



**TUGAS AKHIR - SF184801**

# **PEMODELAN 2D MAGNETOTELURIK UNTUK INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI**

**Mohammad Istajarul Alim**  
**NIM. 0111154000004**

**Dosen Pembimbing:**  
**Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.**  
**NIP. 19750205 199903.1.004**

**DEPARTEMEN FISIKA**  
**FAKULTAS SAINS**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2019**





**TUGAS AKHIR - SF184801**

**PEMODELAN 2D MAGNETOTELURIK UNTUK  
INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI**

**Mohammad Istajarul Alim  
NIM. 0111154000004**

**Dosen Pembimbing:  
Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.  
NIP. 19750205 199903.1.004**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS SAINS  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**FINAL PROJECT - SF184801**

**MAGNETOTELLURICS 2D MODELING TO  
INTERPRETATION OF GEOTHERMAL  
SYSTEMS**

**Mohammad Istajarul Alim  
NIM. 0111154000004**

**Advisor :  
Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.  
NIP. 19750205 199903.1.004**

**DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

### Pemodelan 2D Magnetotelurik untuk Interpretasi Sistem Panas Bumi

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains  
pada  
Bidang Studi Geofisika  
Program Studi S-1 Departemen Fisika  
Fakultas Sains  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MOHAMMAD ISTAJARUL ALIM**  
**0111154000004**

**Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :**



**Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.**

NIP. 19750205 199903.1.004



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## PEMODELAN 2D MAGNETOTELURIK UNTUK INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI

**Nama Mahasiswa** : Mohammad Istajarul Alim  
**NIM** : 0111154000004  
**Departemen** : Fisika, Fakultas Sains ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.

### ABSTRAK

*Sistem panas bumi merupakan area bawah permukaan bumi yang menyimpan adanya sirkulasi energi panas. Energi panas yang tersimpan dalam sistem panas bumi dapat dimanfaatkan oleh manusia sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan. Menentukan area sistem panas bumi membutuhkan metode eksplorasi geofisika yang memiliki penetrasi cukup dalam dan dapat membedakan struktur tanah berdasarkan nilai tahanan jenis. Salah satu metode yang efektif dalam menentukan sistem panas bumi yaitu metode magnetotelurik. Metode ini menerima sinyal medan listrik dan magnet dari hasil induksi batuan bawah permukaan terhadap aktivitas gelombang elektromagnetik badai matahari dan petir. Sinyal tersebut kemudian dilakukan pengolahan sehingga menghasilkan nilai tahanan jenis. Data tahanan jenis inilah yang kemudian dapat mempresentasikan struktur dari sistem panas bumi baik batuan kedap air, reservoir dan zona intrusi magmatik. Dalam penelitian ini juga dikolaborasikan dengan data pendukung geologi dan geokimia. Dimana sistem panas bumi daerah penelitian ini memiliki kedalaman puncak reservoir sekitar 1000m dibawah permukaan berdasarkan interpretasi seluruh data. Temperatur reservoir diperkirakan sebesar 200°C dan termasuk dalam fluida klorida serta bikarbonat.*

***Kata Kunci: Elektromagnetik, Interpretasi, Magnetotelurik, Sistem Panas Bumi.***

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## MAGNETOTELLURICS 2D MODELING TO INTREPETATION OF GEOTHERMAL SYSTEMS

**Name** : Mohammad Istajarul Alim  
**NRP** : 0111154000004  
**Department** : Physics, Faculty of Sciences ITS  
**Advisor** : Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si.

### **ABSTRACT**

*The geothermal systems are subsurface area of the earth that stores heat energy circulation. Heat energy stored in geothermal systems can be used by humans as an eco-friendly alternative energy. Determining the geothermal systems area requires a geophysical exploration method that has deep sufficient penetration which can distinguish soil structures based on the resistivity value. One of effective method for determining the geothermal systems is the magnetotellurics method. This method receives electric and magnetic field signals from the result of subsurface rock induction against the activity of electromagnetic waves of solar and lightning storms. The signals processed to produce the resistivity value. Then, the representation of the structure of the geothermal systems both the impermeable rock, the reservoir, and the magmatic intrusion zone can be calculated. This study also collaborated with supporting data of geology and geochemistry. Where the geothermal systems of the study area have a top depth of the reservoir around 1000m below the surface based on the interpretation of all data. The reservoir temperature is estimated at 200°C where chloride fluid and bicarbonate are included.*

**Keywords:** *Electromagnetic, Interpretation, Magnetotellurics, Geothermal Systems.*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas limpahan rahmat dan hidayahnya, penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir ini. Tugas akhir ini penulis susun sebagai syarat wajib untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan judul:

### **PEMODELAN 2D MAGNETOTELURIK UNTUK INTERPRETASI SISTEM PANAS BUMI**

Selama pelaksanaan penelitian tugas akhir ini, penulis telah mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, maka penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. rer. nat. Eko Minarto, M.Si., selaku dosen pembimbing penulis yang senantiasa telah memberikan bimbingannya dalam bentuk ilmu, nasihat serta saran dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Ahmad Zarkasy, S.Si., M.T., selaku pembimbing instansi dari PSDBMP yang telah memberikan arahan dan masukan dalam pengolahan dan interpretasi data.
3. Bapak Dr. Sungkono, M.Si. dan Bapak Muhammad Arief Bustomi, M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan terhadap penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Suyatno, M.Si, selaku dosen wali yang telah setia memberikan arahan perkuliahan kepada penulis hingga akhir jenjang sarjana.
5. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng., selaku Ketua Departemen Fisika ITS.
6. Seluruh dosen dan staf Departemen Fisika yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama perkuliahan jenjang sarjana.
7. Kedua orang tua dan adik penulis, yang selalu mendoakan penulis, memberikan kasih sayang, motivasi, dukungan moral

dan memberikan semua hal yang dibutuhkan oleh penulis setiap saat.

8. Keluarga besar penulis, yang telah memberikan berbagai bantuan dan doa kepada penulis.
9. Teman-teman tim kerja praktik, A. R. Utami, I. M. Rozika dan S. K. Rachmawati, yang telah berbagi ilmu, kolaborasi dan semangat kebersamaan hingga pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
10. Teman-teman kelompok belajar, A. I. Maharani, E. B. Yutomo, R. L. Pradana dan V. L. Maghfirohtuzzoimah, yang telah semangat dan saling berbagi ilmu dari awal perkuliahan.
11. Teman-teman seperjuangan tugas akhir atau kerja praktik periode Januari 2019 di PSDMBP yang tidak dapat saya sebutkan satu-satu.
12. Keluarga lab. Geofisika, lab. Fisika Madya dan lab. Fisika Dasar.
13. Keluarga UKM *ITS Astronomy Club* dan *SC AAPG ITS*.
14. Teman-teman Fisika ITS 2015 yang telah memberikan kebersamaan serta segala bantuan baik moral maupun material.
15. Semua pihak lain yang terlibat dalam perjalanan penulis hingga terlaksanakannya penelitian tugas akhir ini.

Berkat bantuan dari pihak-pihak tersebut, penulis dapat menempuh jenjang sarjana hingga pada tahap penelitian tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dapat memberikan implikasi bagi khalayak akademisi lain. Namun penulis juga menyadari, bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini sehingga kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat penulis harapkan.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
<i>TITLE PAGE</i> .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Batasan Masalah .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1 Metode Magnetotelurik.....	7
2.2 Induksi Gelombang EM.....	7
2.3 Persamaan Maxwell.....	8
2.4 <i>Skin Depth</i> .....	10
2.5 Tensor Impedansi.....	11
2.5.1 Tensor impedansi 1 dimensi .....	12
2.5.2 Tensor impedansi 2 dimensi .....	12
2.5.3 Rotasi tensor impedansi.....	14
2.6 Pemodelan.....	14
2.6.1 Pemodelan kedepan .....	15
2.6.2 Pemodelan kebelakang .....	16
2.7 Sistem Panas Bumi .....	17
2.8 Klasifikasi Sistem Panas Bumi .....	20
2.9 Geologi Penelitian .....	21
2.10 Geokimia Manifestasi Penelitian .....	23

BAB III METODOLOGI .....	27
3.1 Waktu dan Pelaksanaan Penelitian .....	27
3.2 Data dan Piranti Lunak Penelitian .....	27
3.3 Titik Pengukuran dan Desain Lintasan Model .....	28
3.4 Prosedur Kerja .....	28
3.4.1 Studi literatur .....	28
3.4.2 Pengolahan data magnetotelurik.....	29
3.4.3 Analisis geologi dan geokimia .....	31
3.4.4 Interpretasi.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Analisis Data Magnetotelurik .....	35
4.1.1 Hasil rotasi tensor .....	35
4.1.2 Hasil seleksi <i>cross power</i> .....	38
4.1.3 Hasil <i>masking</i> dan <i>smoothing</i> .....	39
4.1.4 Koreksi pergeseran statik .....	42
4.1.5 Pemodelan inversi 1 dimensi.....	42
4.1.6 Pemodelan inversi 2 dimensi.....	45
4.2 Geologi dan Geokimia Penelitian .....	49
4.3 Interpretasi Akhir.....	50
BAB V KESIMPULAN .....	55
5.1 Kesimpulan .....	55
5.2 Saran .....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN .....	59
BIODATA PENULIS.....	89

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Induksi gelombang EM pad batuan.....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Model bumi satu dimensi .....	12
<b>Gambar 2.3</b>	Mode TE dan TM dalam kontras kontak vertikal .	13
<b>Gambar 2.4</b>	Sistem panas bumi .....	19
<b>Gambar 2.5</b>	Peta geologi.....	22
<b>Gambar 2.6</b>	Diagram trilinear Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> .....	24
<b>Gambar 2.7</b>	Diagram trilinear Na-K-Mg .....	24
<b>Gambar 2.8</b>	Diagram trilinear Cl-Li-B .....	25
<b>Gambar 3.1</b>	Titik-titik pengukuran dan desain lintasan .....	29
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram alir proses pengolahan magnetotelurik...	32
<b>Gambar 3.3</b>	Diagram alir penelitian.....	33
<b>Gambar 4.1</b>	Rotasi terhadap arah struktur .....	36
<b>Gambar 4.2</b>	(a) Kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 sebelum dilakukan rotasi, dan (b) kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 setelah dilakukan rotasi -45° .....	37
<b>Gambar 4.3</b>	(a) Kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 sebelum dilakukan seleksi <i>cross power</i> , dan (b) kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 setelah dilakukan seleksi <i>cross power</i> .....	40
<b>Gambar 4.4</b>	kurva resistivitas semu dan fase titik 73 (a) sebelum dan (b) setelah dilakukan proses <i>masking</i> dan <i>smoothing</i> .....	41
<b>Gambar 4.5</b>	kurva resistivitas semu dan fase titik 80 (a) sebelum dan (b) setelah dilakukan proses pergeseran statik.....	43
<b>Gambar 4.6</b>	Model 1 dimensi dengan interpolasi untuk lintasan 3 .....	44
<b>Gambar 4.7</b>	Model inversi 2 dimensi untuk lintasan 3 .....	46
<b>Gambar 4.8</b>	Model gabungan inversi 2 dimensi seluruh lintasan .....	47
<b>Gambar 4.9</b>	Interpretasi pada lintasan 3.....	51

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Klasifikasi sumber panas bumi .....	20
<b>Tabel 2.2</b> Karakteristik sampel mata air panas .....	25
<b>Tabel 3.1</b> Titik-titik pengukuran sebagai model 2 dimensi .....	28
<b>Tabel 4.1</b> Jumlah iterasi dan RMS tiap lintasan .....	48

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran A.</b> Data perhitungan koreksi pergeseran statik.....	59
<b>Lampiran B.</b> Kurva resistivitas semu dan fase tiap stasiun .....	60
<b>Lampiran C.</b> Interpretasi tiap lintasan .....	83

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan terbesar di dunia yang formasinya terbentuk akibat dari pertemuan antar tiga lempeng tektonik utama bumi yaitu lempeng Australia, Eurasia dan Pasifik (Shearer, 2009). Dari adanya pertemuan antar tiga lempeng utama tersebut, kepulauan Indonesia menyimpan daerah magmatik yang tersebar dari Pulau Sumatera hingga pulau Papua dan tergabung dalam daerah cincin api pasifik. Tersebar nya potensi magmatik itu sendiri merupakan suatu hal yang dapat dikatakan sebagai salah satu sumber daya alam untuk dilakukan eksplorasi oleh umat manusia seperti energi sumber daya panas bumi (Tabak, 2009).

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber daya yang sangat menarik untuk dilakukan eksplorasi. Hal ini dikarenakan energi panas bumi merupakan salah satu sumber daya alam tanpa bahan bakar dan hanya menghasilkan sedikit emisi buangan (Glassley, 2010). Energi panas bumi juga merupakan sumber energi alternatif yang dapat membantu dalam penyediaan energi ramah lingkungan di abad 21 (Gupta dan Roy, 2007).

Panas bumi di Indonesia adalah salah satu sistem panas bumi yang memiliki cadangan terbesar didunia. Dari segi pemerintah melalui Wakil Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral memiliki harapan di 2025 Indonesia dapat mencapai tujuan 7.100 MW dalam kapasitas pembangkit panas bumi, yang mana di tahun 2018 kapasitas pembangkit panas bumi di Indonesia sebesar 1.450 MW (Wahjosoedibjo dan Hasan, 2018). Tentunya, untuk menunjang tercapainya harapan tersebut perlu dilakukan kerja bersama dari seluruh sektor baik dari eksplorasi, eksploitasi dan izin pemerintah. Berdasarkan uraian tersebut, peneliti juga ingin melakukan kontribusi khususnya dalam hal metode survei eksplorasi. Dimana peneliti akan menjelaskan mengenai rincian survei eksplorasi

geofisika menggunakan metode magnetotelurik dan data pendukung geologi geokimia.

Dalam eksplorasi panas bumi, metode geofisika magnetotelurik merupakan salah satu metode yang efektif dalam menggambarkan distribusi konduktivitas listrik bawah permukaan dengan memanfaatkan adanya fluktuasi medan magnet dan medan listrik (Vozoff, 1972). Adanya fluktuasi medan magnet dan medan listrik ini akan diukur di permukaan bumi berdasarkan variasi waktu. Dimana hubungan antara medan listrik dan medan magnet akan menghasilkan nilai baru yaitu impedansi ( $Z$ ). Nilai impedansi yang dihasilkan dapat menggambarkan nilai resistivitas semu dan fase pada suatu titik pengukuran. Nilai tersebut kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan nilai resistivitas bawah permukaan berdasarkan pencocokan data pada model inversi. Pemrosesan inversi sendiri merupakan metode yang menghubungkan antara data lapangan dengan parameter model yang berdasarkan atas fungsi *forward modelling* (Rodi dan Mackie, 2001).

Penelitian ini menggunakan data area prospek panas bumi suatu daerah di pulau Sumatera. Data yang digunakan merupakan data mentah magnetotelurik serta data pendukung geologi area penelitian dan geokimia manifestasi permukaan. Semua data merupakan data sekunder dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) sehingga untuk spesifik daerah penelitian tidak dapat dijelaskan secara detail. Data magnetotelurik sendiri digunakan sebanyak 45 titik pengukuran, dimana di titik-titik tersebut dilakukan analisis 2D resistivitas bawah permukaan dan dikorelasikan dengan data pendukung geologi dan geokimia.

Hasil korelasi data geofisika, geologi dan geokimia yang telah diperoleh dapat digunakan sebagai acuan dalam interpretasi sistem panas bumi, sehingga berdasarkan interpretasi tersebut dapat digunakan untuk membuat model konseptual sistem panas bumi pada daerah penelitian. Hasil ini tentunya bisa dipakai sebagai acuan lanjutan eksplorasi panas bumi di daerah penelitian atau dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan tahapan

pengolahan data magnetotelurik beserta interpretasinya untuk data daerah lain.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang muncul dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana tahapan pengolahan data magnetotelurik untuk memperoleh model penampang resistivitas 2 dimensi?
2. Bagaimana melakukan interpretasi area prospek panas bumi penelitian berdasarkan hasil model resistivitas 2 dimensi dan informasi pendukung geologi geokimia?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan perumusan masalah yang telah disusun maka diperoleh tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Mengetahui tahapan pengolahan data magnetotelurik untuk memperoleh model penampang resistivitas 2 dimensi.
2. Dapat melakukan interpretasi area prospek panas bumi penelitian berdasarkan hasil model resistivitas 2 dimensi dan informasi pendukung geologi geokimia.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memberikan banyak manfaat bagi beberapa pihak, diantaranya:

1. Bagi Pemerintah Indonesia  
Bagi pemerintah Indonesia, penelitian memberikan manfaat yakni dapat digunakan sebagai acuan dalam informasi pra-eksploitasi di daerah penelitian.
2. Bagi Masyarakat Indonesia  
Bagi masyarakat Indonesia pada umumnya dapat digunakan sebagai acuan dalam membuat model bawah tanah dari data magnetotelurik.

### 3. Bagi Para Peneliti

Bagi para peneliti, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai kajian terbaru dari data-data model penelitian yang sebelumnya telah dilakukan.

## 1.5 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Data mentah merupakan milik dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDBMP).
2. Pengolahan data magnetotelurik hingga diperoleh penampang model resistivitas 2 dimensi menggunakan algoritma *Non Linear Conjugate Gradient* (NLCG).
3. Model konseptual interpretasi sistem panas bumi berdasarkan atas hasil penampang resistivitas 2D dan data pendukung geologi geokimia yang telah ada.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang dilakukan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab, yakni:

### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori dan data pendukung yang digunakan sebagai acuan dari penelitian.

### BAB III : METODOLOGI

Berisi uraian waktu pelaksanaan penelitian dan mengenai metode-metode serta tahapan-tahapan dalam dilakukannya penelitian.

### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi uraian mengenai hasil analisis dan pembahasan dari proses pengolahan data serta interpretasinya.

**BAB V : PENUTUP**

Uraian mengenai kesimpulan umum dan saran mengenai hasil penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

Daftar pustaka berisikan identitas buku, jurnal, situs web, maupun hal lain yang digunakan sebagai acuan referensi dalam penulisan.

**LAMPIRAN**

Lampiran berisikan data penelitian dan seluruh gambar pendukung.

**BIODATA PENULIS**

Biodata penulis berisikan mengenai biodata dan riwayat perjalanan hidup dari penulis.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Metode Magnetotelurik**

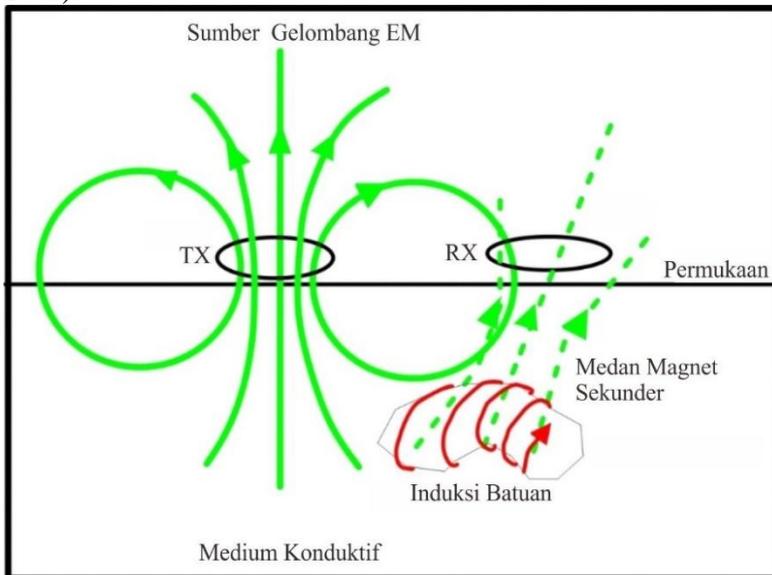
Magnetotelurik merupakan salah satu metode elektromagnetik pasif yang melibatkan pengukuran respon fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (B) alami bumi dalam arah ortogonal di permukaan bumi sebagai alat untuk menentukan struktur konduktivitas bawah permukaan bumi hingga kedalaman beberapa ratus kilometer (Simpson dan Bahr, 2005). Konsep magnetotelurik pertama kali dipublikasikan oleh Tikhonov 1950 dan dibahas lebih detail oleh Cagniard 1953. Metode magnetotelurik menggunakan sumber sinyal yang disebabkan oleh interaksi plasma matahari pada frekuensi rendah yaitu dibawah 1 Hz dan aktivitas petir pada frekuensi tinggi yaitu diatas 1 Hz (Nabighian, 1991). Pada sumber sinyal magnetotelurik frekuensi rendah merupakan salah satu hal yang sangat penting, terutama karena dapat digunakan sebagai sumber untuk melakukan penyelidikan pada kedalaman yang sangat besar. Tentunya medan ini berasal dari interaksi plasma matahari terhadap medan magnet permanen bumi (Zhdanov, 2009).

Pengukuran metode magnetotelurik akan melibatkan dua medan yang diukur dalam arah yang saling tegak lurus. Kedua medan ini masing-masing mengukur dalam arah x dan arah y sehingga akan didapatkan empat data yaitu medan magnet x, medan magnet y, medan listrik x dan medan listrik y. Keseluruhan data tersebut sangat berguna untuk memperoleh informasi impedansi berdasarkan persamaan Maxwell melalui model-model tertentu (Chave dan Jones, 2012).

#### **2.2 Induksi Gelombang EM**

Sinyal MT yang berupa gelombang elektromagnetik akan mengalami rambatan di dalam permukaan bumi. Dimana berdasarkan Gambar 2.1, TX merupakan sumber gelombang

elektromagnetik. Dalam rambatannya dibawah permukaan bumi, gelombang elektromagnetik tersebut akan menginduksi batuan bumi sehingga akan menghasilkan arus telurik atau arus eddy. Arus telurik yang dihasilkan akibat induksi batuan tersebut akan merambat di medium konduktif bawah permukaan bumi. Berdasarkan Hukum Ampere, rambatan arus telurik pada medium konduktif tentu akan menimbulkan medan magnet yang disebut sebagai medan magnet sekunder. Gabungan antara medan magnet primer dan sekunder akan diterima oleh RX sebagai informasi mengenai karakteristik batuan yang telah diinduksi (Unsworth, 2008).



**Gambar 2.1** Induksi gelombang EM pada batuan (Modifikasi dari Unsworth, 2008)

### 2.3 Persamaan Maxwell

Pengembangan dasar gelombang elektromagnetik pada metode magnetotelurik harus memenuhi persamaan Maxwell. Dimana terdapat empat hukum yang harus memenuhi yaitu Hukum Gauss tentang listrik, Gauss tentang magnet, Faraday dan Ampere.

Keempat persamaan Maxwell tersebut dapat ditulis sebagai berikut, (Telford *et al.*, 1990).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \mathbf{q} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

Dimana,

$\mathbf{E}$  : Medan listrik (volt/meter)

$\mathbf{B}$  : Fluks induksi magnetik (Tesla)

$\mathbf{H}$  : Medan magnet (Ampere/meter)

$\mathbf{J}$  : Rapat arus listrik (Ampere/meter<sup>2</sup>)

$\mathbf{D}$  : Perpindahan listrik (Coulomb/meter<sup>2</sup>)

$\mathbf{q}$  : Rapat muatan listrik (Coulomb/meter<sup>2</sup>)

Persamaan (2.1) merupakan persamaan dari Hukum Faraday menyatakan bahwa adanya fluks induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu dapat menyebabkan adanya medan listrik yang arahnya saling berlawanan.

Persamaan (2.2) merupakan persamaan dari Hukum Ampere menyatakan bahwa medan magnet yang melingkupi suatu ruang dihasilkan oleh arus total yang melingkupi ruang tersebut. Dimana arus total yang dimaksud terdiri dari arus konduksi dan perpindahan arus listrik yang bervariasi terhadap waktu.

Persamaan (2.3) merupakan persamaan Hukum Gauss tentang listrik yang menyatakan bahwa rapat muatan listrik sebanding dengan medan listrik yang mengalir dalam ruangan tersebut.

Persamaan (2.4) merupakan persamaan Hukum Gauss tentang magnet yang menyatakan bahwa medan magnet bersifat tidak mempunyai monopol-monopol sehingga tidak memiliki muatan yang melingkupinya.

Persamaan Maxwell yang telah ditulis sebelumnya kemudian dapat dihubungkan dengan persamaan konstitutif linier berikut, (Zhdanov, 2009).

$$D = \epsilon E \quad (2.5)$$

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

$$J = \sigma E \quad (2.7)$$

Dimana,

$\epsilon$  : Permittivitas listrik (Farad/meter)

$\mu$  : Permeabilitas magnetik (Hendry/meter)

$\sigma$  : konduktivitas listrik (Siemens/meter)

Sehingga persamaan (2.1) dan (2.2) dapat ditulis kembali berdasarkan persamaan konstitutif linier menjadi berikut,

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.9)$$

## 2.4 *Skin Depth*

*Skin Depth* untuk perambatan medan elektromagnetik di bumi yang konduktif merupakan jarak dimana amplitudo gelombang telah berkurang menjadi  $1/e$  dari amplitudonya dipermukaan bumi (Zhdanov, 2009). *Skin Depth* dapat ditulis dalam fungsi dari informasi medium dan besaran gelombang yang dinyatakan dalam persamaan (2.10) (Berdichevsky dan Dmitriev, 2002).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2.10)$$

Dengan  $\omega = 2\pi f$  dan  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (Hendry/meter), sehingga persamaan (2.10) dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.11).

$$\delta = 503.3 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ meter} \quad (2.11)$$

## 2.5 Tensor Impedansi

Data magnetotelurik lapangan yang berupa data medan magnet dan medan listrik akan diubah menjadi domain frekuensi untuk mendapatkan besaran impedansi. Masing-masing dari medan magnet dan medan listrik yang diukur merupakan besaran vektor dua arah sehingga nilai dari impedansi merupakan suatu tensor. Tensor impedansi menyatakan hubungan vektor medan magnet dan vektor medan listrik yang saling tegak lurus yang dapat dituliskan pada persamaan (2.12) (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008).

$$E_{\tau} = [Z] H_{\tau} \quad (2.12)$$

Dimana,

$$E_{\tau} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad H_{\tau} = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

Sehingga persamaan (2.12) dapat ditulis menjadi persamaan (2.13),

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

atau dapat dijabarkan menjadi persamaan (2.14).

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dalam nilai tensor impedansi, komponen  $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$  disebut elemen diagonal. Sedangkan komponen  $Z_{xy}$  dan  $Z_{yx}$  disebut elemen anti-diagonal (Simpson dan Bahr, 2005).

Pada persamaan (2.14),  $\underline{Z}$  merupakan bilangan kompleks dengan elemen riil dan imajiner. Oleh karenanya, tiap nilai  $\underline{Z}$  selain memiliki nilai besaran juga memiliki nilai fase. Selain itu, nilai besaran tensor impedansi juga dapat dinyatakan dalam nilai tahanan jenis ekuivalen berdasarkan persamaan rekursif. Adapun persamaan tahanan jenis ekuivalen dapat ditulis pada persamaan (2.15) dan persamaan fase dapat ditulis pada persamaan (2.16) (Widarto, 2008).

$$\rho_{a.ij} = \frac{1}{\mu_0\omega} |Z_{ij}|^2 \quad (2.15)$$

$$\phi_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{im\{Z_{ij}\}}{re\{Z_{ij}\}} \right) \quad (2.16)$$

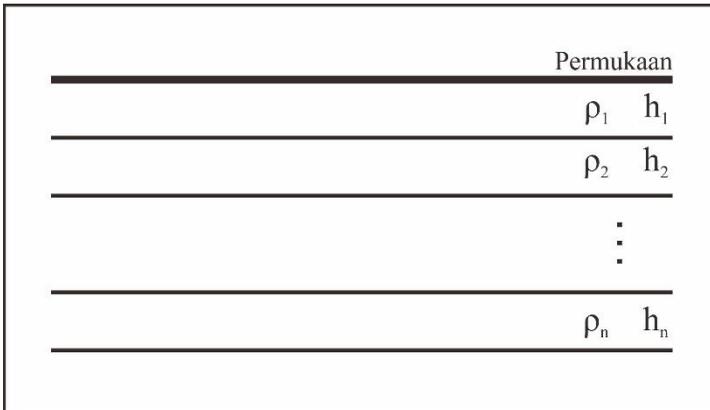
### 2.5.1 Tensor impedansi 1 dimensi

Pada model bumi satu dimensi, nilai konduktivitas hanya berdasarkan variasi kedalaman. Nilai tensor impedansi dari elemen diagonal  $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$  adalah nol, sedangkan nilai untuk elemen anti-diagonal  $Z_{xy}$  dan  $Z_{yx}$  adalah sama dengan nilai yang berlawanan (Simpson dan Bahr, 2005). Sehingga berdasarkan pernyataan tersebut, nilai tensor impedansi satu dimensi dapat ditulis pada persamaan (2.17).

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dimana,  $Z_{xy} = -Z_{yx}$

Parameter tensor impedansi model bumi satu dimensi adalah besaran nilai resistivitas berdasarkan kedalaman dari permukaan (Grandis, 2009). Dimana berdasarkan Gambar 2.2 nilai  $\rho$  adalah resistivitas dan  $h$  adalah kedalaman.



**Gambar 2.2** Model bumi satu dimensi (Modifikasi dari Grandis, 2009)

### 2.5.2 Tensor impedansi 2 dimensi

Tensor impedansi pada model dua dimensi memiliki analisis yang lebih kompleks dari satu dimensi. Dimana konduktivitas bervariasi sepanjang sumbu vertikal  $z$  dan salah satu sumbu horizontal baik  $x$  atau  $y$ , dengan bidang horizontal tegak lurus *geological strike*. Pada asumsi dua dimensi, salah satu sumbu

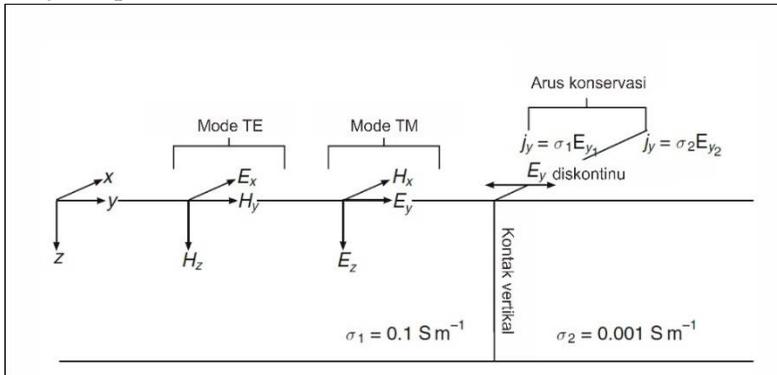
horizontal pada diagram kartesian besarnya konduktivitas akan bervariasi sedangkan untuk sumbu horizontal lainnya akan dianggap cenderung konstan. Sehingga sumbu horizontal yang dianggap cenderung konstan inilah yang akan disebut sebagai *geoelectrical strike* (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008).

Pada kasus model 2 dimensi, tensor impedansi berbeda dengan model 1 dimensi. Elemen diagonal  $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$  bernilai sama namun berlawanan dan elemen anti-diagonal  $Z_{xy}$  dan  $Z_{yx}$  bernilai berbeda (Simpson dan Bahr, 2005). Sehingga berdasarkan pernyataan tersebut, nilai tensor impedansi dua dimensi dapat ditulis dalam persamaan (2.18).

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dimana,  $Z_{xx} = -Z_{yy}$

Dalam model dua dimensi dikenal akan adanya dua mode yaitu mode TE (*transverse electric*) dan TM (*transverse magnetic*). Mode TE merupakan mode untuk medan listrik yang sejajar dengan arah *strike* sehingga medan magnetnya tegak lurus, sedangkan mode TM merupakan mode untuk medan listrik yang tegak lurus dengan arah *strike* sehingga medan magnetnya sejajar (Simpson dan Bahr, 2005). Model dari kedua mode ini dapat disajikan pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Mode TE dan TM dalam kontras kontak vertikal (Modifikasi dari Simpson dan Bahr, 2005).

### 2.5.3 Rotasi tensor impedansi

Kasus model dua dimensi meninggalkan permasalahan terhadap arah acuan *geological strike*. Dalam akuisisi lapangan, piranti magnetotelurik sering kali diarahkan pada arah utara-selatan bumi. Sehingga untuk mendapatkan arah yang sesuai dengan *geological strike* perlu dilakukan proses rotasi tensor impedansi. Proses rotasi menyebabkan nilai tensor impedansi elemen anti-diagonal menjadi maksimal, sedangkan elemen diagonal menjadi seminimal mungkin (Widarto, 2008).

Rotasi tensor impedansi bekerja seperti pada persamaan (2.19). Dimana nilai komponen matrik rotasi dapat ditulis pada persamaan (2.20a) dan persamaan (2.20b). Hasil dari proses rotasi tensor impedansi menyebabkan sistem berbeda dengan sistem koordinat pengukuran (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008).

$$[Z(\alpha)] = [R(\alpha)][Z][R(\alpha)]^{-1} \quad (2.19)$$

Dimana,

$$[R(\alpha)] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.20a)$$

$$[R(\alpha)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.20b)$$

Berdasarkan persamaan (2.19), tensor impedansi untuk dua dimensi pada persamaan (2.18) akan berubah, karena pada persamaan tersebut belum berkaitan dengan arah *geological strike*. Persamaan baru (2.21) akan menyebabkan nilai elemen diagonal menjadi nol. Secara hitungan, satu dimensi model bumi anisotropi ekuivalen dengan model bumi dua dimensi. Namun, secara data lapangan tentunya akan sulit untuk mencapai komponen diagonal bernilai nol karena kompleksnya struktur bawah permukaan bumi (Simpson dan Bahr, 2005).

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

## 2.6 Pemodelan

Dalam geofisika, model dan parameter model digunakan untuk mengkarakterisasi suatu kondisi geologi bawah permukaan.

Pemodelan merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi (Grandis, 2009). Permasalahan model dengan parameter model dapat dibedakan menjadi dua metode, yaitu pemodelan ke depan (*forward modeling*) dan pemodelan ke belakang (*inverse modeling*). Pemodelan inversi merupakan proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik secara otomatis untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan berdasarkan model (Supriyanto, 2007). Berkebalikan dengan pemodelan ke depan, merupakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati dipermukaan bumi jika diketahui harga parameter model bawah permukaan tertentu (Grandis, 2009). Secara sederhana proses pemodelan ke depan yaitu teknik perhitungan berdasarkan penyelesaian matematika dan statistik hingga didapatkan data perhitungan yang dicocokkan dengan data observasi.

### 2.6.1 Pemodelan kedepan

Pada kasus bumi dua dimensi magnetotelurik, dapat dimodelkan dalam bentuk *halfspace*,  $z \geq 0$ , dengan resistivitas atmosfer serbasama 0 ohm.m. nilai  $z$  merupakan fungsi penetrasi kedalaman. Persamaan Maxwell yang telah diperoleh dapat dipisahkan dan dijabarkan dalam turunan kedua berdasarkan mode polarisasi TE pada persamaan (2.22) dan TM pada persamaan (2.23) (Rodi dan Mackie, 2001)

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -i\omega\mu\sigma E_x \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) = -i\omega\mu H_x \quad (2.23)$$

dengan  $\omega$  merupakan frekuensi anguler,  $\mu$  merupakan permeabilitas magnetik (diasumsikan ruang bebas),  $\sigma$  merupakan konduktivitas listrik, dan  $\rho$  merupakan resistivitas.

Data magnetotelurik merupakan perbandingan data medan listrik dan magnet pada domain frekuensi yang dapat dituliskan pada persamaan kompleks resistivitas semu. Untuk mode TE dapat

didefinisikan pada persamaan (2.24). Persamaan (2.24) berdasarkan persamaan Maxwell dapat ditulis ulang menjadi persamaan (2.25).

$$\rho_{\text{semu}} = \frac{i}{\omega\mu} \left( \frac{\langle E_x \rangle}{\langle H_y \rangle} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.25)$$

Untuk mode TM dapat didefinisikan pada persamaan (2.26) dan dengan berdasarkan persamaan Maxwell kembali dapat ditulis menjadi persamaan (2.27) (Rodi dan Mackie, 2001).

$$\rho_{\text{semu}} = \frac{i}{\omega\mu} \left( \frac{\langle E_y \rangle}{\langle H_x \rangle} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$E_y = \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (2.27)$$

## 2.6.2 Pemodelan kebelakang

Kasus dalam algoritma pemodelan magnetotelurik dua dimensi dapat menggunakan algoritma *Non-linear Conjugate Gradient* (NLCG). Permasalahan awal pada inversi algoritma NLCG dapat dituliskan dalam persamaan (2.28) (Rodi dan Mackie, 2001). Dengan  $d$  merupakan vektor data,  $m$  merupakan vektor model,  $e$  merupakan vektor error dan  $F$  merupakan fungsi pemodelan ke depan.

$$d = F(m) + e \quad (2.28)$$

Inversi NLCG merupakan suatu proses yang terdiri dari dua alir, alir *conjugate gradient* dan *line search*. Dalam kasus ini, *line search* inilah yang bersifat non linier. Permasalahan inversi pada algoritma NLCG sendiri bekerja dengan meminimalkan fungsi objektif  $\Psi$  pada persamaan (2.29) (Rodi dan Mackie, 2001).  $\lambda$  merupakan parameter regulasi. Matriks positif  $V$  berperan terhadap variasi vektor error.  $L$  merupakan matriks operator turunan kedua. Ketika model blok berbentuk seragam,  $Lm$  mendekati fungsi Laplacian dari  $\log \rho$ .

$$\Psi(m) = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \lambda m^T L^T L m \quad (2.29)$$

Algoritma NLCG bekerja mencari solusi model (S) dengan meminimalkan fungsi objektif yang memproses sisa data dan turunan kedua spasial dari resistivitas. Fungsi ini merupakan pembobotan dari fungsi objektif dan data misfit  $\Psi_d$  pada persamaan (2.30). Berdasarkan eksperimen numerik yang melibatkan data sintesis dan data lapangan menunjukkan bahwa algoritma NLCG lebih efisien dari algoritma sebelumnya yang menyelesaikan permasalahan inversi linierisasi yaitu metode Gauss-Newton dan Mackie-Madden. Efisienitas ini berdasarkan dalam hal kebutuhan memori komputer dan waktu CPU dalam menemukan solusi akurat (Rodi dan Mackie, 2001).

$$S = \Psi_d + \lambda \Psi_m \quad (2.30)$$

Dalam mencari solusi inversi dilakukan dengan metode iteratif atau metode perulangan dalam menjalankan model. Dimana pada aplikasi algoritma NLCG saat mencari solusi model dapat dituliskan pada persamaan (2.31), dengan  $h$  merupakan arah pencarian model dan  $a$  merupakan perhitungan S berdasarkan *line search*.

$$m^{i+1} = m^i + a^{i+1} h^{i-1} \quad (2.31)$$

Permasalahan simpangan pada misfit rata-rata prediksi dan observasi dapat diwakili pada persamaan *root mean square* (RMS) (Menke, 2018). Persamaan RMS pada kasus 2D dapat dituliskan pada persamaan (2.32),  $R_{dd}$  merupakan matriks kovarian dan  $N$  adalah jumlah data.

$$RMS = \sqrt{\frac{(d-F(m))^T R_{dd}^{-1} (d-F(m))}{N}} \quad (2.32)$$

## 2.7 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi dapat dibangun dari tiga komponen utama, yaitu sumber panas bumi, reservoir dan fluida (Dickson dan Fanelli, 1995). Ada tidaknya tiga komponen tersebut mutlak adanya dalam suatu sistem panas bumi. Apabila salah satu tidak ada, maka sistem panas bumi tidak dapat terbentuk. Namun, agar dalam suatu sistem panas bumi dapat dihasilkan sistem yang

memiliki reservoir dengan temperatur yang tinggi, perlu adanya satu komponen tambahan yaitu lapisan batuan kedap fluida.

Sumber panas bumi dapat didefinisikan sebagai reservoir yang berada didalam bumi yang mana energi panas dapat diambil secara lebih ekonomis, dalam artian biaya produksi jauh lebih murah daripada sumber energi konvensional lainnya seperti energi fosil dan hidroelektrik (Gupta dan Roy, 2007). Sumber panas bumi berupa daerah intrusi magmatik yang memiliki temperatur lebih dari 600°C pada kedalaman sekitar 5 hingga 10 km (Dickson dan Fanelli, 1995).

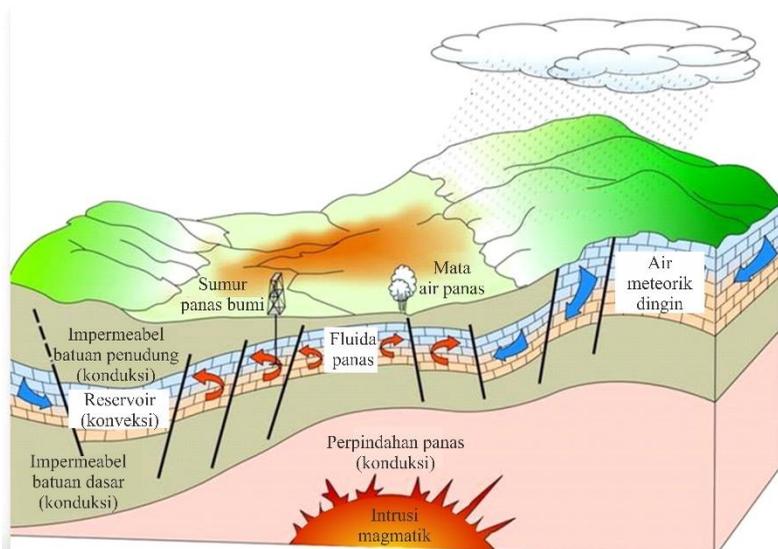
Reservoir merupakan daerah batuan berpori yang memiliki tingkat porositas dan permeabilitas yang tinggi sebagai penampung fluida yang akan mengalami proses perpindahan panas (Dickson dan Fanelli, 1995). Porositas merupakan presentase ruang kosong diantara material, sedangkan permeabilitas merupakan tingkat kemampuan batuan dalam meloloskan fluida. Dengan tingginya tingkat porositas dan permeabilitas batuan reservoir, maka fluida akan dapat masuk dengan mudah sehingga proses pemanasan fluida pada sistem panas bumi dapat berjalan lebih efisien.

Fluida panas bumi merupakan suatu senyawa air, dimana pada banyak daerah panas bumi seringkali ditemukan air berjenis meteorik baik dalam fase cair maupun uap air yang membawa senyawa Karbondioksida, Hidrogen Sulfida, dan sebagainya (Dickson dan Fanelli, 1995). Air meteorik merupakan air tanah yang berasal dari atmosfer bumi dalam bentuk hujan ataupun salju yang kemudian masuk kedalam tanah melalui rekahan ataupun lapisan batuan yang permeabilitasnya tinggi dan terjebak dalam zona reservoir.

Batuan kedap fluida merupakan batuan yang memiliki permeabilitas rendah dan melingkupi zona reservoir, sehingga dapat mencegah fluida panas bumi melarikan diri dari zona reservoir (Gupta dan Roy, 2007). Batuan kedap fluida terdiri dari dua area yaitu batuan penudung dan batuan dasar. Batuan penudung berada diatas reservoir, sedangkan batuan dasar berada dibawah reservoir sehingga mencegah fluida panas bumi untuk

turun ke dalam bumi karena pengaruh gravitasi. Kedua pembatas tersebut akan mengalami proses perpindahan panas dalam bentuk konduksi.

Pada sistem panas bumi dapat digambarkan sebagai proses perpindahan panas dari sumber panas bumi hingga menuju fluida seperti yang telah disajikan pada Gambar 2.4. Selama perpindahan panas dapat terjadi secara konduksi maupun konveksi. Dimana proses konduksi terdapat di batuan dasar dan konveksi terdapat di zona reservoir. Keadaan fluida yang terperangkap dan akhirnya memiliki temperatur dan tekanan yang tinggi menyebabkan fluida tersebut mencari celah untuk dapat lolos dari zona reservoir, dimana daerah yang mudah dilewati oleh fluida tersebut merupakan rekahan atau struktur patahan. Perjalanan fluida menuju ke tekanan yang lebih rendah menyebabkan fluida dapat berganti fasa baik dari uap air menjadi cair atau sebaliknya, hal tersebut tentunya dipengaruhi oleh faktor tekanan dan temperatur dalam fluida (White, 1973).



**Gambar 2.4** Sistem panas bumi (Modifikasi dari Dickson dan Fanelli, 1995)

## 2.8 Klasifikasi Sistem Panas Bumi

Umumnya kriteria untuk klasifikasi sumber daya panas bumi berdasarkan entalpi dari fluida panas bumi yang bertindak sebagai pembawa energi panas dari dalam batuan panas menuju ke permukaan. Entalpi yang dapat sebagai dan dianggap sebanding dengan temperatur digunakan untuk menyatakan energi panas fluida dan memberikan gambaran kasar tentang karakteristik fluida tersebut (Dickson dan Fanelli, 1995). Entalpi merupakan istilah dalam termodinamika yang menyatakan jumlah energi dalam suatu sistem termodinamika, yang mana merupakan penjumlahan dari energi internal dengan energi yang digunakan untuk melakukan aktivitas sistem. Dalam klasifikasi berdasarkan entalpi dapat di bagi dari rendah, sedang hingga tinggi. Tabel klasifikasi tersebut dapat disajikan pada Tabel 2.1 berdasarkan masing-masing sumber.

**Tabel 2.1** Klasifikasi sumber panas bumi (dari beberapa pustaka)

	(a)	(b)	(c)	(d)
Entalpi rendah	<90	<125	<100	≤150
Entalpi sedang	90-150	125-225	100-200	-
Entalpi tinggi	>150	>225	>200	>150

### Pustaka

- (a) Muffler dan Cataldi (1978),
- (b) Hochstein (1990),
- (c) Benderitter dan Cormy (1990),
- (d) Haenel *et al.* (1988).

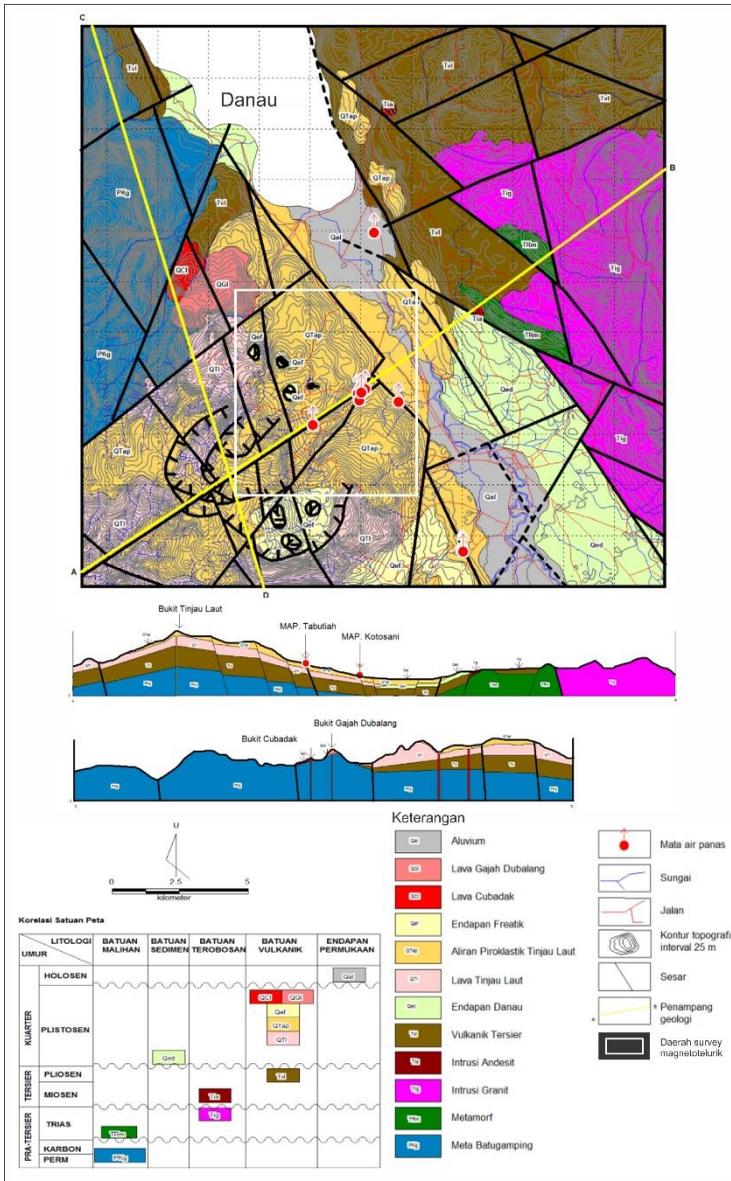
Seringkali klasifikasi lainnya dibuat atas dominasi fluida cair dan dominasi uap air (White, 1973). Pada dominasi fluida cair secara kontinu tekanan sistem dikontrol dalam fase cairan. Sebagian kecil uap air tentunya hadir dalam bentuk gelembung kecil-kecil. Kemudian untuk dominasi uap air, fluida cair dan uap air secara normal ada di reservoir, yang mana secara kontinu fase uap air akan mengontrol tekanan sistem. Secara umum, dominasi fluida cair lebih banyak tersebar didunia dari pada dominasi uap air (Dickson dan Fanelli, 1995).

## 2.9 Geologi Penelitian

Daerah penelitian potensi panas bumi terletak di Pulau Sumatera yang dilewati zona struktur besar Sumatera yang membentuk zona depresi di bagian tengah daerah penelitian. Peta geologi penelitian telah disajikan pada Gambar 2.5. Daerah ini terbentuk akan kompleks gunungapi dengan produksi berupa batuan piroklastik dan lava dengan komposisi andesit-basaltit. Morfologi terdiri dari satuan morfologi perbukitan vulkanik, morfologi perbukitan non vulkanik dan morfologi pedataran.

Batuan tertua yang tersingkap merupakan batuan meta batugamping berumur Perm-Karbon yang merupakan batuan malihan dari batugamping terumbu. Proses pemalihan yang mengakibatkan terbentuknya batuan di sebelah timur zona depresi terjadi pada awal Trias. Sementara itu diakhir Trias terjadi aktivitas magmatik yang mengakibatkan munculnya batuan terobosan granit. Sebaran batu ini cukup luas di sebelah timur daerah survei dan diperkirakan merupakan suatu batolit. Pada kala Miosen, aktivitas magmatik kembali terjadi yang ditandai dengan munculnya batuan terobosan andesit.

Pada masa Pli-Plistosen terjadi aktivitas tektonik yang menyebabkan teraktifasinya kembali sesar besar Sumatera yang membentuk zona depresi dibagian tengah daerah survei yang kemudian diikuti pembentukan endapan danau disebelah sisi utara. Aktivitas tektonik dilanjutkan pada Kala Plistosen yang diindikasikan dengan pembentukan lava Tinjau Laut. Setelah pembentukan lava tersebut kemudian batuan piroklastik dihasilkan dari proses erupsi. Erupsi terjadi beberapa kali dalam suatu periode sehingga terbentuk struktur rim kaldera dan kawah. Pada tahap tersebut kantong-kantong hidrotermal terbentuk akibat dari aktivitas magmatik yang memanasi air bawah permukaan. Kantong-kantong hidrotermal akan terisi oleh fluida hidrotermal hingga menyebabkan tekanannya meningkat. Akibatnya terjadi erupsi hidrotermal berupa erupsi freatik yang membentuk endapan freatik.



Gambar 2.5 Peta geologi (Modifikasi dari Hermawan *et al.*, 2011)

Berkembangnya aktivitas vulkanik menyebar kebagian utara Bukit Tinjau Laut yang ditandai dengan pembentukan lava Gajah Dubalang dan lava Cubadak. Berdasarkan analisis tim survei geologi PSDMBP, aktivitas vulkanik terjadi terakhir kali pada 0,8 juta tahun yang lalu atau pada Kala Plistosen. Selanjutnya, proses erosi hingga kala ini menyebabkan terbentuknya endapan aluvium (Hermawan *et al*, 2011).

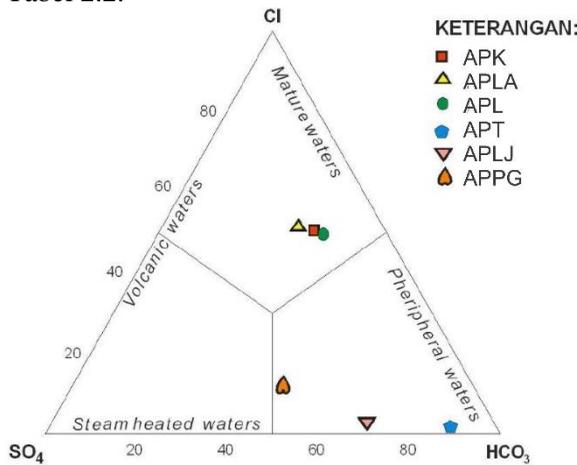
## **2.10 Geokimia Manifestasi Penelitian**

Fluida panas bumi yang manifestasinya dimanfaatkan sebagai sumber energi geotermal memiliki kandungan unsur yang berbeda-beda tiap titik panas bumi. Dimana kandungan tersebut dapat dilakukan analisis berdasarkan geokimia panas bumi. Sampel yang akan dianalisis merupakan fluida panas bumi yang menyembur dalam bentuk geiser atau tergenang dipermukaan akibat adanya rekahan atau patahan sehingga fluida panas bumi yang terjebak dapat melewati rekahan tersebut. Hasil dari analisis geokimia dapat disajikan dalam diagram trilinier yang mana informasinya sangat berguna dalam hal jenis fluida apa yang akan dimanfaatkan sebagai energi panas bumi.

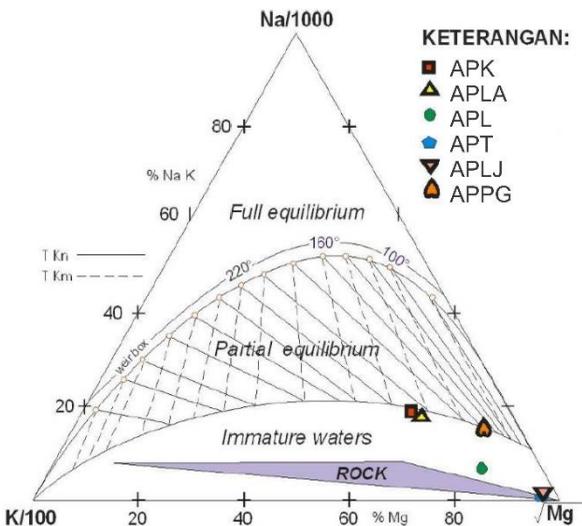
Hasil kandungan unsur tiap sampel fluida merupakan nilai presentasi kandungan unsur terhadap total unsur pada suatu volume. Presentase tiap nilai unsur akan memiliki karakteristik tertentu terhadap jenis fluida dan prediksi temperatur pada saat pemanasan. Untuk mempermudah analisis dapat menggunakan diagram segitiga unsur atau trilinier. Secara umum dan sederhana terdapat tiga jenis diagram trilinier, yaitu diagram trilinier  $Cl-SO_4-HCO_3$ ,  $Na-K-Mg$  dan  $Cl-Li-B$  (Nicholson, 1993).

Daerah penelitian ini memiliki 6 mata air panas yang telah dianalisis kandungan unsur oleh tim survei geokimia PSDMBP. Empat mata air panas berada didalam lokasi survei magnetotelurik, sedangkan dua yang lainnya berada disisi luar lokasi survei (APLJ berada disisi utara dan APPG berada disisi selatan area penelitian magnetotelurik). Kandungan unsur juga telah diplot pada diagram trilinier seperti pada Gambar 2.6 hingga 2.8. Sedangkan untuk

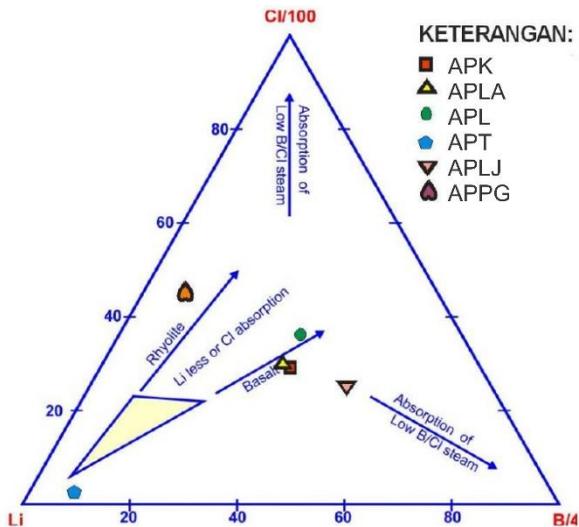
karakteristik masing-masing mata air panas dapat disajikan pada Tabel 2.2.



**Gambar 2.6** Diagram trilinear Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (Modifikasi dari Hermawan *et al.*, 2011)



**Gambar 2.7** Diagram trilinear Na-K-Mg (Modifikasi Hermawan *et al.*, 2011)



**Gambar 2.8** Diagram trilinear Cl-Li-B (Modifikasi dari Hermawan *et al.*, 2011)

**Tabel 2.2** Karakteristik sampel mata air panas (Hermawan *et al.*, 2011)

Mata air panas	Temp air panas (°C)	Temp udara (°C)	pH	$\rho$ ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	Debit (l/detik)
APK	71,6	32,8	6,80	5800	0,1
APLA	58,5	27,1	7,14	5700	0,5
APL	35,2	27,2	6,39	4480	1,0
APT	35,8	24,8	6,44	448	0,1
APLJ	34,9	32,0	6,44	417	0,2
APPG	51,8	27,3	7,04	570	5,0

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB III**

### **METODOLOGI**

#### **3.1 Waktu dan Pelaksanaan Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) Bandung pada bulan Januari 2019 untuk pengolahan data magnetotelurik menggunakan piranti lunak lisensi milik PSDMBP. Pengerjaan selanjutnya dilaksanakan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya untuk penyusunan laporan penelitian ini. Data yang digunakan merupakan data sekunder milik PSDMBP pada salah satu daerah di pulau Sumatera yang lokasi spesifiknya tidak dapat disajikan karena alasan instansi terkait.

#### **3.2 Data dan Piranti Lunak Penelitian**

Data dan peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

- a. Data magnetotelurik berupa 45 titik pengukuran yang akan diolah hingga model 1 dimensi dan 29 titik diantaranya diolah hingga model 2 dimensi.
- b. Data kalibrasi magnetotelurik sebagai kalibrator pada data medan magnet pengukuran.
- c. Data pendukung berupa peta geologi dan data geokimia manifestasi permukaan berupa 6 air panas.
- d. Piranti lunak SSMT2000 Phoenix Geophysics berlisensi PSDMBP digunakan untuk *robust processing* dan perubahan domain waktu menjadi frekuensi.
- e. Piranti lunak MTEditor Phoenix Geophysics berlisensi PSDMBP digunakan untuk proses seleksi *cross power*.
- f. Piranti lunak Winglink berlisensi PSDMBP digunakan untuk proses pemodelan 1D inversi Occam dan 2D inversi NLCG.
- g. Piranti lunak MS Excel lisensi pribadi digunakan untuk proses perhitungan koreksi pergeseran statik.

- h. Piranti lunak Surfer 13 lisensi pribadi digunakan untuk pembuatan peta.
- i. Piranti lunak CorelDRAW X7 lisensi pribadi digunakan untuk pengeditan peta geologi, diagram geokimia, dan berbagai gambar di penelitian tugas akhir ini.

### 3.3 Titik Pengukuran dan Desain Lintasan Model

Titik-titik pengukuran dalam penelitian ini sejumlah 45 titik data magnetotelurik yang semuanya diatur pada arah standar koil dan pot berpori sumbu x sebagai utara-selatan. Dari sejumlah titik pengukuran tersebut digunakan sebagai data pemodelan untuk 6 lintasan yang dibuat dalam arah barat daya-timur laut. Adapun titik-titik pengukuran dan desain lintasan model dapat disajikan pada Gambar 3.1. Adapun untuk titik-titik pengukuran yang digunakan sebagai model 2 dimensi pada lintasan model dapat disajikan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Titik-titik pengukuran sebagai model 2 dimensi

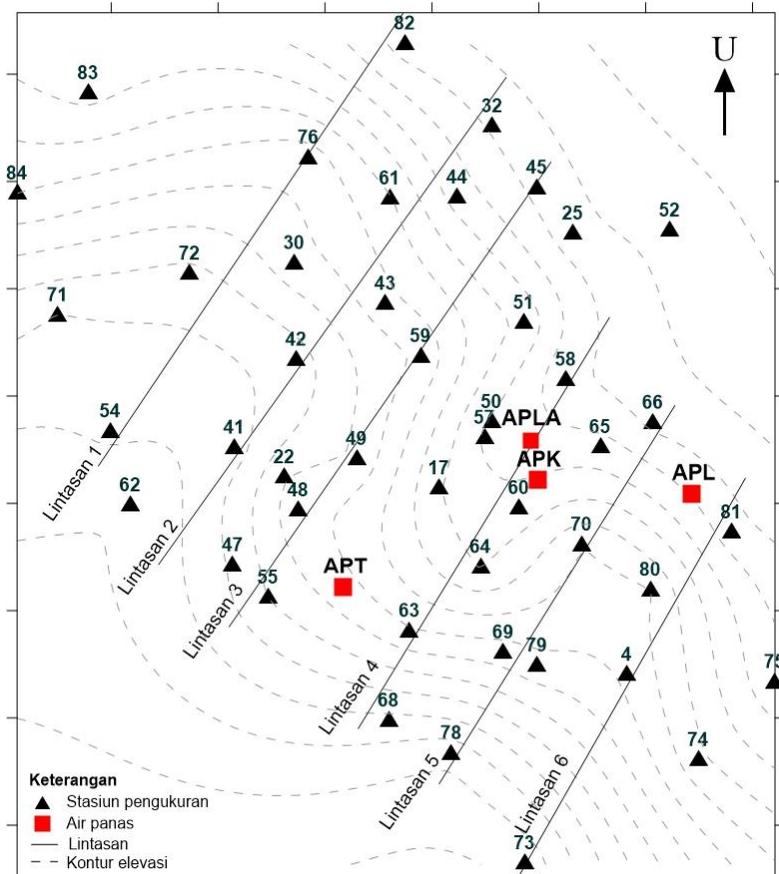
Lintasan Model	Titik yang digunakan
Lintasan 1	54, 72, 30, 76 dan 82
Lintasan 2	41, 42, 43, 61, 44 dan 32
Lintasan 3	55, 48, 49, 59 dan 45
Lintasan 4	68, 63, 64, 60 dan 58
Lintasan 5	78, 69, 70 dan 66
Lintasan 6	73, 04, 80 dan 81

### 3.4 Prosedur Kerja

Adapun diagram alir proses pengolahan data magnetotelurik dapat disajikan pada Gambar 3.2 dan diagram alir penelitian pada Gambar 3.3. Untuk lebih jelasnya telah diuraikan sebagai berikut ini.

#### 3.4.1 Studi literatur

Studi literatur merupakan tahapan awal untuk melakukan sebuah penelitian. Dalam tahapan ini perlu memahami mengenai konsep pengolahan data magnetotelurik untuk model 2 dimensi, geologi penelitian dan data geokimia untuk sistem panas bumi.



**Gambar 3.1** Titik-titik pengukuran dan desain lintasan

### 3.4.2 Pengolahan data magnetotelurik

Data mentah magnetotelurik hasil dari akuisisi dan kalibrasi dari tim survey magnetotelurik PSDMBP perlu dilakukan perubahan domain waktu menjadi domain frekuensi dengan metode transformasi fourier menggunakan piranti lunak SSMT2000. Hal ini dikarenakan informasi kedalaman penetrasi hanya dapat diperoleh dari nilai frekuensi berdasarkan *skin depth*. Selain itu perlu dilakukan tahap *robust processing* atau teknik

pemrosesan data berbasis statistika yang memanfaatkan pembobotan ulang dari sisa untuk mengidentifikasi dan menghapus pencilan luar data yang terbias oleh *non-Gaussian noise* (Widarto, 2008).

Proses pengolahan data magnetotelurik kemudian berlanjut menggunakan piranti lunak MTEditor untuk melakukan proses rotasi tensor impedansi agar sesuai dengan kondisi geologi lapangan. Pada tahap ini juga dilakukan *smoothing* kurva resistivitas xy dan yx berdasarkan seleksi *cross power*. Hal tersebut dikarenakan hasil dari *robust processing* hanyalah menghilangkan sebagian pencilan luar. Adapun untuk *noise* acak karena gangguan saat akuisisi lapangan perlu dilakukan secara manual pada tahap seleksi *cross power*.

Setelah kurva resistivitas didapatkan hasil yang halus berdasarkan seleksi *cross power*, maka tahap selanjutnya dapat dilanjutkan menggunakan piranti lunak Winglink untuk membuat lintasan yang akan dibuat model 2 dimensi dan memilih titik-titik mana saja yang akan digunakan sebagai parameter inversi 2 dimensi. Kemudian tahap selanjutnya dapat dilanjutkan untuk analisis seluruh titik pengukuran hasil kerja saat menggunakan piranti lunak MTEditor. Analisis ini bertujuan untuk memperhalus kurva hasil seleksi *cross power* yang bila secara matematis tidak dapat ditemukan solusi terbaiknya. Adapun metode yang digunakan pada tahap ini yaitu dengan menghapus data *noise* pada suatu frekuensi agar didapatkan solusi terbaik.

Tahapan *smoothing* dalam penelitian ini menggunakan metode D+. Kurva *smoothing* dan data pengukuran tiap frekuensi untuk bagian resistivitas dipertahankan agar kurang dari 5% untuk nilai erornya. Sedangkan untuk bagian fase digunakan 5% atau 10% untuk nilai erornya, titik pengukuran yang dirasa memiliki tren kurva fase yang relatif baik digunakan 5% dan untuk yang kurang baik dapat digunakan 10%.

Penelitian ini juga menggunakan koreksi efek pergeseran statik. Idealnya kurva TE dan TM dalam magnetotelurik akan saling berimpitan, namun karena beberapa sebab kurva tersebut

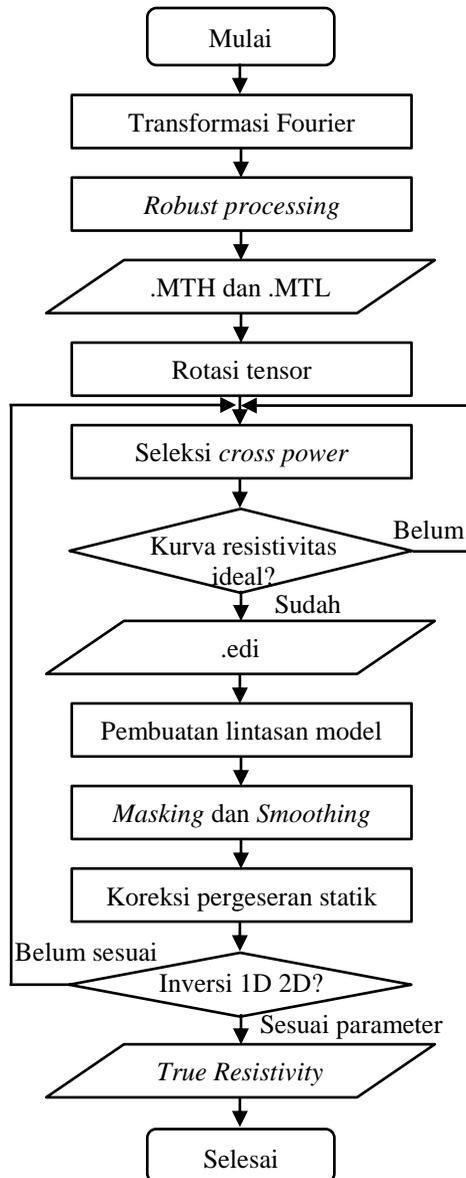
dapat saling tidak berimpitan sehingga perlu dilakukan koreksi efek pergeseran statik. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan yaitu pendekatan rata-rata median. Metode ini melihat respon antar seluruh stasiun pengukuran kemudian dilakukan proses perataan pada suatu frekuensi dipermukaan. Bila telah dilakukan koreksi efek pergeseran statik dengan benar, maka dapat dilanjutkan untuk analisis *sounding* 1 dimensi dan berakhir pada inversi model 2 dimensi sehingga didapatkan penampang resistivitas tiap lintasan.

### **3.4.3 Analisis geologi dan geokimia**

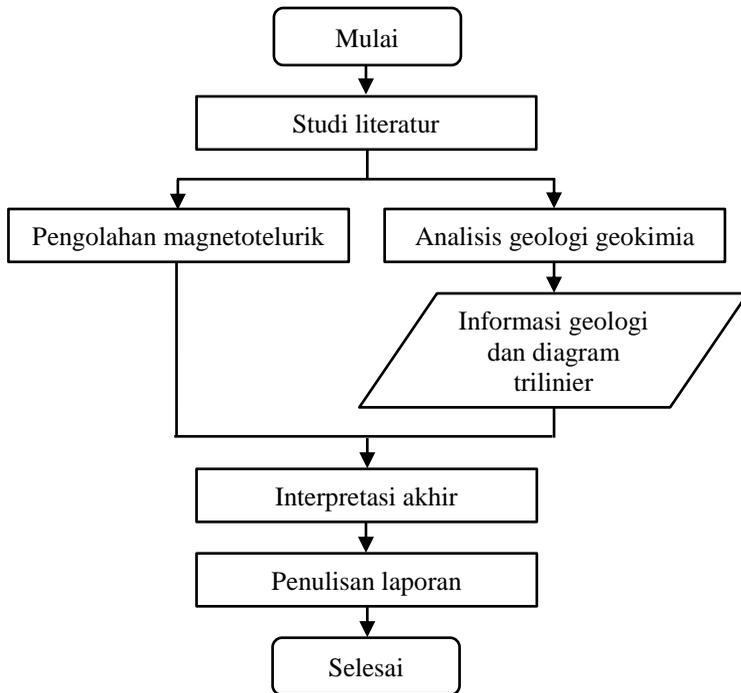
Model penampang resistivitas 2 dimensi yang didapatkan pada proses pengolahan data magnetotelurik berdasarkan konseptual geofisika belum bisa dilakukan analisis terperinci tanpa adanya informasi geologi baik secara geologi lapangan maupun geologi laboratorium untuk informasi resistivitas tiap batuan. Dimana jenis batuan berdasarkan informasi karakteristik resistivitas akan berguna untuk dilakukannya interpretasi dari data perhitungan geofisika. Selain itu data geokimia juga akan sangat membantu dalam mengidentifikasi fluida apa yang manifestasinya akan dimanfaatkan sebagai energi panas bumi. Analisis geokimia tersebut dapat dilakukan dengan cara meneliti struktur kandungan kimia fluida hasil semburan atau geiser dan jenis mata air panas lainnya pada daerah akuisisi data magnetotelurik secara intensif. Hasil tersebut telah disajikan dalam diagram trilinier CL-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>, Na-K-Mg dan Cl-Li-B pada bab sebelumnya dari hasil tim survey geokimia PSDMBP.

### **3.4.4 Interpretasi**

Hasil dari pemodelan resistivitas 2D berdasarkan metode geofisika magnetotelurik serta analisis geologi dan geokimia yang telah didapatkan perlu dilakukan analisis secara berkesinambungan antar ketiga data tersebut. Dimana ketiga data tersebut bila dikomparasikan dapat mengidentifikasi struktur bawah permukaan bumi untuk daerah sistem panas bumi secara lebih akurat dan jenis manifestasi fluida panas bumi dapat diketahui.



**Gambar 3.2** Diagram alir proses pengolahan magnetotelurik



**Gambar 3.3** Diagram alir penelitian

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

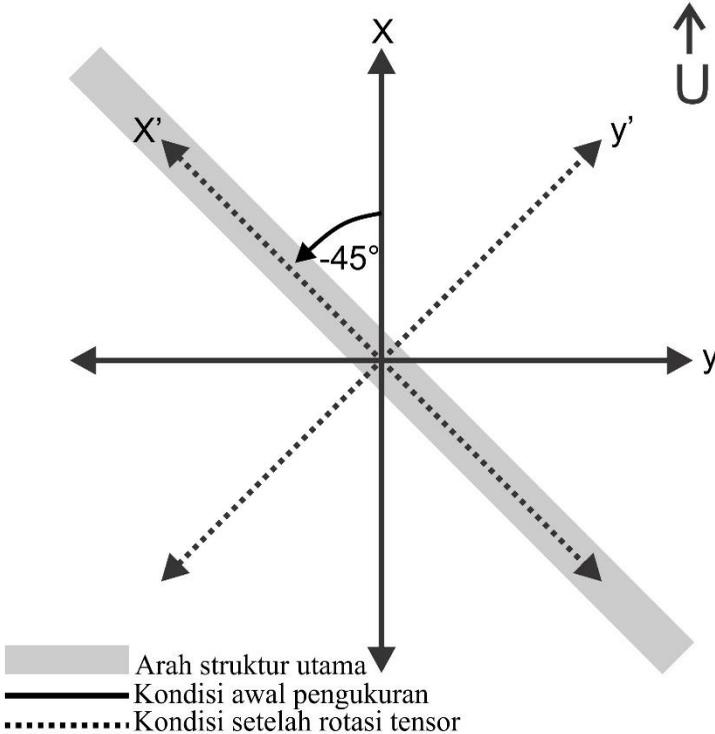
#### 4.1 Analisis Data Magnetotelurik

##### 4.1.1 Hasil rotasi tensor

Data lapangan yang digunakan dalam penelitian ini belum disesuaikan dengan kondisi geologi lapangan. Dimana arah coil dan pot berpori masih diletakan pada arah utara-selatan dan barat-timur bumi. Adapun dalam penelitian ini daerah pengukuran berada di Pulau Sumatera, yang mana struktur utama yang membentang merupakan sesar Sumatera yang berarah barat laut-tenggara. Agar didapatkan data tensor impedansi yang maksimal, maka perlu dilakukan rotasi tensor. Sebagai acuan kita anggap pot berpori dan coil x dirotasi hingga sejajar dengan arah struktur. Untuk mendapatkan kondisi yang sedemikian rupa maka diperlukan rotasi tensor sebesar  $-45^\circ$ . Adapun untuk mempermudah acuan ini dapat disajikan dalam Gambar 4.1. Berdasarkan gambar tersebut, hasil rotasi menunjukkan bahwa medan listrik x menjadi sejajar dengan struktur sehingga medan listrik y berarah tegak lurus. Dengan demikian akan didapatkan bahwa asumsi TE merupakan besarnya nilai  $Z_{xy}$  dan asumsi TM merupakan besarnya nilai  $Z_{yx}$ .

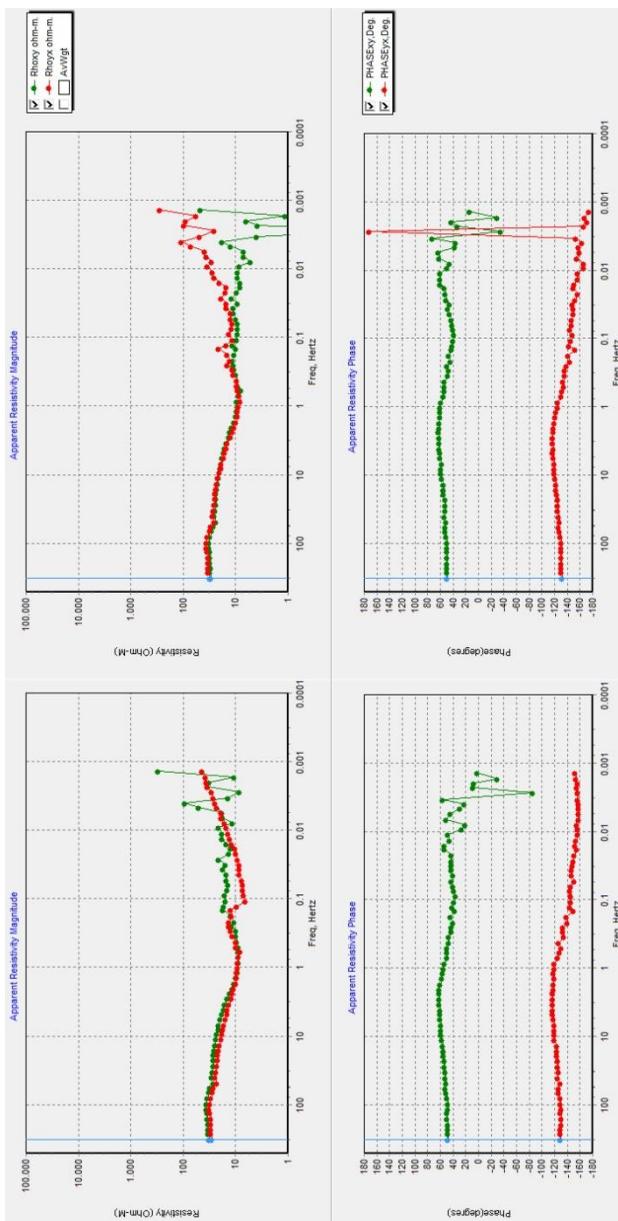
Hasil rotasi tensor sangat berpengaruh terhadap kondisi kurva resistivitas dan fase yang telah terbentuk. Berdasarkan kondisi lapangan keadaan rotasi tensor berada pada perulangan rentang  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$ . Yang dimaksud demikian, keadaan rotasi  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  adalah sama baik dalam lapangan maupun perhitungan. Namun perlu diketahui bahwa kedua keadaan tersebut akan berbeda dalam hal acuan polarisasi. Hal ini tentu saja terjadi mengingat antara  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  akan menyebabkan perbedaan arah dari utara-selatan menjadi selatan-utara dan arah mata angin lainnya. Hal lain akan berbeda apabila kita ambil pada derajat tengah yaitu  $90^\circ$ .  $0^\circ$  dan  $90^\circ$  menyebabkan komponen medan magnet dan listrik yang semula pada sumbu x menjadi sumbu y.

Akibatnya, besarnya impedansi seperti pada persamaan (2.14) akan bernilai saling berkebalikan. Dimana  $Z_{xy}$  baru akan memiliki nilai sebesar  $Z_{yx}$  lama dan  $Z_{yx}$  baru akan memiliki nilai sebesar  $Z_{xy}$  lama.



**Gambar 4.1** Rotasi terhadap arah struktur

Adapun proses rotasi tensor dalam penelitian ini dilakukan pada seluruh titik pengukuran. Pada Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan perbedaan antara kurva resistivitas semu dan fase sebelum dilakukan rotasi tensor dan setelah dilakukan rotasi tensor sebesar  $-45^\circ$  pada titik pengukuran 61. Terlihat jelas bahwa dengan dilakukan rotasi tensor sebesar itu, kurva resistivitas semu dan fase akan berubah secara drastis. Hal ini tentunya akan mempengaruhi terhadap hasil pemodalan 2 dimensi yang akan dilakukan.



**Gambar 4.2** (a) Kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 sebelum dilakukan rotasi, dan (b) kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 setelah dilakukan rotasi  $-45^\circ$

#### 4.1.2 Hasil seleksi *cross power*

Pada dasarnya, gelombang elektromagnet alami yang terukur pada alat magnetotelurik dipengaruhi oleh berbagai gangguan. Gangguan dapat berupa aktivitas manusia saat pengukuran maupun dari sumber utama pengukuran berupa gejala petir disekitar lokasi pengukuran. Akibatnya data yang terekam pada alat magnetotelurik akan mengalami kekacauan di beberapa frekuensi. Adapun metode dalam menghilangkan data-data gangguan tersebut dapat dilakukan dengan cara seleksi *cross power*. Tahapan seleksi *cross power* merupakan salah satu tahapan dalam pengolahan data magnetotelurik agar didapatkan hasil kurva yang lebih baik dan sedikit akan gangguan *noise* alami maupun buatan. Secara teori, kurva resistivitas semu dan fase magnetotelurik harus dalam keadaan halus dan memiliki kenaikan dan penurunan kurva yang relatif landai. Untuk mencapai kondisi yang demikian tersebut, maka perlu mematikan beberapa data pada tiap frekuensi kurva resistivitas dan fase. Hasil kurva yang lebih baik tersebut tentunya akan berpengaruh dalam pemodelan yang akan dilakukan.

Jumlah *cross power* yang digunakan penelitian ini telah diatur maksimal 20. Artinya dalam suatu frekuensi akan terdapat maksimal 20 data acak yang dapat dimatikan ataupun dihidupkan kembali. Namun semakin kecil frekuensi yang ditampilkan, maka akan memiliki data yang lebih sedikit. Mengingat semakin kecil suatu frekuensi maka periode waktu yang diperlukan semakin besar. Sehingga dalam waktu pengukuran yang sama, data frekuensi tinggi akan mencuplik lebih banyak data daripada frekuensi rendah.

Dalam penelitian ini, frekuensi yang terekam pada alat magnetotelurik berada pada rentang 320 hingga sekitar 0.001 Hz. Namun untuk frekuensi terendahnya dibuat agar minimum 0.01 Hz. Upaya tersebut dilakukan karena pada data dibawah 0.01 merekam data yang sangat sedikit sehingga *cross power* yang ditampilkan juga sangat minimal seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Akibat dari upaya tersebut, penetrasi kedalaman model tentunya akan berkurang. Namun, hal tersebut tidak akan

berdampak banyak, mengingat berdasarkan informasi geologi penelitian sebelumnya dan hasil perhitungan kasar konsep *skin depth* kedalaman reservoir sistem panas bumi masih dalam rentang frekuensi yang digunakan.

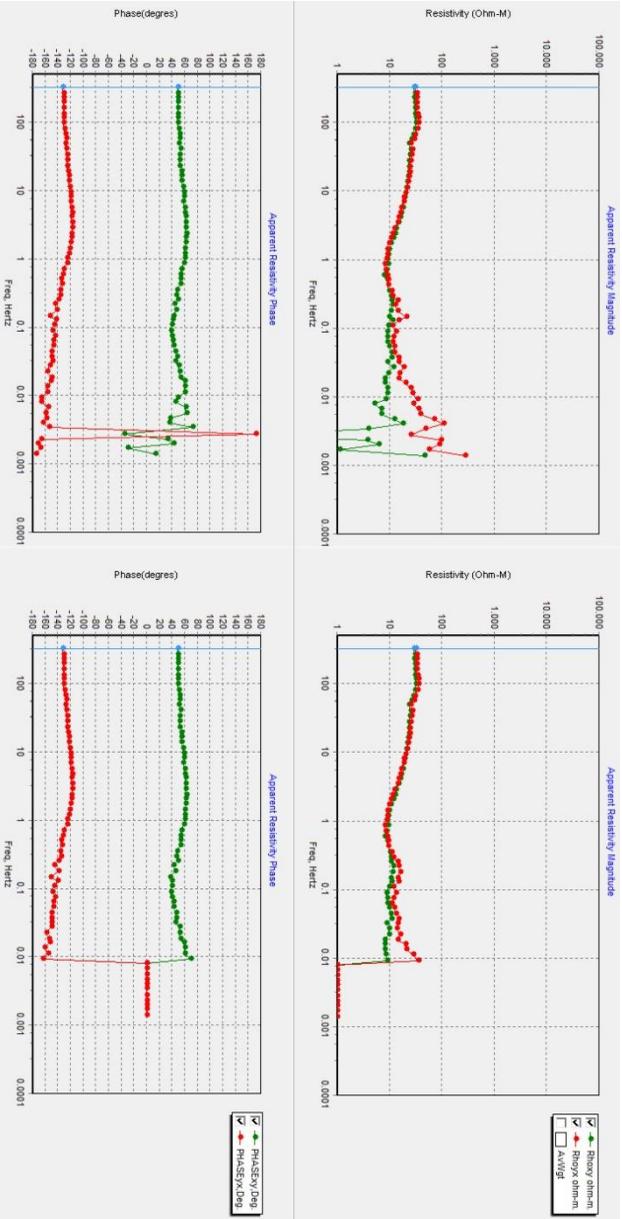
Sebagai contoh hasil kerja proses seleksi *cross power* telah disajikan pada Gambar 4.3 sebagai kurva resistivitas semu dan fase untuk titik pengukuran 61. Pada gambar tersebut terlihat bahwa kurva (a) memiliki data tiap frekuensi yang masih dalam keadaan belum terseleksi (masih dipengaruhi oleh efek gangguan). Hasil dari seleksi *cross power* terlihat pada kurva (b) yang memiliki kurva lebih halus dan memiliki tren yang landai, dalam artian tidak terlalu curam. Korelasi kurva resistivitas semu dan fase akan selalu saling berkebalikan. Dalam artian apabila kurva resistivitas semu memiliki tren naik dalam suatu frekuensi, maka kurva fase akan memiliki tren turun dalam frekuensi yang sama.

Pada Gambar 4.3, warna kurva mempresentasikan data jenis apa yang telah direkam. Kurva berwarna hijau mempresentasikan sebagai kurva  $xy$  dan kurva berwarna merah sebagai kurva  $yx$ . Dalam asumsi awal yang telah dibuat bahwa pot berpori  $x$  dirotasi agar sejajar dengan struktur utama, maka kurva  $xy$  merupakan kurva mode TE dan kurva  $yx$  merupakan kurva mode TM. Namun sebenarnya dalam mengaitkan asumsi tersebut agar sesuai dengan kondisi TE dan TM baru bisa dilakukan nantinya pada saat tahapan pemodelan pada piranti lunak Winglink.

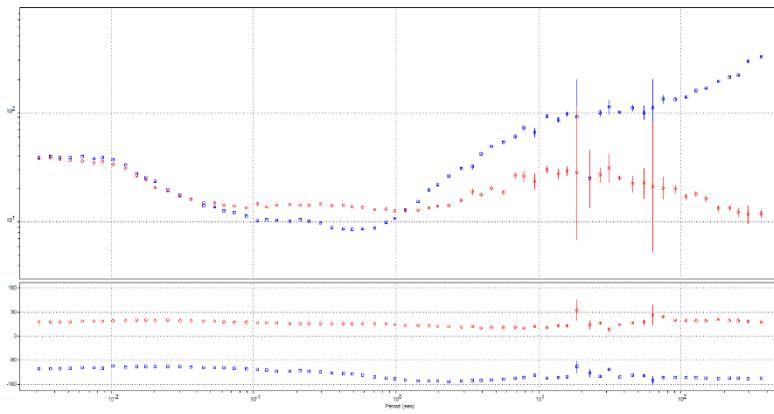
#### **4.1.3 Hasil *masking* dan *smoothing***

Berdasarkan data hasil dari seleksi *cross power* masih perlu dilakukan proses *masking* pada beberapa titik pengukuran, mengingat tidak semua data hasil dari seleksi *cross power* menghasilkan data dengan kurva yang halus. Sebagai hasil contoh telah disajikan pada Gambar 4.4 yang merupakan data untuk titik pengukuran 73 yang mana terdapat beberapa titik frekuensi yang telah dilakukan *masking* pada kotak yang berwarna hitam.

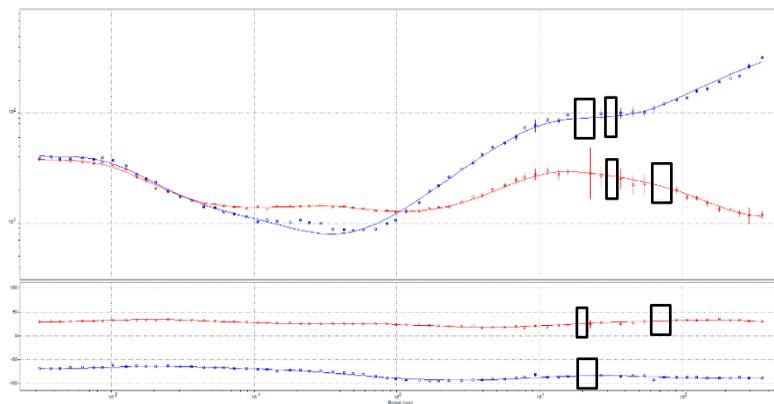
Kembali merujuk pada Gambar 4.4, proses *smoothing* juga digunakan dalam penelitian ini. *Smoothing* dilakukan dengan melakukan rata-rata simpangan tren dalam suatu kurva. Penelitian



**Gambar 4.3** (a) Kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 sebelum dilakukan seleksi *cross power*, dan (b) kurva resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61 setelah dilakukan seleksi *cross power*.



(a)



(b)

**Gambar 4.4** kurva resistivitas semu dan fase titik 73 (a) sebelum dan (b) setelah dilakukan proses *masking* dan *smoothing*

ini menggunakan jenis *smoothing* D+ yang memiliki konsep mempertahankan simpangan tren kurva berdasarkan resistivitas semu dan fasenya. Dimana untuk resistivitas semu dibuat 5% sedangkan untuk fase dibuat 5% atau 10%, tergantung pada kondisi kurva fase yang dihasilkan. Penggunaan *smoothing* berguna sebagai informasi lanjut untuk proses pemodelan. Hal ini karena

dalam melakukan pemodelan, data yang digunakan merupakan tren yang dibentuk oleh kurva *smoothing*. Logika dari kurva *smoothing* berlandaskan atas dasar data perhitungan dan model yang terbentuk secara ideal. Yang mana idealnya kurva *smoothing* tidak memiliki kenaikan dan penurunan tren secara sangat curam.

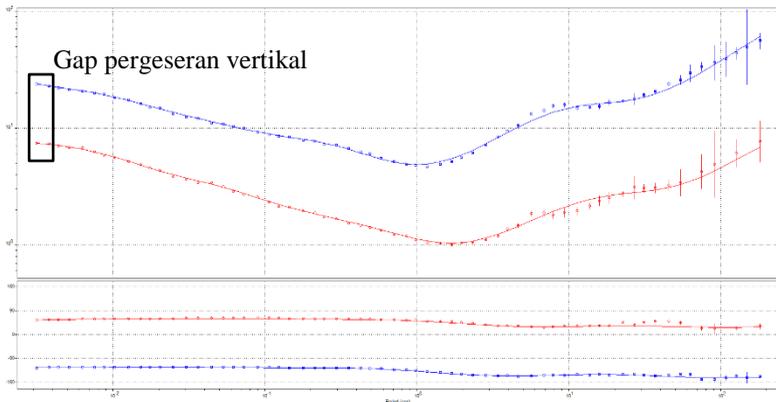
#### **4.1.4 Koreksi pergeseran statik**

Metode dalam melakukan pergeseran statik dalam penelitian ini menggunakan konsep rata-rata median. Seluruh titik pengukuran dalam penelitian diambil pada frekuensi 320 Hz sebagai acuan koreksi. Adapun tabel perhitungan untuk koreksi pergeseran statik telah di lampirkan. Dimana pada perhitungan tersebut didapatkan nilai median untuk kurva  $xy$  sebesar 16 ohm.m dan kurva  $yx$  sebesar 15,5 ohm.m. Sehingga untuk rata-rata dari kedua nilai tersebut yaitu sebesar 15,75 ohm.m. Seluruh titik dalam penelitian ini kemudian di geser untuk kurva resistivitas semu pada frekuensi 320 Hz baik kurva  $xy$  dan  $yx$  menjadi 15,75 ohm.m.

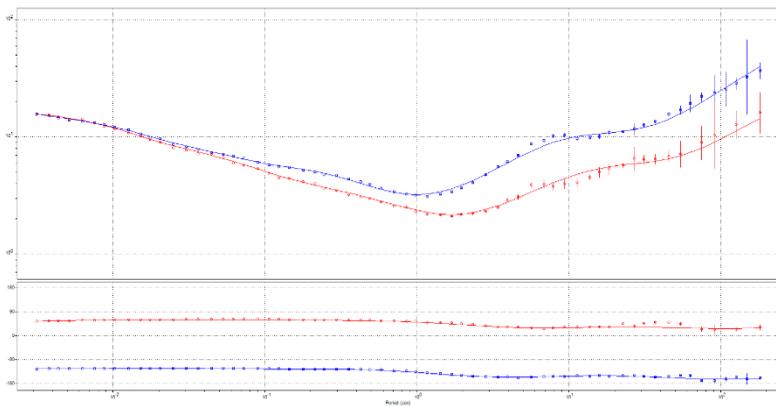
Koreksi pergeseran statik sangat berguna dalam pemodelan yang akan dilakukan nantinya. Kebanyakan, pergeseran statik disebabkan oleh adanya heterogenitas batuan di permukaan. Kurva resistivitas semu kemudian akan mengalami pergeseran vertikal. Dalam gambar 4.5 telah disajikan untuk titik pengukuran 80. Terlihat bahwa kedua gambar tersebut menjelaskan mengenai perbedaan antara Gambar yang sebelum dilakukan koreksi pergeseran statik dan setelah dilakukan koreksi.

#### **4.1.5 Pemodelan inversi 1 dimensi**

Pemodelan 1 dimensi digunakan sebagai pembanding atau pengontrol dalam melakukan model 2 dimensi. Dalam penelitian ini, model yang digunakan merupakan mode invarian. Mode ini merupakan gabungan antara mode TE dan TM pada kurva resistivitas semu dan fase. Pemodelan inversi 1 dimensi menggunakan inversi Occam sebagai algoritmanya. Algoritma ini membuat model yang mana secara otomatis akan membentuk model atas data *skin depth*.



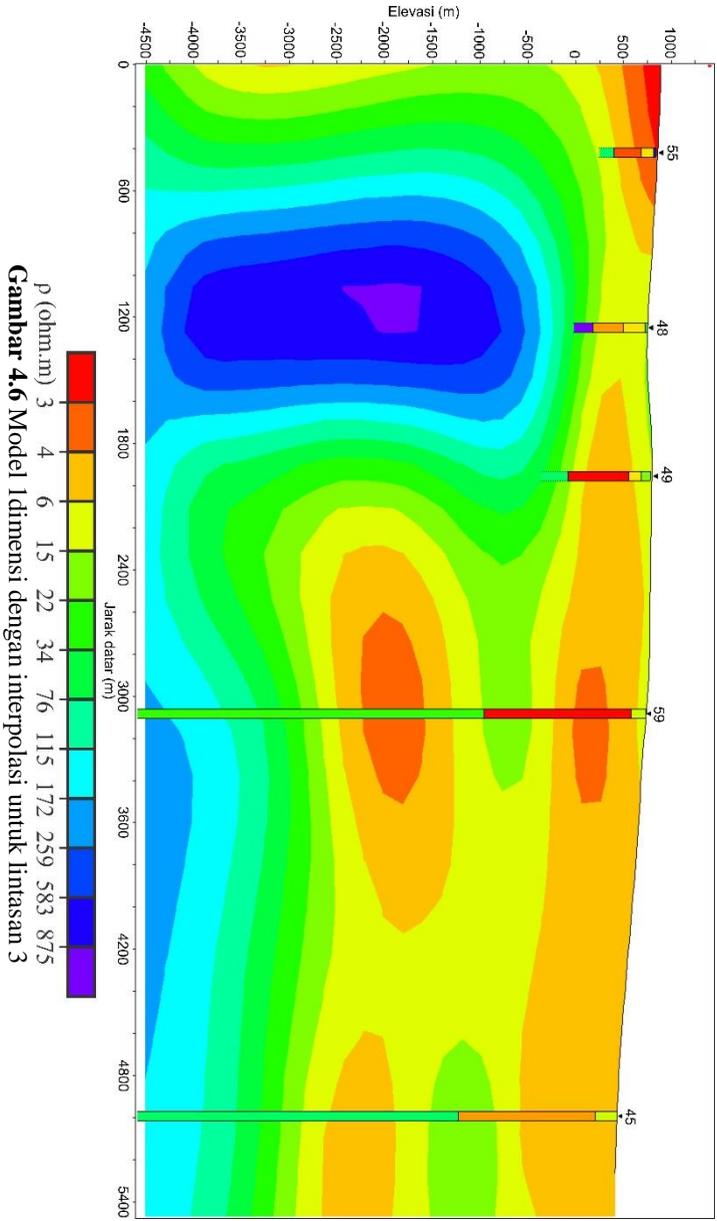
(a)



(b)

**Gambar 4.5** kurva resistivitas semu dan fase titik 80 (a) sebelum dan (b) setelah dilakukan proses pergeseran statik

Pemodelan interpolasi atau gabungan inversi 1 dimensi pada penelitian ini hanya dibuat untuk satu lintasan saja. Namun, untuk inversi 1 dimensi tidak dengan interpolasi tetap dilakukan untuk seluruh titik stasiun pengukuran. Adapun untuk model yang telah dibentuk dapat disajikan pada Gambar 4.6 untuk lintasan 3.



Gambar 4.6 Model Idimensi dengan interpolasi untuk lintasan 3

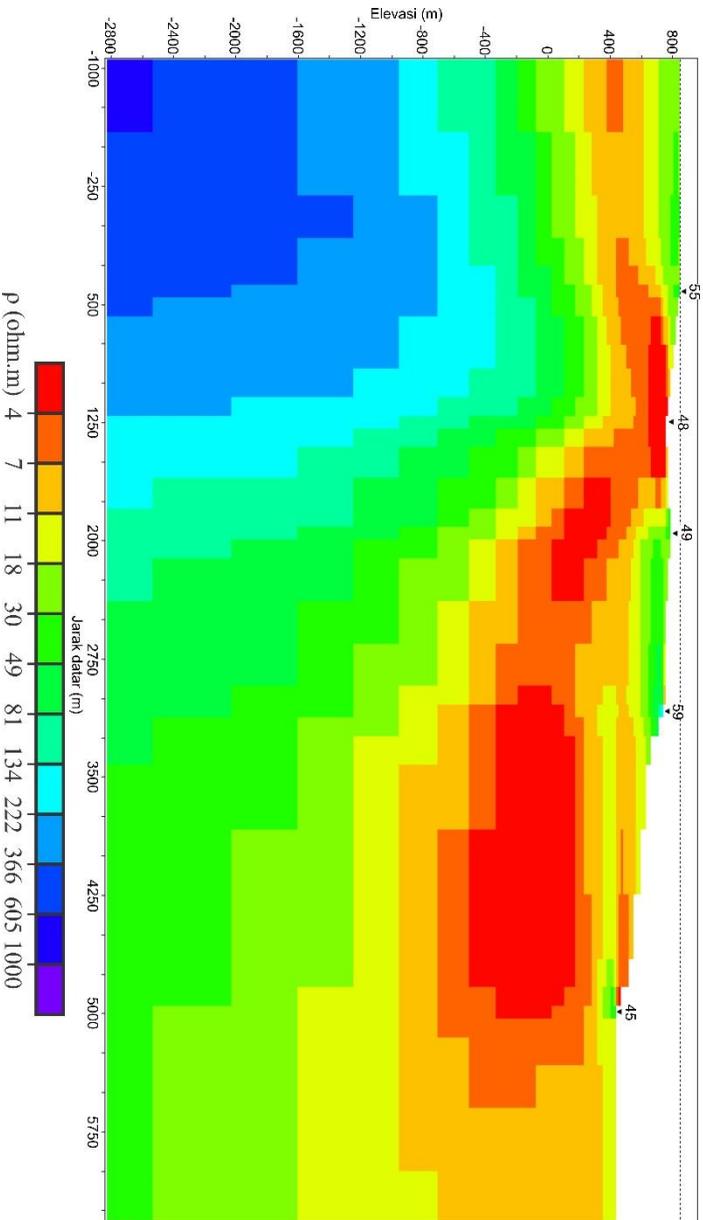
Pada Gambar 4.6, model yang ditampilkan merupakan data dari lintasan 3 yang terdiri dari titik 55, 48, 49, 59 dan 45. Gradasi warna dari masing-masing model *sounding* 1 dimensi tersebut merupakan hasil dari inversi Occam. Adapun kemudian, hasil tersebut dilakukan interpolasi sehingga didapatkan penampang 2 dimensi berdasarkan model 1 dimensi. Penampang inilah yang kemudian akan digunakan sebagai parameter pengontrol model inversi 2 dimensi yang akan dilakukan menggunakan algoritma NLCCG.

#### **4.1.6 Pemodelan inversi 2 dimensi**

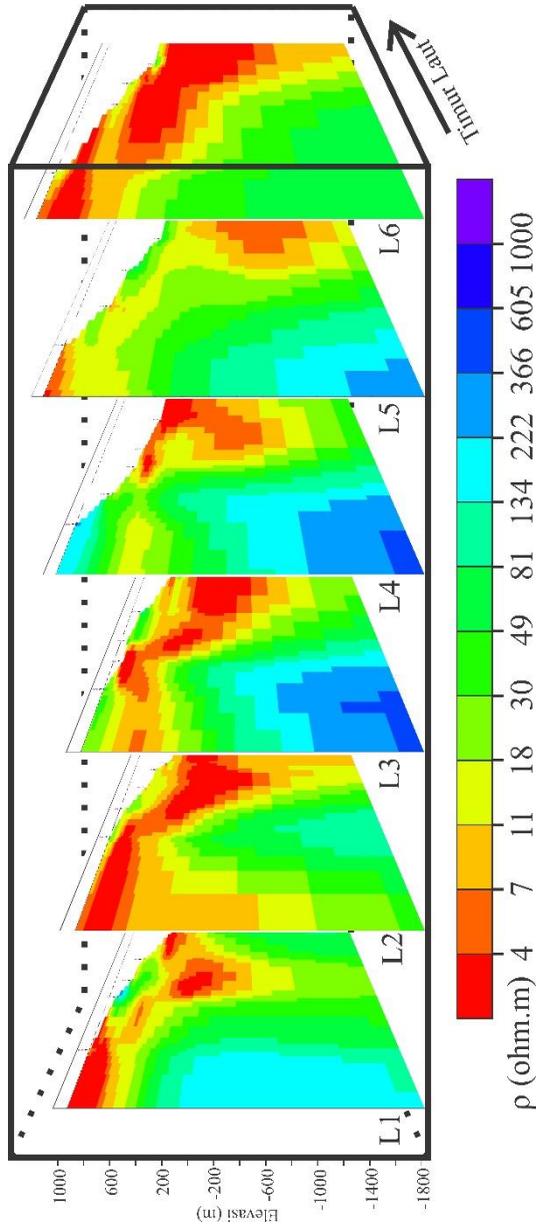
Pemodelan 2 dimensi merupakan model yang menampilkan variasi resistivitas berdasarkan arah vertikal dan horizontal. Pemodelan 2 dimensi dalam penelitian ini juga seperti pemodelan 1 dimensi yang hanya menggunakan mode invarian. Adapun berdasarkan informasi pemodelan 1 dimensi dengan interpolasi untuk lintasan 3, maka didapatkan bahwa sebaran resistivitas tinggi berada pada sisi sebelah kiri model yang ditandai menggunakan warna biru. Sebagai pengontrol, maka hasil tersebut harus saling berkorelasi dengan pemodelan inversi 2 dimensi berikut. Dimana hasil untuk model inversi 2 dimensi pada lintasan 3 dapat ditampilkan pada Gambar 4.7.

Kedua gambar antara Gambar 4.6 yang merupakan model 1 dimensi dengan interpolasi dan Gambar 4.7 yang merupakan model inversi 2 dimensi memiliki karakteristik yang saling menyerupai. Sebaran resistivitas tinggi pada model 1 dimensi sangat sesuai dengan model inversi 2 dimensi, yaitu pada sisi bagian kiri model. Kemudian untuk hasil lainnya dirasa juga sudah cukup berkesesuaian antara satu dengan lainnya. Hasil ini dapat menjelaskan bahwa parameter inversi antara kedua mode telah saling berkorelasi dan dapat dilanjutkan untuk model inversi 2 dimensi untuk lintasan lainnya.

Adapun untuk lintasan lainnya telah diplot dalam model 3 dimensi berdasarkan model inversi 2 dimensi. Dimana data tersebut dapat disajikan pada Gambar 4.8



**Gambar 4.7** Model inversi 2 dimensi untuk lintasan 3



**Gambar 4.8** Model gabungan inversi 2 dimensi seluruh lintasan

Hasil dari pemodelan inversi 2 dimensi menunjukkan bahwa adanya sebaran resistivitas tinggi pada arah barat. Besarnya resistivitas yang tersebar pada zona resistivitas tinggi ini berkisar lebih dari 500 ohm.m. Kemudian pada daerah sekitar permukaan didominasi oleh sebaran resistivitas rendah sekitar kurang dari 4 ohm.m hingga 10 ohm.m. Hasil dari model gabungan 2 dimensi menjadi 3 dimensi saling berkorelasi, dimana kemenerusan sebaran resistivitas tinggi dan rendah saling berkaitan antar lintasan. Hal ini tentunya akan sangat baik bila dilakukan untuk interpretasi sistem panas bumi yang ada pada daerah tersebut.

Adapun untuk nilai RMS tertinggi dari keenam lintasan tersebut yaitu sebesar 2,69% pada lintasan 1. Nilai RMS mempresentasikan sebagai penyimpangan antara data hasil *smoothing* D+ dengan model yang telah terbentuk. Kemudian untuk jumlah maksimal iterasi yang digunakan dalam penelitian ini dipilih sebesar 100 kali. Adapun secara keseluruhan, nilai RMS dan jumlah iterasi yang digunakan pada seluruh lintasan dapat disajikan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Jumlah iterasi dan RMS tiap lintasan

Lintasan	Iterasi (kali)	RMS (%)
1	99	2.69
2	37	2.162
3	100	2.032
4	100	1.695
5	100	1.073
6	92	1.236

Iterasi maksimal yang dapat dicapai masing-masing lintasan menunjukkan perbedaan, ada yang mencapai iterasi maksimum 100 kali dan ada juga yang hanya mencapai 37 kali. Banyaknya iterasi bergantung pada parameter inisial model, algoritma inversi yang digunakan dan korelasi antar model dengan data. Parameter awal inisial model digunakan model *halfspace* dengan resistivitas bumi homogen sebesar 1 ohm.m. Adapun jumlah maksimum iterasi yang dapat dicapai dipengaruhi oleh nilai RMS itu sendiri, dimana pada parameter yang digunakan, iterasi akan berhenti dengan sendirinya

ketika penurunan nilai RMS tidak lebih besar dari 0.001% atau model telah ditemukan pada kondisi yang sesuai. Sehingga berdasarkan hal tersebut, lintasan 1, 2 dan 6 dapat dianggap sudah mencapai nilai eror yang paling minim dan tidak dapat diturunkan kembali nilai RMS-nya.

## **4.2 Geologi dan Geokimia Penelitian**

Pembentukan sistem panas bumi daerah penelitian berkaitan dengan aktivitas vulkanik sekitar daerah tersebut. Pada area bagian barat daerah penelitian merupakan daerah dengan elevasi yang lebih tinggi daripada daerah sisi timur. Pada sisi barat daerah penelitian juga banyak ditemukan bekas lapisan aliran lava. Kondisi yang demikian akan sangat membantu dalam pembentukan sistem panas bumi baik dalam pembentukan reservoir maupun batuan penudung.

Daerah penelitian sistem panas bumi ini didukung dengan adanya sumber mata air panas yang keluar dari permukaan. Dengan adanya mata air panas tersebut, analisis geokimia dapat dilakukan dengan mengidentifikasi kandungan masing-masing unsur dari fluida tersebut.

Adapun untuk kandungan fluida hasil manifestasi permukaan dari mata air panas disekitar penelitian merupakan fluida berjenis klorida dan bikarbonat. Fluida berjenis klorida terdapat pada mata air panas APK, APLA dan APL. Sedangkan berjenis bikarbonat terdapat pada mata air panas APT, APLJ, APPG. Mata air panas yang didominasi oleh klorida dapat diidentifikasi sebagai mata air panas yang berasal langsung dari reservoir tanpa adanya campuran dengan air permukaan. Sedangkan untuk mata air panas bertipe bikarbonat merupakan mata air panas yang telah terkontaminasi oleh air permukaan.

Kemudian untuk identifikasi temperatur reservoir dapat dilakukan berdasarkan kandungan dari natrium, kalium dan magnesium. Pada diagram Na-K-Mg yang telah disajikan sebelumnya, diidentifikasi mata air panas APK, APLA dan APL memiliki temperatur resevoir sekitar 200°C. Ada mata air panas

yang tidak memiliki temperatur reservoir yang diperkirakan sebesar 200°C yaitu pada mata air panas APT, APLJ dan APPG. Mata air panas APLJ dan APPG berada jauh dari daerah penelitian, yang mana kemungkinan besar adanya kontak antar reservoir penyedia mata air panas APLJ dan APPG dengan sumber panas sangat kecil karena dipengaruhi oleh jarak antar lokasi.

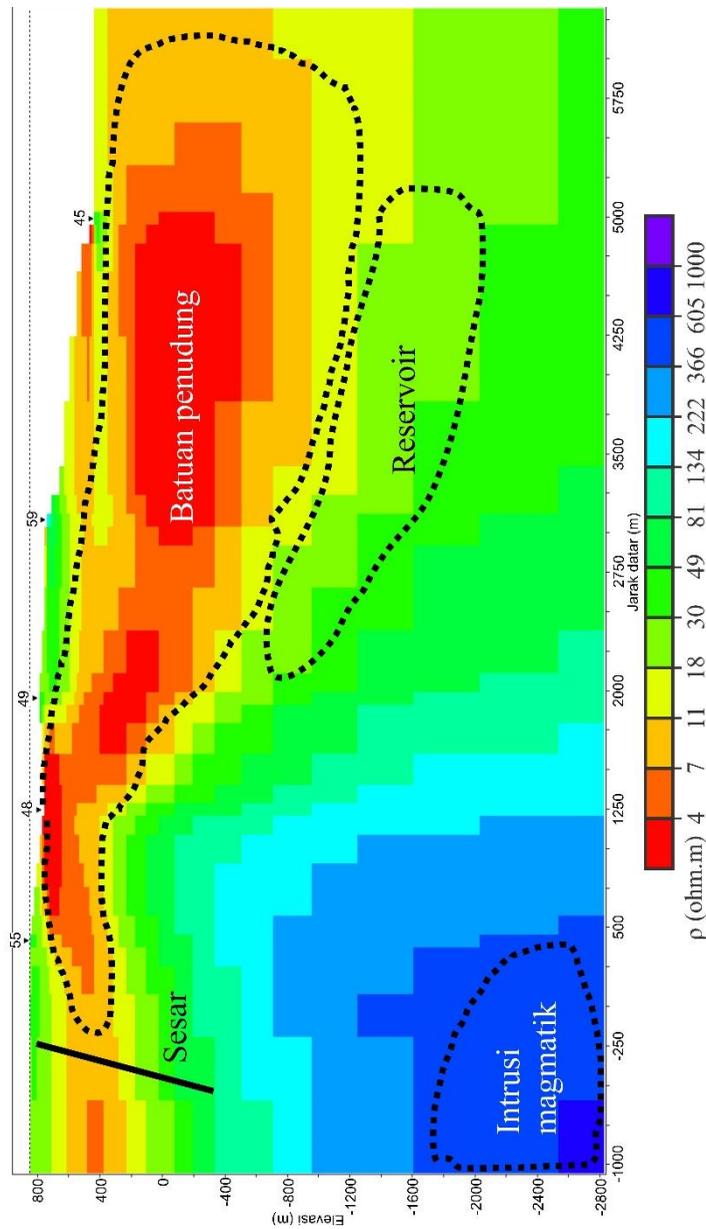
Beralih ke diagram trilinear Cl-Li-B dapat menunjukkan bahwa fluida mata air panas yang berada pada dominasi lithium merupakan fluida yang bergerak cepat menuju kepermukaan. Hal tersebut dikarenakan kandungan lithium yang ada pada fluida tidak sempat diserap oleh batuan disepanjang perjalanan. Berdasarkan diagram tersebut, mata air panas APT merupakan salah satu yang memiliki kandungan lithium tinggi.

### **4.3 Interpretasi Akhir**

Penunjang tahap interpretasi data magnetotelurik telah dibahas berdasarkan informasi geologi dan geokimia. Dimana pada bagian barat didominasi oleh batuan beku dengan resistivitas yang relatif tinggi. Pada daerah tersebut diduga sebagai daerah kontak termal antara reservoir dengan sumber panas. Hal lain berbeda untuk daerah sisi timur yang didominasi oleh batuan yang memiliki resistivitas rendah. Batuan ini sangat cocok sebagai pembentukan lapisan penudung dari sistem panas bumi.

Hasil interpretasi berdasarkan penampang 2 dimensi magnetotelurik telah dilakukan, adapun untuk lintasan 3 hasil interpretasi dapat disajikan pada Gambar 4.9. Dimana untuk gambar tiap penampang lintasan lainnya telah disajikan pada lampiran laporan ini.

Pada penampang lintasan 1, batuan penudung melingkupi seluruh daerah permukaan yang diidentifikasi sebagai batuan yang memiliki resistivitas rendah. Pada bagian tengah penampang, teridentifikasi memiliki anomali berupa adanya area yang memiliki resistivitas lebih rendah daripada area sebelah kanan dan kirinya. Penampakan ini juga terlihat membentuk zona yang memanjang hingga kedalaman 2600m dibawah permukaan air. Anomali seperti



**Gambar 4.9** Interpretasi pada lintasan 3

ini diduga merupakan sesar. Kondisi yang demikian tersebut apabila melihat kembali berdasarkan data geologi memang benar, karena pada daerah tengah pada lintasan 1 memotong suatu sesar yang berarah hampir utara-selatan. Kemudian untuk bagian kiri pada lintasan 1 memiliki nilai resistivitas yang tinggi. Keadaan tersebut diduga merupakan daerah intrusi magmatik.

Kemudian pada lintasan 2, pada daerah kiri masih didominasi oleh batuan yang memiliki resistivitas tinggi sedangkan pada bagian kanan cenderung terisi oleh batuan yang memiliki resistivitas rendah. Pada bagian permukaan juga dicirikan dengan memiliki lapisan yang resistivitasnya rendah. Namun apabila diteliti lebih seksama, pada bagian permukaan terdapat diskontinuitas resistivitas yang menyebabkan seolah-olah lapisan tersebut dibagi menjadi tiga area. Diskontinuitas itu diduga berupa struktur sesar sebanyak dua buah yang membagi lapisan tersebut menjadi tiga bagian. Lapisan yang dimaksud demikian dicirikan sebagai lapisan penudung yang melingkupi seluruh sebaran permukaan lintasan 2. Kemudian kembali lagi apabila kita melihat berdasarkan informasi geologi, pada lintasan 2 memang memiliki lintasan yang memotong dua buah sesar yang berarah hampir barat laut-tenggara.

Berbeda hal pada penampakan lintasan 3. Pada lintasan ini, kondisi geologi terlihat lebih kompleks yang dicirikan memiliki zona resistivitas sangat tinggi hingga rendah. Pada bagian permukaan penampakan dicirikan dengan sebaran resistivitas rendah yang diduga sebagai lapisan batuan penudung. Pada sisi sebelah kiri lapisan penudung tersebut terdapat anomali berupa diskontinuitas resistivitas. Diskontinuitas tersebut diduga sebagai adanya zona sesar yang bila kita kembali melihat data geologi memang lintasan ini dilalui oleh sesar yang berarah hampir barat laut-tenggara. Pada bagian bawah lapisan penudung yang lokasinya berada ditengah lintasan, diduga terdapat reservoir sebagai batuan yang menyimpan air sistem panas bumi yang terpanaskan. Zona reservoir tersebut dicirikan memiliki resistivitas sedang dan terjebak antara daerah yang memiliki

resistivitas tinggi dan rendah. Zona reservoir pada lintasan 3 berada dekat dengan mata air panas APT, yang mana kemungkinan besar mata air panas tersebut dikontrol oleh adanya reservoir pada lintasan 3. Kemudian pada sisi sebelah kiri bagian bawah lintasan 3 terdapat zona yang memiliki resistivitas sangat tinggi. Diduga daerah ini sangat dekat dengan aktivitas dapur magma sebagai pengontrol panas yang mengalami perpindahan panas.

Pada lintasan 4, adanya zona yang memiliki resistivitas rendah berada pada bagian sisi kanan didekat permukaan. Zona ini diduga sebagai batuan penudung yang berupa lapisan impermeabel. Pada bagian sebelah kiri didekat permukaan diduga terdapat sesar yang memotong lintasan 4. Pada lintasan ini dilewati oleh mata air panas APK dan APLA yang berada pada bagian tengah lintasan. Adanya informasi tersebut dimungkinkan area ini memiliki zona reservoir yang berada dibagian bawah lapisan penudung yang berbentuk memanjang dan diapit oleh batuan yang memiliki resistivitas tinggi yang diduga sebagai zona intrusi magmatik.

Berlanjut pada lintasan 5, daerah ini memiliki lapisan dengan resistivitas rendah yang relatif tipis dan memanjang melingkupi daerah permukaan. Zona resistivitas rendah juga terdapat pada bagian sisi sebelah kanan lintasan. Lapisan tipis tersebut diduga merupakan batuan penudung yang dekat dengan permukaan. Adapun dibagian bawah lapisan penudung tersebut diduga terdapat zona reservoir yang relatif lebih besar dengan dicirikan memiliki nilai resistivitas sedang. Daerah reservoir tersebut berada dibagian sebelah sisi selatan mata air panas APK dan APLA serta berada di sebelah barat daya mata air panas APL. Kemudian zona intrusi magmatik juga masih sama dengan kebanyakan lintasan lain yang berada dibagian sisi kiri lintasan dengan dicirikan memiliki nilai resistivitas yang tinggi.

Lintasan yang terakhir yaitu lintasan 6 yang membentang pada sisi sebelah selatan daerah penelitian. Pada lintasan ini zona yang memiliki resistivitas rendah berada disekitar permukaan.

Zona ini terlihat kokoh dengan ketebalan yang relatif tinggi yang mana diduga sebagai lapisan batuan penudung. Pada bagian bawah lapisan penudung tersebut diduga memiliki batuan reservoir yang berdasarkan peta berada pada bagian selatan mata air panas APK, APLA dan APL.

Berdasarkan seluruh interpretasi tiap lintasan, didapatkan bahwa zona reservoir terlihat mulai pada lintasan 3, 4, 5 dan 6. Dari lintasan 6 sendiri terlihat zona reservoir masih memiliki penampang yang cukup tebal. Diduga kemenerusan reservoir masih terus berlanjut disisi selatan daerah pengukuran.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan penelitian ini berdasarkan tahapan pengolahan dan interpretasi sistem panas bumi, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengolahan data magnetotelurik dapat dilakukan dengan menggunakan piranti lunak keluaran Phoenix Geophysics yang mana agar didapatkan hasil yang baik perlu dilakukan adanya tahapan pendukung berupa rotasi tensor, koreksi pergeseran statik serta kontrol inversi 2 dimensi berdasarkan interpolasi inversi 1 dimensi.
2. Pada daerah penelitian sistem panas bumi ini didapatkan bahwa adanya zona intrusi magmatik berada pada bagian barat daerah penelitian yang dicirikan memiliki nilai resistivitas tinggi. Lapisan penudung memiliki nilai resistivitas kurang dari 10 ohm.m yang menyebar didekat permukaan. Kemudian zona reservoir yang memiliki nilai resistivitas sedang berupa 10 hingga 40 ohm.m berada pada bagian selatan sekitar mata air panas APK, APLA dan APL. Kedalaman puncak reservoir berkisar 1000 meter dibawah permukaan. Temperatur reservoir diduga sebesar 200°C dan termasuk dalam fluida klorida serta bikarbonat.

#### **5.2 Saran**

Saran dalam pemodelan 2D magnetotelurik untuk interpretasi sistem panas bumi pada daerah penelitian yang sama yakni:

1. Perlu dilakukan penambahan titik pengukuran dibagian selatan daerah pengukuran untuk melihat akhir dari batas reservoir.
2. Sebaiknya perlu dilakukan analisis sumur untuk didapatkan model sistem panas bumi yang lebih spesifik dan detail.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Benderitter, Y., & Cormy, G. 1990. Possible Approach to Geothermal Research and Relative costs. *UNITAR*, 59–69.
- Berdichevsky, Mark N., & Dmitriev, V. I. 2008. *Models and Methods of Magnetotellurics*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Berdichevsky, Mark Naumovich, & Dmitriev, V. I. 2002. *Magnetotellurics in the Context of the Theory of Ill-posed Problems*. Tulsa: SEG Books.
- Chave, A. D., & Jones, A. G. 2012. *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. 1995. *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Glassley, W. E. 2010. *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton: CRC Press.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Gupta, H. K., & Roy, S. 2007. *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Haenel, R., Rybach, L., & Stegena, L. 1988. *Handbook of Terrestrial Heat-flow Density Determination*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Hermawan, D., Widodo, S., S, R., K, D., Kholid, M., Zarkasyi, A., & J, W. 2011. *Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Sumani, Provinsi Sumatera Barat*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.
- Hochstein, M. P. 1990. Classification and Assessment of Geothermal Resources. *UNITAR*, 31–57.
- Menke, W. 2018. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. London: Academic Press.

- Muffler, P., & Cataldi, R. 1978. Methods For Regional Assessment of Geothermal Resources. *Geothermics*, 7(2), 53–89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0)
- Nabighian, M. N. 1991. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Tulsa: SEG Books.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Rodi, W., & Mackie, R. L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1), 174–187. <https://doi.org/10.1190/1.1444893>
- Shearer, P. M. 2009. *Introduction to Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Simpson, F., & Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Supriyanto, S. 2007. *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Tabak, J. 2009. *Solar and Geothermal Energy*. New York: Facts On File.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Unsworth, M. J. 2008. *Lecture Notes*. Geophysics 424.
- Vozoff, K. 1972. The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins. *Geophysics*, 98–141.
- Wahjosoedibjo, A., & Hasan, M. 2018. Indonesia's Geothermal Development - Where Is It Going? *43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 12.
- White, D. E. 1973. *Characteristics of geothermal resources*. Stanford: Stanford University Press.
- Widarto, D. S. 2008. *Metoda Magnetotelurik dalam Geofisika Eksplorasi*. Jakarta: P.T. Pertamina.
- Zhdanov, M. S. 2009. *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*. Amsterdam: Elsevier Science.

## LAMPIRAN

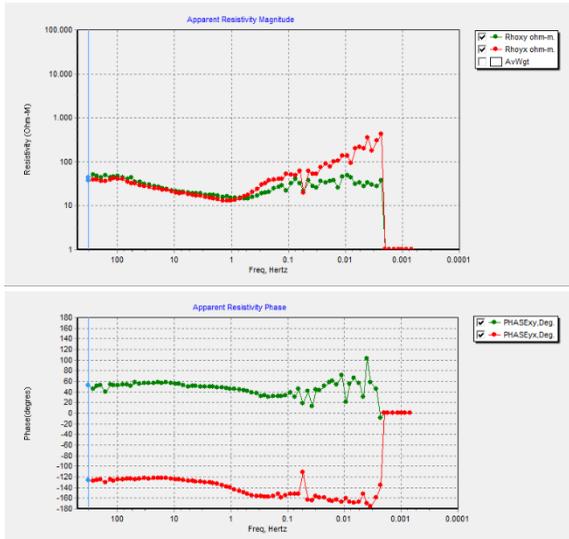
### Lampiran A. Data perhitungan koreksi pergeseran statik

**Tabel A.** Hasil perhitungan koreksi pergeseran statik (320 Hz)

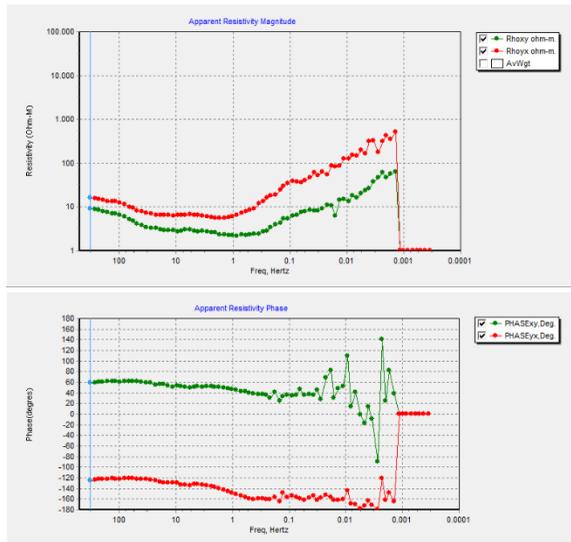
Titik Pengukuran	Resistivitas TE (ohm.m)	Resistivitas TM (ohm.m)
4	43.1	35.7
17	8.9	15.9
22	227.2	31.8
25	19.3	21.2
30	49.6	40.8
32	23.8	18.5
41	65.3	95.3
42	13.9	61
43	19.7	17.5
44	31.2	10.7
45	13.3	15.5
47	19.9	17.9
48	6.2	7.6
49	17.4	9.7
50	3.7	5.7
51	8.7	9.9
52	15.4	1.9
54	22.7	8
55	5.3	8.9
57	4.8	5.1
58	7.5	14.7
59	16	14.5
60	3.6	7.2
61	28.5	30.7
62	62.3	48.1
63	3.3	3.9
64	2.1	1.1
65	5.5	7.9
66	9.9	8.5
68	19.1	37.9
69	4.1	5.3
70	16.9	8.1

71	26.4	20.8
72	63.1	57.9
73	37.3	39
74	50.3	22.9
75	10.9	14.6
76	10.2	16.7
78	28.7	17.9
79	2.2	8.5
80	7.5	23.6
81	14.4	23.7
82	35.2	14.9
83	39.3	9.7
84	11	18
<hr/>		
Median	16	15.5
<hr/>		
Rata-rata		15.75
<hr/>		

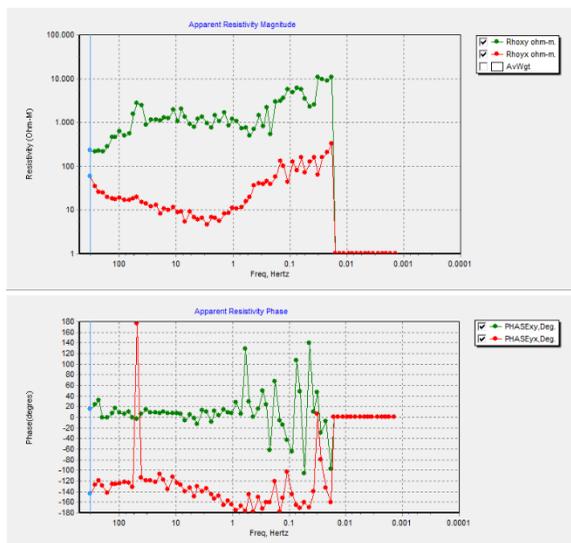
### Lampiran B. Kurva resistivitas semu dan fase tiap stasiun



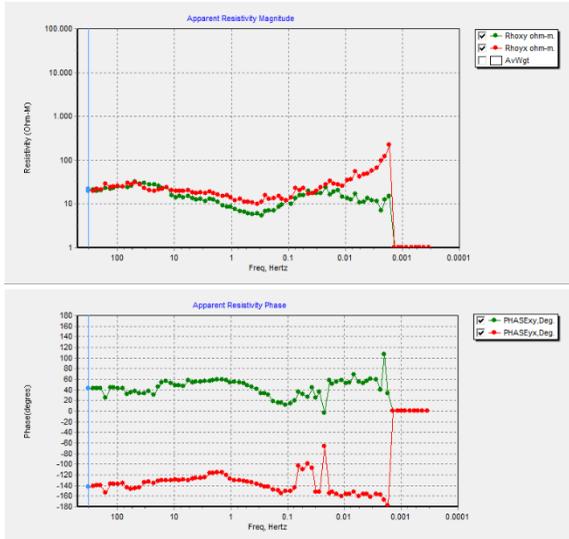
**Gambar B.1** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 04



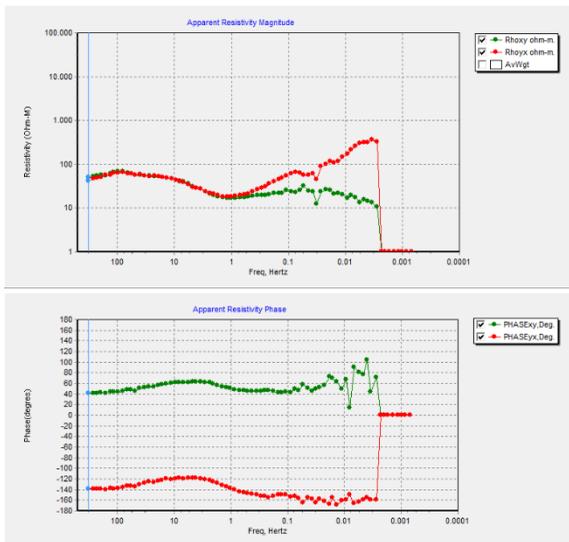
**Gambar B.2** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 17



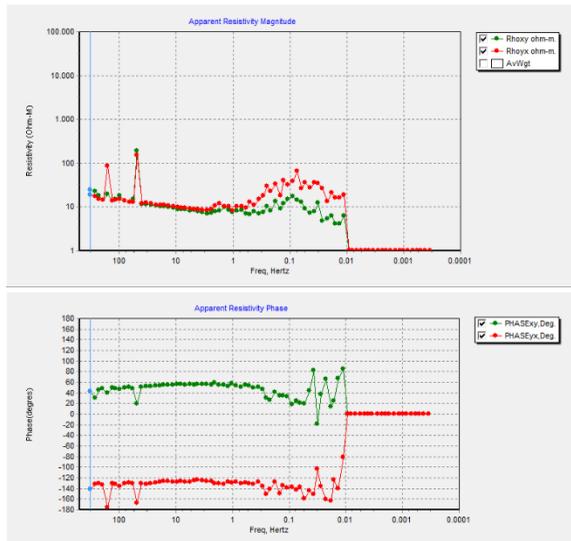
**Gambar B.3** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 22



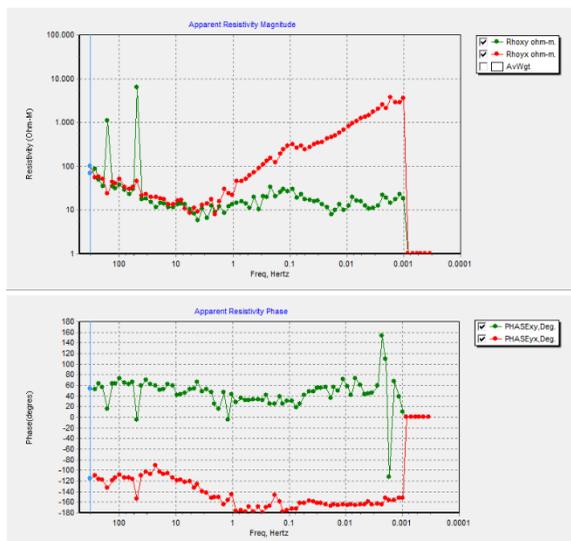
**Gambar B.4** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 25



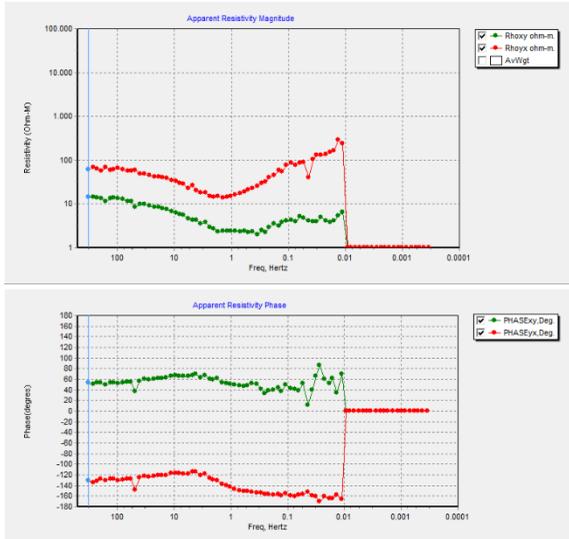
**Gambar B.5** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 30



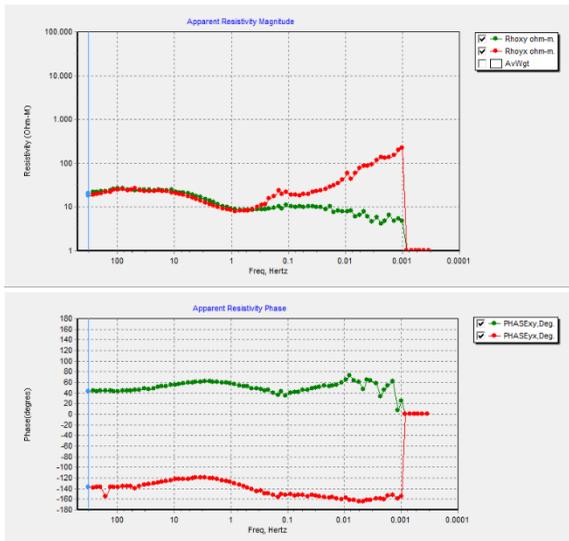
**Gambar B.6** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 32



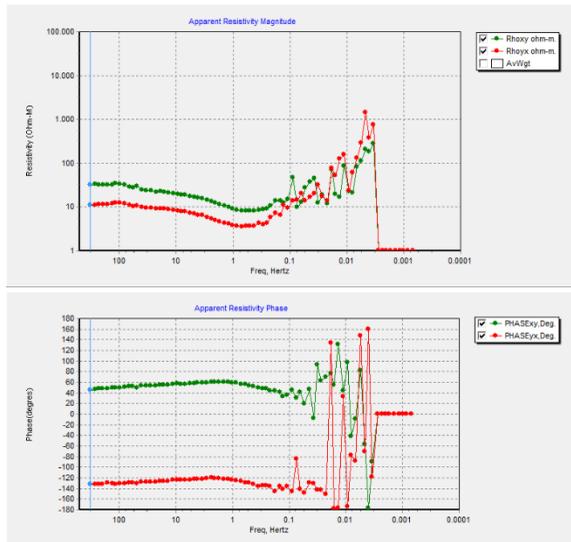
**Gambar B.7** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 41



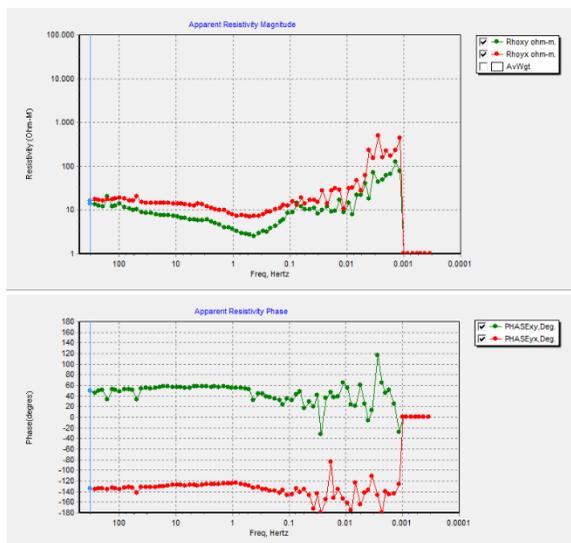
**Gambar B.8** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 42



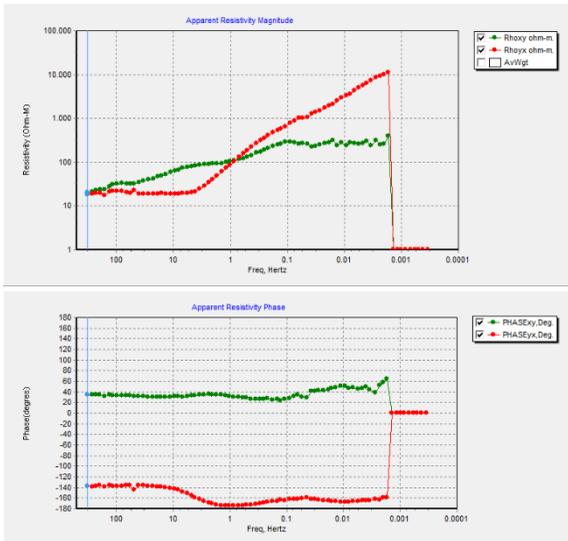
**Gambar B.9** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 43



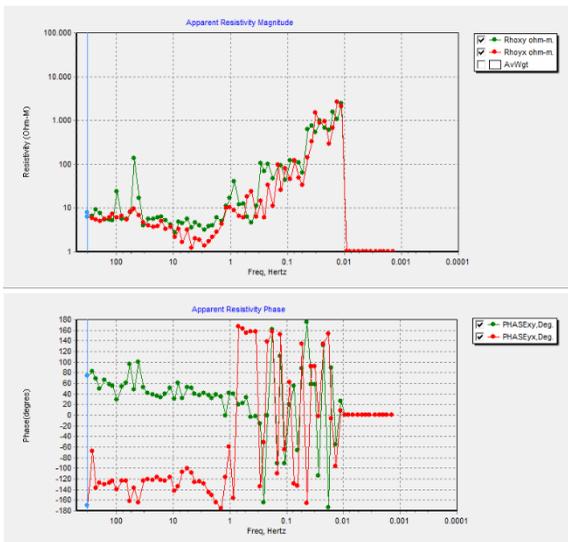
**Gambar B.10** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 44



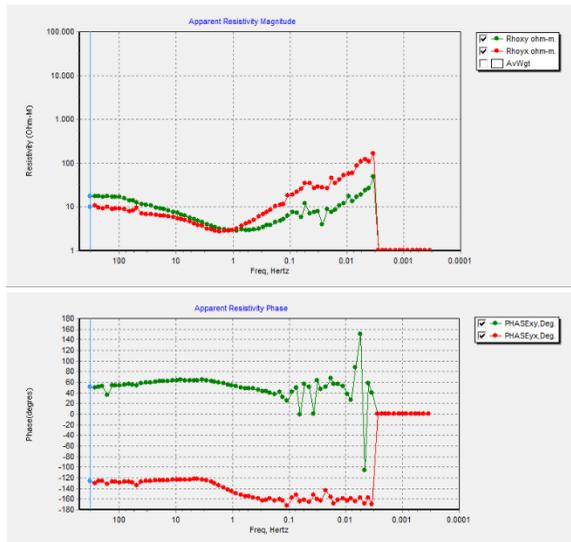
**Gambar B.11** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 45



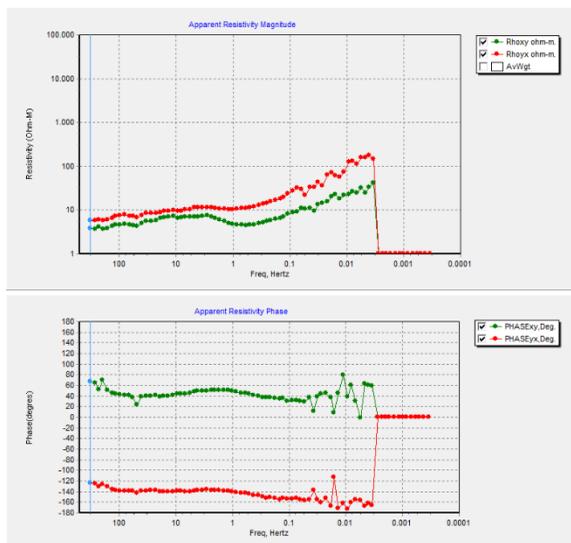
**Gambar B.12** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 47



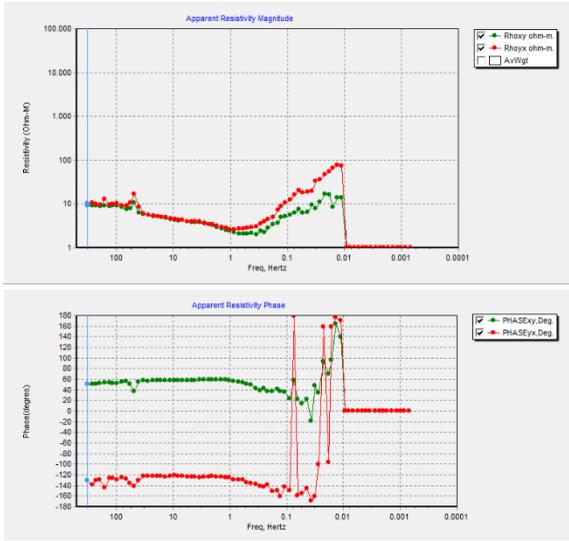
**Gambar B.13** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 48



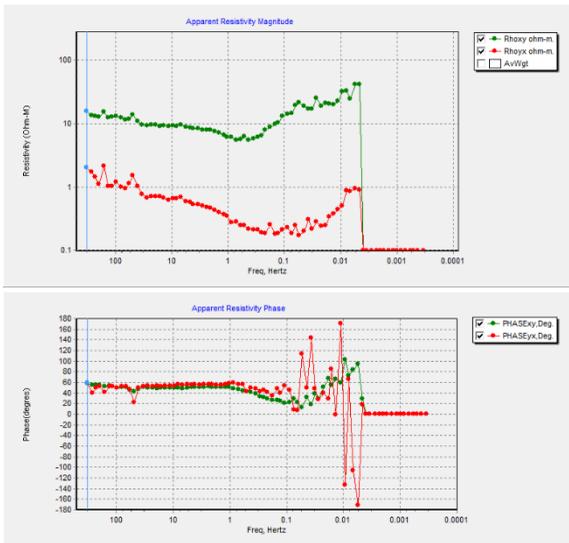
**Gambar B.14** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 49



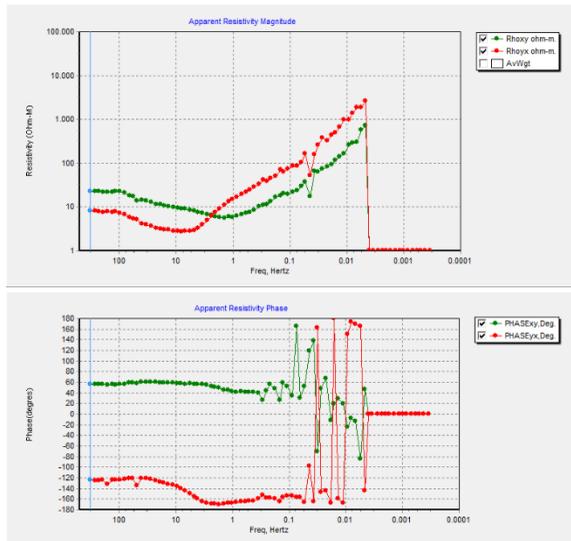
**Gambar B.15** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 50



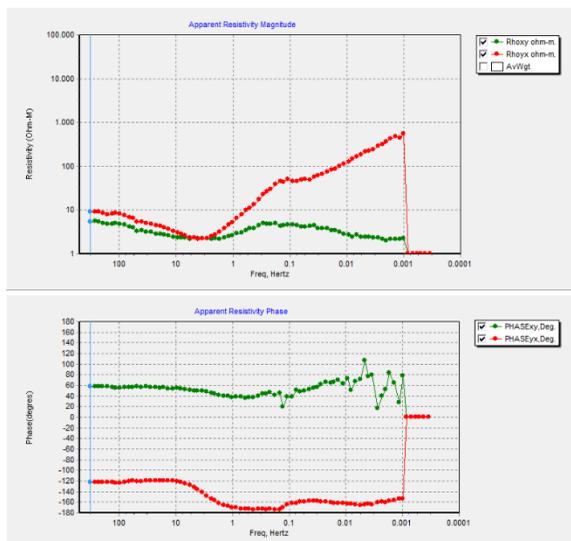
**Gambar B.16** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 51



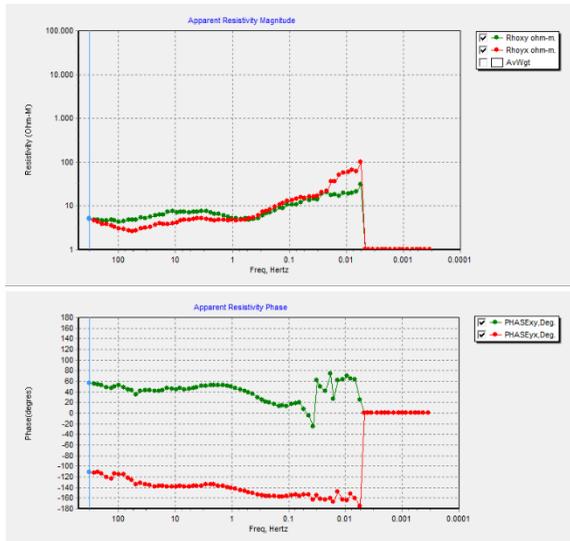
**Gambar B.17** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 52



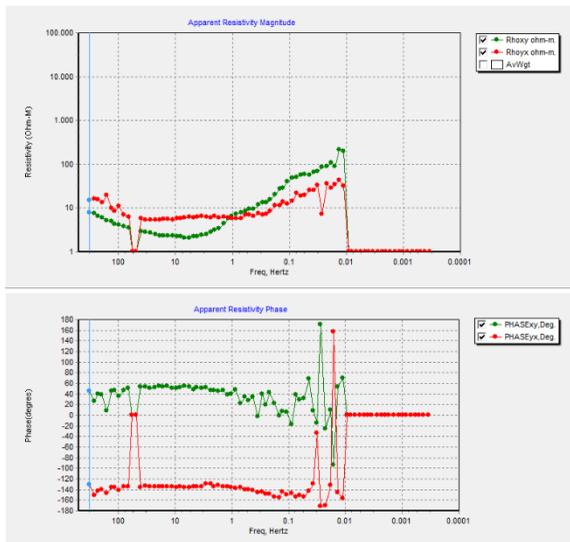
**Gambar B.18** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 54



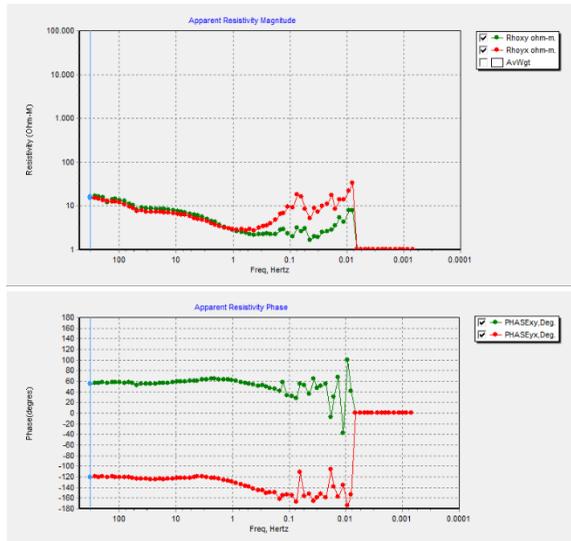
**Gambar B.19** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 55



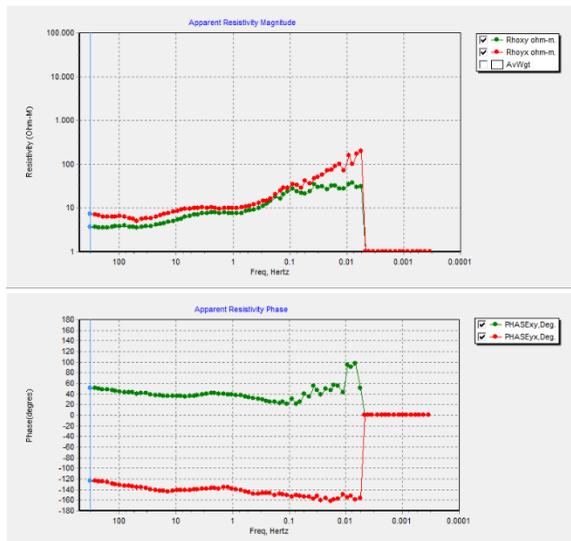
**Gambar B.20** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 57



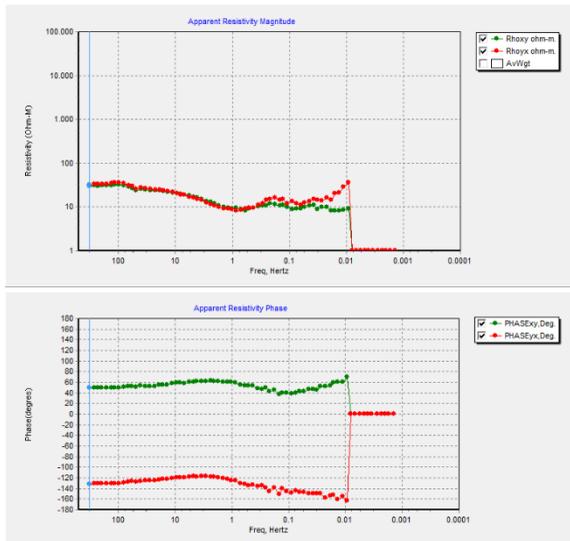
**Gambar B.21** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 58



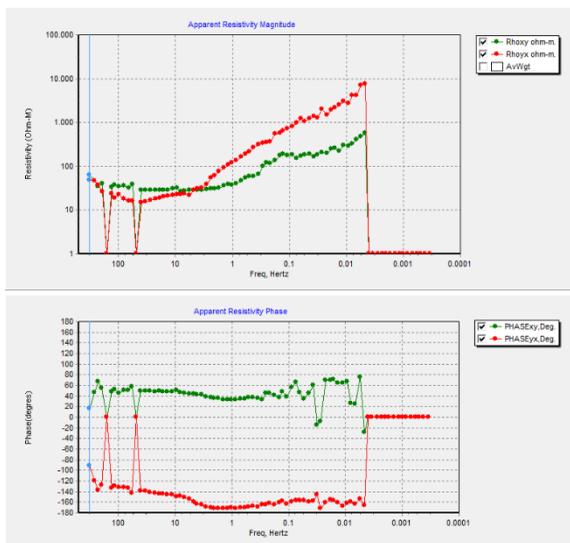
**Gambar B.22** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 59



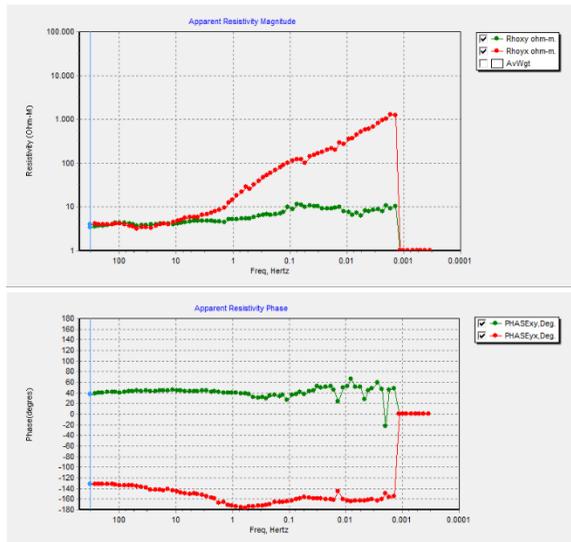
**Gambar B.23** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 60



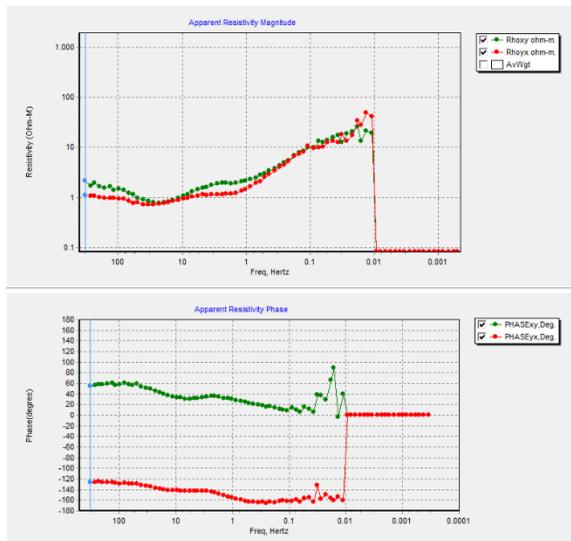
**Gambar B.24** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 61



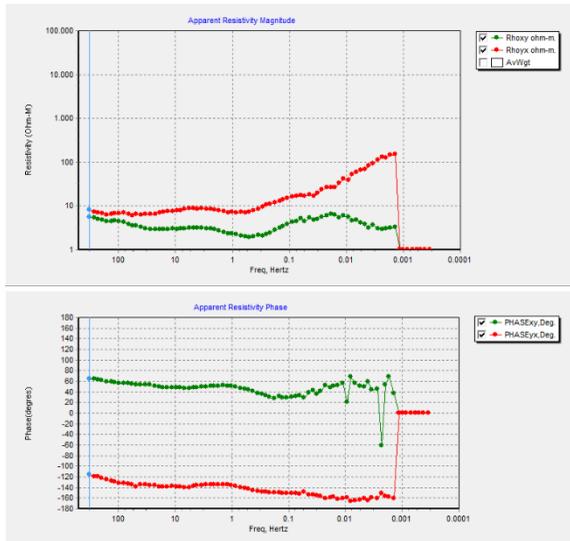
**Gambar B.25** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 62



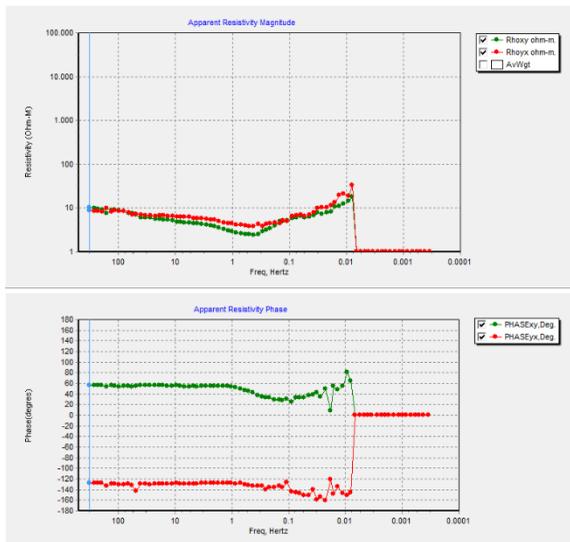
**Gambar B.26** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 63



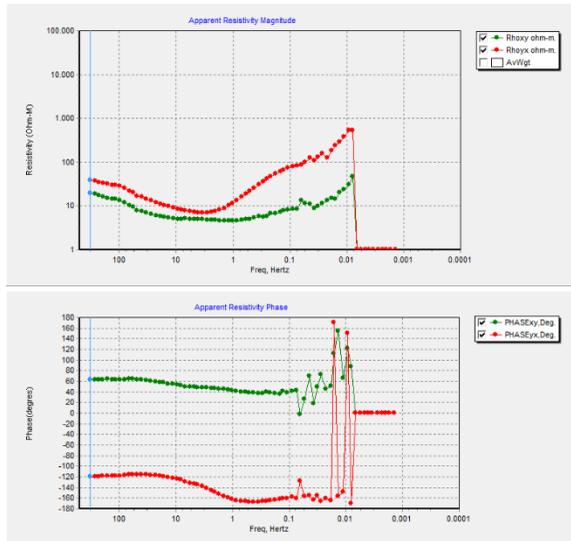
**Gambar B.27** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 64



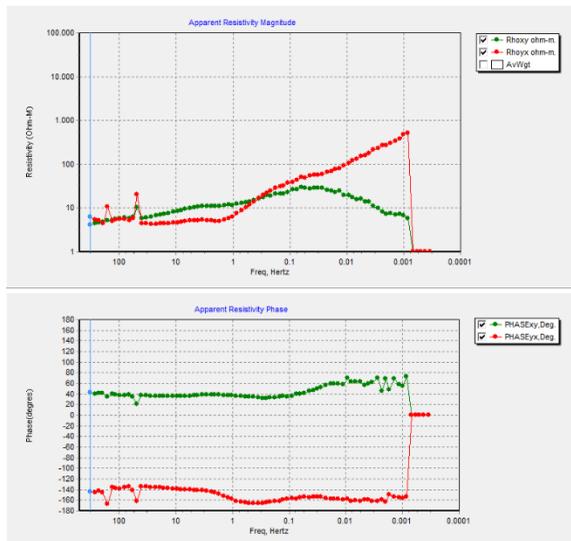
**Gambar B.28** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 65



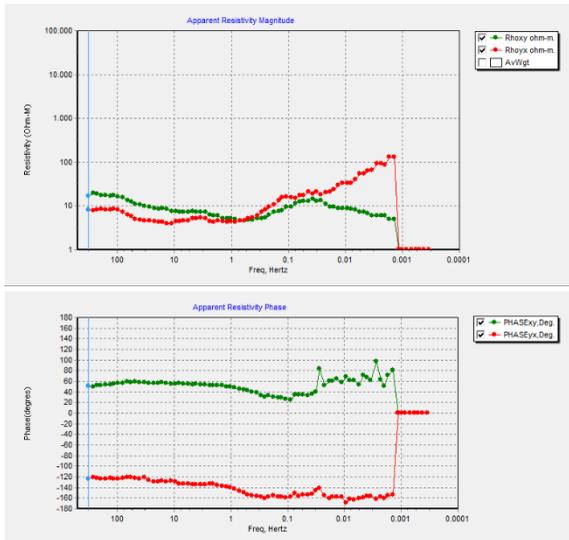
**Gambar B.29** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 66



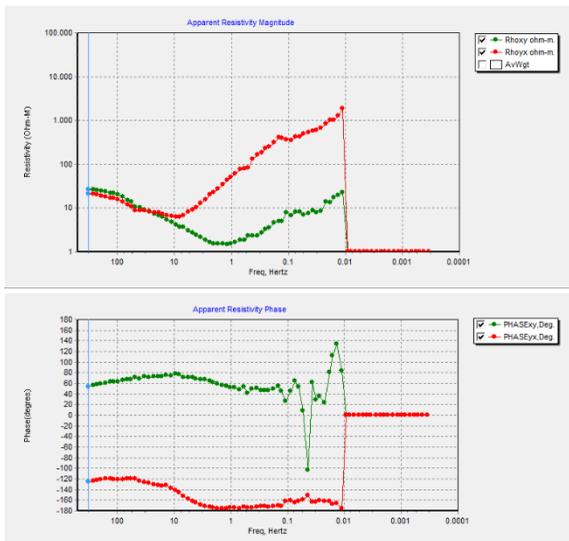
**Gambar B.30** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 68



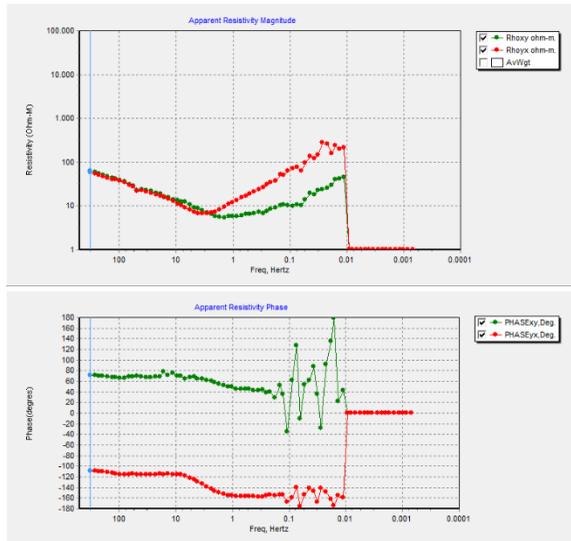
**Gambar B.31** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 69



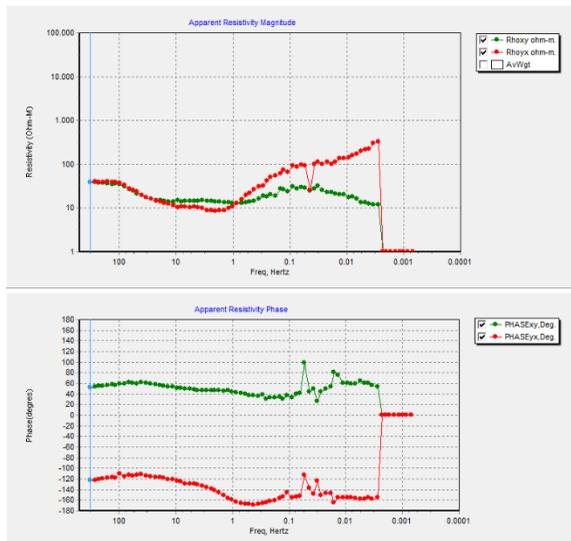
**Gambar B.32** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 70



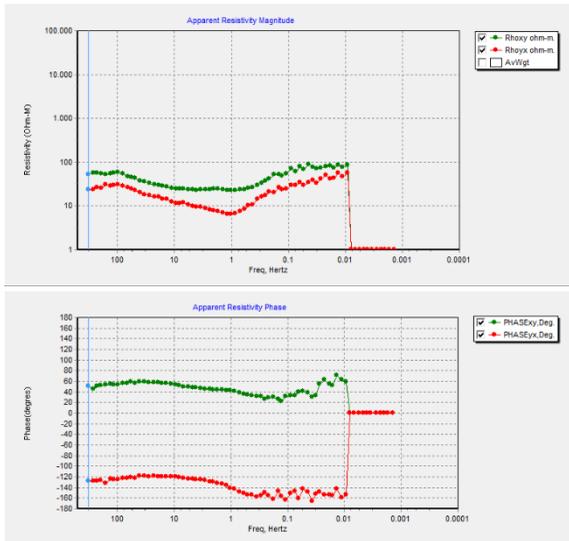
**Gambar B.33** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 71



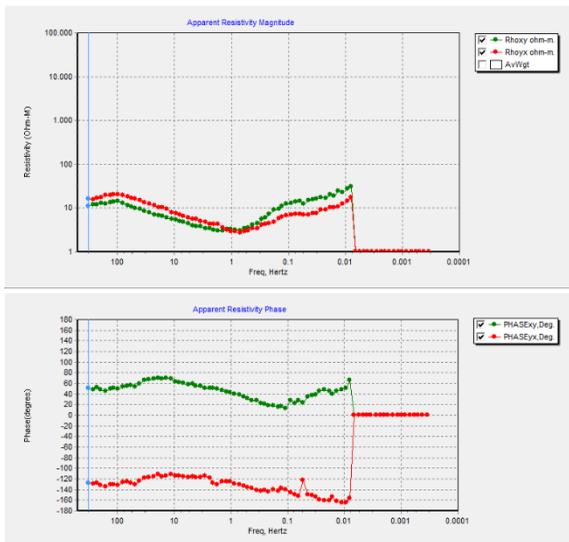
**Gambar B.34** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 72



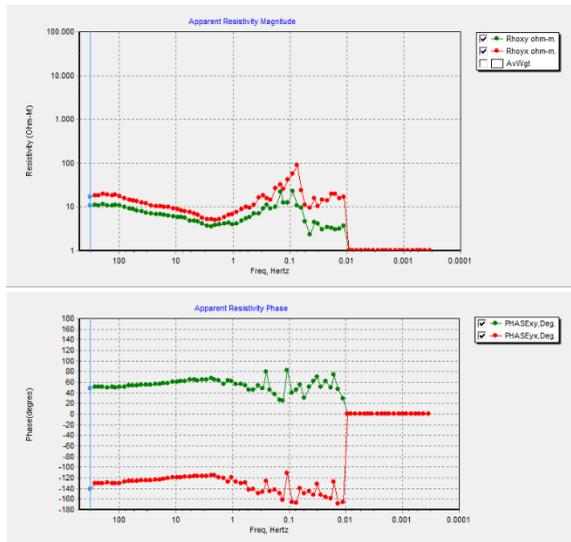
**Gambar B.35** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 73



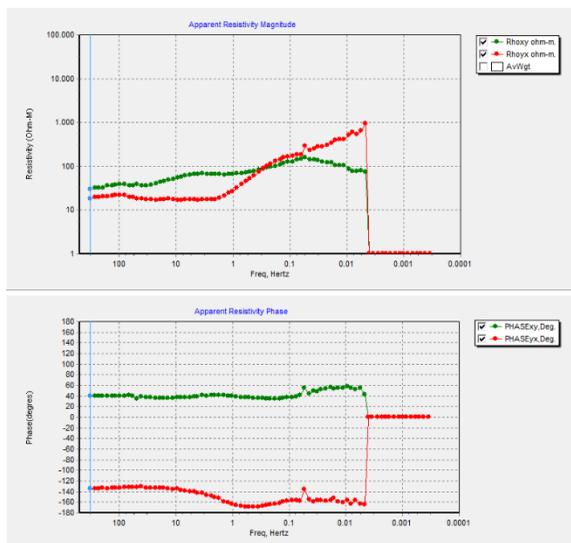
**Gambar B.36** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 74



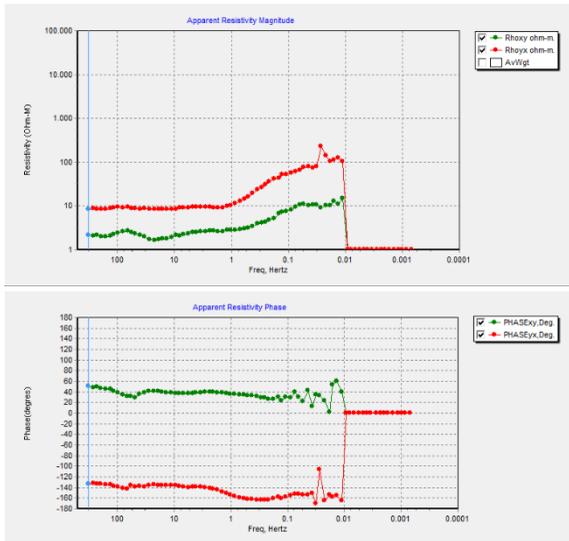
**Gambar B.37** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 75



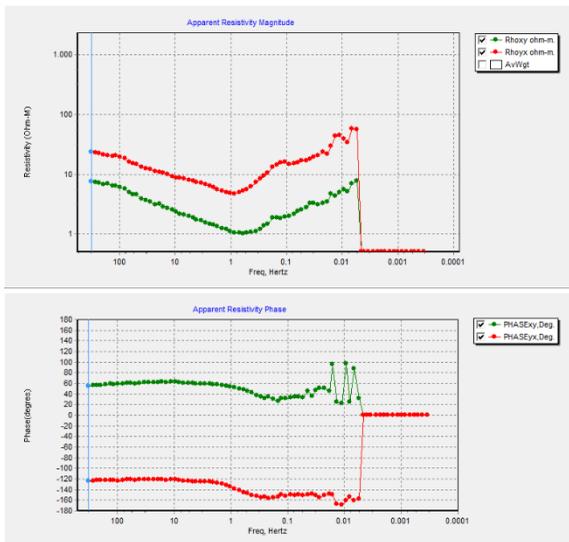
**Gambar B.38** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 76



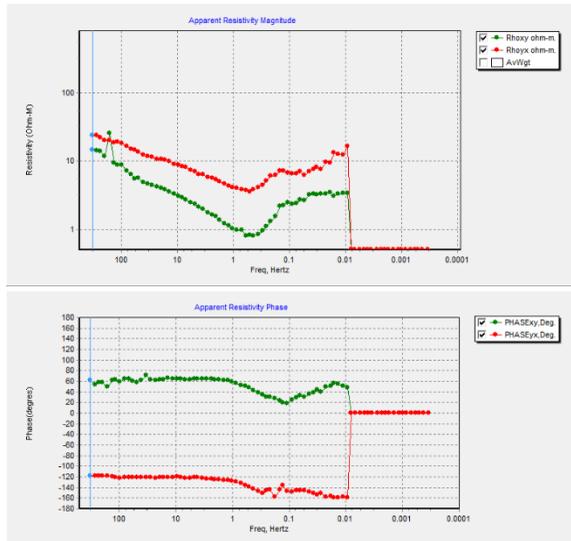
**Gambar B.39** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 78



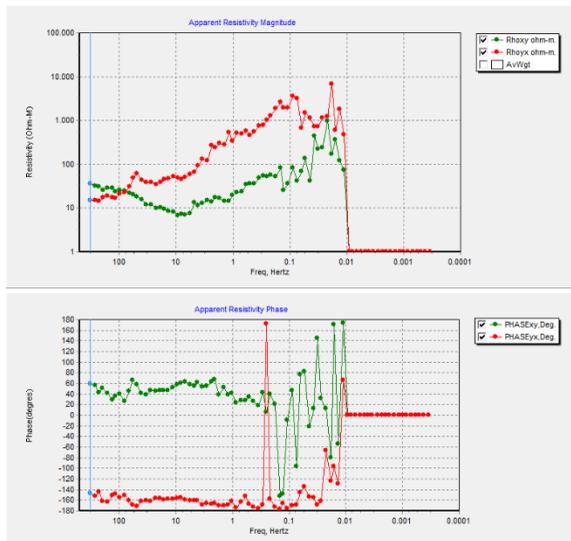
**Gambar B.40** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 79



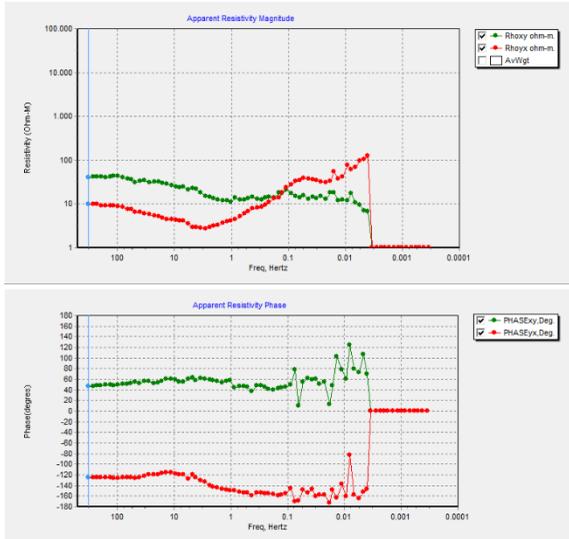
**Gambar B.41** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 80



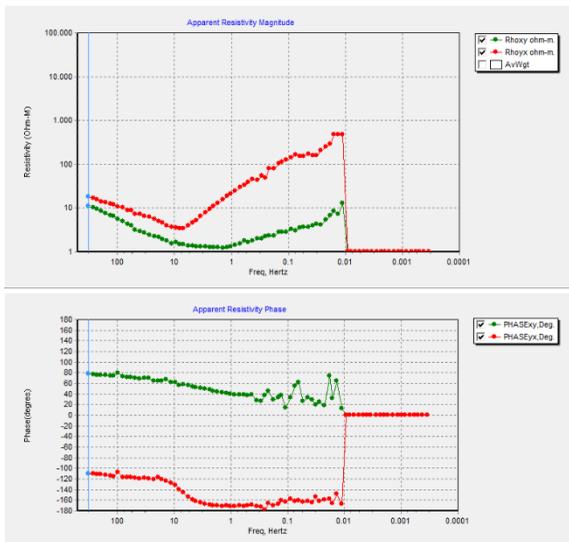
**Gambar B.42** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 81



**Gambar B.43** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 82

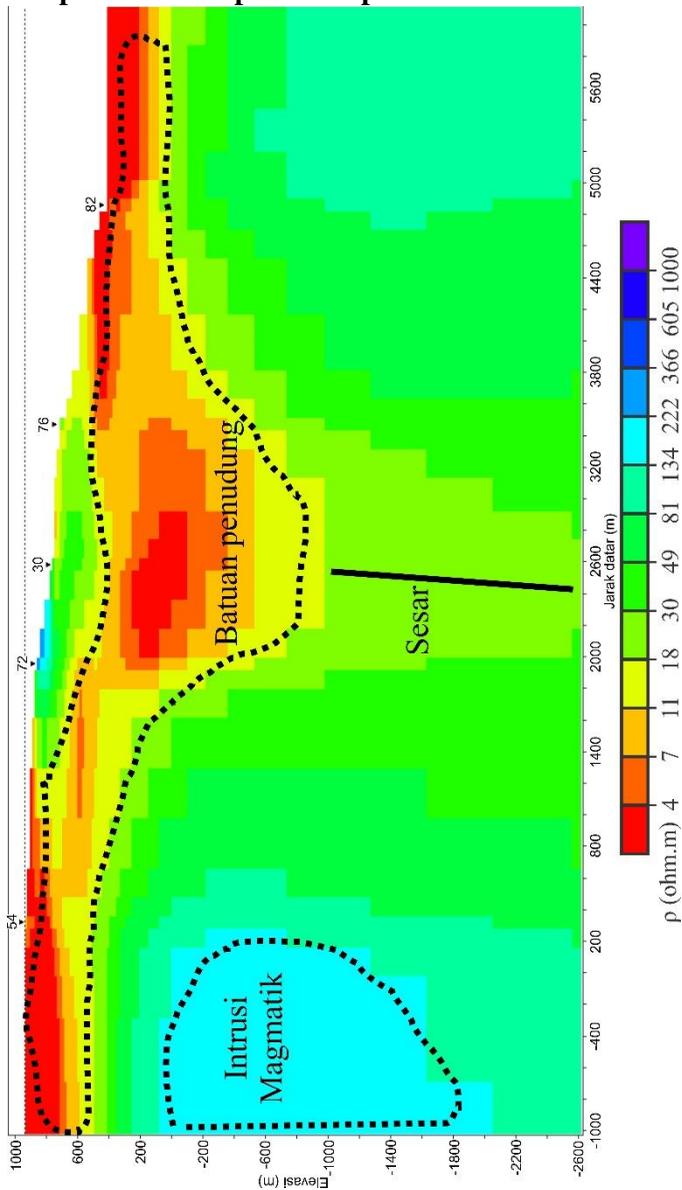


**Gambar B.44** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 83

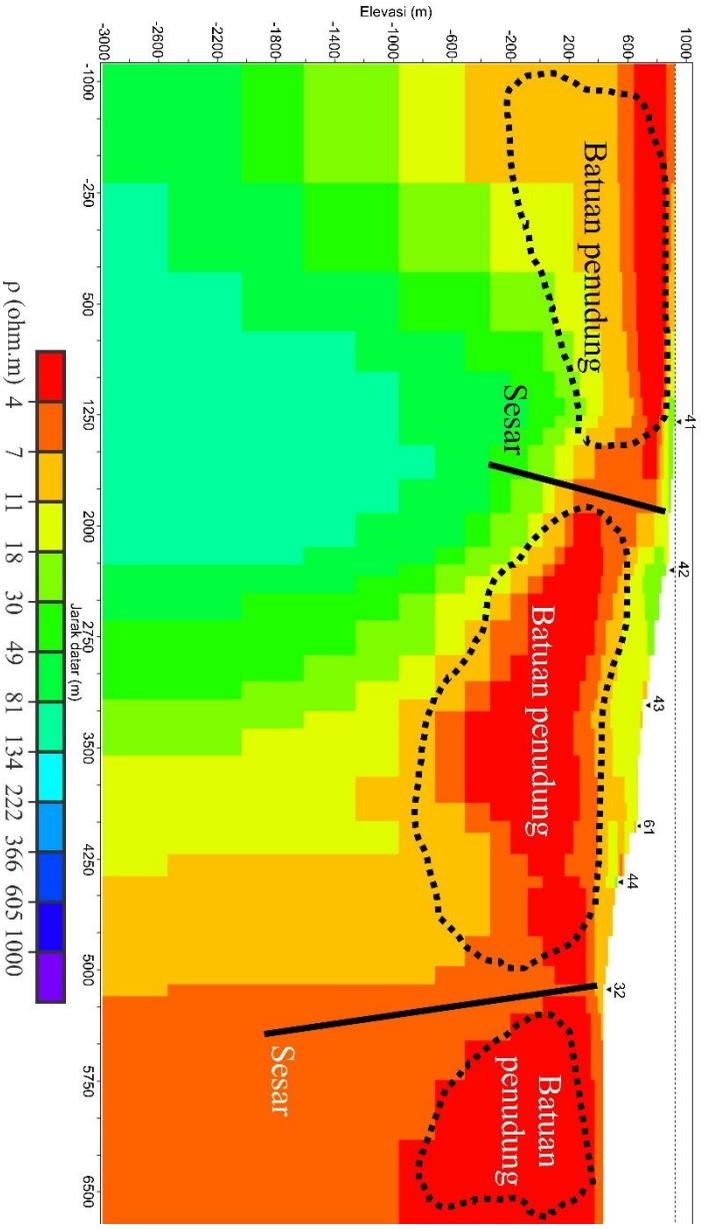


**Gambar B.45** Resistivitas semu (atas) dan fase (bawah) titik 84

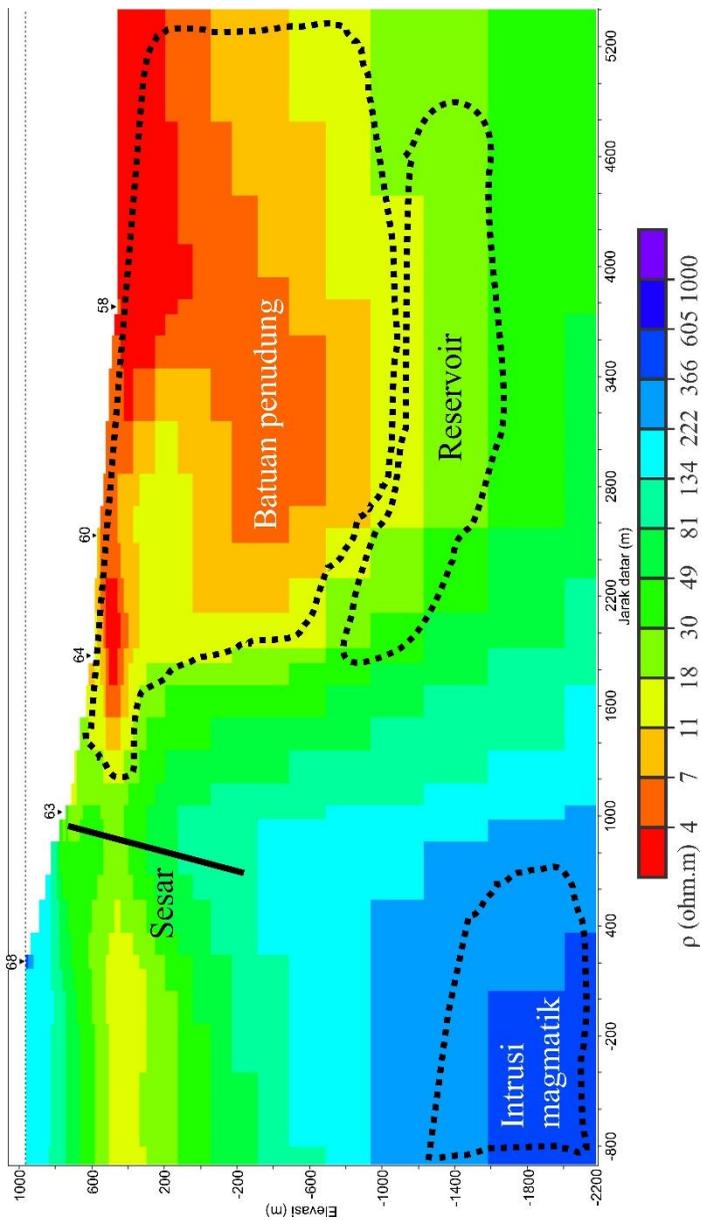
Lampiran C. Interpretasi tiap lintasan



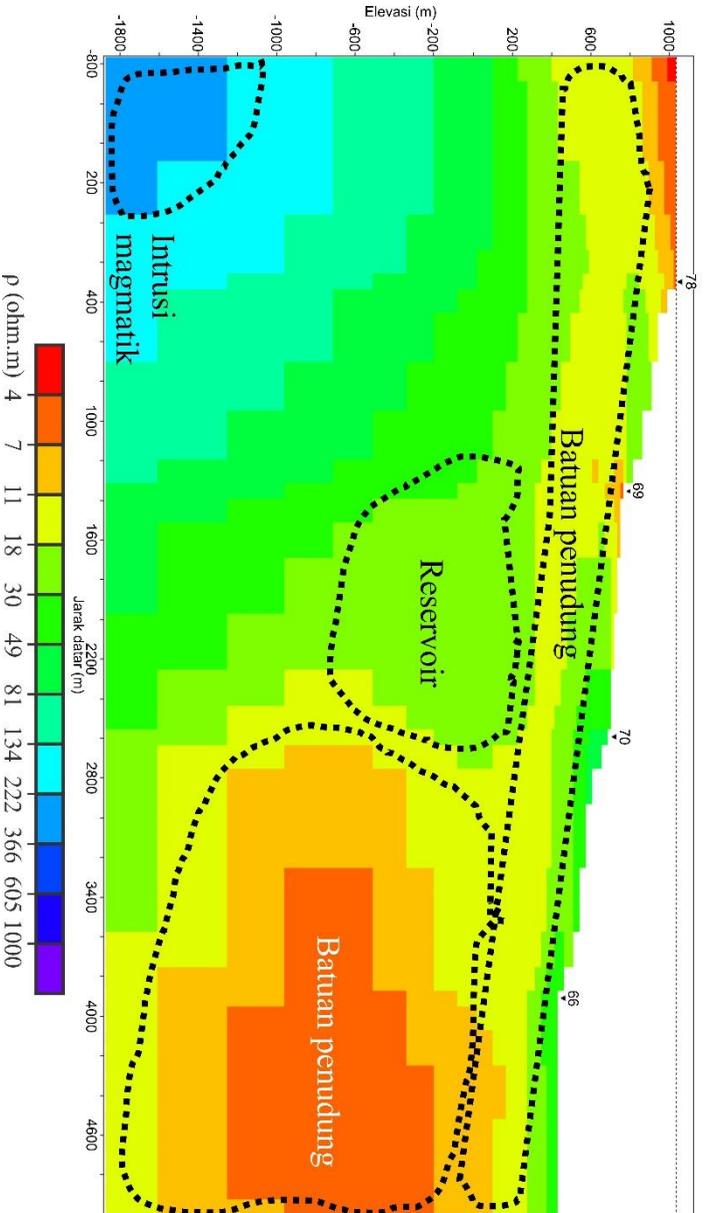
Gambar C.1 Interpretasi lintasan I



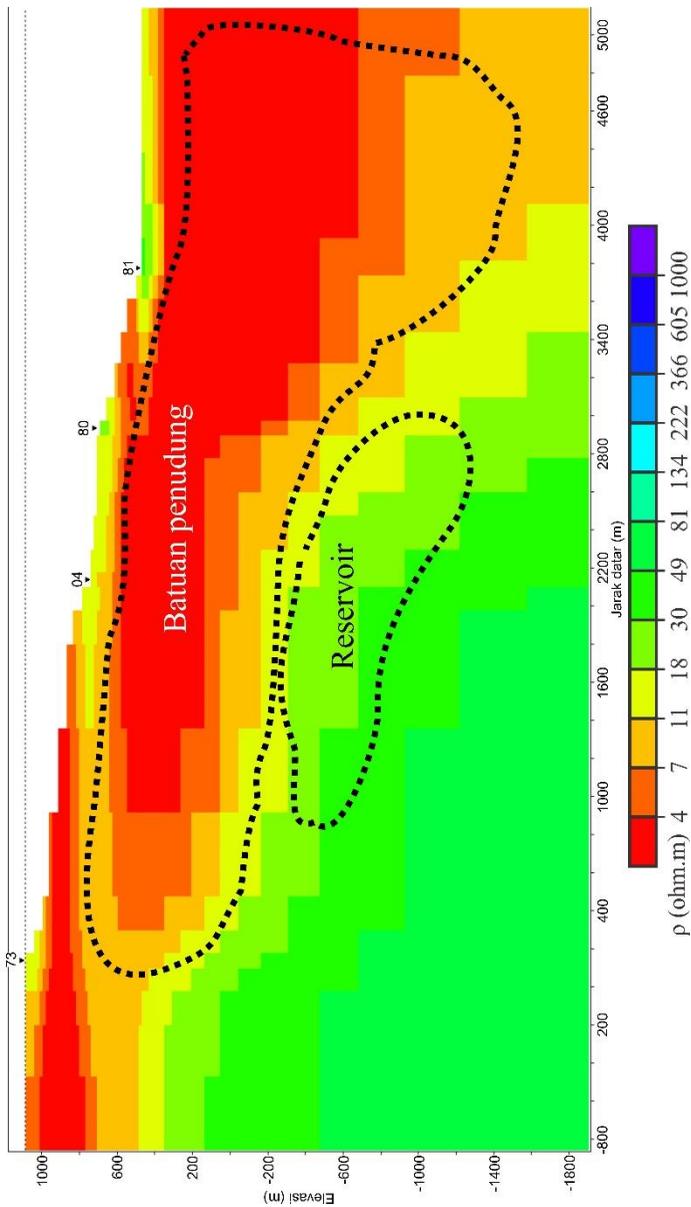
Gambar C.2 Interpretasi lintasan 2



**Gambar C.3** Interpretasi lintasan 4



Gambar C.4 Interpretasi lintasan 5



**Gambar C.5** Interpretasi lintasan 6

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap “Mohammad Istajarul Alim” dan biasa dipanggil Jarul. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang lahir di Madiun, pada tanggal 17 Maret 1997. Pendidikan formal yang ditempuh penulis yaitu di SDS Ulil Albab Mejayan (2003-2009), SMPN 1 Mejayan (2009-2012), SMAN 1 Mejayan (2012-2015) dan melanjutkan pendidikan sarjana di Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015.

Selama jenjang sarjana, penulis aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) *ITS Astronomy Club* sebagai wakil ketua umum dan *Student Chapter (SC) American Association of Petroleum Geologists ITS* sebagai kepala divisi relasi publikasi dan media. Selain itu, penulis juga sebagai asisten dosen dari Departemen Matematika untuk matakuliah Matematika 1 dan sebagai asisten laboratorium Fisika Dasar serta asisten laboratorium Fisika Madya.

Penulis pernah melakukan kegiatan kerja praktik di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Geoteknologi Bandung pada tahun 2018 tentang akuisisi dan pengolahan data magnetotelurik. Kemudian di tahun terakhir sarjana, penulis melakukan penelitian kembali mengenai pengolahan dan interpretasi data magnetotelurik untuk tugas akhir sarjana di Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas bumi (PSDBMP) Bandung pada tahun 2019.

Harapan penulis setelah melakukan penelitian ini yaitu perkembangan eksplorasi dan eksploitasi sumber daya panas bumi di Indonesia agar lebih cepat dan berbagai persoalan yang ada saat ini segera diselesaikan oleh pemerintahan maupun lembaga akademik terkait. Dan apabila ada yang perlu didiskusikan dengan penulis dapat menghubungi email [md\\_istajarul@yahoo.co.id](mailto:md_istajarul@yahoo.co.id).

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*