>Forward Modeling</i>	54
Gambar 19. Peta SVD Anomali residual menggunakan <i>filter</i> Elkins.....	56
Gambar 20. Model Anomali Residual 2,5D Lintasan A-A'	59
Gambar 21. Model Anomali Residual 2,5D Lintasan B-B'	62
Gambar 22. Model Anomali Residual 2,5D Lintasan C-C'	65
Gambar 23. Korelasi Model 2D <i>Forward Modeling</i>	66

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Operator Elkins Filter SVD	23
Tabel 2. Jadwal Kegiatan Penelitian	33
Tabel 3. Kedalaman Bidang Anomali Penampang Lintasan 1-5	47
Tabel 4. Bilangan gelombang (kc) dan Lebar Jendela (N).....	47

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tektonik Pulau Papua pada saat ini berada pada bagian tepi Utara Lempeng Indo-Australia, yang berkembang akibat adanya pertemuan antara Lempeng Australia yang bergerak ke Utara dengan Lempeng Pasifik yang bergerak ke Barat. Dua lempeng utama ini mempunyai sejarah evolusi yang diidentifikasi yang berkaitan erat dengan perkembangan sari proses magmatik dan pembentukan busur gunung api.

Secara garis besar Manokwari memiliki struktur geologi yaitu berupa daerah lipatan yang terdapat di kawasan dataran tinggi pegunungan. Di antara lipatan tersebut terdapat sesar naik (berupa bentukan daerah dataran tinggi dengan dominasi batuan sedimen batu kapur dan batuan pluton). Dan sesar turun (berupa bentukan lembah-lembah dengan didominasi batuan endapan dengan sedimen lumpur dan organik dan alluvium). Pada kawasan-kawasan pantai atau laut banyak dijumpai batuan terumbu karang dan koral (Robinson dkk, 1990).

Bentukan struktur Sesar biasanya dapat diidentifikasi dengan menggunakan metode Gayaberat. Metode Gayaberat merupakan salah satu metode pasif geofisika, metode ini dilakukan berdasarkan pada anomali gayaberat yang muncul karena adanya variasi rapat massa batuan di bawah permukaan.

Metode Gayaberat merupakan metode yang sangat peka terhadap perubahan ke arah lateral. Oleh karena itu metode ini sering digunakan untuk mempelajari cekungan sedimen, kontak intrusi, batuan dasar, struktur geologi, endapan sungai purba, lubang di dalam massa batuan dan lain-lain.

Dengan melakukan penelitian menggunakan metode gayaberat diharapkan dapat diketahui struktur bawah permukaan berdasarkan pemodelan FHD (*First Horizontal Derivative*), SVD (*Second Vertical Derrivative*). *Forward modeling* (2,5D). Hal-hal tersebut sangat penting sebagai data atau informasi awal mengenai sistem sesar yang terdapat pada daerah Manokwari, yang selanjutnya dapat ditindaklanjuti dengan survei yang mempunyai resolusi lebih tinggi.

B. Tujuan dan Manfaat

Adapun penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui Pola Anomali Bouguer daerah penelitian yang berkaitan dengan struktur yang terdapat pada daerah tersebut.

2. Menganalisis struktur bawah permukaan berdasarkan analisis FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derrivative*).
3. Menginterpretasi struktur geologi bawah permukaan daerah penelitian melalui pemodelan 2,5D (*Forward Modeling*)

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan dalam penelitian adalah data Anomali Bouguer lengkap atau data sekunder, artinya data yang telah dilakukan berbagai koreksi, sehingga menjadi Anomali Bouguer Lengkap (ABL), dan bukan data observasi hasil pengukuran lapangan.
2. Penerapan metode FHD dan SVD berdasarkan peta anomali Residual untuk melihat sebaran patahan serta batas kontak struktur geologi pada daerah penelitian dan analisis pembuatan model 2,5D.

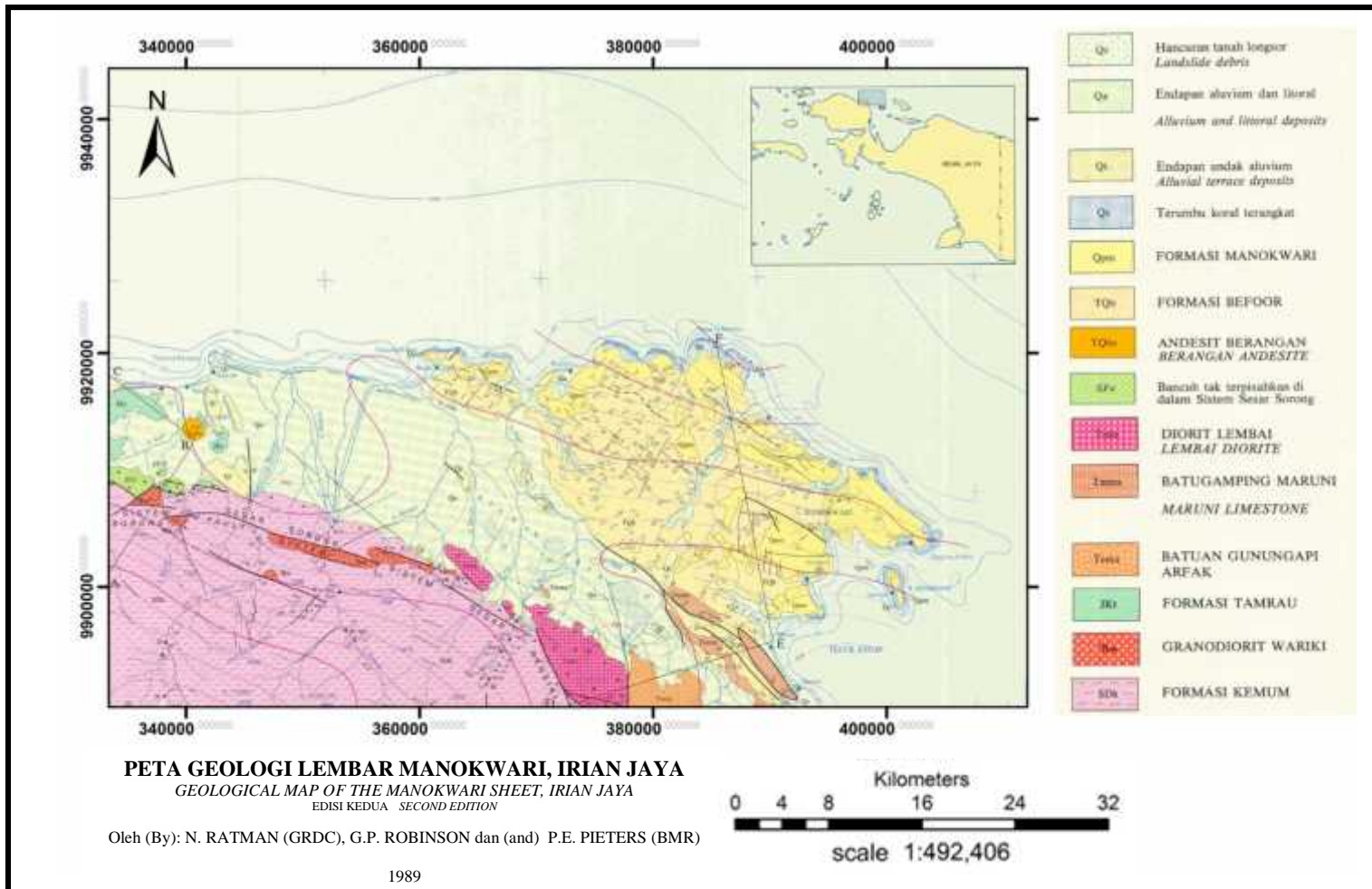
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada koordinat antara $0^{\circ}20'$ dan $1^{\circ}00'$ LS, dan antara $133^{\circ}30'$ dan $135^{\circ}00'$ BT sampai ke timur lembar ke selatan sampai $1^{\circ}15'$, yang terletak di ujung timur laut Kepala Burung, Irian Jaya sehingga meliputi pulau Numfoor. Daerah penelitian tersebut termasuk dalam daerah Manokwari yang secara administratif termasuk ke daerah Kabupaten Manokwari dengan Ibukotanya di Kota Manokwari Provinsi Papua Barat. Dan Pulau Numfoor yang termasuk ke dalam daerah Kabupaten Teluk Cenderawasih dengan ibukotanya Kota Biak. Daerah penelitian juga termasuk ke dalam Lembar Ransiki yang dibatasi oleh garis $1^{\circ}-2^{\circ}$ LS dan $133^{\circ}-134^{\circ}30'$ BT, yang mencakup pesisir timur Kepala Burung Irian Jaya. Seperti dijelaskan oleh Gambar 1.

B. Geologi Regional Daerah Penelitian

Manokwari memiliki struktur geologi yaitu berupa daerah lipatan yang terdapat di kawasan dataran tinggi pegunungan. Di antara lipatan tersebut



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian

terdapat sesar naik (berupa bentukan daerah dataran tinggi dengan dominasi batuan sedimen batu kapur, batuan pluton). Dan sesar turun (berupa bentukan lembah-lembah dengan didominasi batuan endapan dengan sedimen lumpur dan organik dan alluvium).

Pada kawasan-kawasan pantai atau laut banyak dijumpai batuan terumbu karang dan koral. Informasi geologi Manokwari ini dapat diperoleh dari publikasi peta geologi lembar Manokwari dan Lembar Ransiki, Irian Jaya. skala 1 : 250.000 Puslitbang Geologi Bandung (Robinson dkk, 1990).

1. Fisiografi

Manokwari meliputi tujuh satuan fisiografi yang terdiri dari Pegunungan tengah Kepala Burung, Dataran Arfak, Daerah perbukitan, Terumbu koral terangkat dan lintap gisik, Pematang batugamping, Dataran aluvium dan dataran pantai dan Bukit pencil batuan gamping.

a. Pegunungan Tengah Kepala Burung

Bagian baratdaya daerah Lembar bergunung dan tertoreh dalam-dalam (dengan timbulan mencapai 500 m) oleh sejumlah sungai yang mengalir ke utara. Sungai yang tergolong besar (Warjori, Wariki, Waramoi dan Iborregah) alurnya teranyam. Di Pegunungan Memendes di antara sungai Waramoi dan sungai Wariki, Gunung Itswei merupakan puncak tertinggi dengan ketinggiannya sekitar 2430 m di atas mukalaut (daml). Pola alirannya pada dasarnya dendrit, tetapi

setempat menyesuaikan dengan persesaran. Ke utara pegunungan dengan mendadak dibatasi oleh Dataran Arfak.

b. Dataran Arfak

Daerah ini rendah, rata dan yang bagian terbesarnya bertumbuhan lebat memanjang dari batas barat Lembar ke arah S. Prafi di timur. Dataran itu berukuran terluas (sampai 12,5 km) dan mencapai pantai antara S. Kasi dan S.Arui, tetapi lebih jauh ke barat dan timur cepat menyempit dan dikelilingi oleh darat darau.

c. Daerah Perbukitan

Di daratan Irian Jaya bagian timurlaut, medan berbukit (360 m daml) dengan timbulan rendah (50 m), terciirkan oleh pematang yang pendek-pendek tajam hingga membulat dan sungai yang berkelok-kelok dan berkelandaian rendah.

d. Terumbu Karang Terangkat dan Lintap gisik

Di utara dan timur daerah perbukitan itu, dan setempat makin jauh di pedalaman, terumbu karang dan lintap gisik membentuk bukit-bukit yang licin, membulat-bulat, bertimbulan sangat rendah, luas, yang khas dengan ketinggian hingga 290 m daml. Daerah menggelombang serupa terdapat di P. Numfoor yang setempat disela oleh punggung tajam-tajam atau gawir yang bisa jadi terbentuk pada tepi undak terumbu, dan oleh gawir lurus-lurus kendalian sesar.

e. Pematang Batugamping

Di daratan Irian Jaya bagian tenggara, topografinya dikuasai oleh 3 pematang sejajar, memanjang, berarah barat laut sampai setinggi 350 m daml, berkembang di batu gamping. Dua yang paling utara berpuncak membulat dengan tekstur halus, bukit yang lebih jauh ke selatan tertoreh lebih dalam.

f. Dataran Aluvium dan Dataran Pantai

Jenis dataran aluvium dan dataran pantai berkaitan dengan jenis sungai yang besar yang mengalir dari daerah perbukitan di daratan Irian Jaya bagian timurlaut. Di P. Numfoor, rataan pantai berawa mendukung tumbuhnya bakau.

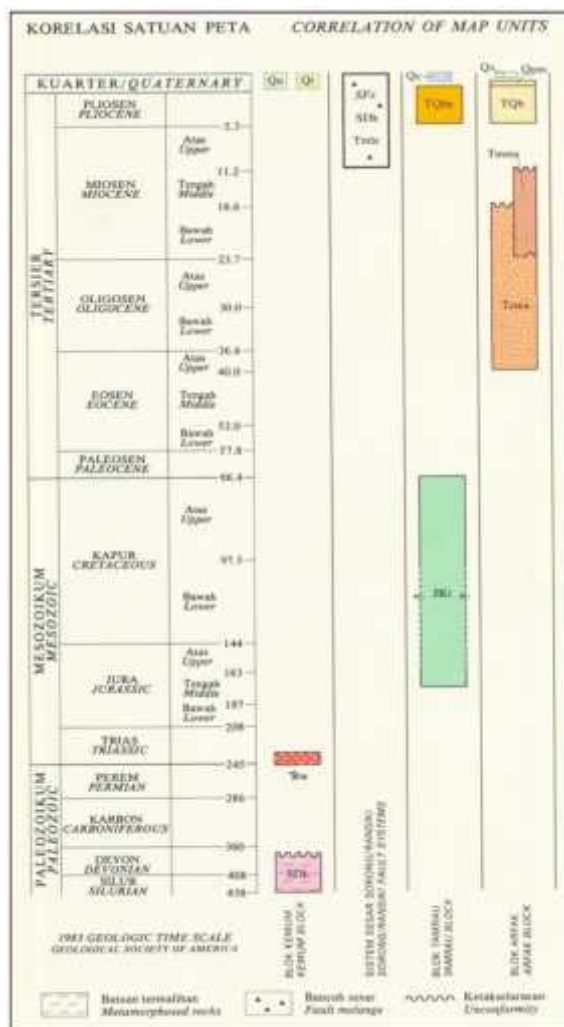
g. Bukit Pencil Batuan Gunungapi

Di bagian barat laut dataran Arfak sepanjang sungai Kasi, sebuah gunung bentuk kubah setangkup terpencil yang sungguh menarik, menjulang setinggi 400 m daml. Bukit itu adalah sisa sumbat atau teras gunungapi.

2. Stratigrafi

Manokwari meliputi lima mendala geologi (Gambar 2). Mendala itu ialah Bongkah (Blok) Kemum, Bongkah Tamrau, Bongkah Arfak, Sistem Sesar Sorong dan Sesar Ransiki, dan Cekungan Manokwari. Ada bagian tertentu dari mendala tersebut yang tertutup endapan aluvium dan litoral Kuarter Dataran Arfak.

- a. Bongkah Kemum terbentuk oleh Formasi Kemum (SDk) yang berumur Silur hingga Devon berupa endapan malih derajat rendah sampai menengah. Yang terdiri dari kuarsit malih, batulanau malih, batusabak, rijang, sekis, sedikit batuan kalk-silikat, sekis hijau. Zona malihan biotit sampai andalusit. Di tempat yang terpetakan, tubuh batuan digolongkan ke dalam Granodiorit Wariki (Trw), yang enam umur K-Ar nya berkisar dari 226-258 juta tahun, tetapi sebagian besar menunjukkan Trian. Batuan ini terdiri dari Granodiorit biotit, terdaunkan dan pejal biasanya tersesarkan.



Gambar 2. Stratigrafi Daerah Penelitian (Robinson dkk, 1990).

- b. Batuan Bongkah Tamrau sebagai Formasi Tamrau (JKt) yang meluas dari MAR ke bagian Manokwari yang paling barat. Satuan ini terdiri dari batuan klastika silika yang berbutir halus dengan umur yang berkisar dari Jura Tengah hingga Kapur akhir. Dengan litologi yaitu serpih, batulanau, batusabak, dan batu pasir. Juga di barat terdapat bukit berbentuk sarang lebah yang berkembang pada teras atau sumbat gunungapi dan tersusun dari breksi andesit, andesit berangan (Tqbe).
- c. Bongkah Arfak meliputi dua satuan. Yang lebih tua yaitu Batuan Gunungapi Arfak (Tema) dari busur kepulauan, dan umumnya terdiri dari batuan klastika gunungapi dan piroklastika, lava, breksi lava yang bersusunan basal sampai andesit dan batuan terobosan andesit, basal porfir, diorit, gabro dan jarang batugamping lumpuran.
- d. Batugamping Maruni (Tmma) merupakan satuan atas dari bongkah Arfak. Satuan itu sebagian selaras dan sebagian tak-selaras menindih batuan gunungapi Arfak jauh di selatan di Ransiki. Satuan itu tersusun atas karbonat berbutir halus, yang mengandung foraminifera berumur Miosen Awal hingga Miosen Tengah.
- e. Sistem Sesar Sorong dan Ransiki adalah ketidaksenambungan kerakbumi yang besar dan mewilayah, yang masing-masing mengikuti arah ke barat dan utara-baratlaut. Kedua struktur itu bersambung di Manokwari lewat endapan sesar yang terlengkungkan. Di Manokwari bagian barat sistem Sesar Sorong meliputi bancuh tak terpisah-pisahkan (SFx). Batuannya terdiri dari klastika silikat gampingan dan tak gampingan yang tersesarkan dan setempat terambak kuat, dan

batugamping mengandung kepingan tektonik berupa batuan malihan dan granit yang tak lazim. Dalam ruas sesar yang melengkung itu yang menghubungkan sistem sesar Sorong dengan sistem sesar Ransiki, Diorit Lembai (Tmle) muncul sebagai tubuh menganta yang umumnya terambak sangat kuat, terubah dan berurat. Umur terobosannya yang Miosen Tengah dipaksakan dengan sulit berdasarkan analisa isotop K-Ar.

- f. Yang merupakan satuan dasar dan yang utama di cekungan Manokwari adalah Formasi Befoor (TQb) yang berumur Plio-Plistosen. Satuan itu menutupi batugamping Maruni dan di Ransiki dan bisa jadi di bawah permukaan Manokwari, Batuan gunungapi Arfak. Satuan itu meliputi batuan klastika-silikat tak gampingan dan gampingan berbutir halus hingga kasar setebal 1600 m yang mencerminkan pengendapan dalam lingkungan laut dangkal hingga delta dan estuarium. Satuan itu secara selaras dan tidak selaras tertindih oleh batugamping terumbu dan batuan klastika-silikat gampingan formasi Manokwari. Kedua satuan itu mempunyai kesamaan asal, tetapi sebagian rombakan dalam formasi Manokwari berasal dari Formasi Befoor. Formasi Manokwari merupakan satuan utama di P. Numfoor, tetapi tidaklah diketahui apakah Cekungan Manokwari meluas sampai sejauh itu ke arah timur dari daratan Irian Jaya.

III. TEORI DASAR

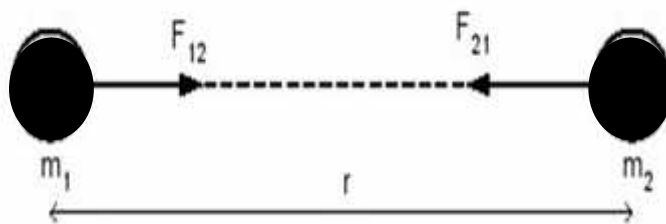
A. Konsep Dasar Metode Gayaberat

1. Gaya Gravitasi (Hukum Newton I)

Teori yang mendukung Ilmu gravitasi terapan adalah hukum Newton yang menyatakan bahwa gaya tarik menarik antara dua partikel bergantung dari jarak dan massa masing-masing partikel tersebut, yang dinyatakan sebagai berikut:

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

dimana, $F(r)$ adalah gaya tarik menarik (N), m_1 dan m_2 adalah massa benda 1 dan massa benda 2 (kg), r adalah jarak antara dua buah benda (m), G adalah konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$).



Gambar 3. Gaya Tarik menarik antara dua benda

2. Percepatan Gravitasi (Hukum Newton II)

Newton juga mendefinisikan hubungan antara gaya dan percepatan. Hukum II Newton tentang gerak menyatakan gaya sebanding dengan perkalian massa benda dengan percepatan yang dialami benda tersebut.

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

Percepatan sebuah benda bermassa m_2 yang disebabkan oleh tarikan benda bermassa M_1 pada jarak R secara sederhana dapat dinyatakan dengan:

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

Bila ditetapkan pada percepatan gaya tarik bumi persamaan di atas menjadi:

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

dimana, g adalah percepatan gaya tarik bumi, M adalah massa bumi, m adalah massa benda, F adalah gaya berat dan R adalah jari-jari bumi (Telford dkk, 1990).

Berdasarkan referensi dari Octonovriya 2009 menyatakan bahwa pengukuran percepatan gravitasi 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 gaya berat dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligal (mGal):

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} \quad (6)$$

$$1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-3} \text{ mGal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 \quad (7)$$

Dalam satuan m.k.s, gravitasi diukur dalam g.u. (gravity unit) atau $\mu\text{m/s}^2$:

$$1 \text{ mGal} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

B. Anomali Bouguer

Anomali Bouguer disuatu titik amat dapat didefinisikan sebagai selisih antara harga gayaberat pengamatan (g_{obs}) terhadap gaya berat normal teoritis. Besarnya harga gaya berat di titik tersebut diperkirakan dari gayaberat normal dengan memasukkan nilai koreksi udara bebas, ketinggian dan koreksi medan. Rumus Anomali Bouguer :

$$\Delta g = g_{obs} - (g_n + FAC - BC + TC) \quad (9)$$

dimana, Δg adalah anomaly Bouguer, g_{obs} adalah percepatan Gayaberat teramati, g_n adalah percepatan Gayaberat setelah dikoreksi lintang, FAC adalah koreksi udara bebas, BC adalah koreksi Bouguer dan TC adalah koreksi medan.

C. Analisis Spektral

Analisis spektral dilakukan untuk untuk mengestimasi lebar jendela serta estimasi kedalaman anomali gayaberat. Analisis spektral dilakukan dengan cara mentransformasi Fourier lintasan yang telah ditentukan pada peta kontur Anomali Bouguer Lengkap. Secara umum, suatu transformasi Fourier adalah menyusun kembali/mengurai suatu gelombang sembarang ke dalam

gelombang sinus dengan frekuensi bervariasi dimana hasil penjumlahan gelombang-gelombang sinus tersebut adalah bentuk gelombang aslinya (Kadir, 2000).

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

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

Dimana $j = \sqrt{-1}$

Pada metode gayaberat, spektrum diturunkan dari potensial gayaberat yang teramati pada suatu bidang horizontal dimana transformasi Fouriernya sebagai berikut (Blakely, 1996):

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{R}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (11)$$

Dimana $z_1 > z_0$, $|k| \neq 0$, U adalah potensial gayaberat, μ adalah anomali rapat masa, γ adalah konstanta gayaberat dan r adalah jarak.

Percepatan gayaberat dihubungkan pada potensial gravitasi oleh persamaan $g = \nabla U$. Gerak vertikal gravitasi yang disebabkan oleh suatu titik massa adalah turunan *derivative* dari potensial gaya beratnya:

$$g_z = Gm \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (12)$$

$$F(g_z) = Gm F\left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) \right) \quad (13)$$

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

Transformasi Fourier pada lintasan yang diinginkan adalah:

$$F(g_z) = 2\pi G m e^{|k|(z_0 - z_1)}, \quad z_1 > z_0 \quad (15)$$

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

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (16)$$

Dimana A adalah amplitudo 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 spektral amplitudo.

$$\ln A = \ln 2\pi G m e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (17)$$

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (18)$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus:

$$y = mx + c \quad (19)$$

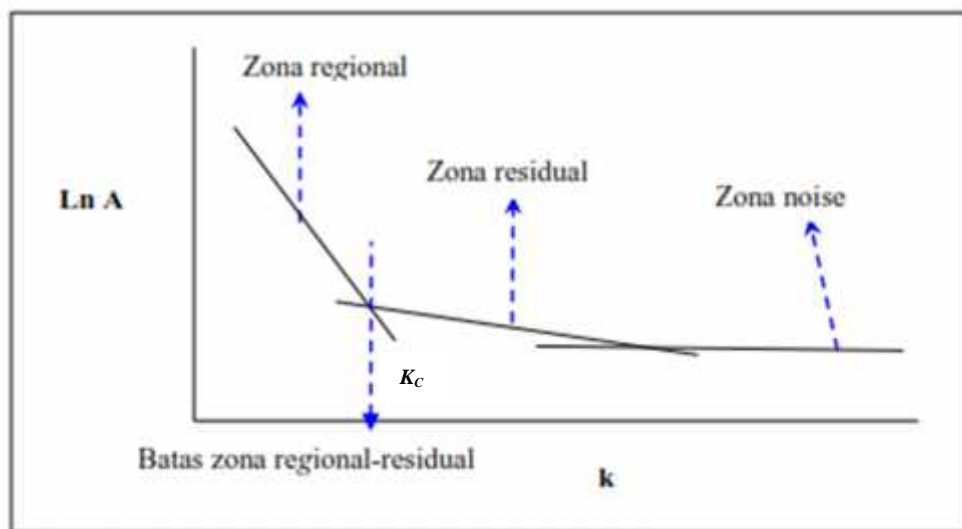
dimana $\ln A$ sebagai sumbu y , $|k|$ sebagai sumbu x , dan $(z_0 - z_1)$ sebagai kemiringan garis (gradien). Oleh karena itu, kemiringan garisnya merupakan kedalaman bidang dalam dan dangkal. $|k|$ sebagai sumbu x didefinisikan sebagai bilangan gelombang yang besarnya $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan satuannya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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (20)$$

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

$$N = \frac{2\pi}{k_c \cdot \Delta x} \quad (21)$$

Dimana Δx adalah domain spasi yang akan digunakan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c adalah bilangan gelombang *cutoff*.



Gambar 4. Kurva Ln A terhadap k (Fitriana, 2011).

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.

D. Proses Pemisahan Regional-Residual

Data yang diperoleh setelah melakukan koreksi-koreksi adalah data anomali Bouguer. Anomali Bouguer merupakan total dari anomali residual dan anomali regional, dimana secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$g_{Bouguer} = g_{reg} + g_{res} \quad (22)$$

Dimana, $g_{Bouguer}$ adalah Anomali Bouguer, g_{reg} adalah Anomali Regional dan g_{res} adalah Anomali Residual.

Sehingga untuk memperoleh anomali residual yang merepresentasikan benda-benda anomali di kedalaman dangkal, maka perlu dilakukannya pemisahan antara anomali regional dan residualnya dengan cara mengurangi anomali Bouguer dengan anomali regionalnya.

$$g_{res} = g_{Bouguer} - g_{reg} \quad (23)$$

Pada umumnya terdapat beberapa metoda dalam proses pemisahan regional-residual yang digunakan untuk memperoleh nilai anomali regional, diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. *Lowpass Filter*
- b. *Trend Surface Analysis* atau *Polynomial Fitting*
- c. *Upward Continuation*

Pada dasarnya metode pemisahan dilakukan untuk memisahkan anomali-anomali berdasarkan frekuensi yang berhubungan dengan kedalaman sumber anomali tersebut. Anomali residual berhubungan dengan frekuensi tinggi,

sedangkan anomali regional berhubungan dengan frekuensi rendah. Tujuan dilakukan proses pemisahan ini adalah untuk memperoleh nilai anomali residual dan regional yang *representative* dengan keadaan bawah permukaan yang sebenarnya (Sari, 2012).

E. Filter *Moving Average*

Nilai gayaberat yang terukur di permukaan merupakan penjumlahan dari berbagai macam anomali dan struktur dari permukaan sampai inti bumi, sehingga anomali Bouguer yang diperoleh merupakan gabungan dari beberapa sumber anomali dan struktur. Anomali Bouguer adalah superposisi dari anomali yang bersifat regional dan yang bersifat residual atau lokal. Anomali regional berkaitan dengan kondisi geologi umum secara keseluruhan pada daerah yang bersangkutan, dicirikan oleh anomali yang berfrekuensi rendah, sedangkan anomali residual dicirikan oleh anomali yang berfrekuensi tinggi.

Untuk memperoleh anomali yang terasosiasi dengan kondisi geologi yang diharapkan dan untuk meningkatkan resolusi sebelum diinterpretasi secara kuantitatif, maka perlu dilakukan pemisahan anomali regional dan residual, sehingga anomali yang diperoleh sesuai dengan anomali dari target yang dicari. Pemisahan anomali juga dimaksudkan untuk membantu dalam interpretasi gayaberat secara kualitatif. Pemisahan anomali ini salah satunya dapat dilakukan dengan *filter moving average*.

Moving average dilakukan dengan cara merata-ratakan nilai anomalnya. Hasil perata-rataan ini merupakan anomali regionalnya, sedangkan anomali residualnya diperoleh dengan mengurangkan data hasil pengukuran gayaberat dengan anomali regional.

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (24)$$

Dimana, i adalah nomor stasiun, N adalah lebar jendela, N adalah nilai bilangan N dikurangi satu dan dibagi dua dan Δg_{reg} adalah 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:

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{3} \sum_{N=1}^3 \Delta g(n) \quad (25)$$

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

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (26)$$

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

F. First Horizontal Derivative (FHD)

First Horizontal Derivative (FHD) atau Turunan Mendatar Pertama mempunyai nama lain yaitu *Horizontal Gradient*. *Horizontal gradient* dari anomali gayaberat yang disebabkan oleh suatu *body* cenderung untuk

menunjukkan tepian dari *body*-nya tersebut (Zaenudin dkk, 2013).

Jadi metode *horizontal gradient* dapat digunakan untuk menentukan lokasi batas kontak kontras densitas horizontal dari data gayaberat (Cordell, 1979 dalam Zaenudin dkk, 2013).

Untuk menghitung nilai FHD dapat dilakukan dengan persamaan :

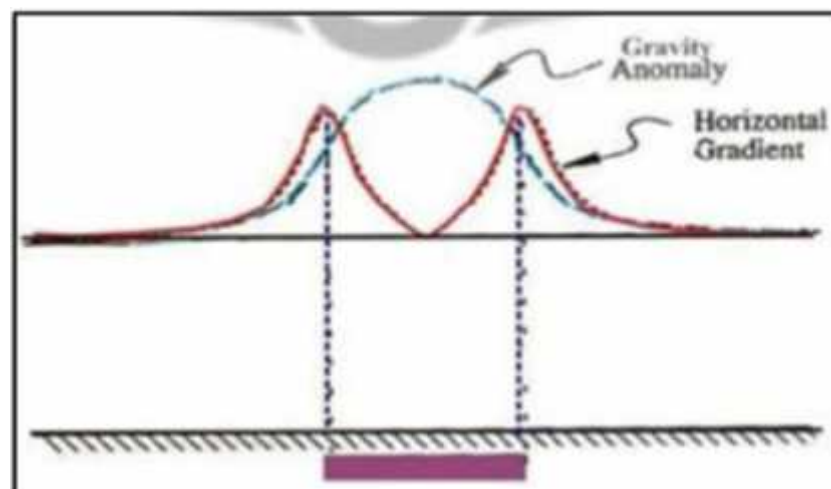
$$FHD = \frac{g_{(i+1)} - g_{(i)}}{\Delta x} \quad (27)$$

dengan :

g = nilai anomali (mgal)

Δx = selisih antara jarak pada lintasan (m)

FHD = *First Horizontal Derivative*



Gambar 5. Nilai Gradien Horizontal Pada Model Tabular (Blakely,1996).

G. *Second Vertical Derivative (SVD)*

Second Vertical Derivative (SVD) dilakukan untuk memunculkan efek dangkal dari pengaruh regionalnya dan untuk menentukan batas-batas struktur yang ada di daerah penelitian, sehingga filter ini dapat menyelesaikan anomali residual yang tidak mampu dipisahkan dengan metode pemisahan regional-residual yang ada. Secara teoritis, metode ini diturunkan dari persamaan Laplace's (Telford dkk., 1976):

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \text{ dimana } \nabla^2 \Delta g = \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} \quad (28)$$

Sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = - \left[\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} \right] \quad (30)$$

Dari persamaan-persamaan di atas dapat diketahui bahwa *second vertical derivative* dari suatu anomali gayaberat permukaan adalah sama dengan negatif dari *derivative* dapat melalui *derivative* orde dua horizontalnya yang lebih praktis dikerjakan. SVD bersifat sebagai *highpass filter*, sehingga dapat menggambarkan anomali residual yang berasosiasi dengan struktur dangkal yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis patahan turun atau patahan naik (Hartati,2012).

Dalam penentuan nilai SVD maka digunakan turunan kedua atau dilakukan dengan persamaan :

$$SVD = \frac{g_{(i+1)} - 2g_{(i)} + g_{(i-1)}}{\Delta x^2} \quad (31)$$

SVD = Second Vertical Derivative

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan filter SVD hasil perhitungan Elkins (1951). Dalam penentuan patahan normal ataupun patahan naik, maka dapat dilihat pada harga mutlak nilai SVD_{\min} dan harga mutlak SVD_{\max} .

Dalam penentuannya dapat dilihat pada ketentuan berikut:

$|SVD|_{\min} < |SVD|_{\max}$ = Patahan Normal

$|SVD|_{\min} > |SVD|_{\max}$ = Patahan Naik

$|SVD|_{\min} = |SVD|_{\max}$ = Patahan Mendatar

Filter *second Vertical Derivative* (SVD) dengan operator Elkins filter 2-D ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Operator Elkinsfilter SVD (Elkins, 1951)

Operator Filter SVD menurut Elkins (1951)				
0.0000	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0.0000	-0.0334	+1.0668	-0.0334	0.0000
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0.0	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000

H. Pemodelan Maju (*Forward Modeling*)

Forward modeling (pemodelan ke depan) adalah suatu metode interpretasi yang memerkirakan densitas bawah permukaan dengan membuat terlebih dahulu benda geologi bawah permukaan. Kalkulasi anomali dari model yang dibuat kemudian dibandingkan dengan anomali Bouguer yang telah diperoleh dari survei gayabarat. Prinsip umum pemodelan ini adalah meminimumkan selisih anomali pengamatan untuk mengurangi ambiguitas.

Pemodelan ke depan (*Forward Modeling*) merupakan proses perhitungan data dari hasil teori yang akan teramati di permukaan bumi jika parameter model diketahui. Pada saat melakukan interpretasi, dicari model yang menghasilkan respon yang cocok dan *fit* dengan data pengamatan atau data lapangan, sehingga diharapkan kondisi model itu bisa mewakili atau mendekati keadaan sebenarnya.

Menurut Talwani dkk (1990), pemodelan metode ke depan untuk efek gravitasi benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n yang dinyatakan sebagai integrasi garis sepanjang sisi-sisi poligon.

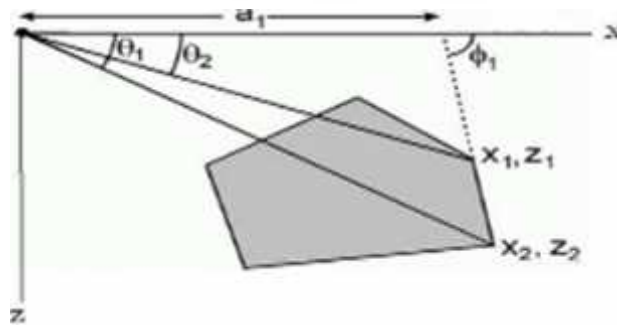
$$g_z = 2G\rho \oint z d\theta \quad (32)$$

Integral garis tersebut dapat pula dinyatakan sebagai jumlah garis tiap sisinya, sehingga persamaan BC = 0,04191 ρh dapat ditulis sebagai berikut:

$$g_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n g_i \quad (33)$$

Model benda anomali sembarang oleh Talwani didekati dengan poligon-poligon dengan sistem koordinat kartesian yang digambarkan seperti Gambar 6. Untuk benda poligon sederhana seperti pada Gambar 6 dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$g_1 = \int_b^a \frac{a_1 \tan \theta_1}{\tan \varphi_1 - \tan \theta} d\theta \quad (34)$$



Gambar 6. Efek benda bentuk poligon anomali gravitasi menurut Talwani dkk (1990).

Sehingga diperoleh:

$$g_1 = a_1 \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \left\{ (\theta_1 + \theta_2) \ln \left(\frac{\cos \theta_1 (\tan \theta_1 - \tan \varphi_1)}{\cos \theta_2 (\tan \theta_2 - \tan \varphi_1)} \right) \right\} \quad (35)$$

Dimana :

$$a_1 = x_2 - z_2 \cot \varphi_1 = x_2 - z_2 \left(\frac{x_2 - z_1}{z_2 - z_1} \right) \quad (36)$$

Dengan :

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_1}{x_1} \right) \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_2 + z_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (37)$$

Persamaan 44 dapat ditulis dalam bentuk sederhana, dengan mensubstitusikan harga-harga $\sin \varphi$, $\cos \varphi$, dan $\tan \varphi$ dengan koordinat titik sudut poligon pada sumbu x dan z, sebagai berikut:

$$Z_1 = \frac{a_1 c}{c^2 + 1} \left\{ \theta_1 - \theta_2 + \frac{1}{2} C \left(\frac{x_2^2 - z_2^2}{x_1^2 - z_1^2} \right) \right\} \quad (38)$$

Persamaan di atas dijadikan sebagai dasar perhitungan mod bawah permukaan yang berbentuk perangkat lunak (*software*). Dalam pemodelan dilakukan dengan menggunakan software Gmsys Oasis-Montaj.

Seringkali istilah *forward modeling* digunakan untuk proses *trial and error*. *Trial and error* adalah proses coba-coba atau tebakan untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis dengan data lapangan. Diharapkan dari proses *trial and error* ini diperoleh model yang cocok responnya dengan data, (Grandis, 2009).

I. Struktur Geologi

Geologi struktur adalah bagian dari geologi yang mempelajari bangun/rupa (arsitektur) batuan dari kerak bumi, yang meliputi:

- geometri : bentuk, ukuran, kedudukan, sifat simetri
- komponen atau unsur yang membentuknya

Pada berbagai ukuran (skala) dari skala batuan, singkapan hingga regional, yang merupakan hasil dari proses pembentukannya (kejadian) atau karena perubahan akibat deformasi. Didalam geologi struktur terutama mempelajari bentuk batuan akibat deformasi serta proses penyebabnya.

Deformasi adalah perubahan dalam tempat dan atau orientasi dari tubuh batuan akibat pengaruh gaya (tektonik) yang bekerja pada batuan tersebut.

Deformasi didefinisikan menjadi empat pergerakan:

- a. Dilatasi, adalah perubahan volume
- b. Translasi, adalah perubahan posisi
- c. Rotasi, adalah perubahan orientasi
- d. Distorsi, adalah perubahan bentuk (Davis, 1984).

Geologi struktur merupakan ilmu yang mempelajari berbagai struktur atau bentuk lapisan tanah akibat adanya gaya tektonisme. Akibatnya akan menghasilkan lipatan (*fold*) dan patahan/sesar (*fault*). Jenis perlipatan dapat berupa lipatan simetri, asimetri, serta lipatan rebah (*recumbent/overtune*). Sedangkan jenis-jenis patahan adalah patahan normal (*normal fault*), patahan mendatar (*strike slip fault*), dan patahan naik (*trust fault*).

1. Lipatan

Lipatan adalah deformasi lapisan batuan yang terjadi akibat dari gaya tegasan sehingga batuan bergerak dari kedudukan semula membentuk lengkungan. Berdasarkan bentuk lengkungannya lipatan dapat dibagi dua, yaitu lipatan Sinklin adalah bentuk lipatan yang cekung ke arah atas, sedangkan lipatan Antiklin adalah lipatan yang cembung ke arah atas.

2. Patahan

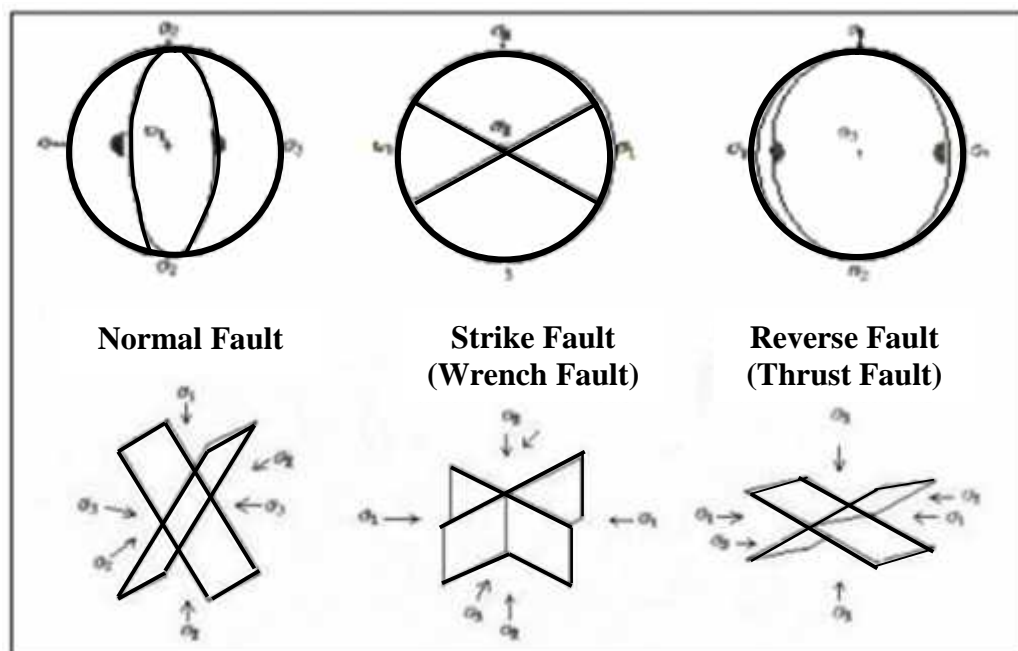
Patahan/sesar adalah struktur rekahan yang telah mengalami pergeseran. Umumnya disertai oleh struktur yang lain seperti lipatan, rekahan dsb. Adapun di lapangan indikasi suatu sesar/patahan dapat dikenal melalui:

- a. Gawir sesar atau bidang sesar
- b. Breksiasi, gouge, milonit
- c. Deretan mata air

- d. Sumber air panas
- e. Penyimpangan/pergeseran kedudukan lapisan
- f. Gejala-gejala struktur minor seperti: cermin sesar, gores garis, lipatan dan sebagainya.

Anderson (1951), membuat klasifikasi sesar berdasarkan pada pola tegasan utama sebagai penyebab terbentuknya sesar. Berdasarkan pola tegasannya ada 3 jenis sesar, yaitu sesar naik (*thrust fault*), sesar turun (*normal fault*), dan sesar mendatar (*wrench fault*).

1. *Normal Fault*, jika tegasan utama atau tegasan maksimum (σ_1) posisinya vertikal.
2. *Wrench Fault*, jika tegasan menengah atau *intermediate* (σ_2) posisinya vertikal.
3. *Thrust Fault*, jika tegasan minimum (σ_3) posisinya vertikal.



Gambar 7. Arah tegasan yang bekerja pada patahan (Anderson, 1951).

IV. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Pusat Survei Geologi (PSG), Bandung, Jawa Barat

Pengolahan data di mulai pada bulan Februari sampai dengan Maret 2017:

Tabel 2. Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan ke-1				Bulan ke-2				Bulan Juli	Bulan September	Bulan November
		Minggu ke-				Minggu ke-						
		1	2	3	4	1	2	3	4			
1.	Studi Literatur											
2.	Input Data											
3.	Pengolahan Data											
4.	Interpretasi Data dan Diskusi											
5.	Presentasi dan Evaluasi											
6.	Penyusunan Laporan											
7.	Seminar Usul											
8.	Seminar Hasil											
9.	Ujian Skripsi											

B. Alat dan Bahan

Penulis menggunakan data pengukuran gayaberat sekunder, diperoleh dari Badan Geologi Kementerian ESDM, Pusat Survei Geologi (PSG) Bandung. Data merupakan hasil survei pengukuran gayaberat di Daerah Kepulauan Manokwari. Data berjumlah 190 titik pengukuran, yang dibatasi oleh 7°-8,2° LS dan 130°-132° BT.

Adapun Alat dan Bahan yang membantu dalam penelitian ini adalah:

- Data Gayaberat Kepulauan Manokwari
- Peta Geologi Lembar Kepulauan Manokwari dan Lembar Ransiki
- *Software Geosoft v.6.4.2*
- *Software Numeri*
- *Software Surfer v.12*
- *Software Global Mapper v.12*
- *Software Microsoft Word dan Excel 2007*

C. Pengolahan Data

1. Anomali Bouguer Lengkap

Data gayaberat dalam penelitian ini adalah data gayaberat sekunder atau data gayaberat yang telah melalui berbagai koreksi-koreksi, sehingga diperoleh Anomali Bouguer Lengkap (ABL). Langkah pertama pada penelitian ini adalah membuat Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL), proses ini dibantu dengan menggunakan perangkat lunak *Geosoft 6.4.2*.

2. Analisis Spektral

Setelah didapatkan peta anomali bouguer lengkap (ABL), langkah selanjutnya adalah analisis spektral. Analisis spektral bertujuan untuk mengestimasi nilai kedalaman suatu anomali dan untuk mengetahui lebar jendela optimal yang akan digunakan untuk pemisahan anomali regional dan residual. Analisis spektral dilakukan dengan Transformasi Fourier dari lintasan yang telah ditentukan. Untuk analisis spektral penulis membuat 5 lintasan pada peta ABL, kelima lintasan diproses menggunakan perangkat lunak *Geosoft 6.4.2*, sehingga menghasilkan data jarak dan anomali Bouguer pada setiap lintasan.

Data jarak dan anomali Bouguer selanjutnya dilakukan proses FFT (*Fast Fourier Transform*) dalam domain spasial (Δx) tertentu. Persamaan Transformasi Fourier dikemas dalam bahasa pemrograman pada perangkat lunak *Numeri*. Hasil dari proses FFT adalah nilai real dan imajiner dari setiap lintasan yang selanjutnya akan diproses dengan menggunakan perangkat lunak *Ms.Excel* untuk mendapatkan nilai amplitudo (A), $\ln A$, frekuensi dan nilai bilangan gelombang k . Nilai amplitudo (A) dihasilkan dengan cara menghitung akar kuadrat dari nilai real dan imajiner. Nilai $\ln A$ dihasilkan dengan cara melogaritmakan nilai amplitudo (A). Perhitungan nilai frekuensi bergantung pada domain spasial (Δx) yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai gelombang k diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan persamaan:

$$k = 2\pi f \quad (39)$$

Setelah semua nilai diperoleh selanjutnya akan diplot grafik antara $\ln A$ (sumbu y) dan k (sumbu x). Dari grafik akan didapatkan dua gradien, gradien atau kemiringan garis dari grafik $\ln A$ terhadap k adalah kedalaman bidang batas residual dan regional. Gradien yang bernilai besar mencerminkan bidang diskontinuitas dari anomali regional (dalam) dan gradien yang bernilai kecil adalah bidang diskontinuitas dari anomali residual. Perpotongan antara kedua gradien adalah bilangan gelombang k_c (*cutoff*) yang merupakan dasar dalam menentukan lebar jendela. Nilai kedalaman rata-rata hasil regresi linear residual dan regional akan digunakan pada pemodelan struktur bawah permukaan.

3. Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Anomali Bouguer pada metode gayaberat disebabkan oleh perbedaan densitas batuan, baik yang berada dekat dengan permukaan bumi maupun yang jauh dari permukaan bumi. Efek yang berasal dari batuan pada daerah dangkal disebut dengan anomali residual sedangkan efek yang berasal dari batuan yang dalam disebut dengan anomali regional. Dalam penelitian menggunakan metode gayaberat ini semua anomali diamati, baik yang berasal dari daerah dangkal maupun daerah dalam, oleh karena itu perlu dilakukan pemisahan anomali regional dan residual dari anomali Bouguer. Pada penelitian ini penulis menggunakan pemisahan dengan metode *moving average*. *Moving average* merupakan perata-rataan dari data anomali gayaberat, hasil dari metode ini adalah anomali regional, dan untuk anomali residual diperoleh dari selisih antara anomali Bouguer

dengan anomali residual. Perangkat lunak yang digunakan untuk proses ini adalah perangkat lunak *Geosoft*, proses pemisahan anomali dimulai dengan menginputkan data anomali Bouguer ke dalam perangkat lunak *Geosoft* lalu nilai lebar jendela optimal yang didapatkan pada proses analisis spektral dimasukkan sebagai nilai *input* pemisahan.

4. Analisis Derivative

Setelah didapatkan anomali residual dan regional dari *filtering moving average*, maka akan diketahui nilai anomali rendah memperlihatkan adanya batuan dengan kontras rapat massa batuan yang lebih rendah (batuan sedimen), sedangkan anomali tinggi mencerminkan adanya batuan dengan kontras rapat massa lebih tinggi, sebagai data pendukung untuk analisis struktur bawah permukaan tersebut maka penulis melakukan analisis *derivative* untuk sebaran patahan pada daerah penelitian, analisis *derivative* juga dilakukan untuk membantu dalam pembuatan model 2,5D, analisis *derivative* yang digunakan pada penelitian ini adalah turunan pertama anomali *Residual* atau *First Horizontal Derivative* (FHD) dan turunan kedua anomali *Residual* atau *Second Vertical Derivative* (SVD). Untuk analisis *derivative* turunan pertama penulis melakukan slicing pada peta anomali Residual dan selanjutnya dibuat grafik berdasarkan teori dasar turunan pertama *First Horizontal Derivative* (FHD). Pada peta kontur SVD dibuat berdasarkan prinsip dasar dan teknik perhitungan yang telah dijelaskan oleh Henderson & Zietz (1949), Elkins (1951), dan Rosenbach (1953). Namun pada penelitian kali ini, peneliti menggunakan *filter* Elkins

yang dianggap sebagai *filter* yang cocok untuk digunakan analisis struktur geologi bawah permukaan.

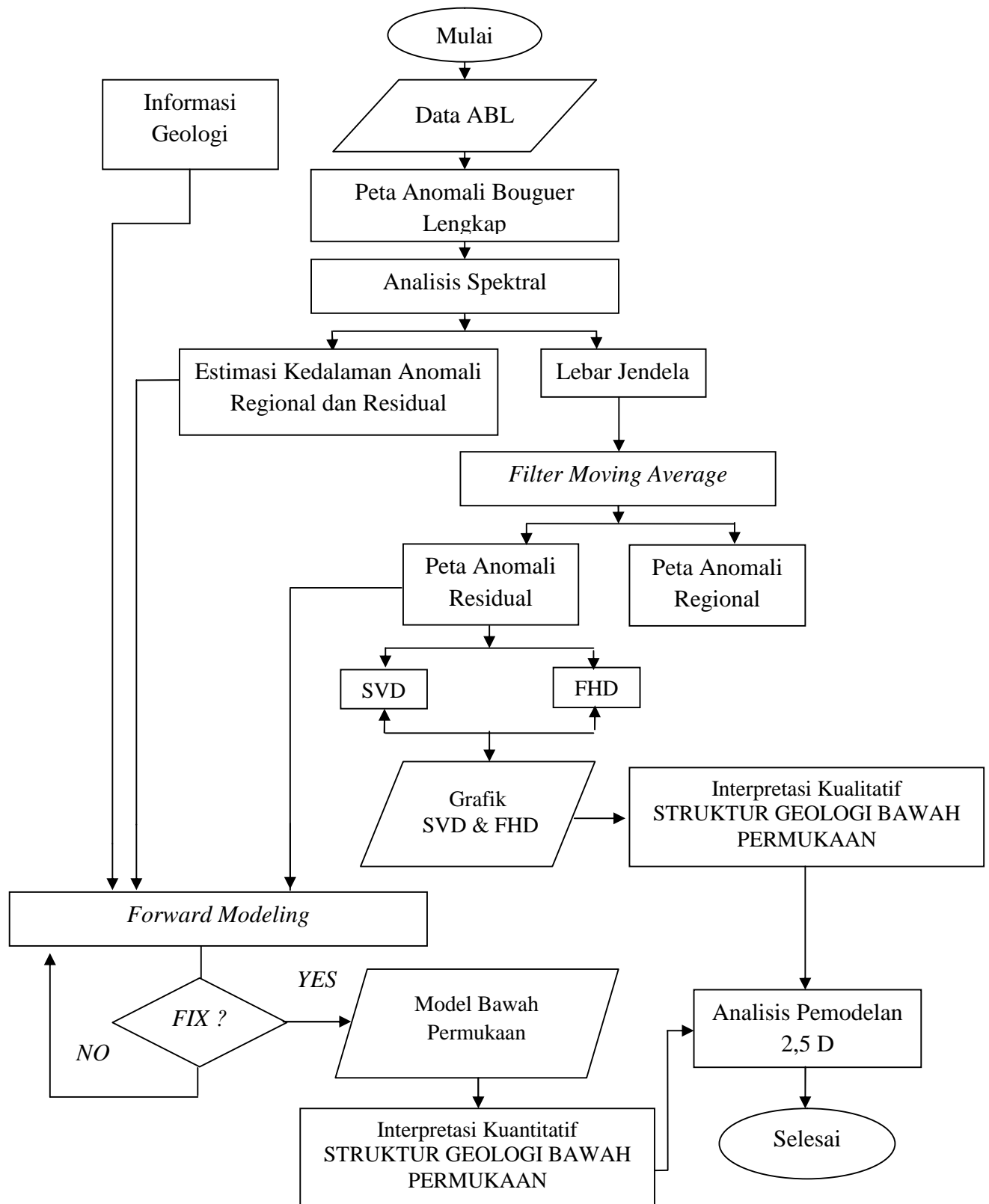
5. Pemodelan Bawah Permukaan

Pemodelan bawah permukaan dalam penelitian ini penulis menggunakan dua metode, yaitu dengan metode *forward modeling* (2,5D) atau pemodelan ke depan yang dibantu dengan perangkat lunak *Geosoft*.

Forward modeling dilakukan dengan cara menginput data jarak dan data anomali residual berdasarkan lintasan atau *slice* yang telah di tentukan pada perangkat lunak *Geosoft*. Penentuan lintasan dalam penelitian ini penulis menarik lintasan dengan melewati jalur perpotongan sesar ransiki dan sesar sorong. Dimulai dengan membuat *polygon* terlebih dahulu kemudian dibandingkan dengan anomali hasil pengukuran, densitas yang sesuai dengan informasi geologi dijadikan *input* untuk *polygon* dan rata-rata kedalaman bidang diskontinuitas dangkal (residual) dan dalam (regional) yang telah diperoleh dari proses analisis spektral digunakan sebagai acuan atau *input* pada saat menentukan batas batuan dasar pada saat pemodelan, dari hasil pemodelan.

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam pengolahan data adalah sebagai berikut :



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil adalah :

1. Daerah penelitian memiliki nilai anomali Bouguer antara 4 mGal sampai 96 mGal dengan anomali rendah pada bagian kiri daerah penelitian yang memanjang dengan arah relatif baratlaut-tenggara, anomali sedang berada pada bagian tengah daerah penelitian yang tersebar di daerah barat-timur daerah penelitian, anomali tinggi tersebar pada bagian utara daerah penelitian.
2. Berdasarkan analisis FHD dan SVD 3 lintasan pada daerah penelitian (A-A', B-B', dan C-C') diidentifikasi terdapat adanya intrusi batuan dan juga sesar naik. Pada lintasan A-A' berdasarkan pemodelan 2D bawah permukaan tidak ditemukan adanya intrusi batuan jika dilihat dari respon observasi data gravity dan hanya berupa perlapisan batuan. Pada lintasan B-B' dan C-C' yang memotong sesar Ransiki diidentifikasi adanya intrusi batuan pada lintasan B-B' sedangkan pada lintasan C-C' terdapat adanya sistem sesar naik (*Thrust Fault*) dengan nilai FHD maksimum dan minimum yang menunjukkan batas bidang kontak dan nilai SVD

memperlihatkan nilai SVD minimum lebih besar daripada nilai mutlak SVD maksimum.

3. Hasil pemodelan bawah permukaan 2,5D menunjukkan:
 - a. Letak patahan pada pemodelan 2,5D sesuai dengan respon grafik SVD yang diperoleh dari peta anomali SVD residual.
 - b. Batuan pengisi dari penampang struktur bawah permukaan yang dilewati oleh sesar Sorong yaitu Formasi Kemum (SDk) dengan densitas 2,65 gr/cc, Endapan Aluvium (Qa) dengan densitas 2,3 gr/cc. pada sesar Ransiki batuan yang tersesarkan yaitu Diorit Lembai (Tmle) dengan densitas 2,75 gr/cc dan Bancuh (RFx) yang tersusun oleh Batugamping tergeruskan dengan densitas sebesar 2,67 gr/cc, dan batuan Gunung Api (Tema) dengan nilai densitas 2,55 gr/cc.

B. Saran

Adapun saran yang coba diberikan oleh penulis adalah :

1. Perlu dilakukan penelitian dengan data geofisika lain, untuk melihat korelasi antar metode dan mengetahui struktur-struktur yang lebih kecil.
2. Diperlukannya data gravity yang lebih banyak lagi untuk memberikan gambaran anomali bawah permukaan yang lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, E. M. 1951. *The Dynamics of Faulting*. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Blakely, R. J. 1996. *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cordell, L. 1979. *Gravimetric Expression of Graben Faulting in Santa Fe Country and Espanola Basin, New Mexico*. New Mexico. Geol. Soc. Guidebook, 30th Field Conf., 59-64.
- Davis, G. H. 1984. *Structural Geology of Rocks and Regions*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Diyanti, A. 2014. Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Leuwidamar Berdasarkan Analisis Spektral Data Gaya Berat. (Skripsi) Prodi Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.
- Elkins, T. A. 1951. *The Second Derivative Method of Gravity Interpretation*. Geophysics, v.23, h.97-127.
- Fitriana, I. 2011. *Penentuan Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Analisa dan Pemodelan Data Gayaberat*, Geophysics Program Study Departement of Physics, University of Indonesia.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia : Jakarta.
- Hartati, A. 2012. Identifikasi Struktur Patahan Berdasarkan Analisa Derivative Metode Gayaberat Di Pulau Sulawesi. (Skripsi) Depok: Universitas Indonesia
- Kadir, W.G.A. 2000. *Eksplorasi Gayaberat dan Magnetik*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB.
- Octonovrihya, L. 2009. Analisa Perbandingan Anomaly Gravitasi dengan persebaran intrusi air asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika Vol.10 No.1 : AMG*.

- Robinson GP, Ratman N, dan Pieters PE. 1990. *Geologi Lembar Manokwari, Irian Jaya*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Departemen Pertambangan dan Energi.
- Sari, I.P. 2012. Study Komparasi Metode Filtering Untuk Pemisahan Regional dan Residual Dari Data Anomali Bouger. (*Skripsi*) Prodi Fisika FPMIPA Universitas Indonesia, Depok.
- Talwani, M., Worzel, J.L. dan Landisman, M. 1969. Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research: Vol.64 No.1*
- Telford, W.M., Goldrat, L.P., dan Sheriff, R.P. 1990. *Applied Geophysics 2nd ed.* Cambridge University Pres, Cambridge.
- Zaenudin, A., Sarkowi, M., dan Suharno. 2013. *Pemodelan Sintetik Gradien Gayaberat Untuk Identifikasi Sesar*. Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik, UNILA.