



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**METODE *MAGNETOTELLURIC* (MT) UNTUK EKSPLORASI  
PANASBUMI DAERAH LILI, SULAWESI BARAT DENGAN  
DATA PENDUKUNG METODE GRAVITASI**

**SKRIPSI**

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

**TRI VIRGANTORO SALAHUDIN KADIR  
0706262855**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
KEKHUSUSAN GEOFISIKA  
DEPOK  
DESEMBER 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : TRI VIRGANTORO SALAHUDIN KADIR**

**NPM : 0706262855**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 15 Desember 2011**

## LEMBAR PENGESAHAN

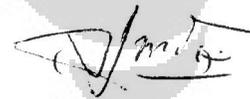
Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Tri Virgantoro Salahudin Kadir  
NPM : 0706262855  
Program Studi : Geofisika  
Judul Skripsi : METODE *MAGNETOTELLURIC* (MT) UNTUK  
EKSPLOKASI PANASBUMI DAERAH LILI,  
SULAWESI BARAT DENGAN DATA  
PENDUKUNG METODE GRAVITASI

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 Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Eng. H. Yunus Daud, M.Sc.



Penguji 1 : Dr. Jatmiko Prio Atmojo



Penguji 2 : Dr. Eng. Supriyanto



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Desember 2011

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbi'l'amin. Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena hanya dengan kehendak-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Salawat dan Salam tercurah kepada Nabi Muhammad SAW dan segenap keluarga serta para sahabat.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini tentu saja tidak terlepas dari banyak pihak yang sangat membantu. Oleh karena itu, melalui media ini saya mengucapkan terimakasih kepada :

1. Dr. Eng. Yunus Daud, M. Sc, selaku pembimbing yang telah memberikan banyak sekali pelajaran berharga baik berkaitan dengan tugas akhir ini maupun untuk bekal rohani;
2. Lendriadi Agung, S. Si dan Surya Aji Pratama, S. Si, Wambra Aswo, S.Si, dan Dzil Mulki Heditama, S.Si untuk segenap arahan dan bantuan;
3. Jimmi Daniel, S.Si, dan Yan Sulistyio atas segala bantuannya.
4. Rekan-rekan dari Pusat Studi Geologi Bandung ( M. Kholid, Pak Narto, Pak Dede, Pak Yazid, Pak Oki, Pak Hadi).
5. Rekan-rekan seperjuangan, Andy Rusbiyanto, M. Arfan, dan Rotua Candra
6. Rekan-rekan Fisika angkatan 2007, sukses buat kalian semua;
7. Seluruh rekan-rekan Fisika dari angkatan 2006 - 2010;
8. Teman-teman dan sahabat-sahabat yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang senantiasa mendukung dan mendo'akan, juga bertanya kapan saya lulus. Karena pertanyaan kalian menjadi dorongan tersendiri buat saya;
9. Dan khususnya untuk keluarga saya. Papa, Mama, Lala dan seluruh keluarga besar, semoga Allah senantiasa menjaga kebersamaan kita sampai nanti;
10. Serta untuk Lisa Fitriani, yang telah banyak menemani, memberikan semangat serta do'a. Semoga Allah senantiasa memberkahi kamu dan keluarga.

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

---

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

Nama : Tri Virgantoro Salahudin Kadir  
NPM : 0706262855  
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 : **METODE MAGNETOTELLURIC (MT) UNTUK EKSPLORASI PANASBUMI DAERAH LILI, SULAWESI BARAT DENGAN DATA PENDUKUNG METODE GRAVITASI** 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 : 15 Desember 2011

Yang menyatakan



(Tri Virgantoro Salahudin Kadir)

## ABSTRAK

Nama : Tri Virgantoro Salahudin Kadir  
Program Studi : Geofisika  
Judul : METODE *MAGNETOTELLURIC* (MT) UNTUK  
EKSPLORASI PANASBUMI DAERAH LILI,  
SULAWESI BARAT DENGAN DATA PENDUKUNG  
METODE GRAVITASI

Area prospek panasbumi Lili, Sulawesi Barat, Indonesia merupakan salah satu daerah prospek yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik yang terjadi sejak zaman Tersier. Aktivitas vulkanik ini diperkirakan merupakan aktivitas gunungapi bawah laut yang berkembang menjadi gunungapi darat berumur Kuartar bawah. Area prospek panasbumi ini memiliki mata air panas tipe klorida, dan tipe bikarbonat yang tersebar di sekitar area prospek. Dari hasil perhitungan geotermometer area prospek panasbumi Lili memiliki temperatur 189-201 °C, yang dikategorikan sebagai *moderate to high temperature geothermal system*. Untuk mengetahui batas, kedalaman, dan geometri dari reservoir yang ada, dilakukan pengukuran dengan metode *Magnetotelluric* (MT) serta metode geofisika lainnya sebagai pendukung seperti metode gravitasi, geomagnet, dan geolistrik. 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 *Mat-Lab* dan *Site to Site Reference* sebelum nantinya siap diinterpretasi. Pemodelan sistem panasbumi dari data magnetotellurik dengan menggunakan analisa 2-dimensi dan 3-dimensi. Hasil area prospek berada dari arah barat daya hingga ke tengah lokasi pengukuran menerus ke utara. Rekomendasi pengeboran di sekitar daerah *outflow* dengan kedalaman sekitar 1.8 km dekat dengan zona patahan yang mempunyai permeabilitas yang lebih besar untuk mendapatkan fluida panasnya.

Kata kunci: Area prospek panasbumi Lili, *moderate to high temperature geothermal system*, *Magnetotelluric*, pemodelan sistem panasbumi, potensi

## ***ABSTRACT***

Name : Tri Virgantoro Salahudin Kadir  
Study Program : Geophysics  
Title : MAGNETOTELLURIC (MT) METHOD FOR  
GEOHERMAL EXPLORATION IN LILI, WEST  
CELEBES WITH SUPPORTING DATA GRAVITY  
METHOD

Geothermal prospect area in Lili, West Celebes, Indonesia is one of the prospect area in Indonesia associated by volcanic activity which happened since tertiary. This volcanic activity is predicted as undersea volcano which grown become to volcano quaternary. This geothermal prospect area has chloride and bicarbonate hot springs. Based on geothermometry calculation the geothermal prospect area of Lili has temperature 189-201 °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 other geophysics methods were used such as gravity, geomagnetic, and geoelectric method as supporting data. 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 Mat-lab and Site to site 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, the prospect area is exist in south west until center of measurement area. Pattern of this zone still continue to the north of measurement area. In addition, drilling recommendation is proposed around the outflow in Lili with depth at 1.8 km near the fault zone to get the hot fluid.

Keyword: Lili geothermal prospect area, 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 .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR DIAGRAM .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Batasan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Metodologi Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Metode <i>Magnetotelluric</i> .....	6
2.1.1 Sumber Sinyal MT .....	6
2.1.1.1 Sumber Sinyal MT Frekuensi Tinggi .....	8
2.1.1.2 Sumber Sinyal MT Frekuensi Rendah .....	9
2.1.1.3 Sumber Sinyal <i>Noise</i> pada MT .....	13
2.1.2 Prinsip Dasar Penjalaran Gelombang EM pada MT ....	15
2.1.3 Mode Pengukuran Metode MT .....	19
2.3.1 Mode TE ( <i>Transverse Electric</i> ) .....	19
2.3.2 Mode TM ( <i>Transverse Magnetic</i> ) .....	20
2.1.4 Efek Pergeseran Statik ( <i>Static Shift Effect</i> ) .....	21
2.2 Sistem Panasbumi .....	22
2.2.1 Skema Sistem Panasbumi .....	22
2.2.2 Klasifikasi Sistem Panasbumi .....	24
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Proses Akuisisi Data .....	25
3.1.1 Lokasi Pengukuran .....	25
3.1.2 Peralatan Akuisisi MT .....	26
3.1.3 Pengaturan Alat .....	28
3.1.4 Proses Perekaman Data .....	31
3.2 Pengolahan Data .....	32
3.2.1 Pemilihan ( <i>Filtering</i> ) Data .....	33
3.2.2 <i>Site to Site Referense</i> .....	35

3.2.3	Rotasi .....	36
3.3.4	Koreksi Efek Pergeseran Statik .....	38
<b>BAB IV</b>	<b>DATA PENDUKUNG .....</b>	<b>40</b>
4.1	Data Geologi .....	41
4.2	Data Geokimia .....	45
<b>BAB V</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>51</b>
5.1	Pemodelan Metode Gravitasi .....	55
5.2	Pemodelan Metode MT .....	55
5.2.1	Model Dua Dimensi .....	55
5.2.2	Model Tiga Dimensi .....	58
5.3	Potensi Reservoir .....	64
5.3	Rekomendasi Pengeboran .....	65
<b>BAB VI</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>66</b>
6.1	Kesimpulan .....	66
6.2	Saran .....	67
<b>DAFTAR ACUAN</b>	<b>.....</b>	<b>68</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>

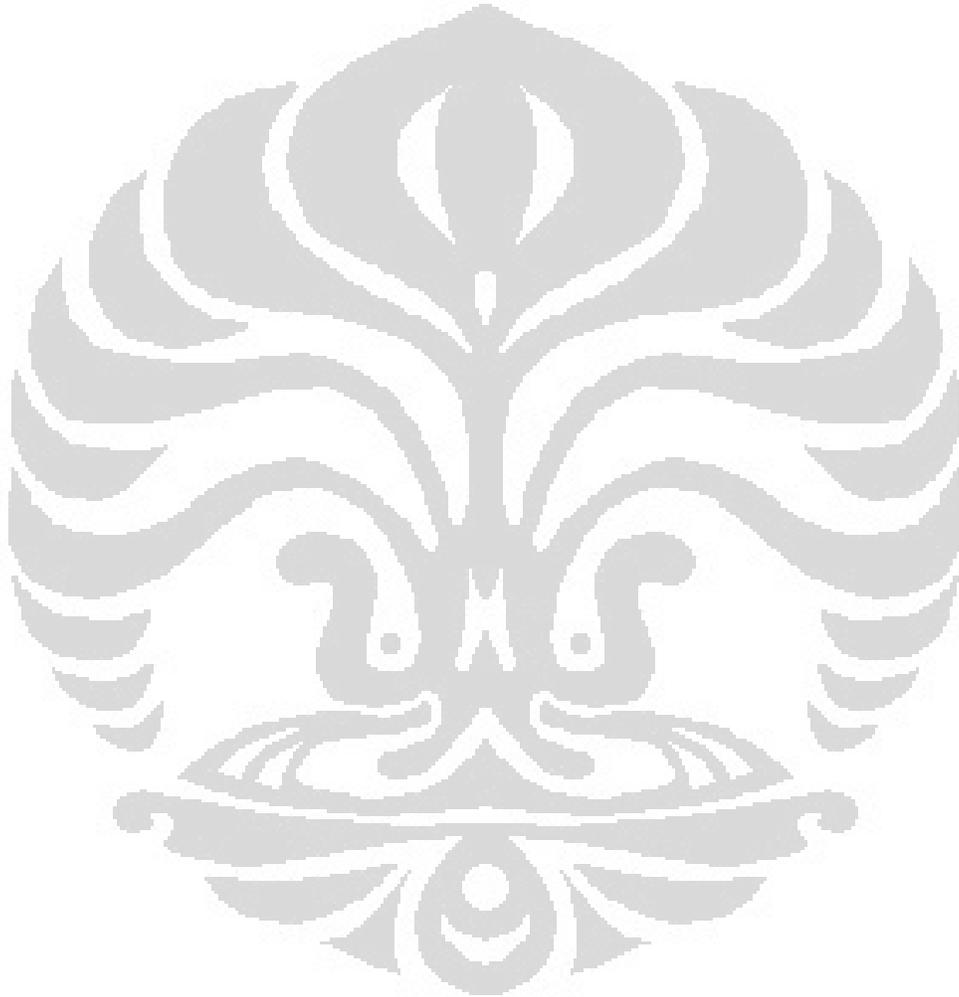
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Spektrum $I/f$ sumber medan magnet alami .....	7
Gambar 2.2	<i>Lightning activity</i> (Aktivitas petir) .....	8
Gambar 2.3	Sinyal data MT pada frekuensi tinggi .....	9
Gambar 2.4	Proses terbentuknya sinyal frekuensi rendah .....	10
Gambar 2.5	Siklus matahari .....	11
Gambar 2.6	Aurora .....	11
Gambar 2.7	Sinyal MT frekuensi rendah yang dihasilkan oleh <i>magnetosphere resonance</i> .....	12
Gambar 2.8	Sinyal MT frekuensi rendah yang dihasilkan oleh <i>magnetic storm</i> .....	13
Gambar 2.9	Noise pada data MT pada frekuensi tinggi .....	14
Gambar 2.10	Spektrum medan magnet alami dan <i>dead band</i> .....	15
Gambar 2.11	Proses interaksi gelombang EM dengan bumi .....	16
Gambar 2.12	TE mode .....	19
Gambar 2.13	<i>Pseudosection</i> pada TE mode .....	20
Gambar 2.14	TM mode .....	20
Gambar 2.15	<i>Pseudosection</i> pada TM mode .....	21
Gambar 2.16	Sistem panasbumi .....	22
Gambar 2.17	Skema sistem panasbumi .....	23
Gambar 3.1a	Lokasi Pengukuran MT .....	25
Gambar 3.1b	Lokasi pengukuran MT .....	26
Gambar 3.2	Peralatan utama MT .....	28
Gambar 3.3	Pengaturan proses kalibrasi .....	29
Gambar 3.4	<i>Lay out</i> pengukuran metode MT .....	30
Gambar 3.5	Pengaturan proses perekaman data MT .....	31
Gambar 3.6	Contoh perekaman data mentah hasil perekaman MT .....	33
Gambar 3.7a	Data dan kurva sebelum koreksi .....	34
Gambar 3.7b	Data dan kurva setelah koreksi .....	34
Gambar 3.8a	Data dan kurva sebelum melakukan <i>site to site reference</i> .....	35
Gambar 3.8b	Data dan kurva setelah melakukan <i>site to site reference</i> .....	36

Gambar 3.9a	Kurva Sebelum ditambahkan efek rotasi .....	37
Gambar 3.9b	Kurva Sesudah ditambahkan efek rotasi .....	37
Gambar 3.10a	Kurva sebelum koreksi statik .....	38
Gambar 3.10b	Kurva setelah koreksi statik .....	39
Gambar 4.1	Peta lokasi penelitian daerah panasbumi Polewali .....	40
Gambar 4.2	Peta geologi regional dan daerah penelitian daerah panasbumi Polewali .....	43
Gambar 4.3	Peta geologi daerah panasbumi Lili .....	45
Gambar 4.4	Manifestasi air panas Lili-Sepporaki .....	46
Gambar 4.5	Manifestasi air panas Katimbang-Matangnga .....	48
Gambar 5.1	Peta anomali bouguer data gravitasi daerah Lili .....	52
Gambar 5.2	Peta anomali bouguer data gravitasi daerah Lili .....	53
Gambar 5.3	Pemodelan anomali persebaran densitas .....	54
Gambar 5.4	Lintasan inversi dengan menggunakan WinGlink .....	56
Gambar 5.5a	Hasil inversi lintasan A .....	56
Gambar 5.5b	Hasil inversi lintasan B .....	57
Gambar 5.5c	Hasil inversi lintasan C .....	57
Gambar 5.6a	<i>Slicing</i> 2-D arah utara-selatan .....	59
Gambar 5.6b	<i>Slicing</i> 2-D arah utara-selatan dan timur-barat .....	59
Gambar 5.6c	<i>Cubic slice</i> .....	60
Gambar 5.7	<i>Cubic Slice</i> persebaran <i>heat source</i> , <i>reservoir</i> , dan <i>clay cap</i> ...	62
Gambar 5.8a	Pemodelan anomali persebaran densitas .....	63
Gambar 5.8b	Pemodelan data MT .....	63
Gambar 5.8c	Konseptual model daerah prospek panasbumi Lili .....	63
Gambar 5.9	Perkiraan luas dan potensi reservoir .....	64
Gambar 5.10	Rekomendasi lokasi pengeboran .....	65

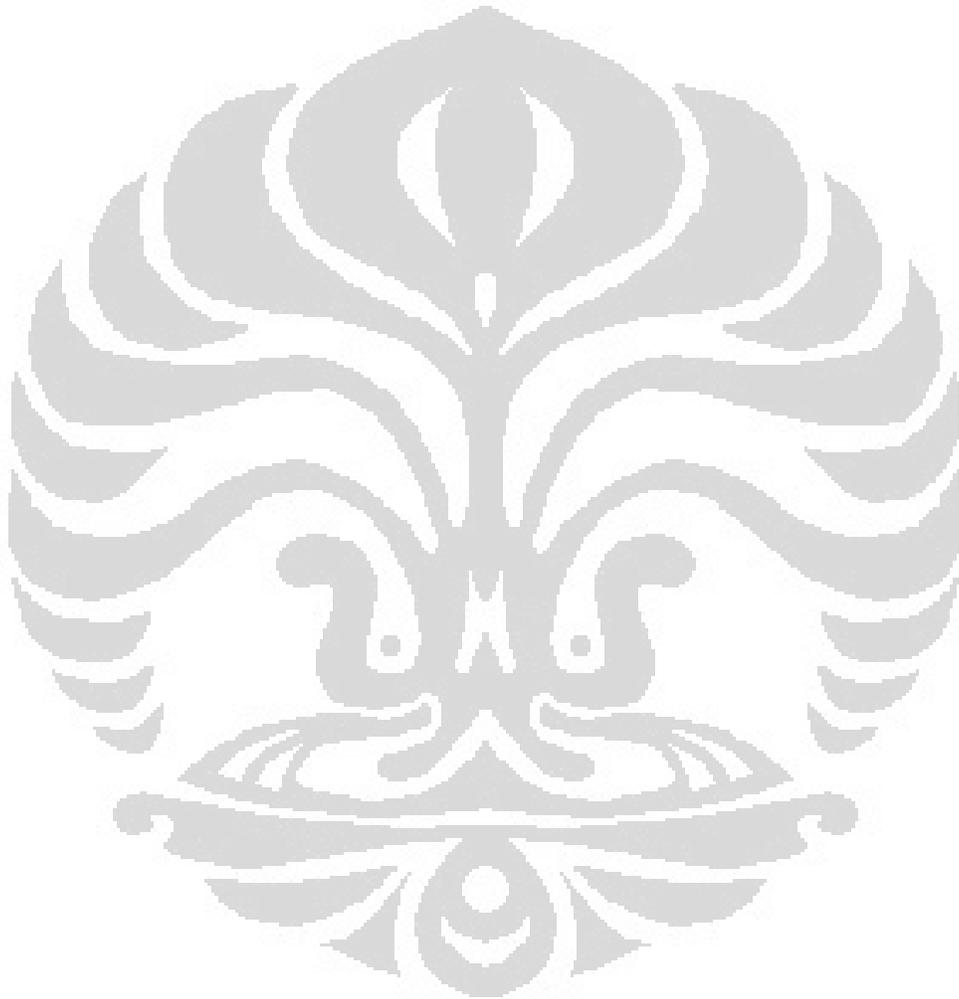
## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi sistem panasbumi berdasarkan temperature .....	24
-----------	--	----



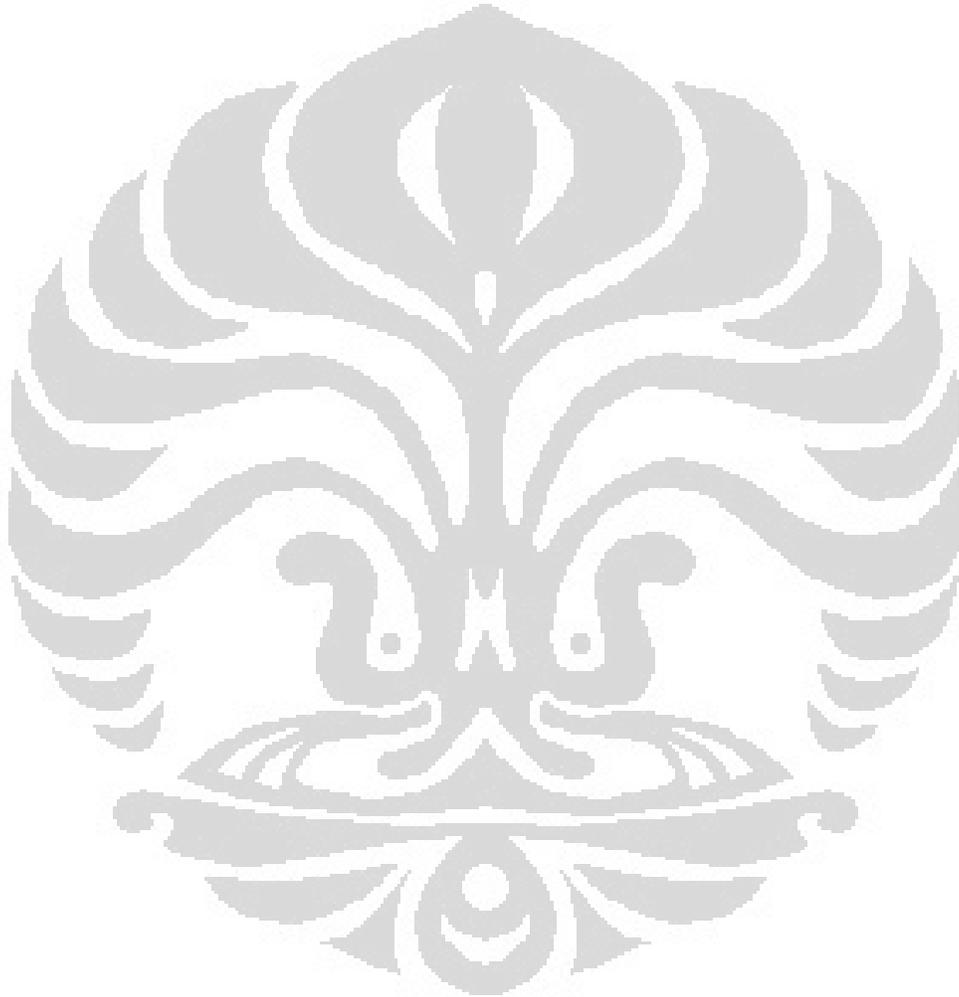
## DAFTAR DIAGRAM

Diagram 4.1	Diagram segitiga Cl-SO <sub>4</sub> -CO <sub>3</sub> .....	49
Diagram 4.2	Diagram segitiga Na-K-Mg .....	49
Diagram 4.3	Diagram segitiga Cl-Li-B .....	50



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Kurva <i>sounding</i> MT .....	70
------------	--------------------------------	----



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Masalah kelistrikan menjadi salah satu isu yang banyak diperbincangkan dewasa ini. Ketergantungan kita terhadap bahan bakar fosil memang tidak dapat terbantahkan, Selain masalah kebutuhan listrik, masalah polusi hasil industri pembakaran bahan bakar fosil juga menjadi masalah yang terus diperbincangkan. Sekarang ini dibutuhkan energi yang ramah lingkungan serta berguna bagi masyarakat banyak dalam jumlah yang cukup besar. Salah satunya adalah energi panasbumi.

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber daya alam yang melimpah, khususnya energi panasbumi. Mengingat wilayah Indonesia merupakan daerah pertemuan lempeng-lempeng di dunia, maka potensi akan gunung api dan energi panasbumi sangatlah besar. Untuk itu, sekarang ini untuk mengatasi masalah kelistrikan di Indonesia mulai dikembangkan sumber energi ini sebagai salah satu sumber energi yang sangat penting sebagai cadangan sumber energi di masa depan serta dalam mengatasi masalah pendistribusian listrik di Indonesia.

Salah satu dari sekian banyak daerah prospek panasbumi yang ada di Indonesia adalah area prospek panasbumi Lili yang berada di bagian barat pulau Sulawesi. Adanya beberapa manifestasi di permukaan yang di daerah prospek ini merupakan salah satu ciri dari adanya sistem panasbumi di bawahnya. Terdapat 3 manifestasi yang cukup besar di daerah ini, yaitu berupa *hot spring* atau mata air panas pada daerah Lili-Sepporraki yang bersuhu 98°C dan 95°C dan daerah Matangnga yang bersuhu 60.9°C. Pada mata air panas daerah Lili-Sepporraki terdapat sinter silika, sedikit *buble* gas, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau dengan pH 8.6-8.8. Sedangkan untuk daerah Matangnga tidak terdapat sinter silika, tidak ada *buble* gas, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau dengan pH 7.20 (PSDG.2010).

Dari data-data Geokimia tahun 2010 yang ada, diperkirakan temperatur daerah prospek Lili termasuk ke dalam tipe *moderate to high* dengan temperatur *reservoir* 189-201°C (PSDG.2010).

Namun, Model konseptual dari sistem panasbumi daerah prospek Lili ini belum dapat dipastikan. Sebelumnya pada tahun 2010 telah dilakukan survey geofisika terpadu dengan menggunakan metode geolistrik, gravitasi, dan magnetik. Dari hasil survey tersebut diketahui bahwa daerah prospek ada di sekitar daerah Lili. Meskipun demikian, dengan melihat adanya beberapa manifestasi dengan jarak dan penyebaran yang cukup jauh maka hasil survey tersebut perlu diperkuat dengan metode lain yang dapat memetakan kondisi bawah permukaan dengan lebih baik, yaitu metode *magnetotelluric*.

Survey dengan menggunakan metode *magnetotelluric* ini dilakukan untuk mengetahui lokasi dan batas *reservoir* panasbumi daerah tersebut serta untuk menentukan bagaimana model konseptual terpadu dari sistem panasbumi ini. Hal ini dilakukan karena dengan metode *magnetotelluric* dapat mengetahui penyebaran batuan di bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitasnya dengan jangkauan penetrasi yang jauh lebih dalam (>10km) dibanding dengan metode geolistrik, sehingga data yang sebelumnya dapat dikuatkan dengan menggabungkan data *magnetotelluric* ini. Dengan mengetahui model konseptual, luas dan batas *reservoir* panasbumi maka memungkinkan juga mengetahui potensi serta kapasitas yang akan dikembangkan nanti

## 1.2 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana memahami tentang proses akuisis metode *magnetotelluric* pada eksplorasi panasbumi serta bagaimana membuat model sistem panasbumi di suatu area prospek dari data *magnetotelluric* dengan data pendukung metode gravitasi.

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengusai penggunaan peralatan MT di lapangan dengan baik.
2. Mengetahui tahapan pengambilan data, pengolahan data, dan interpretasi data MT dengan baik dan benar.

3. Melakukan *noise removal* pada data MT dengan menggunakan *site to site reference*.
4. Menganalisis hasil pemodelan 2D dan 3D dengan metode MT dengan data pendukung metode geofisika lainnya, yaitu metode gravitasi
5. Menentukan keberadaan zona serta luas dari zona *reservoir* panasbumi pada daerah tersebut..
6. Membuat konseptual model terpadu sistem panasbumi 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 panasbumi Lili yang berhubungan dengan faktor ekonomis dari area tersebut untuk dieksploitasi serta dapat membantu dalam merekomendasikan lokasi pengeboran pada daerah prospek panasbumi tersebut.

#### 1.5 Metodologi Penelitian

Secara garis besar, metodologi penelitian yang akan dilakukan pada tugas akhir ini dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama, yaitu proses akuisisi data *magnetotelluric* yang dilakukan di daerah Lili, Sulawesi Barat pada 13 Juli 2011 hingga 5 Agustus 2011 yang kemudian dilanjutkan dengan tahapan kedua yaitu pengolahan data yang telah diperoleh pada saat pengukuran dengan mengubah data input *time series* menjadi resistivitas semu dan fase dengan menggunakan *software* SSMT 2000 dan MTeditor. Pada tahapan ini juga dilakukan pengolahan data ulang untuk metode gravitasi yang merupakan data pendukung pada penelitian ini.

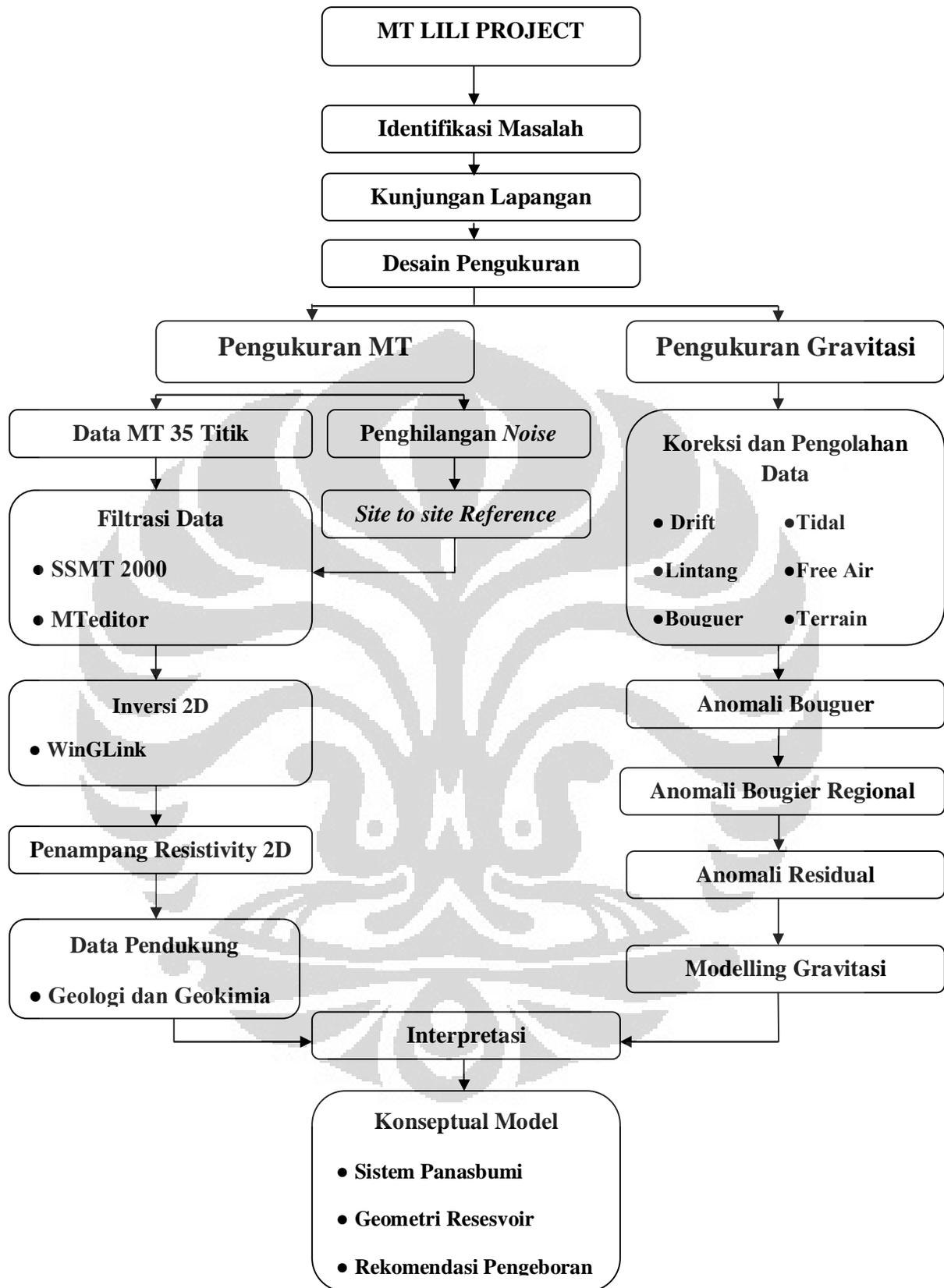
Pada penelitian ini tidak terdapat *remote reference* yang merupakan suatu metode untuk mengoreksi *noise* dari data yang diperoleh. Tidak adanya *remote reference* pada penelitian ini disebabkan karena keterbatasan alat yang dimiliki. Meskipun demikian, daerah ini cukup ideal dalam pengukuran metode *magnetotelluric* karena sangat sedikit *noise* yang disebabkan tidak adanya listrik pada hampir keseluruhan daerah pengukuran. Namun, dalam mengurangi atau

megoreksi *noise* pada daerah pengukuran, dilakukan metode lain sebagai *noise removal*, yaitu *site to site reference*.

Setelah semua data pengukuran dikonversi dalam bentuk resistivitas semu dan fase dan telah melalui proses editing maka dapat dilakukan proses inversi pada data tersebut dengan menggunakan *software* WinGlink sehingga akan didapatkan nilai resistivitas batuan pada kedalaman-kedalaman tertentu. Setelah proses ini selesai barulah dilakukan analisa dan interpretasi data dengan model 3D dengan menggunakan menggunakan *software* Geo Slicer X™. Setelah itu kita dapat membuat model konseptual dari sistem geothermal pada daerah pengukuran. Dengan membuat model konseptual maka akan diketahui luas dan batasan serta kapasitas dari sistem panasbumi tersebut

Selain data *magnetotelluric*, dalam penelitian ini juga digunakan berbagai data pendukung yang dapat menguatkan analisis penulis dalam membuat model konseptual dari sistem panasbumi daerah ini seperti data metode gravitasi, data geologi dan geokimia. Untuk data gravitasi, akan dibuat modeling secara tiga dimensi guna mensinkronasi model konseptual yang akan dibuat dengan data-data *magnetotelluric* dengan modeling gravitasi sehingga model konseptual yang akan didapatkan akan lebih akurat dalam menggambarkan kondisi bawah permukaan daerah prospek Lili.

Seluruh metodologi penelitian dijelaskan pada diagram alir penelitian yang digambarkan pada gambar 1.1 di bawah ini



Gambar 1.1 Diagram alir penelitian

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Metode *Magnetotelluric***

Metode *magnetotelluric* (MT) adalah salah satu metode geofisika yang menggunakan sumber sinyal berupa gelombang elektromagnetik (EM). Metode ini merupakan metode eksplorasi pasif yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik alami yang ada di ionosfer yang kemudian akan berinteraksi dengan medium konduktor (bumi) yang mempunyai respon nilai resistivitas yang bervariasi. Respon nilai resistivitas yang bervariasi ini yang nantinya dapat menggambarkan bagaimana kondisi batuan di bawah permukaan bumi.

Metode MT dapat menggambarkan kondisi struktur batuan di bawah permukaan hingga kedalaman hingga ratusan kilometer. Hal ini disebabkan karena metode MT menggunakan sumber sinyal dengan nilai frekuensi yang sangat kecil sehingga kemampuan gelombang untuk melakukan penetrasi menjadi lebih tinggi untuk mencapai kedalaman tertentu.

Dalam eksplorasi panasbumi, metode MT merupakan salah satu metode geofisika yang cukup efektif apabila dikaitkan dengan hasil akhir dari eksplorasi panas bumi itu sendiri. Hal ini disebabkan karena metode MT dapat membantu dalam menjelaskan serta menentukan bagaimana model konseptual dari sistem panasbumi berdasarkan pola persebaran resistivitasnya. Selain itu, dengan mengetahui model konseptual juga dapat diperkirakan potensi dari sistem panasbumi dengan melihat geometri dari luas reservoir. Metode ini juga dapat membantu memperkirakan lokasi titik pengeboran pada daerah prospek yang biasanya berupa patahan dengan melihat kontras nilai resistivitas dari sistem panasbumi tersebut sehingga kemungkinan keberhasilan pengeboran lebih meningkat.

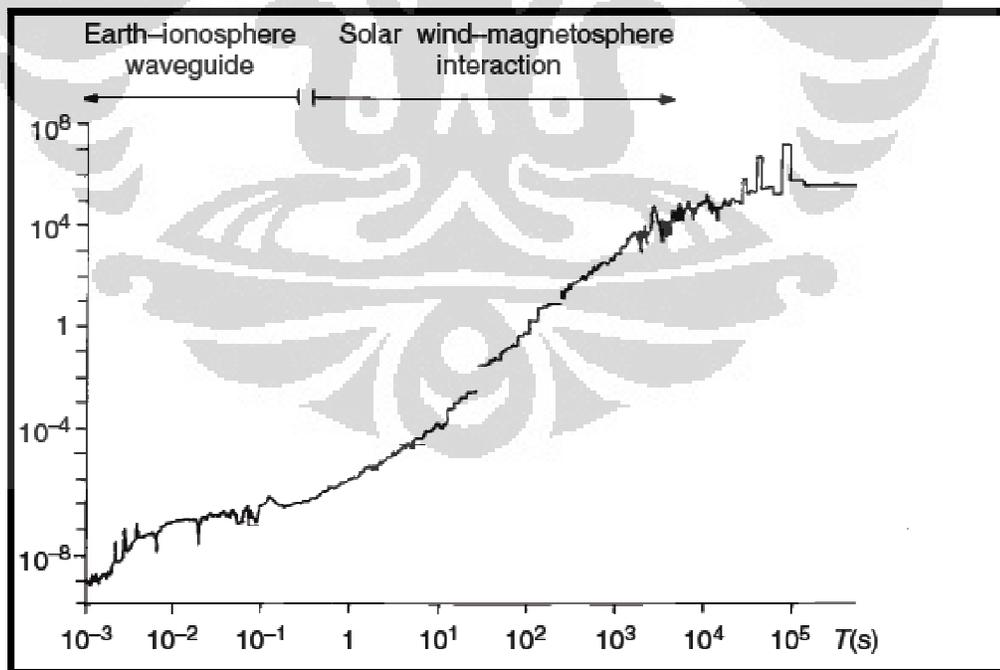
##### **2.1.1 Sumber Sinyal MT**

Dalam metode MT, medan magnetik yang terukur di permukaan bumi merupakan sumber sinyal alami yang berasal dari dalam maupun luar bumi dalam

rentang frekuensi yang bervariasi. Untuk komponen medan magnetik yang berasal dari dalam bumi disebabkan oleh mantel bumi terhadap inti bumi yang disebabkan oleh arus konveksi serta medan-medan magnet yang berada di kerak bumi, sedangkan untuk komponen sumber medan magnet yang berasal dari luar bumi berasal dari medan magnet yang dihasilkan di atmosfer dan magnetosfer (Unsworth, 2008).

Kedua sumber medan magnetik tersebut mempunyai nilai yang bervariasi terhadap waktu yang memungkinkan dapat menghasilkan sumber sinyal EM yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber sinyal dalam eksplorasi MT. Namun, variasi yang dihasilkan dari sumber sinyal yang berasal dari dalam bumi sangatlah kecil dan dalam frekuensi yang sangat rendah sehingga sumber sinyal yang digunakan hanyalah sumber sinyal yang berasal dari komponen luar bumi karena mempunyai rentang frekuensi di atas dan di bawah 1 Hz (Unsworth, 2008).

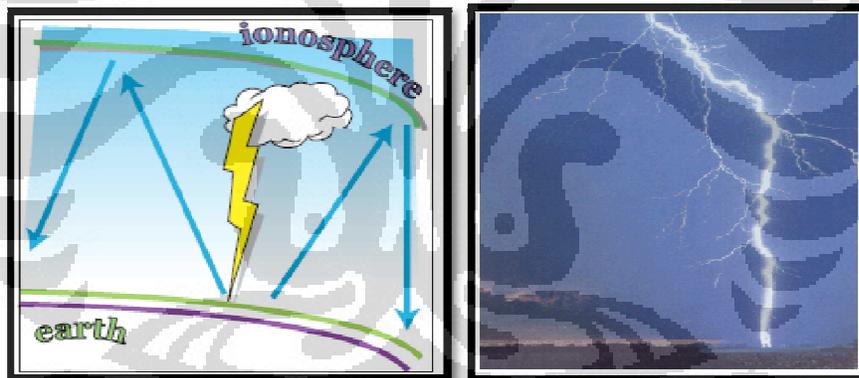
Sumber sinyal yang digunakan dalam metode MT akan dijelaskan pada gambar 2.1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa untuk nilai frekuensi tinggi dihasilkan oleh interaksi ion yang berada di ionosfer sedangkan untuk frekuensi yang lebih rendah dihasilkan oleh *solar wind* yang terjadi di magnetosfer.



Gambar 2.1 Spektrum – sumber medan magnet alami [Junge, 1994]

### 2.1.1.1 Sumber Sinyal MT Frekuensi Tinggi ( $f > 1\text{Hz}$ )

Untuk frekuensi di atas 1 Hz, sebagian besar sumber sinyal MT berasal dari *lightning activity* (gambar 2.2) yang terjadi di ionosfer pada seluruh bagian bumi yang kemudian akan menjalar hingga permukaan bumi. Pada saat *lightning* ini mencapai permukaan bumi, dengan seketika itu pula medan magnet bumi mengalami perubahan. Apabila lightning ini mencapai permukaan bumi berulang kali maka medan magnet di bumi akan terus – menerus mengalami perubahan. Sehingga akan menghasilkan fluks magnet yang selanjutnya fluks magnet ini akan menginduksi arus listrik di bawah permukaan bumi sertamenghasilkan medan magnet sekunder yang kemudian terekam pada alat MT. Untuk frekuensi yang lebih tinggi hingga mencapai 2 KHz sinyal tidak dapat merambat dengan baik karena amplitude yang dihasilkan sinyal tersebut sangatlah kecil, tetapi untuk frekuensi yang lebih besar lagi, yaitu di atas 5 KHz sinyal EM akan dapat menjalar dengan baik kembali (Unsworth, 2008).

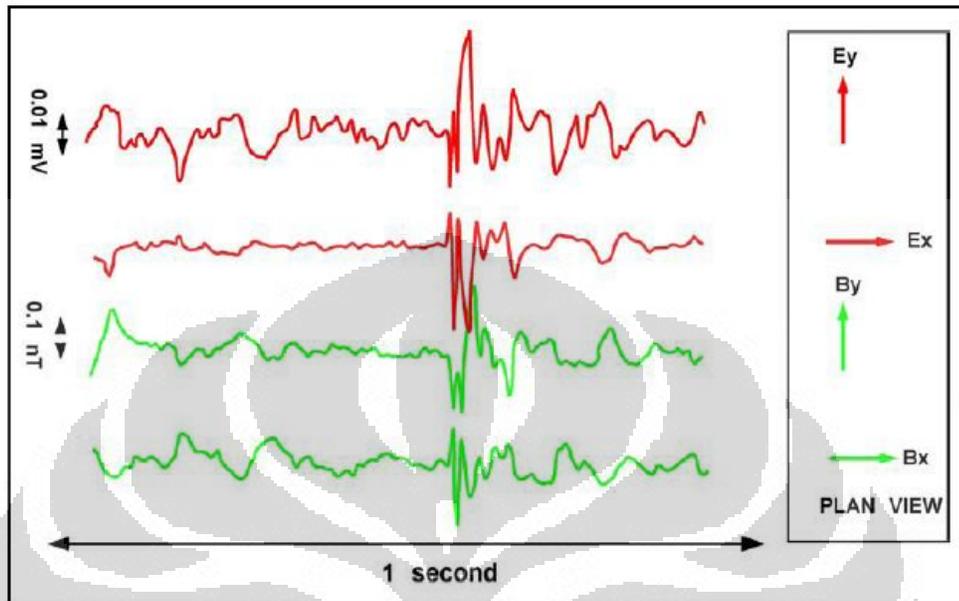


Gambar 2.2 Aktivitas petir [Rusbiyanto, 2011]

Pada metode MT, untuk frekuensi di atas 1 Hz sering dijumpai *noise* yang menyebabkan berkurangnya kualitas data yang didapatkan pada saat pengukuran yang dapat berimbas pada saat proses interpretasi. *Noise* yang didapatkan dapat terjadi pada nilai medan listrik maupun medan magnet. Untuk pembahasan mengenai jenis-jenis *noise* serta bagaimana cara mereduksi dan menghilangkan efek *noise* tersebut akan dibahas pada subbab berikutnya.

Gambar 2.3 di bawah ini menunjukkan bagaimana data sinyal yang tertangkap pada frekuensi tinggi. Terlihat bahwa sinyal yang dihasilkan pada

frekuensi tinggi tidak membentuk pola yang baik karena adanya efek *noise* yang ikut terekam.

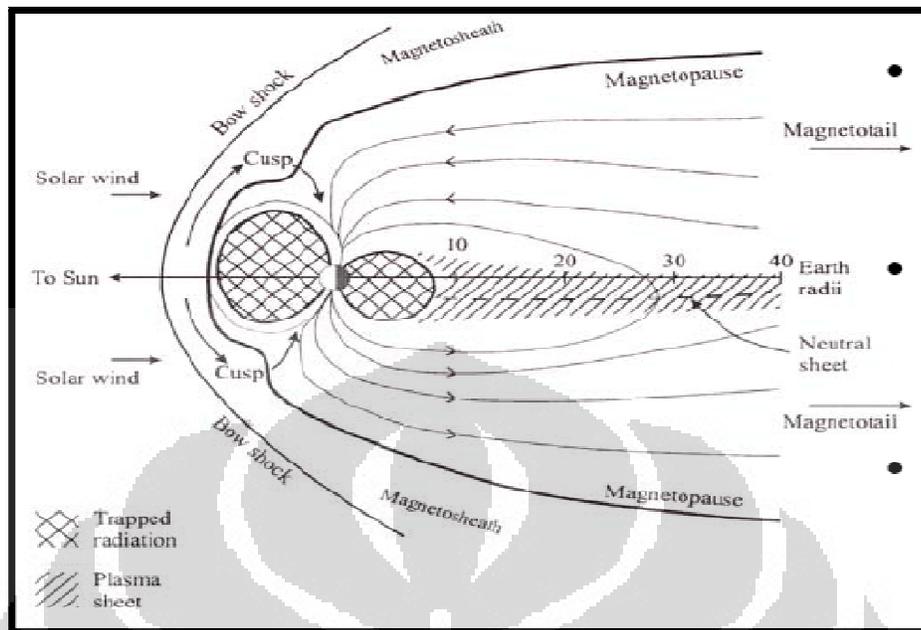


Gambar 2.3 Sinyal data MT pada frekuensi tinggi [Unsworth, 2008]

### 2.1.1.2 Sumber Sinyal MT Frekuensi Rendah ( $f < 1\text{Hz}$ )

Untuk rentang frekuensi ini, sumber sinyal MT dihasilkan di bagian magnetosfer melalui fenomena alam yang disebut *solar wind*. *Solar wind* merupakan suatu fenomena pergerakan ion H dan He yang kemudian berinteraksi dengan medan magnet bumi. Interaksi dengan medan magnet bumi menyebabkan *solar wind* ini terdefleksi sehingga terbentuklah magnetosfer (Unsworth, 2008).

Perubahan nilai medan magnet di bagian magnetosfer dapat menyebabkan terjadinya proses induksi arus listrik yang cukup besar di bagian ionosfer. Seperti yang telah diketahui, bahwa ionosfer merupakan suatu lapisan yang berada 50-1500 km di atas permukaan bumi yang merupakan daerah di mana plasma dengan nilai konduktivitas yang sangat besar berada. Perubahan arus yang terjadi di ionosfer yang disebabkan oleh aktivitas di magnetosfer juga akan menyebabkan perubahan medan magnet yang terukur di permukaan bumi.



Gambar 2.4 Proses terbentuknya sinyal frekuensi rendah [Unsworth, 2008]

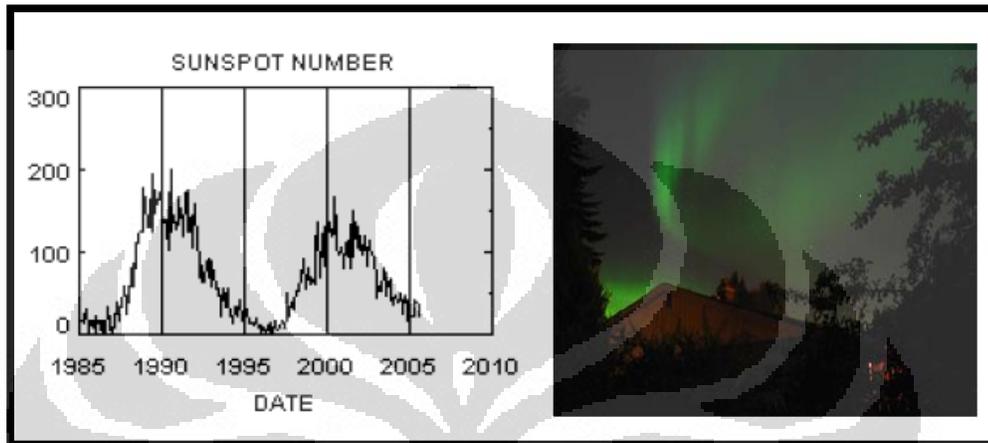
Aktivitas *solar wind* yang terjadi di magnetosfer mempunyai kondisi tertentu yang dapat mempengaruhi kondisi medan magnet bumi, yaitu :

1. *Solar wind* berada dalam keadaan stabil atau tetap. Pada keadaan ini medan magnet bumi akan mengalami perubahan atau variasi harian yang disebabkan pengaruh rotasi bumi di dalam sistem arus magnetosfer dan ionosfer atau yang biasa disebut *solar quite day variation* (sq). Amplitudo dari variasi harian ini mempunyai nilai antara 10-25 nT dan bervariasi pada latitude tertentu (Unsworth, 2008).
2. *Solar wind* berada dalam keadaan aktif. Pada keadaan ini dapat dikatakan bahwa medan magnet bumi mengalami gangguan karena terciptanya badai magnetik. Kondisi ini terjadi pada saat terjadi perubahan sistem arus selama beberapa hari yang menyebabkan terjadinya perubahan medan magnet bumi hingga mencapai 100nT (Unsworth, 2008).

Aktivitas matahari merupakan siklus sebelas tahun yang mempunyai kondisi maksimum atau minimum pada waktu tertentu. Pada saat aktivitas matahari berada pada kondisi maksimum maka akan menghasilkan medan magnet

luar bumi yang sangat besar yang berimbas pada terciptanya badai magnetik serta adanya aurora di bagian bumi utara dan selatan.

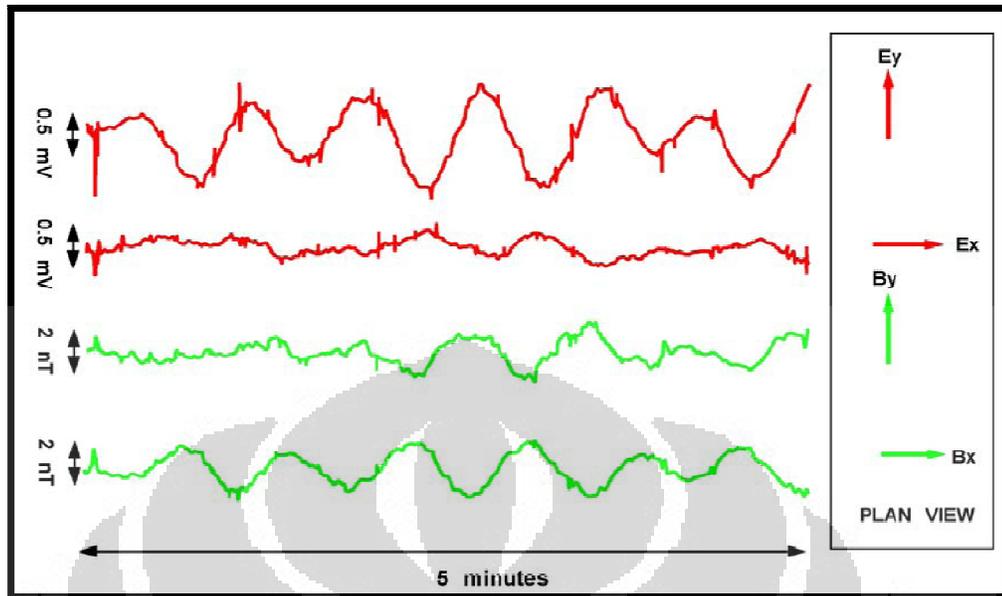
Pada gambar 2.5 merupakan siklus sebelas tahun aktivitas matahari yang sangat berpengaruh pada medan magnet bumi sedangkan gambar 2.6 merupakan hasil dari aktivitas siklus matahari pada saat dalam aktivitas maksimum.



Gambar 2.5 Siklus matahari [Unsworth 2008]

Gambar 2.6 Aurora [Edmon,2003]

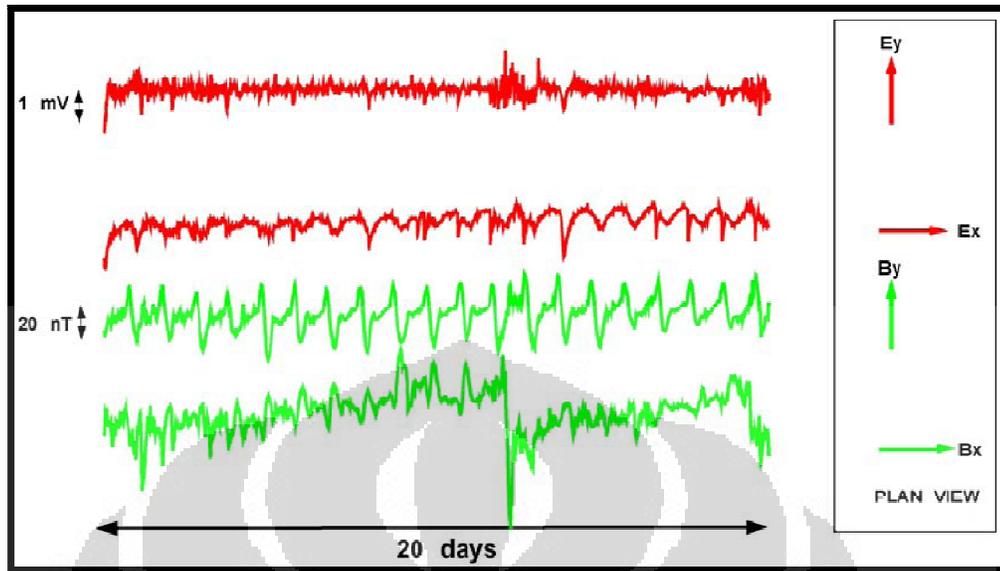
Untuk frekuensi di bawah 1 Hz, sebagian besar sinyal MT berasal dari perubahan atau fluktuasi medan magnet bumi yang disebabkan perubahan intensitas pada magnetosfer akibat efek *solar wind*. Pada gambar 2.7 merupakan plot data hasil perekaman medan listrik dan medan magnet pada frekuensi rendah yang disebabkan oleh resonansi gelombang di magnetosfer. Sinyal tersebut merupakan sinyal yang dihasilkan dari osilasi aktivitas gelombang yang berada di magnetosfer. Dari gambar terlihat bahwa perekaman dilakukan selama 5 menit dan pola yang dihasilkan hampir menyerupai pola gelombang sinusoidal. Namun, terdapat beberapa *short spike* pada sinyal tersebut. Pola *short spike* tersebut kemungkinan dihasilkan dari aktivitas petir yang mempunyai frekuensi yang lebih tinggi dari sinyal yang lainnya.



Gambar 2.7 Sinyal MT frekuensi rendah yang dihasilkan oleh *magnetosphere resonance* [Unsworth, 2008]

Osilasi pada frekuensi yang sangat rendah yang terjadi di magnetosfer dapat dihasilkan oleh perubahan intensitas *solar wind* yang cukup besar. Fenomena ini terjadi pada saat *sun spot* terjadi dengan intensitas yang cukup tinggi sehingga menghasilkan lidah api yang cukup besar. Variasi medan magnet yang terjadi pada masa ini akibat efek rotasi bumi terhadap *solar wind* (Unsworth, 2008).

Pada Gambar 2.8 terlihat perekaman data sinyal MT yang dilakukan selama 20 hari. Dari plot data tersebut terlihat bahwa sinyal yang didapat dihasilkan pada saat *sunspot* tidak terlalu besar. Kemudian diketahui bahwa pada hari ke 13 terjadi badai magnetik yang menyebabkan perubahan sinyal hingga mencapai 100 nT (Unsworth 2008).

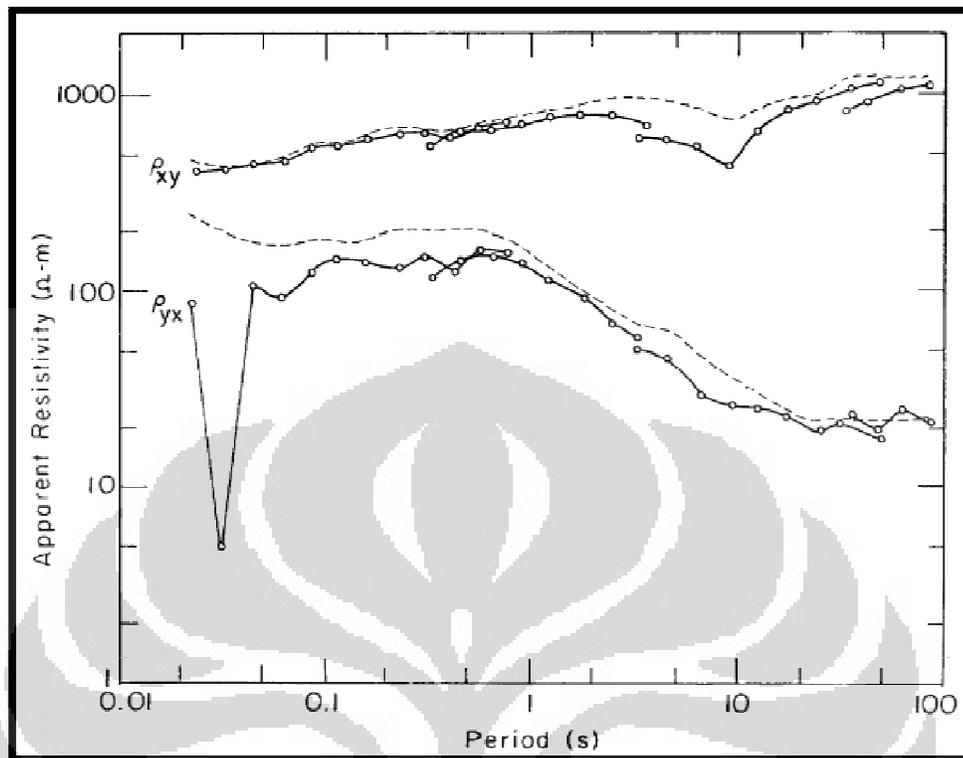


Gambar 2.8 Sinyal MT frekuensi rendah yang dihasilkan oleh *magnetic storm* [Unsworth, 2008]

### 2.1.1.3 Sumber Sinyal *Noise* pada MT

Sumber *noise* pada metode MT dapat berupa sumber *noise* alami maupun buatan. *Noise* ini dapat menyebabkan pola yang dihasilkan dari data MT menjadi tidak beraturan atau diskontinuitas. Salah satu contoh *noise* buatan adalah sumber *noise* yang berasal dari sumber-sumber medan listrik atau magnet yang berasal dari lingkungan sekitar seperti jaringan listrik, alat elektronik, tegangan tinggi, *ground motion* (pergerakan tanah akibat aktivitas di lingkungan sekitar) (Gamble, 1979).

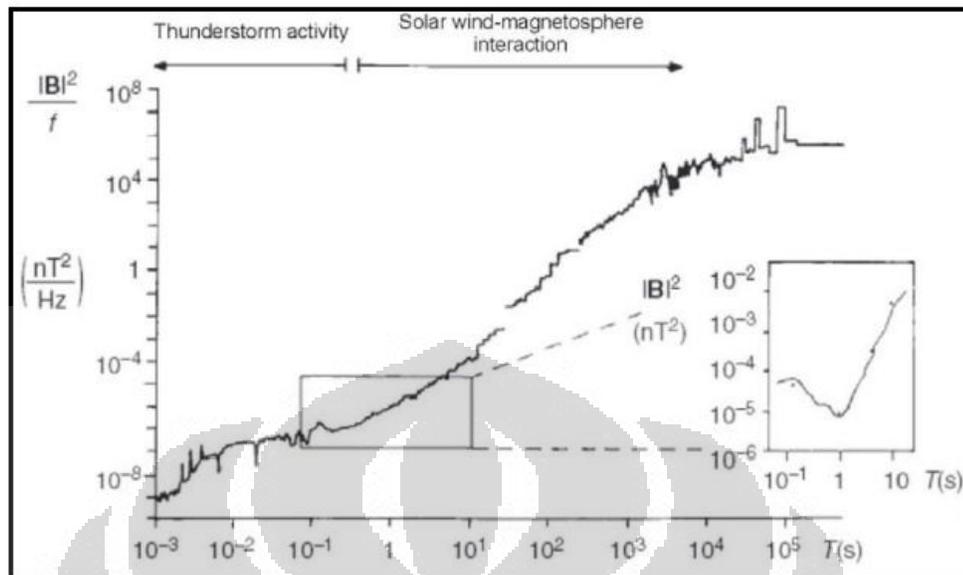
Pada gambar 2.9 merupakan contoh data MT yang terdapat *noise* di dalamnya. Terlihat bahwa pada frekuensi tinggi terdapat *large dip* yang kemungkinan disebabkan oleh generator yang digunakan untuk memberikan sumber listrik untuk alat MT (Gamble, 1979).



Gambar 2.9 *Noise* pada data MT pada frekuensi tinggi [Gamble, 1979]

Untuk *noise* alami atau yang terjadi karena proses alam adalah *noise* yang disebabkan akibat aktivitas dari *solar wind*. Hasil penelitian membuktikan bahwa pada frekuensi 0.5 sampai 5 Hz sinyal EM alami yang digunakan sebagai sumber sinyal MT mengalami pelemahan amplitudo yang juga akan melemahkan sinyal yang akan digunakan. Gambar 2.10 merupakan spektrum dari nilai medan magnetik alami. Terlihat bahwa pada rentang frekuensi 0.5 Hz sampai 5 Hz sinyal mengalami pelemahan atau disebut *dead band* (Castell, 2006).

Meskipun berbagai macam *noise* yang terjadi pada saat pengukuran MT sangat sulit sekali untuk dihindari, namun hal tersebut dapat diatasi dengan melakukan filter pada alat MT pada saat melakukan pengukuran maupun dengan menggunakan *remote reference* (Castell, 2006).

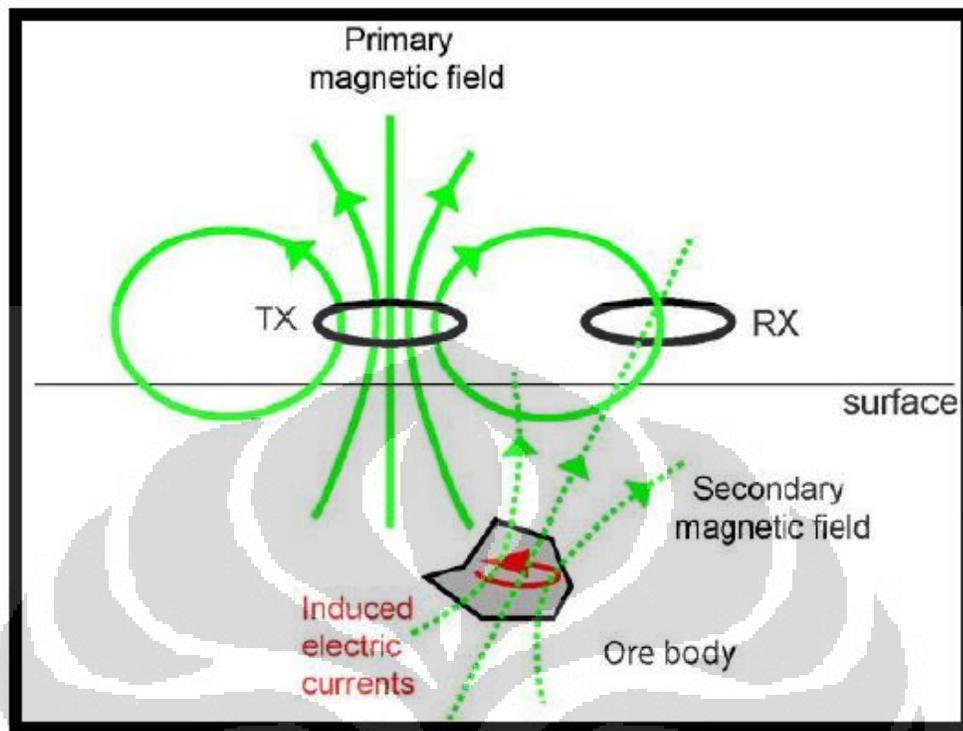


Gambar 2.10 Spektrum medan magnet alami dan *dead band* [Junge, 1994]

### 2.1.2 Prinsip Dasar Penjalaran Gelombang pada MT

Pada gambar 2.11 terlihat bagaimana proses penjalaran gelombang elektromagnetik yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai sumber sinyal pada saat pengukuran MT. Sumber-sumber medan magnet baik frekuensi tinggi maupun frekuensi rendah masuk ke dalam bumi sebagai bidang konduktor. Pada saat medan magnet merambat melalui bidang konduktor maka akan terjadi induksi yang menghasilkan arus yang disebut *eddie current*. Arus yang berputar pada saat melalui bidang konduktor akan menghasilkan medan magnet sekunder. Sumber medan magnet yang masuk ke dalam bumi atau *primary magnetic field* disimbolkan dengan Tx sedangkan *secondary magnetic field* yang dihasilkan dari *eddie current* disimbolkan dengan Rx.

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 kerestifan dari medium yang dilaluinya.



Gambar 2.11 Proses interaksi gelombang EM dengan bumi (Unsworth, 2008)

Untuk memahami metode Magnetotelurik, perlu diperhatikan prinsip gelombang datar yang datang di permukaan bumi. Resistivitas bumi lebih rendah dari atmosfer, oleh karena itu, sinyal *Electromagnetic* (EM) menjalar sebagai gelombang pada udara dan berdifusi di dalam bumi. Persamaan diferensial yang mendasar untuk menjelaskan perilaku gelombang EM diformulasikan pada persamaan Maxwell :

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$\bar{E}$  adalah kuat medan listrik (V/m),  $\bar{H}$  adalah kuat medan magnet,  $\bar{B}$  adalah rapat *flux* magnet (W/m<sup>2</sup>),  $\rho$  adalah rapat muatan (C/m<sup>3</sup>),  $\sigma$  adalah konduktivitas (S/m),  $\epsilon$  adalah konstanta dielektrik (F/m), karena  $\bar{J} = \bar{E} \sigma$  dan  $\bar{B} = \bar{H} \mu$ , persamaan (2.3) menjadi :

$$\nabla \times \bar{B} = \mu \bar{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.3a)$$

$\bar{J}$  adalah rapat arus (A/m<sup>2</sup>), dan  $\mu$  adalah permeabilitas magnetik (H/m). Nilai untuk ruang hampa  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m dan  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  H/m. Dengan menggunakan *curl* dari persamaan 2.4 dan disubstitusikan pada persamaan 2.3a, maka akan didapatkan persamaan diferensial orde kedua untuk  $\bar{E}$  menjadi :

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Pada lingkungan yang konduktif, arus konduksi mendominasi dan efek dari *displacement current* dapat diabaikan. Persamaan 2.5 dapat disederhanakan menghasilkan persamaan difusi menjadi :

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Bumi dapat diinterpretasikan sebagai lingkungan konduktif, jadi persamaan difusi dapat digunakan pada analisa data MT. Untuk sebuah gelombang EM dengan sinusoidal yang bervariasi terhadap waktu, kuat medan listrik dapat dituliskan sebagai  $\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t}$ , sehingga apabila disubstitusikan ke dalam persamaan (2.6) akan menghasilkan persamaan :

$$\nabla^2 \bar{E} + i\omega \mu \sigma \bar{E} = 0 \quad (2.7)$$

Energi elektromagnetik dapat bertransformasi menjadi panas seiring dengan perambatannya pada kedalaman tertentu. Pengurangan energi elektromagnetik ini terjadi secara eksponensial. Dengan memperhitungkan fenomena yang disebut atenuasi tersebut maka persamaan 2.7 dapat diubah menjadi :

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} + i\omega \mu \sigma \bar{E} = 0 \quad (2.7a)$$

Dengan  $\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz}$  dengan  $\bar{E}_0$  adalah kuat medan listrik pada permukaan bumi maka akan didapatkan persamaan lain yang merupakan modifikasi dari persamaan (2.7a) menjadi :

$$\bar{E} k^2 + i\omega \mu \sigma \bar{E} = 0 \quad (2.8)$$

Kemudian untuk penyelesaian variable  $k$  sendiri

$$k = \pm \sqrt{-i\omega \mu \sigma} \quad (2.9)$$

nilai  $k$  merupakan suatu bilangan kompleks yang menyatakan kondisi dari suatu medium. Jadi perambatan gelombang EM di dalam medium dapat dituliskan dengan persamaan

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} \quad (2.10)$$

Pada persamaan terakhir (2.10),  $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z}$  merupakan symbol peluruhan dari amplitude pada saat gelombang pada arah  $z$ , yang dikenal dengan istilah *skin depth*.

*Skin Depth* merupakan jarak ( $\delta$ ) sepanjang kuat medan listrik teratenuasi oleh  $1/e$  dari kuat medan listrik awal. Selama nilai  $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} = e^{-1}$  maka *skin depth* dapat dituliskan dengan

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.11)$$

atau dapat juga ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m) \quad (2.12)$$

Untuk medan magnet gelombang EM, dapat dicari dengan menggunakan cara yang sama. Perbandingan antara medan listrik dan medan magnet adalah sebagai berikut :

$$E_x = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (2.13)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (2.14)$$

Untuk pengukuran dengan  $E$  tegak lurus terhadap  $H$  maka akan didapatkan informasi mengenai resistivitas semu bumi pada permukaan dengan melihat rasio antara medan listrik dengan medan magnet yang disebut sebagai impedansi ( $Z$ ) dengan persamaan :

$$Z = \frac{E}{H} \quad (2.15)$$

dengan melihat persamaan (2.12) dan (2.13), maka impedansi  $Z_{xy}$  menjadi :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu_0\rho} \quad (2.16)$$

Resistivitas semu atau *apparent resistivity* dapat didapatkan dari persamaan di atas (2.16)

$$\frac{\rho}{2} \quad (2.17)$$

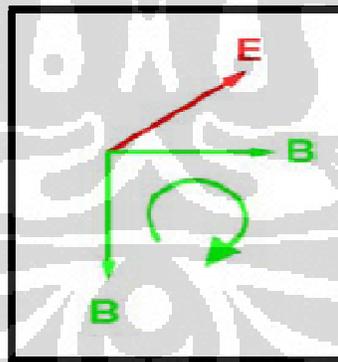
dengan fase (Xiao, 2004)

### 2.1.3 Mode Pengukuran MT

Dalam metode pengukuran MT, terdapat dua metode pengukuran yang dapat membantu dalam proses pemodelan atau interpretasi tahap awal, yaitu TE (*Transverse Electric*) mode dan TM (*Transverse Magnetic*) mode yang akan dijelaskan lebih detail pada subbab berikutnya.

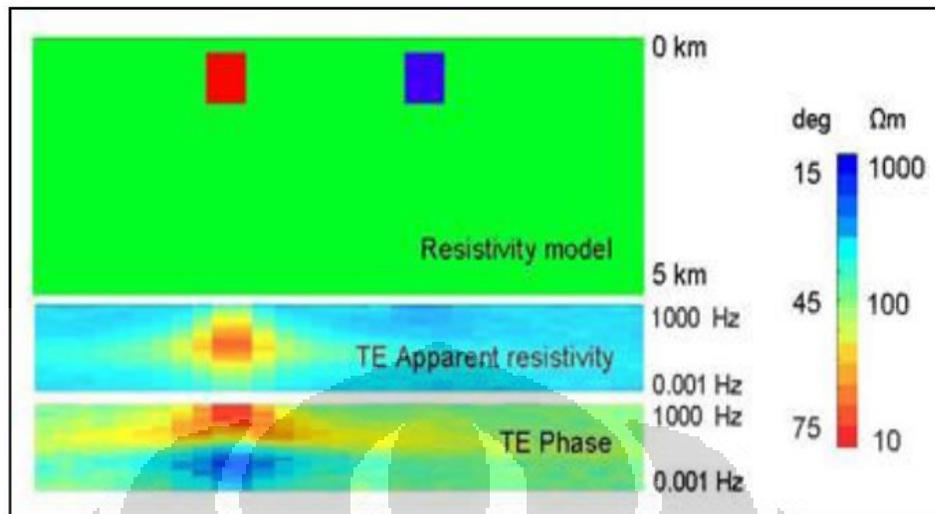
#### 2.1.3.1 Mode TE (*Transverse Electric*)

Pada mode ini komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen magnetiknya saja sedangkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2008).



Gambar 2.12 TE mode [Unsworth, 2008]

Dalam mode TE, 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  $B_z$  yang akan kontinu terhadap bidang sumbu y. Karena itulah TE mode sangat baik jika masih menggunakan analisa 1-dimensi.

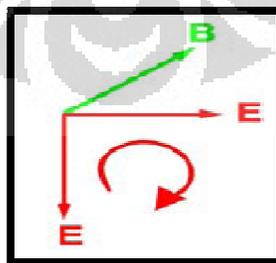


Gambar 2.13 *Pseudosection* pada TE mode [Unsworth, 2008]

Pada gambar 2.13 terlihat bahwa arus listrik hanya menginduksi bagian yang lebih konduktif. Hal ini disebabkan karena adanya efek konduktif dari arus yang muncul. Selain itu 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 (Unsworth, 2008).

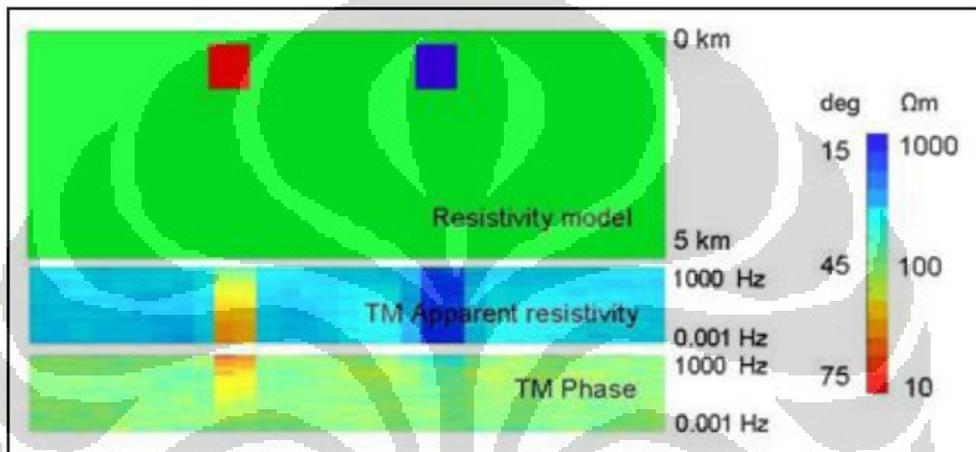
### 2.1.3.2 Mode TM (*Transverse Magnetic*)

Pada mode ini komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu  $y$  dan  $z$  hanya komponen medan listrik saja sedangkan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2008).



Gambar 2.14 TM mode [Unsworth, 2008]

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 pada 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 seperti pada gambar 2.14 di bawah ini (Unsworth, 2008)



Gambar 2.15 *Pseudosection* pada TM mode (Unsworth, 2008)

#### 2.1.4 Efek Pergeseran Statik (*Static Shift Effect*)

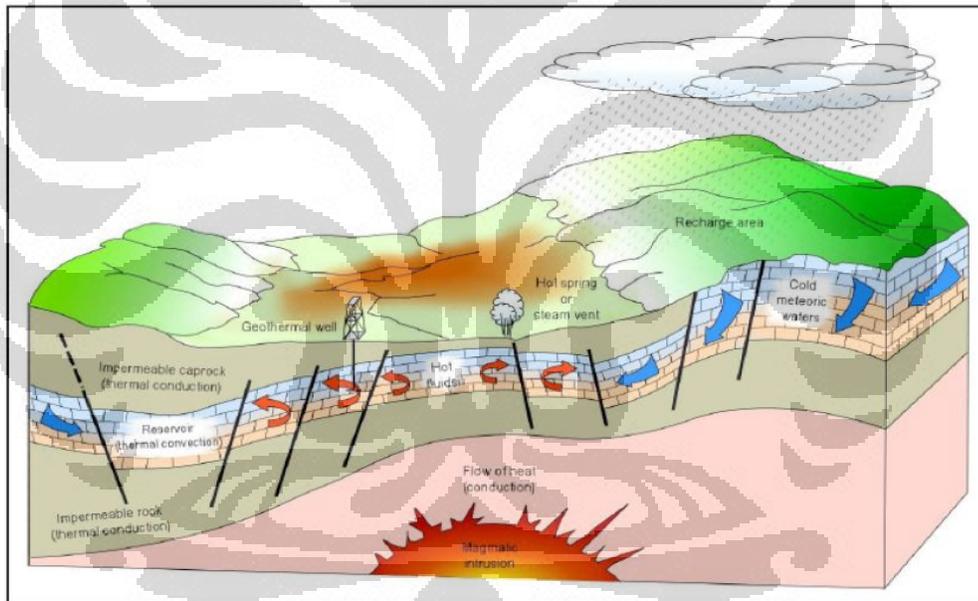
Data magnetotellurik dapat terdistorsi karena adanya pengaruh heterogenitas lokal dekat permukaan dan faktor topografi, yang dikenal sebagai efek pergeseran statik (*static shift effect*). Akumulasi muatan listrik pada batas konduktivitas medium menimbulkan medan listrik sekunder yang tidak bergantung pada frekuensi. Hal ini menyebabkan kurva *sounding magnetotelluric* (log tahanan-jenis semu terhadap log perioda) bergeser ke atas atau ke bawah sehingga paralel terhadap kurva *sounding* yang seharusnya (Grandis, 2006).

Interpretasi atau pemodelan terhadap data magnetotellurik yang mengalami distorsi akan menghasilkan parameter model yang salah. Jika medium dianggap 1-dimensi maka pemodelan terhadap kurva *sounding* tahanan-jenis semu yang dikalikan dengan konstanta  $k$  akan menghasilkan lapisan-lapisan dengan tahanan-jenis dan ketebalan yang masing-masing dikalikan dengan  $k$  dan  $k^{1/2}$ . Oleh

karena itu penentuan konstanta  $k$  tersebut sangat penting untuk mengoreksi kurva *sounding* magnetotellurik sebelum dilakukan pemodelan (Grandis, 2006).

## 2.2 Sistem Panasbumi

Sistem panasbumi dapat digambarkan sebagai konveksi fluida pada kerak bumi teratas di mana dalam ruang terperangkap, transfer panas dari sumber panas (*heat source*) ke penyimpan panas dalam keadaan permukaan yang bebas (*free surface*). Sistem panasbumi sendiri umumnya dibangun atas lima elemen utama yaitu *heat source*, *reservoir*, lapisan penudung, struktur geologi yang biasanya merupakan patahan dan terakhir adalah fluida yang merupakan pembawa panas seperti pada gambar 2.15 (Dickson, 2004).



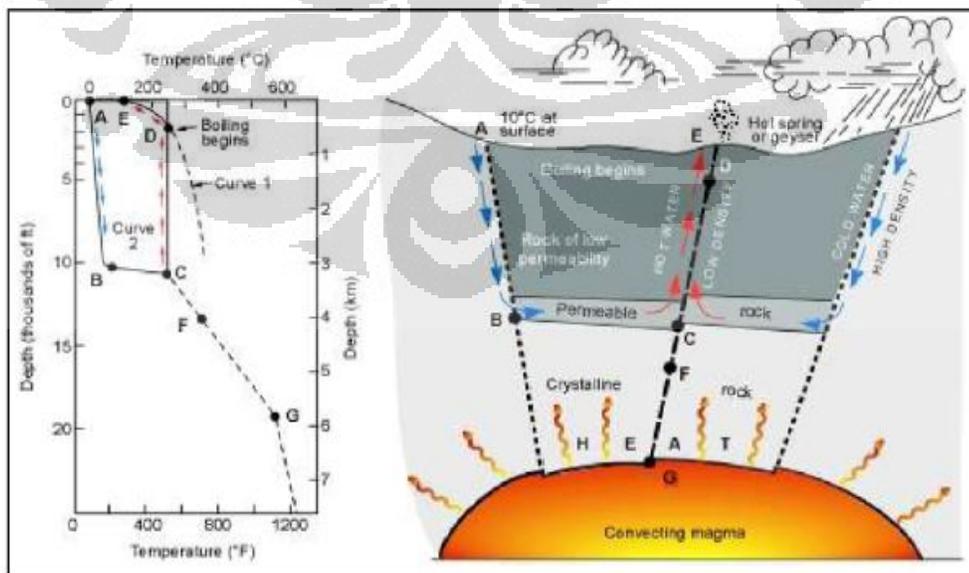
Gambar 2.16 Sistem panasbumi [Dickson, 2004]

### 2.2.1 Skema Sistem Panasbumi

*Heat source* merupakan sumber panas dari sistem panasbumi. *Heat source* bisa merupakan intrusi *magmatik* yang memiliki suhu yang sangat tinggi (>600 °C) dimana kedalamannya yang relatif dangkal (3-5 km). *Reservoir* merupakan volume dari *hot permeable rocks*, tempat menyimpan panas dan tempat sirkulasi fluida yang mengekstrak panas. Di atas *reservoir* terdapat lapisan penudung atau biasa di sebut *cap rocks* yang merupakan lapisan *clay*. Lapisan *clay* merupakan

lapisan impermeabel yang berfungsi untuk menjaga panas agar tetap terakumulasi di dalam zona *reservoir*. Fluida panasbumi adalah air, sebagian besar merupakan air *meteoric*. Sedangkan struktur geologi yang dimaksud merupakan rekahan atau patahan yang akan menjadi jalur dilaluinya fluida/ air dari permukaan menuju *reservoir* atau jalur yang akan dilalui uap panas atau fluida panas dari *reservoir* menuju permukaan dalam bentuk manifestasi permukaan. Terakhir adalah fluida yang dalam hal ini merupakan air sebagai media penyimpanan panas.

Fluida berasal dari air *meteoric* yang masuk ke batuan bawah permukaan melalui rekahan atau lapisan batuan yang permeabel. Sampai di bawah permukaan, air *meteoric* akan menjadi panas jika terjadi kontak dengan *heat source*. Karena air panas memiliki densitas yang rendah maka ia cenderung bergerak ke atas melalui rekahan atau lapisan batuan permeabel dan akan muncul di permukaan sebagai *geyser* atau manifestasi permukaan lainnya. Perubahan fasa bisa terjadi dalam perjalanannya, yaitu pada saat temperatur air telah mencapai temperatur saturasinya atau temperatur titik didihnya. Jika hal itu terjadi maka fluida akan berupa campuran uap-air. Bila pada kedalaman tertentu temperatur air lebih besar dari temperatur saturasinya maka di dalam sistem hanya terdapat satu fasa saja, yaitu fasa uap. Sehingga manifestasi panasbumi di permukaan merupakan ekspresi permukaan dari sistem konveksi yang sangat besar (White, 1973).



Gambar 2.17 Skema istem panasbumi [White, 1973]

Pada gambar 2.17 merupakan skema dari sistem panas bumi dari proses *recharge* hingga proses *discharge*. Kurva 1 adalah kurva referensi untuk titik didih air murni. Kurva 2 menunjukkan profil temperatur sepanjang rute sirkulasi dari *recharge* pada titik A ke *recharge* pada titik E.

## 2.2.2 Klasifikasi Sistem Panasbumi

Kriteria yang biasa digunakan untuk mengklasifikasi sumber daya panas bumi berdasarkan entalpi yang menunjukkan energi panas yang dimiliki oleh fluida. Namun, pada kenyataannya pengklasifikasiannya tidak berdasarkan harga entalpi melainkan berdasarkan temperatur karena entalpi merupakan fungsi dari temperatur pada sistem panasbumi tersebut.

Tabel 2.1 Klasifikasi sistem panasbumi berdasarkan temperatur [Dickson, 2004]

<i>Resources</i>	<i>Temperature</i>
<i>Low Entalphy</i>	<125 °C
<i>Intermediate Entalphy</i>	125 - 225 °C
<i>High Entalphy</i>	>225 °C

Berdasarkan jenis fluida produksi dan jenis kandungan utamanya, sistem *hydrothermal* dibedakan menjadi dua, yaitu sistem satu fasa dan sistem dua fasa. Pada sistem satu fasa, sistem umumnya berisi air yang mempunyai temperatur 90 – 180 °C dan tidak terjadi pendidihan selama eksploitasi. Sistem dua fasa dibagi menjadi dua, yaitu sistem dominansi uap (*vapour dominated system*) dan sistem dominansi air (*water dominated system*).

1. *Vapour dominated system*, yaitu sistem panasbumi dimana sumur-sumurnya memproduksi uap kering atau uap basah karena rongga-rongga batuan *reservoir*-nya sebagian besar berupa uap panas. Dalam sistem ini uap mengisi rongga-rongga atau rekahan-rekahan, sedangkan air mengisi pori-pori batuan.
2. *Water dominated system*, yaitu sistem panasbumi dimana sumur-sumurnya menghasilkan fluida dua fasa berupa campuran uap-air. Dalam sistem dominansi air, air mengisi rongga-rongga atau rekahan-rekahan.

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Proses Akuisisi Data**

Sebelum proses akuisisi data dilakukan, ada beberapa hal yang harus diperhatikan agar hasil yang didapatkan pada saat pengukuran benar-benar merepresentasikan bagaimana kondisi di bawah permukaan yang sebenarnya serta menghasilkan kualitas data yang baik.

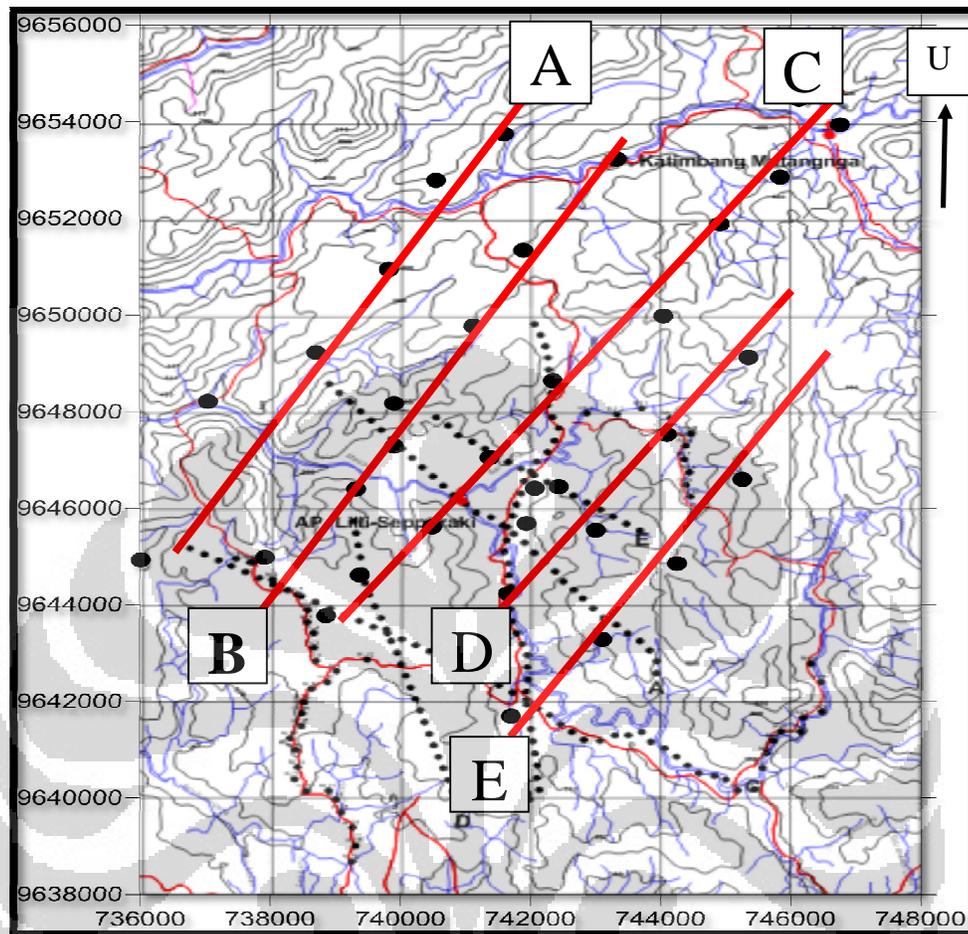
##### **3.1.1 Lokasi Pengukuran**

Pada saat membuat desain pengukuran, penentuan titik-titik pengukuran merupakan langkah awal yang harus diperhatikan untuk menghindari *noise* yang dapat mengganggu kualitas data yang dihasilkan. Lokasi-lokasi seperti pemukiman penduduk, sumber tegangan tinggi serta aliran sungai yang cukup besar sebisa mungkin harus dihindari.

Daerah-daerah titik pengukuran pada daerah prospek ini sebagian besar dilakukan di pedalaman hutan yang secara umum cukup ideal sebagai lokasi pengukuran. Namun, sumber-sumber *noise* alami seperti aliran sungai serta hujan yang sangat sulit dihindari juga memberikan pengaruh pada saat dilakukan pengukuran.



Gambar 3.1a Lokasi penelitian metode MT



Gambar 3.1b Desain pengukuran metode MT dan gravitasi [PSDG,2010]

### 3.1.2 Peralatan Akuisisi MT

Peralatan yang digunakan pada akuisisi MT di daerah prospek panasbumi Lili, yaitu :

1. 1 (satu) unit MTU-5A
2. 1 (satu) buah *Removable flash card*
3. 3 (tiga) buah *Induction Coil*
4. 5 (lima) buah *Porous pot*
5. 8 (delapan) buah *kabel gulung*
6. 1 (satu) unit *Laptop*
7. 1 (satu) buah *GPS (Ground Positioning System)*
8. 1 (satu) unit *accumulator* dan (satu) buah *DC-AC Converter*

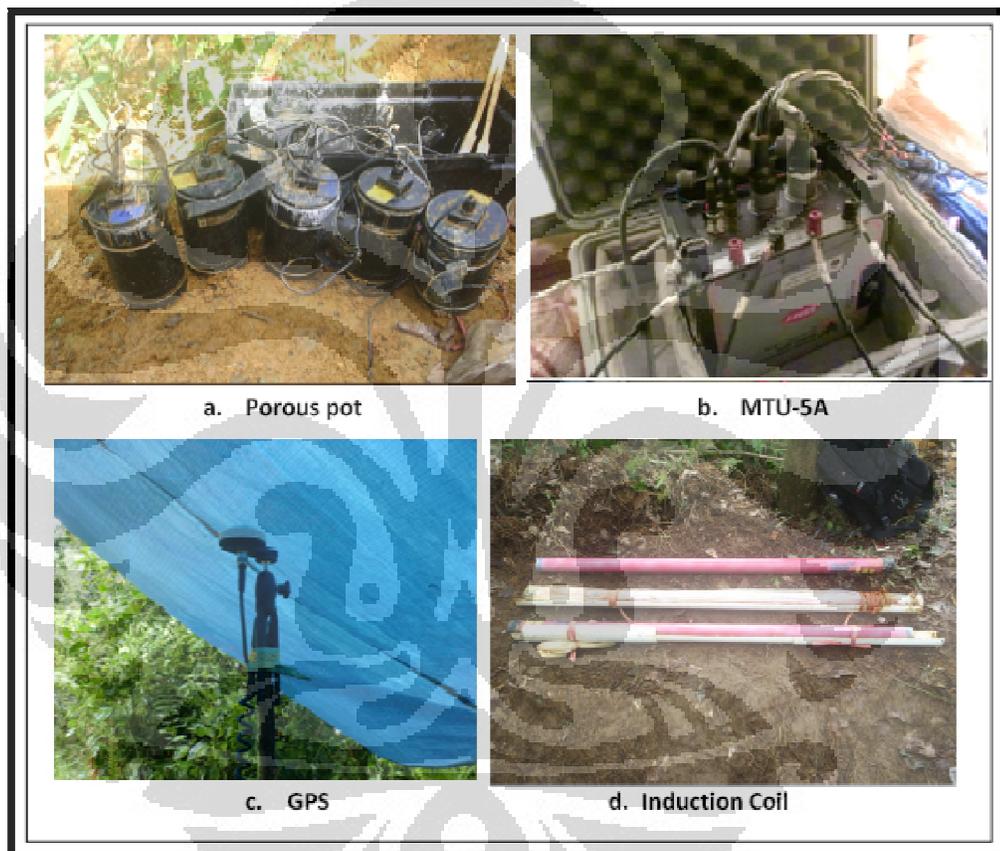
9. Peralatan dan material pendukung lainnya:
  - a. Bentonit, akuades, garam, waterpass, tenda, terpal
  - b. Kompas, Multimeter analog dan digital
  - c. Meteran, pacul, alat bor tanah, pahat, cutter, amplas

MTU (*Magnetotelluric unit*) digunakan sebagai alat untuk merekam variasi waktu medan listrik dan medan magnetik. Data hasil rekaman tersebut kemudian disimpan pada *removable flash card*. *Induction coil* merupakan sensor medan magnetik (**H<sub>x</sub>**, **H<sub>y</sub>**, **H<sub>z</sub>**), dua buah diletakkan secara horizontal saling tegak lurus dan satu buah dipasang secara vertikal. Untuk sensor medan listrik (**E<sub>x</sub>**, **E<sub>y</sub>**) digunakan *electrode non polarizable* agar tidak menimbulkan gangguan medan listrik yang dimiliki oleh *electrode* itu sendiri. *Elektrode* ini menggunakan empat buah *porous pot* yang ditanam saling tegak lurus sebagai dua buah sensor medan listrik (**E<sub>x</sub>** dan **E<sub>y</sub>**). 1 (satu) buah lagi ditanam sebagai *ground*. Di dalam *porous pot* terdapat kawat timbal yang terisi dengan timbal-klorida tersaturasi dan larutan sodium klorida. Kabel konektor berjumlah delapan buah yang digunakan untuk menghubungkan tiga buah *induction coil* dan lima buah *porous pot* ke MTU. *Laptop* digunakan untuk mengoperasikan MTU, keperluan transfer data dari *removable flash card*, serta melihat dan mengecek data mentah (*raw data*) hasil rekaman. Kemudian sinyal GPS digunakan untuk mensinkronkan waktu dan mengetahui posisi pengukuran MT. Akumulator digunakan sebagai sumber energi listrik untuk mengaktifkan MTU. DC-AC *Converter* digunakan untuk mengubah tegangan DC pada akumulator menjadi AC untuk mengaktifkan *laptop*.

Bagian dasar lubang untuk tempat *porous pot* harus dilapisi dengan larutan bentonit (yang terbuat dari bentonit, garam dan akuades) agar *electrode* berada di sekitar lokasi yang bersifat elektrolit. Sehingga *electrode* dapat merekam arus *telluric* dengan optimal. Waterpas digunakan untuk menset *coil* agar berada *fix* horizontal ketika ditanam. Kompas digunakan sebagai penunjuk arah Barat, Timur, Utara dan Selatan. Multimeter analog digunakan untuk mengukur tahanan dari kabel *electrode*, sedangkan multimeter digital untuk mengukur arus listrik dan tegangan listrik dari akumulator.

Tenda digunakan sebagai *center* dan pelindung alat (MTU) dan sebaiknya di atas tenda dilapisi dengan terpal untuk melindungi rembesan air hujan.

Kemudian meteran digunakan untuk mengukur jarak lokasi peletakkan *coil* dan *electrode*, cangkul dan alat bor tanah digunakan untuk menggali tanah sampai menemukan daerah yang tepat untuk meletakkan sensor medan magnetik (*coil*). Pahat digunakan untuk menggali tempat untuk menanam sensor medan listrik (*electrode*), *cutter* digunakan untuk mengupas atau memotong kabel dan sebelum dihubungkan ke *electrode* dan MTU. Sebaiknya kabel diampelas terlebih dahulu agar dapat kontak dengan optimal.

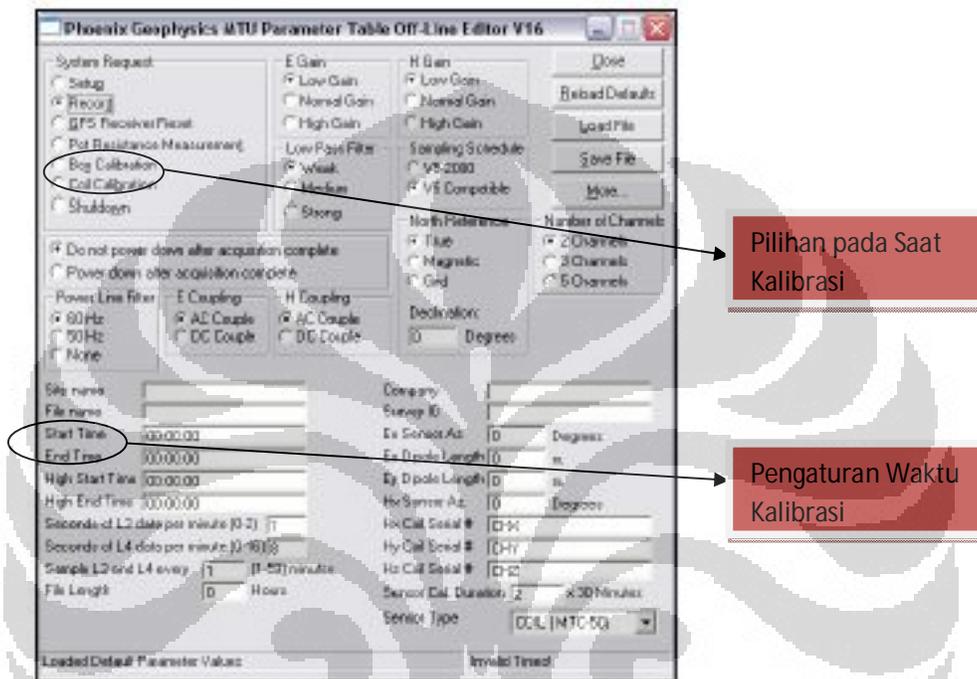


Gambar 3.2 Peralatan utama MT

### 3.1.3 Pengaturan Alat

Sebelum melakukan pengukuran, hal pertama yang harus dilakukan adalah melakukan kalibrasi terhadap *box* dan *induction coil*. Proses ini dilakukan untuk mengetahui apakah *box* dan *induction coil* dapat merekam data dengan baik. Pada tahapan ini, kalibrasi biasa dilakukan di daerah yang mempunyai *noise* yang kecil seperti terhindar dari sumber-sumber listrik dan *ground motion*. Kalibrasi

dilakukan dengan meletakkan *induction coil* di atas permukaan tanah secara sejajar yang kemudian dihubungkan ke MTU. Sebelumnya pada MTU telah terhubung dengan GPS dan laptop untuk melakukan spengaturan pada proses kalibrasi. Setelah GPS mendapatkan sinyal dengan cukup baik, MTU akan merekam data kalibrasi biasanya sekitar 30-60 menit.



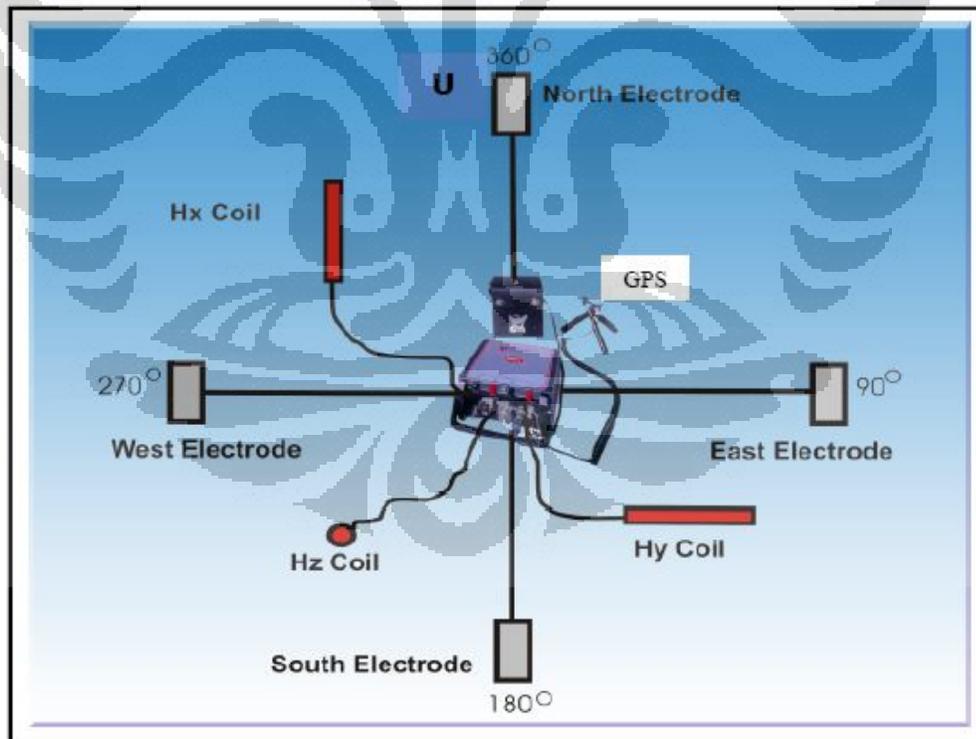
Gambar 3.3 Pengaturan proses kalibrasi [Phoenix,2005]

Setelah proses kalibrasi selesai, proses pengukuran ke titik-titik MT dapat segera dilakukan. Diperlukan tim topografi dalam tahapan ini sebagai surveyor titik-titik pengukuran sehingga perjalanan akan menjadi lebih efektif untuk mencapai titik yang ditentukan. Ada kemungkinan titik-titik pengukuran akan mengalami pergeseran beberapa puluh hingga 100 m untuk menghindari sumber-sumber noise yang ada di lokasi pengukuran.

Setelah sampai di titik pengukuran, dapat dilakukan pengaturan komponen-komponen yang ditentukan sesuai dengan gambar 3.4. Pada gambar tersebut terlihat bagaimana konfigurasi posisi dalam pemasangan *coil induction* dan *porous pot*. Untuk *coil* ditanam dalam tiga kuadran yang berbeda sedangkan *porous pot* dipasang pada empat arah mata angin, yaitu utara, timur, selatan, dan barat.

Untuk *coil induction* yang merupakan sensor medan magnet, **H<sub>x</sub>** dipasang pada arah utara selatan dengan kabel konektor *coil* mengarah ke selatan, sedangkan untuk *coil H<sub>y</sub>* dipasang pada arah timur barat dengan kabel konektor mengarah ke arah barat. Untuk kedua *coil* tersebut dipasang secara horizontal di dalam permukaan tanah berbeda dengan *coil H<sub>z</sub>* yang dipasang secara vertikal ke arah pusat bumi.

Untuk *porous pot* yang merupakan sensor medan listrik dipasang sejajar dengan *coil* magnetik pada arah-arah tertentu. Dua *porous pot* (**E<sub>x</sub>**) dipasang pada arah utara selatan sejajar dengan *coil H<sub>x</sub>* dengan jarak antara masing-masing *porous pot* mencapai 100m. Hal yang sama juga dilakukan terhadap dua *porous pot* lainnya, yaitu *porous pot* (**E<sub>y</sub>**) dipasang pada arah timur barat sejajar dengan *coil H<sub>y</sub>* dengan jarak yang sama, yaitu sekitar 100 m. Satu sisa *porous pot* ditanam di dekat MTU yang digunakan sebagai ground untuk melindungi alat. Untuk GPS diusahakan diletakkan di tempat yang agak tinggi dan terbuka sehingga dapat menangkap sinyal dengan baik.

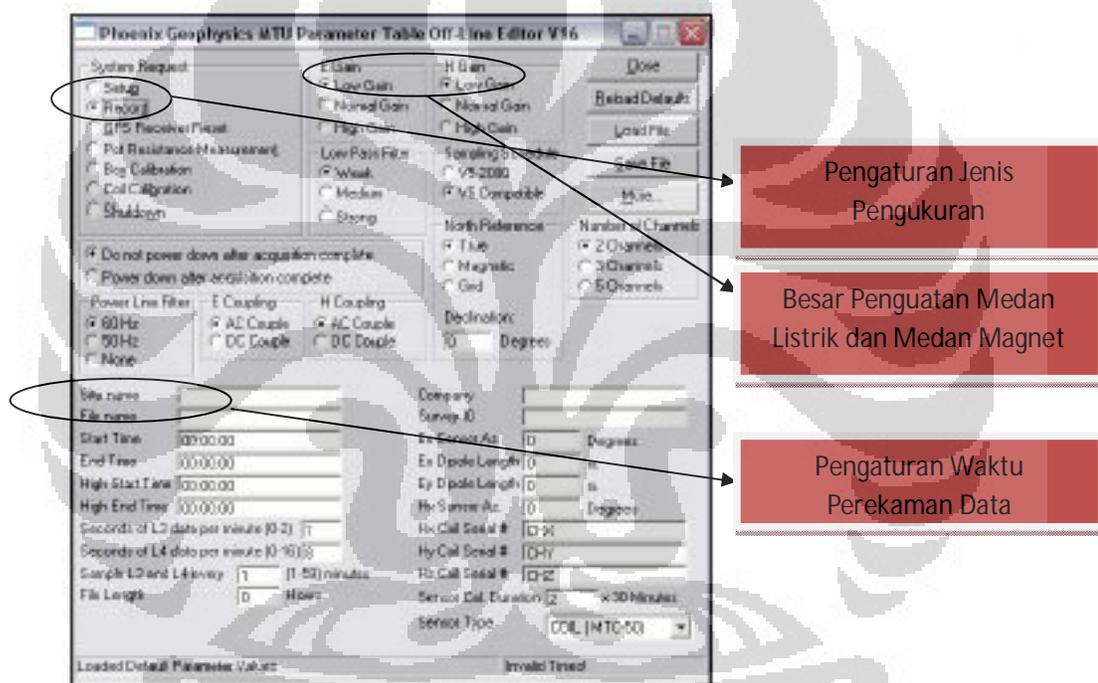


Gambar 3.4 Lay out pengukuran metode MT [Unsworth. 2006]

### 3.1.4 Proses Perekaman Data

Sebelum melakukan perekaman data, hal lain yang harus dilakukan adalah memeriksa bagaimana kontak antara *porous pot* dengan tanah. Apabila kontak nya mempunyai nilai resistivitas yang relative kecil, yaitu  $< 2 \text{ k}\Omega$  maka kontak dinyatakan baik.

Setelah kontak dinyatakan cukup baik dan GPS yang terhubung ke MTU siap digunakan, maka dilakukan pengaturan parameter-parameter pada proses pengukuran menggunakan *laptop* seperti pada gambar 3.5. Setelah pengaturan selesai maka MTU akan siap untuk merekam data.



Gambar 3.5 Pengaturan proses perekaman data MT [Phoenix, 2005]

Proses akuisisi pada daerah prospek panasbumi Lili dilakukan pada dua titik secara bersamaan setiap harinya. Namun, kedua titik ini merupakan titik pengukuran sebenarnya bukan bertujuan sebagai *remote reference*. Hal ini dilakukan karena keterbatasan alat dan waktu pengukuran yang relative singkat. Meskipun demikian, untuk mereduksi *noise* yang terekam selama proses pengukuran dapat di minimalisir pada pengolahan data dengan menggunakan *site to site reference*.

Untuk mendapatkan kualitas data yang baik, kita perlu mengetahui kondisi tiap titik karena sumber *noise* dapat berinterferensi dengan peralatan. Ada beberapa *noise* yang harus kita perhatikan sebagai berikut: *Ground motion* dapat menggerakkan sensor magnetik dan kemudian menyebabkan *noise* pada komponen medan magnetik. Kabel listrik dan *transmitter* radio juga dapat menyebabkan *noise* berupa gelombang elektromagnetik. Binatang juga dapat menjadi *noise* karena ia dapat menggoyang-goyang, menarik-narik atau menggigit-gigit kabel sehingga mempengaruhi kualitas data.

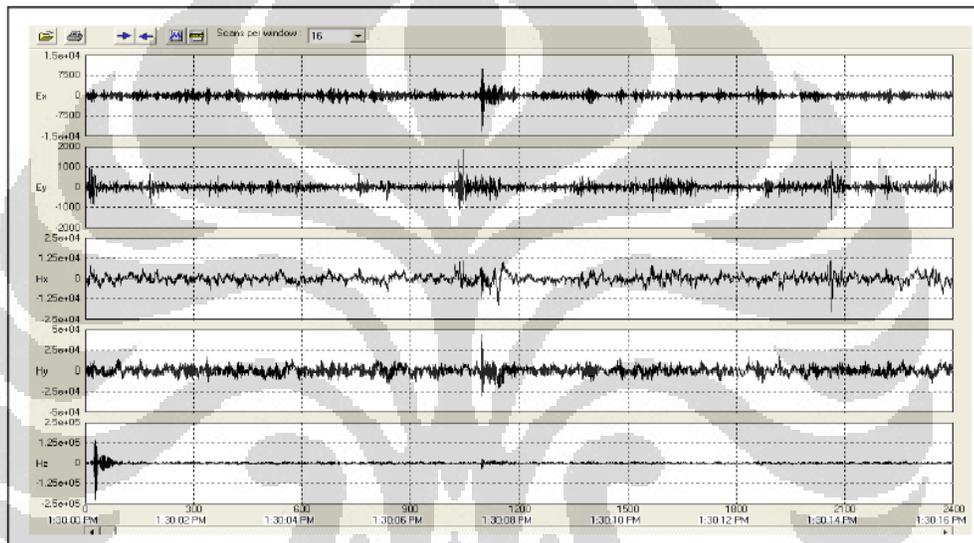
Langkah penanganannya untuk beberapa *noise* adalah dengan mengubur peralatan di bawah tanah dan menempatkan benda berat sepanjang kabel yang menyambung ke *electrode* untuk membantu meminimalisir efek *noise* dari tiupan angin dan binatang serta menimalisir aktivitas di sekitar lokasi pengukuran.

Rentang waktu pada saat proses perekaman data cukup bervariasi tetapi waktu pengukuran biasanya dilakukan pada saat sore atau menjelang malam ketika keadaan di sekitar lokasi pengukuran menjadi lebih tenang dan lebih sedikit menghasilkan *noise*. Lamanya waktu pengukuran biasanya sekitar 12 jam atau lebih untuk memperoleh kualitas data yang lebih baik. Setelah proses perekaman data selesai maka akan dilakukan pengolahan data.

### 3.2 Pengolahan Data

Data yang direkam dalam MTU adalah berupa data mentah dalam format *time series*. Salah satu contoh data mentah (*raw data*) bisa dilihat dalam Gambar 3.6. Sumbu vertikal merupakan *magnitude* dari **Ex**, **Ey**, **Hx**, **Hy**, **H<sub>z</sub>** hasil dari perekaman komponen medan listrik dan medan magnetik di lapangan. Sedangkan sumbu horizontal merupakan waktu *sampling* perekaman selama 16 sekon. Selanjutnya adalah memilih interval waktu yang diinginkan untuk diproses. Pemilihan data pada selang waktu tertentu sangat menentukan kualitas data. Panjang-pendeknya interval waktu yang dipilih juga perlu diperhatikan. Semakin panjang interval waktu, jumlah data yang didapat juga semakin banyak. Sebaliknya, jika interval pendek, data yang ada juga sedikit, sehingga data (*cross power*) yang ada pada saat proses *filtering* juga terbatas.

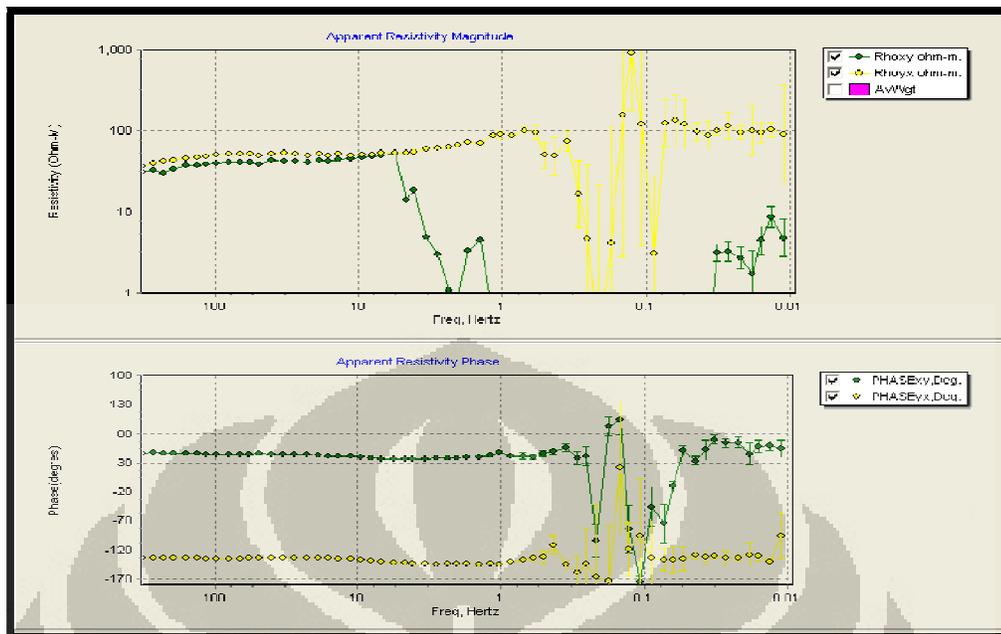
Setelah menganalisa *time series*, langkah selanjutnya adalah mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga dapat diketahui nilai impedansinya dengan menggunakan transformasi Fourier. Setelah didapatkan data dalam domain frekuensi, maka langkah selanjutnya adalah menghitung nilai dari impedansi, resistivitas, dan fase dengan menggunakan robust processing. Pada tahapan ini juga dapat dilakukan koreksi terhadap data dengan menggunakan *reference data* yang berguna dalam mereduksi *noise* yang ada pada saat pengukuran. Semua tahapan ini dikerjakan dalam *software SSMT 2000*.



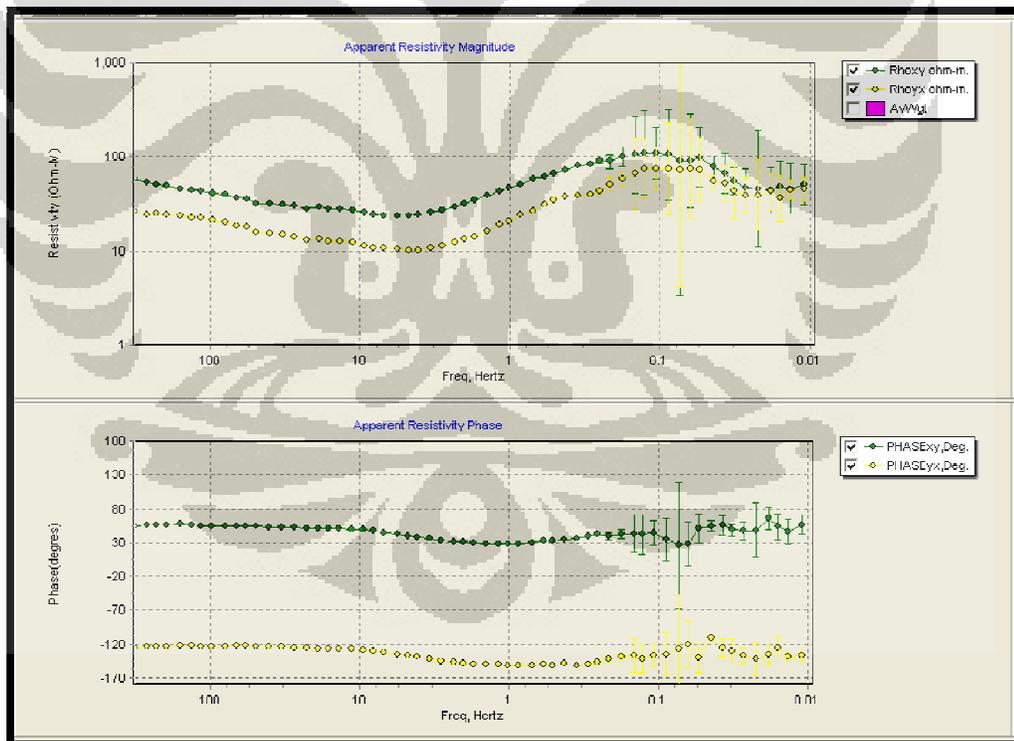
Gambar 3.6 Contoh data mentah hasil perekaman selama 16 detik

### 3.2.1 Pemilihan (*Filtering*) Data

Setelah melalui proses dengan *software SSMT 2000*, maka data yang ada sekarang sudah berupa resistivitas versus frekuensi, dan fase, yang dapat dibuka dengan *software MTeditor* (Gambar 3.7a). Selanjutnya adalah proses seleksi crosspower untuk mendapat kurva resistivitas versus frekuensi yang representatif (Gambar 3.7b). Jumlah crosspower sesuai dengan parameter yang telah diatur dalam *SSMT 2000*.



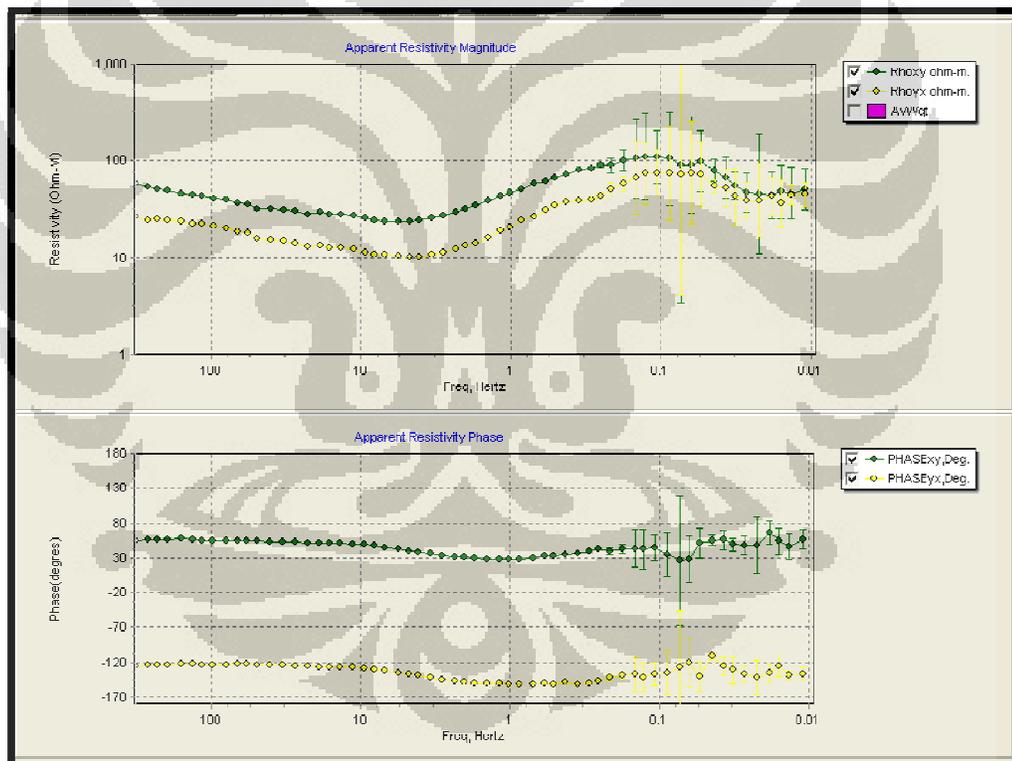
Gambar 3.7a Data dan kurva sebelum seleksi MTL-05



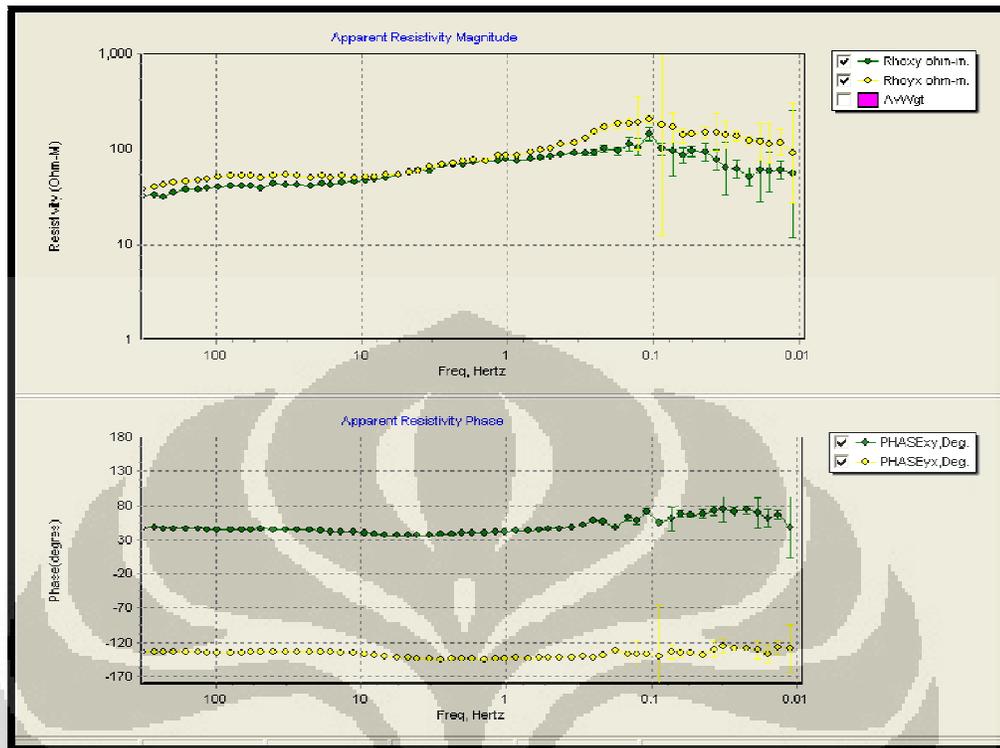
Gambar 3.7b Data dan kurva setelah seleksi MTL-05

### 3.2.2 Site to Site Reference

Untuk menghilangkan efek *noise*, untuk beberapa titik tertentu dilakukan sebuah metode yang disebut *site to site reference*. Prinsip pada metode ini tidak jauh berbeda dengan metode *remote reference* hanya saja data-data pengoreksi ini didapat dari lokasi pengukuran lain yang mempunyai kualitas data yang cukup baik atau sangat sedikit sekali *noise*. Keterbatasan kualitas data pengoreksi menyebabkan tidak semua titik diterapkan metode ini. Pada Gambar 3.8a dan 3.8b terlihat bagaimana data sebelum dan sesudah digunakan *site to site reference*. Terlihat bahwa nilai *error bar* menjadi lebih kecil setelah menggunakan metode ini dibandingkan dengan yang sebelumnya.



Gambar 3.8a Data dan kurva sebelum menggunakan *site to site reference* MTL-05

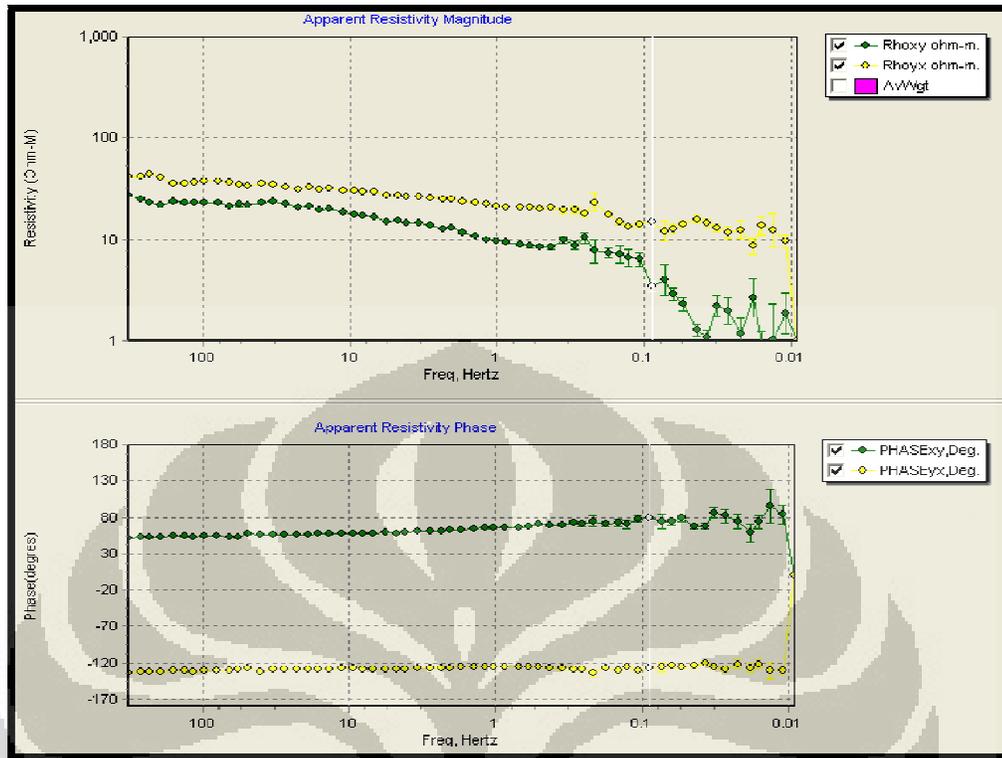


Gambar 3.8b Data dan kurva setelah menggunakan *site to site reference* MTL-05

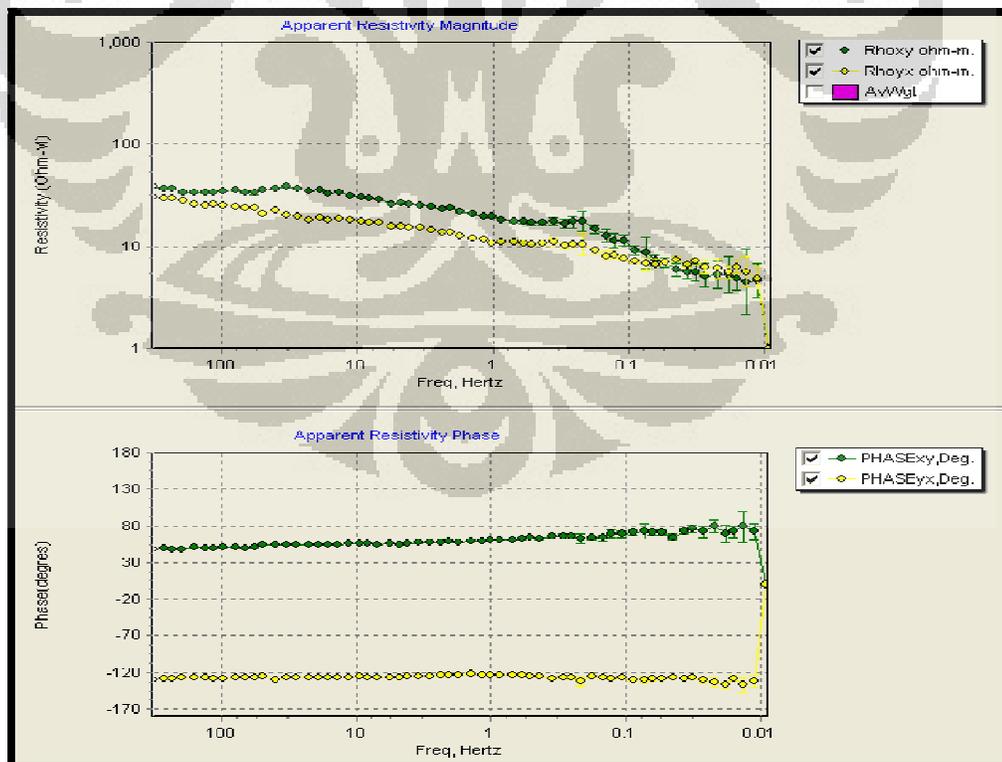
### 3.2.3 Rotasi

Selanjutnya adalah menambahkan efek rotasi pada kurva. Teknik rotasi yang digunakan adalah dengan menggunakan referensi pola struktur mayoritas pada daerah penelitian. Pada daerah penelitian, arah struktur mayoritas adalah sekitar 30.

Struktur bawah permukaan sebenarnya sangat kompleks, pola struktur yang tersaji pada peta geologi juga merupakan hasil interpretasi yang berarti masih ada kemungkinan *error* (memiliki persentase kesalahan). Namun jika diteliti satu per satu efek dari struktur terhadap data MT akan sangat sulit. Hal ini disebabkan karena satu data MT dipengaruhi oleh banyak struktur bawah permukaan dengan arah yang berbeda-beda. Oleh karena itu, walaupun memiliki persentase kesalahan, referensi arah struktur dominan pada data geologi cukup merepresentasikan struktur yang bekerja pada daerah penelitian (Aswo, 2011).



Gambar 3.9a Kurva sebelum ditambahkan efek rotasi MTL-01

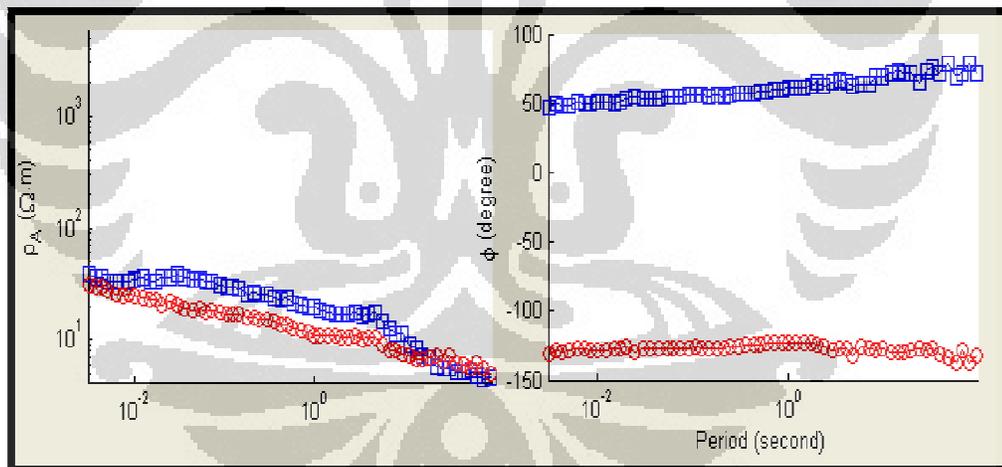


Gambar 3.9b Kurva sesudah ditambahkan efek rotasi MTL-01

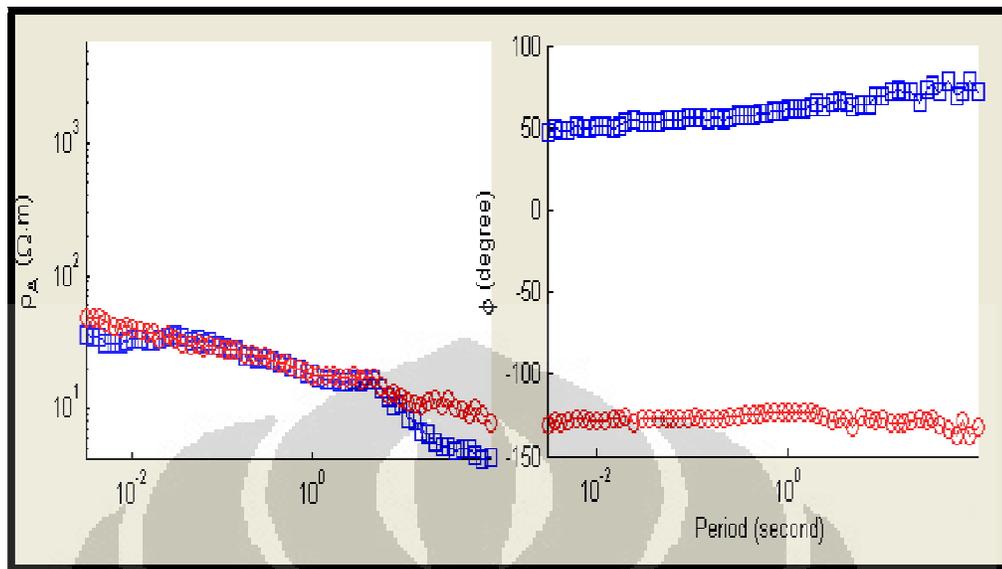
### 3.2.4 Koreksi Efek Pergeseran Statik

Langkah terakhir dalam proses *filtering* data adalah dengan mengoreksi efek statik yang terjadi pada kurva. Seperti yang telah disebutkan pada bab sebelumnya bahwa efek ini terjadi karena adanya pengaruh heterogenitas lokal dekat permukaan dan faktor topografi. Metode yang biasa digunakan untuk mengoreksi efek ini adalah TDEM (*Time Domain Electromagnetic*). Namun, karena keterbatasan data digunakan metode lain dengan menggunakan formula matematis yang disebut *averaging/ spatial filtering*.

Metode ini menggunakan teknik perata-rataan, yaitu titik yang akan dikoreksi akan dirata-rata oleh titik di sekitarnya sebagai pengoreksi. Untuk membuat kondisi bawah permukaan pada daerah tersebut homogen. Metode ini memberikan hasil yang mendekati hasil dari TDEM (Sulistyo, 2011). Berikut adalah kurva sebelum dan hasil dari koreksi statik dengan menggunakan metode perata-rataan pada gambar 3.10a dan 3.10b.



Gambar 3.10a Kurva sebelum koreksi statik MTL-01

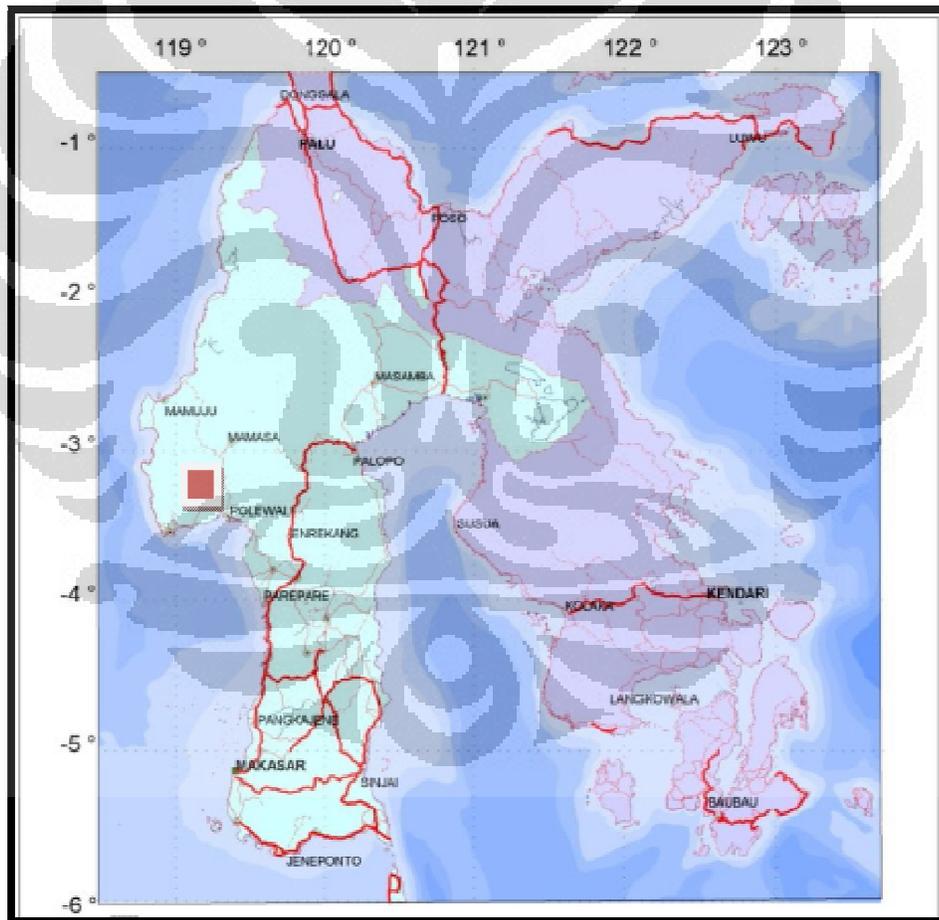


Gambar 3.10b Kurva setelah koreksi statik MTL-01

Pada gambar terlihat bahwa *shifting* yang terjadi antara kurva TE dan TM menjadi lebih rapat dibandingkan kurva sebelumnya. Setelah semua titik selesai dikoreksi statik, langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan secara dua dimensi dan tiga dimensi. Hal ini dilakukan agar mempermudah proses interpretasi dalam menjelaskan bagaimana kondisi bawah permukaan sebenarnya. Untuk pembahasan mengenai pemodelan secara dua dimensi dan tiga dimensi akan dijelaskan lebih detail pada bab berikutnya.

## BAB 4 DATA PENDUKUNG

Untuk memperkuat interpretasi data geofisika, disertakan pula beberapa data pendukung, seperti data geologi, geokimia dan gravitasi. Data geologi akan menyajikan geologi regional dan lokal dari daerah penelitian, sedangkan dari data geokimia, akan didapatkan informasi tentang kandungan kimia pada manifestasi permukaan yang ada serta perkiraan suhu *reservoir* dari *geothermometer*. Data geologi dan geokimia ini didapat dari Pusat Sumber Daya Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.



Gambar 4.1 Lokasi penelitian (merah) daerah panasbumi Polewali [PSDG, 2010]

## 4.1 Data Geologi

Stratigrafi daerah penyelidikan berdasarkan hasil penyelidikan di lapangan, secara regional 8 satuan batuan (modifikasi dari Djuri, Sudjatmiko, 1998) yang terdiri dari Formasi Latimojong (Kls), Formasi Loka (Tml), Formasi Mandar (Tmm), Batuan Gunungapi Walimbong (Tmpv), Formasi Mapi (Tmpm), Batuan terobosan (Tmpl), Napal Pambuang (Qpps), dan Endapan Aluvial (Qa).

- a) Formasi Latimojong, secara umum formasi ini mengalami pemalihan lemah – sedang. Terdiri dari batu sabak dan filit yang ditemukan di daerah Tapango. Ciri sesar banyak ditemukan di satuan ini, diduga telah mengalami lebih dari sekali proses tektonik.
- b) Formasi Loka, berupa batuan epiklastik gunungapi. Terdiri dari breksi dan setempat konglomerat. Masif, diduga sebagai endapan darat sampai delta.
- c) Formasi Mandar (Tmm) terdiri dari batupasir, batulanau dan batulempung, berlapis baik, sedikit karbonatan, setempat telah terkloritkan. Mengandung lensa lignit, yang berumur Miosen Akhir. Tebalnya mencapai 400 m, diendapkan dalam lingkungan laut dangkal sampai delta.
- d) Batuan Gunungapi Walimbong (Tmpv) terdiri dari lava bersusunan basalt sampai andesit, trakhit, sebagian lava bantal, breksi andesit piroksen, breksi andesit trakhit; mengandung fedspatoid di beberapa tempat; diendapkan di lingkungan laut; menurut Djuri dkk diduga berumur Mio-Pliosen karena menjemari dengan Formasi Skala yang berumur Miosen Tengah – Pliosen dengan ketebalan lapisan ratusan meter.
- e) Formasi Mapi (Tmpm) terdiri dari batupasir tufan, batulanau, batulempung, batugamping pasir dan konglomerat, mengandung lensa lignit. Berdasarkan kandungan fosil foraminiferanya pada peta regional menurut Djuri dkk umur formasi ini Miosen Tengah – Pliosen. Formasi ini tersingkap di daerah S. Maloso dan daerah Dusun Timolo.
- f) Batuan Terobosan (Tmpl) umumnya batuan beku bersusunan asam sampai menengah seperti syenit, diorit, monzonit dan riolit. Singkapan dijumpai di daerah Pandanpanreng, Kondo, Nenebece, Mokombong, dan Seppoang. Umurnya diduga lebih muda dari Pliosen karena menerobos Batuan Gunungapi Walimbong yang

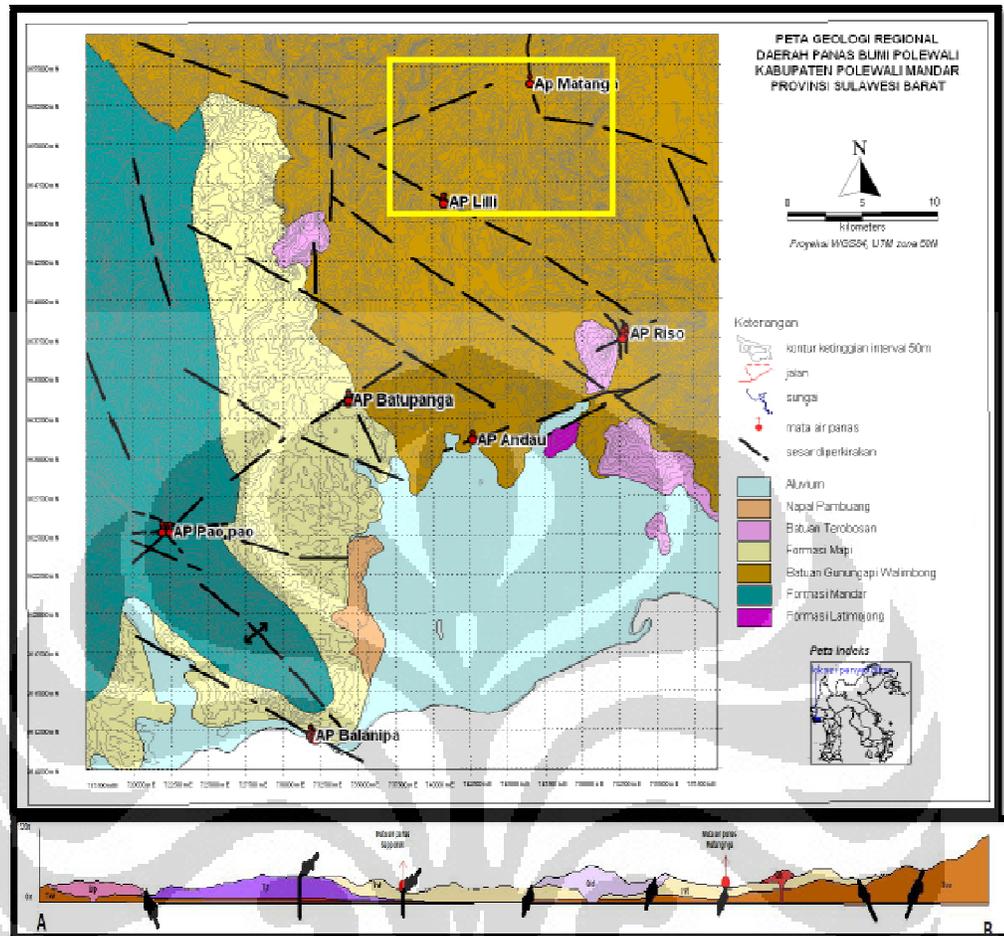
berumur Mio-Pliosen, berdasarkan kesebandingan dengan granit di Lembar Pasangkayu yang berumur 3,35 juta tahun (Sukanto, 1975).

g) Napal Pambuang (Qpps) terdiri dari napal tufan, serpih napalan mengandung nodul, batupasir tufan, dan lensa-lensa konglomerat; mengandung fosil foraminifera yang menunjukkan umur Plistosen. Tebal satuan sekitar 300m, dan kemungkinan terendapkan di lingkungan laut dangkal.

h) Aluvium (Qa) terdiri dari lempung, lanau, pasir, dan kerikil. Satuan ini tersebar di sekitar sungai – sungai utama Polewali seperti Sungai Maloso.

Daerah Polewali Mandar diperkirakan dibentuk oleh 3 sistem panasbumi, yaitu: Sistem panasbumi Lili yang berasosiasi dengan batuan vulkanik Kuarter, Sistem panasbumi Mapilli yang berasosiasi dengan batuan terobosan sienit yang diperkirakan sebagai *heat sourcanya*, dan sistem panasbumi Allu yang berasosiasi dengan batuan sedimen atau *sediment hosted*. Namun, Pada eksplorasi kali ini, ruang lingkup penelitian diperkecil hingga hanya pada Sistem panasbumi Lili yang dianggap mempunyai prospek yang paling besar dibandingkan yang lainnya.

Sistem panasbumi Lili memiliki dua pemunculan kelompok manifestasi yaitu di kelompok manifestasi Lili-Sepporaki dan kelompok manifestasi Matanga. Daerah ini dicirikan oleh dominasi batuan vulkanik yang berkomposisi andesitik hingga trahitik. Morfologi daerah Lili-Matanga didominasi oleh perbukitan terjal dan perbukitan bergelombang dimana bentuk-bentuk kerucut dijumpai di beberapa tempat. Bentuk kerucut ini diperkirakan sebagai bekas pusat erupsi batuan vulkanik muda yang tersingkap di dekat daerah manifestasi. Sementara itu morfologi perbukitan bergelombang menggambarkan tahapan erosional dari batuan vulkanik yang lebih tua yang merupakan tahapan dewasa atau lanjut.



Gambar 4.2 Peta geologi regional dan daerah penelitian (kuning) panasbumi Polewali [PSDG,2010]

Aktivitas vulkanik di daerah Lili – Matanga terjadi sejak jaman Tersier yang diperkirakan merupakan aktifitas gunungapi bawah laut yang kemudian berkembang menjadi gunungapi darat berumur Kuartar bawah. Produk-produk aktivitas vulkanik Tersier berkomposisi andesitik hingga trahitik sebagian besar telah mengalami erosi tahapan dewasa dan menghilangkan jejak-jejak sumber erupsi, serta terkekarkan secara intensif yang memungkinkan satuan ini memiliki permeabilitas yang cukup baik untuk meloloskan fluida, khususnya fluida hidrotermal yang berkerja di daerah ini. Proses geologi selanjutnya adalah proses orogenesis yang menyebabkan pengangkatan (*uplift*) menjadi daratan, selama proses orogenesis ini aktivitas vulkanik masih terus berlangsung dan membentuk kerucut vulkanik di sebelah baratdaya manifestasi Lili dengan produk berupa lava

dan breksi lava yang berkomposisi andesitik. Tubuh kerucut vulkanik ini diperkirakan sebagai produk terakhir dari aktivitas vulkanik di daerah penyelidikan dan diduga sebagai sumber panas (*heat source*) yang memiliki sisa panas dari dapur magma. Aktivitas tektonik yang terjadi pada Kala Miosen – Pliosen membentuk sesar mendatar yang berarah barat-laut-tenggara, dimana di daerah manifestasi Lili kemungkinan terbentuk *jog* sehingga fluida panas bumi dapat keluar melalui celah ini ke permukaan. Sementara itu di daerah Matanga terbentuk sesar normal berarah utara – selatan yang menjadi media munculnya mata air panas di daerah tersebut.

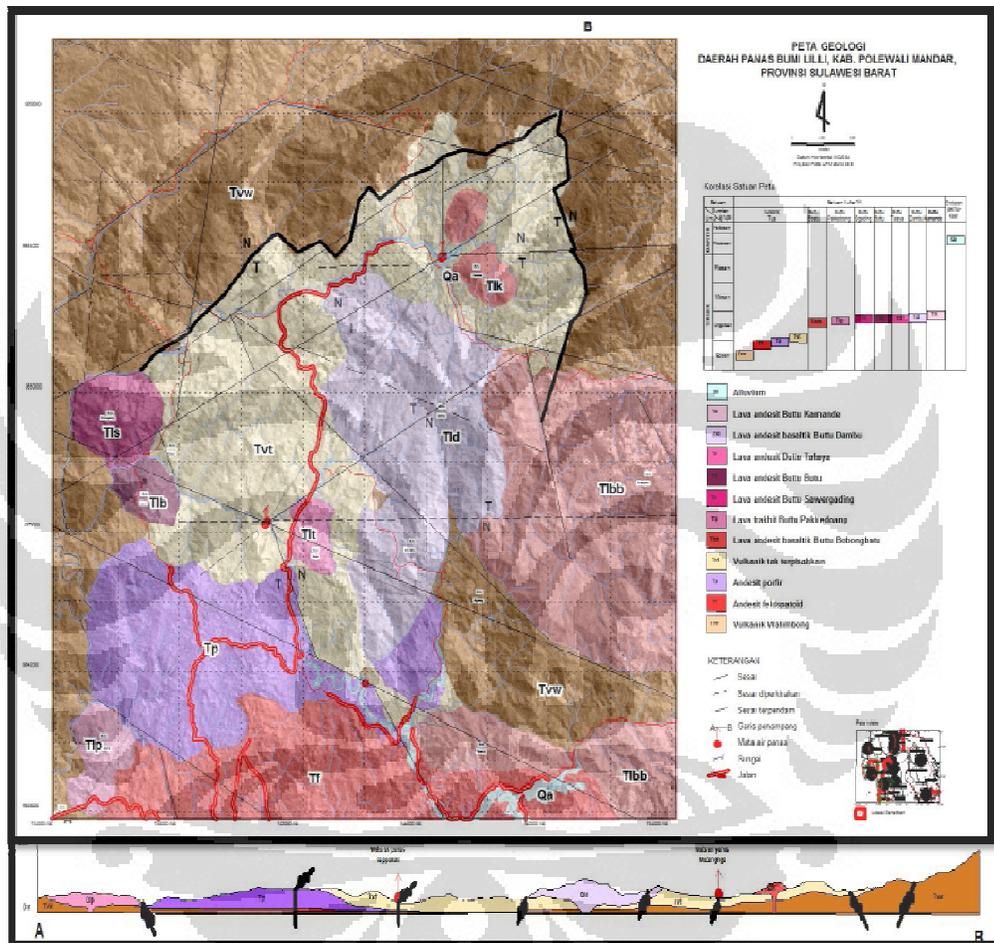
Daerah Lili didominasi oleh batuan produk vulkanik. Beberapa produk gunungapi terdiri dari aliran lava dan yang tersebar cukup luas serta kubah-kubah vulkanik. Kemudian jenis batuan beserta struktur dan susunan stratigrafinya disajikan dalam bentuk peta geologi (Gambar 4.2).

Sesuai dengan susunan stratigrafinya maka karakteristik masing-masing satuan disajikan dapat di kelompokkan kedalam berikut ini adalah Satuan Vulkanik Walimbong (Tvw), Andesit Feldspatoid (Tf), Andesit Porfir (Tp), Vulkanik Tak Terpisah (Tvt), Lava Andesit Basaltik Buttu Bobongbatu (Tlbb), Lava Trakhit Buttu Pakkedoang (Tlp), Lava Andesit Buttu Sawergading (Tls), Lava Andesit Buttu Butu (Tlb), Lava Andesit Buttu Talaya (Tlt), Lava Andesit Buttu Dambu (Tld), Lava Andesit Buttu Kamande (Tlk), Alluvium (Qal).

Pola struktur geologi di daerah penyelidikan ini diklasifikasikan berdasarkan diagram roset, yang terbagi kedalam 7 (tujuh) pola struktur yang berkembang. Dari ketujuh pola struktur tersebut, yang paling berperan penting dalam pemunculan manifestasi panas bumi adalah pola struktur N110-120°E / N290- 300°E dan pola struktur N10-20°E / N190-200°E untuk manifestasi Lili Sepporaki. Diperkirakan terbentuk bukaan sesar (*dilational fault jog*) pada perpotongan sesar – sesar ini sehingga menjadi media jalannya fluida hidrotermal ke permukaan. Selain itu dari pola-pola struktur tersebut beberapa diantaranya dapat teramati jenis pergerakan *elative* sesarnya yakni:

1. Sesar mendatar, yang terdiri dari 2 buah sesar mengiri (*sinitral*) di bagian selatan dan dua buah sesar menganan (*dextral*) di bagian utara.
2. Sesar normal yang terdiri dari 5 buah sesar.

3. Struktur depresi, terdapat di daerah Lilli hingga Matangnga yang dicirikan oleh sisa gawir yang membatasi depresi yang terbentuk melengkung hingga setengah radial. Dari bentuk morfologinya dan pola struktur secara regional, bentuk depresi ini diperkirakan sebagai hasil *collapse* dari sumbu perlipatan yang terbentuk sebelumnya. Sistem panasbumi Lilli diperkirakan dibatasi oleh depresi ini, dimana manifestasi muncul di dalamnya berupa mata air panas.



Gambar 4.3 Peta geologi lokal daerah panasbumi Lili [PSDG,2010]

## 4.2 Geokimia

Berdasarkan hasil penyelidikan terpadu tahun 2010, gejala kenampakan panasbumi permukaan ditandai dengan munculnya beberapa mata air panas, yang terbagi menjadi dua kelompok manifestasi panasbumi, yaitu manifestasi panasbumi Lilli - Sepporaki dan manifestasi panasbumi Matangnga.

### 1) Kelompok Lili - Sepporaki

Kelompok Lili - Sepporaki terdapat di dekat sungai Masongi, sekitar 300 meter dari dusun terdekat dusun Gatta, Desa Sepporaki, Kecamatan Bulu, Kabupaten Polewali Mandar, terdapat dua mata air panas yaitu: air panas Sepporaki 1 (APS-1) dan sekitar 70 meter dari lokasi air panas ini, yang lebih dekat lagi ke lokasi aliran air sungai Masongi, muncul air panas Sepporaki 2 (APS-2).

Air panas Sepporaki 1 (APS-1) berada pada koordinat UTM zona 50 S dengan  $x = 740921$  mE dan  $y = 9646287$  mN dengan ketinggian 214 m dpl., disekitar pemunculan mata air panas terdapat sinter silika, sedikit *bubble* gas, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau, temperatur air panas  $97,0^{\circ}\text{C}$ , pada temperatur udara  $30,6^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH} = 8,60$  daya hantar listrik  $1250 \mu\text{S}/\text{cm}$ , debit 5 l/detik.

Air panas Sepporaki 2 (APS -2) berada pada koordinat UTM zona 50 S dengan  $x = 740857$  mE dan  $y = 9646213$  mN dengan ketinggian 209 m dpl., terdapat sinter silika, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau, temperatur air panas  $95,0^{\circ}\text{C}$ , pada temperatur udara  $30,9^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH} = 8,86$  daya hantar listrik  $1125 \mu\text{S}/\text{cm}$ , debit air panas 0,1 l/detik.



Gambar 4.3 Manifestasi air panas Lili-Sepporaki

## 2) Kelompok Katimbang Matangnga

Kelompok Katimbang Matangnga terdapat di sungai Matangnga, Desa Katimbang, Kecamatan Matangnga, Kabupaten Polewali Mandar (terletak di bagian timur laut peta daerah penyelidikan. Manifestasi panasbumi berupa mata air panas Katimbang 1 (APK-1) terletak pada batas desa Katimbang dan Kelurahan Matangnga, di sekitar pemukiman penduduk Desa Katimbang dan kelurahan Matangnga, sedangkan sekitar 80 meter dari lokasi air panas ini, muncul air panas Katimbang 2 (APK-2), pada sungai Matangnga di wilayah desa Katimbang, kedua mata air panas terletak pada aliran sungai Matangnga (bila air sungai pasang, maka pemunculan air panas akan tertutup dan tercampur oleh air sungai).

Air panas Katimbang 1 (APK-1) berada pada koordinat UTM zona 50 S dengan  $x = 746604$  mE dan  $y = 9653887$  mN dengan ketinggian 316 m dpl, tidak terdapat sinter silika ataupun sinter karbonat, tidak ada *bubble* gas, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau, temperatur air panas  $84,2^{\circ}\text{C}$ , pada temperatur udara  $32,2^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH} = 7,30$  daya hantar listrik  $700 \mu\text{S}/\text{cm}$ , debit 0,1 lt/detik.

Air panas Katimbang 2 (APK -2) berada pada koordinat UTM zona 50 S dengan  $x = 746527$  mE dan  $y = 9653848$  mN dengan ketinggian 321 m dpl, tidak terdapat sinter silika ataupun sinter karbonat, air tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau, temperatur air panas  $60,90^{\circ}\text{C}$ , pada temperature udara  $32,0^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{pH} = 7,20$  daya hantar listrik  $650 \mu\text{S}/\text{cm}$ , debit 0,1 l/detik.



Gambar 3.4 Manifestasi air panas Katimbang-Matangnga

Hasil survei geokimia menunjukkan bahwa, berdasarkan perbandingan  $Cl-SO_4-HCO_3$ , mata air panas Lilli Sepporaki-1 dan -2 termasuk dalam tipe klorida, air panas Katimbang-1 dan -2 juga termasuk tipe klorida. Berdasarkan perbandingan  $Na-K-Mg$ , air panas Lilli Sepporaki-1 berada pada zona perbatasan *full equilibrium*, sedangkan air panas Lilli Sepporaki-2 dan air panas Ketampang -1 dan -2 berada pada zona *partial equilibrium* karena adanya interaksi antara fluida panas dengan batuan yang dilalui telah bercampur dengan air permukaan (*meteoric water*).

Berdasarkan diagram segi tiga  $Cl, Li, B$  air panas terletak pada zona tengah, ada indikasi air panas berinteraksi dengan sistem panasbumi di kedalaman, sebelum mencapai ke permukaan membentuk mata air panas. Manifestasi panasbumi di daerah penyelidikan Lili Sepporaki terdiri dari air panas pH netral dan alterasi.

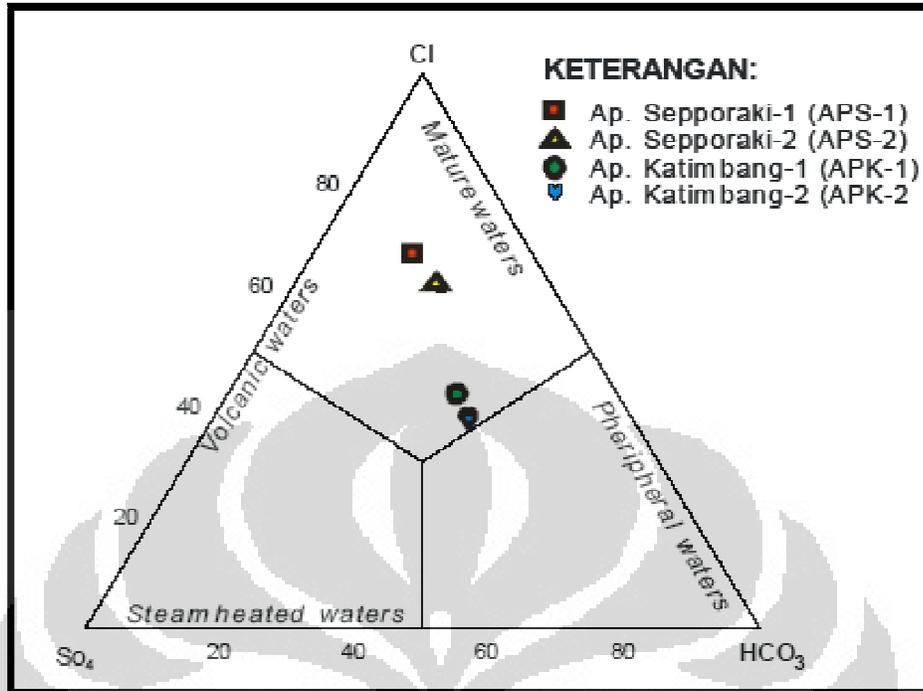


Diagram 4.1 Diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-CO<sub>3</sub> [PSDG, 2010]

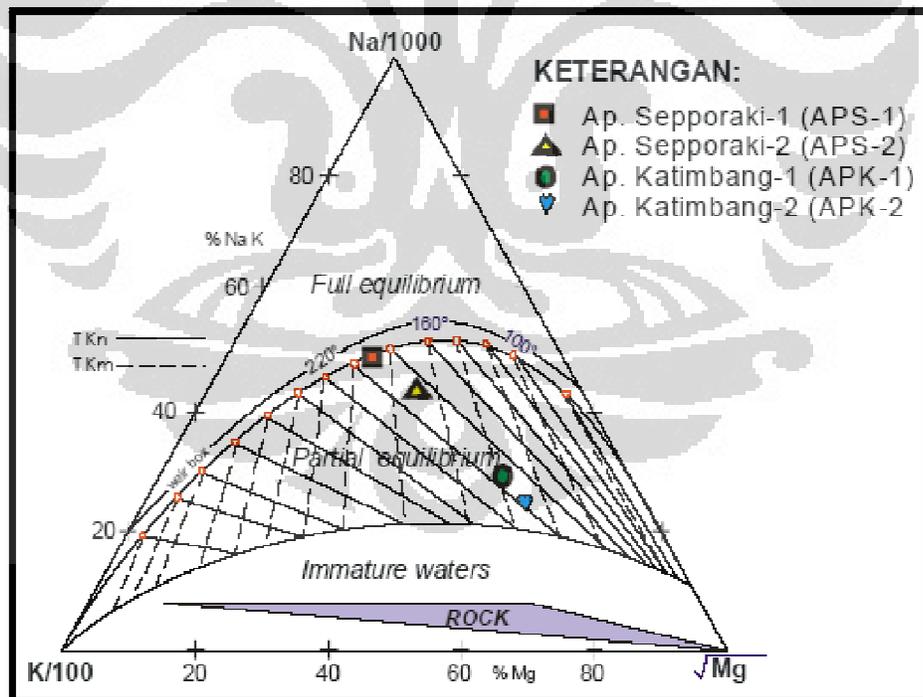


Diagram 4.2 Diagram segitiga Na-K-Mg [PSDG, 2010]

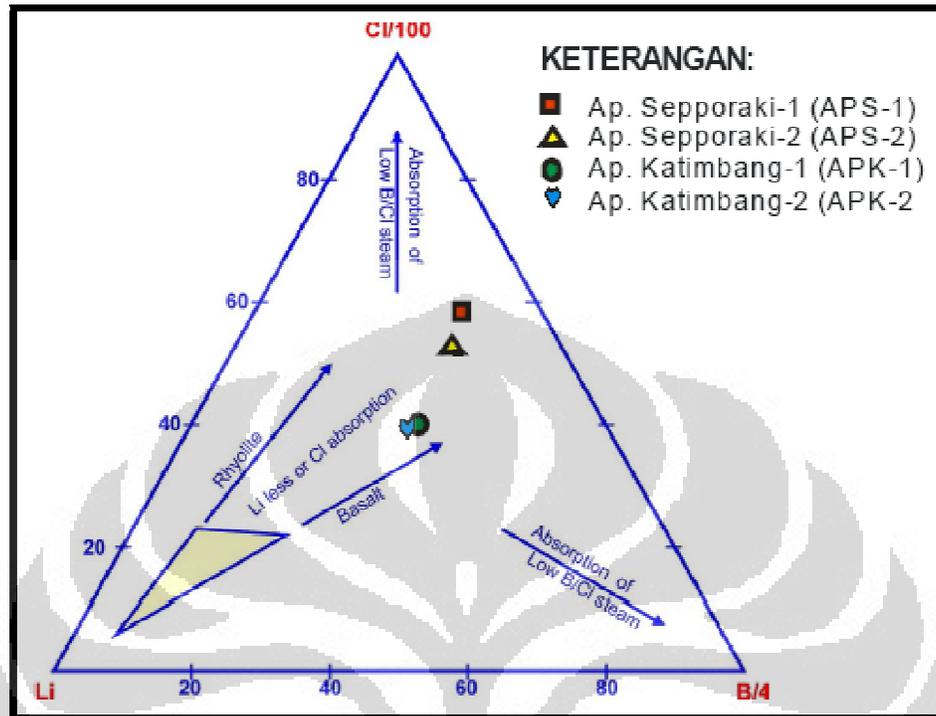


Diagram 4.3 Diagram segitiga Cl-Li-B [PSDG, 2010]

Hasil perhitungan *geothermometer* air dari air panas, menggunakan persamaan *geothermometer* SiO<sub>2</sub> dan NaK, menghasilkan temperatur yang cukup tinggi, 170°C (berdasarkan *geothermometer* SiO<sub>2</sub> *conductive cooling* dan temperatur yang lebih tinggi 190°C (berdasarkan *geothermometer* NaK), pengaruh penurunan temperatur oleh air meteorik, sehingga konsentrasi SiO<sub>2</sub> akan lebih rendah, hasil *geothermometer* NaK yang lebih tinggi (189-201°C) lebih valid diaplikasikan dengan mempertimbangkan temperatur air panas cukup tinggi, pH netral, tipe klorida dan terletak pada zona *full equilibrium*, maka temperatur bawah permukaan yang berhubungan dengan temperatur *reservoir* panasbumi daerah penyelidikan Lili Sepporaki, adalah 190°C, termasuk temperatur medium.

## **BAB 5**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

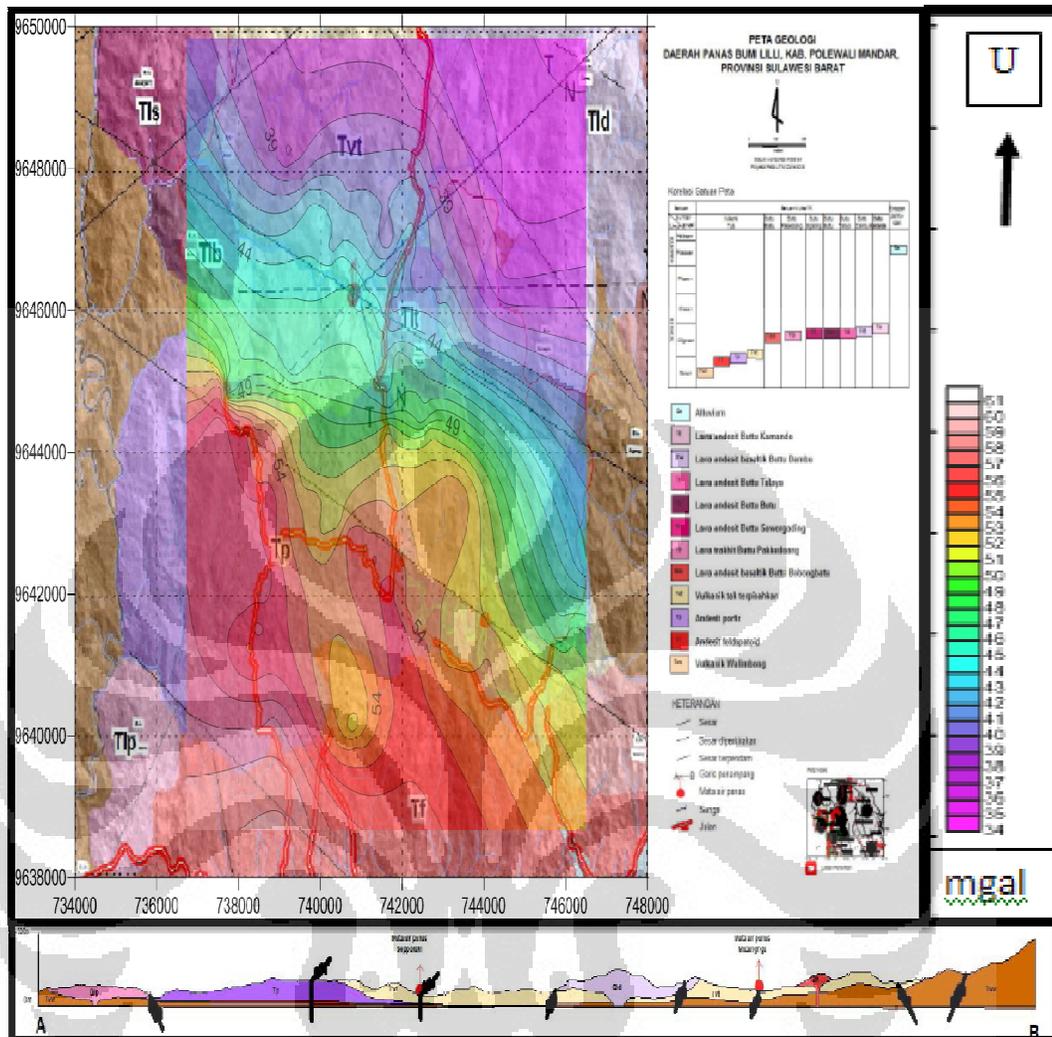
#### **5.1 Pemodelan Metode Gravitasi**

Penggunaan metode gravitasi sebagai metode pendukung pada eksplorasi panasbumi bertujuan untuk mengetahui bagaimana persebaran densitas batuan di daerah prospek serta untuk mengetahui struktur bawah permukaan yang dapat membantu dalam analisis lebih lanjut tentang bagaimana sistem panasbumi yang bekerja pada daerah prospek.

Pada metode gravitasi, ada beberapa hal yang dapat dianalisis sebelum data dimodelkan dalam bentuk dua dimensi untuk mendukung interpretasi dari sistem panasbumi yang ada, seperti peta kontur dari anomali bouguer dan residual.

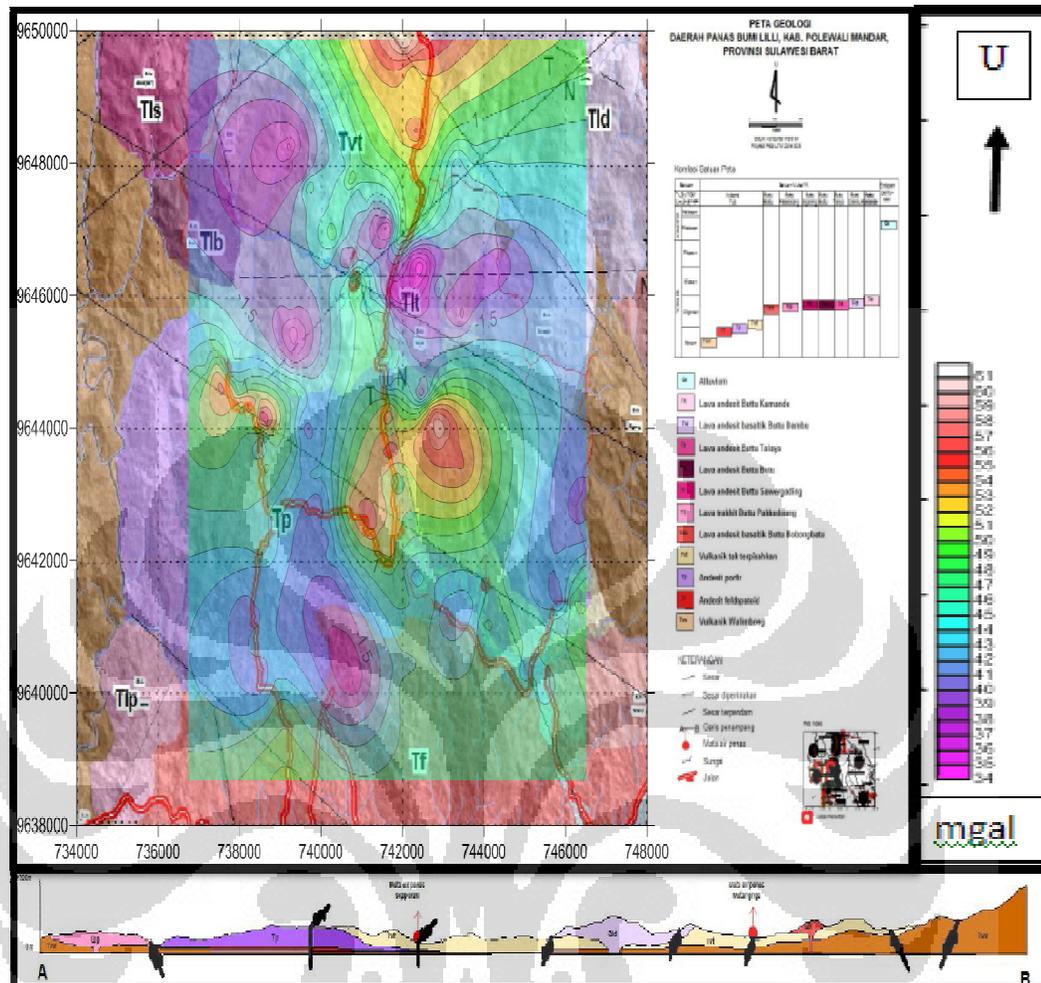
Gambar peta anomali bouguer (gambar 5.1) menunjukkan adanya pola nilai kontur yang bervariasi dari nilai tinggi hingga rendah yang tersebar di daerah pengukuran. Untuk nilai anomali bouguer tinggi terdapat di daerah bagian barat daya, selatan dan sebagian tenggara daerah pengukuran, sedangkan untuk anomali bouguer sedang berada pada bagian timur, tengah dan barat daerah pengukuran diikuti dengan nilai bouguer rendah pada bagian utara dan sekitarnya. Pada peta anomali bouguer menggambarkan seluruh jumlah tarikan masa yang terjadi pada daerah pengukuran baik secara regional maupun residual. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan anomali residual harus dilakukan penghilangan efek anomali regional. Anomali regional sendiri didapatkan melalui proses *low pass filter* pada nilai anomali bouguer yang bertujuan untuk menghilangkan efek-efek dari anomali yang muncul pada kedalaman dangkal.

Untuk nilai anomali residual (gambar 5.2) rendah mengisi hampir 1/3 bagian daerah penyelidikan, yaitu di bagian barat laut, tengah, timur dan barat. Anomali residual sedang yang mendominasi hampir 1/2 bagian daerah penyelidikan, yaitu di bagian barat laut, barat daya, timur, dan tengah daerah penyelidikan. Kemudian anomali residual tinggi di sebagian kecil utara, tengah, barat, dan barat daya.



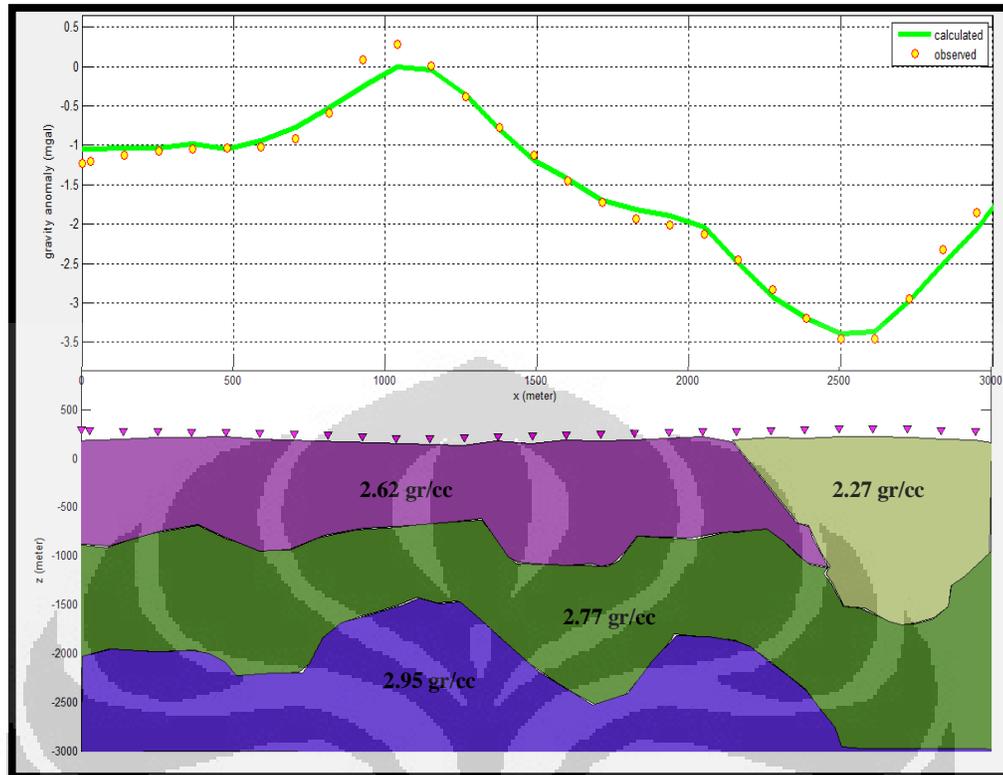
Gambar 5.1 Peta anomali bouguer data gravitasi daerah Lili

Pemodelan metode gravitasi pada pemodelan sistem panas bumi daerah prospek Lili digunakan untuk mendeteksi struktur yang terdapat pada lokasi pengukuran. Walaupun struktur mampu terdeteksi pada pemodelan tiga dimensi data MT, namun hal tersebut perlu diperkuat sehingga tidak menimbulkan ambiguitas pada saat melakukan interpretasi terpadu tentang bagaimana model konseptual dari sistem panasbumi tersebut.



Gambar 5.2 Peta anomali bouguer data gravitasi daerah Lili

Tujuan utama pemodelan data gravitasi adalah mendeteksi lokasi patahan maupun rekahan-rekahan pada lokasi pengukuran yang merupakan zona lemah yang kemungkinan merupakan zona *recharge* maupun *discharge* fluida yang kemudian masuk ke dalam *reservoir*. Untuk mempermudah proses interpretasi data gravitasi dalam mendeteksi keberadaan struktur pada daerah prospek panasbumi Lili, pemodelan data gravitasi akan ditampilkan secara dua dimensi berdasarkan persebaran nilai densitas yang terdapat pada daerah pengukuran.



Gambar 5.3 Pemodelan dua dimensi persebaran densitas

Pada gambar 5.3 merupakan model hasil dari *forward modeling* dari nilai anomali residual. Pada model tersebut diperkirakan terdapat tiga lapisan geologi yang membentuk sistem panasbumi Lili. Lapisan dengan nilai densitas 2.95 gr/cc diduga sebagai *heat source* dari sistem panasbumi Lili yang berasosiasi dengan batuan vulkanik yang diperkirakan adalah andesit profir. *Reservoir* dari sistem panas berada pada densitas 2.77 gr/cc yang diperkirakan berasosiasi dengan lapisan batuan vukanik tak terpisahkan. *Zona alterasi* berada di sekitar daerah graben dengan densitas 2.27 gr/cc. Hal ini disebabkan batuan di atas *reservoir* telah mengalami perubahan sifat fisis batuan akibat pengaruh alterasi hidrotermal. Lapisan paling atas yang mempunyai nilai densitas 2.67 gr/cc merupakan batuan andesit lava buttu-buttu.. *Zona discharge* fluida diperkirakan melalui zona patahan di sekitar *graben* yang merupakan zona lemah sehingga fluida dapat keluar melewatinya.

## 5.2 Pemodelan Metode *Magnetotelluric* (MT)

Hasil dari pengolahan data MT daerah prospek panasbumi Lili akan ditampilkan dalam model dua serta tiga dimensi. Hal ini dilakukan agar dapat mempermudah dalam proses interpretasi awal maupun terpadu dalam menentukan bagaimana model konseptual dari sistem panasbumi yang ada. Untuk pemodelan dalam bentuk dua dimensi menggunakan *software WinGlink* sedangkan untuk pemodelan tiga dimensi menggunakan *GeoSlicer-X* yang dikembangkan oleh *Geothermal Laboratory University of Indonesia*.

### 5.2.1 Model Dua Dimensi

Untuk mendapatkan model dalam bentuk dua dimensi dibutuhkan suatu proses yang disebut inversi. Inversi adalah proses pencarian model dari data yang telah diperoleh. Apabila  $m$  diasumsikan sebagai model,  $F$  sebagai fungsi keadaan, dan  $d'$  adalah data yang diperoleh dari model yang dibuat, maka dapat ditulis :

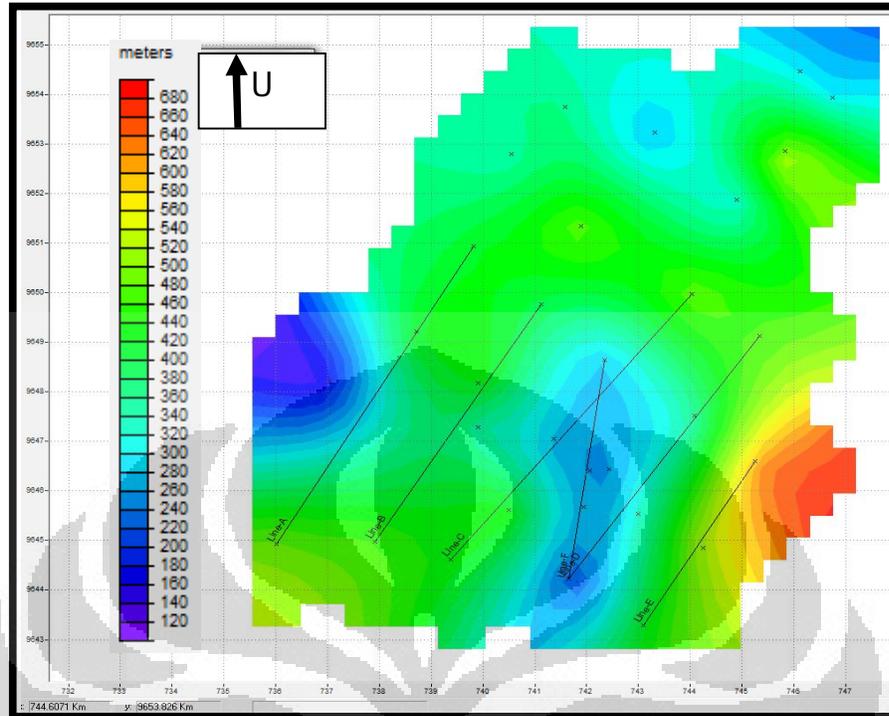
$$d' = Fm \quad (5.1)$$

tetapi persamaan tersebut digunakan apabila model telah dimiliki atau disebut proses *forward modeling*. Untuk kasus inversi, berlaku keadaan yang sebaliknya, sehingga persamaan tersebut dapat dimodifikasi menjadi persamaan sebagai berikut :

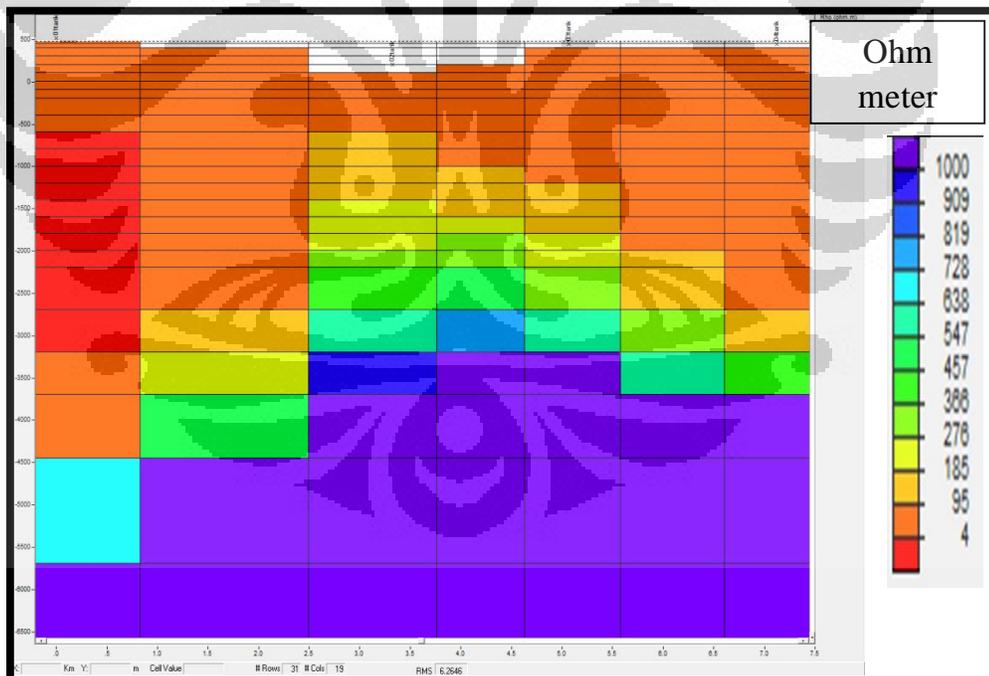
$$m = dF^{-1} \quad (5.2)$$

Tidak hanya dalam melakukan proses pemodelan secara dua dimensi, pada proses inversi ini juga dilakuakn proses *smoothing* terhadap nilai-nilai fase dan resistivitas pada data yang ada namun proses tersebut tetap mengacu pada data sebelumnya. Oleh karena itu, tentu ada faktor selisih atau perbedaan nilai yang didapatkan untuk proses modeling dengan nilai data sebelumnya yang disebut dengan *root mean square error*.

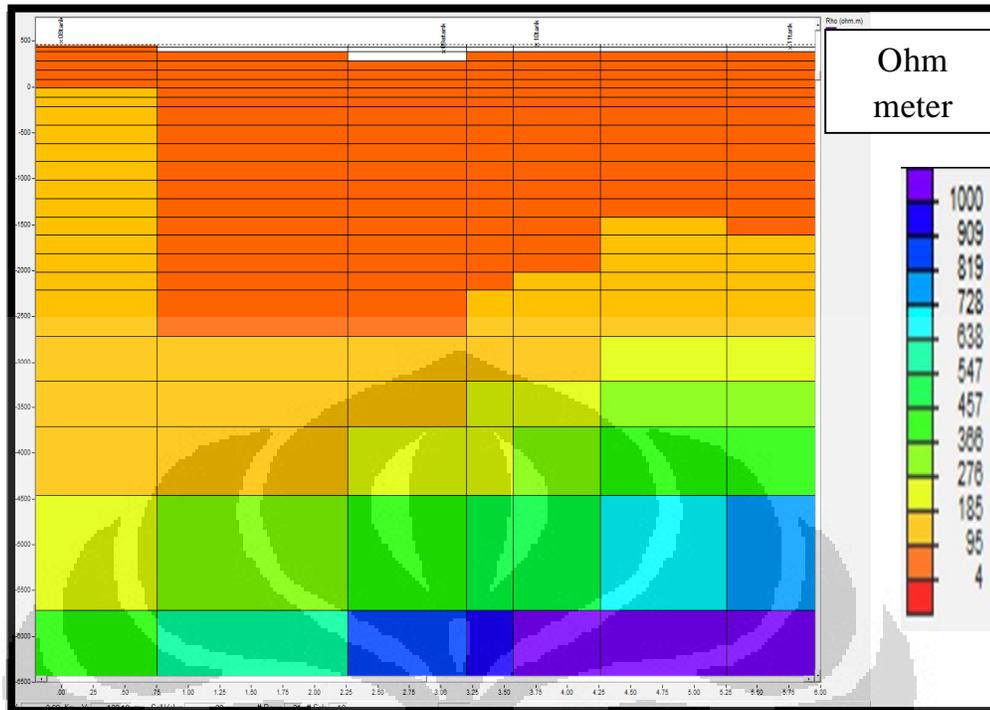
Terdapat lima lintasan yang diinversi pada tahapan ini yang diolah dengan menggunakan *WinGlink*, namun hanya beberapa lintasan yang ditampilkan karena dianggap dapat sebagai "*promising zone*", yaitu lintasan A, B, dan C.



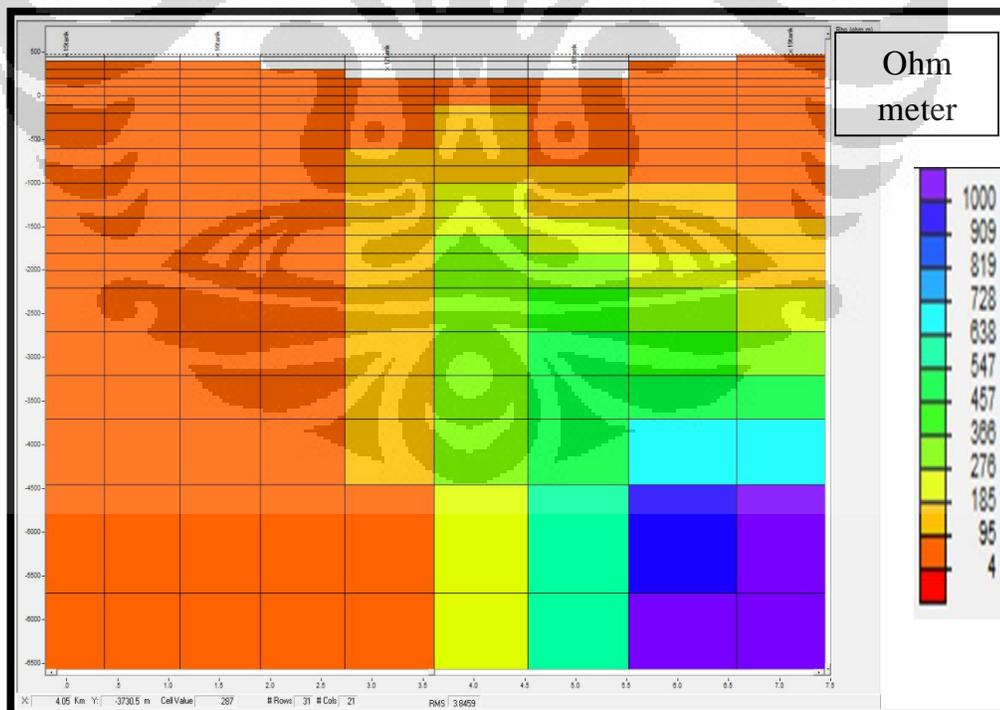
Gambar 5.4 Lintasan topografi MT dengan menggunakan WinGlink



Gambar 5.5a Hasil inversi lintasan A



Gambar 5.5b Hasil inversi lintasan B



Gambar 5.5c Hasil inversi lintasan C

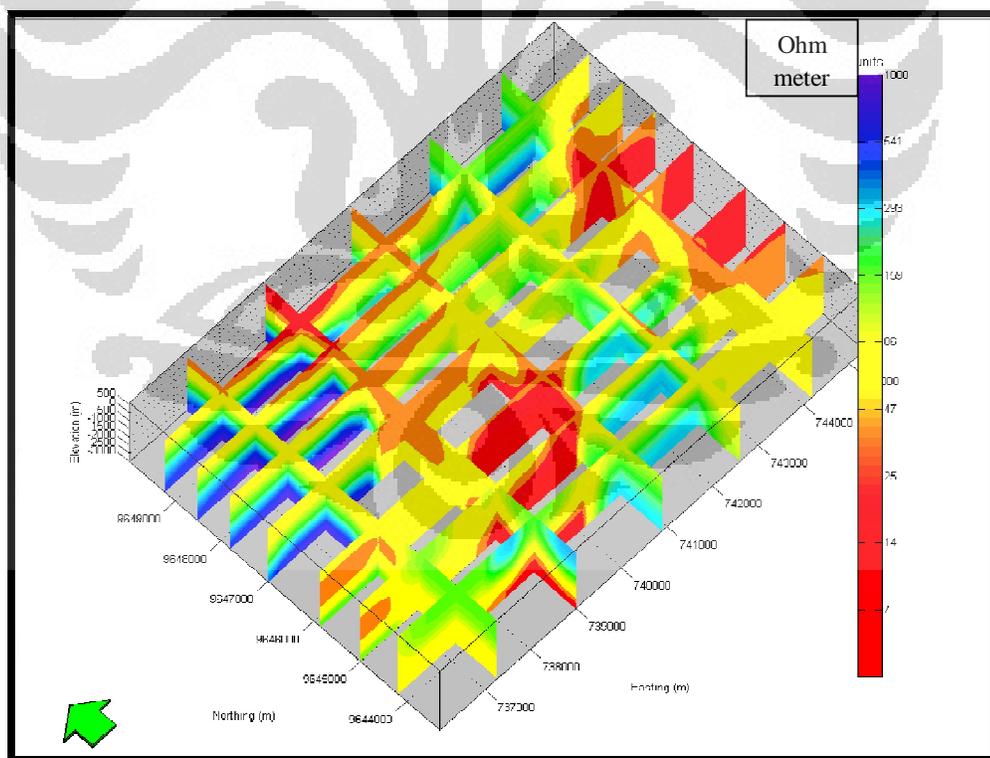
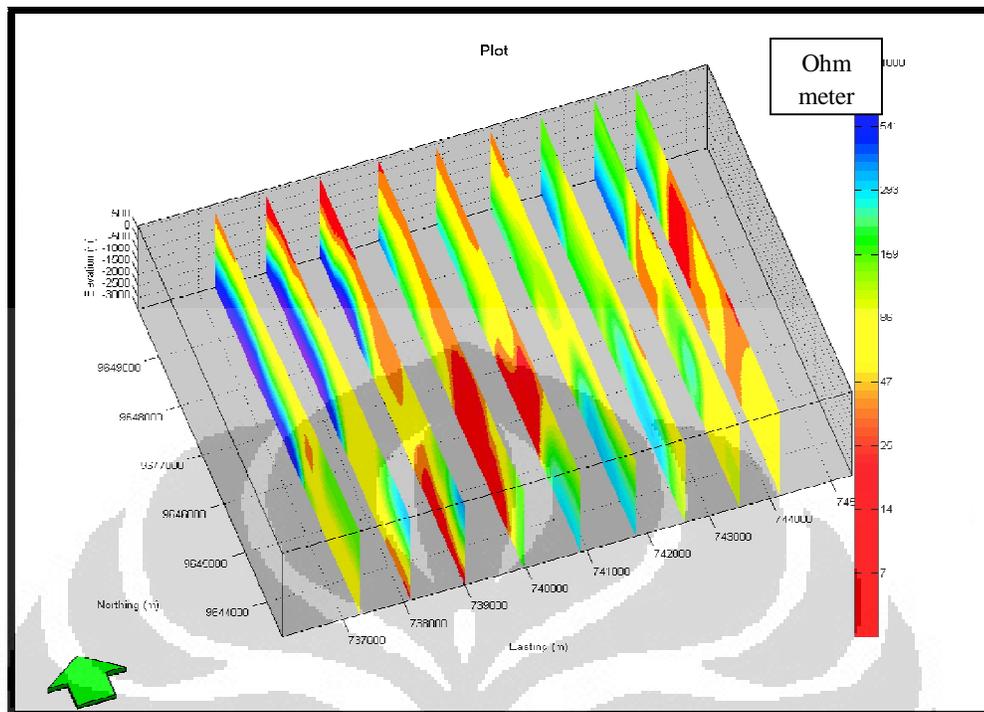
Dari ketiga lintasan di atas, mulai dapat dibuat kemungkinan atau hipotesa awal mengenai keberadaan *heat source* maupun *reservoir* dari sistem panasbumi yang berada di daerah prospek Lili. Mengacu pada hasil inversi lintasan A (MT-01, MT-02, MT-03) gambar 5.5a, terlihat bahwa zona berwarna biru yang diduga sebagai sumber panas dari sistem tersebut serta *reservoir* yang berada di atasnya dengan resistivitas yang lebih rendah. Kemudian di atas *reservoir* terdapat zona dengan resistivitas yang sangat rendah yang diduga sebagai *clay cap*.

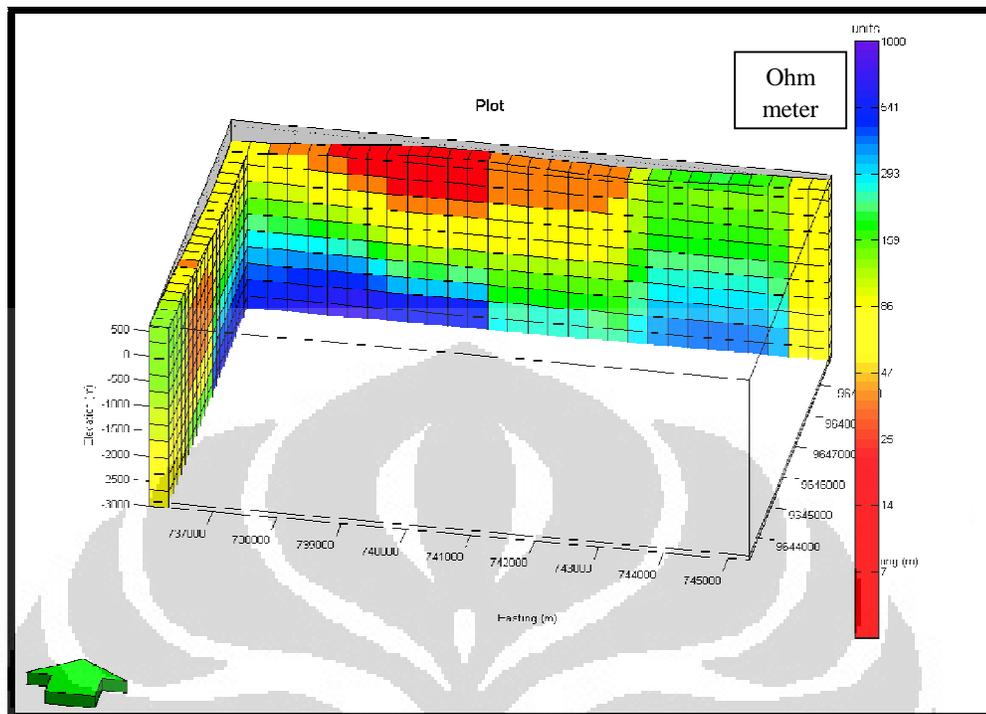
Pada lintasan B (MT-08, MT-09a, MT-10, MT-11) gambar 5.5b, kemenerusan zona yang dianggap *heat source* masih terdeteksi. Pada lintasan ini terlihat sebuah kontras resistivitas yang diduga sebagai patahan yang terletak di antara MT-08 dan MT-09. Pada lintasan C (MT-15, MT-16, MT-17, MT-18, MT-19) gambar 5.5c masih terdapat kemenerusan *heat source* dan juga zona yang diprediksi sebagai patahan.

Dari hasil inversi tersebut akan didapatkan nilai resistivitas dan fase yang baru yang tetap mengacu pada data sebelumnya. Kemudian untuk mengetahui persebaran serta bagaimana sistem serta model konseptual dari sistem panasbumi dilakukan pemodelan secara tiga dimensi yang akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

### **5.2.2 Model Tiga Dimensi**

Semua hasil proses inversi pada setiap lintasan akan divisualisasikan dalam model tiga dimensi dengan menggunakan *software Geoslicer-X*. Selain data resistivitas dibutuhkan juga data tambahan seperti topografi titik pengukuran dan batas atau *boundary* dari daerah yang akan dilakukan pemodelan secara tiga dimensi. Setelah melalui proses *gridding* hasil visualisasi persebaran pola resistivitas dapat ditampilkan melalui metode *slicing* seperti pada gambar 5.6 di bawah :





(c)

Gambar 5.6 (a) *Slicing* 2-D arah utara-selatan (b) *Slicing* 2-D arah utara-selatan dan timur-barat (c) *Cubic slice*

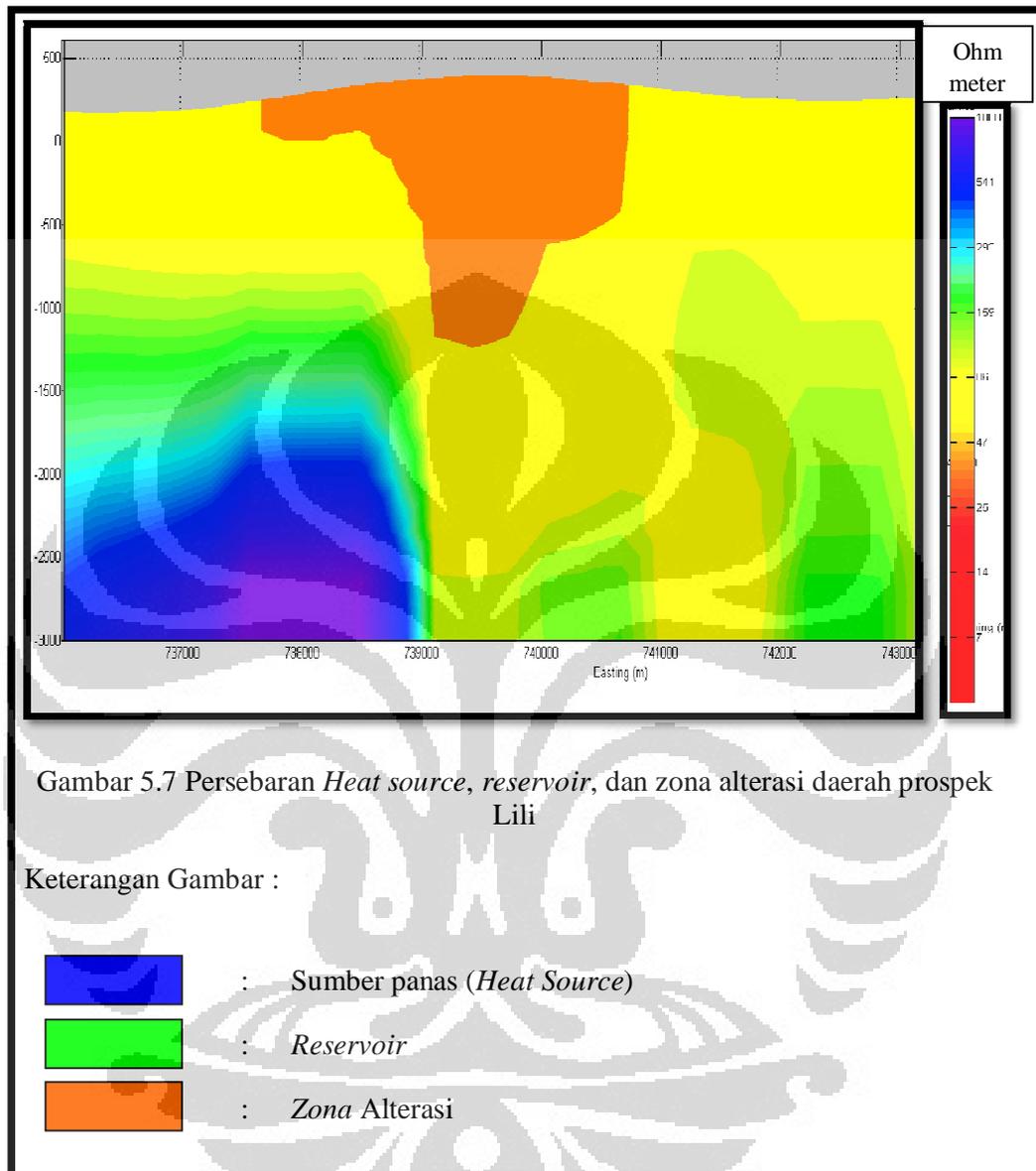
Menurut data geologi, sumber panas yang berasal dari kerucut vulkanik dengan produk berupa lava dan breksi lava yang berkomposisi andesit yang masih memiliki sisa panas dari dapur magma terdeteksi dengan metode MT dengan adanya pola persebaran resistivitas yang cukup tinggi, yaitu sekitar 1000  $\Omega\text{m}$ . Pola persebaran resistivitas tinggi menyebar dari barat hingga ke timur daerah pengukuran (Gambar 5.7). Pola persebaran sumber panas terlihat agak terputus pada bagian tengah yang disebabkan adanya zona patahan dengan resistivitas rendah yang merupakan lokasi mata air panas Sepporaki 1. Menurut data geologi batuan di sekitar patahan tempat munculnya manifestasi mengalami perubahan sifat fisis yang disebabkan oleh alterasi hidrotermal yang bergerak pada sistem tersebut.

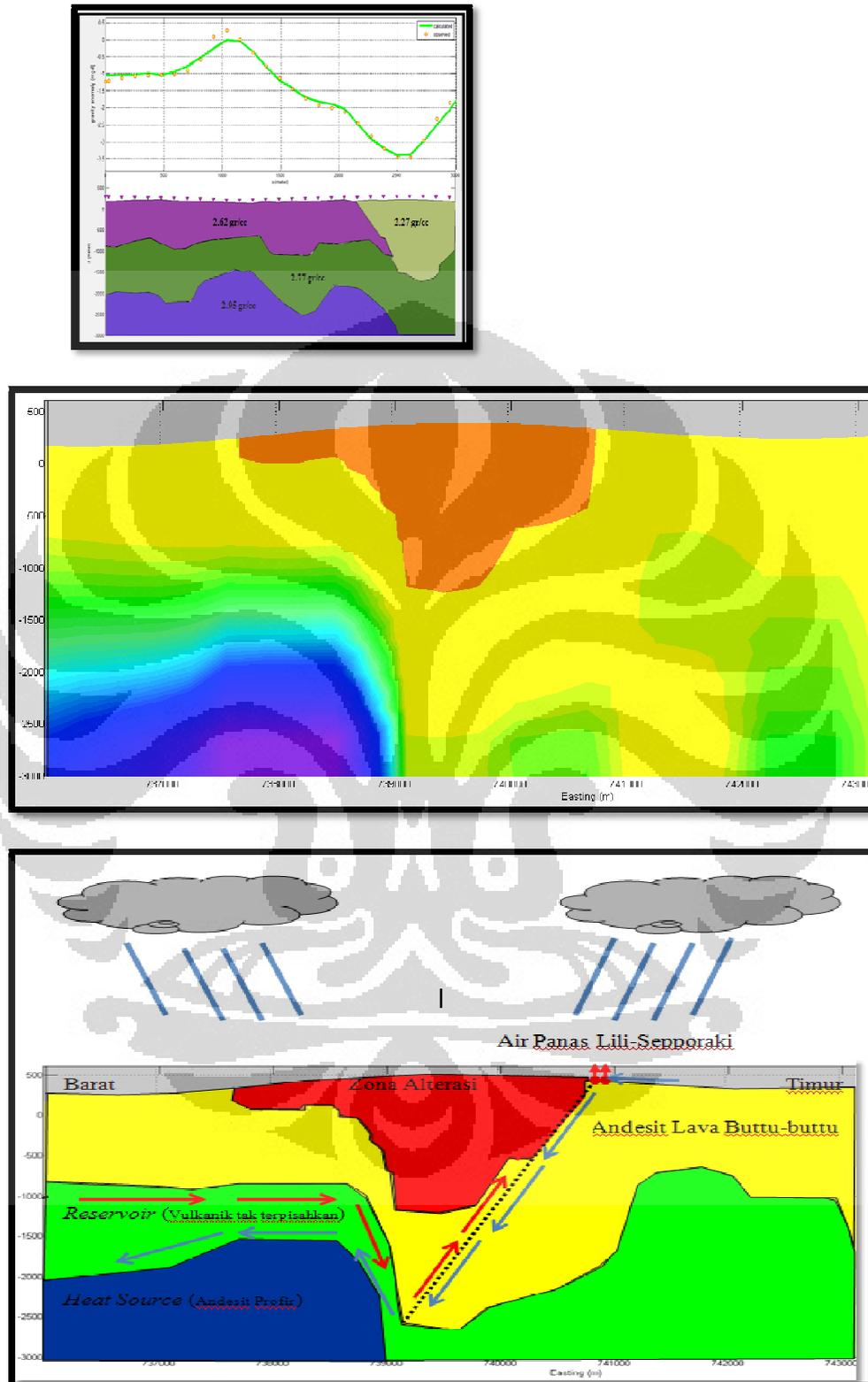
Sesuai dengan data geologi, terdapat patahan dengan nilai resistivitas yang relatif rendah sekitar 50  $\Omega\text{m}$  dari arah barat laut hingga ke tenggara yang merupakan pola struktur utama yang terjadi pada daerah pengukuran. Patahan inilah yang merupakan zona *recharge* dan *discharge* pada sistem panasbumi

daerah prospek Lili (Gambar 5.7). Pada visualisasi data MT pada daerah patahan, muncul struktur berupa *graben* yang kemungkinan berkontribusi dengan kemuculan mata air panas Sepporaki.

Zona *reservoir* pada sistem ini berada di antara zona dengan resistivitas tinggi (*heat source* 1000  $\Omega\text{m}$ ) dan zona alterasi mineral akibat alterasi hidrotermal dengan resistivitas yang rendah (*clay cap* <20  $\Omega\text{m}$ ). Nilai resistivitas dari *reservoir* ini berada sekitar di atas 50  $\Omega\text{m}$  yang tersebar di sekitar barat daya hingga tengah lokasi pengukuran (Gambar 5.7). Dilihat dari persebaran resistivitasnya, zona ini masih terus kontinu ke arah utara daerah pengukuran sehingga geometri dari *reservoir* masih belum dapat ditentukan dengan pasti. Kedalaman *reservoir* berada sekitar 1 – 1.8 km dari permukaan dengan suhu *reservoir* berdasarkan pengukuran geotermometer Na-K berkisar antara 189°-201°C (PSDG, 2010).

Zona alterasi (*clay cap*) terbentuk dari proses *hydrothermal alteration*, yaitu perubahan mineral, tekstur, dan respon kimia dari batuan karena interaksi dengan air panas, *steam*, atau gas (Wohletz & Heiken, 1992). Zona alterasi pada daerah penelitian, yang ditandai dengan lapisan berwarna merah (Gambar 5.7) dengan resistivitas yang rendah (<20 ohm-m) diakibatkan oleh interaksi air panas dari *reservoir* dengan batuan-batuan yang dilaluinya. Interaksi mengakibatkan porositas dan permeabilitas batuan yang awalnya besar menjadi berkurang karena hasil alterasi mengisi pori-pori yang ada pada matriks batuan. Oleh karena itu, air panas membutuhkan celah agar dapat naik ke permukaan. Pada kasus ini, air panas keluar melalui beberapa patahan yang ada pada daerah penelitian yang mempunyai permeabilitas lebih besar.





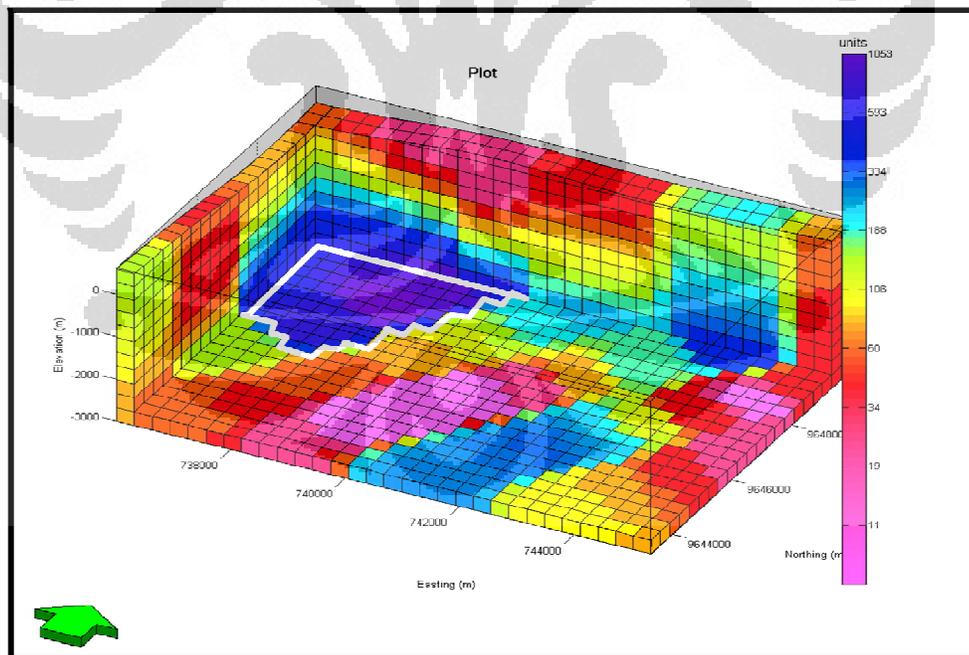
Gambar 5.8 (a) Pemodelan metode gravitasi (b) Pemodelan data MT (c) Konseptual model daerah prospek Lili

### 5.3 Potensi Reservoir

Perkiraan potensi dari panasbumi daerah penelitian didapat dari kalkulasi matematis dengan formula :

$$\text{Potensi} = A \times k \times (\text{Treservoir} - \text{Tcut off}) \quad (\text{Daud, 2008})$$

**A** adalah luas daerah *reservoir*, **k** adalah koefisien *reservoir* yaitu 0,1 (faktor konversi untuk energi panas yang dikandung di dalam fluida panas saja, sedangkan  $k=0,19$  untuk energi panas yang dikandung di dalam fluida dan formasi batuan), **Treservoir** adalah suhu *reservoir* yang didapat dari hasil *geothermometer* sekitar  $201^{\circ}\text{C}$  (Suhu maksimal dari Na-K *geothermometer*) dan **Tcut off** adalah  $180^{\circ}\text{C}$ . Luas daerah *reservoir* didapat dari mendeliniasi *hot rock*, diperkirakan luasan *hot rock* tidak jauh berbeda dengan luasan *reservoir*. Karena luasan *reservoir* lebih sulit dideliniasi secara visual (Gambar 5.9). Kalaupun ada perbedaan, cenderung luasan *reservoir* lebih besar dari luasan *hot rock*, jadi tidak mengurangi perkiraan potensi yang diberikan. potensi yang dihasilkan sekitar 45.6 MW.

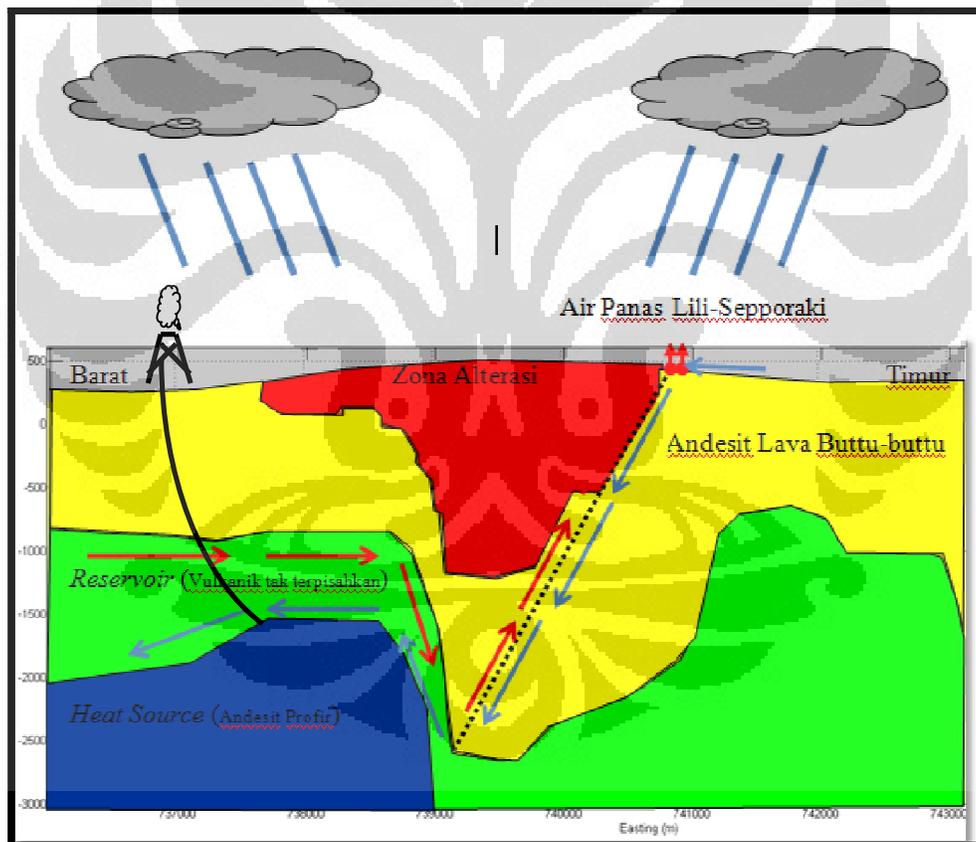


Gambar 5.9 Perkiraan luas reservoir

## 5.4 Rekomendasi Pengeboran

Dari hasil pemodelan sistem panasbumi juga perkiraan potensi yang ada pada daerah penelitian, maka dapat dikatakan bahwa daerah prospek panasbumi Lili cukup berpotensi untuk dikembangkan.

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengeboran eksplorasi untuk memastikan batasan area prospek untuk diproduksi dan mendapatkan data yang lebih lengkap mengenai *properties* dari batuan *reservoir*. Saran mengenai titik pengeboran adalah di sekitar daerah *outflow* dengan kedalaman sekitar 2 km. Titik pengeboran ini dipilih karena daerah tersebut dekat dengan zona patahan untuk mendapatkan fluida panasnya, karena mempunyai permeabilitas yang lebih besar.



Gambar 5.10 Rekomendasi lokasi pengeboran

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1 Kesimpulan**

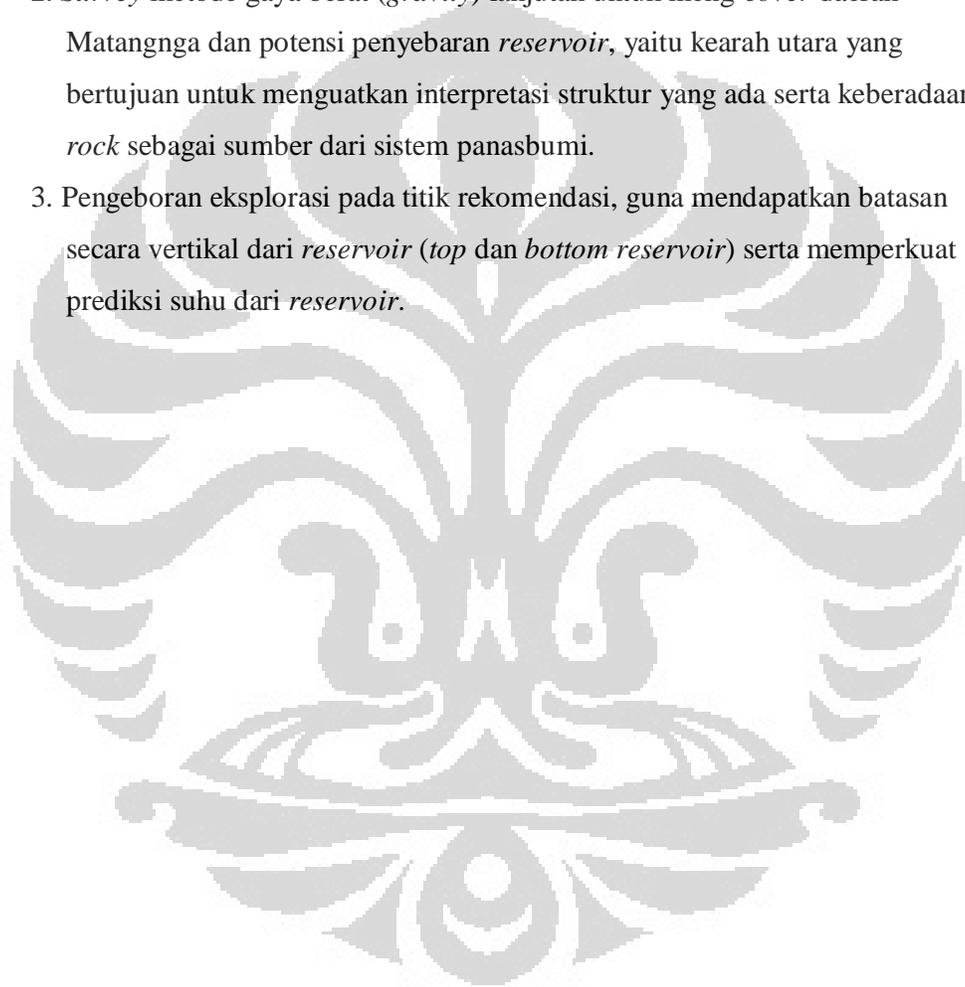
Setelah melakukan pengolahan data dan pemodelan sistem panasbumi pada daerah penelitian dengan metode *magnetotelluric* dan didukung oleh data gravitasi, geologi dan geokimia, dapat disimpulkan bahwa :

1. Metode MT telah berhasil mendeteksi keberadaan lapisan *clay cap*, geometri *reservoir*, *hot rock*, dan penyebarannya serta struktur yang mengontrol keberadaan sistem panasbumi berdasarkan nilai resistivitasnya.
2. Data MT memperlihatkan lapisan konduktif (<20 ohm-m) dengan ketebalan sekitar 1 km, diindikasikan sebagai zona alterasi dari sistem panasbumi. Lapisan yang berada di bawah zona alterasi dengan nilai resistivitas sedikit lebih tinggi (>50 ohm-m), diindikasikan sebagai zona reservoir, dengan ketebalan 1 - 1,8 km. Lapisan dengan nilai resistivitas tinggi ( $\pm 1000$  ohm-m) berada di bagian barat mengindikasikan *hot rock*. Lokasi *outflow* dari sistem panasbumi yang ditandai dengan kemunculan *hotspring* di daerah sekitar patahan yang merupakan zona lemah dengan permeabilitas dan resistivitas yang cukup rendah pada daerah tengah pengukuran.
3. Pemodelan data MT dan data gravitasi menunjukkan pola yang sama mengenai pola sistem panasbumi di daerah prospek Lili serta bentuk struktur yang terbentuk pada daerah tersebut.
4. Lokasi titik pengeboran eksplorasi direkomendasikan berada di dekat titik MTLL-09, yaitu di sebelah barat Desa Sepporaki, dengan kedalaman sekitar 2 km.

## 6.2 Saran

Ada beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian berikutnya, antara lain :

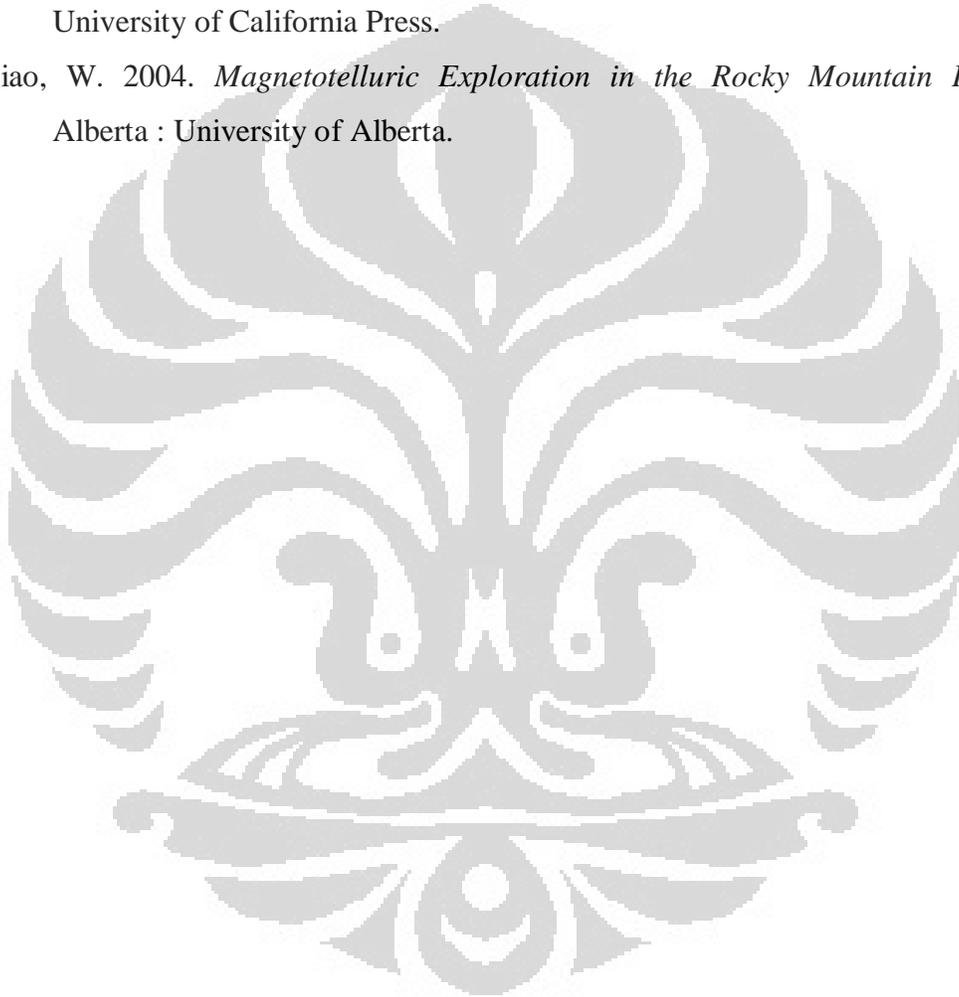
1. Penambahan titik pengukuran MT ke arah barat daerah penelitian untuk mendapatkan informasi tentang batas *reservoir* yang masih dimungkinkan adanya perluasan.
2. *Survey* metode gaya berat (*gravity*) lanjutan untuk meng-*cover* daerah Matangnga dan potensi penyebaran *reservoir*, yaitu kearah utara yang bertujuan untuk menguatkan interpretasi struktur yang ada serta keberadaan *hot rock* sebagai sumber dari sistem panasbumi.
3. Pengeboran eksplorasi pada titik rekomendasi, guna mendapatkan batasan secara vertikal dari *reservoir* (*top* dan *bottom reservoir*) serta memperkuat prediksi suhu dari *reservoir*.



## DAFTAR ACUAN

- Aswo, Wambra. 2011. *Pemodelan Sistem Panasbumi dengan Metode Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Wilerang, Jawa Timur*. Skripsi Program Studi Fisika Universitas Indonesia.
- Castells, A. M. 2008. *Magbetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of the Central Betic Crustal Structure*. Barcelona: Univesitat de Barcelona, Departement de Geodinamica I Geofisica.
- Daud, Yunus. 2008. *Modul Kuliah Eksplorasi Geothermal*. Program Studi Fisika Universitas Indonesia.
- Dickson, Mary H, dan Mario Fanelli. 2004. *What is Geothermal Energy?.* Italy : Istituto di Geoscienze e Georisorse.
- Gamble. T. D, W. M. Goubaou, J. Clarke. 1979. *Magnetotelluric With Remote Reference* : Geophysics, Vol 40 hlm 53-68.
- Grandis, Hendra dan Agus Hendro L. 1996. *Koreksi Efek Statik Pada Data Magnetotelurik Menggunakan Data Elektromagnetik Transien*, Proceeding Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Phoenix Geophysics. 2005. *Data Processing User Guide*.
- Phoenix Geophysics. 2005. *Magnetotelluric Unit User Guide*.
- Sulistyo, A. (2011). *Koreksi Pergesaran Statik Menggunakan Metode Geostatik, Perata-rataan dan TDEM*. Skripsi Program Studi Fisika Universitas Indonesia.
- Tim Survei Terpadu. 2010. *Penyelidikan Panas Bumi Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Polewali, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat*. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi - Kementrian ESDM.
- Tim Survei Pendahuluan. 2009. *Penyelidikan Panas Bumi Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Polewali, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat*. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi - Kementrian ESDM.
- Unsworth, M. 2008. Lecture Notes. *Geophysics 424*.

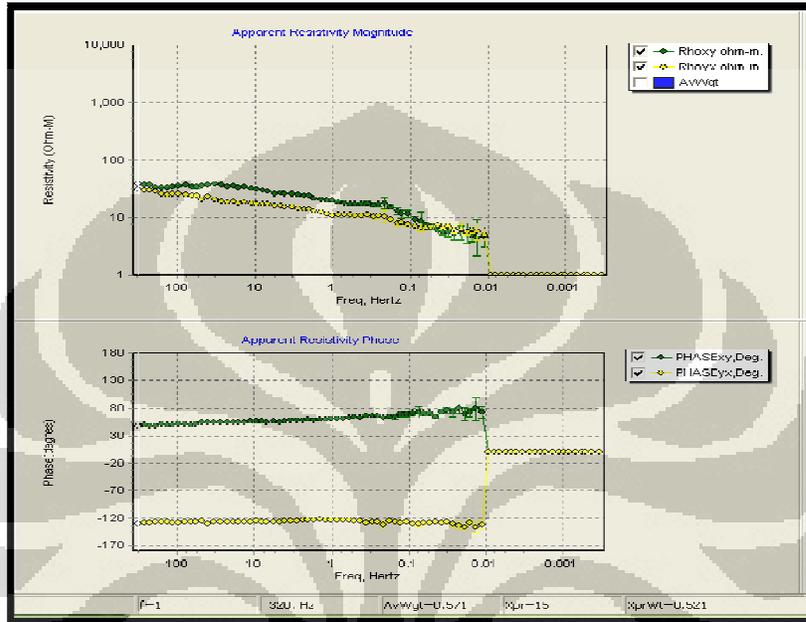
- Vozoff, K. 1991. The Magnetotelluric Method. In M. N. Nabighian, *Electromagnetic Methods In Applied Geophysics-Applications Part A and Part B* (pp. 641-711). Society of Exploration Geophysicist.
- White, D. E. 1973. *Characteristics of Geothermal Resources*. In: Kruger, P. and Otte, C., eds. *Geothermal Energy* hlm. 69-94. Stanford: Stanford University Press.
- Wohletz, K., & Heiken, G. 1992. *Volcanology and Geothermal Energy*. California : University of California Press.
- Xiao, W. 2004. *Magnetotelluric Exploration in the Rocky Mountain Foothills*. Alberta : Universta. of Alberta.



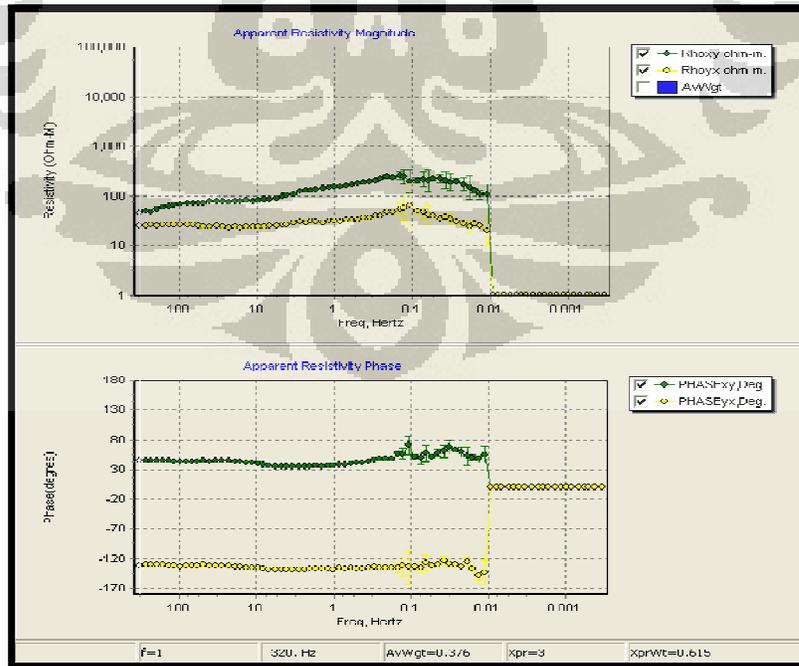
# DAFTAR LAMPIRAN

## KURVA SOUNDING MT

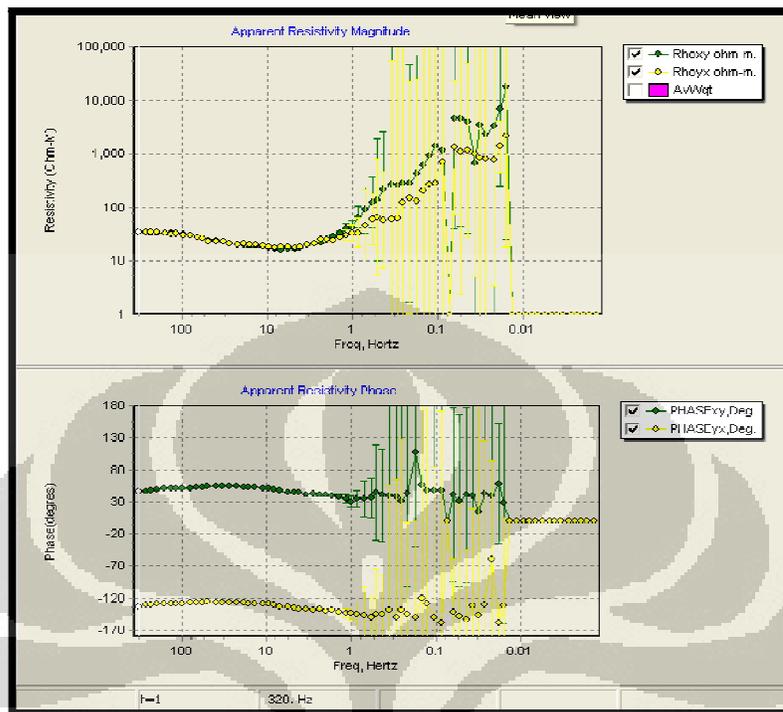
MTLL-01



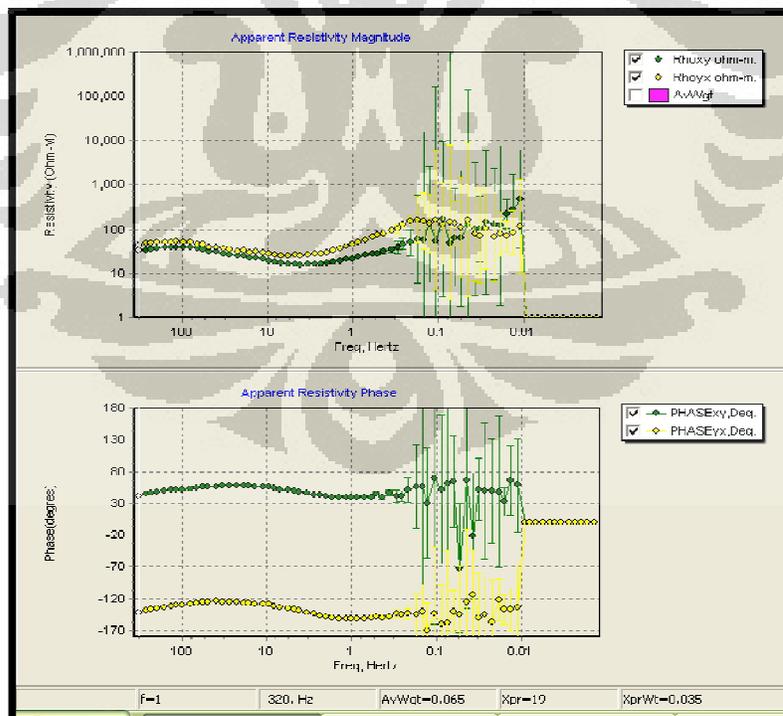
MTLL-02



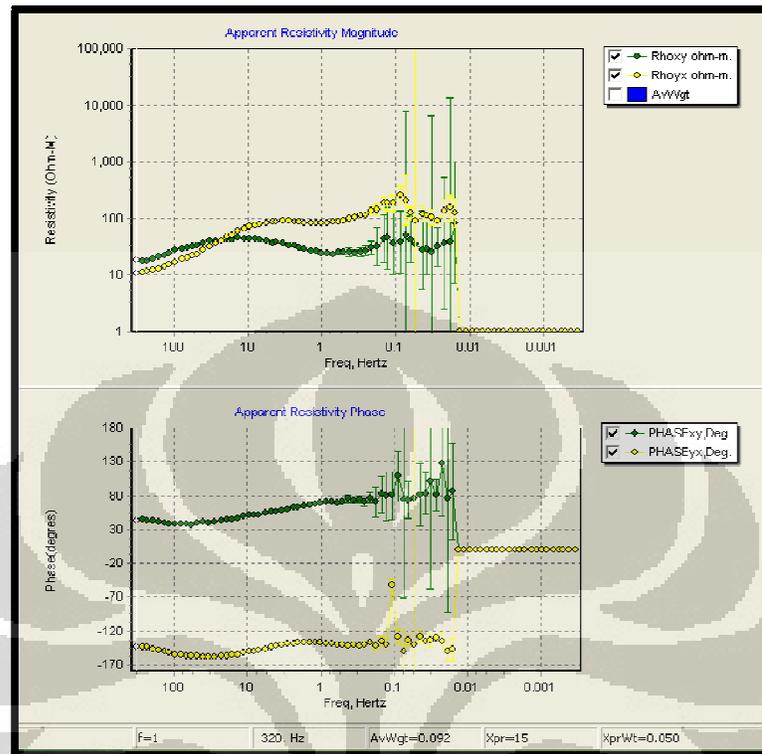
## MTLL-03



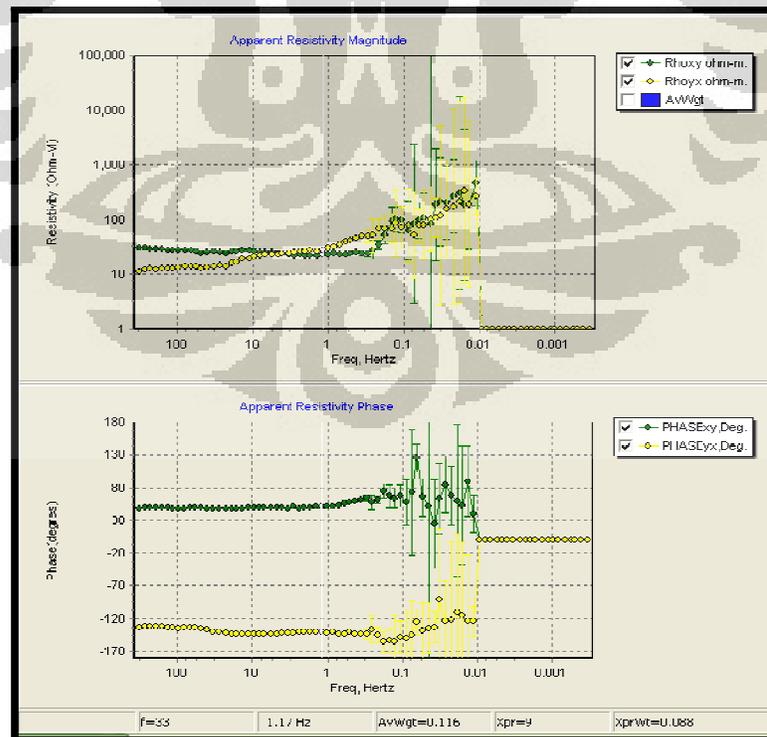
## MTLL-04



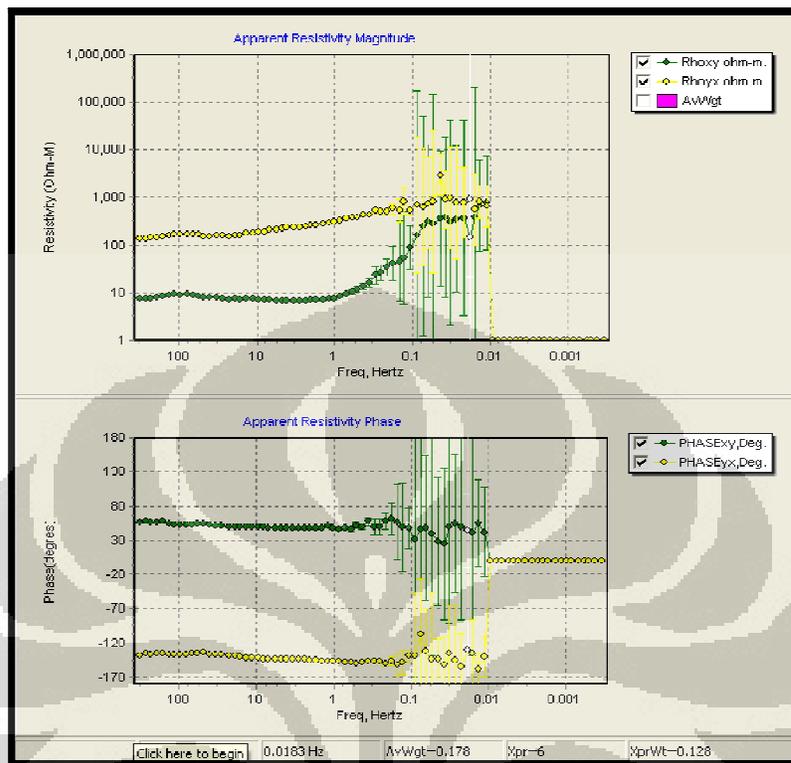
## MTLL-08



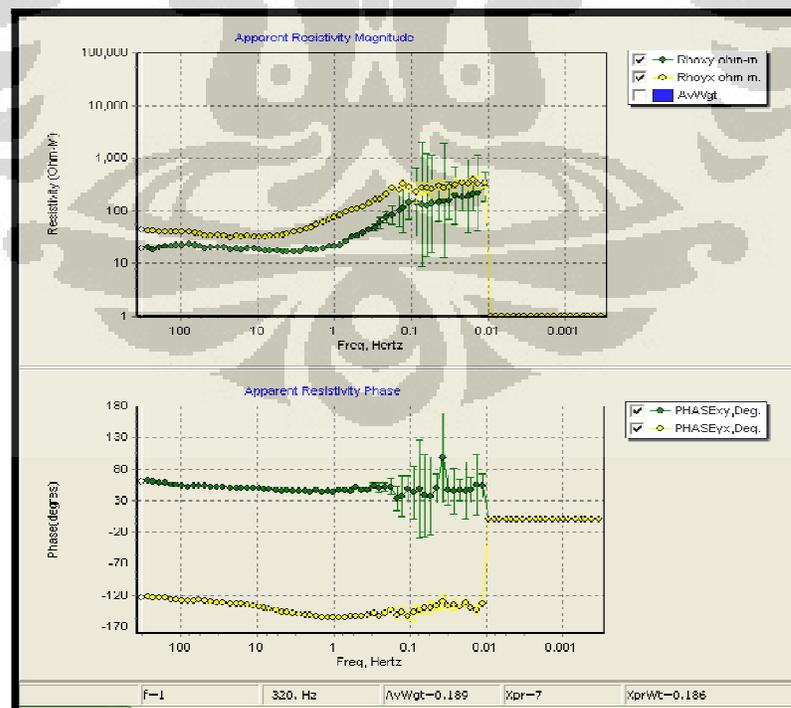
## MTLL-09



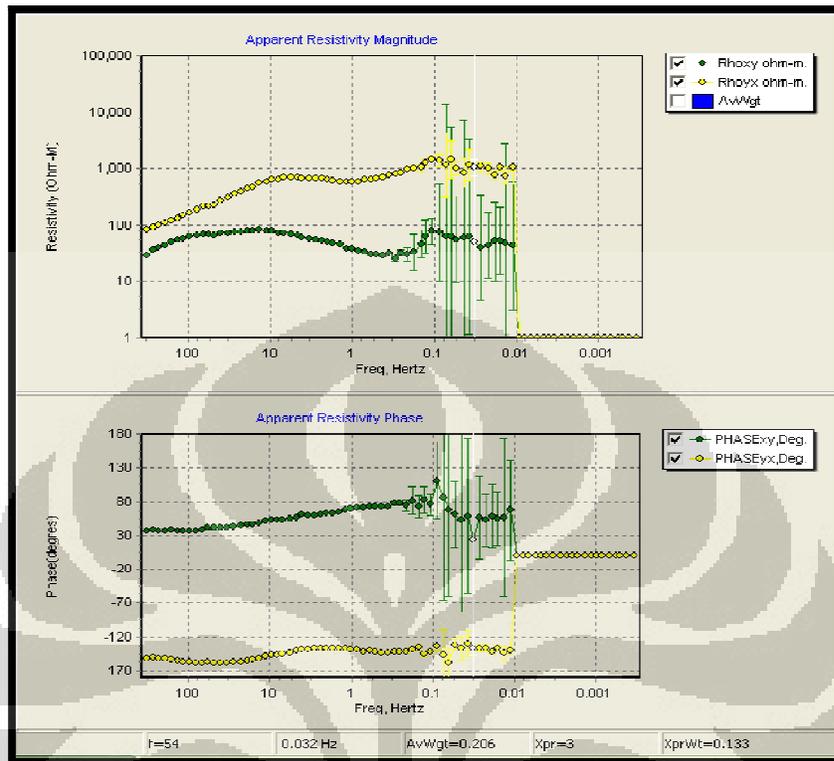
## MTLL-10



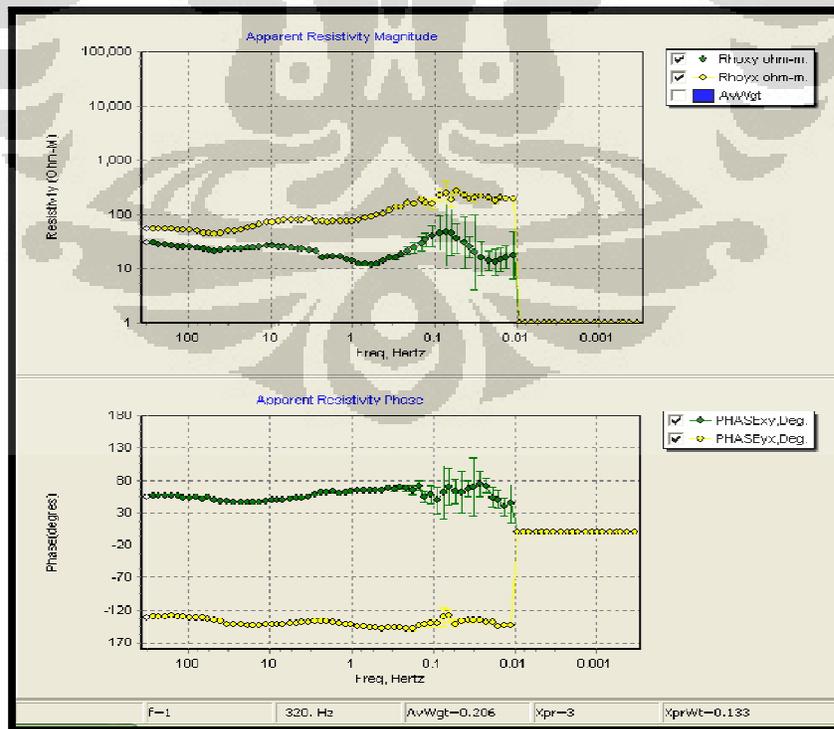
## MTLL-11



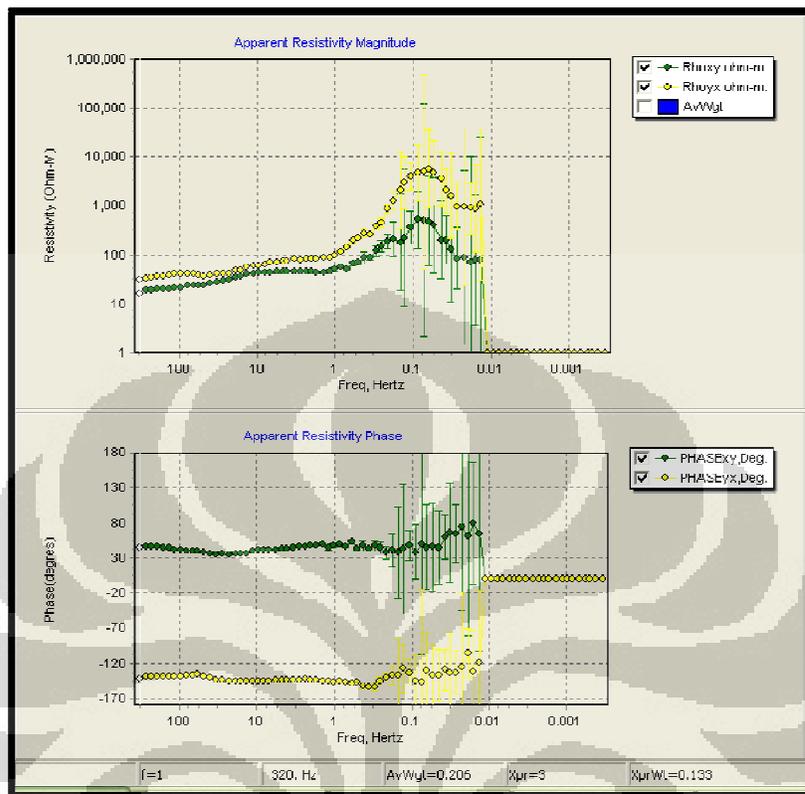
## MTLL-15



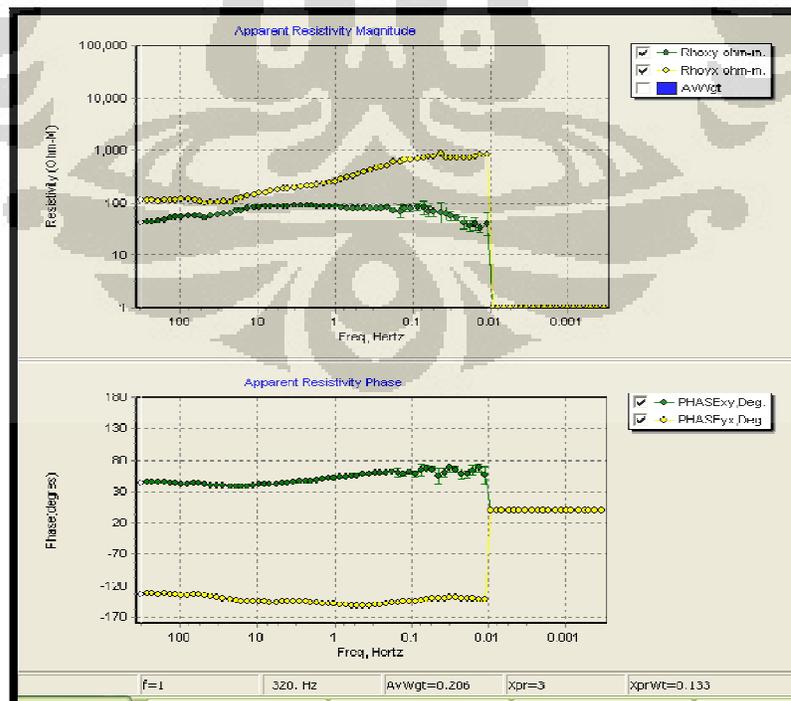
## MTLL-16



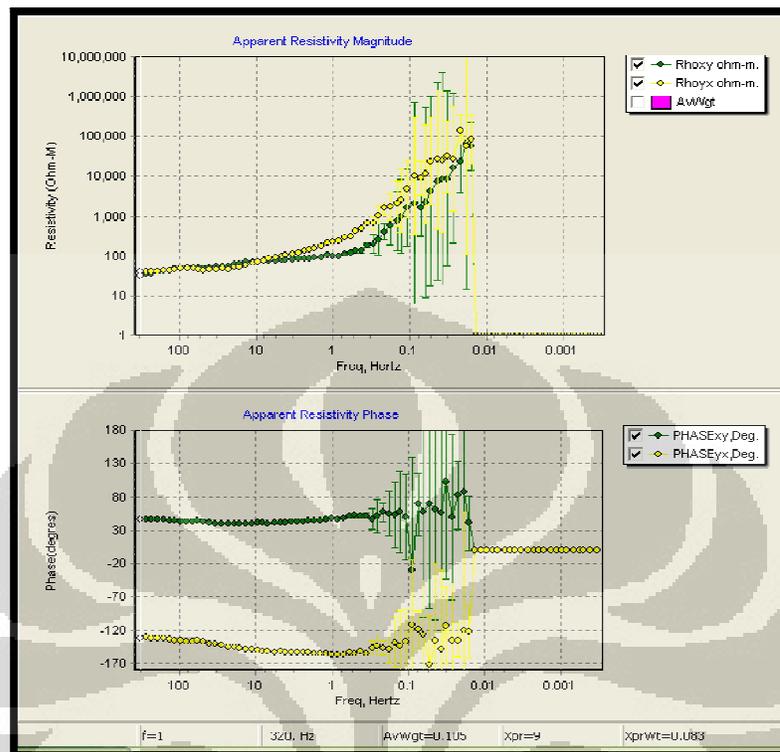
## MTLL-16A



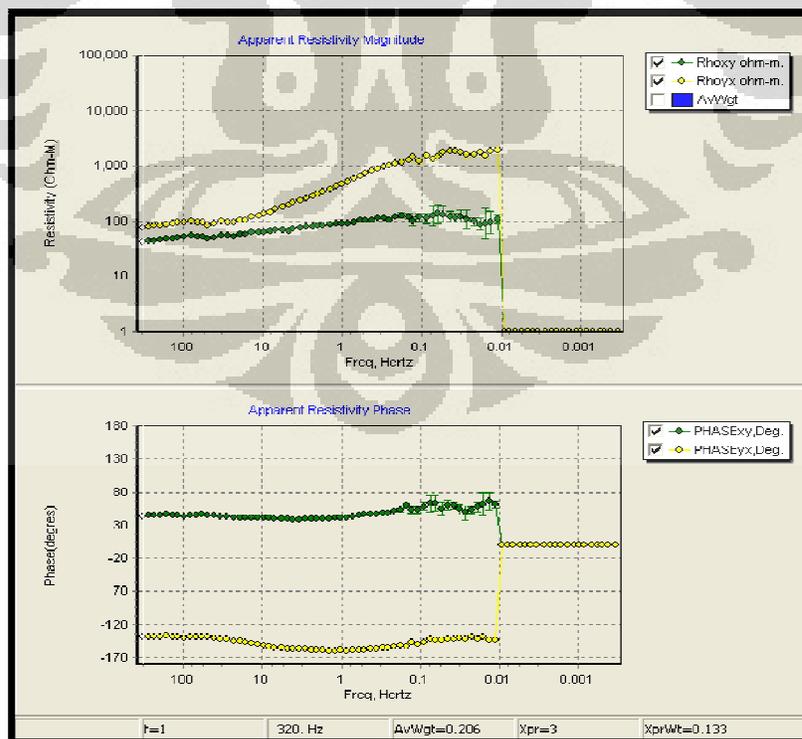
## MTLL-17



## MTLL-17A

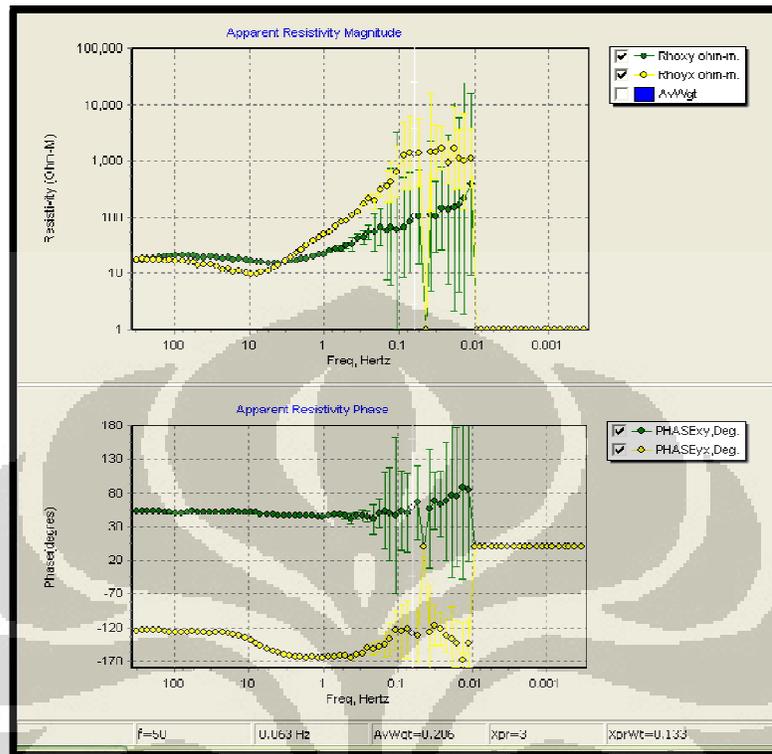


## MTLL-18



Universitas Indonesia

## MTLL-19



## MTLL-22

