

**INVERSI 2D DATA MAGNETOTELURIK UNTUK
MENGETAHUI KEBERADAAN HIDROKARBON
DAERAH BULA, MALUKU**

(Skripsi)

Oleh

ELEN NOVIA LIMSWIPIN



**KEMENTRIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2017**

ABSTRACT

2D INVERSION MAGNETOTELLURIC DATA FOR UNDERSTANDING THE HIDROCARBON PRESENCE IN BULA, MALUKU

By

ELEN NOVIA LIMSWIPIN

There had been done a regional research which title is “2D inversion magnetotelluric data for understanding the hidrocarbon presence in Bula, Maluku”. This study aims to determine the resistivity distribution area of research based on data Magnetotelluric, identifying the presence of hydrocarbons based on the value of the resistivity of the results of 2D inversion of data Magnetotelluric. Methods of data processing done are (i) transform raw data from the time domain into the frequency domain, (ii) reduce noise by robust processing, (iii) process combine, (iv) Selection cross power, (v) inversion 1D and 2D. 2D inversion results is sectional subsurface resistivity distribution, layer having resistivity values 7-16 Ωm along MT1 and MT7 point at a depth of 1000 meters is a clay stone which is indicated as cap rock. Layer with resistivity values 34-120 Ωm , which is between the point MT6 and MT7 at a depth of 1500 meters is indicated as the sandstone reservoir. Based on geologic information and sectional 2D inversion seen their fault based on the resistivity contrast is between the point MT2 and MT3, MT3 and MT4 and MT6 and MT7.

Keywords: magnetotelluric, 1D inversion, 2D inversion, hidrocarbon, Bula.

ABSTRAK

INVERSI 2D DATA MAGNETOTELURIK UNTUK MENGETAHUI KEBERADAAN HIDROKARBON DAERAH BULA, MALUKU

Oleh

ELEN NOVIA LIMSWIPIN

Telah dilakukan penelitian dengan tema “inversi 2 dimensi data magnetotelurik untuk mengetahui keberadaan hidrokarbon daerah Bula, Maluku”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi resistivitas daerah penelitian berdasarkan data magnetotelurik, mengidentifikasi keberadaan hidrokarbon berdasarkan nilai resistivitas dari hasil inversi 2D data magnetotelurik. Metode pengolahan data yang dilakukan adalah (i) mengubah raw data dari domain waktu kedalam domain frekuensi, (ii) mereduksi noise dengan melakukan *robust processing*, (iii) melakukan proses *combine*, (iv) seleksi *cross power*, (v) melakukan inversi 1D dan 2D. Hasil inversi 2D yaitu penampang distribusi resistivitas bawah permukaan, lapisan yang memiliki nilai resistivitas 7 – 16 Ωm di sepanjang titik MT1 dan MT7 pada kedalaman mencapai 1000 meter merupakan batu lempung yang diindikasikan sebagai *cap rock*. Lapisan dengan nilai resistivitas 34 – 120 Ωm yang berada diantara titik MT6 dan MT7 pada kedalaman 1500 meter merupakan batu pasir yang diindikasikan sebagai reservoir. Berdasarkan informasi geologi dan penampang inversi 2D terlihat adanya sesar berdasarkan nilai resistivitas yang kontras yaitu diantara titik MT2 dan MT3, MT3 dan MT4 serta MT6 dan MT7.

Kata kunci:magnetotelurik, inversi 1D, inversi 2D, hidrokarbon, Bula.

**INVERSI 2D DATA MAGNETOTELURIK UNTUK
MENGETAHUI KEBERADAAN HIDROKARBON
DAERAH BULA, MALUKU**

Skripsi

Oleh

ELEN NOVIA LIMSWIPIN

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**KEMENTRIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2017**

Judul Skripsi : **INVERSI 2D DATA MAGNETOTELURIK
UNTUK MENGETAHUI KEBERADAAN
HIDROKARBON DAERAH BULA, MALUKU**

Nama Mahasiswa : **Elen Novia Limszipin**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215051021

Jurusan : Teknik Geofisika

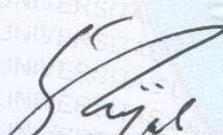
Fakultas : Teknik

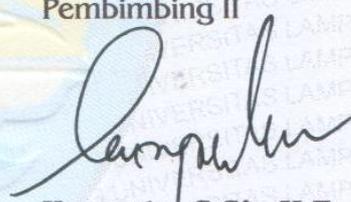
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

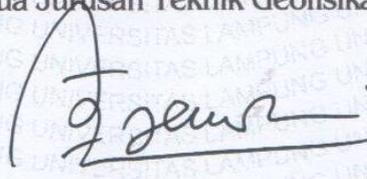
Pembimbing I

Pembimbing II


Syamsurijal Basimeng, S.Si., M.Si.
NIP 19730716 200012 1 002


Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

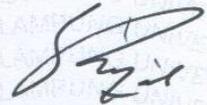

Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720912 199903 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

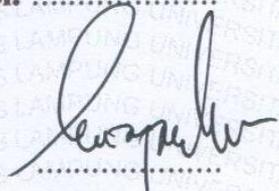
Ketua

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



Sekretaris

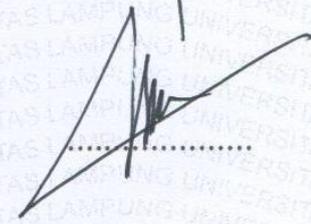
: Karyanto, S.Si., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si.

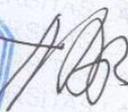


2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 19620717 198730 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 17 Maret 2017

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 17 Maret 2017

Yang Membuat Pernyataan,



Elen Novia Limswipin

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Metro, 17 November 1994, dan merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pasangan Bapak Richardus Sumardiyanto (Alm) dan Ibu Lusia Rosilah.

Penulis pernah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 10 Metro Pusat diselesaikan pada tahun 2006, dan penulis melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 6 Metro diselesaikan pada tahun 2009, penulis melanjutkan Sekolah Menengah Atas yang ditempuh di SMA Negeri 3 Metro diselesaikan pada tahun 2012. Penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN tertulis pada tahun 2012.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana di biro Kesekretariatan periode 2013/2014, pada tahun 2014/2015 penulis di percaya menjadi Sekretaris di biro Kesekretaritan. Bendahara Society of Exploration Geophysicist (SEG) Chapter Universitas Lampung 2014, Sekretaris Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia (HMGI) Regional Sumatera 2015.

Penulis menyelesaikan Kerja Praktik di PT. Bukit Asam (Persero) Tbk Tanjung Enim, Sumatera Selatan pada 5 Desember 2015 dengan judul “Interpretasi Litologi Daerah Tambang Air Laya dan Penentuan *Total Moisture*, Kandungan Abu dan Kalori pada *Seam* Batubara”, penulis melanjutkan Tugas Akhir di Pusat Survei Geologi Bandung, Jawa Barat pada 17 September hingga 17 November 2016 hingga akhirnya penulis menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tanggal 17 Maret 2017 dengan skripsi yang berjudul **“Inversi 2D Data Magnetotelurik untuk Mengetahui Keberadaan Hidrokarbon Daerah Bula, Maluku”**.

PERSEMBAHAN

Atas berkat dan kasih-Nya, dengan segala kerendahan hati
kupersembahkan skripsiku ini kepada:

Bapakku Tercinta Richardus Sumardiyanto (Alm)
Ibuku Tersayang Lusia Rosilah

Terimakasih untuk setiap pengorbanan, peluh keringat, kesabaran, kasih dan sayang, serta
doa yang tiada henti.

Kakakku Hadrianus Rudi Palmajaya, A.md.

Terimakasih selalu mendukung, dan mendoakan.

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2012
Keluarga besar Teknik Geofisika Universitas Lampung
Almamaterku tercinta Universitas Lampung

Tempatku memperoleh ilmu dan merancang mimpi.

Semua penyemangat dan inspirasi bagiku

MOTTO

Penyemangat sejati adalah diri sendiri
(Elen Novia Limswipin)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Inversi 2D Data Magnetotelurik untuk Mengetahui Keberadaan Hidrokarbon Daerah Bula, Maluku”.

Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Skripsi ini merupakan hasil Tugas Akhir yang penulis laksanakan di Pusat Survei Geologi, Kementerian ESDM RI.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini dapat terselesaikan atas bantuan dari pihak-pihak terkait dan dalam penelitian serta penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Sehingga, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca dan pembaruan ilmu di masa yang akan datang.

Demikian kata pengantar yang dapat penulis sampaikan, apabila ada salah kata penulis mohon maaf.

Penulis

Elen Novia Limswipin

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas kasih dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Inversi 2D Data Magnetotelurik untuk Mengetahui Keberadaan Hidrokarbon Daerah Bula, Maluku”**.

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

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala kasih dan berkat-Nya.
2. Bapak Richardus Sumardiyanto (Alm) dan ibu Lusia Rosilah tercinta yang telah memberikan segala pengorbanan, kasih sayang dan kesabaran serta doa yang diberikan tanpa rasa lelah.
3. Kakaku Hadrianus Rudi Palmajaya, A.Md yang terus mendukung penulis.
4. Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika.
5. Bapak Prof. Drs. Suharno, M.Sc, Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik.
6. Bapak Dr. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., sebagai Pembimbing Akademik sekaligus selaku penguji atas bimbingan, saran dan masukannya selama penulis menjalani proses perkuliahan, khususnya dalam proses menyelesaikan skripsi.

7. Bapak Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si sebagai Pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, saran dan masukannya dalam pembuatan skripsi.
8. Bapak Karyanto, M.Si., M.T., sebagai Pembimbing 2 yang juga telah banyak memberikan kritik dan saran selama proses pembuatan skripsi.
9. Bapak Muhammad Noor Indragiri selaku Pembimbing Lapangan di Pusat Survei Geologi yang telah sabar memberikan materi dan memberi masukan dalam proses Tugas Akhir saya terselesaikan.
10. Bapak Hidayat yang telah banyak memberikan masukan dan materi di Pusat Survei Geologi selama proses Tugas Akhir.
11. Dosen-Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung atas semua ilmu pengetahuan yang telah diberikan.
12. Andreas Deddi Adrian, Ryan Mulyadi Saragih dan Pebrianta Tarigan atas kebaikannya, selalu ada memberi semangat serta bantuan baik materi maupun spiritual.
13. Gita Purna Rae, Andina Zuhaera, Niar Amalia, Sigit Pratama teman seperjuangan Tugas Akhir, tempat berbagi kebingungan dan keceriaan yang selalu menyemangati dan membantu dalam segala hal selama Tugas Akhir.
14. Azis Riyanti, Lia Vivi Farida, Andi Veaneta, Nasyratul Ilmi, Lita Samantha Manurung, dan Nur Asiah yang tiada hentinya memberikan doa dan canda tawa ngakak-ngakak setiap hari. Diantara kalian selalu hadir dalam keadaan suka dan duka, memberikan bantuan apapun sebisanya. Kepada Bagas Setiadi, terimakasih atas ilmu pembuatan petanya. Made Jnana atas segala kebaikannya. Selamat berjuang kawan.

15. Ria Rizky Lestari (mbah) sahabat dan keluarga, mantan teman sekosan, tetangga 2 km, terimakasih atas kebaikan dan kehadirannya, tempat curahan cerita kehidupan.
16. Teman sekantor di PSG Prista Bela, M. Azhary, Jordy Carlingga Reno, Faisal dan Bang John.
17. Adik-adik 013 tersayang Wuri Andari, Endah, Winda Setyani, Deswita Sari, Feni Priyanka dan semua adik-adik 013, terimakasih atas tempat berteduh, tempat curahan hati, canda tawa dan segala kebaikannya. Semangat dan selamat berjuang.
18. Kak Valantino Agus S. dan kak Feby yang menjadi teman pertama di perantauan selama Tugas Akhir, terimakasih atas asupan rohani dan segala kebaikannya.
19. Teman-teman Teknik Geofisika 2012, Bari, Agus, Ghifari, Legowo, Andre, Ari, Beny, Bela, Betha, Carta, Dedi Y, Dimassuen, Onoy, Edo, Esha, Ferry, Hilman, Irfan, Irwan Komtiku, Kukuh, Dimastya, Kevin, Medi, Dilla, Aldo, Rival, Resti, Gata, Sule, Virgian, Zhai dan Zulhijri.
20. Kakak tingkat 011 terimakasih atas ilmu yang telah diberikan, keakraban, keceriaan dan kebaikannya.
21. Kakak tingkat 09 dan 10 serta adik tingkat 014, 015 dan 016.
22. Keluarga besar Teknik Geofisika Universitas Lampung serta almamater tercinta, Terimakasih atas semuanya.

Bandar Lampung, 17 Maret 2017

Elen Novia Limswipin

DAFTAR ISI

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

B. Fisiografi Regional	8
C. Stratigrafi Regional	9

III. TEORI DASAR

A. Metode Magnetotellurik	21
B. Konsep Dasar Magnetotellurik	23
C. Impedansi Bumi Homogen	27
D. Impedansi Bumi Homogen Berlapis	29
E. <i>Skin Depth</i>	33
F. Pengolahan Data Magnetotellurik	35

IV. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian	42
B. Alat dan Bahan	43
C. Prosedur Penelitian	43
D. Diagram Alir Penelitian	50
E. Matrik Penelitian	51

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Titik Pengukuran Magnetotellurik	52
B. Hasil Koherensi Data	52
C. Hasil Inversi 1D Data Magnetotellurik	55
D. Hasil Inversi 2D Data Magnetotellurik	67

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan.	75
B. Saran	76

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Geologi Lembar Bula dan Watubela.....	7
2. Fenomena <i>solar wind</i>	22
3. Model 1-D terdiri dari n-lapisan horizontal	30
4. Peta lokasi pengukuran	42
5. Contoh data <i>time series</i>	44
6. Kurva MT sebelum dan sesudah seleksi <i>cross power</i>	48
7. Diagram alir penelitian.....	50
8. Titik pengukuran data MT	53
9. Hasil inversi 1D titik MT1	57
10. Hasil inversi 1D titik MT2.....	58
11. Hasil inversi 1D titik MT3.....	61
12. Hasil inversi 1D titik MT4.....	62
13. Hasil inversi 1D titik MT5.....	63
14. Hasil inversi 1D titik MT6.....	65
15. Hasil inversi 1D titik MT7.....	66
16. Sayatan geologi daerah penelitian	68
17. Model penampang resistivitas hasil inversi 2D.	70
18. Model penampang resistivitas 2D hasil korelasi inversi 1D.....	71
19. Borehole (a), mpdel titik pengukuran data MT (b).....	72

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Stratigrafi dan sejarah tektonik Pulau Seram	12
2. Matrik penelitian	51
3. Hasil nilai koherensi data	54
4. Sebelum <i>combine</i> (a) sesudah <i>combine</i> (b).....	54
5. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT1	55
6. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT2.....	56
7. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT3.....	59
8. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT4.....	59
9. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT5.....	60
10. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT6.....	64
11. Resistivitas dan ketebalan lapisan pada titik MT7	64
12. Nilai resistivitas batuan (Telford, 1990)	67
13. Nilai porositas (Kusworo dan Aries, 2014).....	74

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Ketersediaan hidrokarbon di daerah Bula sudah diketahui sejak zaman perang dunia kedua (Gafoer dkk, 1993). Telah dilakukan penelitian sebelumnya oleh Styanta dan Setiadi pada tahun 2010 untuk mengetahui pola struktur dan geodinamika cekungan di Pulau Seram termasuk cekungan pada daerah Bula.

Penelitian oleh Setyanta dan Setiadi pada tahun 2010 menggunakan metode gaya berat. Pada penelitian tersebut cekungan ditunjukkan oleh kontur anomali -50 mgal hingga 0 mgal berdasarkan peta anomali bouger. Sedangkan batuan penyusun cekungan tersebut diidentifikasi berdasarkan nilai rapat massa dalam pemodelan.

Terdapat beberapa metode geofisika yang digunakan dalam eksplorasi cekungan migas, salah satu metode yang digunakan adalah metode Magnetotelurik (MT).

Metode MT mampu memetakan struktur geologi serta menampilkan zona *interest* berdasarkan kontras tahanan jenis material bawah permukaan.

Metode MT memanfaatkan sumber dari alam, berupa gelombang elektromagnetik dengan mengukur fluktuasi medan magnet dan medan listrik pada arah tegak lurus di permukaan bumi dari puluhan meter sampai ratusan kilometer.

Frekuensi yang rendah di bawah 1Hz terjadi akibat dari fenomena angin matahari dari aktivitas magnetosfer dan ionosfer, sedangkan untuk frekuensi tinggi di atas 1 Hz sumber medan magnet berasal dari petir yang akan menjalar hingga ke permukaan bumi yang terjadi di ionosfer pada seluruh bagian (Simpson dan Bahr, 2005).

Gelombang elektromagnetik memiliki frekuensi yang dihasilkan yaitu dari 0,001 Hz sampai 1000 Hz. Semakin kecil frekuensi yang digunakan maka semakin dalam penetrasi gelombang elektromagnetik ketika berdifusi kedalam suatu medium. Prinsip kedalaman penetrasi ini adalah *electromagnetic skin depth*. *Skin depth* bergantung pada nilai resistivitas dan frekuensi yang digunakan.

Kebergantungan fenomena listrik - magnet terhadap sifat kelistrikan terutama konduktivitas medium (bumi) dapat dimanfaatkan untuk keperluan eksplorasi menggunakan metode MT. Informasi mengenai konduktivitas medium yang terkandung dalam data MT dapat diperoleh dari penyelesaian Persamaan Maxwell menggunakan model-model yang relatif sederhana. Dengan demikian metode ini masih relatif baru jika dibandingkan dengan metode geofisika lainnya (Grandis, 2010).

Dalam penelitian ini, melakukan inversi 1 dan 2 dimensi resistivitas bawah permukaan berdasarkan data magnetotelurik. Prosedur pada penelitian ini adalah: mengubah data *time series* menjadi frekuensi, *robust processing*, *robust processing up*, *combine*, seleksi *cross power*, mengubah data menjadi EDI file, melakukan inversi dan kemudian menginterpretasi data magnetotelurik yang telah diolah.

B. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan inversi dua dimensi dengan metode magnetotelurik.
2. Mengetahui distribusi resistivitas daerah penelitian berdasarkan data magnetotelurik.
3. Mengidentifikasi keberadaan hidrokarbon berdasarkan nilai resistivitas dari hasil inversi dua dimensi data magnetotelurik.

C. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan metode inversi dua dimensi penampang resistivitas berdasarkan data magnetotelurik.
2. Resistivitas hidrokarbon berdasarkan pada nilai rentang.

I. TINJAUAN PUSTAKA

A. Struktur Geologi dan Tektonika

Kawasan Indonesia Timur, termasuk Busur Banda adalah tempat berinteraksinya lempeng-lempeng aktif di dunia, yakni Lempeng Filipina (bagian Lempeng Asia), Lempeng Laut Banda, Lempeng Australia, dan Lempeng Pasifik (de Smet dalam Setyanta dan Setiadi, 2010). Tektonis pada interaksi tersebut melahirkan sesar besar yang berasosiasi dengan vulkanisme dan lipatan.

Salah satu akibat lainnya dari interaksi beberapa lempeng tersebut adalah terbentuknya rangkaian busur luar, busur dalam (busur vulkanik), dan cekungan-cekungan sedimentasi yang disertai dengan kompleksitas deformasi litologi. Walaupun di tempat-tempat tertentu seperti di Seram subdaksinya hanya melibatkan dua lempeng, namun tektonis yang bekerja berasal dari tiga lempeng yaitu Lempeng Laut Banda, Lempeng Australia, dan Lempeng Pasifik (Setyanta dan Setiadi, 2010).

Audley-Charles drr. Chamalaun & Grady dalam Setyanta dan Setiadi (2010) berpendapat bahwa jalur penunjaman (zona subdaksi) di Busur Banda berada di sebelah utara Pulau Timor dan di sebelah selatan Pulau Seram menerus hingga palung Weber membentuk setengah lingkaran (busur).

Sebagian besar batuan di Lembar Bula, umumnya berkisar dari Pra-Tersier sampai Miosen, telah terlipat kuat dan tercenangga. Bagian ini meliputi batuan malihan, Formasi Kanikeh, Formasi Manusela, Formasi Sawai, Formasi Hatuolo, Formasi Selagor dan Kompleks Nif (Gafoer dkk, 1993).

Struktur perdauan (foliasi) dijumpai pada batuan malihan dengan arah yang tidak teratur. Kekar yang kecil dijumpai pada batuan yang tua, tetapi jarang pada batuan yang berumur Tersier Akhir sampai Kuartar. Sesar yang dijumpai adalah sesar naik, sesar turun, dan sesar geser jurus. Sesar naik terjadi pada batuan malihan, sedimen Trias-Jura dan batuan yang berumur Miosen. Ditafsirkan, sesar naik ini terjadi pada kala Miosen Akhir. Arah jurusnya lebih kurang baratlaut-tenggara dengan kemiringan ke arah baratdaya (Gafoer dkk, 1993).

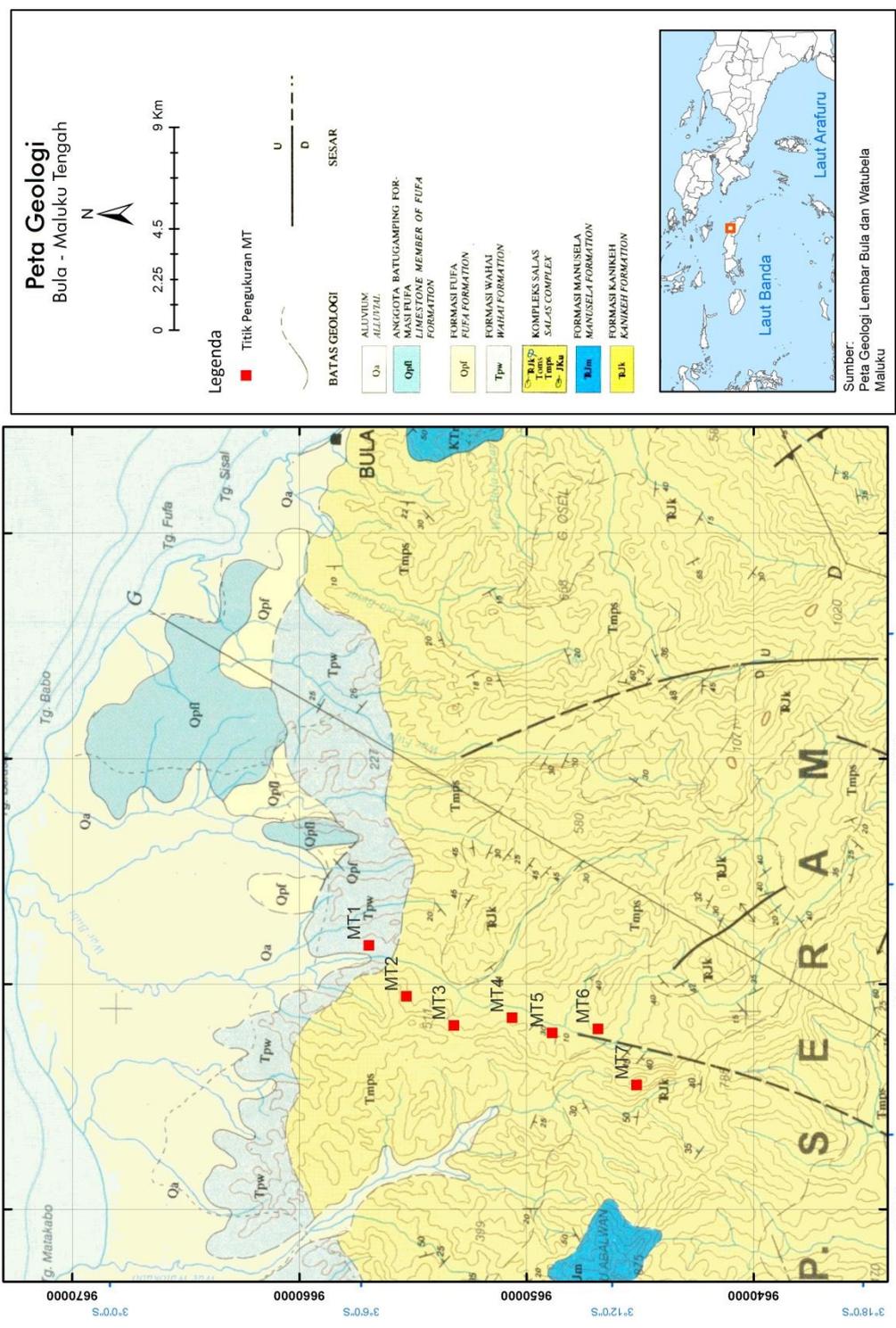
Adanya perulangan lapisan batuan yang berumur Kapur Akhir sampai Miosen di daerah Nif diduga akibat adanya pergentengan yang berhubungan erat dengan sesar naik tersebut. Sesar turun mempunyai arah jurus yang umumnya hampir serupa dengan arah jurus sesar naik, melibatkan batuan yang berumur Trias-Jura sampai Pliosen. Sedangkan sesar geser jurus melibatkan batuan yang berumur sampai pleitosen dengan arah jurus berlawanan dengan jurus sesar naik, yaitu timurlaut-baratdaya (Gafoer dkk, 1993).

Tektonik yang terjadi di Lembar Bula dapat ditafsirkan mulai sebelum pengendapan batuan Trias-Jura. Tektonik yang terjadi pada waktu itu menghasilkan ketidakselarasan antara batuan malihan dengan Formasi Kanikeh dan Formasi Manusela. Adanya perubahan yang berangsur dari filit ke batupasir atau batulempung (Formasi Kanikeh) berasal dari batuan malihan yang

menunjukkan hubungan ketidakselarasan antara keduanya (Van der Sluis dalam Gafoer, 1993).

Masa tektonik berikutnya terjadi setelah pengendapan Formasi Kanikeh dan Formasi Manusela, yakni setelah Jura Akhir. Di Lembar ini, hubungan batuan yang berumur Kapur Akhir dengan batuan Trias-Jura tidak jelas karena keduanya tersingkap secara terpisah. Namun, Van der Sluis menemukan batuan konglomerat pada batuan Kapur Akhir yang ditafsirkan adanya ketidakselarasan antara batuan Trias-jura dengan Kapur Akhir dan merupakan masa orogenesis. Sejak Kapur Akhir sampai Miosen terjadi pengendapan sedimen yang menerus di lingkungan laut dalam hingga neritic (Gafoer dkk, 1993).

Pada Miosen Akhir terjadi lagi tektonik yang menghasilkan sesar naik dan pergentengan. Sesar ini mengakibatkan munculnya batuan ultramafic di atas batuan yang lebih muda. Pada fase tektonik. pembentukan olistrotom (sebagai hasil sekunder) disusul pembentukan sesar turun. Diduga sesar ini giat lagi pada Pliosen Akhir. Pembentukan batuan bancuh tersebut diduga berlangsung sampai Pliosen Tengah (Gafoer dkk, 1993).



Gambar 1. Peta Geologi Lembar Bula dan Watubela (Gafoer dkk, 1993)

Pada Pliosen Awal, Formasi Wahai terendapkan di atas batuan bancuh. Bagian bawah Formasi tersebut bersentuhan secara tektonik dengan batuan bancuh. Pengendapan Formasi Wahai berlangsung sampai Pliosen Akhir. Pada Pliosen Awal terjadi orogenesis yang mengakibatkan susut laut di seluruh daerah ini (Gafoer dkk, 1993).

Di beberapa tempat terjadi ketidakselarasan antara Formasi Wahai dengan Formasi Fufa. Rotwell menamakannya pengangkatan Bula yang mengakibatkan pengikisan sebagian batuan Formasi Wahai di sepanjang pinggiran cekungan. Pada Pliosen Akhir setelah pengendapan Formasi Fufa, terjadi lagi pengangkatan yang menghasilkan ketakselarasan antara Formasi Fufa dengan batugamping terumbu (Gafoer dkk, 1993).

B. Fisiografi Regional

Pulau Seram dan beberapa pulau ditenggaranya terletak pada Busur-Banda Luar. Ada beberapa kesamaan topografi pada pulau ini dengan pulau-pulau di Kepulauan Tanimbar, Pulau Timor dan Pulau Rote yang terletak pada busur itu. Kesamaan itu berupa bukit kecil-kecil yang menonjol, yang biasanya terbentuk dari bongkahan besar batuan yang tercenanggakan (deformasi) dan dikelilingi oleh massa dasar lempungan (Gafoer dkk, 1993).

Morfologi daerah ini dipengaruhi oleh sebaran batuan serta keadaan strukturnya. Setiap satuan morfologi mencerminkan batuan tertentu dengan pola aliran sungainya yang mendaun atau menyiku. Lembar ini dapat dibedakan tiga satuan Morfologi, yakni: pegunungan, perbukitan dan dataran (Gafoer dkk, 1993).

Pegunungan terdapat di bagian tengah dan selatan Lembar tersusun oleh batuan malihan, batupasir dan batugamping Pra-Tersier. Daerah ini dicirikan oleh lembah yang umumnya sempit, lereng yang terjal dan banyak riam atau jeram. Puncak tertinggi mencapai 1071 meter di atas muka laut, terletak 25 kilometer di baratdaya Bula (Gafoer dkk, 1993).

Perbukitan terdapat di bagian utara, timur, sedikit di bagian selatan Lembar, dan sekitar Sungai Bobot-Masiwang tersusun oleh batuan campuran. Daerah ini dicirikan oleh lembah yang agak lebar, lereng bukit agak landai, beberapa kelokan sungai, aliran teranyam dan terjadinya pelebaran lembah, berjulung antara 50 dan 500 meter di atas muka laut (Gafoer dkk, 1993).

Dataran terdapat di daerah pantai utara, timur, sedikit di selatan, sepanjang dan muara Sungai Bobot-Masiwang. Daerah ini ditempati oleh endapan sungai dan pantai. Sungai umumnya berkelok dan mempunyai dataran banjir selain aliran teranyam, berjulung antara 0 dan 50 meter di atas muka laut (Gafoer dkk, 1993).

C. Stratigrafi Regional

Data stratigrafi telah merekam bahwa terjadi dua kali kompresi tektonis dan dua kali *continental break up* yang berkaitan dengan pembentukan Pulau Seram. Kejadian tersebut berkaitan dengan pembentukan sedimen yang diakibatkan oleh *thermal subsidence* bagi pengendapan Seri Australia (*proto-Seram*) yang tersingkap sebagai batuan *allochton* dan sebagai batuan sumber yang lebih muda (Kemp & Mogg dalam Gafoer, 1993).

Suksesi sedimentasi tersebut kemudian secara tidak selaras diakhiri dengan pengendapan Seri Seram yang berumur lebih muda (batuan sedimen *autochthon* di Cekungan Bula, seperti Kelompok Wahai dan Kelompok Bula.

Urut-urutan stratigrafi secara garis besarnya dapat dijelaskan sebagai berikut: Pertama adalah Seri Australia yang merupakan *source rock* dari Seri Seram yang terdiri atas kelompok batuan malihan Formasi Kanikeh (Trias), Formasi Saman saman (Trias-Jura), Karbonat Manusela (Jura) dan Kelompok Nief (Kapur-Miosen Akhir). Kedua adalah Seri Seram yang diawali dengan terobosan batuan vulkanik (Ambon Volcanic) dan disusul dengan pengendapan Formasi Wahai (Pleistosen Awal) dan Formasi Fufa (Pleistosen Akhir) (Kemp & Mogg dalam Gafoer, 1993).

Batuan tua yang tersingkap di Bula adalah batuan malihan yang terdiri dari sekis Kompleks Kabipoto (Pzta), batuan tersebut diduga berumur Perem dan tertindih tak selaras oleh batuan yang berumur Trias sampai Jura (Gafoer dkk, 1993).

Di beberapa tempat sentuhannya berupa sesar. Batuan Trias-Jura terdiri dari Formasi Kanikeh (TJk) berupa sedimen dan Formasi Manusela (TJm) berupa batugamping. Formasi Kanikeh terdiri dari perulangan batupasir, batulanau dan batulempung. Hubungan dengan Formasi Manusela menjemari (Gafoer dkk, 1993).

Formasi Sawai (Ks) terendapkan pada Zaman Kapur. Formasi ini menindih tak selaras Formasi Kanikeh dan Formasi Manusela. Formasi Sawai terdiri dari kalsilitit yang di beberapa tempat bersisipan serpih merah dan rijang dengan radiolarian (Gafoer dkk, 1993).

Formasi Hatuolo (Teh) terendapkan pada Tersier Awal yang terdiri dari serpih pasiran dengan sisipan napal dan lensa rijang dengan radiolarian. Formasi ini menindih selaras Formasi Sawai umurnya Paleosen-Eosen. Formasi Selagor (Toms) yang berumur Oligosen Akhir sampai Miosen Awal terendapkan kemudian dan menindih selaras Formasi Hatuolo. Formasi ini terdiri dari batugamping dan napal dengan sisipan serpih (Gafoer dkk, 1993).

Di daerah Nif terdapat beberapa macam batuan : kalsilutit, serpih dan napal yang sebagian besar serupa dengan batuan dari Formasi Sawai, Formasi Hatuolo dan Formasi Selagor, umurnya berkisar dari Kapur Akhir sampai Miosen Akhir. Kumpulan batuan tersebut tidak dapat dipisahkan mengalami pergentengan (imbrikasi) serta penggerusan setempat. Kumpulan batuan tersebut dinamakan Kompleks Nif (Gafoer dkk, 1993).

Batuan Bancuh yang disebut Kompleks Salas (Tmps) terdiri dari bongkahan batuan sedimen, beku dan malihan dari berbagai umur dan ukuran serta tercampur di dalam massa dasar lempungan. Satuan ini diduga terjadi pada Kala Mio-Pliosen. Kala Pliosen terendapkan Formasi Wahai (TpW) terdiri dari napal bersisipan batugamping (Gafoer dkk, 1993).

Tabel 1. Stratigrafi dan sejarah tektonik Pulau Seram
(Kemp dan Mogg dalam Setyanta dan Setiadi, 2010).

Umur	Litologi	Formasi	Link.Sed.	Tektonika	
Holosen					SERI SERAM
Pleistosen	Akhir	Formasi Fufa	Neritik	Cekungan fore land	
	Awal	F. Wahai	Batial		
Pliosen		Vulkanik Ambon F.Salas	Tektonit	Periode uplift dan gravity sliding	
Miosen		Lapisan Atas Nief	Reefs	Onst of uplift	SERI AUSTRALIA
Oligosen			Batial sampai laut dangkal		
Eosen					
Pliosen		Lapisan bawah Nief	Reefs	Uplift	
KAPUR	Akhir		Batial sampai lingkungan karbonat		
	Awal				
KAPUR	Atas	Serpih Kola	Serpih neritik	Contiental breakup/ seafloor spreading	
	Tengah	Fm. Manusela	Oolitik		
	Bawah	Saman-saman	Laut dalam Mar & Calsium		
TRIAS	Atas	Formasi Kanikeh	Turbidit	Ntra-cratonic rifting & Marine influx	
	Tengah				
	Bawah				
PERM	Atas	Kompleks Tehoru/kobipolo	Unit Basement Malihan	Incipient rifting	
	Bawah				

1. Formasi Kanikeh

Perulangan antara batupasir, batulanau dan batulempung yang merupakan batuan sedimen. Batuan berwarna kelabu muda hingga tua, berlapis halus (perariran) sampai perlapisan setebal 1 meter, kompak dan keras. Batupasir *grewake* berbutir halus sampai kasar, terpilah buruk, menyudut tanggung. Mineral pembentuknya antara lain kuarsa, feldspar, mika, kepingan batuan, mineral lempung dan bahan karbonan yang berjumlah agak banyak (Grafoer dkk, 1993).

Di beberapa tempat terdapat bintal batupasir halus atau batulanau. Dalam Formasi ini dijumpai struktur sedimen berupa perariran sejajar, perarian menggelombang dan perarian silangsiur. Di beberapa tempat terdapat permukaan erosi yang diikuti oleh perlapisan bersusun dan struktur turbidit lainnya. Formasi ini telah terlipat dan tersesarkan (Grafoer dkk, 1993).

Adanya batuan gunungapi dalam Formasi ini dan korok ijolit yang menerobos batuan tersebut di Seram Tengah. Fosil yang dijumpai dalam Formasi ini adalah jenis *Halobia* atau mungkin *monotis* yang terdapat agak jarang. Wanner menyatakan bahwa dalam sedimen ini di Seram Timur terdapat fosil *Lovcenipora vinassai* (Giatt), *Halonella*, *Monotis salinaria* Br. Dan *Amonitis* yang menunjukkan umur Trias (Grafoer dkk, 1993).

Batuan ini tersingkap di bagian tengah pulau dan di dekat pantai, daerah selatan Gunung Selagor, Kepulauan Gorong dan Watubela. Batuan ini banyak terdapat sebagai bongkahan asing dalam lempung (Tmps). Tebalnya melebihi 1000 meter. Formasi ini menindih tak selaras batuan malihan (Pzta) atau hubungan keduanya berupa sentuhan sesar, hubungan dengan Formasi Manusela (TJm) menjemari.

Lokasi tipe Formasi Kenikeh (lembah utara Gunung Binaya) di Lembar Masohi (Gafoer dkk, 1993).

2. Formasi Manusela

Satuan ini telah terlipat dan tersesarkan. Batugamping *Lovcenifora* dari Seram Timur berumur Jura Akhir. Terdapat fosil foraminifera dan ganggang yang berumur Trias-Jura, terendapkan dilingkungan laut dangkal. Batuan ini mengandung beberapa cangkang tipis *pelesipoda* seperti *Halobia* yang diduga berumur Trias-Jura Awal. dan mengandung pula *radiolarian* (Audley, 1975).

Batugamping tersingkap sedikit di bagian barat Lembar, tebalnya 700 meter. Selain itu, terdapat pula sebagai bongkahan asing di dalam Kompleks Salas (Tmps). Formasi Manusela selain menjemari dengan Formasi Kanikeh, di banyak tempat terletak selaras di atasnya. Lokasi tipe Formasi ini terletak di Pegunungan Manusela di Lembar Masohi (Tjokrosapoetro dan Rusmana dalam Gafoer, 1993).

3. Formasi Sawai

Kalsilutit, berwarna putih sampai kekuningan, pejal. Di beberapa tempat ditemukan sisipan tipis rijang berwarna kuning kecoklatan yang mengandung *radiolarian*. Di bagian atas Formasi ini di jumpai sisipan serpih merah. Per lapisannya tidak jelas dan pada umumnya terkekarkan. Pada sayatan tipis tampak adanya pecahan fosil foraminifera plankton yang tersebar dalam massa dasar mikrit. Kalsilutit yang dijumpai di daerah Nif mengandung foraminifera plankton genus *Globotruncana sp.* Dan beberapa genus yang termasuk keluarga *Heterohelicidae*, di antaranya genus *Heterohelix*. Fosil tersebut menunjukkan

umur Kapur Akhir dan diendapkan dalam lingkungan laut dalam (Gafoer dkk, 1993).

Di Lembar ini Formasi Sawai tersingkap di Gunung Teri (ujung tenggara Lembar), sebagian berupa bongkahan asing dalam Kompleks Salas (Tmps). Tebalnya tidak jelas, diperkirakan melebihi 500 meter. Hubungan satuan ini dengan batuan Trias-Jura tidak jelas, tidak selaras (Van der Sluis, 1950). Lokasi tipe Formasi ini terdapat di Teluk Sawai di Lembar Masohi (Tjokrosapoetro dan Rusmana dalam Gafoer, 1993).

4. Formasi Hatuolo

Serpih pasiran berwarna merah bata kecoklatan dan berlapis. Sisipan napal berwarna kelabu muda atau merah disertai lensa rijang yang mengandung radiolarian. Batuan ini terlipat kuat dan pada umumnya tergerus serta terkekarkan. Pada contoh serpih coklat yang di ambil dari daerah Nif ditemukan foraminifera plankton dalam jumlah cukup banyak walaupun pengawetan cangkangnya kurang baik (Gafoer dkk, 1993).

Napal yang tersingkap di daerah yang sama mengandung fosil foraminifera yang berumur Eosen. Dapat disimpulkan bahwa umur Formasi ini adalah Paleosen-Eosen dan diduga terendapkan di lingkungan laut dalam. Formasi ini tersingkap sedikit di bagian selatan dan tengah Lembar, sebagian berupa bongkahan asing di dalam Kompleks Salas (Tmps). Tebalnya diduga melebihi 500 meter. Satuan ini menindih selaras Formasi Sawai (Van der Sluis dalam Gafoer, 1993).

5. Formasi Selagor

Batugamping, di beberapa tempat kalsilitit, napal dan bersisipan serpih. Kalsilitit tidak berlapis sebagian tersilikakan dan terbreksikan. Ditemukan fosil foraminifera. Lingkungan pengendapannya adalah laut dalam bahkan sampai neritic. Satuan ini tersingkap di bagian tenggara Lembar, sebagian berupa bongkahan asing di dalam Kompleks Salas (Tmps) menindih selaras Formasi Hatuolo. Lokasi tipe Formasi ini terdapat di Gunung Selagor (Gafoer dkk, 1993).

6. Kompleks Nif

Kalsilitit, serpih dan napal yang tak dapat dipisahkan. Litologinya dapat dibandingkan dengan Formasi Sawai, Formasi Hatuolo dan Formasi Selagor. Himpunan batuan yang terdiri dari kalsilitit, serpih dan napal tersebut di Nif dan menyatukan ketiganya menjadi satu sataun stratigrafi yang telah mengalami pergentengan kuat dan penggerusan setempat. Satuan tersebut diberi nama Nif Beds. Umur satuan ini adalah Kapur Akhir-Miosen Akhir (Audley dkk, 1975).

7. Formasi Wahai

Napal berwarna putih kekuningan sampai kelabu muda, lunak dan berlapis tipis. Pada bagian atas dijumpai sisipan batugamping pasiran dan batupasir halus. Struktur sedimen yang ditemukan: permukaan erosi, perlapisan bersusun, struktur intraclast, perarian sejajar dan menggelombang. Umurnya Pliosen Akhir. Lingkungan pengendapan diduga laut cukup dalam (Gafoer dkk, 1993).

Singkapan Formasi ini cukup luas dan terlampar memanjang hampir searah dengan pulau, seperti di bagian utara dan selatan Lembar, di sekitar Sungai Bobot

dan Sungai Masiwang. Tebalnya sampai 450 meter. Satuan ini menindih tak selaras batuan yang berumur Trias sampai Tersier Awal. Sentuhannya dengan Kompleks Salas tidak jelas, di daerah dekat Sungai Semos ditemukan sentuhan sesar antara keduanya. Lokasi tipe Formasi ini terdapat di Wahai di Lembar Masohi (Tjokrosapoetro dan Rusmana, 1993). Satuan ini diberi nama Wahai Beds (Zillman dan Patten, 1975).

8. Formasi Fufa

Batupasir halus, batulanau, batulempung dan lensa konglomerat serta gambut. Batuannya berwarna kelabu muda, lunak sampai agak mampat, pada umumnya berlapis tipis. Perlapisannya hampir mendatar atau bersudut kemiringan kecil. Dibagian bawah, satuan ini terdiri dari batupasir dengan lensa konglomerat atau batupasir kasar. Komponen batuan tersebut terdiri dari batupasir dengan lensa konglomerat atau batupasir kasar (Gafoer dkk, 1993).

Komponen batuan tersebut terdiri dari kuarsa, kuarsit, rijang, batupasir, batulanau dan batulempung yang berwarna kehijauan dengan massadasar pasir yang mengandung mika. Tebal lensa tersebut dari beberapa centimeter sampai 20 centimeter. Satuan ini mengandung banyak fosil foraminifera bentos dan plankton serta cangkang moluska. Satuan ini berumur Plistosen. Lingkungan pengendapannya laut dangkal atau sampai darat (Gafoer dkk, 1993).

Satuan ini tersingkap disekitar Sungai Masiwang dan Sungai Semos. Di bagian timur Lembar dan sekitar Fufa. Tebalnya melebihi 300 meter. Satuan ini menunjukkan hubungan yang berangsur dengan Formasi Wahai, di beberapa

tempat seperti di sekitar Sungai Masiwang dan daerah Bula seutuhnya tak selaras. Tipe lokasi Formasi Fufa terdapat di S. Fufa \pm 10 kilometer sebelah barat Bula (Gafoer dkk, 1993).

9. Anggota Batugamping Formasi Fufa.

Batugamping berwarna putih, padat, berlapis, mengandung banyak kepingan koral dan ganggang. Bagian bawah terdiri dari konglomerat dan batugamping konglomeratan. Komponen konglomerat terdiri dari batupasir yang padat, batulanau, batulempung, rijang dan batuan malihan. Di beberapa tempat satuan ini berupa batugamping *globigerina* mengandung hampir 90% foraminifera, plankton dan pengawetan cangkang yang cukup baik. Satuan ini berumur Plistosen dan lingkungan pengendapannya adalah laut dangkal (Gafoer dkk, 1993).

Batugamping ini pada umumnya menunjukkan hubungan menjemari dengan Formasi Fufa. Tebal satuan ini berkisar dari beberapa meter sampai 200 meter. Tersingkap di dekat Fufa, di bagian timur pulau dan di sepanjang Sungai Bobot, Sungai Masiwang dan Sungai Semos. Anggota batugamping ini dapat disetarakan dengan fasies karbonat Formasi Fufa di daerah Bula (Zillman dan Patten, 1975).

10. Terumbu Koral terangkat

Batugamping koral, berongga, berstruktur terumbu. Satuan ini menindih tak selaras Formasi Fufa. Sebarannya terdapat di sekitar pantai dan tanjung di Pulau Parang, Pulau akat, Pulau Seram Rai, Pulau Seram Laut, Kepulauan Gorong dan Kepulauan Watubela (Gafoer dkk, 1993).

11. Kompleks Kabipoto

Sekis mika, sekis tremolit aktinolit, sekis klorit, batu pualam terdaukan, sekis epidot, sekis amfibol dan genes. Batuannya berwarna kelabu tua-muda, kehijauan, kecoklatan, keunguan, padat menghablur. Mineral pembentukannya antara lain kuarsa, feldspar, mika, yakut (garnet), epidot, magnetit, apatit, amfibol, tremolit/aktinolit dan bahan karbon. Selain itu terdapat sedikit wallastonit, turmalin, kianit dan lekoksen. Dalam satuan ini fosil tidak dijumpai. Umurnya diduga Perem berdasarkan korelasi dengan sekis Komplek Taunusa di Seram Barat (Gafoer dkk, 1993).

Satuan ini tertindih tak selaras oleh batuan berumur Trias-Jura atau yang lebih muda dan bersentuhan secara tektonik dengan Formasi Kanikeh dan batuan ultramafik, banyak pula yang terdapat sebagai bongkahan asing di dalam Kompleks Salas (Tmps). Singkapan batuan ini terdapat di bagian selatan Lembar dan Kepulauan Watubela. Lokasi tipenya terdapat di Gunung Tanusa, Lembar Masohi (Gafoer dkk, 1993).

12. Batuan Ultramafik

Serpentinik, piroksenit dan dunit, berwarna kelabu tua, kehijauan sampai hitam pejal. Batuan ini, tersingkap disebelah tenggara dan selatan Pulau Seram, Pulau Tibor, Pulau Watubela dan Pulau Gorong. Disamping itu terdapat pula sebagai bongkahan asing di dalam Kompleks Salas (Tmps). Di banyak tempat batuan ini bersentuhan secara tektonik dengan batuan lain, terutama dengan batuan lain, terutama dengan batuan sedimen yang berumur Trias-Jura. Umurnya diduga Jura-Kapur (Gafoer dkk, 1993).

13. Kompleks Salas

Berbagai macam bongkahan atau kepingan yang berasal dari batuan sedimen, batuan beku dan batuan malihan yang tidak diketahui sumbernya serta tercenanggakan, berukuran dari beberapa centimeter sampai melebihi 10 meter dan mempunyai umur yang berbeda-beda (Gafoer dkk, 1993).

Bongkahan atau kepingan batuan sedimen antara lain terdiri dari konglomerat, *grewake*, batugamping, rijang, batulanau dan batulempung. Batuan beku terdiri dari serpentinit, piroksenit, dunit, gabbro, diabas dan diorit. Batuan malihan terdiri dari sekis, genes dan filit. Bongkahan itu tercampur di dalam massadasar lempungan yang berwarna kelabu, kehijauan, kemerahan, lunak dan getas (Gafoer dkk, 1993).

Fossil sangat jarang dijumpai di dalam massadasar. Umur satuan ini Miosen Akhir-Pliosen Tengah. Lingkungan pengendapannya adalah laut dalam. Satuan ini tersingkap luas dibanyak tempat di Lembar ini. Tebalnya tidak jelas. Berhubung sifat batumannya yang mudah longsor, sulit menentukan bentuk sentuhannya dengan satuan lain (Gafoer dkk, 1993).

Di Sungai Samgah (cabang Sungai Semos), dijumpai sentuhan sesar antara satuan ini dengan Formasi Wahai. Lokasi tipe satuan ini terdapat di Sungai Salas ± 15 kilometer di selatan Bula. Audley memberikan nama Salas *Block Clay* untuk satuan ini (Gafoer dkk, 1993).

III. TEORI DASAR

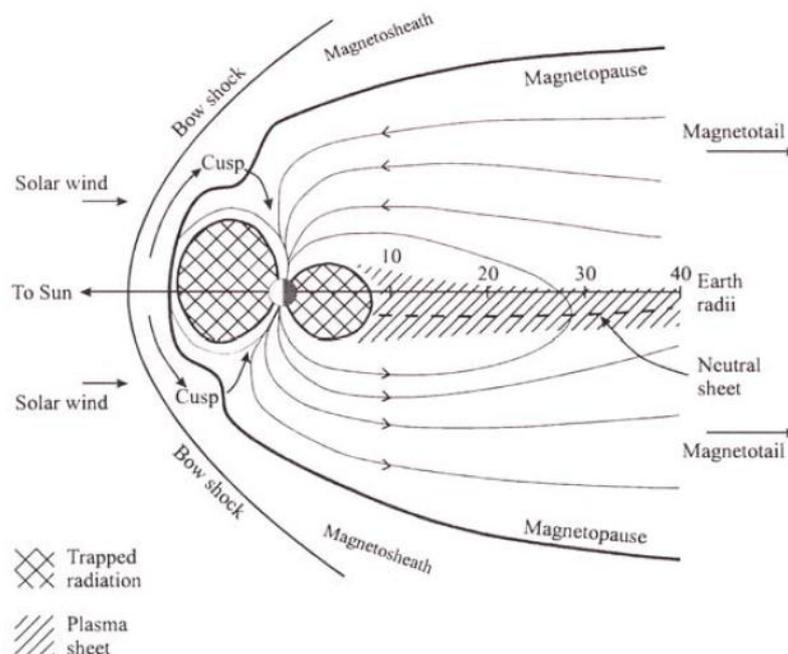
A. Metode Magnetotelurik

Metode Magnetotelurik (MT) merupakan suatu metode eksplorasi geofisika pasif yang bertujuan untuk merekam besarnya medan elektromagnetik bumi alami, guna mengetahui kondisi bawah permukaan. Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari metode magnetotelurik ini adalah konsep Persamaan Maxwell, khususnya dalam Persamaan Hukum Ampere dan Persamaan Hukum Faraday (Simpson dan Bahr, 2005).

Amplitudo, fase dan hubungan arah antara medan listrik (E) dan medan magnetik (H) di atas permukaan bergantung pada distribusi resistivitas listrik di bawah permukaan. Bergantungnya sinyal frekuensi dan resistivitas materialnya, MT dapat menyelesaikan struktur geoelektrik dari kedalaman puluhan meter sampai dengan puluhan kilometer. Sinyal frekuensi yang lebih rendah dengan panjang gelombang yang lebih panjang, dapat diperoleh dari waktu perekaman yang lebih lama, sehingga mempunyai penetrasi kedalaman yang lebih dalam (Green, 2003).

Medan elektromagnetik dibentuk oleh dua sumber, yaitu *lightning activity* dan *solar wind*. *Lightning activity* merupakan fenomena terjadinya petir yang

menghasilkan frekuensi lebih besar dari 1 Hz, sedangkan *solar wind* merupakan partikel bermuatan yang dipancarkan dari matahari yang menghasilkan frekuensi lebih kecil dari 1 Hz. Fenomena *lightning activity* dan *solar wind* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 (Unsworth, 2006).



Gambar 2. Fenomena *solar wind* (unsworth, 2006)

Proses terjadinya metode magnetotelurik yaitu *ionosphere* yang berada 50-1500 km di atas permukaan bumi merupakan tempat dimana terdapat plasma yang memiliki konduktivitas elektrik yang cukup tinggi. Sementara itu, dipermukaan matahari selalu terjadi letupan-letupan plasma yang sebagian besar mengeluarkan partikel hidrogen. Oleh karena adanya ionisasi di permukaan matahari, maka partikel hidrogen tersebut berubah menjadi plasma yang mengandung proton dan elektron. Plasma ini berkecepatan rendah, memiliki sifat acak terhadap waktu dan dikenal dengan sebutan *solar wind*.

Apabila *solar wind* tersebut bertemu dengan medan magnet bumi, maka proton dan elektron akan terpisah dengan arah yang berlawanan dan menimbulkan medan EM di dalam *solar wind* itu sendiri. *Solar wind* yang membawa medan EM akan terus menjalar sampai lapisan ionosfer hingga permukaan bumi. Medan EM yang sampai permukaan bumi tersebut selanjutnya akan berinteraksi dengan material yang ada dibawah permukaan dan konsep elektromagnetik MT akan terjadi.

B. Konsep Dasar Magnetotelurik

Persamaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen mengenai fenomena listrik magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulumb disamping dilakukan oleh Maxwell sendiri (Grandis, 2010). Dalam bentuk diferensial, Persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Keterangan

\vec{E} : medan listrik (volt/m)

\vec{B} : fluks atau induksi magnetic (weber/m² atau tesla)

\vec{H} : medan magnet (ampere/m)

\vec{J} : rapat arus (ampere/m²)

\vec{D} : perpindahan listrik (coulumb/m²)

Hukum Faraday pada Persamaan (1) menjelaskan bahwa adanya perubahan medan magnet terhadap waktu akan menyebabkan terbentuknya medan listrik. Hukum Ampere pada Persamaan (2) menjelaskan bahwa medan magnet tidak hanya terjadi karena adanya sumber arus listrik, namun dapat terjadi juga karena pengaruh perubahan medan listrik terhadap waktu sehingga menginduksi medan magnet. Hukum Coloumb Persamaan (3) menjelaskan bahwa medan listrik disebabkan oleh adanya muatan listrik yang berperan sebagai sumbernya, sedangkan Hukum Kontinuitas Fluks Magnet pada persamaan (4) menyatakan bahwa tidak ada medan magnet yang bersifat monopol (Telford dkk, 2004).

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (7)$$

Keterangan

μ : permeabilitas magnetik (henry/m)

ε : permitivitas listrik (farad/m)

σ : konduktivitas (ohm^{-1}/m atau siemens/m)

ρ : tahanan jenis (ohm.m)

Untuk menyederhanakan masalah, sifat fisik medium diasumsikan tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi (homogen isotropik). Dengan demikian akumulasi muatan seperti dinyatakan pada Persamaan (3) tidak terjadi dan Persamaan Maxwell dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (11)$$

Tampak bahwa dalam Persamaan Maxwell yang dinyatakan oleh Persamaan diatas hanya terdapat dua variabel yaitu medan listrik \vec{E} dan medan magnet \vec{H} . Dengan operasi *curl* terhadap Persamaan (8) dan (9) serta mensubstitusikan besaran-besaran yang telah diketahui pada Persamaan diatas akan kita peroleh pemisahan variabel \vec{E} dan \vec{H} sehingga,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (12)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (13)$$

Memperhatikan identitas vektor $\nabla \times \nabla \times \mathbf{x} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{x} - \nabla^2 \mathbf{x}$ dimana \mathbf{x} adalah \vec{E} dan \vec{H} serta hubungan yang dinyatakan oleh Persamaan (10) dan (11), maka kita dapatkan Persamaan gelombang (Persamaan Helmholtz) untuk medan listrik dan medan magnet sebagai berikut,

$$\nabla^2 \mathbf{x} \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{x} \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (15)$$

Perlu diingat bahwa pada Persamaan tersebut di atas variabel \vec{E} dan \vec{H} merupakan fungsi posisi dan waktu. Jika variasi terhadap waktu dapat direpresentasikan oleh fungsi periodik sinusoidal maka,

$$\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0(r) e^{i\omega t} \quad (16)$$

$$\vec{H}(r, t) = \vec{H}_0(r) e^{i\omega t} \quad (17)$$

\vec{E}_0 dan \vec{H}_0 masing-masing adalah amplitudo medan listrik dan medan magnet, dan ω adalah frekuensi gelombang EM. Dengan demikian Persamaan (12) dan (13) menjadi,

$$\nabla^2 \vec{E} = (i\omega\pi\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)\vec{E} \quad (18)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = (i\omega\pi\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)\vec{H} \quad (19)$$

Kondisi yang umum dijumpai dalam eksplorasi geofisika (frekuensi lebih rendah dari 10^4 Hz, medium bumi) suku yang mengandung ε (perpindahan listrik) dapat diabaikan terhadap suku yang mengandung σ (konduksi listrik) karena harga $\omega\mu\sigma \gg \omega^2\mu\varepsilon$ untuk $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Pendekatan tersebut adalah aproksimasi keadaan kuasi-stasioner dimana waktu tempuh gelombang diabaikan.

Eliminasi kebergantungan medan terhadap waktu seperti dilakukan untuk memperoleh Persamaan (18) dan (19) selain dimaksudkan untuk menyederhanakan Persamaan juga untuk lebih mengeksplisitkan aproksimasi keadaan kuasi-stasioner tersebut. Dengan demikian, Persamaan gelombang (14) dan (15) menjadi Persamaan difusi,

$$\nabla^2 \vec{E} = k^2 \vec{E} \quad (20)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = k^2 \vec{H} \quad (21)$$

$k = \pm\sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$ adalah bilangan gelombang dapat dinyatakan dalam bentuk,

$$k = \pm(\alpha + i\beta) \quad (22)$$

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}}$$

C. Impedansi Bumi Homogen

Gelombang EM dapat dianggap sebagai gelombang bidang yang merambat secara vertikal ke dalam bumi berapapun sudut jatuhnya terhadap permukaan bumi. Hal ini mengingat besarnya kontras konduktivitas atmosfer dan bumi.

Penyelesaian Persamaan gelombang (20) dan (21) yang merupakan Persamaan diferensial orde 2 cukup kompleks mengingat semua variabel dapat bervariasi terhadap waktu dan posisi dalam sistem koordinat kartesian (x, y, z). Oleh karena itu akan kita tinjau permasalahan yang sederhana terlebih dahulu, yaitu untuk kasus medium homogen.

Model bumi yang paling sederhana adalah suatu *half-space* homogen isotropik dimana diskontinuitas tahanan-jenis hanya terdapat pada batas udara dengan bumi. Dalam hal ini setiap komponen horisontal medan listrik dan medan magnet hanya bervariasi terhadap kedalaman sehingga dekomposisi Persamaan (20) menghasilkan Persamaan berikut,

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = k^2 \vec{E}_x \quad (23)$$

Solusi elementer dari Persamaan diferensial tersebut adalah,

$$\vec{E}_x = A e^{-kz} + B e^{+kz} \quad (24)$$

$$\vec{E}_x = A e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} + B e^{+i\alpha z} e^{+\beta z} \quad (25)$$

x, y dan z adalah sumbu koordinat kartesian dengan z adalah kedalaman (positif vertikal ke bawah).

Secara umum eksponensial yang mengandung komponen bilangan imajiner dari k ($e^{\pm i\alpha z}$) menyatakan variasi sinusoidal gelombang EM terhadap kedalaman,

sedangkan eksponensial yang mengandung komponen bilangan riil dari k ($e^{\pm\beta z}$) menyatakan faktor atenuasi menurut sumbu z positif atau negatif. Konstanta A dan B ditentukan berdasarkan syarat batas.

Dekomposisi Persamaan (8), dengan memperhatikan hubungan (17) dan Persamaan (24), menghasilkan komponen medan magnet berikut,

$$\begin{aligned}\vec{H}_y &= -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} \\ &= \frac{k}{i\omega\mu_0} (Ae^{-kz} - Be^{+kz})\end{aligned}\quad (26)$$

Dapat kita buktikan bahwa Persamaan (26) adalah juga solusi Persamaan difusi untuk medan magnet (21).

Untuk bumi homogen, koefisien B pada Persamaan (25) dan (26) berharga nol, mengingat sumber medan EM bersifat ekstern dan amplitudo medan EM harus menjadi nol pada kedalaman tak hingga. Dengan kata lain suku dengan koefisien A mengandung faktor atenuasi gelombang EM terhadap kedalaman (z positif ke bawah).

Impedansi yang didefinisikan sebagai perbandingan antara komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dapat diperoleh dari Persamaan (25) dan (26),

$$Z_{xy} = \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \sqrt{i\omega\mu_0\rho}\quad (27)$$

$$Z_{yx} = \frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x} = -\sqrt{i\omega\mu_0\rho}\quad (28)$$

Berdasarkan Persamaan tersebut di atas, impedansi bumi homogen adalah suatu

bilangan skalar kompleks yang merupakan fungsi tahanan-jenis medium dan frekuensi gelombang EM.

Impedansi yang diperoleh dari dua pasangan komponen medan listrik dan medan magnet yang berbeda (E_x/H_y dan E_y/H_x) secara numerik berharga sama mengingat simetri radial medium homogen atau medium 1-dimensi yang akan dibahas kemudian. Untuk selanjutnya impedansi bumi homogen disebut impedansi intrinsik ($Z_I = Z_{xy} = -Z_{yx}$).

Impedansi kompleks dapat pula dinyatakan sebagai besaran amplitudo dan fasa. Dalam praktik besaran tersebut lebih sering dinyatakan dalam bentuk tahanan-jenis dan fasa sebagai berikut,

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_I|^2 \quad (29)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}Z_I}{\text{Re}Z_I} \right) = 45^\circ \quad (30)$$

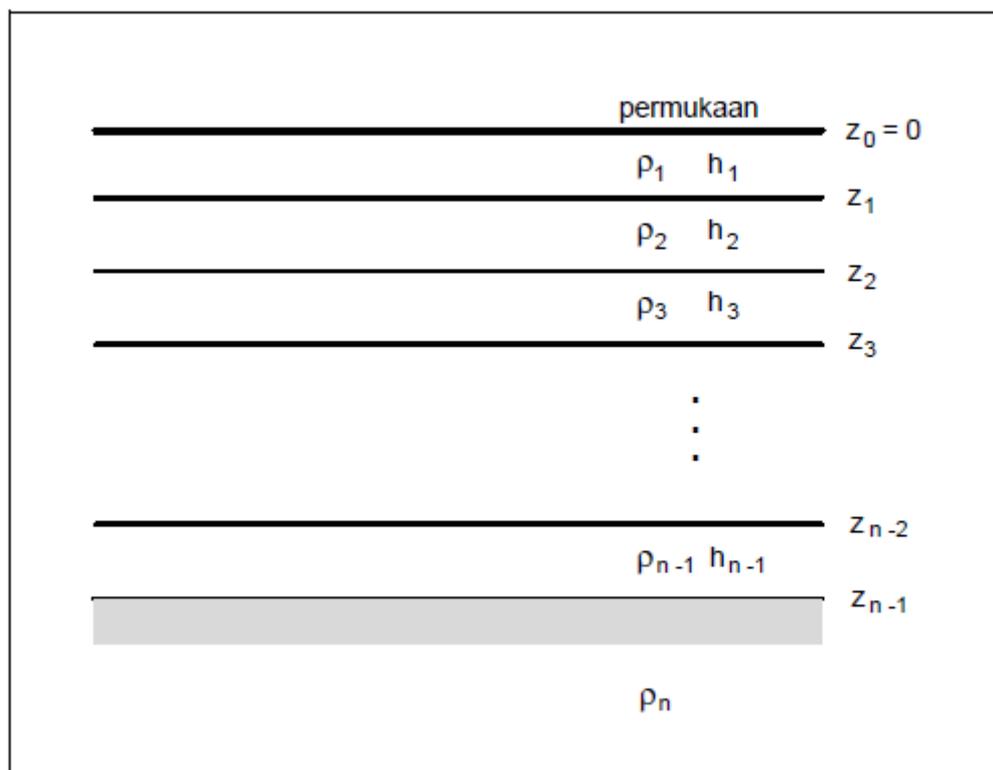
Tampak bahwa fasa untuk bumi homogen adalah konstan, yaitu 45° yang merupakan beda fasa antara medan listrik dan medan magnet. Perbedaan fasa tersebut dapat berupa bilangan positif atau negatif bergantung pada pemilihan fungsi variasi terhadap waktu pada Persamaan (16) dan (17) yaitu $e^{i\omega t}$ atau $e^{-i\omega t}$.

D. Impedansi Bumi Berlapis Horizontal

Impedansi dinyatakan sebagai perbandingan antara medan listrik (\vec{E}) dan medan magnet (\vec{H}) bergantung pada tahanan-jenis medium atau batuan. Dengan demikian, impedansi sebagai fungsi dari perioda memberikan informasi mengenai tahanan-jenis medium sebagai fungsi dari kedalaman. Berdasarkan hal tersebut

metoda *sounding* MT dilakukan dengan merekam data berupa variasi medan listrik dan medan magnet pada beberapa perioda tertentu.

Jika tahanan-jenis hanya bervariasi terhadap kedalaman, maka model yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi ini adalah model 1-dimensi (1-D). Pada umumnya digunakan model yang terdiri dari beberapa lapisan horisontal dengan masing-masing lapisan bertahanan-jenis konstan atau homogen dan isotropis (model bumi berlapis horisontal). Dalam hal ini parameter model adalah tahanan-jenis dan ketebalan tiap lapisan dengan lapisan terakhir berupa medium homogen (Gambar 3).



Gambar 3. Model 1 - dimensi yang terdiri dari n - lapisan horisontal homogen (bumi berlapis horisontal). Parameter model adalah tahanan-jenis (ρ) dan ketebalan (h) tiap lapisan, lapisan terakhir adalah *half-space* dengan ketebalan tak berhingga (Grandis, 2010).

Terdapat beberapa alternatif cara perhitungan impedansi di permukaan bumi berlapis horizontal. Namun secara umum, perhitungan impedansi tersebut menggunakan rumus rekursif yang menghubungkan impedansi di permukaan dua lapisan yang berurutan. Dari impedansi di permukaan lapisan terakhir yang berupa medium homogen (Persamaan (27) dan (28)) dapat dihitung impedansi dipermukaan lapisan di atasnya, demikian seterusnya secara rekursif hingga diperoleh impedansi di permukaan bumi (lapisan pertama).

Bagian ini akan dibahas perumusan yang dikemukakan oleh Pedersen & Hermance (1986) dengan pertimbangan bahwa rumur rekursif yang dihasilkan lebih sederhana dan kompak. Disamping itu implementasi numerik perumusan tersebut lebih mudah dan lebih stabil mengingat adanya perhitungan eksponensial. Berdasarkan Persamaan (24), (25) dan (26), impedansi pada kedalaman z_1 dalam lapisan ke $-j$ adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} Z_j(z_1) &= \frac{k_j}{i\omega\mu_0} \frac{A_j e^{-k_j z_1} + B_j e^{+k_j z_1}}{A_j e^{-k_j z_1} - B_j e^{+k_j z_1}} \\ &= Z_{1,j} \frac{e^{-2k_j z_1 + B_j/A_j}}{e^{-2k_j z_1 - B_j/A_j}} \end{aligned} \quad (31)$$

$Z_{1,j}$ adalah impedansi intrinsik lapisan ke $-j$ seperti telah didefinisikan pada Persamaan (27) dan (28).

Untuk mengeliminasi koefisien B_j/A_j pada Persamaan (31), kita definisikan impedansi pada kedalaman z_2 dalam lapisan ke $-j$ dengan cara yang sama seperti pada Persamaan (31). Kemudian kita peroleh harga koefisien B_j/A_j sebagai fungsi impedansi pada kedalaman z_2 sebagai berikut,

$$B_j/A_j = \frac{Z_j(z_2) - Z_{I,j}}{Z_j(z_2) + Z_{I,j}} e^{-2k_j z_2} \quad (32)$$

Substitusi Persamaan (32) ke dalam Persamaan (31) menghasilkan

$$\begin{aligned} Z_j(z_1) &= \frac{e^{-2k_j z_1} + \frac{Z_j(z_2) - Z_{I,j}}{Z_j(z_2) + Z_{I,j}} e^{-2k_j z_2}}{e^{-2k_j z_1} - \frac{Z_j(z_2) - Z_{I,j}}{Z_j(z_2) + Z_{I,j}} e^{-2k_j z_2}} \\ &= Z_{I,j} \frac{1 + \frac{Z_j(z_2) - Z_{I,j}}{Z_j(z_2) + Z_{I,j}} e^{-2k_j(z_2 - z_1)}}{1 - \frac{Z_j(z_2) - Z_{I,j}}{Z_j(z_2) + Z_{I,j}} e^{-2k_j(z_2 - z_1)}} \end{aligned} \quad (33)$$

Jika z_1 dan z_2 masing-masing adalah kedalaman permukaan (*top*) dan bagian bawah (*bottom*) lapisan ke - j maka selisihnya adalah ketebalan lapisan tersebut (h_j). Sebagai implikasi kontinuitas komponen tangensial medan listrik dan medan magnet pada batas lapisan maka impedansi juga kontinu sehingga diperoleh $Z_j(z_2) = Z_{j+1}(z_2)$. Untuk selanjutnya impedansi selalu didefinisikan di permukaan lapisan ($Z_{j+1}(z_2) = Z_{j+1}$) sehingga dari Persamaan (33) diperoleh Persamaan berikut,

$$Z_j = Z_{I,j} \frac{1 - R_j e^{-2k_j(h_j)}}{1 + R_j e^{-2k_j(h_j)}} \quad (34)$$

$$R_j = \frac{Z_{I,j} - Z_{j+1}}{Z_{I,j} + Z_{j+1}}$$

Persamaan (34) merupakan rumus rekursif yang menyatakan impedansi di permukaan lapisan ke - j sebagai fungsi parameter lapisan tersebut (τ_j dan h_j) dan impedansi di permukaan lapisan yang terletak di bawahnya (lapisan ke - $j+1$). Dengan demikian kita dapat menghitung impedansi di permukaan bumi (Z_1) yang terdiri dari sejumlah n - lapisan jika parameter model diketahui (resolusi *forward problem*).

Impedansi bumi berlapis horisontal dapat dianggap sebagai impedansi medium homogen dengan tahanan-jenis ekuivalen atau tahanan-jenis semu sehingga berdasarkan analogi dengan Persamaan (29) dan (30) impedansi tersebut dapat dinyatakan sebagai tahanan-jenis dan fasa,

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_I|^2 \quad (35)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{ImZ_I}{ReZ_I} \right) \quad (36)$$

Kurva sounding yang menyatakan variasi tahanan-jenis medium sebagai fungsi kedalaman adalah kurva tahanan-jenis semu dan fasa sebagai fungsi periode. Untuk medium dengan tahanan-jenis yang bervariasi secara lateral memerlukan resolusi Persamaan Maxwell dengan model 2-D atau 3-D. Hal ini jauh lebih sulit dan kompleks karena melibatkan resolusi numerik Persamaan diferensial atau Persamaan integral. Oleh karena itu hal tersebut akan dibahas kemudian (Grandis, 2010).

E. Skin Depth

Metode MT bergantung pada penetrasi medan EM yang masuk kedalam bumi (Green, 2003). Gelombang elektromagnetik dan konduktivitas batuan bumi itu sendiri yang akan berpengaruh terhadap penetrasi. Metode magnetotelurik (MT) memiliki penetrasi yang sangat dalam yaitu dapat mencapai lebih dari 3 km. semakin kecil frekuensi dari alat yang kita gunakan, maka akan semakin dalam penetrasi yang diperoleh. Akan tetapi proses perekaman data menjadi semakin lama (Simpson dan Bahr, 2005). Besaran *skin depth* digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang

elektromagnetik. Adapun *skin depth* dalam metode Magnetotelurik memenuhi Persamaan berikut ini:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} \cong 0.503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (km)} \quad (37)$$

Persamaan (37), terlihat bahwa *skin depth* dipengaruhi oleh besarnya frekuensi alat yang kita gunakan dan resistivitas Formasi. Semakin besar frekuensi alat yang kita gunakan, maka penetrasi yang diperoleh akan semakin dangkal. Namun, ketika frekuensi alat yang digunakan semakin kecil, maka penetrasi yang dihasilkan akan semakin dalam.

Sementara dengan frekuensi alat yang sama, semakin besar nilai resistivitas Formasi batuan yang ada dibawah lapisan bumi maka hasil penetrasi yang diperoleh akan semakin dalam. Sedangkan jika lapisan di bawah permukaan memiliki resistivitas Formasi yang kecil, maka penetrasi yang diperoleh juga semakin dangkal.

Besar kecilnya penetrasi bergantung oleh nilai resistivitas batuan dikarenakan lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah akan cenderung lebih mudah mengalirkan arus dibandingkan dengan lapisan yang lebih resistif. Ketika lapisan konduktif tersebut mendapat injeksi arus dari luar, maka arus luar akan lebih cenderung mengalir hanya dilapisan konduktif saja, tidak mengalir ke lapisan di bawahnya yang lebih resistif. Oleh karena itu, faktor resistivitas Formasi batuan akan mempengaruhi besar kedalaman penetrasi yang diperoleh. Parameter yang terukur dalam survey Magnetotelurik adalah medan listrik dan medan magnet di

wilayah tersebut (Daud, 2010). Di dalam teori elektromagnetik, medan listrik selalu tegak lurus terhadap medan magnet. Perbandingan antara medan magnet dan medan listrik dinamakan dengan impedansi. Impedansi inilah yang mengandung informasi mengenai nilai resistivitas medium terhadap kedalaman.

F. Pengolahan Data Magnetotelurik

Pengolahan data MT untuk mengekstraksi fungsi transfer antara medan listrik dan medan magnet dalam domain frekuensi yang mengandung informasi mengenai distribusi tahanan-jenis bawah permukaan. Pada tahap pra-pengolahan data, data mentah yang telah direkam mengalami proses *editing* dan *demultiplexing* untuk menggabungkan data dari setiap kanal yang sama (elektrik atau magnetik) untuk masing-masing jangkah frekuensi (LF, MF dan HF).

Data tersebut adalah keluaran dari sensor elektrik dan magnetik yang masih berupa harga tegangan listrik terukur. Proses *gain recovery* ditujukan untuk mengembalikan faktor perbesaran atau amplifikasi yang telah digunakan. Disamping itu, pada proses tersebut harga tegangan listrik terukur dikonversikan kedalam satuan yang biasa digunakan (mV/km untuk medan listrik dan nano Tesla atau gamma untuk medan magnet).

Seleksi data dalam domain waktu dapat dilakukan secara manual (seleksi visual) maupun otomatis dengan menetapkan nilai minimal korelasi data yang dapat diterima. Korelasi yang dimaksud adalah korelasi silang (*cross-correlation*) antara medan listrik dan medan magnet yang saling tegak-lurus. Hasilnya dalam bentuk seri waktu (*time series*) disimpan dalam file di disket. Pada tahap analisa spektral,

transformasi seri waktu tiap kanal ke dalam domain frekuensi menghasilkan spektrum daya dan juga spektrum silang (*power-* dan *cross-spectra*). Seleksi data dalam domain frekuensi didasarkan pada koherensinya.

Disamping itu, antara medan magnet horisontal dan medan magnet vertikal terdapat hubungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\vec{H}_z &= \vec{T}_{zx}\vec{H}_x + \vec{T}_{zy}\vec{H}_y \\ \vec{H}_z &= \vec{T} \cdot \vec{H}\end{aligned}\tag{38}$$

\vec{T} adalah vektor induksi yang dapat digunakan untuk menghitung parameter yang dikenal sebagai *tipper*. Dari besaran impedansi dan *tipper* inilah dapat diperkirakan informasi mengenai distribusi konduktivitas bawah permukaan berdasarkan hasil analisa tensor dan pemodelan (Grandis, 2010).

1. Data *Time Series*

Salah satu *time series* terdiri dari informasi tentang periode dan penetrasi kedalaman. Langkah awal dalam pengolahan data adalah mentransformasikan dari domain waktu menjadi domain frekuensi menggunakan transformasi fourier.

Time series elektromagnetik direkam sampai beberapa minggu atau bulan yang menghasilkan 10 Mbytes data. Disisi lain, transfer *function* dari satu stasiun memiliki data set yang sangat kecil yang digambarkan dengan *impedance* tensor pada 30-50 *evaluation frequencies* (Simpson dan Bahr, 2005).

2. Transformasi Fourier

Secara prinsip, transformasi fourier merupakan suatu operasi matematis yang mengubah sinyal menjadi spectrum. Transformasi fourier biasanya digunakan untuk mengubah *time series* $Ex(t)$, $By(t)$, ke dalam domain frekuensi (Simpson, 2005).

Berikut ini adalah fungsi dari fourier transform dengan $x(\omega)$ adalah fungsi gelombang dalam domain frekuensi, $x(t)$ adalah fungsi gelombang dalam domain waktu, i adalah bilangan imajiner, $\omega = 2\pi f$ adalah frekuensi angular dan t adalah waktu.

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt \quad (39)$$

Proses komputasi salah satu teknik yang dapat dilakukan dalam melakukan transformasi fourier adalah *Fast Fourier Transform* (FFT) yang dapat melakukan secara efisien transformasi fourier dari data diskrit dengan jumlah banyak. Kemampuannya untuk memanfaatkan sifat-sifat periodik yang terdapat dalam fungsi-fungsi sinus maupun cosinus.

3. Tensor Impedansi

Impedansi merupakan perbandingan antara medan magnet dan medan listrik. Hubungan linier antara medan magnet, medan listrik dan impedansi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{H}_x \\ \vec{H}_y \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \text{ mempresentasikan tensor impedansi.}$$

Gelombang EM dianggap merambat secara vertikal, maka komponen medan listrik dan medan magnet adalah komponen horizontal. Bentuk matriks impedansi bergantung pada dimensional medium (Simpson dan Bahr, 2005).

4. *Transverse Magnetic Mode (TM)* dan *Transverse Electric Mode (TE)*

Pada kasus 2 dimensi terdapat dua jenis modus yaitu modus TE dan TM. Modus TE merupakan modus yang mengukur medan listrik searah dengan *strike* dan medan magnet tegak lurus dengan *strike*. Sedangkan modus TM merupakan modus yang mengukur medan magnet searah dengan *strike* dan medan listrik tegak lurus dengan *strike*. Persamaan modus TE dan TM diturunkan dari Persamaan Maxwell yang dijabarkan sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = \mu\sigma E \quad (41)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -i\omega \vec{B} \quad (42)$$

Persamaan 40 dan 41 dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu\sigma \vec{E}_x ; \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial x} = \mu\sigma \vec{E}_y ; \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu\sigma \vec{E}_z \quad (43)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_x ; \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} = -i\omega \vec{B}_y ; \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -i\omega \vec{B}_z \quad (44)$$

Asumsi $\frac{\partial}{\partial x} = 0$, Persamaan 42 dan 43 menjadi:

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu\sigma \vec{E}_x ; \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} = \mu\sigma \vec{E}_y ; -\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu\sigma \vec{E}_z \quad (45)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_x ; \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_y ; -\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -i\omega \vec{B}_z \quad (46)$$

Jika disumsikan arah *strike* berada pada arah x, sehingga modus TE dengan medan listrik berada pada arah x dan medan magnet berada pada arah y dan z, maka Persamaannya sebagai berikut:

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu \sigma \vec{E}_x ; \quad \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_y ; \quad -\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -i\omega \vec{B}_z \quad (47)$$

Jika disumsikan arah *strike* berada pada arah x, sehingga modus TM dengan medan magnet berada pada arah x dan medan listrik berada pada arah y dan z, maka Persamaannya sebagai berikut:

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_x ; \quad \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} = \mu \sigma \vec{E}_y ; \quad -\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu \sigma \vec{E}_z \quad (48)$$

Dengan diketahuinya arah *strike*, data MT dapat dirotasikan terhadap arah *strike*.

Menurut Vozoff 1972 dengan asumsi model 2-D, arah jurus struktur dapat diperkirakan dengan merotasikan tensor hingga diperoleh tensor impedansi dengan elemen anti diagonal (Z_{xy} atau Z_{yx}) maksimal dan elemen diagonal (Z_{xx} atau Z_{yy}) minimal.

5. Inversi Non Linier Conjugate Gradient (NLCG)

Inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis bawah permukaan. Analisis terhadap data lapangan dilakukan dengan cara melakukan pencocokan kurva antara model matematika dengan data lapangan. Pada penelitian ini digunakan metode inversi *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG). Metode NLCG merupakan jenis inversi dapat digunakan untuk

meminimalisasi *objective functional* (S). Fungsi objek berisi jumlah beban weighed dari model fungsi objektif dan data misfit.

$$S = \Phi_d + \tau \Phi_m \quad (49)$$

Φ_d merupakan data misfit dan Φ_m merupakan model fungsi objektif. τ adalah parameter regulasi yang mengontrol *trade off* Φ_d dan Φ_m . τ dipilih agar Φ_d sama dengan nilai konsistensi error data. Nilai τ semakin besar mengindikasikan model cocok dengan data. Inversi 2D untuk mengatur model fungsi objektif dan data misfit sama dengan

$$\Phi_m = \|L(m - m_0)\|^2 \quad (50)$$

$$\Phi_d = (d - F(m))^T R_{dd}^{-1} (d - F(m)) \quad (51)$$

Keterangan

L = operator linier

m = model vektor unknown

m_0 = model awal

d = vektor data observasi

$F(m)$ = operator pemodelan *forward*

R_{dd} = matrik kovarian error

Operator linier yang dipilih adalah Laplacian $L = \Delta$

$$\|L(m - m_0)\|^2 = \int \Delta \left((m_{(x,z)} - m_{0(x,z)}) \right)^2 dx dz \quad (52)$$

Solusi masalah inversi dilakukan dengan iteratif, metode NLCG mengaplikasikan secara langsung minimalisasi dari S. Rangkaian model diberikan oleh:

$$m^{i+1} = m^i + a^{i+1} h^{i-1} \quad (53)$$

h^{i-1} adalah arah pencarian didapatkan dari NLCG dan a^{i+1} dihitung untuk meminimumkan S dengan *line search*. *Misfit* rata-rata antara data prediksi dan

data observasi diwakili oleh eror RMS (root mean square). Eror RMS untuk program inversi 2D ditentukan dengan

$$RMS = \sqrt{\frac{(d-F(m))^T R_{dd}^{-1} (d-F(m))}{N}} \quad (54)$$

N adalah jumlah titik data.

Proses *update model* dengan mencari nilai α yang meminimalisasi fungsi $W(m_k + \alpha_k u_k)$. Alogaritma ini membutuhkan hasil dari J atau J^T . Efisiensi komputasi algoritma ini, dikontrol oleh jumlah iterasi (N_{cg}). N_{cg} adalah fungsi dari λ . Nilai λ yang besar akan membutuhkan N_{cg} yang kecil. Akan tetapi, nilai λ yang kecil akan membutuhkan N_{cg} yang besar (Siripunvarapon dkk, 2007).

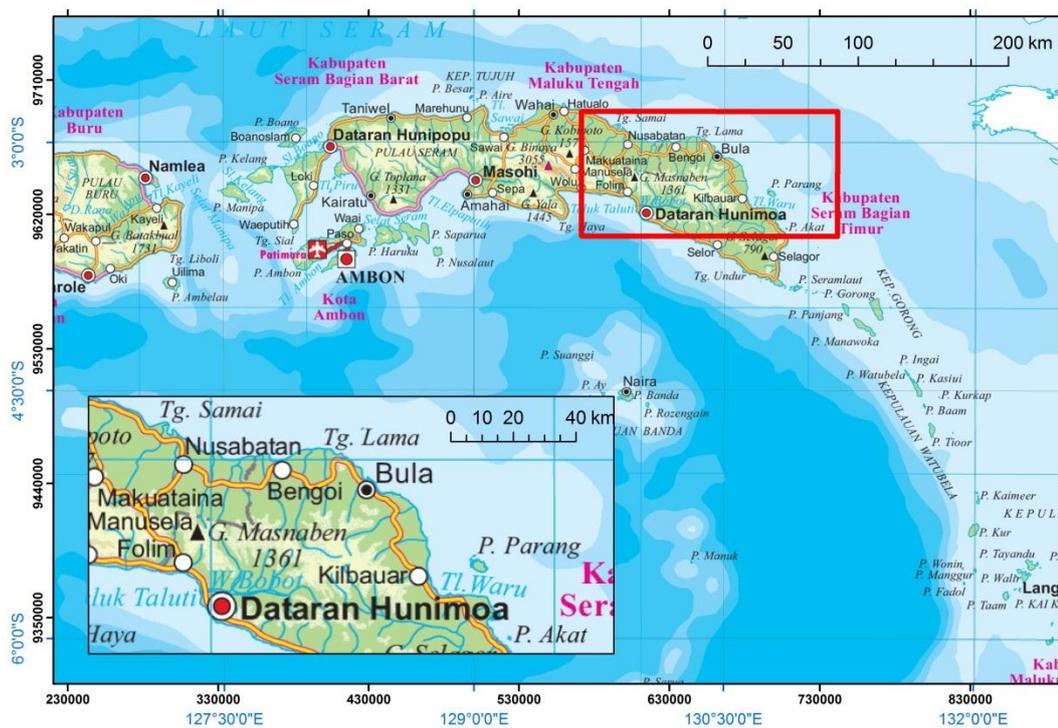
Pendekatan Hessian yang berkorelasi dengan Laplacian operator untuk meningkatkan efisiensi *pre-conditioner*. Dengan *pre-conditioner*, jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi ke level yang diinginkan menjadi sangat berkurang hal ini menunjukkan bahwa jumlah konvergensi dapat dicapai dengan iterasi yang sedikit.

Alogaritma NLCG ketika digunakan *pre-conditioner* akan makin mempercepat jalannya proses inversi. Perbandingan waktu komputasi yang dibutuhkan antara 3 algoritma yang berbeda, yakni algoritma Mackie Madden, NLCG dan Gauss Newton. Algoritma Mackie Madden dan NLCG lebih unggul dibandingkan algoritma Gauss Newton dalam hal waktu komputasi (Rodie dan Mackie, 2001).

IV. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilakukan dari tanggal 19 September – 19 November 2016, lokasi penelitian di daerah Bula Provinsi Maluku dan pengolahan datanya dilakukan di Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.



Gambar 4. Peta Lokasi Pengukuran (BIG,2015).

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam Penelitian ini adalah:

1. Laptop *Acer Aspire 4736Z*
2. Data sekunder magnetotelurik daerah Bula, Maluku
3. Lembar Peta Geologi daerah Bula-Watubela
4. *Software ArcGIS v.10*
5. *Software Microsoft Exel 2010*
6. *Software SSMT 2000*
7. *Software MTEditor*
8. *Software WinGlink dan RockWorks15*

C. Prosedur Penelitian

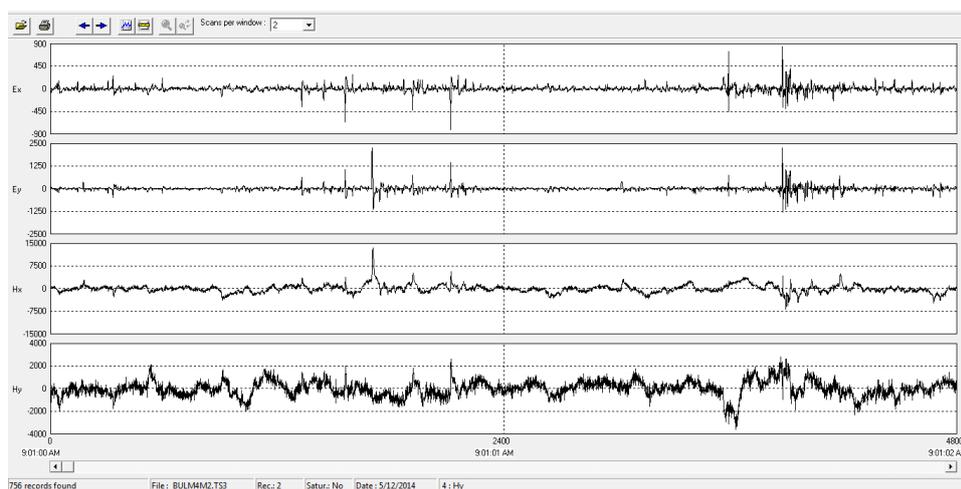
1. Pengolahan Data Magnetotelurik

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari Pusat Survei Geologi (PSG) yaitu data MT daerah Bula, Pulau Seram Provinsi Maluku. Akuisisi data magnetotelurik menghasilkan variasi medan listrik dan medan magnet terhadap waktu. Data tersebut berupa *time series* selanjutnya diubah ke dalam domain frekuensi.

Data yang diperoleh dari akuisisi ini merupakan data yang mengandung *noise*. Maka, dilakukan pengolahan data magnetotelurik untuk mengurangi *noise* dengan menggunakan beberapa *software* dan diperoleh kurva *apparent resistivity* terhadap frekuensi pada setiap stasiun dan selanjutnya dilakukan proses Inversi 1D dan 2D.

a. Pengubahan *Time series* ke dalam domain frekuensi

Hasil perekaman pada alat MT yaitu komponen medan listrik dan medan magnet berupa data dalam format *time series*. Contoh data *time series* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Contoh data *time series*

Data *time series* ini akan diubah ke dalam domain frekuensi dengan menggunakan *software SSMT 2000* yang didasari oleh konsep Transformasi Fourier.

b. *Robust Processing*

Robust processing merupakan *filter noise*. Data diproses dengan menggunakan *software SSMT 2000*. *Robust processing* memiliki tiga tipe yaitu *no weight*, *rho variance*, *ordinary coherency*. *Robust no weight* merupakan pemrosesan data tanpa pembobotan. *Robust rho variance* memberikan pembobotan bernilai besar pada data *outlayer* yang memiliki error kecil sehingga tidak terlalu mempengaruhi nilai koherensi. Sedangkan *robust ordinary coherency* merupakan pemrosesan data yang memberikan bobot lebih besar pada data yang terekam pada koil dan sensor antara channel

E dan *H*. data yang terekam pada *H_x*, *H_y*, *E_x* dan *E_y* akan diberikan bobot yang lebih besar.

Setelah dilakukan ketiga *tipe robust processing* tersebut, *robust* dengan nilai koherensi tertinggi akan di *upgrade*. Cara mengetahui nilai koherensi secara kuantitatif yaitu dengan menyimpan data hasil *robust* pada *MTEditor* kedalam *Microsoft Excel* dan dilakukan perhitungan.

Setelah mengetahui nilai koherensi tertinggi langkah selanjutnya yaitu melakukan *upgrade* koherensi pada *software SSMT 2000* dengan *edit parameter* pada *setting robust processing* parameter nilai diubah menjadi 0.95 dan 0.75. Nilai tersebut berdasarkan *guide book SSMT 2000*.

Untuk nilai *move to next frequency if coherency reaches set value* nilai efektif yang digunakan 0.95 untuk data yang mengandung banyak *noise* dan 0.80 untuk data yang mengandung sedikit *noise*. Sedangkan pada *maximum fraction of estimates to reject* nilai efektif yang digunakan 0.75 untuk data yang mengandung banyak *noise* sedangkan 0.25 untuk data yang mengandung sedikit *noise*.

Setelah dilakukan *upgrade* pada *robust* yang memiliki nilai koherensi tertinggi, langkah selanjutnya adalah mengecek kualitas suatu data. Data dengan nilai koherensi $\geq 75\%$ dilanjutkan ke tahap seleksi *cross power*, namun jika data memiliki nilai koherensi $\leq 75\%$ maka dilakukan tahap *combine*.

c. *Combine*

Combine merupakan salah satu cara untuk mereduksi *noise*. *Combine* merupakan proses penambahan sensor medan magnetik yang memiliki nilai regional yang dapat menjadi acuan medan magnetik lokal. *Combine* memiliki peranan yang sama seperti *remote reference*, perbedaan keduanya adalah jarak stasiun yang akan dikoreksi dengan stasiun yang menjadi pengkoreksi.

Pada *remote* jarak antar stasiun yang akan dikoreksi dengan stasiun pengkoreksi jauh sekitar 30 – 40 kilometer, titik yang dijadikan sebagai *remote* merupakan daerah yang *free noise* dan titik sebagai *remote* tidak berpindah.

Sedangkan *combine* jarak antar stasiun yang dikoreksi dengan stasiun pengkoreksi jaraknya dekat yaitu 2 – 4 kilometer dan titik sebagai *combine* dapat berpindah-pindah atau *moving*. Namun, keduanya memiliki prinsip yang sama yaitu sebagai titik pengkoreksi. Pada kedua metode ini menggunakan data pada stasiun yang berbeda namun pada waktu yang bersamaan.

Kemudian dilakukan perhitungan nilai koherensi secara kuantitatif dengan *Microsoft Excel*. Diantara kedua metode ini pilih mana yang memiliki nilai koherensi yang tertinggi. Jika nilai koherensi $\geq 75\%$ maka langkah selanjutnya adalah seleksi *cross power*. Namun jika nilai koherensi $\leq 75\%$ maka dilakukan seleksi *time series*. Pada data penelitian ini nilai koherensi sudah mencapai $\geq 75\%$, sehingga tidak perlu dilakukan proses seleksi *time series*.

d. Seleksi *cross power*

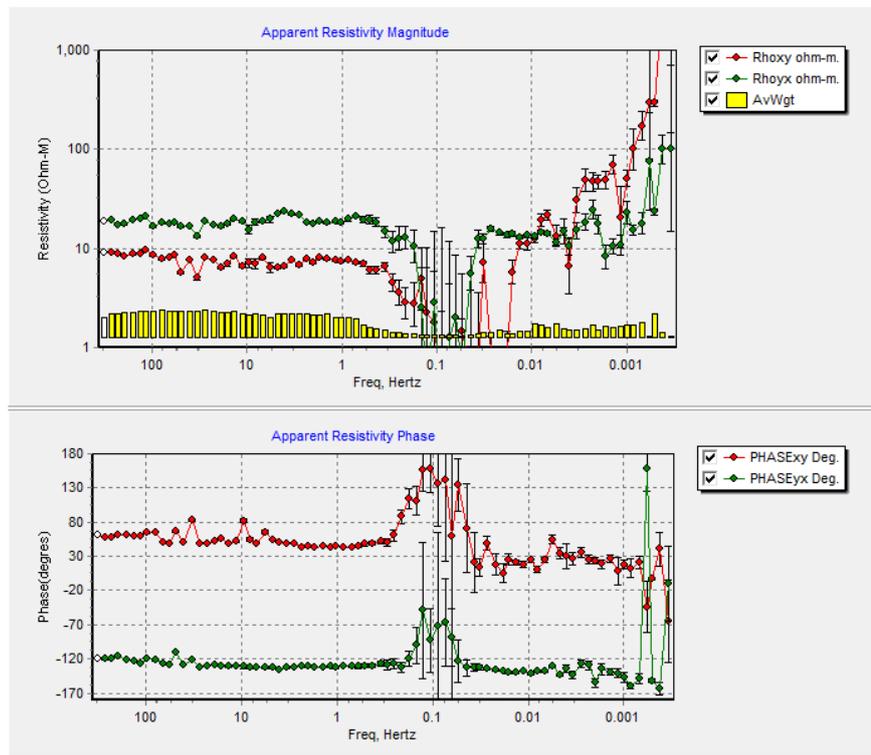
Data yang sudah memiliki nilai koherensi yang baik yaitu $\geq 75\%$ akan diseleksi *cross power*. Seleksi *cross power* dengan menggunakan *software MTEditor*. Data ditampilkan dalam bentuk kurva *apparent resistivity* terhadap frekuensi. Kemudian dilakukan pemilihan data.

Setiap data *apparent resistivity* yang terplot dalam kurva terbagi menjadi beberapa titik *cross power* yang berhubungan dengan *apparent resistivity* dan *phase* (pada data penelitian ini 100 *cross power*). Pada seleksi *cross power* terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu fasa, *trench* dan pembobotan tahanan jenis.

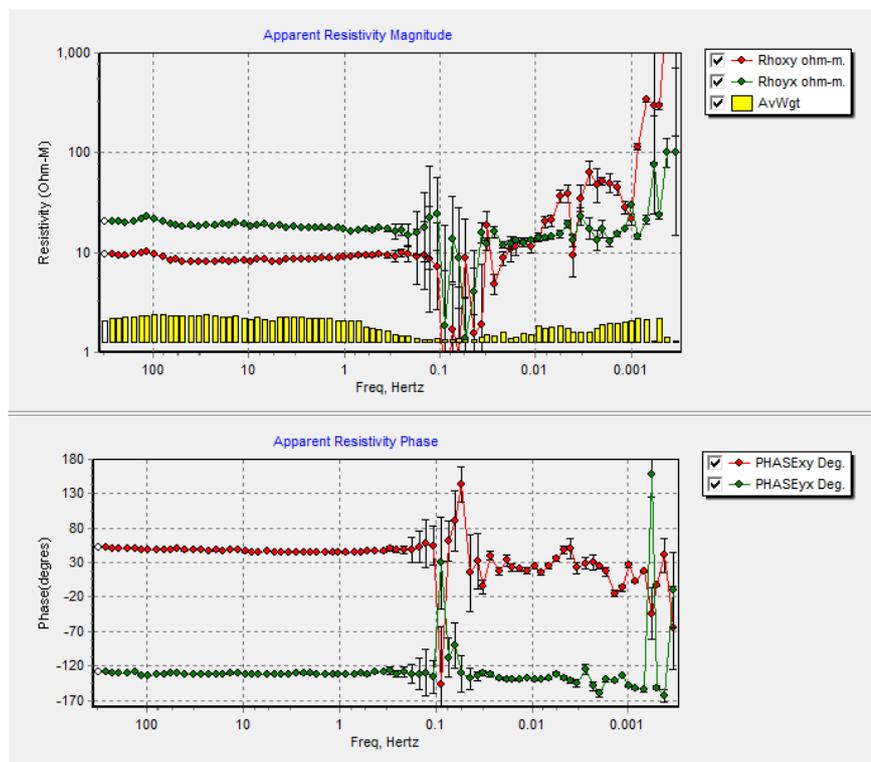
Perubahan *trench* grafik tidak lebih besar dari 45° , jika lebih besar maka tidak sesuai dengan asumsi homogen isotropis. Pembobotan atau AvWgt semakin besar maka kualitas data akan meningkat, sehingga data dengan bobot kecil dihapus. Fasa dilakukan dengan menghapus *peak* pada *cross power*. Setelah proses seleksi *cross power* selesai, data disimpan dalam bentuk .mpk dan diubah kedalam file .edi untuk proses selanjutnya yaitu inversi.

e. Inversi

Setelah dilakukan proses yang telah dijelaskan sebelumnya, selanjutnya kurva MT disimpan dalam file berformat EDI. File ini sebagai input untuk melakukan inversi. Inversi yang dilakukan yaitu inversi 1D dan 2D dengan menggunakan *software WinGlink*. Inversi 1D akan menghasilkan profil tahanan jenis setiap titik pengukuran, sedangkan inversi 2D proses pemodelan distribusi tahanan jenis bawah permukaan.



(a)



(b)

Gambar 6. Kurva MT sebelum (a) sesudah seleksi *cross power* (b)

Langkah awal proses inversi adalah pendefinisian lintasan dan stasiun mana saja yang masuk pada lintasan tersebut. Proses ini dilakukan pada menu *Maps*. Kemudian langkah selanjutnya yaitu *sounding*. Memilih titik yang akan di proses dan menentukan periode maksimal data yang akan di proses. Dengan mengklik titik pengukuran dan klik edit. Kemudian pilih *mask XY-YX*.

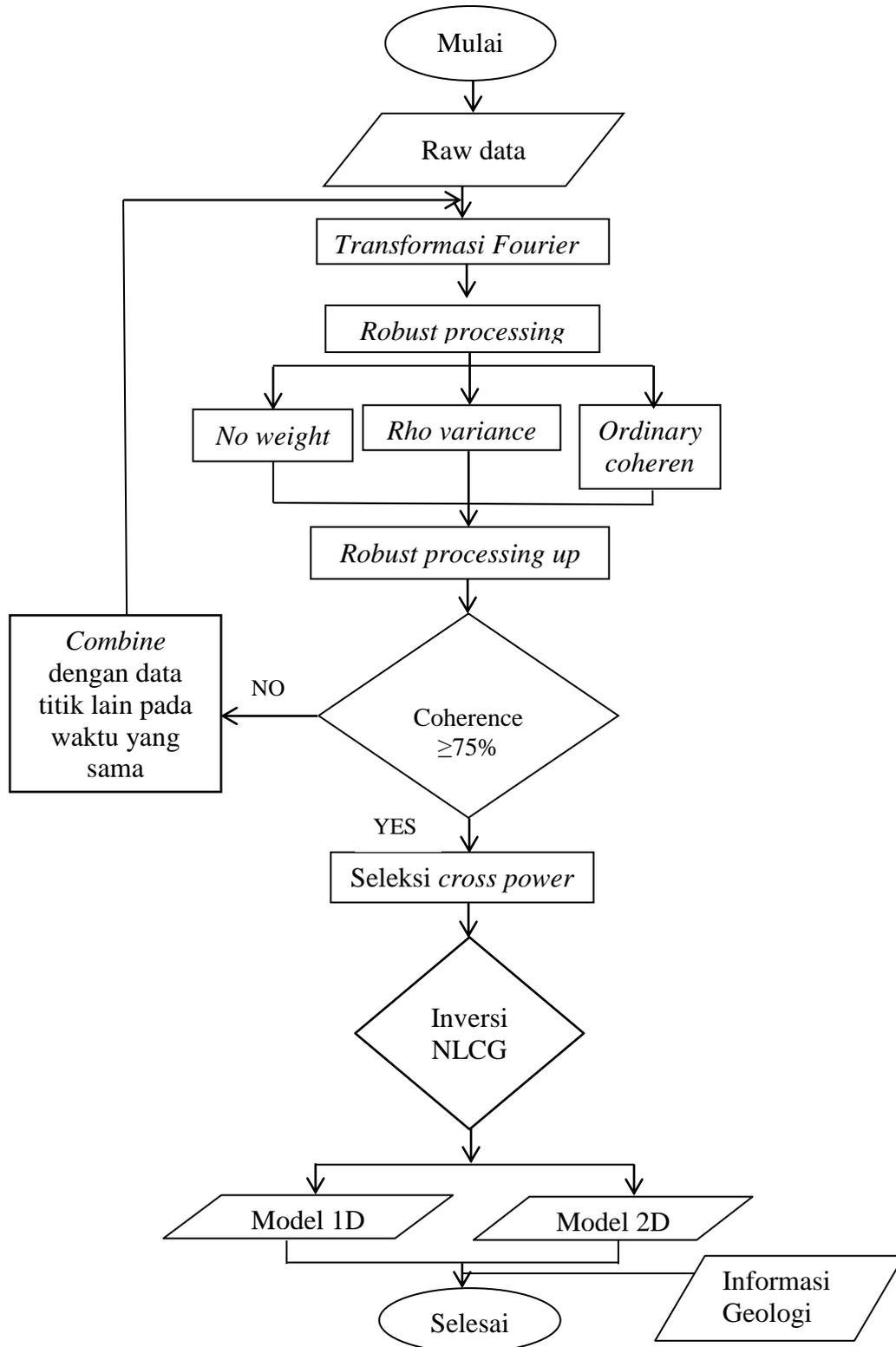
Selanjutnya dilakukan inversi 1D, dengan mode invarian, dan membuat 8 *layer*. Kemudian pada *occam* menggunakan iterasi maksimal 45. Pada inversi 1D terdapat dua kurva, yaitu *bostick* dan *occam* dimana *bostick* menunjukkan *apparent resistivity* dan *occam* menunjukkan *true resistivity*.

Kemudian kembali ke *maps* dan melakukan proses pada titik yang lain. Selanjutnya dilakukan inversi 2D, dengan membuat *maps* pada kedalaman dari 0-5000 meter. Kemudian memainkan tampilan warna. Skala warna logaritmik dan mengatur nilai maksimum dan minimum pada *contour range*. Kemudian untuk mengatur batas tampilan hasil inversi 2D yaitu pada menu *set view area*

Kemudian melakukan tahap *Psection* dan selanjutnya melakukan inversi 2D dengan nilai tau atau koefisien inversi sebesar 5 dan menggunakan *standard grid Laplacian operator*. Jenis inversi yang digunakan adalah *Nonlinier Conjugate Gradient (NLGC)* dengan iterasi minimal sebanyak 30 iterasi dan diperoleh RMS error bernilai 1,29. Setelah proses inversi dilakukan, data siap untuk diinterpretasi.

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian

E. Matrik Penelitian

Matrik penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Matrik Penelitian

No	Kegiatan	Sep-16		Okt-16				Nov-16				Des-16				Jan-17				Feb-17				Mar-17		
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
1	Studi Literatur	■	■																							
2	Pemrosesan Data			■	■	■	■																			
3	Interpretasi Data							■	■																	
4	Seminar Usul									■	■	■	■	■	■	■										
5	Seminar Hasil																■	■	■	■	■	■				
6	Ujian Komprehensif																							■	■	■

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian yang telah dilakukan adalah:

1. Berdasarkan data geologi dapat diidentifikasi Formasi pada daerah penelitian yaitu Formasi Wahai yang terdiri dari batu napal yang bersisipan dengan batu gamping pasiran dan batupasir halus, Formasi Kanikeh yang terdiri dari batupasir, batulanau dan batulempung serta Kompleks Salas yang terdiri dari batu beku, sedimen dan metamorf yang menyatu pada massadasar lempungan.
2. Data magnetotelurik penelitian ini memiliki kualitas yang baik.
3. Hasil pengolahan data dan inversi 2D data magnetotelurik didapatkan:
 - a. Lapisan dengan nilai resistivitas $7 - 16 \Omega\text{m}$ disepanjang titik MT1 hingga MT7 pada kedalaman mencapai 1000 meter diduga batu lempung yang diindikasikan sebagai *cap rock*.
 - b. Lapisan dengan nilai resistivitas $34 - 120 \Omega\text{m}$ pada titik MT6 dan MT7 pada kedalaman sekitar 1500 meter diduga batu pasir yang diindikasikan sebagai *reservoir*.

- c. Dari hasil inversi 2D terdapat sesar berdasarkan informasi geologi dan nilai resistivitas yang kontras.
4. Hasil inversi 2D data magnetotelurik memiliki kesamaan dengan model geologi daerah penelitian

B. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah:

1. Sebaiknya didukung oleh data log pada titik pengukuran MT agar semakin jelas litologi bawah permukaan daerah penelitian.
2. Sebaiknya penelitian tidak hanya 1 line saja agar penampang 2D dapat lebih mudah diinterpretasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amriyah, Q., 2012, Pemodelan Data Magnetotelurik Multidimensi untuk Mendelineasi Sistem Geotermal Daerah Tawau Malaysia, *Skripsi*, Depok: Universitas Indonesia.
- Audley-Charles, M.G., Carter D.J. dan Barber A.J., 1975, Stratigraphic Basin for Tectonic Interpretations of the Banda Arcs, Eastern Indonesia, *Proc. Indones Petroleum Association 3rd Annual Convention*, p. 25-44.
- Badan Informasi Geospasial. 2015. *Peta Rupa Bumi Provinsi Maluku skala 1:250.000*. Jakarta:Permendagri.
- Daud, Y., 2010, *Metode Magnetotelurik Laboratorium Geofisika*, Depok: FMIPA UI.
- Erdiansyah, E., Iryanti, M. dan Wardana, D.D., 2015, Identifikasi Struktur Bawah Permukaan dengan Menggunakan Metode Magnetotelurik Daerah Sekitar Bogor Jawa Barat Sebagai Potensi Sistem Hidrokarbon, *Fisika*, Vol. 3, No.1, p.1-9.
- Gafoer S., Suwitodirdjo K. dan Suharono, 1993, *Peta Geologi Lembar Bula-Watubela, Maluku Skala 1:250.000*, Bandung: Pusat Survei Geologi.
- Grandis, H., 2010, *Metode Magnetotelurik (MT)*, http://hendragrandis.wordpress.com/2010/01/mt_teks1.pdf.
- Green, A.M., 2003, *Magnetotelluric Crustal Studies in Kenai, Alaska*, Colorado: School of mines.
- Kusworo dan Aries, 2014, *Tabel Nilai Porositas*, Bandung:Pusat Survei Geologi
- Rodi, W. dan Mackie, R.L., 2001, Nonlinier Conjugate Gradient Alogarithm for 2D Magnetotelluric Inversion, *Geophysics* Vol. 66, No.1, p. 174-187.
- Setyanta, B. dan Setiadi, E., 2010, Pola Struktur dan Geodinamika Cekungan Bula Berdasarkan Anomali Gaya Berat, *Geophysics* Vol. 20, No.1, p. 41-55.
- Siripunvarapon, W., Egbert, G., Lenbury, Y., dan Uyeshima, M., 2005, Three-dimensional Magnetotelluric Inversion: Data Space Method, *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, Vol 150, p. 3-14.

- Simpson dan Bahr., 2005, *Practical Magnetotellurics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Supriyanto., 2007, *Analisis Data Geofisika:Memahami Teori Inversi*, Depok: Universitas Indonesia.
- Telford, W., Geldart M.L.P. dan Sheriff R.E., 1990, *Applied Geophysics Second Edition*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Unsworth, 2006, *Overview of Elektromagnetic Exploration Methods*, Geophysics 424, Kanada: University of Alberta.
- Vozoff, K., 1972, The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins, *Geophysics*, Vol 37, p. 98 – 141.
- Wachisbu, MIM. dan Santosa, B.J., 2015, Pemodelan Data Magnetotelurik dengan Remote Reference untuk Eksplorasi Cekungan Migas Studi Kasus: Lapangan Em-4, *Fisika* Vol. 4, No.1, p. 17-20.
- Zillman, N.J. dan Paten R.J., 1975, Geology and petroleum prospects of Seram Island, Eastern Indonesia, *A.P.E.A.J.*, Vol. 15, No. 1, p.73-80.