



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMODELAN SISTEM GEOTHERMAL DENGAN MENGGUNAKAN  
METODE MAGNETOTELLURIK DI DAERAH TAWAU, SABAH,  
MALAYSIA**

**SKRIPSI**

**LENDRIADI AGUNG**

**0305020527**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM FISIKA**

**DEPOK**

**JUNI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PEMODELAN SISTEM GEOTHERMAL DENGAN MENGGUNAKAN  
METODE MAGNETOTELLURIK DI DAERAH TAWAU, SABAH,  
MALAYSIA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh  
Gelar Sarjana Sains**

**LENDRIADI AGUNG**

**0305020527**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
KEKHUSUSAN GEOFISIKA  
DEPOK  
JUNI 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : LENDRIADI AGUNG**

**NPM : 0305020527**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 17Juni 2009**

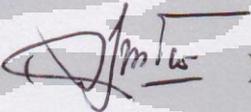
## LEMBAR PENGESAHAN

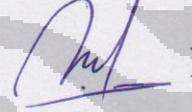
Skripsi ini diajukan oleh :

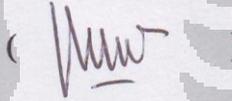
Nama : LENDRIADI AGUNG  
NPM : 0305020527  
Program Studi : Geofisika  
Judul Skripsi : PEMODELAN SISTEM GEOTHERMAL DENGAN  
MENGUNAKAN METODE MAGNETOTELLURIK  
DI DAERAH TAWAU, SABAH, MALAYSIA

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc (  )

Penguji I : Dr. Syamsu Rosid (  )

Penguji II : Dr. Jatmiko P.A (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 17 Juni 2009

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'aalamiin. Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) pihak USAINS Malaysia yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3) pihak ELNUSA yang juga telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (4) Fred Javino, selaku pihak dari JMG Malaysia yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data dan diskusi dalam penyusunan skripsi ini,
- (5) seluruh tim pengukuran MT-TDEM, Bang Deni yang sudah sangat banyak membantu, Bang Edwin, Bang Riki, Mas Royo, dan Pak Toto yang tidak bosannya memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (6) terkhusus untuk kedua orang tua dan keluarga saya yang tidak pernah berhenti mendoakan dan juga telah memberikan bantuan baik dukungan material dan moral. Terima kasih atas segala doa dan dukungan motivasi dari Mama, Papa, juga Lia, semoga Allah senantiasa menjaga kalian,
- (7) Inta yang banyak menemani dan memberi semangat ketika pengerjaan penelitian ini,
- (8) teman seperjuangan Sucandra yang sudah bersama-sama hingga akhirnya dapat menyelesaikan pengukuran MT-TDEM dan skripsi ini,

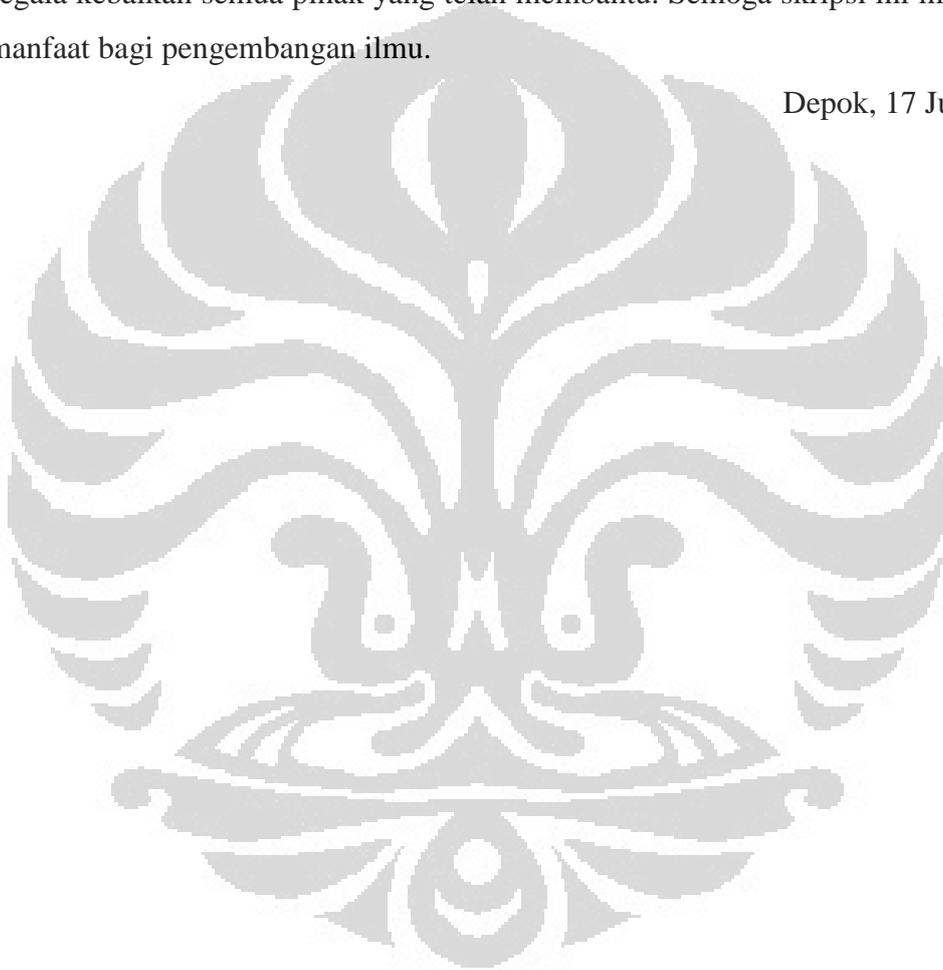
(9) seluruh sahabat fisika dan geofisika. Satrio, Surya, Ophie, Irvan, Nendar, Ka Rahman, Bang Ojak, Mas Budi, Dedew, Heni, teh Fitri, Riri, dan lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas doa dan dukungannya dalam menyelesaikan skripsi ini,

(10) dan seluruh teman-teman kos Wildan, Andi, Aziz, Aldi dan yang lainnya, terima kasih atas semua bantuan dan doanya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 17 Juni 2009

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lendriadi Agung

NPM : 0305020527

Program Studi : Geofisika

Departemen : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PEMODELAN SISTEM GEOTHERMAL DENGAN MENGGUNAKAN  
METODE MAGNETOTELLURIK DI DAERAH TAWAU, SABAH,  
MALAYSIA**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Juni 2009

Yang menyatakan

(Lendriadi Agung)

## ABSTRAK

Nama : Lendriadi Agung  
Program Studi : Geofisika  
Judul : PEMODELAN SISTEM GEOTHERMAL DENGAN  
MENGUNAKAN METODE MAGNETOTELLURIK DI  
DAERAH TAWAU-SABAH, MALAYSIA

Area prospek geothermal Tawau, Sabah, Malaysia salah satu daerah prospek di Malaysia yang terbentuk karena proses tektonik di daerah Sulu, dengan formasi batuan kuartar. Area prospek geothermal ini memiliki mata air panas tipe klorida, mata air panas tipe *steam-heated*, dan mata air panas tipe bikarbonat yang keseluruhannya tersebar di sekitar area prospek. Dari hasil perhitungan geotermometri diperoleh area prospek geothermal Tawau memiliki temperatur 190-236 °C, yang dapat dikategorikan sebagai *moderate to high temperature geothermal system*. Untuk mengetahui mengenai batas, kedalaman, dan geometri dari reservoir yang ada, dilakukan pengukuran dengan metode Magnetotellurik (MT) dan *Time Domain Electromagnetic* (TDEM). Pengukuran dilakukan dengan desain *gridding* agar dapat diketahui penyebaran resistivitas dari arah Utara-Selatan maupun Barat-Timur. Data MT tersebut dikoreksi terlebih dahulu terhadap efek statik dan noise dengan menggunakan TDEM dan *Remote Reference* sebelum nantinya siap diinterpretasi. Pemodelan sistem geothermal dari data magnetotellurik dengan menggunakan analisa 2-dimensi dan visualisasi 3-dimensi. Diperoleh hasil area prospek geothermal ini memiliki luas reservoir sekitar 15 km<sup>2</sup>, dan potensi untuk dikembangkan menjadi pembangkit listrik mencapai 84 MW, dengan rekomendasi pengeboran yang berada di dekat gunung Maria di bagian Utara Tawau.

Kata kunci: Area prospek geothermal Tawau, *moderate to high temperature geothermal system*, magnetotellurik, pemodelan sistem geothermal, potensi

## ABSTRACT

Name : Lendriadi Agung  
Study Program : Geophysics  
Title : GEOTHERMAL SYSTEM MODELING USING  
MAGNETOTELLURIC METHOD IN THE TAWAU AREA,  
SABAH, MALAYSIA

Geothermal prospect area in Tawau, Sabah, Malaysia is one of the prospect area developed by tectonic process in Sulu, with quaternary formation. This geothermal prospect area has chloride, steam-heated, and bicarbonate hot springs. Based on geothermometry calculation the geothermal prospect area of Tawau has temperature 190-236 °C which is categorized as a moderate to high temperature geothermal system. To estimate the boundary, depth, and geometry of the reservoir, Magnetotelluric (MT) and Time Domain Electromagnetic (TDEM) methods were used. Data acquisition was designed gridding method to delineated resistivity distribution in North-South or West-East orientation. MT data was then corrected for static effect and possible noise using TDEM and remote reference before comprehensive interpretation. Modeling of the geothermal system was carried out by using 2-dimensional MT resistivity and 3-dimensional visualization. As a result we could delineated the geothermal prospect area is about 15 km<sup>2</sup> with its potential of up to 84 MWe. In addition, the with drilling recommendation is proposed is the promising zone (close to Mt. Maria flank).

Key words: Tawau geothermal prospect, moderate to high temperature geothermal system, magnetotelluric, geothermal system modeling, potential

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PENGESAHAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR DIAGRAM.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Pembatasan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Metodologi Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Metode Magnetotellurik .....	5
2.1.1 Sumber Sinyal MT .....	5
2.1.1.1 Frekuensi Tinggi Sinyal MT.....	6
2.1.1.2 Frekuensi Rendah Sinyal MT .....	7
2.1.1.3 Sinyal Noise MT.....	10
2.1.2 Prinsip Dasar Metode MT.....	11
2.2 Pemodelan MT .....	16
2.2.1 Pemodelan 1-Dimensi .....	16
2.2.2 Pemodelan 2-Dimensi .....	18
2.2.2.1 <i>Transverse Electric (TE) Mode</i> .....	20
2.2.2.2 <i>Transverse Magnetic (TM) Mode</i> .....	21
2.2.2.3 Tipper.....	22
2.3 Pergeseran Statik .....	23
2.3.1 Efek Statik.....	23
2.3.2 Koreksi Statik.....	25
2.3.2.1 Koreksi Statik Dengan Metode Perata-rataan .....	25
2.3.2.2 Koreksi Statik Dengan Data TDEM.....	25
2.3.2.3 Data geologi dan Data Geofisika Lain .....	26
2.4 <i>Remote Reference</i> .....	26
<b>BAB III TINJAUAN DAERAH PENELITIAN.....</b>	<b>30</b>
3.1 Kondisi Geologi Daerah Penelitian .....	30
3.1.1 Fisiografi dan Morfologi.....	33
3.1.2 Stratigrafi.....	33

3.2	Kondisi Geokimia.....	34
3.2.1	Temperatur Reservoir.....	37
3.2.2	Hidrogeologi .....	38
<b>BAB IV</b>	<b>DATA MAGNETOTELLURIK .....</b>	<b>40</b>
4.1	Desain Pengukuran .....	40
4.2	Instrumentasi MT .....	41
4.2.1	MT Unit.....	42
4.2.2	Sensor Elektrik .....	43
4.2.3	Sensor Magnetik .....	44
4.3	Akuisisi Data MT .....	44
4.4	Kurva Sounding MT.....	49
4.5	Inversi 2-Dimensi Data MT.....	54
4.5.1	Inversi Data MT Tawau .....	55
4.7	Visualisasi 3-Dimensi Data MT .....	58
<b>BAB V</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>59</b>
5.1	Interpretasi Terintegrasi.....	59
5.1.1	Model Sistem Geothermal.....	64
5.1.2	Potensi Geothermal .....	67
5.2	Rekomendasi Pengeboran.....	69
<b>BAB VI</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>71</b>
6.1	Kesimpulan.....	71
6.2	Saran .....	72
	<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>73</b>
	<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Spektrum gelombang elektromagnetik.....	6
Gambar 2.2	Sinyal data MT yang terekam pada frekuensi tinggi.....	7
Gambar 2.3	Proses terjadinya sinyal frekuensi rendah pada MT.....	7
Gambar 2.4	Sinyal MT pada frekuensi rendah dengan waktu perekaman selama 5 menit.....	9
Gambar 2.5	Sinyal MT pada frekuensi rendah dengan waktu perekaman selama 20 hari.....	9
Gambar 2.6	Variasi spektrum dari nilai medan magnetik alami .....	10
Gambar 2.7	Penjalaran gelombang EM di atmosfer dan di bumi .....	11
Gambar 2.8	Interaksi gelombang EM dengan medium di bawah permukaan .....	12
Gambar 2.9	Grafik fungsi kedalaman berdasarkan frekuensi .....	16
Gambar 2.10	Pemodelan 1-Dimensi dari besar nilai resistivitas semu dan fase dari data MT.....	17
Gambar 2.11	Model 2-Dimensi dengan nilai resistivitas berbeda .....	19
Gambar 2.12	<i>Pseudosection</i> dengan menggunakan TE mode .....	20
Gambar 2.13	<i>Pseudosection</i> dengan menggunakan TM mode .....	22
Gambar 2.14	Penampang vertikal (a) dan arah vektor induksi (b) dari medan magnetik vertikal .....	22
Gambar 2.15	<i>Pseudosection</i> dengan menggunakan tipper.....	23
Gambar 2.16	Pengaruh heterogenitas terhadap efek statik .....	24
Gambar 2.17	Contoh data MT (a) menunjukkan data MT yang tanpa menggunakan remote reference (b) menunjukkan data MT setelah menggunakan remote reference.....	29
Gambar 3.1	Area penelitian Prospek Geothermal Tawau .....	30
Gambar 3.2	Tektonik di daerah Sabah .....	31
Gambar 3.3	Zona Subduksi di daerah Sulu .....	31
Gambar 3.4	Distribusi batuan di daerah Sabah berdasarkan umur terbentuknya .....	32
Gambar 3.5	Stratigrafi daerah Tawau-Sabah .....	34
Gambar 3.6	Manifestasi permukaan daerah penelitian .....	37

Gambar 3.7	Hidrogeologi daerah Tawau-Sabah .....	38
Gambar 4.1	Desain titik pengukuran MT.....	40
Gambar 4.2	1 Set alat pengukuran MT .....	42
Gambar 4.3	Alat MT unit dan GPS.....	42
Gambar 4.4	Sensor elektrik MT .....	43
Gambar 4.5	Sensor magnetik MT .....	44
Gambar 4.6	Tanda yang diberikan tim Topo .....	45
Gambar 4.7	<i>Layout</i> pengukuran MT .....	46
Gambar 4.8	(a) Lubang tempat sensor elektrik dikubur (b) Penguburan sensor elektrik.....	46
Gambar 4.9	Pembagian kuadran tempat dikuburnya sensor magnetik .....	47
Gambar 4.10	Penguburan sensor magnetik.....	48
Gambar 4.11	Pemasangan sensor-sensor dan perekaman data MT di MT Unit.....	49
Gambar 4.12	Data <i>time series</i> pada titik MT-A1 .....	50
Gambar 4.13	Kurva sounding MT. (a) Sebelum terkoreksi statik (b) Sesudah terkoreksi statik .....	51
Gambar 4.14	Kualitas kurva sounding MT .....	52
Gambar 4.15	Model inversi 2-dimensi. (a) Model inversi line-A (b) Model inversi line-B (c) Model inversi line-C .....	56
Gambar 4.16	Visualisai 3-dimensi pada tiap profile pengukuran .....	60
Gambar 5.1	Visualisasi 3-Dimensi dengan tampilan <i>cubic slice</i> .....	62
Gambar 5.2	Hasil pemodelan sistem geothermal area prospek Tawau.....	65
Gambar 5.3	Potensi luasan dari reservoir di area prospek Tawau .....	66
Gambar 5.4	Batas daerah zona reservoir.....	67
Gambar 5.5	Titik rekomendasi pengeboran .....	69

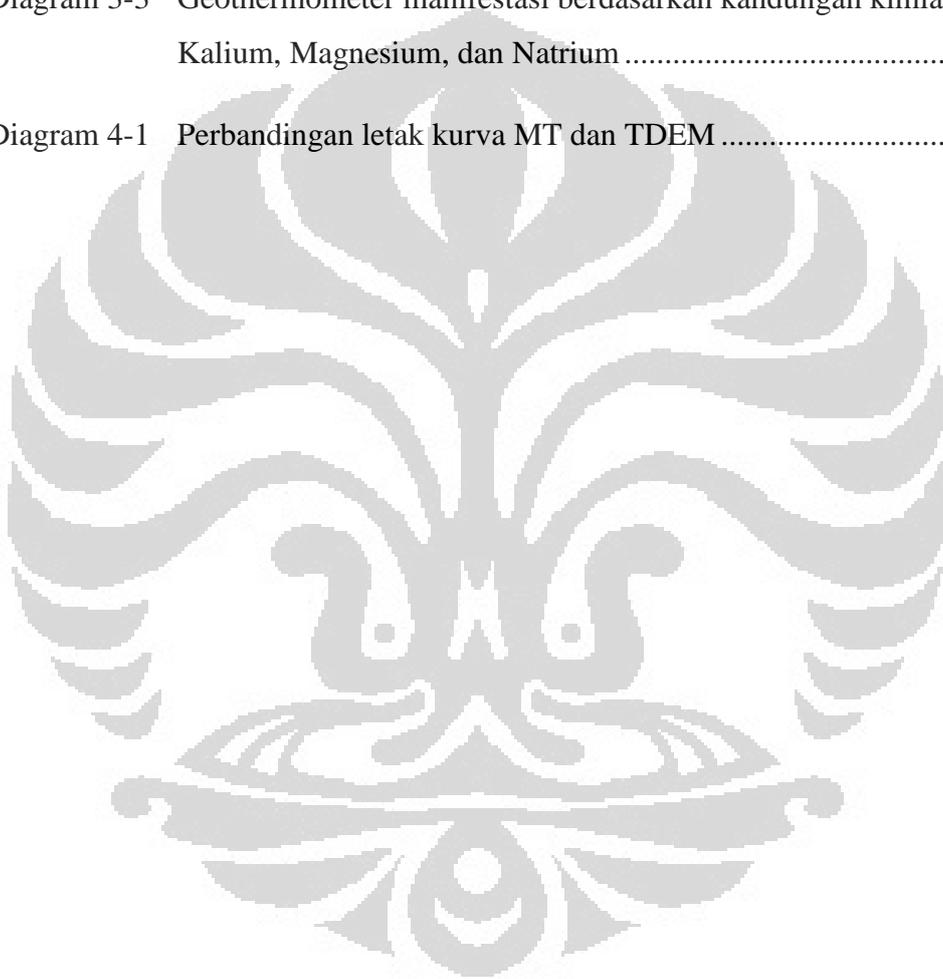
## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Kandungan kimia dari manifestasi mata air panas Tawau-Sabah .....	35
Tabel 4.1	Kualitas data titik-titik MT .....	53



## DAFTAR DIAGRAM

Diagram 1-1	Diagram alir penelitian .....	4
Diagram 3-1	Jenis fluida pada manifestasi permukaan berdasarkan kandungan kimianya.....	35
Diagram 3-2	Kandungan Cl dan B dalam manifestasi permukaan.....	36
Diagram 3-3	Geothermometer manifestasi berdasarkan kandungan kimia Kalium, Magnesium, dan Natrium .....	37
Diagram 4-1	Perbandingan letak kurva MT dan TDEM .....	56



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Kurva Sounding MT.....	75
------------	------------------------	----



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Area prospek geothermal Tawau berada di bagian sebelah timur dari Malaysia, berbatasan langsung dengan Indonesia di bagian utara pulau Kalimantan, merupakan salah satu daerah prospek geothermal dari sekian banyak daerah prospek yang ada disekitar Sabah-Malaysia, secara geologis memiliki kondisi formasi batuan quaternary yang ada di daerah gunung Maria dan sebagian gunung Andrassy. Adanya formasi tersebut adalah produk dari gunung api muda yang sudah tidak aktif yang umumnya merupakan ciri dari adanya kemungkinan sistem geothermal dibawahnya.

Manifestasi permukaan yang muncul di area prospek Tawau ini antara lain adalah air panas tipe *steam-heated* yang berada di dekat gunung Maria, adanya manifestasi ini dapat diindikasikan bahwa daerah tempat di mana air panas tersebut muncul merupakan daerah *up-flow* dari sistem geothermal yang berada disana. Manifestasi lain yang juga ada di area prospek ini adalah air panas tipe *chloride* yang muncul di daerah yang lebih rendah, manifestasi yang dapat diartikan bahwa adanya hubungan langsung antara manifestasi ini dengan reservoir geothermalnya.

Dari data-data geokimia yang ada diperkirakan tempertatur area prospek Tawau ini masuk dalam golongan *moderate to high* yaitu sekitar 180-236 °C (Daud, 2008) geothermal reservoirnya.

Namun model dari sistem geothermal area prospek Tawau ini belum diketahui. Pada tahun 1993 telah dilakukan survey geofisika dengan metode geolistrik. Dari hasil survey tersebut diperoleh bahwa zona prospek diperkirakan berada di daerah Apas, dengan luas batas reservoir sekitar 1 km<sup>2</sup> (Daud, 2008). Namun dengan melihat banyaknya manifestasi yang ada serta penyebarannya yang cukup luas, hasil dari survey tersebut perlu diperkuat kembali dengan melakukan survey lanjutan, seperti survey magnetotelurik, gravitasi, maupun *microearthquakes*.

Pada kesempatan kali ini dilakukan survey magnetotelutik didaerah tersebut guna mengetahui tentang batas dari reservoir geothermalnya, serta

konseptual model dari sistem geothermal disana, hal ini dilakukan karena dengan metode magnetotelurik kita dapat mengetahui penyebaran batuan berdasarkan nilai resistivitasnya dengan jangkauan penetrasi yang jauh lebih tinggi dibanding dengan metode geolistrik, sehingga data yang sebelumnya sudah ada dapat dikuatkan ataupun dikoreksi kembali dengan metode magnetotelurik ini. Dengan kita mengetahui batas dan konseptual modelnya dapat membantu kita mengenai kapasitas dari potensi geothermal yang ada.

## **1.2 Batasan Masalah**

Bagaimana memahami tentang metode magnetotelurik. Bagaimana membuat model sistem geothermal disuatu area prospek dari data magnetotelurik, membuat model geometri dari reservoir, bagaimana mengetahui potensi geothermal disuatu wilayah.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Secara umum dari penelitian ini memiliki tujuan adalah sebagai berikut.

- Memahami tentang cara kerja metode Magnetotellurik, pengambilan data, pengolahan data, dan interpretasi data Magnetotellurik.
- Mengetahui hidrogeologi yang terdapat di daerah prospek Geothermal Tawau, Sabah, Malaysia.
- Mengetahui batas daerah prospek, luas, maupun potensinya.
- Membuat model terpadu sistem Geothermal berdasarkan metode geofisika yang juga dibantu oleh data penunjang lainnya seperti data geologi dan geokimia.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian ini diharapkan mampu memperkirakan tentang potensi dari area prospek geothermal disana, yang nantinya dapat dikaitkan dengan keekonomisan dari area prospek untuk dieksploitasi serta mampu membantu merekomendasikan perkiraan lokasi pengeboran di area prospek tersebut.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Secara umum metode penelitian yang akan dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini antara lain meliputi akuisisi data magnetotelurik yang telah dilakukan pada bulan Desember 2008 hingga awal Januari 2009 di Area Prospek Tawau, kemudian melakukan pengolahan data magnetotelurik yang sudah diperoleh pada waktu pengukuran sebelumnya, sehingga data mentah dari alat MT yang berupa *time series* tersebut dapat ditransformasi menjadi fase, dan resistivitas semu terhadap frekuensi.

Setelah data ditransformasi kemudian data tersebut dihilangkan faktor noisennya dengan menggunakan *remote reference* yang merupakan data magnetotelurik yang diletakan jauh dari daerah pengukuran dan dianggap daerahnya bebas dari noise.

Data yang sudah dikoreksi tersebut dikoreksi kembali dengan data resistivitas batuan sekitarnya yang diperoleh dari data TDEM (*Time Domain Electromagnetic*) 1-Dimensi, hal tersebut karena adanya faktor heterogenitas batuan lokal didekat permukaan dan juga faktor dari topografi sehingga data MT tersebut terdistorsi secara vertikal atau yang dikenal sebagai efek statik (Hendro dan Grandis, 1996).

Setelah berbagai macam koreksi tersebut dilakukan maka selanjutnya adalah melakukan inversi dari data tersebut sehingga diperoleh data resistivitas batuan pada tiap kedalaman, setelah proses inversi ini dilakukan barulah proses analisa hasil dilakukan untuk dapat model geothermal didaerah tersebut sehingga nantinya dapat menjawab semua pertanyaan yang menjadi tujuan dari penelitian ini.

Seluruh metodologi ini digambarkan menjadi sebuah alur penelitian yang dapat dilihat diagram 1.1.

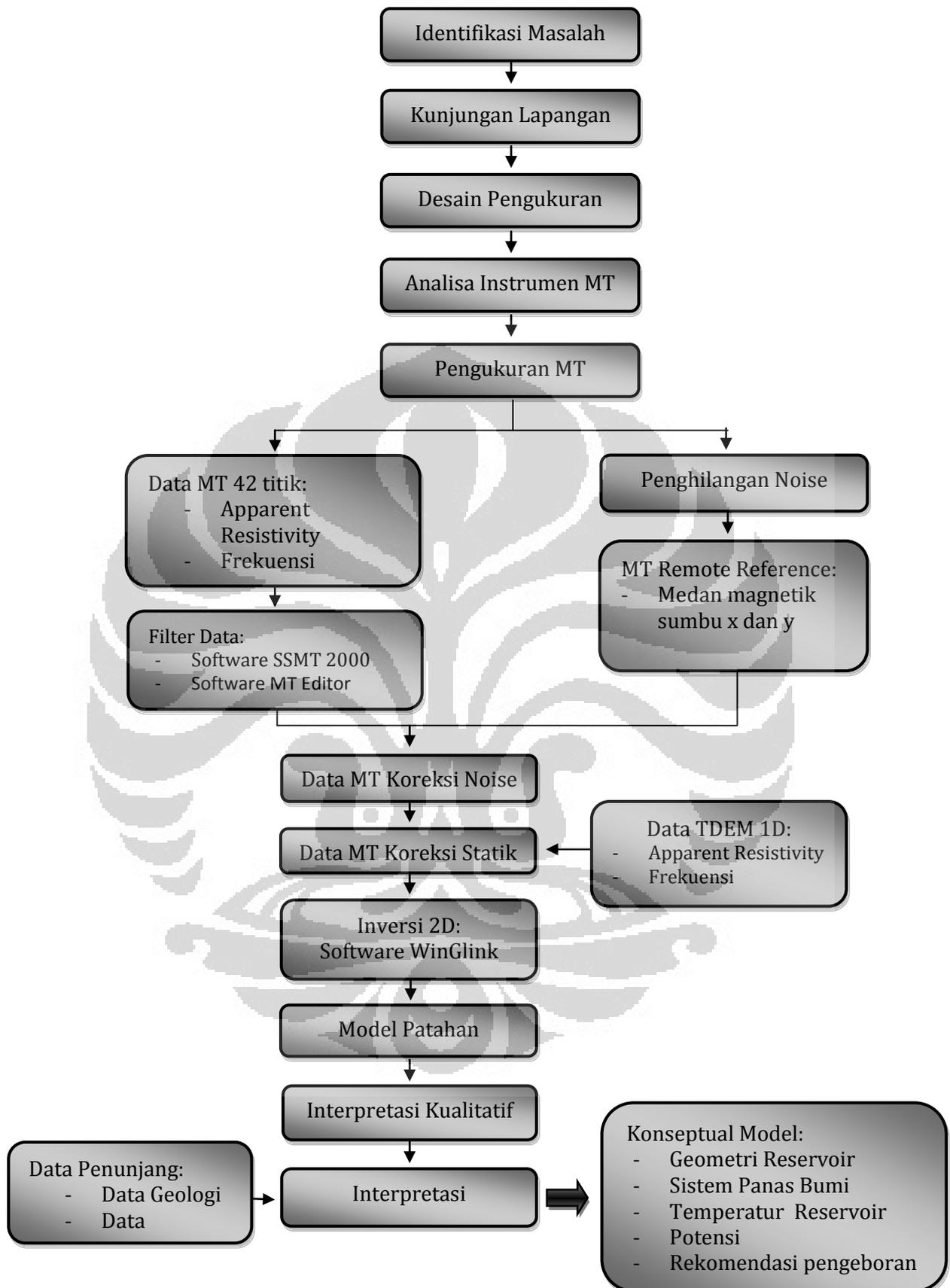


Diagram 1.1 Diagram alir penelitian

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Magnetotellurik**

Metode magnetotellurik (MT) saat ini merupakan salah satu metode geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik (EM). Pada metode ini gelombang EM yang digunakan adalah gelombang elektromagnetik alami yang berasal dari ionosphere yang kemudian berinteraksi dengan medium yang memiliki nilai resistivitas tertentu sehingga dapat dimanfaatkan untuk mencitrakan kondisi struktur resistivitas batuan dibawah permukaan bumi.

Dengan memanfaatkan gelombang EM tersebut, metode ini dapat mencitrakan kondisi bawah permukaan pada tingkat kedalaman yang cukup tinggi, karena frekuensi yang digunakan pada gelombang EM tersebut sangat rendah sehingga kemampuan gelombang tersebut untuk dapat masuk ke bagian bawah permukaan bumi memiliki tingkat penetrasi yang cukup tinggi.

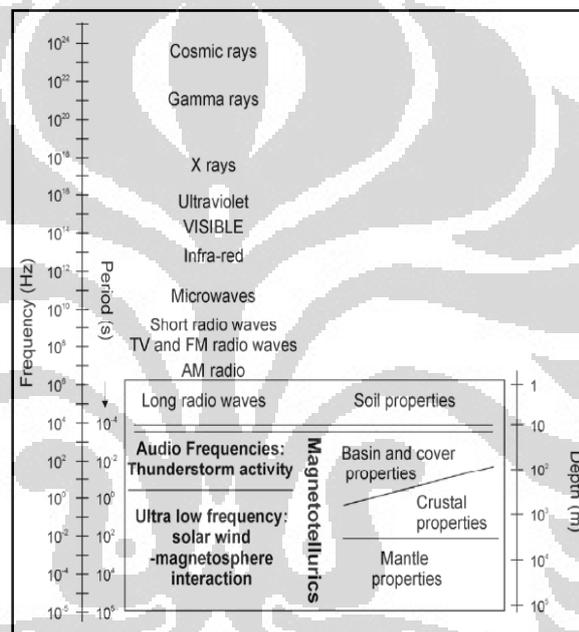
Hasil dari pencitraan metode MT ini dapat membantu untuk menjelaskan tentang konseptual model dari suatu sistem panas bumi yang ada, selain itu juga dapat memperkirakan tentang besarnya potensi suatu area prospek geothermal yang kita ingin ketahui. Manfaat lain yang tidak kalah penting dari metode MT ini adalah mampu untuk membantu guna memperkirakan tentang lokasi pengeboran di mana terdapat daerah yang memiliki potensi merupakan daerah bertemperatur yang tinggi dan daerah yang memiliki permeabilitas yang tinggi, di mana daerah tersebut umumnya merupakan daerah patahan.

#### **2.1.1 Sumber sinyal MT**

Medan magnetik yang terukur dipermukaan bumi disebabkan oleh sumber yang berasal dari dalam maupun dari luar bumi. Sumber medan magnet yang berasal dari dalam bumi disebabkan karena adanya pergerakan mantel bumi terhadap inti bumi (arus konveksi) dan sisa dari medan magnet yang berada dikerak bumi. Sedangkan sumber medan magnet yang berasal dari luar bumi adalah medan magnet yang terbentuk diatmosfer dan magnetosfer. Antara kedua komponen tersebut memiliki nilai yang bervariasi terhadap waktu dan akhirnya dapat digunakan dalam eksplorasi MT (Unsworth, 2008).

Namun pada kenyataannya hanya variasi sinyal EM yang berasal dari luar bumi saja yang digunakan dalam eksplorasi MT, hal tersebut dikarenakan variasi medan magnet yang dihasilkan dari dalam bumi sangatlah kecil sehingga cukup sulit untuk dimanfaatkan pada metode ini.

Gambar 2.1 menjelaskan tentang frekuensi-frekuensi gelombang yang digunakan serta target yang dapat diperoleh pada eksplorasi MT. Frekuensi gelombang yang digunakan pada eksplorasi MT adalah frekuensi yang besarnya sekitar 400 – 0.00002 Hz, yang dapat bagi menjadi 2 golongan yaitu sinyal frekuensi tinggi dan frekuensi rendah.



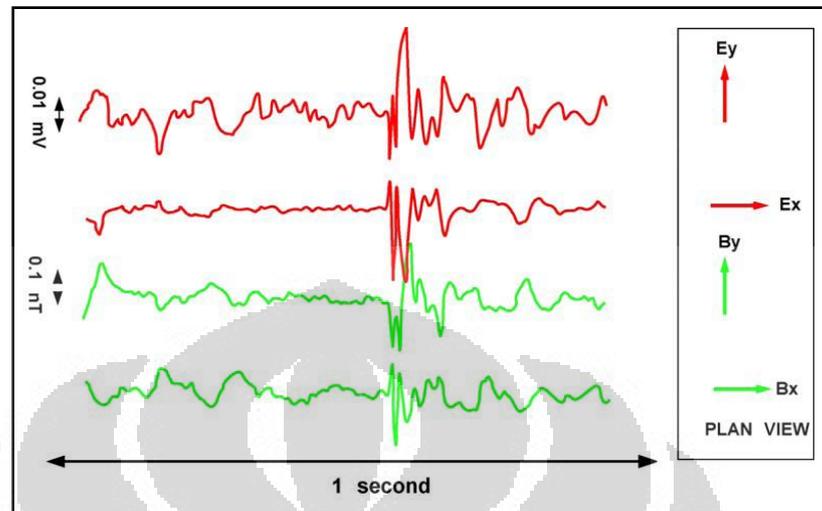
Gambar 2.1. Spektrum gelombang elektromagnetik (Castells, 2006)

### 2.1.1.1 Frekuensi tinggi sinyal MT

Pada frekuensi di atas 1 Hz, sinyal MT umumnya berasal dari adanya aktivitas petir/kilat yang terjadi diseluruh bagian dunia (Unsworth, 2008). Sinyal tersebut akan menjalar disepanjang bumi-ionosphere. Sedangkan pada frekuensi sinyal diatas 2 kHz, sinyal tersebut tidak dapat merambat dengan baik di bumi-ionosphere, karena amplitudo dari gelombang tersebut yang sangat kecil sehingga gelombang teratenuasi.

Pada frekuensi ini, data MT yang diperoleh akan mengandung banyak noise baik noise yang ada pada sinyal medan listrik maupun medan magnet.

Macam-macam noise yang ada ini akan dijelaskan pada bagian selanjutnya pada pembahasan sinyal noise.

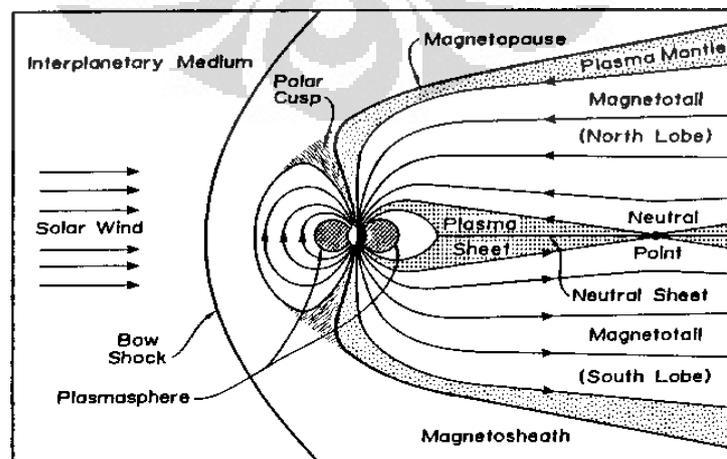


Gambar 2.2. Sinyal data MT yang terekam pada frekuensi tinggi (Unsworth, 2008)

Dari Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa sinyal yang ditangkap pada frekuensi tinggi tidak berpola dan terdapat sinyal gangguan pada frekuensi tertentu, sehingga diperlukan pengolahan lebih lanjut untuk dapat memanfaatkan sinyal yang diperoleh tersebut.

### 2.1.1.2 Frekuensi rendah sinyal MT

Sinyal MT yang memiliki frekuensi di bawah 1 Hz, berasal dari magnetosphere. *Solar wind* yang merupakan pergerakan dari ion *H* dan *He*, berinteraksi dengan medan magnet dari dalam bumi, sehingga *solar wind* tersebut dibelokkan yang menyebabkan terbentuknya magnetosphere (Unsworth, 2008).



Gambar 2.3. Proses terjadinya sinyal frekuensi rendah pada MT (Space Physics Center, 2009)

Ionosphere yang berada 50-1500 km di atas permukaan bumi merupakan tempat di mana terdapat plasma yang memiliki konduktivitas elektrik yang cukup tinggi (Unsworth, 2008). Perubahan medan magnet dari magnetosphere dapat meninduksi arus listrik yang cukup besar di ionosphere. Perubahan pada arus ini menghasilkan perubahan yang signifikan pada medan magnet yang terukur di permukaan bumi.

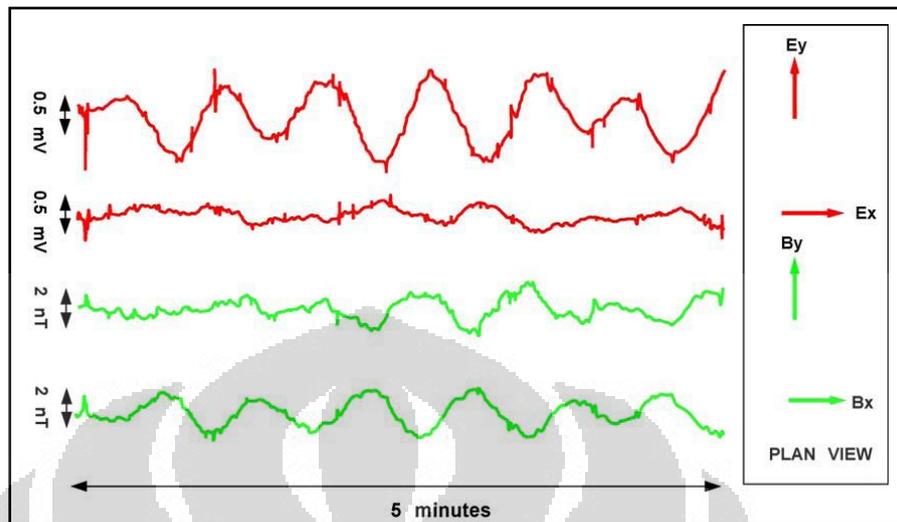
Ketika *solar wind* berada pada keadaan yang tetap, medan magnet bumi memperlihatkan variasi nilai magnetik tiap harinya, yang disebabkan oleh rotasi bumi di dalam sistem arus dari magnetosphere dan ionosphere, keadaan ini disebut juga *solar quiet day variation* ( $S_q$ ) (Unsworth, 2008), di mana amplitudonya sekitar 10-20 nT. Namun setiap 25 hari diketahui terdapat variasi medan magnet yang lebih kecil yang disebabkan adanya rotasi bulan yang mengorbit pada bumi (Unsworth, 2008).

Dan ketika *solar wind* dalam keadaan aktif, medan magnet bumi dapat dikatakan menjadi terganggu. Pada saat tersebut terjadi badai magnetik yang mana terjadi perubahan sistem arus pada suatu waktu disepanjang hari. Adanya fenomena tersebut menyebabkan perubahan medan magnet bumi yang terukur dipermukaan bumi sekitar 100 nT. Gangguan medan magnet dalam skala yang lebih kecil juga dapat terjadi ketika adanya badai magnetik yang jauh lebih kecil pada waktu yang relatif singkat (Unsworth, 2008).

Ketika frekuensi di bawah 1 Hz, sinyal MT umumnya berasal dari fluktuasi medan magnet bumi yang terjadi karena adanya perubahan di magnetosphere. Gambar 2.4 memperlihatkan data perekaman medan listrik dan medan magnet dalam bidang  $x$  dan  $y$  yang dilakukan selama 5 menit, sinyal yang ditangkap tersebut disebabkan adanya osilasi gelombang dari magnetosphere. Sinyal yang diperoleh, bentuknya mendekati sinyal sinusoidal. *Spike* yang muncul menunjukkan adanya gelombang pada frekuensi tinggi yang berasal dari aktivitas petir/kilat seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

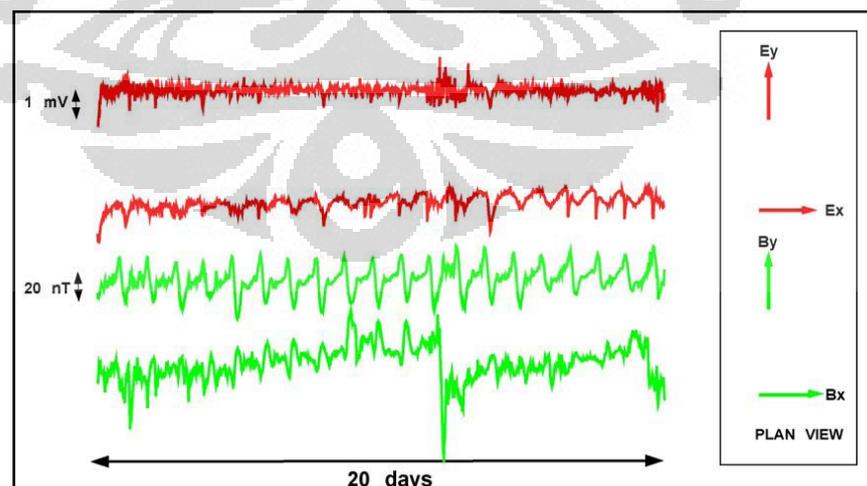
Osilasi gelombang pada frekuensi yang sangat rendah dari magnetosphere dapat terjadi karena adanya perubahan yang sangat besar di *solar wind*. Hal ini akan terjadi ketika aktivitas *sun spot* meningkat, terutama ketika matahari

menghasilkan lidah api yang sangat besar. Variasi medan magnetik yang terjadi karena adanya rotasi bumi terhadap *solar wind*.



Gambar 2.4. Sinyal MT pada frekuensi rendah dengan waktu perekaman selama 5 menit (Unsworth, 2008).

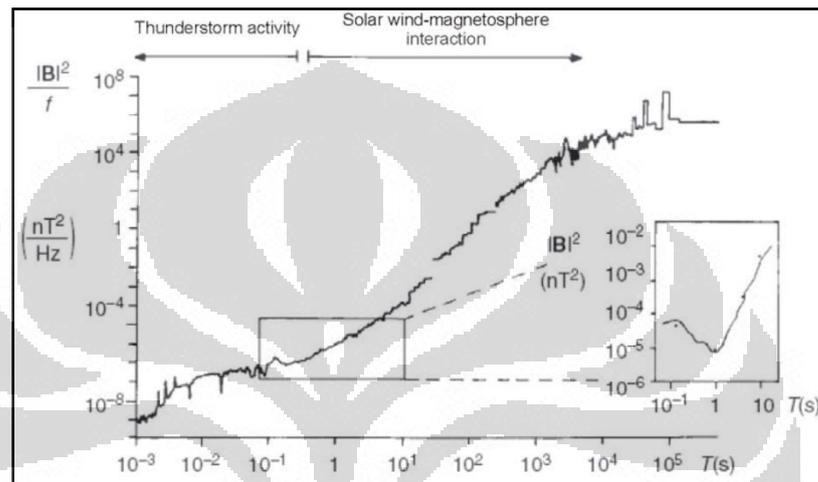
Seperti pada Gambar 2.5, dilukiskan tentang sinyal MT yang diperoleh selama 20 hari perekaman. Dari data tersebut diketahui bahwa sinyal yang diperoleh didapat ketika aktivitas dari sun spot tidak terlalu besar dan tercatat pada hari ke 13 sinyal MT menangkap adanya badai magnetik yang ditandai dengan terjadinya perubahan sinyal yang signifikan pada hari tersebut yang melebihi dari 100 nT.



Gambar 2.5. Sinyal MT pada frekuensi rendah dengan waktu perekaman selama 20 hari (Unsworth, 2008).

### 2.1.1.3 Sinyal Noise pada MT

Pada frekuensi disekitar 1 Hz, yaitu di antara frekuensi dari aktivitas petir/kilat dan *solar wind* kira-kira pada frekuensi 5 – 0.5 Hz, diketahui sebagai *dead band* (Castells, 2006), di mana pada spektrum dari gelombang EM alami tersebut menghasilkan sinyal MT yang memiliki amplitudo yang rendah, sehingga membuat terjadinya pelemahan sinyal pada frekuensi tersebut.



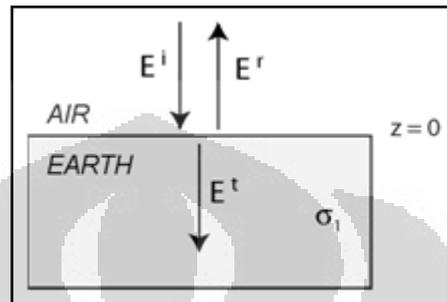
Gambar 2.6. Variasi spektrum dari nilai medan magnetik alami. Pada gambar sisipan menjelaskan bahwa terjadinya penurunan sinyal pada frekuensi *dead band* (Castells, 2006).

Selain dua sumber gelombang EM yang digunakan pada metode MT ini, ada sinyal EM lain yang dapat juga terekam selama proses pengukuran, yaitu yang berupa *noise* atau sinyal gangguan. Adanya penambahan sinyal *noise* ini dapat membuat hasil dari MT tidak lagi akurat, untuk itu perlu dilakukannya koreksi guna menghilangkan efek dari adanya *noise* ini.

Yang menjadi sumber dari adanya *noise* dalam eksplorasi MT ini antara lain berasal dari alat MT itu sendiri, ataupun sumber yang berasal dari lingkungan di mana dilakukan pengukuran misalnya saja alat-alat elektronik, tegangan tinggi, jaringan listrik, jalan kereta api, pagar listrik, radio, *ground motion* (gelombang yang terbentuk karena adanya aktivitas di atas permukaan tempat lokasi pengukuran dilakukan, seperti guncangan karena adanya pergerakan mobil, pejalan kaki, pergerakan kereta), maupun transmitter televisi. Efek dari *noise* ini dapat dihilangkan atau dikurangi dengan menggunakan filter pada alat MT, pengolahan data, maupun dengan menggunakan *remote reference* (Castells, 2006).

### 2.1.2 Prinsip Dasar Magnetotellurik

Gelombang EM yang datang akan merambat di atmosfer menuju bumi. Sebagian gelombang akan masuk ke dalam bumi secara difusi dan sebagian gelombang lainnya akan terrefleksikan kembali ke atas.



Gambar 2.7. Penjaralan gelombang EM di atmosfer dan di bumi (Unsworth, 2008).

Gelombang EM yang datang memiliki amplitudo sebesar  $E^i$ , frekuensi senilai  $\omega$ , bilangan kompleks gelombang sebesar  $k_0$ , dan dengan asumsi konduktivitas udara di atmosfer adalah nol maka (Unsworth, 2008):

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}, \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_x^i(z, t) = \vec{E}^i e^{-ik_0 z} e^{-i\omega t}, \quad (2.2)$$

Pada gelombang EM yang terrefleksikan memiliki persamaan yang serupa pada persamaan gelombang datang namun dengan amplitudo sebesar  $E^r$ , pada gelombang refleksi ini memiliki arah perambatan gelombang yang berlawanan arah dengan arah gelombang datang, sehingga:

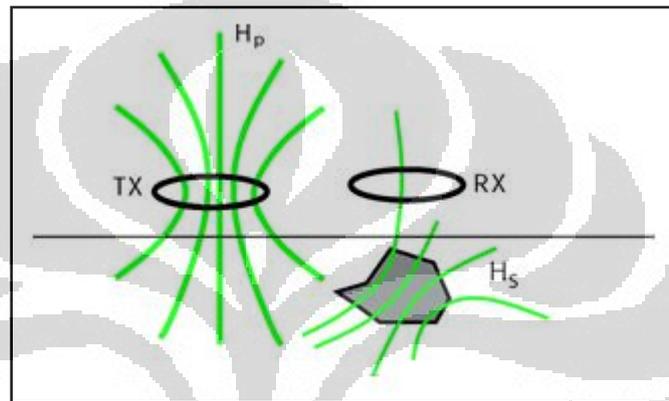
$$\vec{E}_x^r(z, t) = \vec{E}^r e^{ik_0 z} e^{-i\omega t}, \quad (2.3)$$

Sedangkan pada gelombang EM yang masuk bumi yang memiliki nilai konduktivitas yang relatif lebih besar jika dibanding konduktivitas udara, akan menyebar secara difusi dengan amplitudo senilai  $E^t$ . Dengan asumsi bahwa jika dibandingkan dengan nilai dari arus konduksi yang terjadi, *displacement current* dapat diabaikan maka (Unsworth, 2008):

$$k_1 = (1 - i) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_1}{2}}, \quad (2.4)$$

$$\vec{E}_x^t(z, t) = \vec{E}^r e^{k_1 z} e^{-i\omega t}, \quad (2.5)$$

Gelombang EM yang ditransmisikan ke dalam bumi berinteraksi dengan medium yang memiliki nilai resistivitas tertentu, hasil dari interaksi tersebut mengakibatkan terjadinya induksi yang menyebabkan terbentuknya arus tellurik dan medan magnetik sekunder yang nantinya sinyal tersebut akan ditangkap oleh alat MT untuk diketahui tentang struktur resistivitas di dalamnya, seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Interaksi gelombang EM dengan medium di bawah permukaan bumi (Unsworth, 2008).

Di mana TX adalah sumber gelombang EM yang memiliki medan magnetik utama ( $H_p$ ), kemudian gelombang tersebut ditransmisikan ke bawah permukaan bumi yang memiliki nilai resistivitas tertentu sehingga terjadi interaksi yang menyebabkan timbulnya arus tellurik yang menginduksi sehingga terbentuk medan magnetik sekunder ( $H_s$ ), hasil dari interaksi tersebut akhirnya ditangkap oleh receiver (RX) yang dalam hal ini adalah alat MT (Unsworth, 2008).

Sinyal yang ditangkap oleh alat MT tersebut merupakan sinyal yang berasal dari medan EM total yang terjadi di permukaan bumi yang bergantung dengan variasi waktu. Sesuai dengan sifat gelombang EM pada suatu medium, penetrasi dari gelombang EM akan bergantung pada frekuensi dari gelombang tersebut dan sifat keresistifan dari medium yang dilaluinya. Persamaan differensial umum yang dapat menjelaskan perambatan gelombang EM ini didasarkan pada persamaan Maxwell sebagai berikut:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{Hukum Faraday} \quad (2.6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v, \quad \text{Hukum Gauss} \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \text{Hukum Gauss} \quad (2.9)$$

di mana  $\vec{E}$  (V/m) adalah medan listrik dan  $\vec{H}$  (A/m) adalah medan magnetik,  $\vec{B}$  (T) adalah induksi magnetik,  $\vec{D}$  (C/m<sup>2</sup>) adalah perpindahan muatan elektrik dan  $\rho_v$  (C/m<sup>3</sup>) adalah rapat muatan elektrik yang seharusnya berada pada muatan bebas.  $\vec{j}$  adalah rapat arus dan  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  (A/m<sup>2</sup>) adalah perpindahan arus terhadap waktu.

Persamaan (2.6) merupakan hukum Faraday di mana variasi medan magnet  $\vec{B}$  terhadap waktu yang membangkitkan medan elektrik  $\vec{E}$ . Persamaan (2.7) merupakan hukum Ampere di mana keberadaan arus listrik  $\vec{j}$  membangkitkan rotasi medan magnet  $\vec{H}$ , kipas angin yang berputar merupakan salah satu aplikasi yang dapat kita jumpai sehari-hari dari persamaan ini. Persamaan (2.8) menunjukan bahwa keberadaan muatan listrik  $q$  merupakan sumber dari *displacement current*  $\vec{D}$ , kapasitor merupakan salah satu aplikasi dari persamaan ini. Sedangkan persamaan (2.9) merupakan hukum Gauss menyatakan bahwa medan magnet tidak mempunyai sumber (Raharjo, 2008).

Di samping persamaan diatas, diperlukan juga persamaan yang memberikan hubungan antar medan yaitu:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (2.10)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (2.11)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (2.12)$$

di mana  $\epsilon$  (F/m) merupakan permitivitas elektrik,  $\mu$  (H/m) merupakan permeabilitas magnetik, dan  $\sigma$  (S/m) merupakan konduktivitas dari bahan.

Dengan menggunakan persamaan hubungan antar medan (2.10) dan (2.11), maka persamaan (2.7) dapat dituliskan menjadi:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2.13)$$

Dan dari persamaan (2.13) dengan menggunakan persamaan (2.10) dan (2.12) maka dapat juga dituliskan menjadi:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2.14)$$

Turunan orde dua pada persamaan (2.6) dengan menggunakan persamaan (2.14) akan menjadi:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (2.15)$$

Dalam kasus dilingkungan dielektrik, terdapat sedikit arus konduksi, dan didominasi oleh *displacement current*. Untuk itu persamaan (2.15) dapat diubah menjadi persamaan gelombang, yaitu:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2.16)$$

Sedangkan dalam kasus lingkungan konduktif, di mana arus konduksi sangat dominan dan efek dari *displacement current* dapat diabaikan. Maka persamaan (2.15) dapat diubah menjadi persamaan difusi, yaitu:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0, \quad (2.17)$$

Bumi dapat dianggap sebagai lingkungan yang konduktif jika dibandingkan dengan nilai resistivitas dari atmosfer, sehingga persamaan difusi di atas dapat digunakan untuk menganalisa data magnetotellurik. Pada gelombang EM yang merupakan gelombang sinusoidal dengan variasi waktu, kuat medan listriknya dapat ditulis menjadi  $E = E_0 e^{-i\omega t}$ . Sehingga persamaan (2.17) dapat diubah menjadi:

$$\nabla^2 \vec{E} + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0, \quad (2.18)$$

Karena gelombang EM akan berkurang secara eksponensial terhadap kedalaman ( $z$ ) yang disebabkan oleh proses transformasi gelombang tersebut menjadi panas. Maka persamaan (2.18) dapat ditulis menjadi

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0, \quad (2.19)$$

Dengan  $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t} e^{kz}$ , di mana  $\vec{E}_0$  adalah kuat medan listrik pada permukaan bumi, maka persamaan (2.19) menjadi:

$$\vec{E}k^2 + i\omega\mu\sigma\vec{E} = 0, \quad (2.20)$$

Atau dapat juga ditulis menjadi:

$$\vec{E}(k^2 + i\omega\mu\sigma) = 0, \quad (2.21)$$

Dan diperoleh penyelesaian untuk fungsi  $k$ , yaitu

$$k = \pm(1 - i)\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}, \quad (2.22)$$

Disini  $k$  adalah merupakan bilangan kompleks gelombang pada suatu medium.

Dari sini persamaan medan listrik permukaan dapat ditulis sebagai:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{i\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} e^{i\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z}, \quad (2.23)$$

Pada persamaan (2.23),  $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z}$  merepresentasikan pengurangan amplitudo gelombang selama penjaralan pada sumbu  $z$  yang nilainya berubah sebanding dengan  $e^{-1}$ . Sehingga penetrasi kedalaman gelombang atau *skin depth* yang diidentifikasi sebagai  $\delta$  dapat dituliskan menjadi:

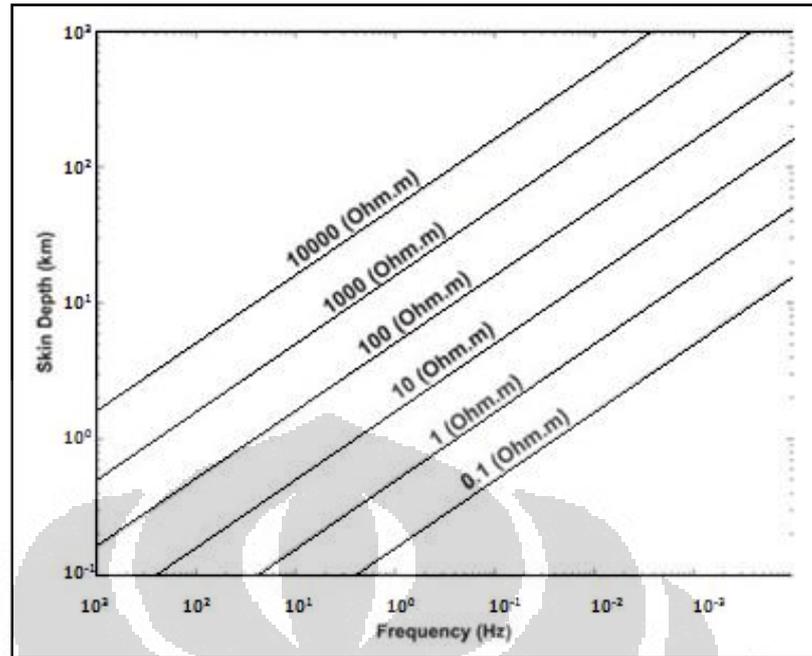
$$e^{i\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}\delta} = e^{-1}, \quad (2.24)$$

Dan formulasi *skin depth* dapat dirumuskan menjadi:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \quad (2.25)$$

Atau dapat juga ditulis:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m), \quad (2.26)$$



Gambar 2.9. Grafik fungsi kedalaman berdasarkan frekuensi (Xiao, 2004)

## 2.2 Pemodelan MT

Distribusi resistivitas medium yang dilalui oleh gelombang EM yang kemudian responnya ditangkap oleh alat MT dapat dimodelkan dalam beberapa dimensi misalnya saja 1-Dimensi, 2-Dimensi, maupun 3-Dimensi. Pada kasus ini hanya akan dibahas pemodelan 1-Dimensi dan 2-Dimensi saja.

### 2.2.1 Pemodelan 1-Dimensi

Pada kasus 1-Dimensi, distribusi resistivitas medium hanya bergantung pada kedalaman saja. Distribusi resistivitas tersebut diperoleh dari perbandingan medan listrik dan medan magnet yang menjalar secara tegak lurus dibawah permukaan bumi pada arah osilasi yang konstan (Xiao, 2004). Gelombang tersebut akan teratenuasi seiring bertambahnya kedalaman yang juga dipengaruhi oleh frekuensi gelombang dan nilai resistivitas medium yang dilaluinya.

Medan listrik dan medan magnet di permukaan dapat ditulis juga sebagai berikut:

$$\vec{E}_x = \vec{E}_0 e^{-kz} e^{-i\omega t}, \quad (2.27)$$

$$\vec{H}_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} \vec{E}_0 e^{-kz} e^{-i\omega t}, \quad (2.28)$$

Dan untuk mengetahui informasi struktur resistivitas bumi dari tempat pengukuran yang berada dipermukaan ( $z=0$ ), maka perbandingan antara medan listrik dan medan magnet secara tegak lurus dapat diketahui nilai impedansinya yaitu:

$$\vec{Z} = \frac{\vec{E}}{\vec{H}}, \quad (2.29)$$

Dari persamaan (2.27) dan (2.28) impedansi  $Z_{xy}$  adalah:

$$\vec{Z}_{xy} = \frac{\vec{E}_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu_0 \rho}, \quad (2.30)$$

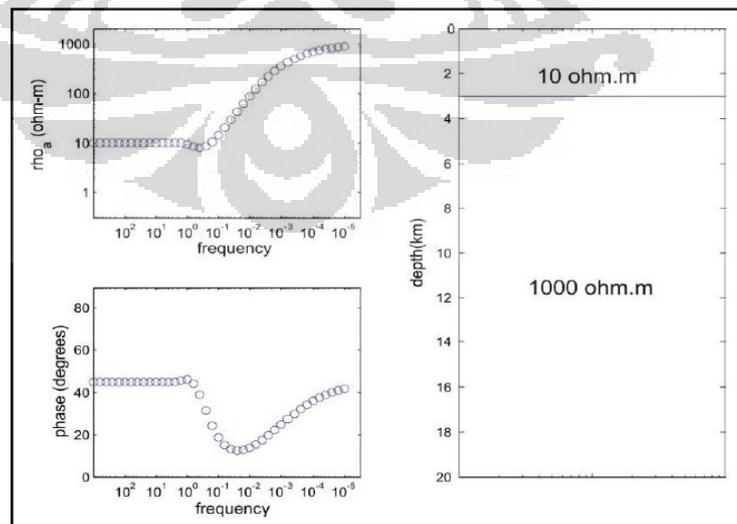
Sehingga nilai resistivitas semu (*apparent resistivity*) dari hasil tersebut dapat diformulasikan menjadi:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{\vec{E}_x}{H_y} \right|^2, \quad (2.31)$$

Dan fase dari gelombang tersebut juga dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\varphi_{xy} = \arg(Z_{xy}), \quad (2.32)$$

Besarnya nilai fase yang diperoleh adalah merupakan besarnya nilai sudut fase antara medan listrik ( $\vec{E}_x$ ) dan medan magnet ( $\vec{H}_y$ ).



Gambar 2.10. Pemodelan 1-Dimensi dari besar nilai resistivitas semu dan fase dari data MT (Xiao, 2004)

Pada Gambar 2.10 terdapat suatu model struktur yang pada kedalaman 0 – 3 km memiliki nilai resistivitas sebesar 10 ohm.m dan pada kedalaman 3 – 20 km memiliki resistivitas sebesar 1000 ohm.m. Dari hasil kurva MT diketahui pada frekuensi awal ( $10^3 - 10^0$  Hz) memiliki nilai resistivitas semu sebesar 10 ohm.m atau merupakan nilai resistivitas sebenarnya, pada frekuensi yang lebih rendah lagi terlihat bahwa nilai resistivitas semu yang diperoleh meningkat terhadap frekuensi, yang menunjukkan bahwa pada kedalaman yang lebih dalam dibanding nilai resistivitas sebelumnya terdapat suatu medium yang memiliki nilai resistivitas lebih tinggi dibanding sebelumnya. Nilai resistivitas semu tersebut mendekati stabil ketika frekuensi telah menunjukkan pada frekuensi yang sangat rendah yang menunjukkan nilai resistivitas sebenarnya.

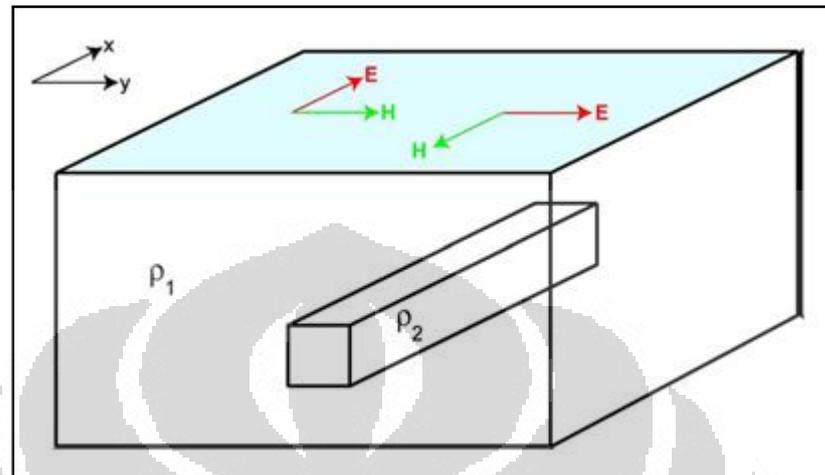
Demikian juga pada kurva fase, pada frekuensi awal fase gelombang diketahui sebesar  $45^0$ , dan ketika penetrasi gelombang sudah mencapai batas medium yang memiliki nilai resistivitas lebih tinggi, fase gelombang tersebut mengalami penurunan hingga mendekati  $10^0$ , dan makin lama meningkat kembali dan mulai kembali stabil pada sudut  $45^0$  pada frekuensi yang sangat rendah atau ketika penetrasi gelombang sangat tinggi. Hal tersebut membuktikan bahwa fase gelombang tersebut saling tegak lurus antara gelombang magnetik dan gelombang listrik ketika berada pada satu medium yang homogen, dan ketika medium tersebut melewati medium yang lebih tinggi nilai resistivitasnya dibanding medium sebelumnya maka fase gelombang tersebut akan menurun, begitu juga sebaliknya ketika melewati medium yang lebih rendah nilai resistivitasnya dari medium sebelumnya, maka fase gelombangnya menjadi lebih tinggi dari  $45^0$  (Xiao, 2004).

### 2.2.2 Pemodelan 2-Dimensi

Pada struktur bumi yang anisotropik, nilai resistivitas semu pada kasus 2-dimensi akan berbeda nilainya dibanding dengan nilai resistivitas semu yang berasal dari komponen medan magnetik dan medan listrik dalam arah yang berbeda. Pada kasus 1-dimensi hal ini dapat mengakibatkan hasil yang diperoleh menjadi tidak tepat (Unsworth, 2008).

Pada pemodelan 2-dimensi seperti yang dilukiskan pada Gambar 2.11, di mana digambarkan bahwa kondisi geologi dengan suatu model yang di dalamnya

terdapat 2 nilai resistivitas yang berbeda ( $\rho_1$  dan  $\rho_2$ ), yang mana arah dari struktur utama tersebut sejajar dengan bidang arah  $x$ , yang berarti variasi nilai resistivitasnya hanya pada bidang sumbu  $y$  dan  $z$ .



Gambar 2.11. Model 2-dimensi dengan nilai resistivitas berbeda (Unsworth, 2008).

Dengan menggunakan persamaan Maxwell seperti pada persamaan (2.6) dan (2.7), dapat diseparasi pada tiap-tiap komponen  $x, y,$  dan  $z$ -nya, namun karena pada pemodelan 2-dimensi ini di mana variasi resistivitasnya hanya berada pada komponen  $y$  dan  $z$  saja, maka separasi persamaan tersebut dapat ditulis menjadi:

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu \sigma \vec{E}_x \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial x} = \mu \sigma \vec{E}_y \quad (2.34)$$

$$-\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu \sigma \vec{E}_z \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_x \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_y \quad (2.37)$$

$$-\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -i\omega \vec{B}_z \quad (2.38)$$

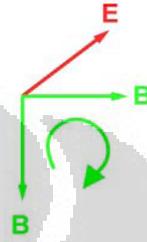
### 2.2.2.1 Transvers Electric Mode

Pada komponen yang menunjukkan medan listriknya sejajar dengan arah struktur utama dinamakan *Transver Electric* (TE) mode atau juga disebut *E-Polarization* (Unsworth, 2008). Pada TE mode komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu  $y$  dan  $z$  hanya komponen magnetik saja.

$$\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu \sigma \vec{E}_x$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_y$$

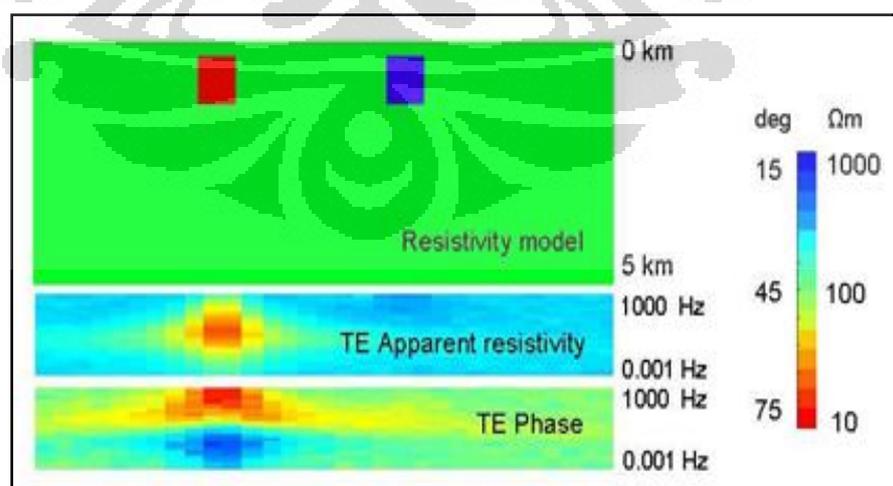
$$-\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -i\omega \vec{B}_z$$



Sehingga komponen medan listrik dapat ditulis:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x(y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}_x(y,z)}{\partial z^2} = i\omega \mu \sigma \vec{E}_x(y,z) \quad (2.39)$$

Dalam TE mode, arus listrik tidak akan mengalir melewati batas antara daerah yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, oleh karena itu komponen  $E_x$  akan kontinu terhadap bidang sumbu  $y$ , demikian juga dengan  $\rho_{xy}$  yang akan kontinu terhadap bidang sumbu  $y$ . Karena itulah TE mode sangat baik jika masih menggunakan analisa 1-dimensi.



Gambar 2.12. *Pseudosection* dengan menggunakan TE mode (Unsworth, 2008).

Seperti pada pseudosection atau kontur resistivitas vertikal yang ada pada Gambar 2.11, terlihat bahwa arus listrik hanya akan menginduksi bagian yang lebih konduktif saja, dan tidak pada bagian yang lebih resistif, hal tersebut karena adanya efek konduktif dari arus yang muncul.

Pada Gambar 2.11 juga terlihat bahwa bagian yang memiliki resistivitas 10 ohm.m menghasilkan nilai resistivitas semu yang rendah dengan respon maksimal pada frekuensi 10 Hz. Sedangkan pada bagian yang memiliki resistivitas 1000 ohm.m hampir tidak terlihat adanya perbedaan resistivitas yang kontras.

Respon resistivitas semu dari bagian yang konduktif (10 ohm.m) akan menghilang ketika frekuensi gelombang telah mencapai pada frekuensi yang sangat rendah (0.001 Hz), hal tersebut terjadi karena induksi yang terjadi sensitif terhadap nilai dari perubahan medan magnet.

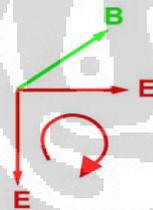
#### 2.2.2.2 *Transvers Magnetic Mode*

Pada komponen yang menunjukkan medan magnet yang sejajar dengan arah struktur utama dinamakan *Transverse Magnetic* (TM) mode atau disebut juga *B-Polarization* (Unsworth, 2008). Pada TM mode komponen yang menunjukkan pada arah bidang sumbu  $y$  dan  $z$  adalah hanya komponen medan listrik saja.

$$\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial x} = \mu\sigma \vec{E}_y$$

$$-\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu\sigma \vec{E}_z$$

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -i\omega \vec{B}_x$$

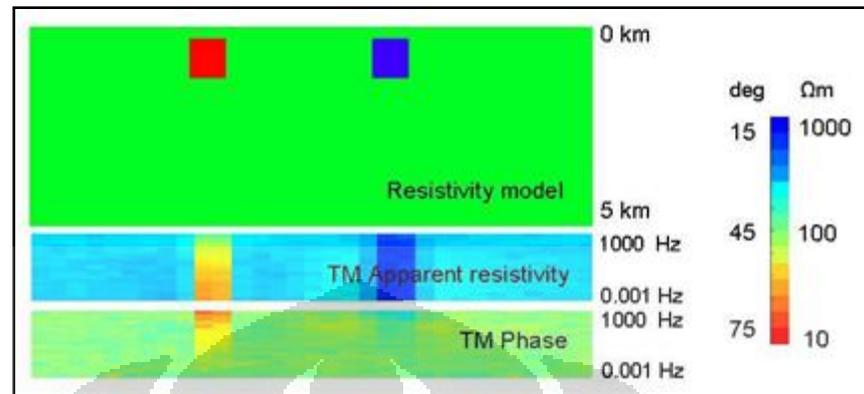


Sehingga komponen medan magnetik dapat ditulis:

$$\frac{\partial^2 \vec{B}_x(y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{B}_x(y,z)}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma \vec{B}_x(y,z) \quad (2.40)$$

Pada TM mode, arus listrik akan melewati batas antara bagian yang memiliki perbedaan resistivitas. Dalam TM mode ini, terjadi fenomena efek konduktif yang terjadi juga pada TE mode, namun apa mode ini terjadi juga efek lain yaitu efek statik yang disebabkan adanya heterogenitas resistivitas medium, sehingga muatan-muatan terkumpul pada batas medium tersebut. Adanya efek

statik tersebut menyebabkan nilai resistivitas semu pada frekuensi rendah tetap terlihat.

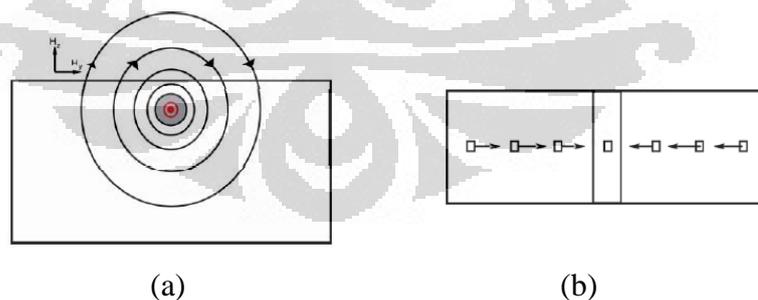


Gambar 2.13. *Pseudosection* dengan menggunakan TM mode (Unsworth, 2008).

Seperti pada Gambar 2.13, nilai  $E_y$  tidak akan kontinu terhadap bidang sumbu  $y$ , demikian juga pada nilai resistivitas semu  $\rho_{yx}$  yang tidak kontinu pada batas resistivitas. Oleh karena itu, TM mode baik digunakan untuk menganalisa daerah yang memiliki batas resistivitas yang jelas (Unsworth, 2008).

### 2.2.2.3 Tipper (Medan magnetik vertikal)

Arus listrik yang ada pada TE mode menyebabkan timbulnya medan magnetik vertikal. Dengan contoh kasus di mana terdapat suatu bagian yang konduktif seperti pada Gambar (2-14(a)) yang posisi bagian konduktif tersebut sejajar dengan arah bidang  $x$ .



Gambar 2.14. Penampang vertikal (a) dan arah vektor induksi (b) dari medan magnetik vertikal (Unsworth, 2008).

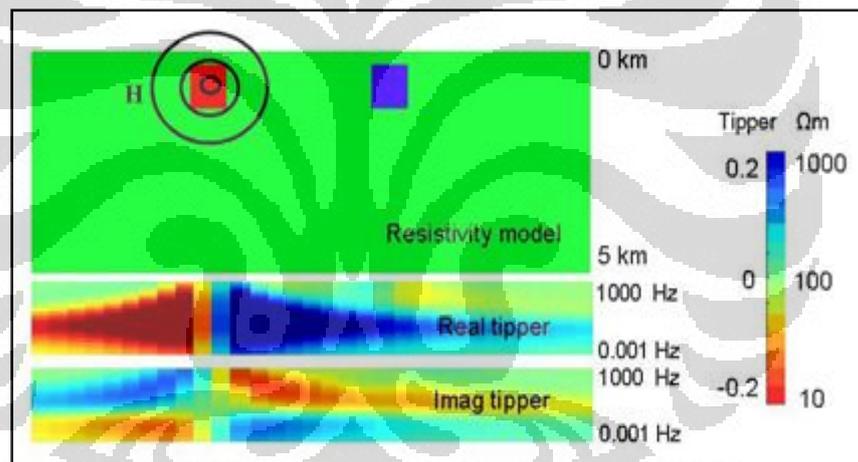
Arus akan menginduksi pada bidang tersebut, sehingga menyebabkan timbulnya medan magnetik yang arah vektornya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 (b). Adanya fenomena tersebut dapat digunakan untuk

menggambarkan struktur resistivitas bawah permukaan dengan menghitung arah vektor induksi dengan persamaan:

$$\vec{I}_y = \frac{\vec{H}_z}{\vec{H}_y} \quad (2.36)$$

$$\vec{I}_x = \frac{\vec{H}_z}{\vec{H}_x} \quad (2.37)$$

Pada Gambar 2.15 menunjukkan pseudosection dengan menggunakan tipper terlihat terjadi pembalikan arah vektor pada bagian yang konduktif, hal tersebut ekuivalen dengan adanya pembalikan arah vektor induksi. Pada tipper bagian yang resistif tidak akan terlihat perbedaannya dengan metode ini, hal tersebut karena tipper memanfaatkan arus yang menginduksi pada bidang yang relatif konduktif.



Gambar 2.15. *Pseudosection* dengan menggunakan tipper (Unsworth, 2008).

## 2.3 Pergeseran Statik

Setiap titik pengukuran MT akan dihasilkan nilai resistivitas semu, kurva resistivitas semu tersebut akan mengalami pergeseran statik karena perbedaan antara besarnya nilai resistivitas semu rata-rata di area pengukuran dengan nilai resistivitas semu di suatu titik tertentu.

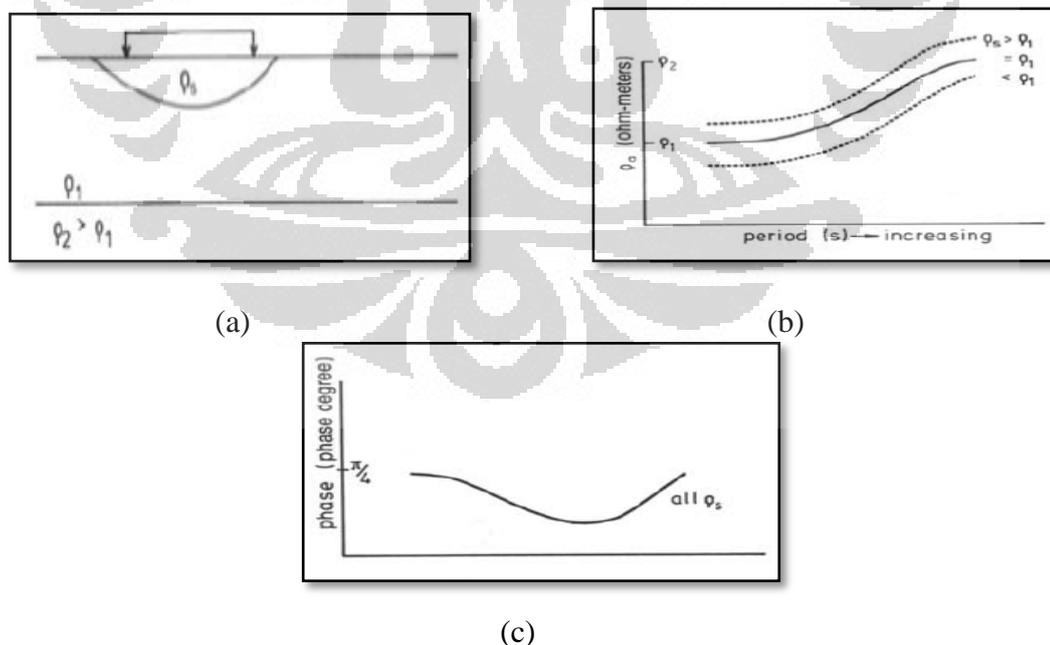
### 2.3.1 Efek Statik

Heterogenitas sifat resistivitas batuan pada lingkungan yang relatif dangkal dan faktor topografi dapat menimbulkan distorsi pada data magnetotellurik.

Adanya akumulasi muatan listrik pada batas konduktivitas medium menimbulkan medan listrik sekunder yang tidak bergantung pada frekuensi (Hendro dan Grandis, 1996). Hal tersebut menyebabkan kurva resistivitas semu data MT mengalami pergeseran ke atas atau ke bawah terhadap harga resistivitas regional yang sebenarnya.

Interpretasi atau pemodelan terhadap data MT yang mengalami distorsi akan menghasilkan parameter model yang kurang tepat. Pada medium 1-dimensi, pemodelan terhadap kurva sounding resistivitas semu dikalikan suatu konstanta akan menghasilkan lapisan-lapisan dengan nilai resistivitas semu dan ketebalan lapisan yang masing-masing dikalikan dengan konstanta tersebut. Oleh karena itu koreksi kurva sounding terhadap nilai konstanta tersebut sangatlah penting sebelum dilakukan pemodelan.

Pada medium yang di dalamnya terdapat suatu medium yang sedikit bagiannya memiliki perbedaan nilai resistivitasnya akan menyebabkan efek statik ini (Gambar 2.16). Seperti misalnya pada Gambar 2.16 (b), terlihat bahwa jika  $\rho_s$  dianggap memiliki nilai resistivitas yang sama dengan  $\rho_1$  maka kurva resistivitas semu akan sesuai dengan keadaan yang sebenarnya, seperti yang terlihat pada gambar dengan garis kurva yang dicetak tebal.



Gambar 2.16. Pengaruh heterogenitas terhadap efek statik (Vozoff, 1991)

Dan jika  $\rho_s$  dianggap lebih besar nilai resistivitasnya dibanding  $\rho_1$  maka kurva sounding pada Gambar 2.16 (b) akan bergeser secara vertikal ke atas, dan begitu juga sebaliknya jika  $\rho_s$  memiliki nilai resistivitas yang lebih rendah dibanding dengan  $\rho_1$  maka kurva sounding pada Gambar 2.16 (b) akan mengalami pergeseran secara vertikal ke bawah. Dengan kata lain dapat disimpulkan bahwa adanya heterogenitas resistivitas yang lebih besar atau lebih kecil akan menyebabkan peningkatan atau penurunan nilai resistivitas yang diperoleh dari data MT dari nilai resistivitas yang sebenarnya (Vozoff, 1991).

### **2.3.2 Koreksi Statik**

Untuk mengkoreksi efek statik tersebut ada beberapa hal yang dapat dilakukan, terdapat beberapa metode yang dapat mengurangi atau menghilangkan efek statik pada data MT ini antara lain:

#### **2.3.2.1 Koreksi Statik dengan Metode Perata-rataan**

Untuk mengkoreksi efek statik ini dapat dilakukan perata-rataan atau pemfilteran spasial terhadap sekelompok data, misalnya saja dari suatu lintasan tertentu, dengan asumsi bahwa efek regional yang merepresentasikan kondisi bawah permukaan yang sebenarnya akan muncul setelah itu dilakukan perata-rataan (Hendro dan Grandis, 1996).

Perata-rataan dilakukan dengan menggunakan seluruh data yang ada kemudian dilakukan perata-rataan besaran nilai resistivitas semuanya yang diperoleh dan dianggap besaran rata-rata tersebut merupakan besaran yang sebenarnya, sehingga seluruh kurva data di statik hingga sesuai dengan nilai rata-rata yang telah diperoleh.

#### **2.3.2.2 Koreksi Statik dengan Data *Time Domain Electromagnetic* (TDEM)**

Metode lain yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah efek statik ini adalah dengan mengkonversi data dari metode *Time Domain Electromagnetic* (TDEM), metode geofisika yang melibatkan pengukuran medan magnet sekunder dari akibat induksi medan magnet primer yang diberikan, sehingga data dari metode TDEM ini relatif tidak terpengaruh oleh anomali resistivitas lokal di dekat permukaan (Hendro dan Grandis, 1996). Cara ini didasarkan pada ekuivalensi kedalaman penetrasi gelombang EM yang didefinisikan menjadi:

$$MT : \delta \approx 503\sqrt{\rho T} \quad TDEM : \delta' \approx 36\sqrt{\rho t}$$

Pada penetrasi kedalaman (*skin depth*) yang sama dapat diasumsikan bahwa *delay time* ( $t$ ) akan sama dengan periode ( $T$ ). dari kedua persamaan tersebut maka akan diperoleh faktor konversi berupa pergeseran waktu sehingga pembagian  $t$  dengan 195 akan menghasilkan periode (Hendro dan Grandis, 1996).

Data TDEM 1-dimensi ini kemudian akan dibuat *forward modeling* terhadap kurva MT, sehingga nantinya pada kurva data MT akan disesuaikan dengan kurva *forward modeling* tersebut sehingga masalah mengenai pergeseran secara vertikal tersebut dapat diatasi.

### 2.3.2.3 Koreksi Statik Dengan Data geologi dan Data Geofisika Lain

Data lain yang dapat digunakan untuk membantu koreksi efek statik ini adalah dengan menggunakan data geologi maupun data geofisika lain seperti data magnetik, data seismik, maupun data gravitasi yang diketahui tentang batuan yang berada pada kedalaman yang relatif dangkal, data batuan tersebut di konversi sesuai dengan nilai resistivitas batuanya. Data inilah yang nantinya dimungkinkan untuk membantu menghilangkan efek statik ini (Sternberg et al., 1988).

Namun metode ini memiliki tingkat ketidakpastian yang cukup tinggi, hal tersebut dikarenakan seluruh variabelnya mungkin untuk digunakan, jadi bukan tidak mungkin dua orang yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda untuk mengkoreksi efek statik ini dari data pendukung yang ada.

## 2.4 *Remote reference*

Data yang diperoleh dari pengukuran MT umumnya mengandung noise lokal yang dapat mengganggu dalam pemodelan dan interpretasi hasil, untuk meningkatkan kualitas sinyal yang diharapkan, kita harus dapat memastikan bahwa sinyal kombinasi antara medan magnetik dan medan listrik yang kita dapat adalah kombinasi yang koheren atau yang sesuai (Unsworth, 2008).

Ketika pengukuran MT dilakukan, akan diperoleh nilai medan magnetik dan medan listrik di mana didalam sinyal yang direkam tersebut termasuk di dalamnya sinyal noise yang tidak kita inginkan (Unsworth, 2008).

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{0x} + n_E \quad (2.38)$$

$$\vec{H}_y = \vec{H}_{0y} + n_H \quad (2.39)$$

Dari medan listrik dan magnet di atas maka diketahui pula impedansi dari kedua medan tersebut yaitu:

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{\vec{E}_x \vec{H}_y^*}{\vec{H}_y \vec{H}_y^*} \right) \quad (2.40)$$

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{[\vec{E}_{0x} + n_E][\vec{H}_{0y} + n_H]}{[\vec{H}_{0y} + n_H][\vec{H}_{0y} + n_H]} \right) \quad (2.41)$$

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{[\langle \vec{E}_{0x} \vec{H}_{0y}^* \rangle + \langle \vec{E}_{0x} n_H \rangle + \langle n_E \vec{H}_{0y}^* \rangle + \langle n_E n_H \rangle]}{[\langle \vec{H}_{0y} \vec{H}_{0y}^* \rangle + \langle \vec{H}_{0y} n_H \rangle + \langle n_H \vec{H}_{0y}^* \rangle + \langle n_H n_H \rangle]} \right) \quad (2.42)$$

Dengan asumsi bahwa medan magnetik dan medan listrik itu tidak koheren dengan noise maka:

$$\langle \vec{H}_{0y} n_H \rangle = 0 \quad (2.43)$$

$$\langle \vec{E}_{0x} n_H \rangle = 0 \quad (2.44)$$

Dan kita juga dapat mengasumsi bahwa noise medan magnetik dan noise medan listrik itu tidak koheren maka:

$$\langle n_E n_H \rangle = 0 \quad (2.45)$$

Namun bagaimanapun noise medan magnetik akan koheren dengan medan magnetik itu sendiri sehingga:

$$\langle n_H n_H \rangle \neq 0 \quad (2.46)$$

Dari asumsi-asumsi di atas impedansi yang diperoleh akhirnya menjadi:

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{[\langle \vec{E}_{0x} \vec{H}_{0y}^* \rangle]}{[\langle \vec{H}_{0y} \vec{H}_{0y}^* \rangle + \langle n_H n_H \rangle]} \right) \quad (2.47)$$

Hal ini berarti menunjukkan bahwa efek dari noise dalam medan magnet akan membuat impedansi  $\vec{Z}_{xy}$  menjadi lebih kecil daripada nilai impedansi yang sebenarnya.

Untuk mengatasi masalah tersebut perlu digunakan teknik remote reference yang dilakukan dengan mengukur medan magnet ditempat lain pada waktu yang bersamaan. Dengan teknik ini diharapkan dapat mengukur sinyal magnetik yang sama dengan sinyal magnetik yang diukur di tempat dilakukan pengukuran namun dengan sinyal noise yang berbeda (Unsworth, 2008).

Data MT lokal

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{0x} + n_E$$

$$\vec{H}_y = \vec{H}_{0y} + n_H$$

Sehingga impedansi dapat ditulis

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{\vec{E}_x \overline{RH}_y^*}{\vec{H}_y \overline{RH}_y^*} \right) \quad (2.48)$$

$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{\langle \vec{E}_{0x} + n_E \rangle \langle \overline{RH}_{0y} + n_{RH} \rangle}{\langle \vec{H}_{0y} + n_H \rangle \langle \overline{RH}_{0y} + n_{RH} \rangle} \right) \quad (2.49)$$

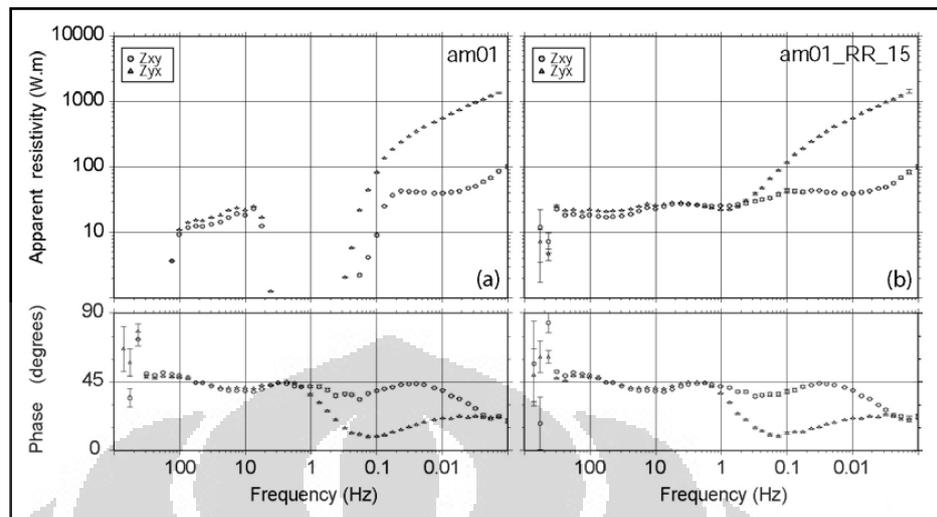
$$\vec{Z}_{xy} = \left( \frac{\langle \vec{E}_{0x} \overline{RH}_{0y}^* \rangle + \langle n_E \overline{RH}_{0y}^* \rangle + \langle \vec{E}_{0x} n_{RH} \rangle + \langle n_E n_{RH} \rangle}{\langle \vec{H}_{0y} \overline{RH}_{0y}^* \rangle + \langle n_H \overline{RH}_{0y}^* \rangle + \langle \vec{H}_{0y} n_{RH} \rangle + \langle n_H n_{RH} \rangle} \right) \quad (2.50)$$

Dengan noise medan magnetik di remote reference dan noise di lokasi pengukuran berbeda lokasi sehingga  $\langle n_H n_{RH} \rangle = 0$  dan noise medan listrik di lokasi adalah tidak koheren dengan noise medan magnetik sehingga  $\langle n_E n_{RH} \rangle = 0$ .

Dari asumsi-asumsi tersebut diperoleh nilai impedansi yang sudah dikoreksi dengan teknik remote reference menjadi:

$$\vec{Z}_{xy}^R = \left( \frac{\vec{E}_{0x} \overline{RH}_{0y}^*}{\vec{H}_{0y} \overline{RH}_{0y}^*} \right) \quad (2.51)$$

Seperti pada Gambar 2.17 (a) di bawah ini yang menunjukkan salah satu data contoh yang diambil disuatu daerah, di mana terjadi noise magnetik yang disebabkan oleh adanya *ground motion* sehingga menyebabkan nilai resistivitas semu yang diperoleh menjadi kurang baik pada frekuensi 10-0.1 Hz. Dan dengan menggunakan remote reference maka masalah tersebut dapat diselesaikan seperti pada Gambar 2.17 (b).



(a)

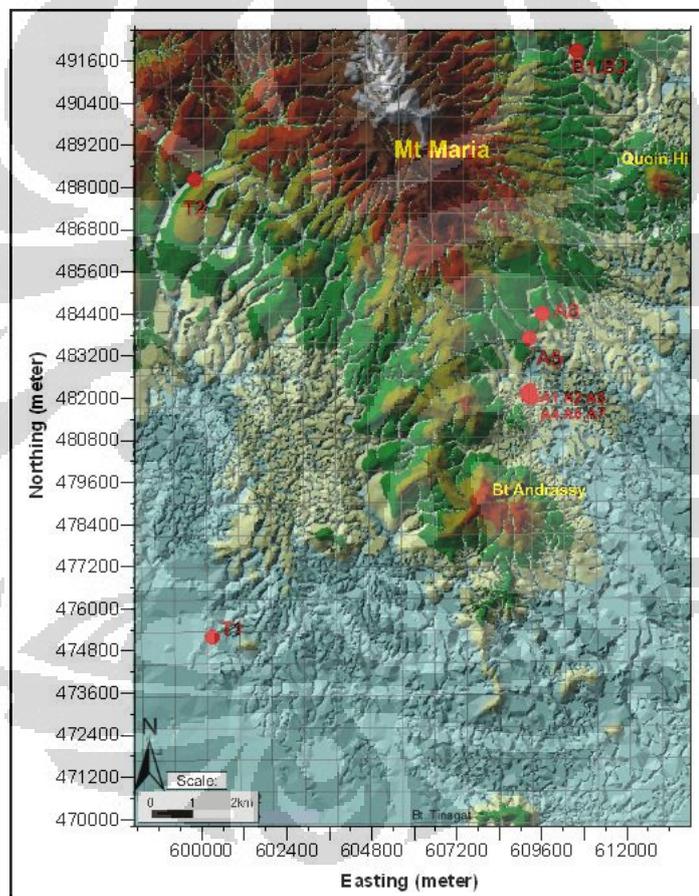
(b)

Gambar 2.17. Contoh data MT. (a) menunjukkan data MT yang tanpa menggunakan remote reference (b) menunjukkan data MT setelah menggunakan remote reference (Unsworth, 2008)

### BAB III

#### TINJAUAN DAERAH PENELITIAN

Pada penelitian ini, daerah yang menjadi objek penelitian adalah daerah Timur laut dari Sabah, yang berada di daerah Tawau, tepatnya di sekitar koordinat 117°53 E – 4°15 N. Di daerah tersebut terdapat gunung api yang sudah tidak aktif yang bernama gunung Maria, dan disekitar daerah tersebut terdapat manifestasi-manifestasi yang menunjukkan adanya kemungkinan terdapatnya suatu sistem geothermal yang dapat dimanfaatkan di bawahnya.

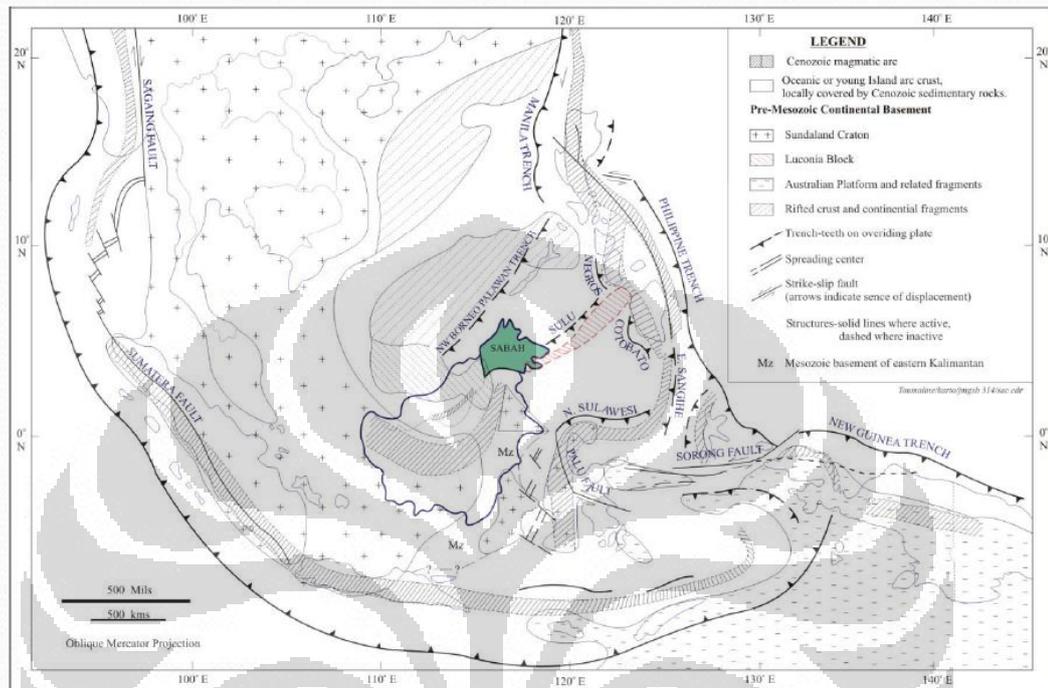


Gambar 3.1. Area penelitian Prospek Geothermal Tawau (Daud, 2008)

#### 3.1 Kondisi Geologi Daerah Penelitian

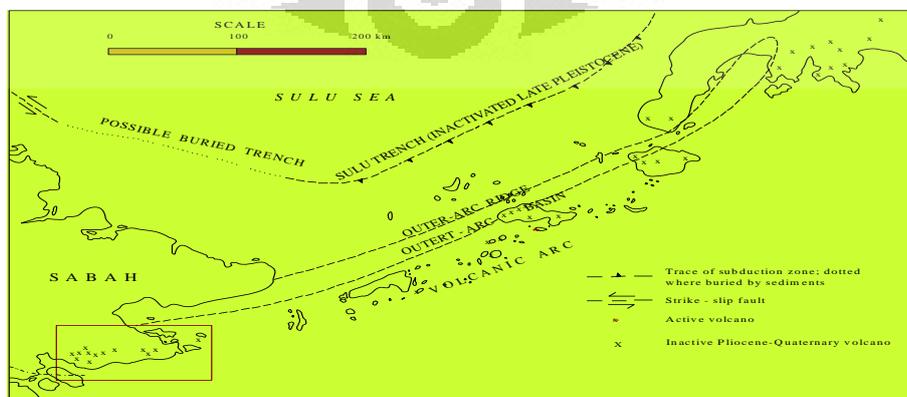
Secara Geologis adanya area prospek ini terjadi karena adanya proses tumbukan di daerah Sulu, sehingga menimbulkan adanya zona subduksi di sepanjang daerah tersebut yang menyebabkan adanya daerah-daerah yang

meninggi di salah satu bagian karena ada proses tumbukan (Gambar 3.2). Pada daerah-daerah tersebut berpotensi terbentuknya gunung-gunung api karena adanya bagian-bagian patahan yang membuat magma dari dalam bumi dapat naik.



Gambar 3.2. Tektonik di daerah Sabah (Daud, 2008)

Dalam zona patahan tersebut terdapat banyak titik-titik gunung api yang masih aktif dan juga gunung api yang tidak aktif yang berumur pliosen ataupun quaternary (Gambar 3.3), magma-magma yang mendingin (gunung api tidak aktif) karena sudah tidak terhubung langsung lagi dengan sumbernya, menimbulkan akan adanya potensi geothermal di bawahnya, bergantung dengan faktor-faktor lain sehingga membantu terbentuknya sistem geothermal di dalamnya.

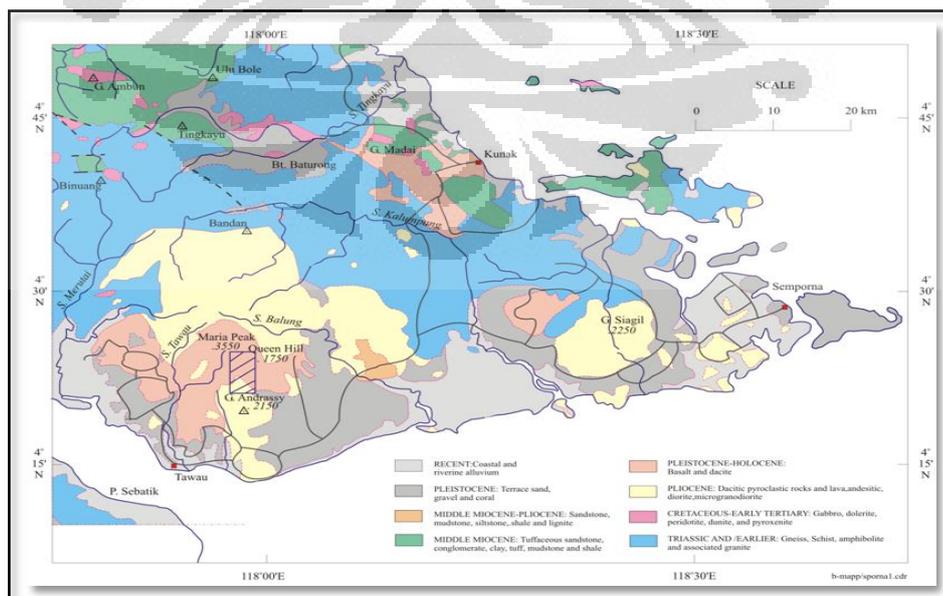


Gambar 3.3. Zona Subduksi di daerah Sulu (Daud, 2008)

Berdasarkan peta geologi (Gambar 3.4) dapat disimpulkan bahwa daerah Sabah, batuan pada bagian yang paling dasar atau *basement-nya* adalah batuan yang umurnya paling tua, yang pada gambar tersebut yang ditandai dengan warna biru yang terdiri dari batuan yang berasosiasi dengan batuan *gneiss*, *schist*, maupun batuan-batuan lain yang ditemukan di beberapa daerah di Sabah yang muncul dipermukaan di mana umur batuan tersebut masuk dalam kurun waktu yang sama yaitu pada masa *Triassic*. Kemudian di atas lapisan *basement* tersebut, terdapat batuan yang terjadi pada masa *Cretaceous* yang diketahui terdiri dari batuan *gabbro*, *dolerite*, dan batuan lainnya yang mana terbentuk pada masa yang sama.

Dan selanjutnya lapisan yang menutupi beberapa bagian lapisan di bawahnya yaitu batuan-batuan yang berumur sekitar pada masa *Pliocene*, yang berupa *lava*, *andesitic*, dan batuan lainnya. Dan di atas lapisan ini ditutupi oleh batuan yang berumur pada masa *Pleistocene-Holocene* atau pada masa *quaternary*, masa di mana umumnya sistem geothermal banyak terbentuk, yaitu pada masa gunung api muda, pada bagian ini batuannya berupa *basalt* dan *dacite* yang membentuknya.

Dan selanjutnya batuan-batuan yang berumur relatif lebih muda yaitu batuan berumur pada masa *Miocene*, *middle Miocene*, *Pleistocene*, dan batuan pada masa kini yang berupa *clay*, *sandstone*, *gravel*, maupun *alluvium*.



Gambar 3.4. Distribusi batuan di daerah Sabah berdasarkan umur terbentuknya (Daud, 2008)

### 3.1.1 Fisiografi dan Morfologi

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, morfologi daerah penelitian relatif memiliki variasi ketinggian yang cukup beragam. Di bagian selatan topografi daerah penelitian tidaklah terlalu curam, yaitu berkisar antara 100-300 m di atas permukaan laut, namun sebagian utara di mana menuju puncak gunung Maria, variasi ketinggian cukup tinggi yaitu berkisar 300-700 m di atas permukaan laut dengan variasi undulasi yang cukup tinggi atau dengan kata lain variasi ketinggian tersebut berupa bukit-bukit yang cukup curam.

Terdapat banyak sungai-sungai baik kecil ataupun besar yang bersumber dari puncak gunung Maria, banyaknya sungai-sungai tersebut menunjukkan banyaknya undulasi-undulasi perbukitan yang ada disana.

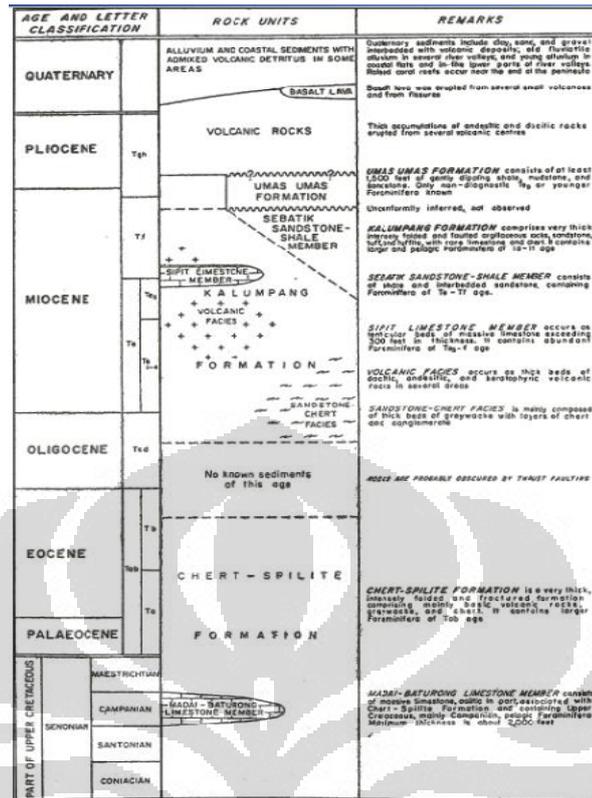
Di daerah penelitian hampir 40% merupakan perkebunan Sawit yang dikelola oleh pemerintah maupun swasta, dan selebihnya berupa hutan lindung yang mana flora dan faunanya dilindungi oleh pemerintah.

### 3.1.2 Stratigrafi

Studi mengenai stratigrafi di daerah Tawau, Sabah telah dilakukan oleh Kirk (1962). Dari hasil studi tersebut diketahui beberapa kondisi geologi dari data stratigrafinya yang dapat membantu untuk menginterpretasi dari data yang diperoleh.

Batuan-batuan dari masa *Cretaceous* hingga masa kini yang ada pada daerah Tawau ini cukup beragam. Batuan yang berumur paling tua pada masa *Cretaceous-Eocene* merupakan formasi *Chert-Spilite* yang terdiri dari *chert*, *grey-wacke*, *conglomerate*, dan *basaltic volcanic rock*. Pada formasi ini pernah mengalami patahan yang cukup besar karena tektonik yang disebabkan pergerakan kerak bumi.

Di atas formasi tersebut, terdapat formasi Kalumpang yang dominan terdiri dari sedimen dan batuan *tuffitic*. Terdapat hubungan antar kedua formasi ini, yaitu formasi ini dipisahkan oleh suatu kejadian patahan yang cukup besar sehingga menyebabkan batas *unconformity* diantara keduanya.



Gambar 3.5. Stratigrafi daerah Tawau-Sabah (Kirk, 1962)

Pada formasi Kalumpang terjadi lagi *unconformity* yang terjadi akibat patahan, di atas formasi tersebut terdapat formasi Umas dengan ketebalan sekitar 500 m yang lalu terjadi perubahan formasi lagi, formasi Umas ini terjadi karena adanya sungai Umas yang mengalir di atasnya sehingga terjadi pengendapan sehingga terbentuknya formasi ini. Namun karena terjadinya patahan dan intrusi dari batuan vulkanik formasi tersebut tidak berlangsung cukup lama.

Dari intrusi tersebut terbentuklah batuan vulkanik pada masa akhir Tersier dan Quarter yang menutupi formasi sedimen di bawahnya. Adanya erupsi ini dipermukaan, menyebabkan tertutupnya akses sungai-sungai di permukaan untuk mengalir sehingga menyebabkan terjadinya pengendapan alluvium dalam area yang cukup luas.

### 3.2 Kondisi Geokimia

Terdapat beberapa manifestasi air panas di area prospek geothermal Tawau, dari manifestasi-manifestasi tersebut dapat di analisa mengenai kandungan kimia yang terkandung di dalamnya sehingga dapat diperkirakan asal

dari air panas pada manifestasi tersebut, temperatur reservoirnya, maupun hidrogeologinya.

Untuk itulah dilakukan survey geokimia, pada penelitian ini data geokimia yang digunakan merupakan data yang diambil oleh salah satu peneliti, yang sudah lama mengamati kondisi geokimia yang ada di area prospek ini.

Tabel 3-1. Kandungan kimia dari manifestasi mata air panas Tawau-Sabah (Daud, 2008)

ID	T (°C)	pH at 25°C	F	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
B1	55.1	6.1	0.66	39.25	8.3	16.4	445.2	10	1254	89.06	37
B2	55.6	6.0	0.72	30.00	9.6	17.5	447.1	8	1302	78.08	32
T1	50.3	6.9	1.3	282.7	23.5	28.3	89.8	350	330	444.08	71
T2	-	3.9	0.31	20	5	18.9	196.5	32.7	217	4.9	-

Di daerah Apas kiri, terdapat sekitar 5 lokasi manifestasi air panas yang dinamakan A1, A2, A3, A4, dan A5. Dan di daerah Balung terdapat 2 lokasi mata air panas yang dinamakan B1 dan B2. Juga di daerah Tawau, di mana terdapat 2 manifestasi yang dinamakan T1 dan T2.

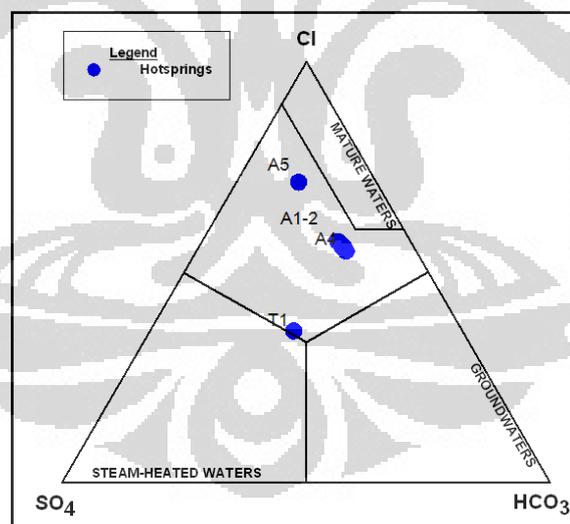


Diagram 3-1. Jenis fluida pada manifestasi permukaan berdasarkan kandungan kimianya (Daud, 2008)

Dari kandungan kimianya diperoleh data bahwa manifestasi air panas A1, A2, A3, A4 dan A5 merupakan manifestasi air panas tipe *chloride*, dan A5 merupakan manifestasi tipe *mud pool* dengan kandungan *chloride* yang cukup tinggi. Dan pada diagram di atas juga dapat dilihat bahwa manifestasi T1

merupakan manifestasi air panas yang memiliki tipe kandungan *chloride* dan *steam-heated* yang seimbang.

Pada manifestasi T2 juga ditemukan manifestasi air panas tipe *steam-heated* dengan kandungan pH yang sangat rendah, di mana banyak kandungan sulfur dilingkungkannya. Namun pada manifestasi tersebut sudah tercampur dengan air di sekitar lingkungannya yang kebetulan bersebelahan dengan sungai yang mengalir di dekatnya, sehingga untuk mengukur besar temperatur sebenarnya dari manifestasi tersebut cukup sulit.

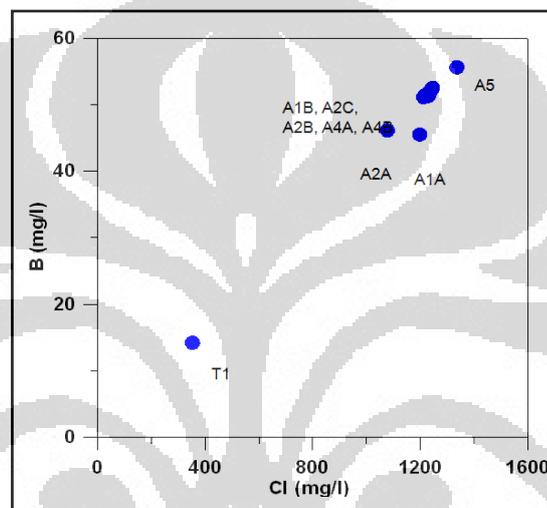


Diagram 3.2 Kandungan Cl dan B dalam manifestasi permukaan (Daud, 2008).

Pada manifestasi fluida permukaan yang muncul, diketahui bahwa kandungan zat Cl dan B yang cukup tinggi terutama pada manifestasi A1, A2, A3, A4, maupun A5. Namun pada manifestasi T1 tercatat memiliki kandungan Cl dan B yang relatif lebih rendah dibanding yang lain yaitu sekitar 380 mg/l Cl dan 17 mg/l.

Pada tabel 3-1 dapat di lihat bahwa pada manifestasi B1 dan B2 terdapat hal menarik, dari data tersebut menunjukkan bahwa kandungan  $SO_4$  yang ada di manifestasi tersebut sangat tinggi, jauh lebih tinggi dibanding pada manifestasi T2. Manifestasi tersebut dapat digolongkan menjadi manifestasi mata air panas tipe *steam-heated*.



Gambar 3.6. Manifestasi permukaan daerah penelitian (a). manifestasi T2 (b). manifestasi A3, A4

### 3.2.1 Temperatur Reservoir

Dari kandungan kimia yang terukur pada manifestasi yang ada diketahui temperatur area prospek geothermal dengan menggunakan geothermometer, yaitu salah satu cara memperkirakan temperatur reservoir pada suatu sistem geothermal dengan menghitung kandungan kimia yang ada di suatu daerah.

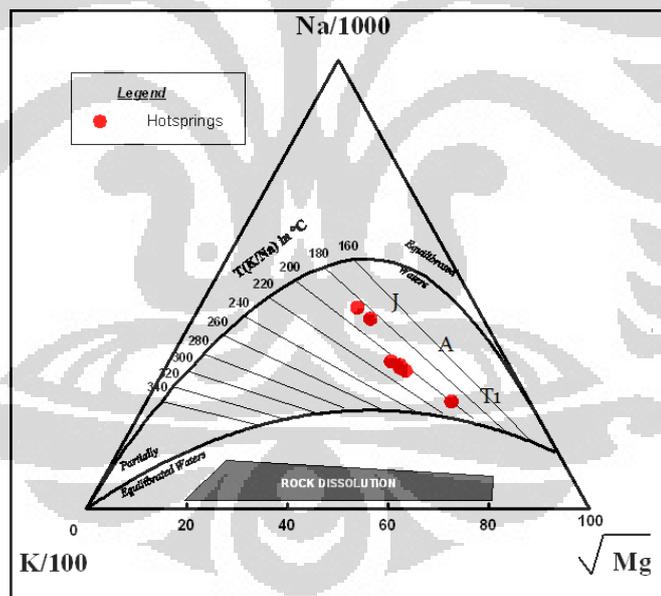


Diagram 3-3. Geothermometer manifestasi berdasarkan kandungan kimia Kalium, Magnesium, dan Natrium (Daud, 2008)

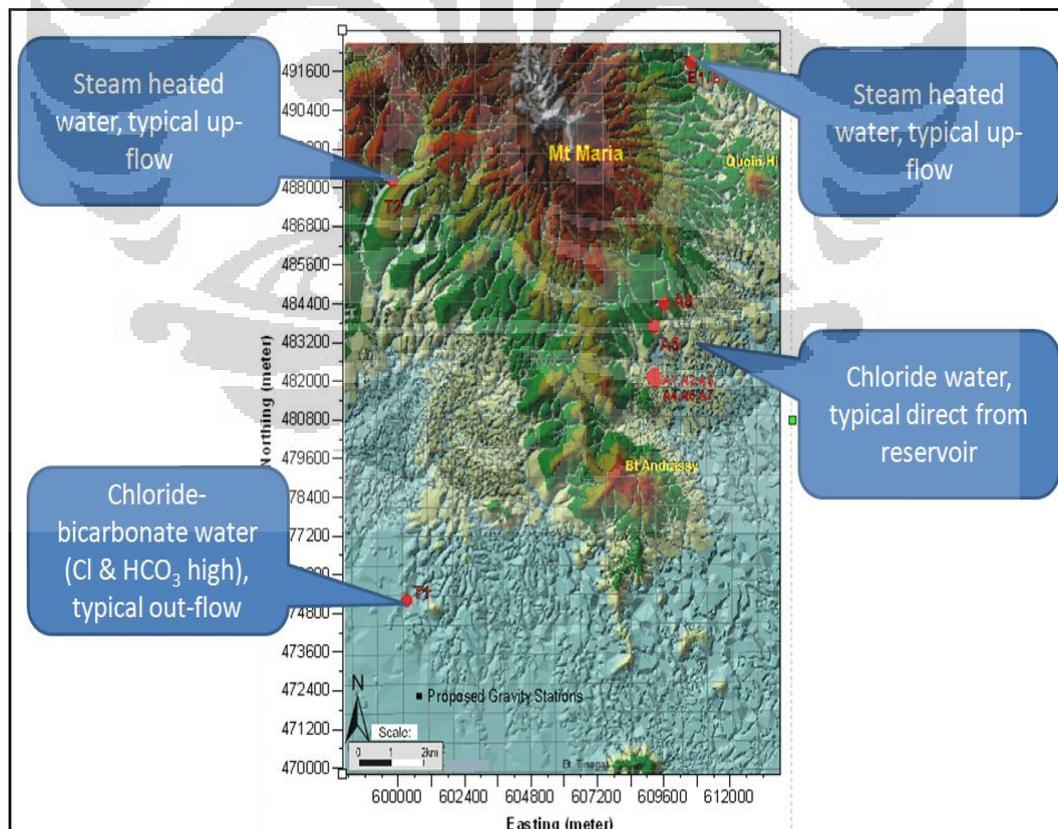
Dari diagram 3-3 dapat diketahui bahwa hasil dari geothermometer area prospek geothermal Tawau diperkirakan memiliki temperatur reservoir sekitar 190-236 °C (Daud, 2008), atau dapat disebut juga *moderate to high geothermal system*. Dengan temperatur tersebut, maka daerah prospek dapat dimungkinkan

untuk digunakan sebagai suatu pembangkit listrik yang berarti cukup ekonomis, namun masih perlu di ketahui lagi mengenai luas dari potensi yang ada sehingga nantinya dapat diperkirakan tentang besaran elektik yang mampu dihasilkan.

### 3.2.2 Hidrogeologi

Dari kandungan kimia di atas diketahui bahwa manifestasi A1, A2, A3, dan A4 merupakan manifestasi air panas tipe *chloride* yang menunjukkan bahwa area di mana terdapat manifestasi tersebut berhubungan langsung dengan reservoir, hal tersebut dikarenakan air yang berasal dari reservoir adalah air dengan kandungan Cl yang sangat tinggi.

Pada manifestasi T1 di mana merupakan manifestasi dengan air panas tipe *chloride-bicarbonate* yang dapat menunjukkan bahwa area di mana terdapat manifestasi tersebut merupakan area zona *outflow*, hal tersebut dapat diketahui karena air yang berasal dari reservoir sudah bercampur dengan lingkungan lainnya yang menyebabkan kandungan Cl dari air tersebut berkurang dan bercampur dengan kandungan *bicarbonate*.



Gambar 3.7. Hidrogeologi daerah Tawau-Sabah

Sedangkan pada manifestasi T2 dan B1/B2 merupakan manifestasi air panas dengan tipe *steam-heated* yang dapat menunjukkan bahwa daerah di mana terdapat manifestasi tersebut merupakan daerah zona *out-flow*, yang dapat dilihat dari kandungan sulfur pada manifestasi keduanya cukup tinggi

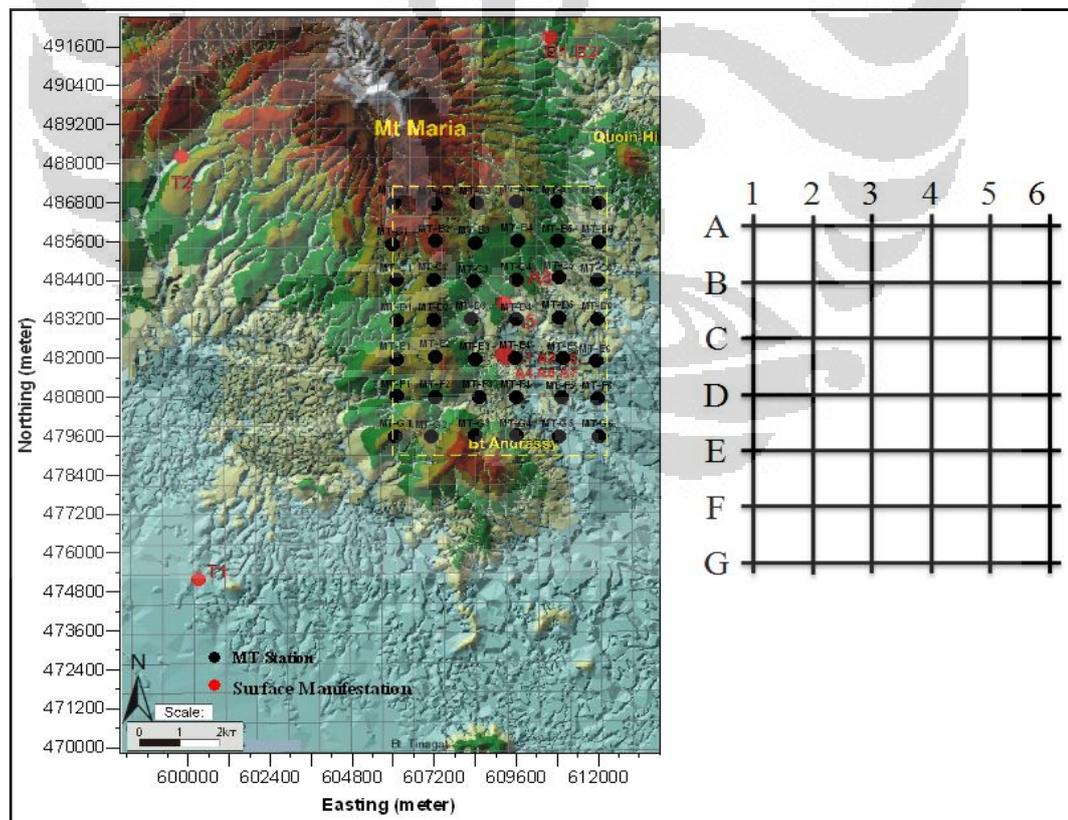


## BAB IV DATA MAGNETOTELLURIK

### 4.1 Desain Pengukuran

Desain pengukuran dibuat agar nantinya hasil dari pengukuran dapat memenuhi tujuan dari dilakukannya pengukuran, yang pada penelitian ini salah satunya mengetahui konseptual model dari sistem geothermal yang ada di area prospek geothermal Tawau.

Dasar dari pembuatan desain pengukuran ini adalah dari penampakan kemungkinan adanya sistem geothermal di area tersebut. Salah satu bukti adanya kemungkinan tersebut adalah adanya kawah atau bekas letusan di sekitar puncak Gunung Maria, adanya kawah tersebut menunjukkan bahwa adanya sumber panas di bawahnya, namun mengenai tepatnya tempat keberadaannya tersebut perlu dibuktikan lagi, salah satunya dengan menggunakan metode magnetotellurik ini.



Gambar 4.1 Desain titik pengukuran MT

Dari bentuk topografi, terlihat ada pola kemenerusan struktur dari kawah gunung Maria ke arah gunung Andrassy, ditambah lagi terdapatnya manifestasi permukaan yang berupa mata air panas tipe klorida (A1, A2, A3, A4, A5) yang dapat menunjukkan bahwa adanya fluida dari reservoir suatu sistem geothermal, karena umumnya mata air panas tipe klorida merupakan ciri fluida yang berasal dari reservoir sistem geothermal.

Adanya manifestasi tipikal *up-flow* di manifestasi T2 dan B1/B2 dimungkinkan berasal dari satu sumber panas yang berasal dari gunung Maria, namun belum tentu merupakan satu kesatuan dari manifestasi di A1-A5 tersebut, untuk itu desain pengukuran yang dibuat seperti pada Gambar 4.1 nantinya diharapkan dapat membuktikan tentang batasan dari reservoir yang berada di daerah Apas tersebut.

Titik pengukuran dibuat sebanyak 42 titik, dengan pola *gridding* yang jarak antar titik sejauh 1.2 km. Titik pengukuran tersebut terbentang 6 titik dari Barat-Timur dan 7 titik Utara-Selatan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dengan pengaturan titik tersebut diharapkan dapat mengetahui pola penyebaran harga resistivitas baik dari arah Barat-Timur maupun Utara-Selatan maupun untuk ditampilkan dalam bentuk 3-Dimensi, sehingga mampu menggambarkan tentang luasan dan batasan serta konseptual model dari sistem geothermal yang ada di area tersebut.

#### **4.2 Instrumentasi MT**

Komponen utama alat MT terdiri dari sensor-sensor yang dapat digunakan untuk mengukur medan listrik dan medan magnet, juga alat MT unit sendiri yang dapat merekam data dan menyimpan data yang diperoleh dari sensor-sensor tersebut. Ditambah dengan adanya GPS yang digunakan untuk sinkronisasi waktu ketika pengukuran dilakukan. Penampilan gambaran tentang satu set alat pengukuran MT dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 1 Set alat pengukuran MT (Phoenix, 2008).

#### 4.2.1 MT Unit

MT unit adalah alat yang dapat mengontrol seluruh proses pengambilan data. Alat yang memiliki dimensi 23.0 cm x 22.5 cm x 11.0 cm dengan berat sekitar 4 kg ini mampu memfilter sinyal-sinyal yang diinginkan dan juga mampu menguatkan sinyal yang diharapkan, serta mampu mengkonversi format data yang awalnya berupa data analog menjadi data digital (ADC).



Gambar 4.3 Alat MT Unit dan GPS (Phoenix, 2008)

Sinyal yang ditangkap oleh sensor magnetik dan sensor elektrik akan disimpan di dalam MT unit pada sebuah kartu memori, sinyal yang akan disimpan menggunakan sampling frekuensi yang berdasarkan teori Nyquist menyatakan bahwa sampling frekuensi yang digunakan paling tidak harus memenuhi dua kali lebih besar dari nilai frekuensi tertinggi agar sinyal tersebut nantinya dapat di evaluasi.

### 4.2.2 Sensor elektrik

Sensor elektrik atau disebut juga *porous pot* memiliki dimensi dengan diameter sekitar 10 cm dan tinggi kurang lebih 20 cm dengan berat mencapai 1.5 kg ini mampu mengukur beda potensial ( $\Delta V$ ) antara 2 porous pot yang dipisahkan dengan jarak sejauh ( $d$ ), sehingga kita dapat mengetahui medan listriknya baik pada komponen  $E_x$  maupun pada komponen  $E_y$ . Besarnya medan listrik tersebut dapat kita ketahui melalui persamaan  $\Delta V = \frac{E_i}{d}$ .



Gambar 4.4 Sensor elektrik MT (Phoenix, 2008)

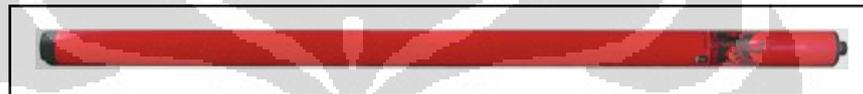
Di dalam porous pot terdapat elektroda, larutan kimia, dan keramik pada bagian bawah dari porous pot tersebut. Elektroda yang digunakan di porous pot umumnya terbuat dari logam yang sesuai dengan larutan kimia yang ada di dalamnya agar tidak terjadi polarisasi sehingga menghindari adanya arus elektrokimia. Terdapat 2 jenis larutan yang biasa digunakan pada porous pot, yaitu larutan KCl atau  $PbCl_2$ . Jika larutan yang digunakan adalah larutan KCl maka material yang digunakan sebagai elektroda terbuat dari logam kalium, begitu juga jika yang digunakan adalah larutan  $PbCl_2$ , maka material elektroda yang digunakan adalah material yang terbuat dari logam timbal.

Agar elektroda dan larutan tersebut memiliki kontak langsung yang baik dengan lingkungan yang ingin diukur medan listriknya, maka bagian bawah dari porous pot tersebut dibuat dari material yang memiliki pori-pori yang sangat kecil, tujuannya larutan kimia yang ada dalam porous pot dapat melewati pori-pori tersebut sehingga dapat kontak dengan lingkungan namun dengan jumlah yang tidak terlalu banyak karena. Biasanya, material yang digunakan pada bagian bawah porous pot adalah material keramik, keramik memiliki pori-pori yang dapat

dilalui oleh larutan tersebut namun dengan jumlah yang sesuai. Dengan kondisi demikian mampu digunakan untuk mengetahui medan listrik pada suatu daerah lingkungan pengukuran dengan kemampuan merespon pada frekuensi DC hingga pada frekuensi 10.000 Hz (Phoenix, 2008).

### 4.2.3 Sensor magnetik

Sensor magnetik yang biasa disebut juga sebagai *coil* ini, memiliki berat kurang lebih sekitar 10 kg dengan panjang sekitar 140 cm dan diameter sekitar 6 cm. Di dalam *coil* terdapat lilitan kabel yang sangat rapat, dengan panjang kabel yang jika dibentangkan mencapai kurang lebih 1 km ini mampu mengukur medan magnetik yang merupakan salah satu komponen dari medan gelombang elektromagnetik pada arah  $B_x$ ,  $B_y$ , maupun  $B_z$ .



Gambar 4.5 Sensor magnetik MT (Phoenix, 2008)

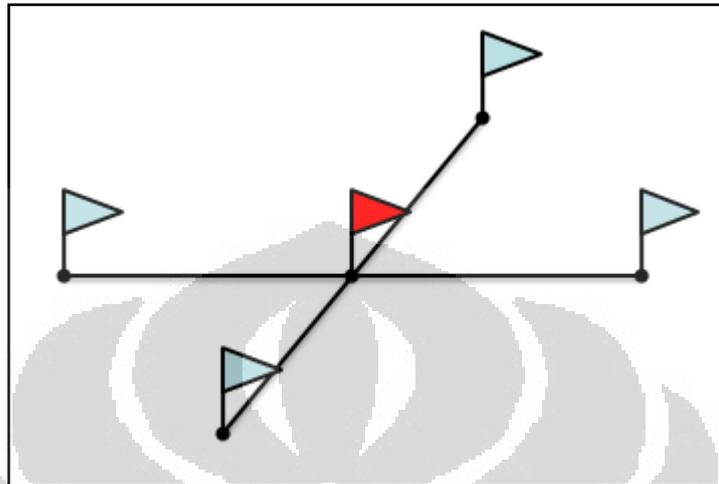
Adanya perbedaan flux magnetik pada suatu lintasan akan menyebabkan adanya ggl induksi, ggl induksi tersebut akan menimbulkan arus induksi yang disebut juga sebagai fenomena induksi magnetik. Besarnya perubahan flux magnetik tersebut akan ditangkap oleh *coil* sehingga terbentuk arus induksi yang kemudian direkam pada alat MT. *Coil* ini dapat menangkap gelombang magnetik yang memiliki frekuensi pada 400 Hz – 0.0002 Hz (Phoenix, 2008).

### 4.3 Akuisisi Data MT

Pengambilan data MT dilakukan dari tanggal 3 Desember 2008 dan berakhir hingga 1 Januari 2009. Namun sebelum pengambilan data di titik pengukuran dilakukan, sebelumnya dilakukan kalibrasi alat terlebih dahulu, baik pada MT unit, maupun sensor-sensor yang digunakan seperti sensor elektrik dan sensor magnetiknya. Hal tersebut dilakukan agar data yang didapat, sesuai dengan kondisi sebenarnya.

Terdapat dua tim dalam pengukuran, yaitu tim MT dan tim Topo. Sebelum tim MT datang ke titik pengukuran, terlebih dahulu tim Topo menuju titik yang akan diukur, untuk memastikan mengenai akses jalan menuju titik pengukuran,

kondisi lapangan, maupun informasi-informasi penting lainnya yang dapat mengganggu pengukuran, misalnya keterdapatannya patahan pada daerah titik pengukuran.



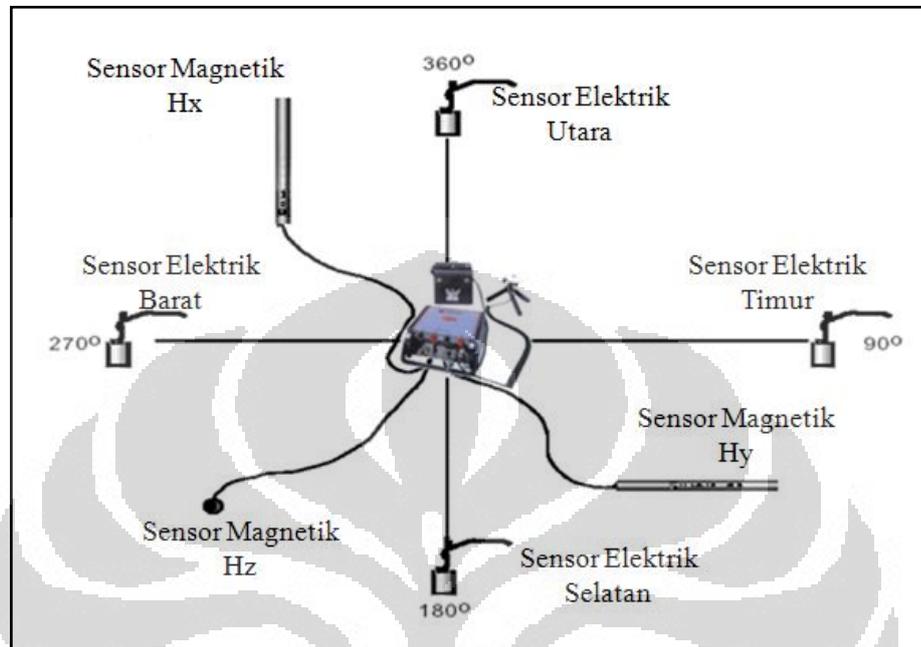
Gambar 4.6 Tanda yang diberikan tim Topo di titik pengukuran

Tim Topo bertugas memberi tanda mengenai akses jalan, dalam pengukuran ini tanda yang diberikan berupa pita-pita berwarna cerah. Hal tersebut dimaksudkan untuk memudahkan tim MT menuju titik pengukuran. Tim Topo juga bertugas memberikan informasi-informasi yang ditemukan di lapangan agar tim MT dapat menyesuaikan dengan adanya informasi tersebut. Selain itu yang paling penting tim Topo bertugas memberikan tanda-tanda, serta arah-arah yang akan digunakan ketika pengukuran MT dilakukan sesuai dengan *layout* pengukuran MT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Di mana bendera dengan warna merah merupakan tanda tempat meletakkan MT unit dan bendera dengan warna biru muda menunjukkan tanda tempat mengubur sensor elektrik.

Jadi tim Topo bertugas menentukan titik pengukuran, tempat di mana MT unit diletakan, serta menentukan titik tempat sensor elektrik ditanam disetiap sudutnya, baik yang dibagian utara, selatan, barat, serta timur. Jarak sensor elektrik yang ditanam dengan MT unit diatur sejauh sekitar 50 m, bergantung dengan kondisi dilapangan. Dengan dilakukannya hal tersebut nantinya dapat sangat membantu tim MT untuk melakukan pengukuran.

Pada umumnya adanya tim Topo membantu tim MT dalam melakukan pengukuran, karena tim akses jalan yang diberikan oleh tim Topo mempercepat

pergerakan tim MT menuju titik pengukuran, serta penentuan konfigurasi pengukuran MT, karena pengukuran MT yang memiliki *layout* seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 *Layout* pengukuran MT

Setelah tim Topo melakukan tugasnya barulah tim MT masuk ke lokasi pengukuran dengan menggunakan bantuan GPS, maupun pita-pita yang sudah dipasang oleh tim Topo sebagai tanda jalan. Setelah tiba di titik pengukuran tim MT selanjutnya menyiapkan segala halnya agar dapat segera dilakukan pengukuran.



(a)

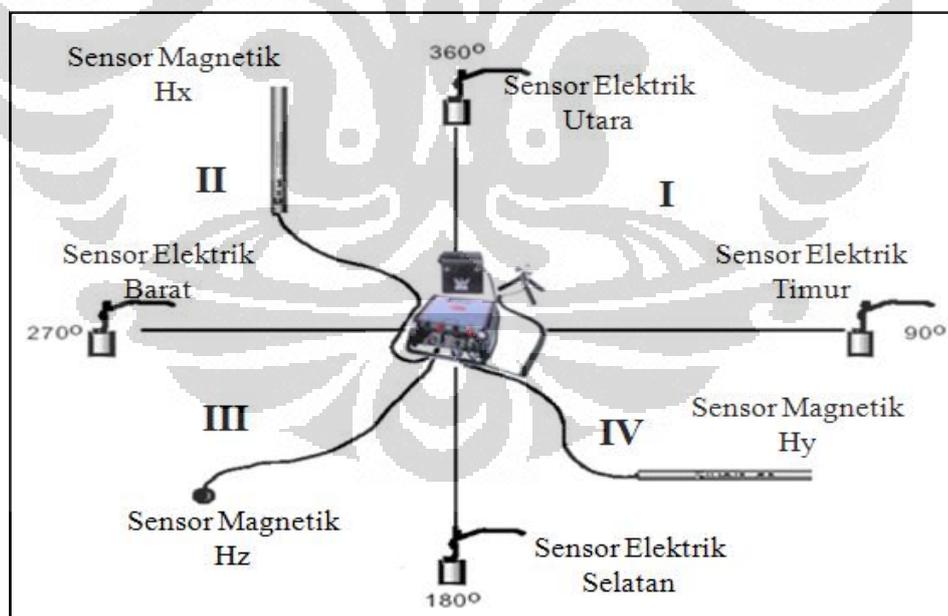


(b)

Gambar 4.8 (a) Lubang tempat sensor elektrik dikubur. (b) Penguburan sensor elektrik MT

Pertama kali yang dilakukan yaitu meletakkan MT unit di titik pengukuran yang sudah ditentukan sebelumnya, lalu mengubur sensor elektrik di bagian utara, selatan, barat, dan timur, pada tempat-tempat yang sudah ditentukan oleh tim Topo, serta sensor elektrik yang dikubur di dekat MT unit yang digunakan sebagai *ground*. Sensor elektrik dikubur di tiap titiknya dengan kedalaman sekitar 50 cm dan diameter sekitar 30 cm. Sensor dikubur (Gambar 4.8 (b)) di dalam lubang yang telah diberikan kurang lebih 250 gr garam dan sekitar 1 liter air yang kemudian diaduk hingga tanah disekitarnya berubah menjadi kental seperti pada Gambar 4.8 (a), hal ini ditujukan agar lingkungan disekitar sensor elektrik lebih konduktif sehingga sensor elektrik yang digunakan tersebut lebih sensitif. Kemudian masing-masing kabel dari tiap-tiap sensor elektrik dihubungkan ke MT unit sesuai dengan letak-letak sensor tersebut.

Setelah sensor-sensor elektrik dikubur di tempatnya masing-masing, selanjutnya adalah menentukan titik kubur dari sensor magnetik. Sensor magnetik dikubur sekitar  $45^{\circ}$  antara dua arah mata angin yang berdekatan. Misalnya  $45^{\circ}$  antara utara dan barat.



Gambar 4.9 Pembagian kuadran tempat dikuburnya sensor magnetik

Terdapat 3 jenis sensor magnetik yang digunakan, yaitu sensor magnetik sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Sensor magnetik sumbu  $x$  di arahkan ke utara-selatan, dengan arah sensor yang tidak terdapat kabel berada di bagian utara. Sensor magnetik

sumbu  $y$  di arahkan ke barat-timur, dengan arah sensor yang tidak terdapat kabel berada dibagian timur. Dan untuk sensor magnetik sumbu  $z$  dikubur secara vertikal, dengan bagian yang terdapat kabel di bagian atas sensor.

Tiap sensor magnetik diusahakan diletakan pada daerah yang relatif datar agar meminimalkan faktor *noise* karena topografi, dan diletakan pada kuadran yang berbeda, maksudnya misalnya seperti pada Gambar 4.9, bagian antara utara dan timur disebut kuadran I, utara dan barat disebut kuadran II, barat dan selatan disebut kuadran III, serta selatan dan timur disebut kuadran IV, maka sensor magnetik diletakan pada kuadran-kuadran yang berbeda-beda, hal tersebut dilakukan untuk menghindari faktor *noise* dari kutub positif dan negatif dari sensor tersebut yang bila saling berdekatan akan terjadi polarisasi sehingga terjadi gangguan pada data yang terekam. Walaupun kondisi di lapangan tidak memungkinkan maka diatur agar faktor polarisasi tersebut dapat diminimalisir.

Sensor magnetik untuk sumbu  $x$  dan  $y$ , dikubur dengan kedalaman sekitar 1 m dan untuk sumbu  $z$  dikubur sesuai dengan panjang dari sensor tersebut yaitu sekitar 1.5 m. namun besarnya kedalaman tempat sensor magnetik dikubur bergantung juga pada kondisi di lapangan.



Gambar 4.10 Penguburan sensor magnetik MT

Penguburan sensor magnetik dilakukan hingga ditemukannya *clay*, hal tersebut dimaksudkan agar tidak terjadi *noise* karena faktor *ground motion* yang

terjadi di permukaan. Dengan mengubur sensor magnetik di bagian lapisan *clay*, diharapkan mampu meredam faktor tersebut.

Setelah semua sensor dikubur, kabel dari sensor magnetik tersebut dihubungkan ke alat MT unit dengan batuan kabel yang memiliki percabangan, yang masing-masing cabangnya telah ditentukan mengenai arah sensor magnetik yang harusnya dihubungkan.



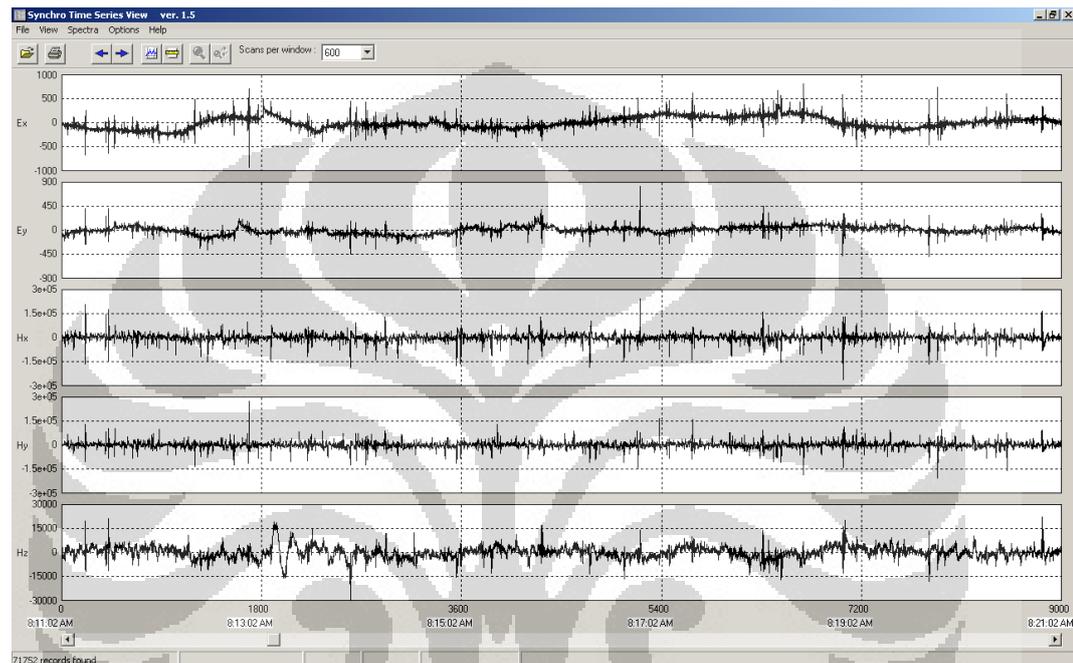
Gambar 4.11 Pemasangan sensor-sensor dan perekaman data MT di MT unit

Setelah semua sensor telah dipasang lalu MT unit dihidupkan hingga tanda perekaman data di MT unit telah menyala. Lalu alat ditinggal titik pengukuran kurang lebih sekitar 18 jam perekaman. Lamanya perekaman bergantung dengan frekuensi gelombang yang ingin kita gunakan, jika menginginkan hingga frekuensi sangat rendah sehingga dapat mencitrakan hingga kedalaman yang besar maka lama pengukuran dapat ditingkatkan.

### 4.3 Kurva Sounding MT

Pada *processing* data MT, nilai resistivitas semu dan fase dilihat berdasarkan fungsi frekuensi yang diperoleh dari data *time series* (Gambar 4.12) tersebut. Untuk menghasilkan data tersebut, data yang masih berupa *time domain* ditransformasi dengan menggunakan transformasi Fourier agar dapat dihitung impedansinya seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Dan dari nilai impedansi tersebutlah maka nantinya akan diperoleh nilai resistivitas semu dan fasenya.

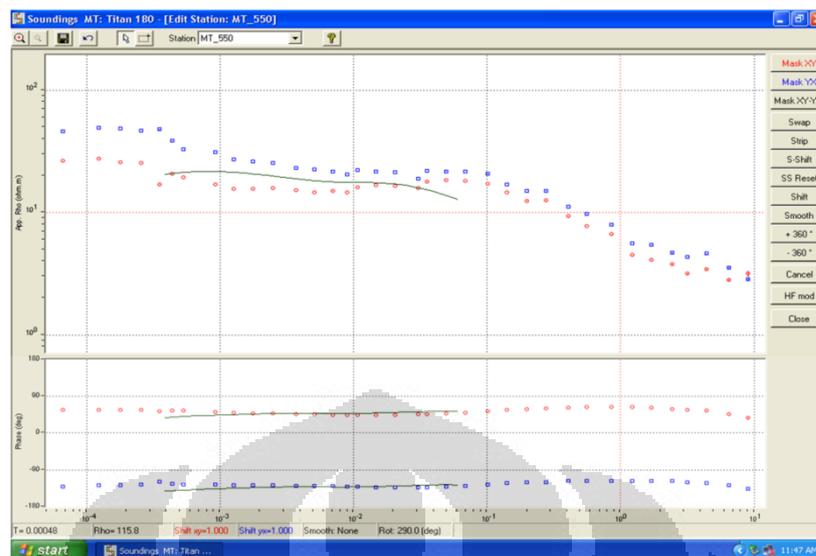
Dengan menggunakan *robust processing* pada software SSMT2000, maka data *time series* dapat diproses untuk menghasilkan nilai resistivitas semu dan fase. Di dalam *robust processing*, data *time series* dibagi menjadi beberapa bagian, yang besarnya bagian telah dipilih sebelumnya sesuai dengan frekuensi yang diharapkan dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Kemudian dari hasil tersebut maka akan diperoleh nilai resistivitas semu pada tiap frekuensi.



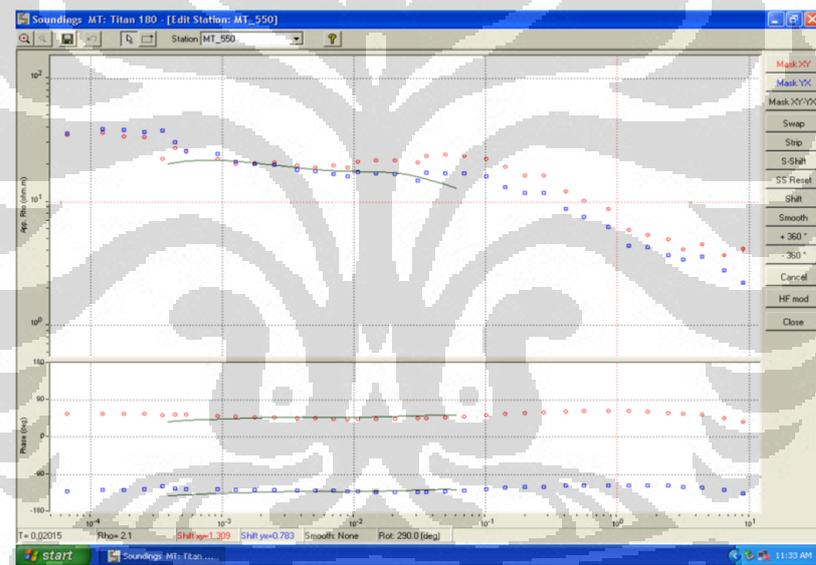
Gambar 4.12 Data *Time Series* pada titik MT-A1

Setelah mengetahui nilai resistivitas semuanya selanjutnya data tersebut dikoreksi terhadap efek statik. Koreksi tersebut dilakukan dengan menggunakan data TDEM yang telah ada dari Sucandra (2009) agar diketahui nilai resistivitas batuan pada kedalaman yang dangkal yang selanjutnya dilakukan *forward modeling* sehingga dapat digunakan untuk mengkoreksi efek statik pada kurva sounding MT.

Gambar 4.13 merupakan gambar salah satu contoh koreksi terhadap efek statik. Gambar 4.13 (a) menunjukkan kurva sounding di mana pada kurva tersebut belum terkoreksi terhadap efek statik, dan pada Gambar 4.13 (b) menunjukkan kurva sounding di mana kurva tersebut telah terkoreksi terhadap efek statik dengan menggunakan data TDEM.



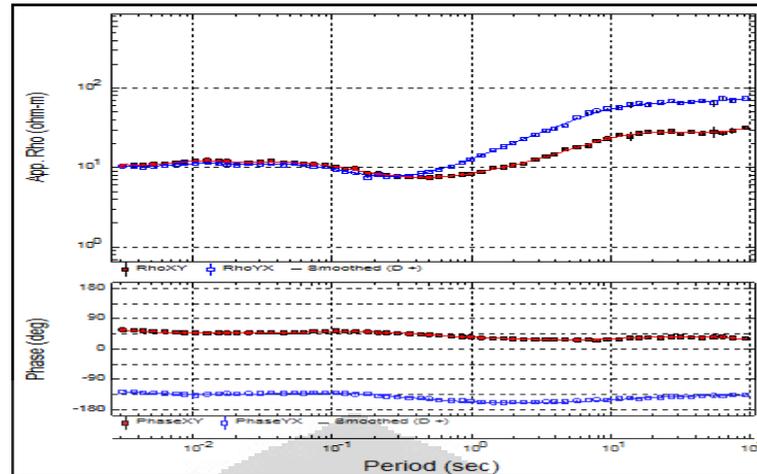
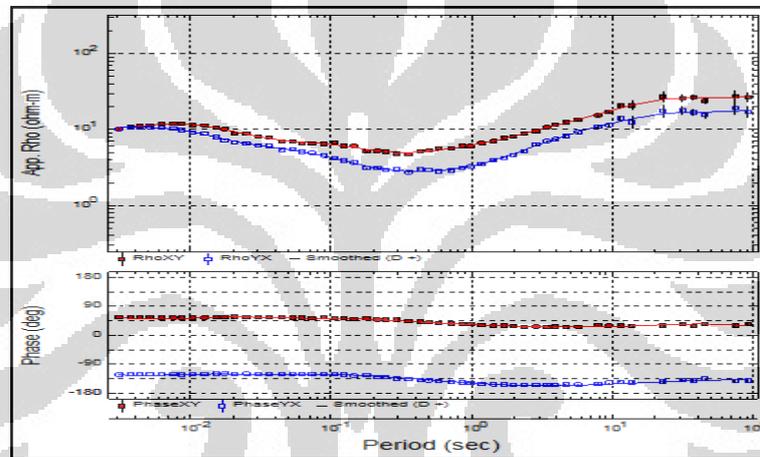
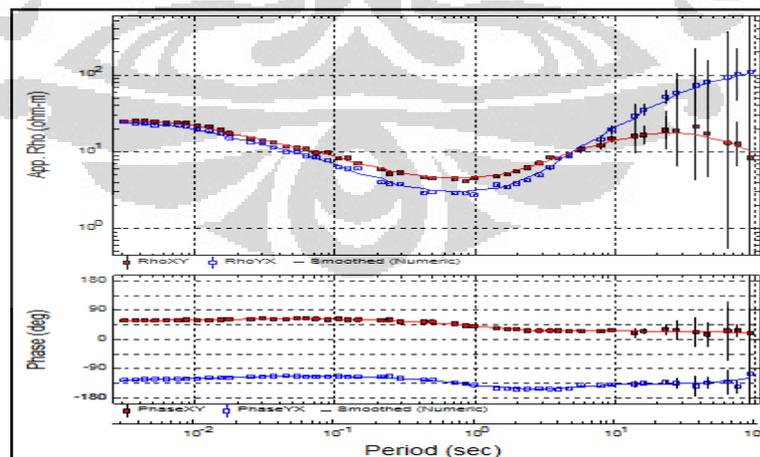
(a)



(b)

Gambar 4.13 Kurva sounding. (a) Sebelum terkoreksi statik (b) Sesudah terkoreksi statik (Daud, 2008)

Seluruh titik MT yang diperoleh dilakukan koreksi terhadap efek statik, Gambar 4.14 merupakan gambar di mana kurva sounding pada titik pengukuran yaitu titik MT-B1, MT-B2, MT-A2 dengan telah dilakukan koreksi statik yang menggunakan data TDEM, dengan katagorisasi kualitas data yang telah dilakukan.

MT-B1 (*Excellent*)MT-B2 (*Very good*)MT-A2 (*Good*)

Gambar 4.14. Kualitas kurva sounding MT

Titik tersebut dikategorikan menjadi beberapa penilaian data, yaitu *excellent*, *very good*, *good*, dan *poor*. Penilaian tersebut didasarkan pada titik-titik data yang diperoleh pada tiap titik pengukuran, dari tiap titik pengukuran data yang memiliki *trend* kurva yang jelas dan memiliki *error bar* yang sangat kecil maka data pada titik tersebut dikategorikan dalam data *excellent* seperti yang diperlihatkan pada data titik MT-G1. Data yang memiliki *trend* kurva yang jelas dengan kandungan *error bar* yang sedikit maka data tersebut dikategorikan dalam data *very good*. Dan data yang memiliki *error bar* yang cukup besar namun *trend* dari kurvanya sendiri cukup jelas maka dikategorikan dalam data *good* seperti yang ditunjukkan pada data titik MT-A1. Sedangkan data yang memiliki *trend* yang tidak jelas dan *error bar* yang besar dikategorikan dalam data *poor*. Gambaran tentang kualitas data yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.14.

Dari seluruh titik kurva sounding MT (Lampiran 1), maka diperoleh kualitas kurva sounding MT seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 yang menunjukkan seluruh titik MT yang diukur berdasarkan kualitas data yang diperoleh.

No.	Kualitas Data	Keterangan	Jumlah
1.	<i>Excellent</i>	MT-A3, MT-A4, MT-A5, MT-A6, MT-B1, MT-B4, MT-B5, MT-B6, MT-C1, MT-C2, MT-C4, MT-D1, MT-D2, MT-D4, MT-D5, MT-D6, MT-E1, MT-E6, MT-F1, MT-F4, MT-F5, MT-F6, MT-G1, MT-G2	24
2.	<i>Very Good</i>	MT-B2, MT-C3, MT-C6, MT-E2, MT-E3, MT-E5, MT-F2, MT-F3, MT-G3	9
3.	<i>Good</i>	MT-A1, MT-A2, MT-B3, MT-C5, MT-D3, MT-E4, MT-G4, MT-G5, MT-G6	9
4.	<i>Poor</i>	-	0

Tabel 4.1 Kualitas data titik-titik pengukuran MT

Dari hasil data sounding yang didapat dapat disimpulkan bahwa pada titik-titik sounding yang dilakukan pada daerah bagian selatan, yaitu bagian line-E, Line-F, dan Line-G diperkirakan memiliki penyebaran nilai resistivitas rendah yang cukup luas terutama pada titik sounding MT-G1 dan MT-F1. Di mana dari kurvanya terlihat baik pada frekuensi tinggi maupun rendah kurvanya cenderung memiliki nilai resistivitas yang cukup rendah, namun ada titik sounding MT-A1, MT-A2, MT-B1, maupun MT-B2 kurva soundingnya terlihat

memiliki nilai resistivitas yang tidak terlalu kecil, dan pada frekuensi menengah turun lagi ke resistivitas rendah baru kemudian nilai resistivitasnya kembali meninggi.

Pada data MT-B3 terdapat perbedaan data sounding yang cukup tinggi, pada data tersebut diperoleh nilai resistivitas yang cukup tinggi pada frekuensi yang relatif tinggi, hal tersebut mungkin pada daerah tersebut terdapat batuan yang memiliki nilai resistivitas tinggi, karena di permukaannya terdapat *out-crop* batuan vulkanik yang cukup besar, atau tingginya nilai tersebut memang karena adanya daerah *hot rock* dan reservoir.

#### 4.5 Inversi 2-Dimensi Data MT

Proses inversi pada data MT telah banyak dibahas oleh Rodi dan Mackie (2001) dengan menggunakan algoritma inversi *non linier conjugate* atau yang disingkat NLCG, algoritma tersebut dapat membuat fungsi sehingga dapat menyelesaikan masalah pembuatan model dengan menggunakan model smooting pada data MT terukur.

Inversi data dapat diumpakan sebagai pencarian suatu model dari hasil data yang telah kita peroleh. Jika saja kita memiliki suatu model yang dapat kita sebut sebagai  $m$  dan  $F$  sebagai suatu fungsi keadaan serta  $d'$  sebagai data yang kemungkinan akan kita dapat sesuai dengan modelnya maka dapat ditulis:

$$d' = Fm \quad (4.1)$$

Persamaan di atas dapat kita gunakan sebagai pencarian respon suatu data jika modelnya sudah kita ketahui atau dapat dikatakan juga dengan *forward modeling*. Namun jika kita ingin mengetahui suatu model ( $F$ ) dari data yang telah kita miliki ( $d$ ) maka diperlukan proses inversi (*inversion modeling*) yang dapat ditulis secara sederhana menjadi:

$$m = dF^{-1} \quad (4.2)$$

Pada *forward modeling* data prediksi ( $d'$ ) yang diperoleh pasti merupakan data yang unik, jadi dengan kata lain dengan model yang digunakan maka data prediksi yang muncul adalah pasti berupa seperti itu, namun tidak demikian pada

kasus model inversi, tidak selalu hasil model yang diperoleh dari data yang dimiliki modelnya unik. Jika saja data yang kita peroleh tak terbatas serta akurat dan tanpa *noise*, mungkin saja hasil dari inversi yang unik akan kita dapatkan. Namun pada kenyataannya, data yang kita peroleh selalu memiliki keterbatasan dan mengandung *noise*. Sehingga model hasil inversi menjadi tidak unik

Untuk mengurangi kadar ketidakpastian dari model yang didapatkan, ada beberapa cara antara lain menggunakan data konstrain sehingga model yang dihasilkan menjadi lebih unik. Data konstrain tersebut dapat berupa apa saja asal tingkat kepercayaan dari data tersebut tinggi, misalnya saja data yang berasal dari sumur bor.

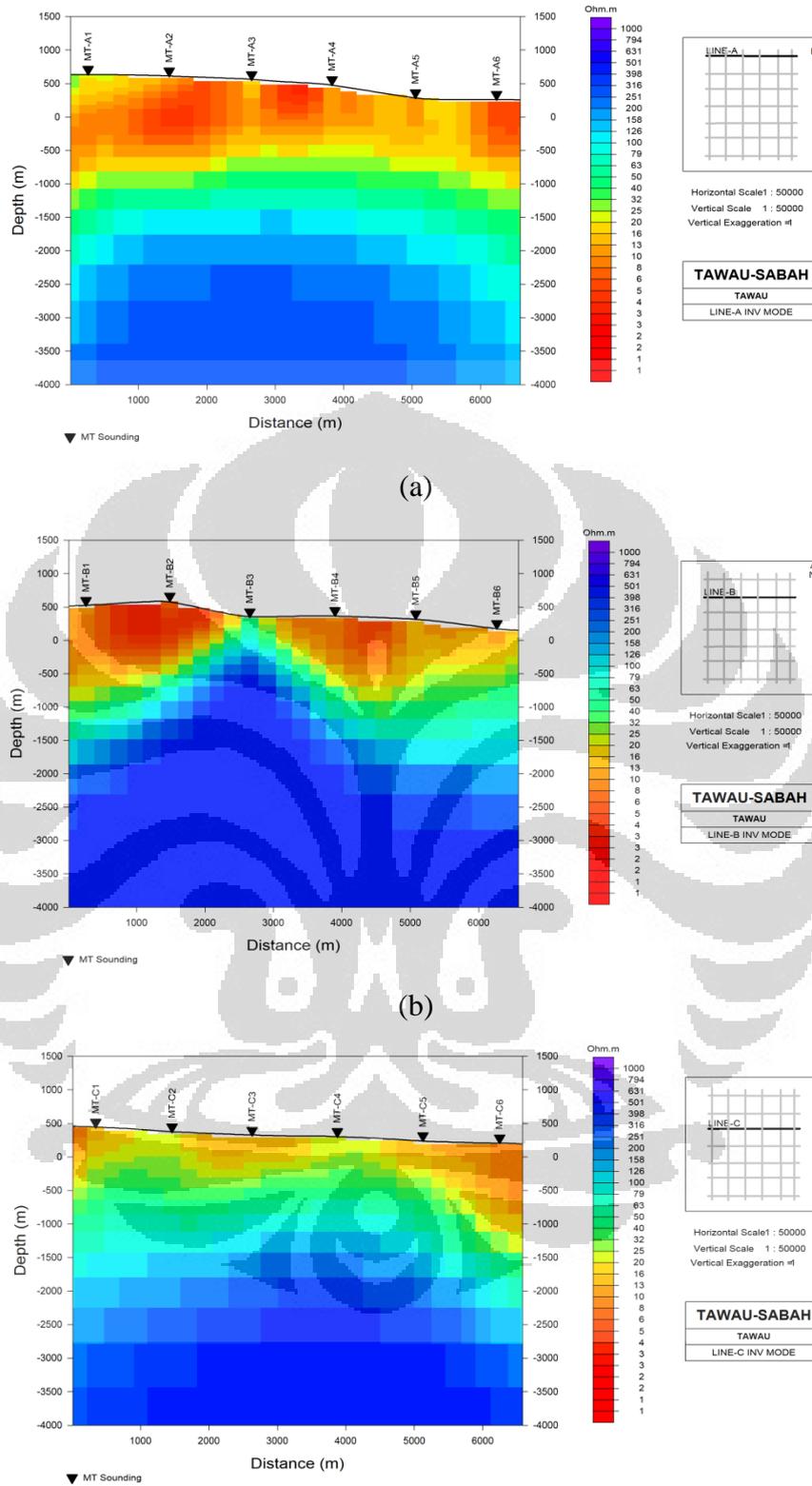
Dalam hal ini dilakukan smoothing pada kurva model resistivitasnya, namun tetap mengacu pada data MT yang telah diperoleh. Untuk memastikan model smoothing yang dibuat tetap mengacu pada data, maka data terukur yang berupa resistivitas ( $\rho^{data}$ ) dan fase ( $\varphi^{data}$ ) dianalisa dengan data hasil perhitungan smoothing sehingga diperoleh nilai resistivitas baru ( $\rho^{smooth}$ ) dan fase baru hasil smoothing ( $\varphi^{smooth}$ ), dengan menggunakan hasil r.m.s-nya (*root mean square*) yang dituliskan menjadi:

$$rms = \sqrt{\frac{1}{2NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{(\rho_{ij}^{data} - \rho_{ij}^{smooth})^2}{e_{ij}^{r^2}} + \frac{1}{2NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_{ij}^{data} - \varphi_{ij}^{smooth})^2}{e_{ij}^{p^2}}} \quad (4.3)$$

di mana  $e^r$  dan  $e^p$  merupakan standar error yang diperbolehkan dari nilai resistivitas dan fase yang ada. Dengan melihat hasil rms tersebut kita dapat juga melihat apakah data yang dimiliki memiliki banyak *noise* ataupun error yang tinggi.

#### 4.5.1 Inversi Data MT Tawau

Data MT Tawau diinversi model 2-dimensi dengan menggunakan software WinGLink yang dibuat oleh Rodi dan Mackie (2001) dengan menggunakan algoritma *nonlinear conjugate gradient* (NLCG). Dengan sebelumnya dikoreksi terhadap efek statik yang telah di bahas pada bagian sebelumnya.



Gambar 4.15 Model inversi 2-dimensi. (a) Model inversi line-A (b) Model inversi line-B (c) Model inversi line-C

Data nilai resistivitas semu dan fase yang digunakan berada pada frekuensi 100 Hz – 0.01 Hz. Pertimbangan mengapa hal tersebut dilakukan adalah melihat dari kualitas data yang ada serta target kedalaman dari tujuan penelitian ini yang bermaksud untuk membuat pemodelan sistem geothermal pada area penelitian, yang pada umumnya berada pada kedalaman 1-3 km sehingga frekuensi tersebut dapat dimanfaatkan. Pada dasarnya tidak semua data memiliki kualitas yang kurang baik pada frekuensi di bawah 0,01 Hz, terdapat juga beberapa titik yang memiliki kualitas data yang sangat baik pada frekuensi dibawah frekuensi tersebut seperti yang terlihat pada bagian data MT di bab ini. Namun kebanyakan dari data kurang baik pada frekuensi sangat rendah tersebut sehingga tidak dapat digunakan secara maksimal ketika melihat hasil kepercayaan dari data yang digunakan.

Pada proses inversi tersebut dilakukan sebanyak 13 profile (Gambar 4.1), yaitu profile-A atau Line-A yang menunjukkan profilan pada titik MT-A1, MT-A2, dan seterusnya hingga A6. Demikian pula Line-B yang menunjukkan, hasil inversi pada titik MT-B1 hingga MT-B6. Line-C, Line-D, Line-E, Line-F, Line G, Line-1 Line-2, Line-3, Line-4, Line-5, dan Line-6. Nilai hasil inversi tersebut diplot terhadap posisi dan kedalaman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.

Pada Gambar 4.15 ditunjukkan beberapa hasil dari inversi, Dari gambar tersebut terlihat terdapat tiga zona yang kontras, yaitu zona dengan nilai resistivitas rendah yang ditandai dengan warna merah, bernilai 1-20 ohm-m pada kedalaman yang relatif dangkal yaitu dari permukaan hingga kedalaman 700 m (Ussher et al., 2000). Pada zona tersebut dinamakan zona *clay cap*, zona yang menutupi zona reservoir.

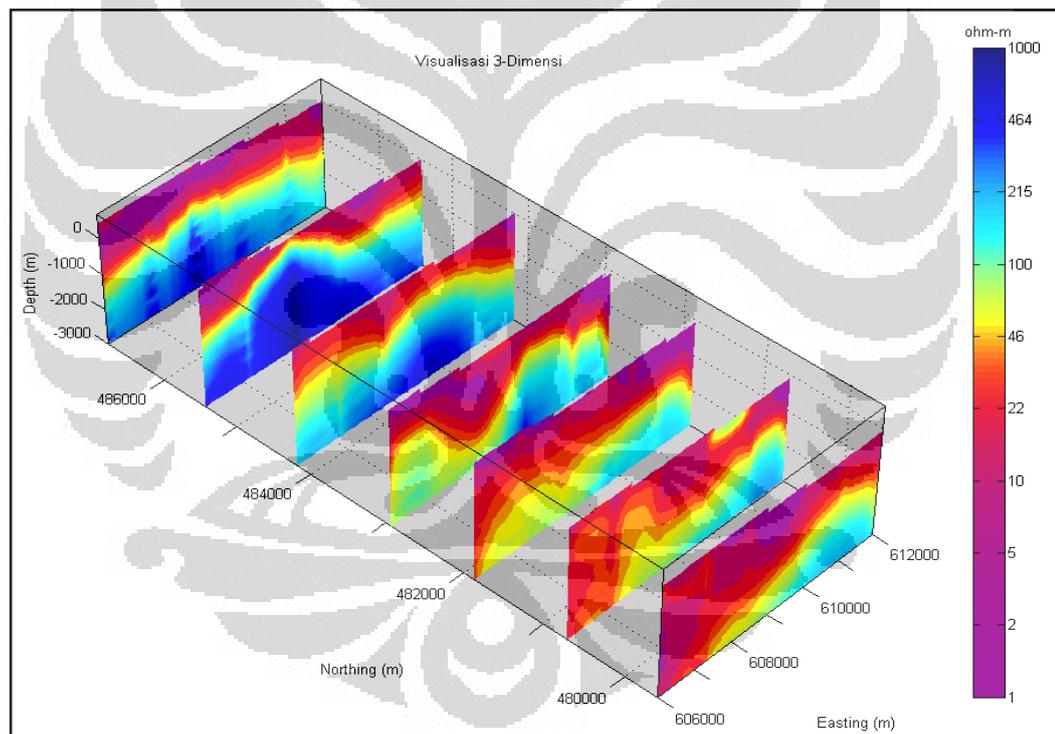
Zona dengan nilai resistivitas menengah yang ditandai dengan warna kehijauan bernilai 20-90 ohm-m, berada pada kedalaman sekitar 1000 m dengan ketebalan yang bervariasi, berkisar antara 500 hingga 700 m. zona tersebut dimasukkan ke dalam zona reservoir (Ussher et al., 2000).

Dan zona yang terakhir yaitu zona yang memiliki nilai resistivitas sangat tinggi yaitu di atas 200 ohm-m ditandai dengan warna kebiruan merupakan zona *hot rock* atau batuan sumber panas pada sistem tersebut (Ussher et al., 2000). Namun pada kasus di Area Prospek Tawau ini cukup sulit membedakan antara zona *hot rock* dan zona reservoir, hal tersebut dikarenakan kedua zona tersebut

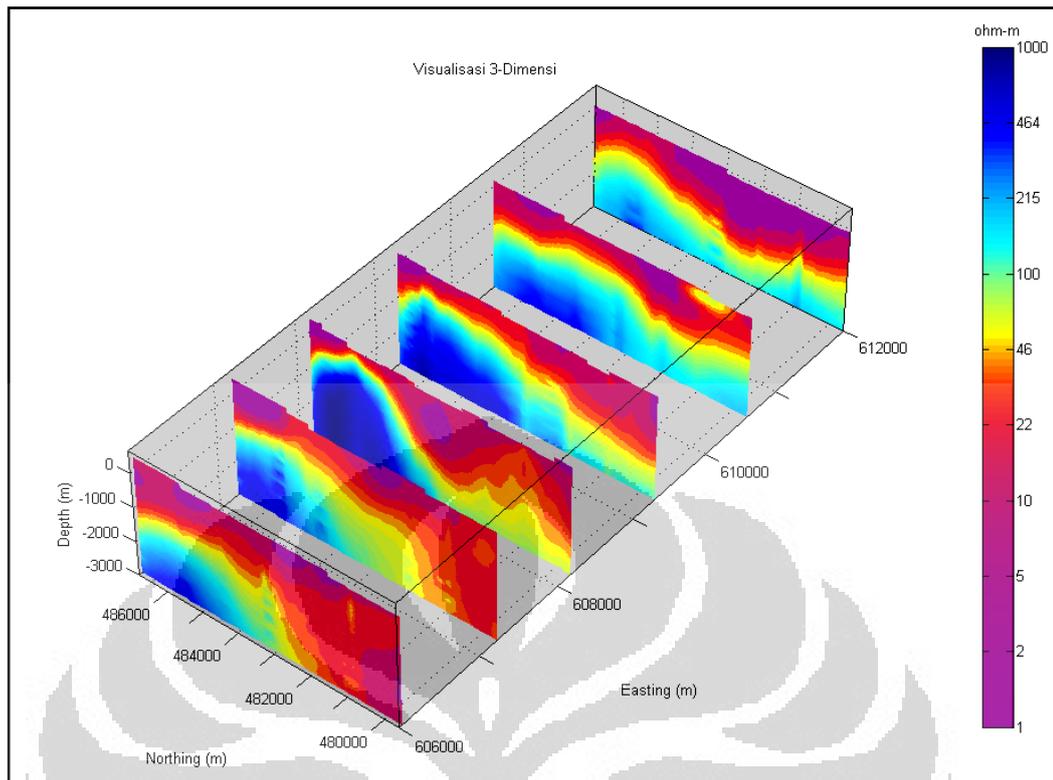
sama-sama memiliki harga resistivitas yang tinggi. Seperti pada kasus di daerah Line-B, terdapat penampakan zona yang resistif di daerah titik MT-B3, hal tersebut bias dimungkinkan karena adanya reservoir atau mungkin juga karena adanya *hot rock* pada kedalaman yang dangkal.

#### 4.6 Visualisasi 3-Dimensi Data MT

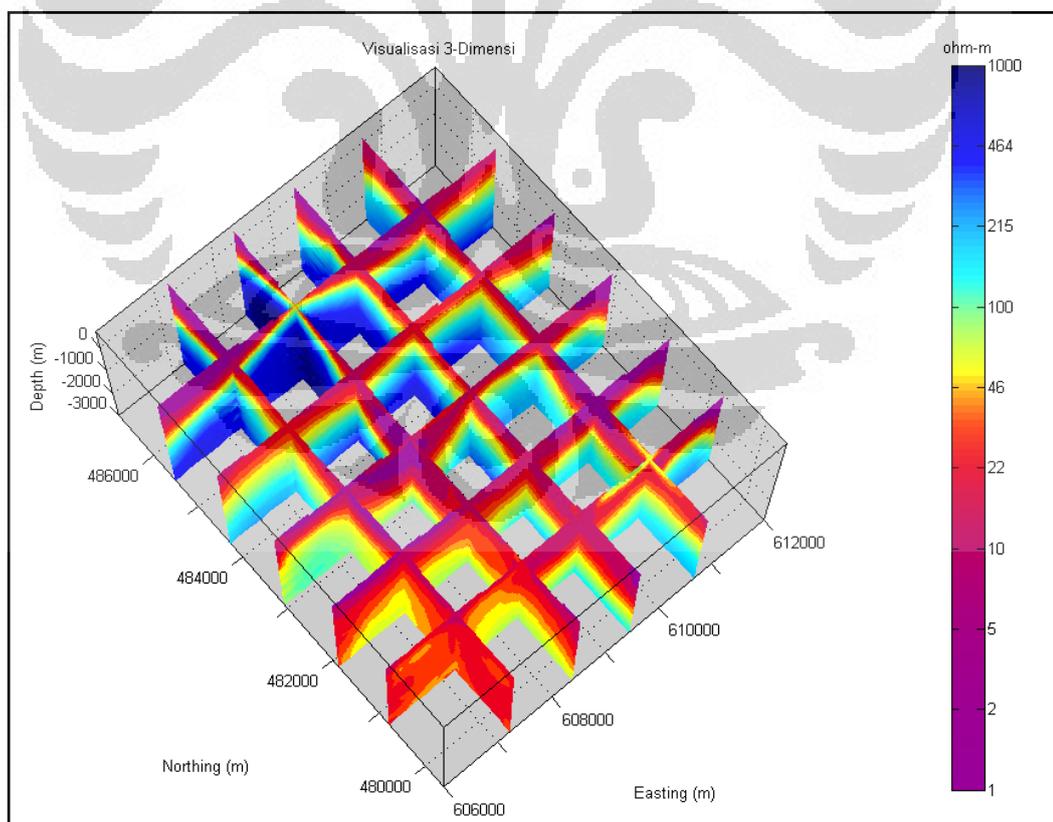
Dari hasil perhitungan inversi 2-dimensi yang telah dilakukan di atas, data-data hasil perhitungannya digunakan pada software GeoSlicerX untuk nantinya dapat ditampilkan secara 3-dimensi namun dengan tetap hasil perhitungan 2-dimensi. Software tersebut bekerja dengan prinsip menginterpolasi secara linier dari data hasil perhitungan inversi 2-dimensi, sehingga diperoleh gambar berupa 3-Dimensi seperti yang ada Gambar 4.11.



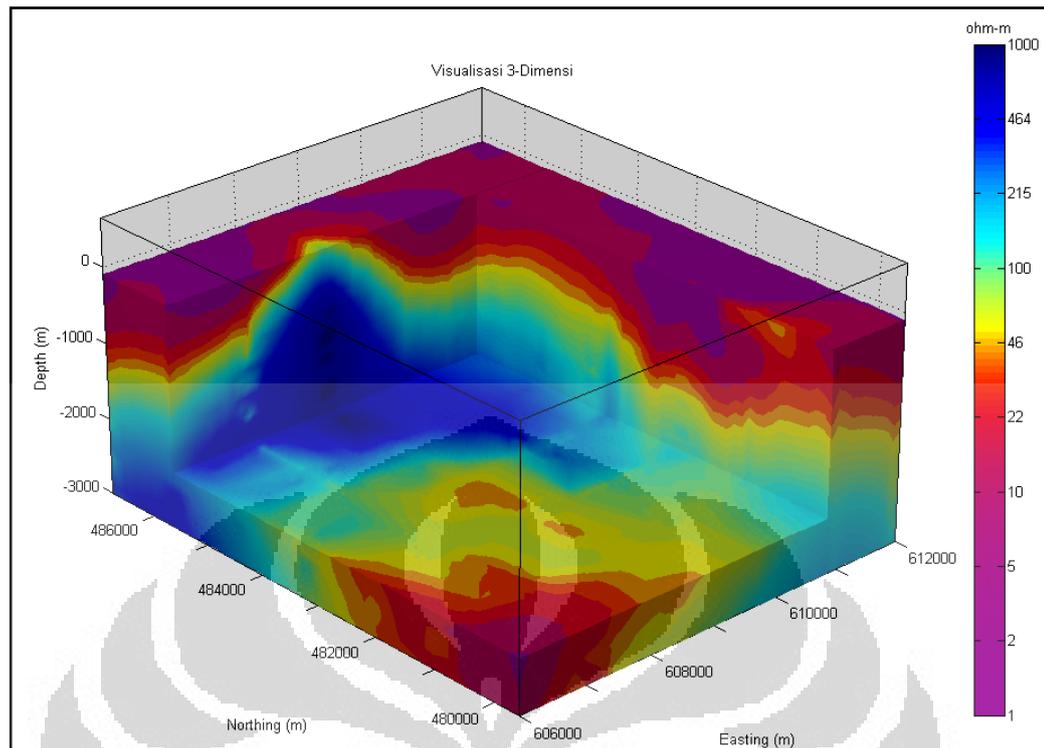
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.16 Visualisasi 3-dimensi pada profile pengukuran (a) Profile A, B, C, D,E, F, dan G (b) Profile 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 (c) Profile keseluruhan (d) *Cubic slice*

Dari Gambar 4.16 (a) terlihat pola kemenerusan nilai resistivitas dari Utara-Selatan, namun penyebaran harga resistivitas tersebut tidak merata dari Utara-Selatan. Telihat pada gambar tersebut penyebaran nilai resistivitas tinggi dimulai dari bagian Utara pada Line-A dan berakhir di bagian Selatan sekitar daerah Line-D, dengan penebalan lapisan harga resistivitas pada daerah Line-B. jadi terlihat pola menutup di bagian selatan dari daerah yang memiliki nilai resistivitas tinggi tersebut, namun masih terlihat terbuka bentuk dari penyebaran harga resistivitas tingginya di bagian Utara.

Pada Gambar 4.16 (b) terlihat pola kemenerusan nilai resistivitas dari Barat-Timur, dengan penyebarannya yang berada pada kedalaman yang dangkal pada daerah Line-3 dan agak menutup kedaerah Timur, kemungkinan sudah mengarah ke daerah *out-flow*. Demikian juga pada arah Barat, pola kemenerusan nilai resistivitas di daerah tersebut sudah mengarah menutup.

Jadi dari Gambar 4.16 (a) dan Gambar 4.16 (b) terlihat bahwa kemungkinan area potensi geothermal pada daerah Tawau ini berbentuk *dome* yang menutup

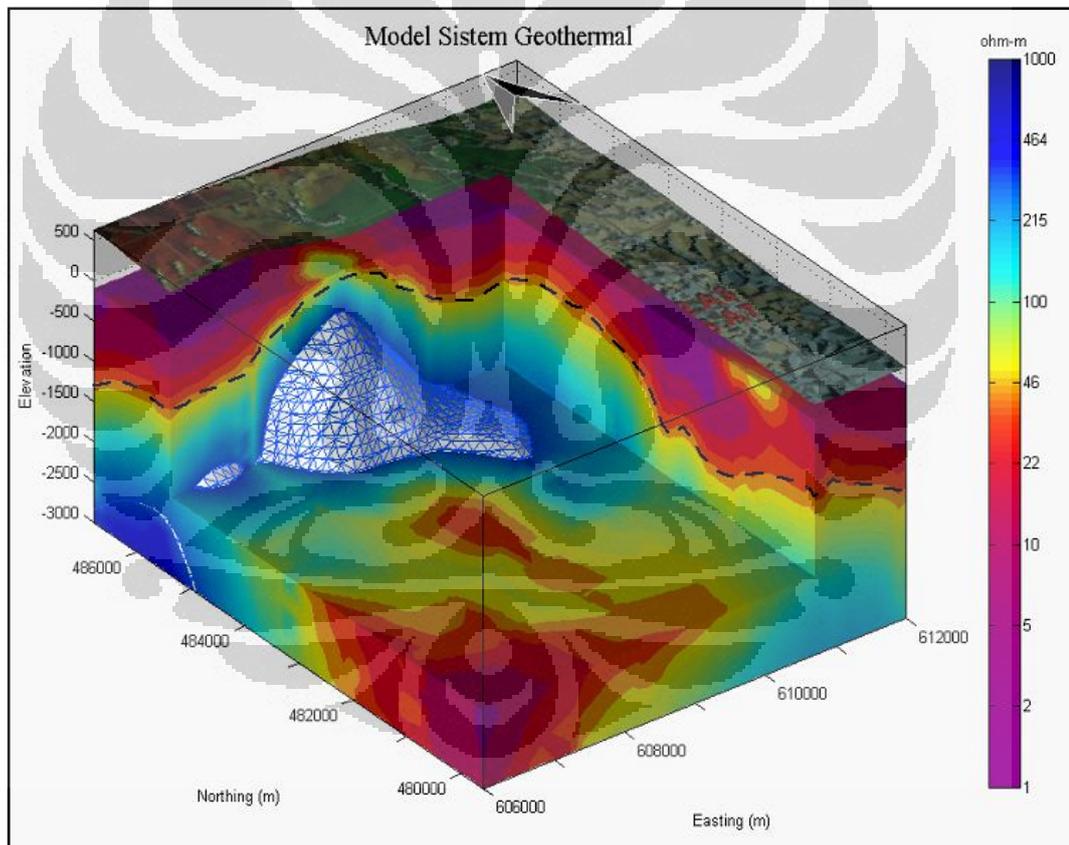
bentuknya di daerah Selatan di sekitar Line-D, Line-1, dan Line-5. Namun pada Line-A terlihat bahwa pola *dome* tersebut masih mungkin lebih luas ke arah Utara, yang mungkin terpusat di sekitar daerah Gunung Maria di mana di atasnya terdapat kawah bekas letusan yang cukup besar, sehingga penyebaran nilai resistivitas tersebut menggambarkan penyebaran *hot rock* dan reservoir yang ada pada sistem geothermal di sana.



## BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Interpretasi Terintegrasi

Pada hasil inversi seperti yang juga ditunjukkan pada Gambar 4.16, terlihat bahwa terdapat zona yang memiliki nilai resistivitas yang ditunjukkan dengan warna merah terang, zona tersebut dimungkinkan merupakan zona *clay cap*, di mana merupakan zona yang mengalami alterasi karena adanya suhu yang tinggi di bawahnya sehingga terjadi perubahan bentuk menjadi batuan yang teralterasi. Zona *clay cap* tersebut menyebar dari barat ke timur dengan pada bagian titik MT-B3 yang mengalami penipisan zona tersebut (Gambar 5.1).



Gambar 5.1 Visualisasi 3-Dimensi dengan tampilan *cubic slice*

Terjadi penebalan zona *clay cap* pada bagian selatan dengan ketebalan mencapai hingga 1000 m, dengan kecenderungan penutupan dari zona tersebut, namun pada bagian utara, walaupun pada daerah MT-B3 terdapat penipisan zona *clay cap* namun kearah utara masih terlihat zona tersebut masih terbuka, atau

masih menunjukkan bahwa dibagian utara penyebaran zona alterasi masih mungkin ada.

Penebalan zona *clay cap* di bagian selatan dimungkinkan juga karena terdapatnya zona mineralisasi, karena terlihat dari Gambar 5.1 terdapat daerah yang memiliki nilai resistivitas yang sangat rendah hingga pada kedalaman 2000 m di bagian barat daya di sekitar titik MT-G1. Hal tersebut juga dapat dibuktikan dari data geologi yang ada, diketahui bahwa di daerah selatan daerah pengukuran di mana berada di daerah gunung Andrassy, batuan penyusunnya salah satunya adalah *Dacitic pyroclastic* dan *lava*, sehingga memungkinkan ketika batuan tersebut naik ke permukaan membawa material-material mineral sehingga terdapatnya zona mineralisasi di daerah bagian Selatan dan Barat daya.

Tepat dibawah zona *clay cap* merupakan zona reservoir atau mungkin juga yang berada di bawah zona *clay cap* tersebut merupakan batuan *hot rock*, terutama jika dilihat dari gambar hasil inversi di daerah Line-B dan Line-3, pada daerah tersebut terdapat penyebaran nilai resistivitas yang tinggi pada kedalaman yang dangkal, jika dihubungkan dengan data geologi yang ada dimungkinkan daerah tersebut merupakan bukti keterdapatannya batuan *hot rock* yang berada di dekat permukaan, yang berupa batuan *Dacite* yang berumur sekitar masa quaternary. Hal tersebut dikuatkan dengan adanya *out-crop* yang ada disekitar titik pengukuran MT-B3, di mana pada daerah tersebut terdapat batuan yang cukup besar yang muncul di permukaan. Jika dilihat dari hasil data tersebut daerah potensi reservoir berada di sekitar daerah MT-A1 – MT-A4 hingga MT-D1 – MT-D4.

Jadi walaupun terdapat zona reservoir di daerah MT-B3, mungkin dengan ketebalan yang tidak cukup tinggi. Zona reservoir yang diperkirakan cukup tebal yaitu di bagian luar sekitar daerah MT-B3, di mana kemungkinan batuan *hot rock*-nya tidak sedangkal pada daerah MT-B3, di mana jika dilihat dari gambar hasil inversi tersebut dimungkinkan terdapatnya patahan di sekitar MT-B2 yang dapat dimungkinkan merupakan zona reservoir yang lebih tebal pada kedalaman sekitar 1600-2000 m.

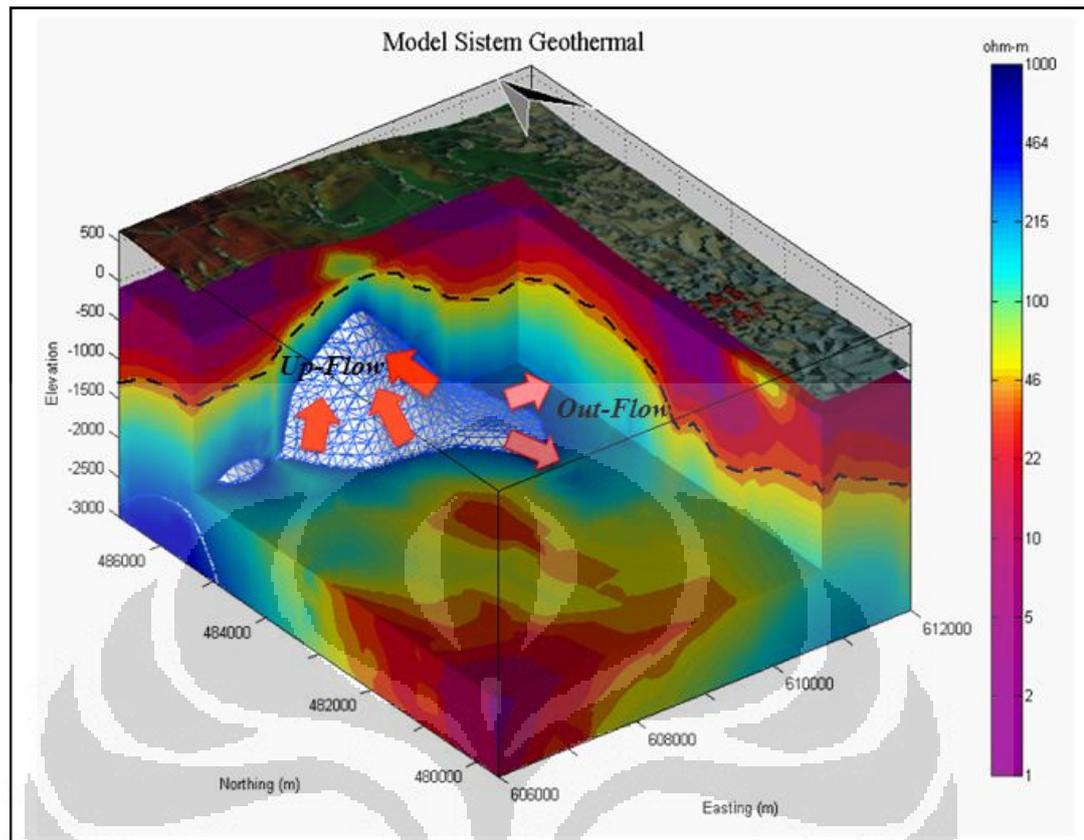
Zona reservoir yang di gambarkan dengan warna kehijauan terlihat penyebarannya meluas ke daerah tenggara, hal tersebut mungkin sudah mengarah

ke daerah *out-flow*, hal tersebut dapat dikuatkan dari data manifestasi dan geokimia yang ada, di mana ditunjukkan bahwa pada daerah tenggara terdapat manifestasi mata air panas tipe klorida, di mana manifestasi tersebut merupakan manifestasi yang dapat menunjukkan bahwa fluida yang naik ke permukaan merupakan fluida yang berasal langsung dari reservoir, pada mata air panas A5 dan juga A8 diketahui bahwa memiliki kandungan fluida yang lebih netral di banding mata air panas A1-A4 yang cenderung tidak senetral pada mata air panas A5 dan A8, selain itu pada mata air panas A1-A4 memiliki kandungan silika dan kandungan lain yang dapat menggambarkan bahwa mata air panas A5 dan A8 memiliki kemungkinan lebih dekat dengan reservoir dibanding pada mata air panas A1-A4 yang berada lebih jauh dari reservoir.

Adanya manifestasi T2 dan B1/B2 di bagian Barat laut dan Timur laut dari Gunung Maria dapat disimpulkan dari hasil data magnetotellurik ini merupakan suatu sistem yang mungkin tidak memiliki hubungan langsung dengan sistem yang berada di bagian selatan manifestasi tersebut, hal tersebut didasarkan dari hasil inversi yang diperoleh bahwa potensi reservoir mengarah ke bagian Utara di mana terdapat Gunung Maria pada daerah tersebut, bukan mengarah ke arah manifestasi yang dapat mencirikan daerah *up-flow* tersebut, mungkin adanya manifestasi tersebut terjadi karena adanya patahan yang menyebabkan adanya kandungan sulfur yang berkumpul di dekat permukaan sehingga menyebabkan adanya manifestasi air panas tipe *steam-heated*.

### 5.1.1 Model Sistem Geothermal

Gambar 5.2 menunjukan hasil pemodelan sistem geothermal yang dibuat di daerah prospek Tawau. Pada gambar tersebut dapat diketahui area penyebaran *clay cap* yang cukup luas yang berada hampir diseluruh daerah pengukuran. Selain penyebaran yang cukup luas yang berada dari daerah Utara-Selatan maupun Barat-Timur, zona *clay cap* ini juga memiliki ketebalan yang cukup tinggi, walaupun adanya penyebaran ketebalan zona tersebut tidak merata di semua daerah pengukuran, namun umumnya ketebalan dari zona ini berkisar antara 700-1200 m bahkan di beberapa daerah pengukuran diketahui ketebalan *clay* ini mencapai lebih dari 3000 m, hal tersebut dimungkinkan karena adanya zona mineralisasi yang berada di sekitar daerah gunung Andrassy.

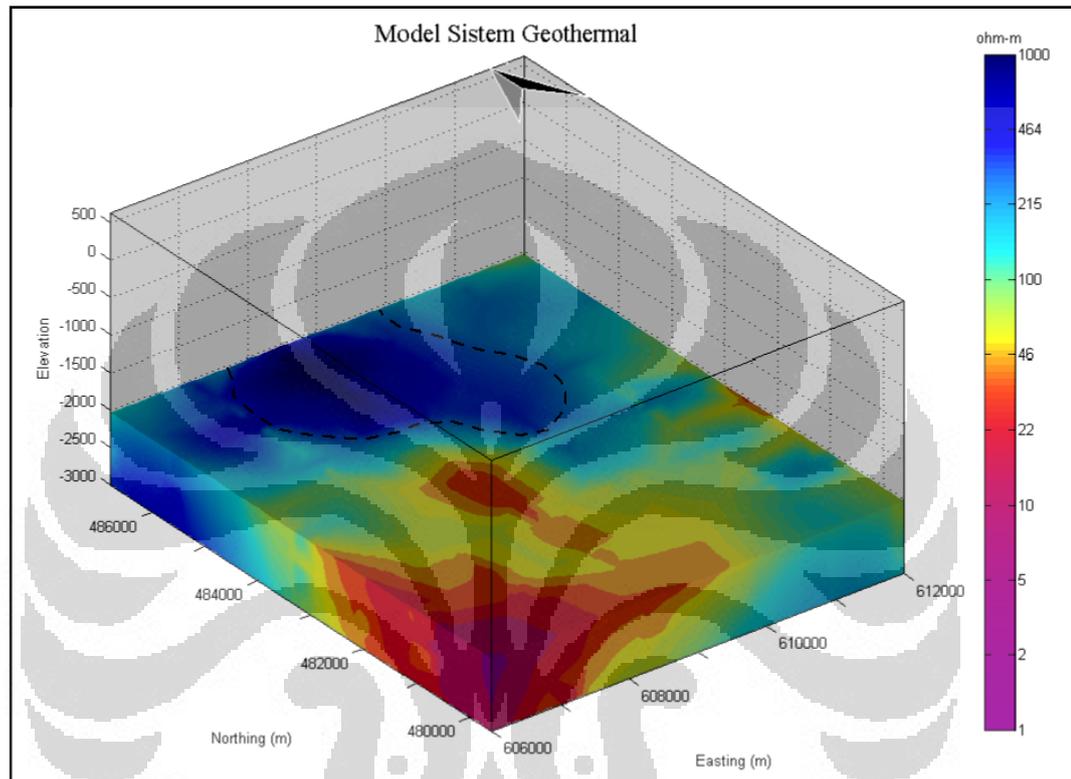


Gambar 5.2 Hasil pemodelan sistem geothermal area prospek Tawau

Dari Gambar 5.2 juga dapat diketahui mengenai daerah reservoir yang ada pada sistem geothermal di area prospek Tawau ini. Dari hasil pengukuran MT yang telah dilakukan disimpulkan bahwa daerah area prospek sesuai dengan analisa awal yang mengatakan bahwa daerah potensi geothermal yang ada di daerah tersebut berada di sekitar bagian Utara, yang tepatnya di sekitar gunung Maria. Dari Gambar 5.2 terlihat bahwa reservoir berada di bagian Utara pengukuran dengan luas daerah reservoir yang cukup luas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 yang mana memperlihatkan bahwa potensi dari luasan reservoir yang ada masih mungkin meluas ke daerah bagian Utara, terlihat dari pola penyebaran resistivitas tinggi yang dapat menunjukkan zona reservoir yang masih membuka ke arah Utara.

Pada bagian Utara daerah pengukuran dapat dilihat dari bentuk *isovalue topography* yang ditunjukkan pada Gambar 5.2 memiliki nilai resistivitas yang relatif tinggi, bentuk tersebut dianggap sebagai zona *top reservoir*, yang berarti dibawah bentuk *isosurface* tersebut merupakan reservoir pada sistim

geothermalnya atau dengan kata lain zona reservoir berada pada kedalaman yang relatif dangkal, hal tersebut dimungkinkan bahwa terdapatnya intrusi batuan *dacite* yang naik ke dekat permukaan, batuan tersebut dimungkinkan sebagai batuan *hot rock* sehingga pada daerah tersebut dimungkinkan bahwa area reservoir yang ada relatif lebih tipis dibanding di sekeliling batuan *hot rock* tersebut.



Gambar 5.3 Potensi luasan dari reservoir di area prospek Tawau

Pada pemodelan yang dibuat diketahui bahwa aliran fluida *up-flow* berada di sekitar daerah *hot rock* tersebut, aliran fluida tersebut mengarah ke permukaan, namun tidak fluida tersebut tidak muncul di permukaan, hal tersebut mungkin disebabkan jumlah kandungan fluida yang tidak terlalu banyak pada daerah *hot rock* yang berada di dekat permukaan, sehingga tidak ada bukti kemunculan fluida di daerah tersebut.

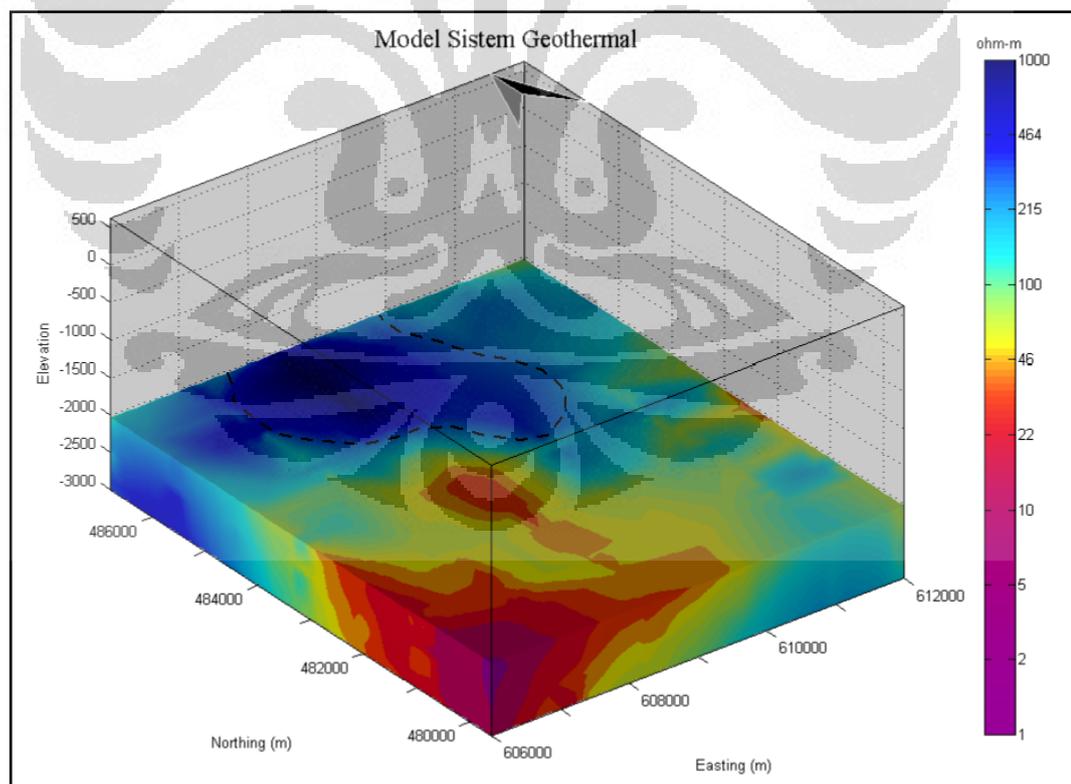
Model aliran fluida *out-flow* dibuat mengarah ke bagian Tenggara dan Timur, hal tersebut dikarenakan dilihat dari penyebaran nilai resistivitas yang mengarah ke bagian tersebut, ditambah adanya bukti bahwa di bagian Tenggara terdapat manifestasi mata air panas yang dari kandungan kimiawinya menunjukkan bahwa manifestasi mata air panas tersebut bercirikan daerah *out-flow* yang di

tandai dengan kandungan klorida yang tinggi yang merupakan ciri dari fluida reservoir.

Pada kasus ini, dari hasil data magnetotelluriknya tidak dapat diketahui daerah *recharge area*-nya hal tersebut dikarenakan dari hasil inversi tidak berhasil menentukan batasan dari penyebaran zona *clay cap*-nya, padahal dari batasan daerah penyebaran zona *clay cap* tersebut dapat membantu memperkirakan daerah *recharge area*-nya, yang umumnya berada di bagian luar dari zona *clay cap*-nya.

### 5.1.2 Potensi Geothermal

Besarnya potensi suatu daerah yang memiliki sistem geothermal dapat diketahui dari besarnya daerah reservoir yang dapat dimanfaatkan. Semakin besar daerah potensi reservoirnya maka makin besar pula potensi geothermal yang dapat dimanfaatkan. Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa potensi besarnya reservoir dari nilai resistivitas yang ada. Nilai resistivitas yang tinggi dapat dimungkinkan merupakan zona reservoir. Pada Gambar 5.4 terlihat bahwa zona batas reservoir diperkirakan seluas 15 km<sup>2</sup> yang dilihat pada kedalaman 2000 m.



Gambar 5.4 Batas daerah zona reservoir

Mengenai batasan dari zona reservoir yang telah diperlihatkan pada Gambar 5.4 didasarkan pada harga resistivitas batuan yang ada pada kedalaman 2000 m tersebut yakni sekitar 700 ohm-m yang masih dimungkinkan bukan merupakan batuan basement-nya yang berupa batuan andesite. Batas reservoir ternyata belum sepenuhnya, karena jika dilihat dari gambar tersebut, penyebaran daerah yang memiliki nilai resistivitas yang tinggi masih terbuka ke arah utara di mana terdapat gunung Maria. Kemungkinan reservoir dari sistem geothermal ini berada hingga ke dekat gunung Maria tersebut, sehingga mengenai potensi geothermal ini masih belum dipastikan.

Dari hasil yang ada yaitu diperkirakan tentang luasan dari potensi reservoir yang ada yaitu sekitar 15 km<sup>2</sup>. Maka besarnya potensi yang ada di daerah tersebut dapat dihitung dengan menggunakan formulasi matematika yaitu:

$$\text{Potensi} = A \times k \times (T^{\text{reservoir}} - T^{\text{cut off}}) \quad (\text{Daud, 2008})$$

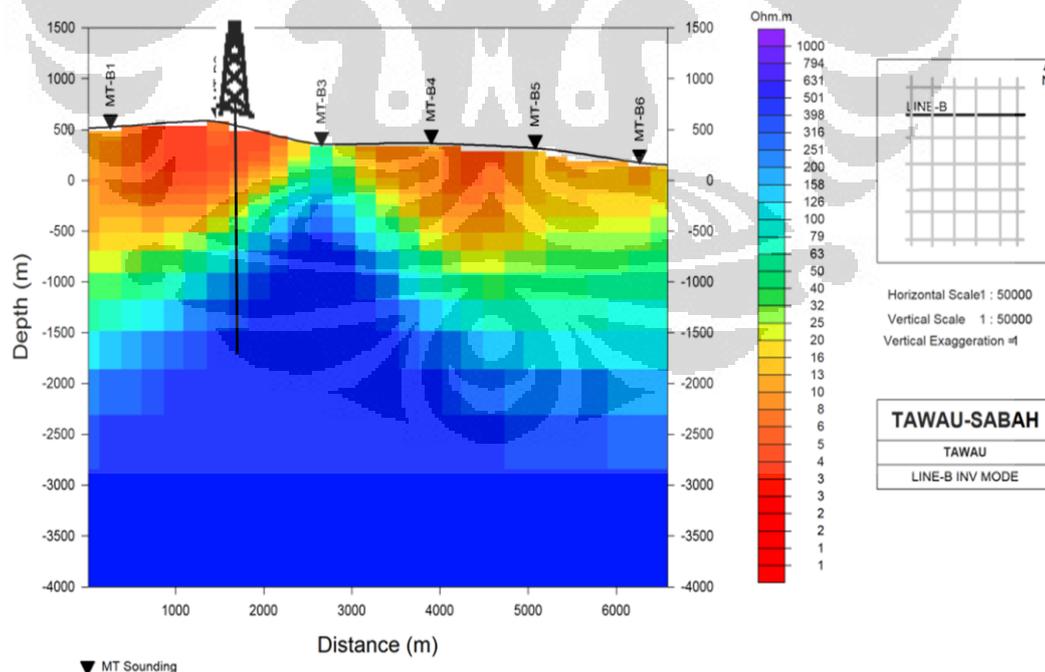
dengan  $A$  adalah luas daerah reservoir yang tadi diketahui adalah 15 km<sup>2</sup>,  $k$  adalah konstanta reservoir yaitu 0.1,  $T^{\text{reservoir}}$  adalah temperatur reservoir yang diperoleh dari data geokimia yaitu 236<sup>0</sup>C, dan  $T^{\text{cut off}}$  adalah temperatur *cut off* dari turbin yaitu sekitar 180<sup>0</sup>C, maka diperoleh potensi geothermal di daerah tersebut sebesar 84 MW. Dan sebagai catatan mengenai perhitungan besarnya potensi tersebut, bahwa nilai potensi tersebut masih mungkin menjadi lebih besar jika saja faktor temperatur *cut off* yang digunakan lebih kecil lagi, mengingat bahwa sekarang ini sudah ada turbin yang memiliki nilai temperatur *cut off* yang hanya sekitar 165<sup>0</sup>C. Jika saja nilai perhitungan tersebut dengan nilai *cut off* tersebut maka besarnya potensi yang ada di daerah prospek Tawau menjadi sekitar 114 MW.

Namun berapapun besarnya potensi tersebut, perlu diingat kembali bahwa potensi luasan reservoir yang diketahui belum sepenuhnya diketahui mengenai batasannya, dan hasil yang telah dihitung hanya menggunakan hasil yang diperoleh saat ini, jadi mengenai besarnya potensi tersebut masih dapat dimungkinkan bertambah, sesuai dengan besarnya reservoir yang belum diketahui.

## 5.2 Rekomendasi Pengeboran

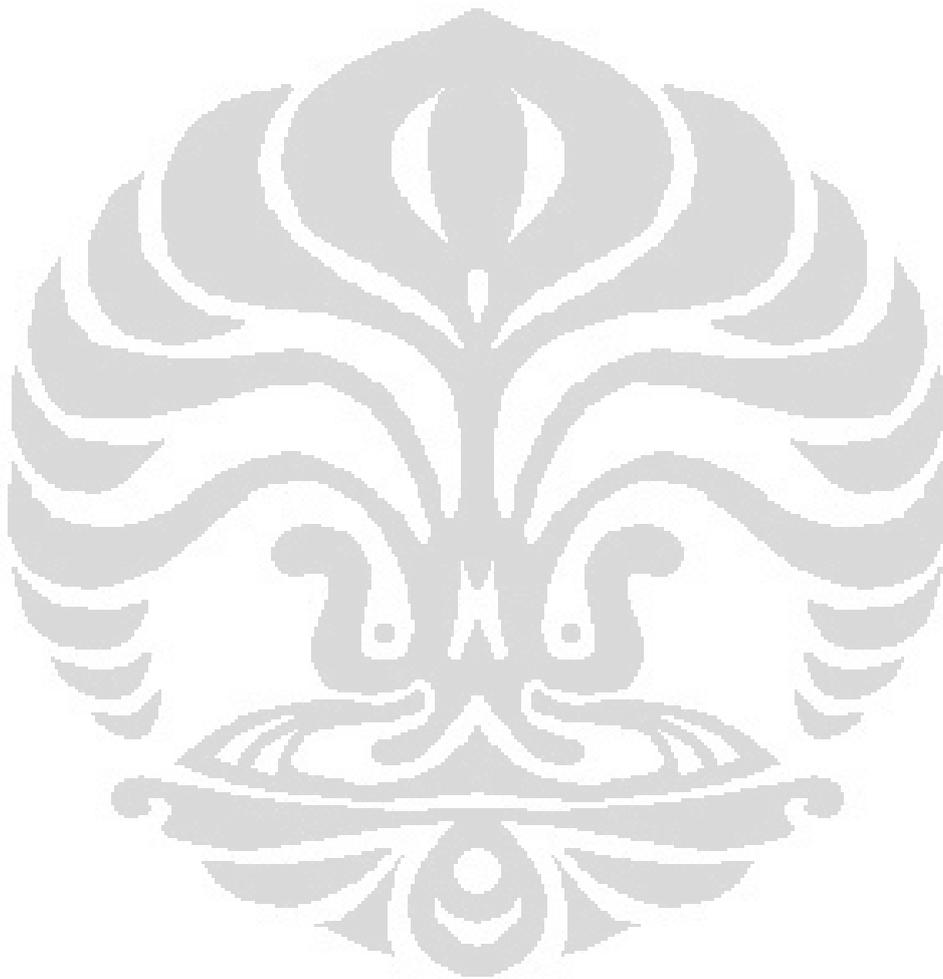
Dari hasil pemodelan yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa Area Prospek Geothermal Tawau ini berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi pembangkit. Hal tersebut didasari dari keseluruhan hasil yang diketahui yaitu ternyata area prospek geothermal Tawau ini masuk dalam kategori *high temperature* (190-236 °C), dan juga dari besaran potensi yang dimiliki sekitar 84 MW, sehingga wajar saja jika potensi ini nantinya dapat dimanfaatkan untuk menjadi pembangkit listrik sehingga hasilnya dapat dirasakan oleh masyarakat Malaysia pada umumnya.

Untuk itu langkah selanjutnya adalah melakukan pengeboran eksplorasi guna memastikan mengenai batasan area prospek yang ingin dieksplotasi. Pada bagian ini penulis memiliki saran mengenai titik pengeboran eksplorasi. Saran mengenai titik pengeboran ini didasarkan pada hasil pemodelan sistem geothermal Tawau yang telah dilakukan yang menunjukkan akan adanya reservoir pada daerah sekitar A1-A4 hingga D1-D4.



Gambar 5.5. Titik rekomendasi pengeboran

Untuk itu penulis menyarankan untuk melakukan pengeboran eksplorasi didekat daerah titik MT B2-B3, pada kedalaman sekitar 1500 m dengan memotong zona reservoir yang telah dijelaskan sebelumnya. Mengenai titik lokasi pengeboran tidaklah terbatas hanya pada yang terlihat di Gambar 5.5. Penentuan lokasi pengeboran dapat dipindahkan ke daerah lain namun dengan target pengeboran yang sama yaitu memotong zona reservoir yang ada.



## **BAB VI PENUTUP**

### **6.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan penelitian guna melakukan pemodelan sistem geothermal di area prospek geothermal Tawau dengan menggunakan metode magnetotellurik dan ditambah dengan data-data penunjang lain, dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

- Dengan menggunakan metode MT dapat diketahui penyebaran *clay cap*, *reservoir*, maupun *hot rock* di daerah prospek Tawau ini. Selain itu metode MT ini juga dapat membantu menggambarkan luas, kedalaman, dan geometri reservoir sehingga mampu memperkirakan besaran potensi geothermal di daerah prospek Tawau.
- Hidrogeologi dari sistem geothermal Tawau diketahui bahwa bagian *up-flow*nya mengarah ke bagian Utara dekat pengunungan Maria dengan penyebaran daerah *out-flow* mengarah ke bagian Tenggara dan Timur.
- Batas reservoir daerah prospek geothermal Tawau berada di sekitar daerah titik pengukuran MT-A1 - MT A4 hingga titik pengukuran MT-D1 - MT-D4. Dengan potensi luasan area prospek yang masih mungkin meluas ke bagian Utara, yang dapat dilihat dari hasil yang diperoleh dengan masih terbukanya zona yang memiliki nilai resistivitas tinggi yang dimungkinkan merupakan zona reservoir.
- Model sistem geothermal yang ada di area prospek Tawau diketahui memiliki daerah penyebaran *clay cap* yang cukup besar, bahkan di beberapa daerah diindikasikan merupakan daerah mineralisasi. Sedangkan dari model sistem tersebut diketahui juga bahwa potensi reservoir berada di dekat gunung Maria yang berarti sumber panas berada di dekat daerah tersebut.

## 6.2 Saran

Dari hasil keseluruhan penelitian ini penulis memiliki beberapa saran yang mungkin berguna untuk langkah kedepannya, mengingat objek yang diteliti merupakan objek yang masih baru dan perlu analisa yang lebih dalam. Saran-saran yang dapat penulis sampaikan antara lain:

- Penambahan titik pengukuran MT di bagian arah Utara, di dekat gunung Maria, mengingat diperlukannya informasi tentang batas reservoir yang masih memungkinkan adanya perluasan.
- Survey lanjutan dengan metode gravitasi, karena dengan metode tersebut diharapkan dapat mengetahui struktur dari daerah tersebut sehingga dapat lebih dipastikan mengenai daerah pengeboran.
- Survey lanjutan dengan menggunakan *microearthquake*, karena dengan metode tersebut diharapkan dapat diketahui daerah patahan di mana umumnya tempat reservoir yang paling baik untuk dilakukan pengeboran.

## DAFTAR ACUAN

- Castells, A.M. (2006). *Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of the Central Betic Crustal Structure*. Univesitat de Barcelona, Departement de Geodinàmica i Geofísica.
- Daud, Yunus. (2008). Catatan kuliah Eksplorasi Geothermal. Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia.
- Hendro A.L. dan Grandis, H. (1996). *Koreksi Efek Statik Pada Data Magnetotelurik Menggunakan Data Elektromagnetik Transien*. Proceedings Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, Jakarta.
- <http://www.Phoenix-geophysics.com>. (2008). *Magnetic and electric field sensor for geophysical receiver*. Diakses 20 Desember 2008.
- <http://www.Phoenix-geophysics.com>. (2008). *Satellite-synchronized data acquisition unit*. Diakses 20 Desember 2008.
- Kirk, H. J. C. (1962). *The Geology and Mineral Resources of the Semporna Peninsula North Borneo*. Geological Survey Departement British Territories in Borneo.
- Raharjo, I.B. (2008) *Metoda Magnetotelluric (Magnetotellurik) Untuk Eksplorasi Geothermal*. magnetotelluric.com. Diakses 20 Desember 2008.
- Rodi, W., and Mackie, R. (2001). *Nonlinear Conjugate Gradient Algorithm for Two-Dimensional Magnetoteluric Inversion*. Geophysics, 66, No.1, Hal 174-187.

Space Physics Center.(2009). [www-ssc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/msphere06.gif](http://www-ssc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/msphere06.gif).  
Diakses 20 Juni 2009

Stenberg, B.K., Washburne, J.C., and Pellerin, L. (1988). *Correction For the Static Shift in Magnetotelluric Using Transien Electromagnetic*.  
Geophysics, Vol. 53. No. 11

Sucandra. (2009). *Aplikasi Metode Time Domain Electromagnetic (TDEM) di Daerah Tawau, Sabah, Malaysia*. Skripsi S-1 Jurusan Fisika Universitas Indonesia.

Unsworth, M. (2008). *Electromagnetic Exploration Methods*. University of Alberta. Canada

Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., and Anderson, E. (2000). *Understanding the Resistivities Observed in Geothermal System. Proceeding World Geothermal Congress, Kyusu-Tohoku, Japan*.

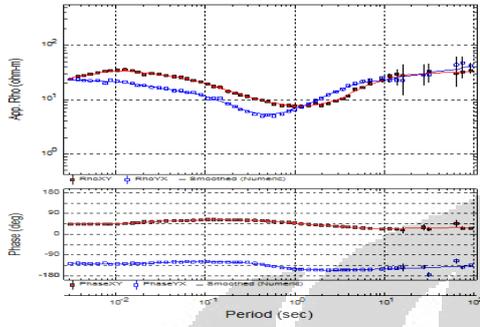
Vozoff, K. (1991). *Electromagnetic Method in Applied Geophysics, Chapter 8*. Society of Exploration Geophysics, Hal 641-771.

Xiao, W. (2004). *Magnetotelluric Exploration in the Rocky Mountain Foothills, Alberta*. Departement of Physics. University of Alberta.

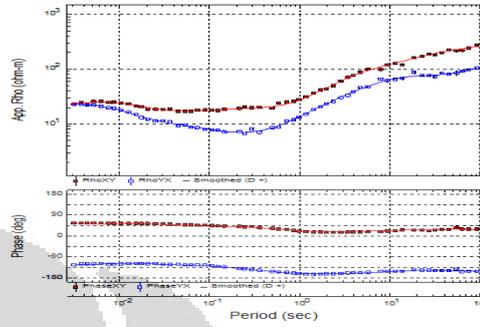
# LAMPIRAN

## Lampiran 1: Kurva Sounding MT

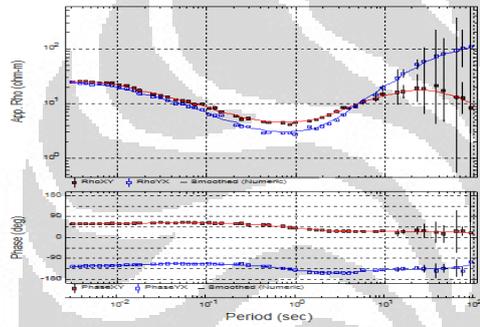
### MT-A1



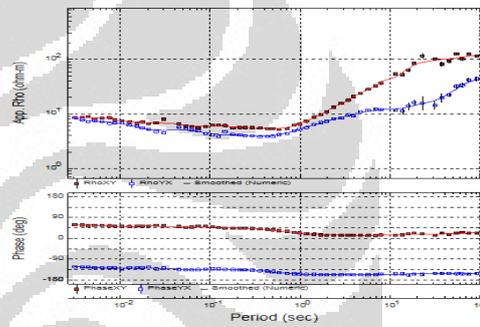
### MT-A5



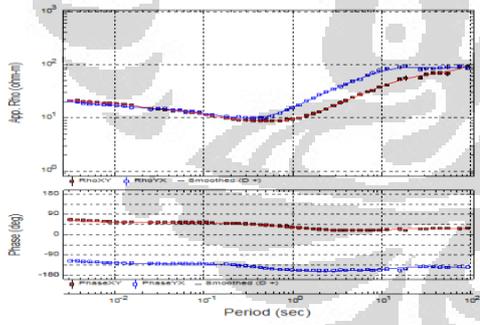
### MT-A2



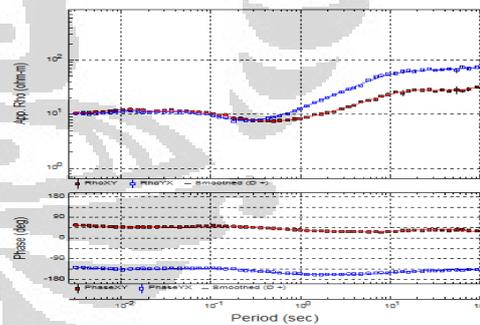
### MT-A6



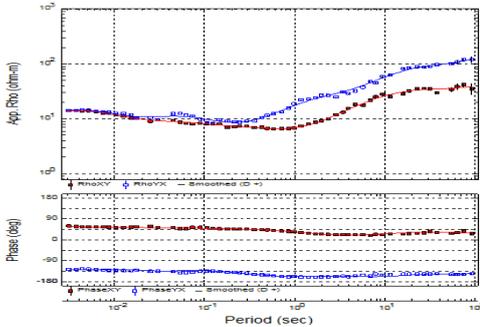
### MT-A3



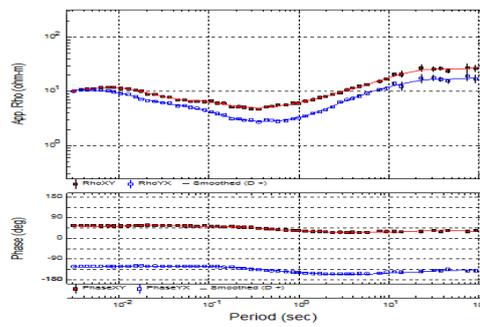
### MT-B1



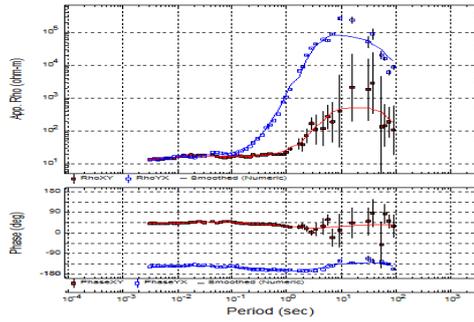
### MT-A4



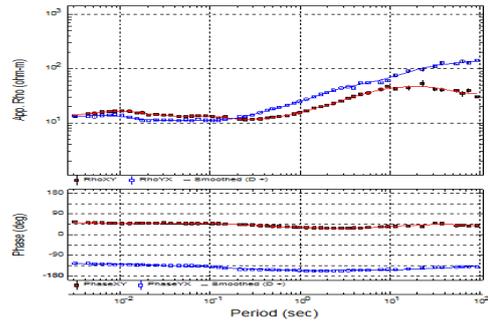
### MT-B2



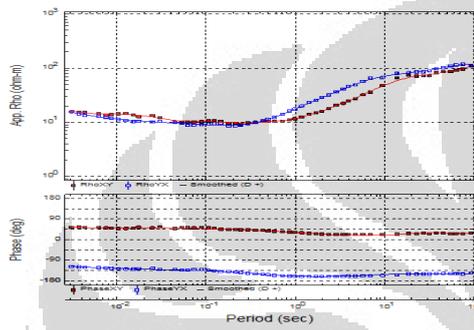
MT-B3



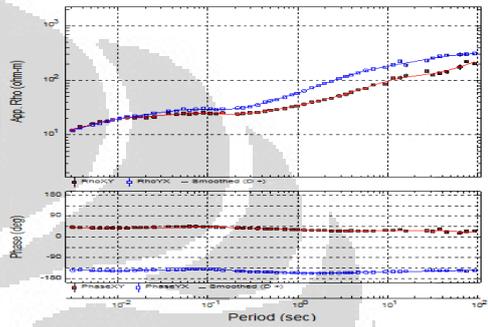
MT-C1



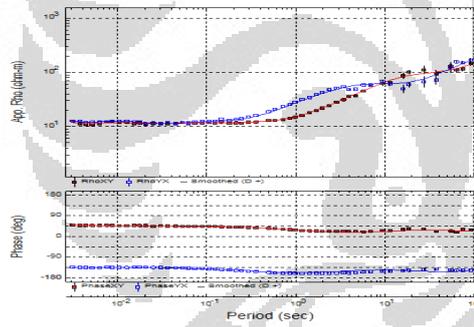
MT-B4



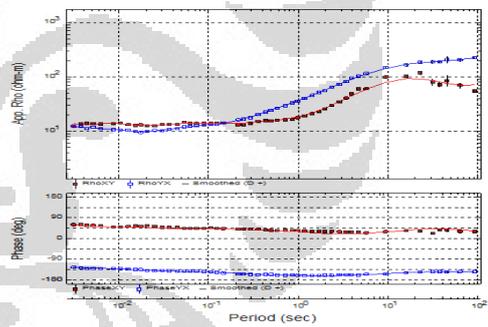
MT-C2



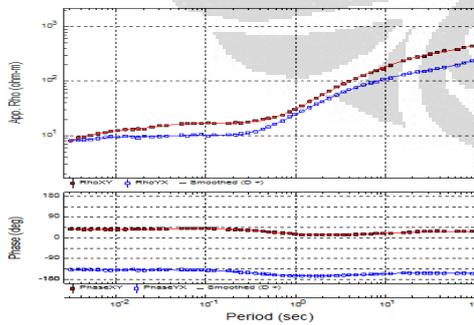
MT-B5



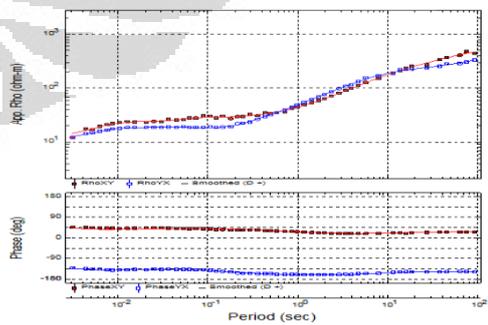
MT-C3



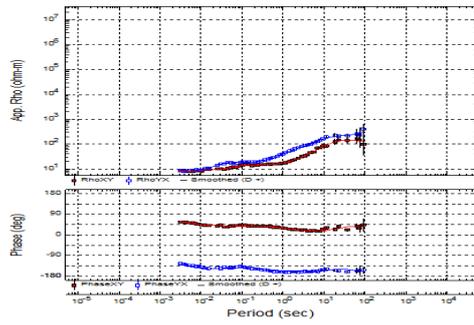
MT-B6



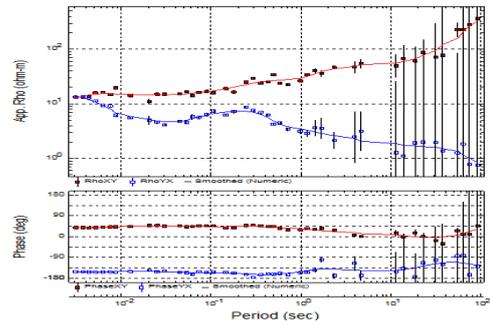
MT-C4



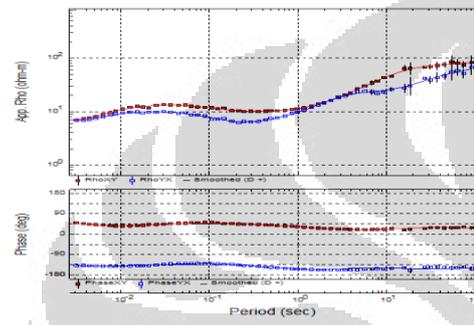
MT-C5



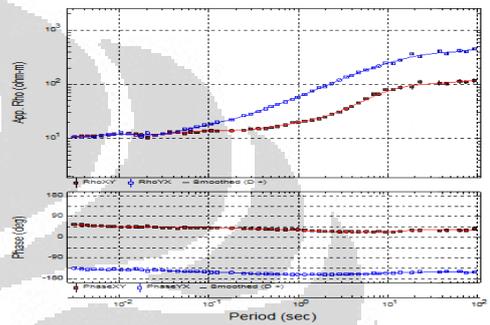
MT-D3



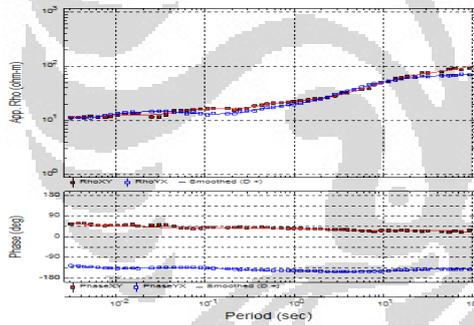
MT-C6



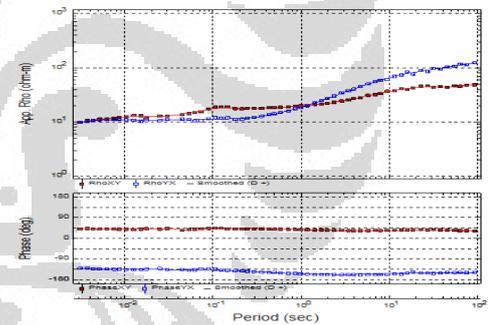
MT-D4



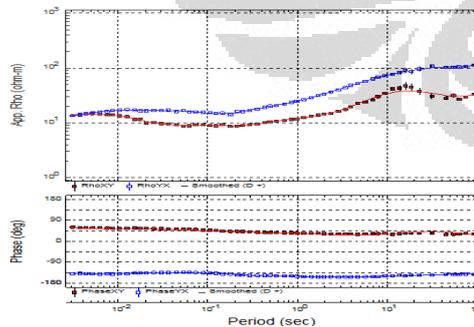
MT-D1



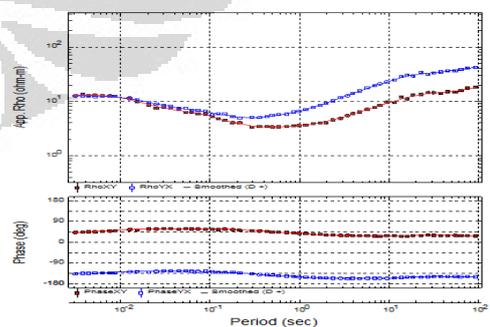
MT-D5



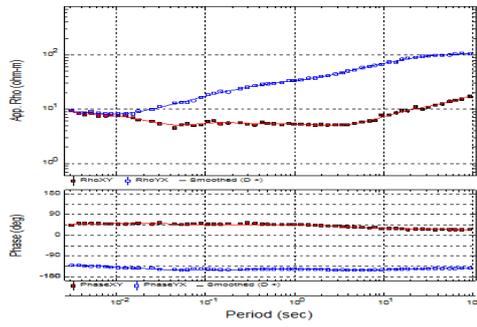
MT-D2



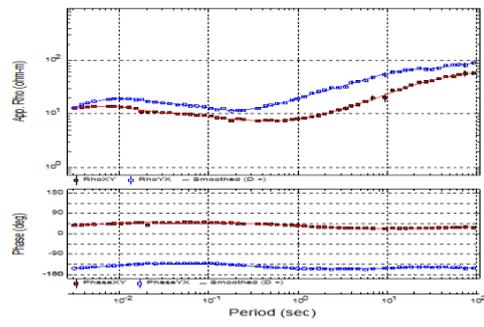
MT-D6



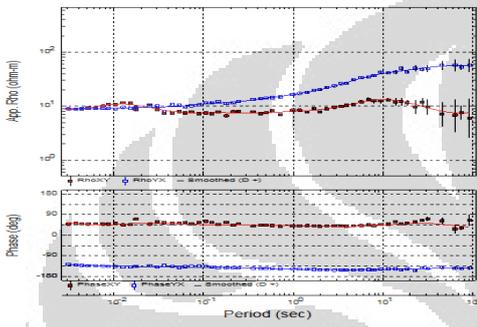
MT-E1



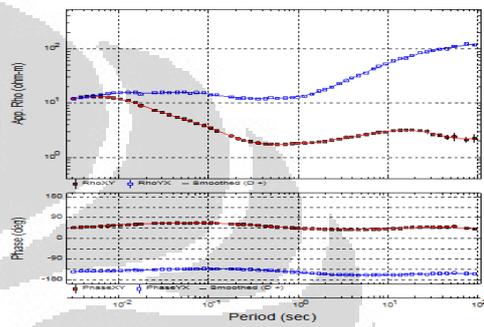
MT-E5



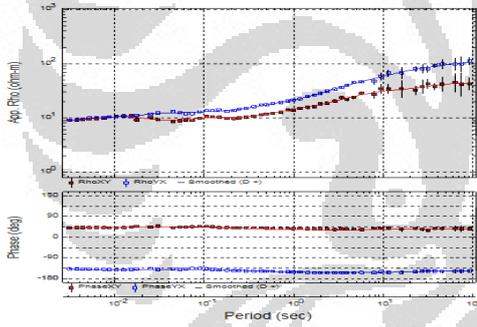
MT-E2



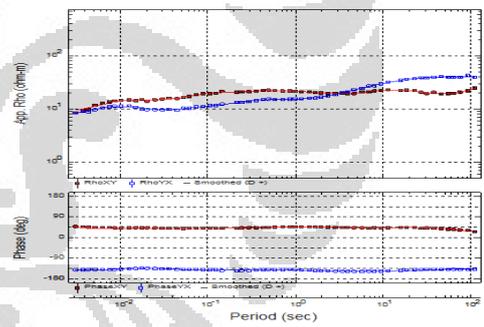
MT-E6



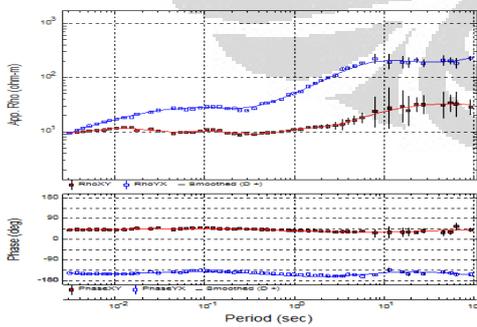
MT-E3



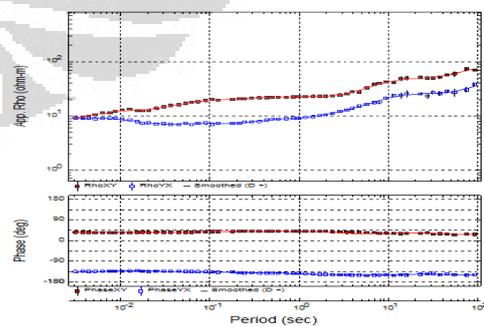
MT-F1



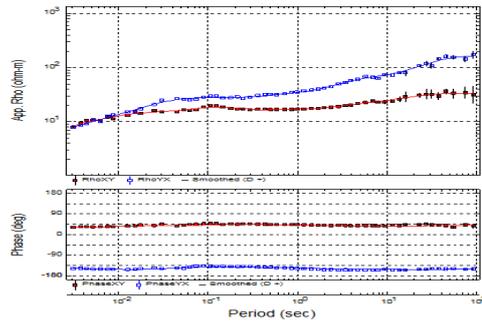
MT-E4



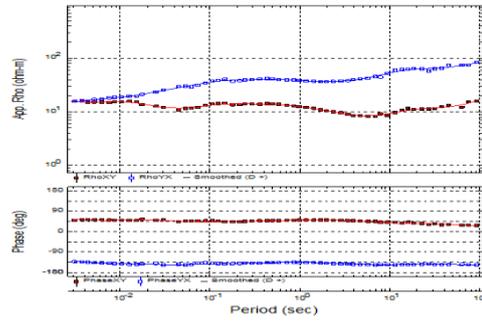
MT-F2



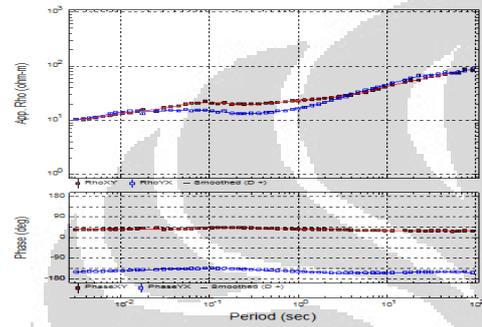
MT-F3



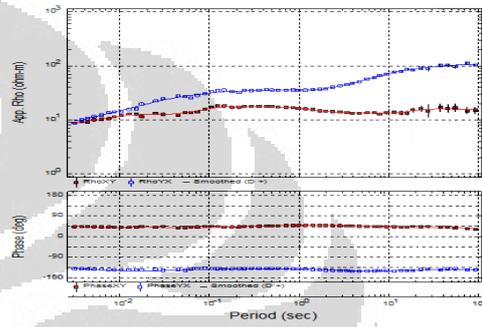
MT-G1



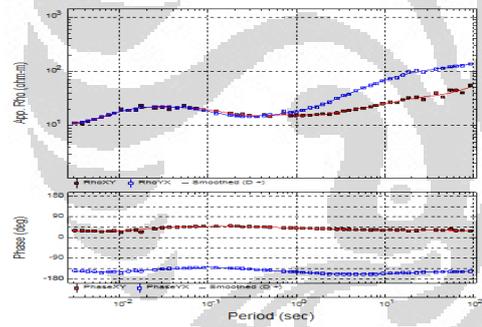
MT-F4



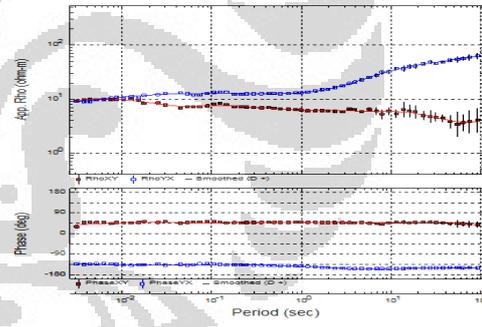
MT-G2



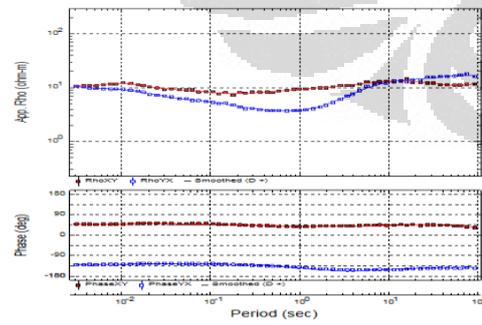
MT-F5



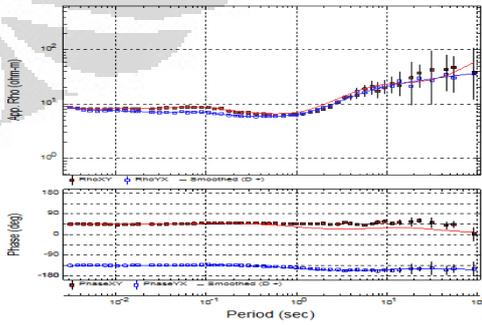
MT-G3



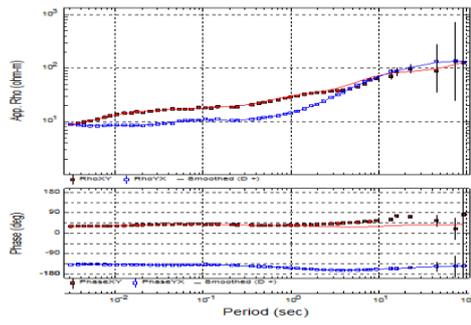
MT-F6



MT-G4



MT-G5



MT-G6

