

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN PADA
LAPANGAN PANASBUMI X DENGAN MENGGUNAKAN
METODE AUDIO MAGNETOTELURIK DAN
MAGNETOTELURIK**

SKRIPSI

HALAMAN JUDUL

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika**

oleh :

CINANTYA NIRMALA DEWI

105090301111006



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

MALANG

2014

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN PADA LAPANGAN PANAS BUMI X DENGAN MENGGUNAKAN METODE AUDIO MAGNETOTELURIK DAN MAGNETOTELURIK

oleh:
CINANTYA NIRMALA DEWI
105090301111006

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal 15 Juli 2014
dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

Sukir Maryanto, Ph.D
NIP. 19710621.199802.1.001

Ir. Eddy Z. Gaffar, M.Sc
NIP. 19550120.198703.1.001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Adi Susilo, Ph.D
NIP. 19631227.199103.1.002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Cinantya Nirmala Dewi
NIM : 105090301111006
Jurusan : Fisika
Penulis skripsi berjudul :

**Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Pada Lapangan
Panasbumi X dengan Menggunakan Metode Audio
Magnetotelurik dan Magnetotelurik**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam daftar pustaka skripsi ini semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila dikemudian hari ternyata skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 15 Juli 2014
Yang menyatakan,

CINANTYA NIRMALA DEWI
NIM. 105090301111006

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

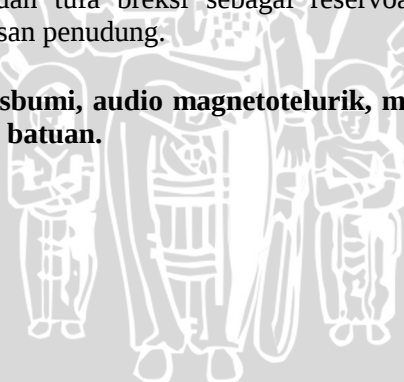
IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN PADA LAPANGAN PANASBUMI X DENGAN MENGGUNAKAN METODE AUDIO MAGNETOTELURIK DAN MAGNETOTELURIK

ABSTRAK

Penelitian geofisika dengan menggunakan metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik telah dilaksanakan di lapangan panasbumi X. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan dan menentukan sistem panasbumi di daerah penelitian. Daerah penelitian terdiri dari 3 lintasan dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 24 titik. Pengolahan data dilakukan hingga didapatkan peta kontur resistivitas.

Hasil pengolahan data 2D menunjukkan bahwa nilai resistivitas lapisan bawah permukaan pada ketiga lintasan berkisar 4 Ω .m hingga 16384 Ω .m. Struktur bawah permukaan pada lintasan 1, 2, dan 3 memiliki litologi batuan yang sama yaitu batuan alterasi, breksi, tufa breksi, lava andesit, andesit, dan basalt. Sistem panasbumi pada daerah penelitian tersusun atas batuan lava andesit dan basalt sebagai sumber panas, batuan tufa breksi sebagai reservoir, dan batuan alterasi sebagai lapisan penudung.

Kata kunci : Panasbumi, audio magnetotelurik, magnetotelurik, resistivitas, litologi batuan.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

IDENTIFICATION OF SUBSURFACE STRUCTURE IN X GEOTHERMAL FIELD BY USING AUDIO MAGNETOTELLURIC AND MAGNETOTELLURIC METHOD

ABSTRACT

Geophysical research using audio magnetotelluric and magnetotelluric method has been done in X geothermal field. The goal of this research are to identify the subsurface structure and determine the geothermal system. Research area consist of 3 measurement lines and the number of measurement points is 24 points.

Based on 2D modeling result, it can be shown that resistivity value at research area is about $4 \Omega.m$ - $16384 \Omega.m$. The litology of subsurface structure in all research area are similar, consist of altered rock, breccia, breccia tuff, andesite lava and basalt. Geothermal system in the research area consist of andesite lava and basalt as a heat source, breccias tuff as a reservoir, and altered rock as a caprock.

Keywords: Geothermal, audio magnetotelluric, magnetotelluric, resistivity, litology of rock.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran ALLAH SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN PADA LAPANGAN PANASBUMI X DENGAN MENGGUNAKAN METODE AUDIO MAGNETOTELURIK DAN MAGNETOTELURIK” dengan lancar dan baik.

Segala kesulitan dan hambatan yang terjadi di dalam penulisan skripsi ini dapat teratasi karena adanya bantuan dan dorongan dari berbagai pihak sehingga mendorong penulis untuk menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua, kakek-nenek, dan adik yang senantiasa selalu memberikan dukungan dan doa.
2. Bapak Sukir Maryanto, Ph.D dan Ir. Eddy Z. Gaffar, M.Sc, selaku pembimbing I dan pembimbing II atas waktu yang telah diluangkan untuk memberi bimbingan dan nasehat.
3. Seluruh bapak/ibu dosen Jurusan Fisika yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman kepada penulis.
4. Bapak Yayat Sudrajat, Bapak Dadan D Wardhana, Bapak Sri Indarto, Bapak Dani Hilman N, Ibu Ida, Ibu Yuli, Ibu Lina, Ibu Nina Rahmawati, Bapak Bambang, dan seluruh pegawai Geoteknologi LIPI atas bantuan, bimbingan, dan motivasi.
5. Teman-teman fisika 2010, yang selalu memberikan semangat dan kebersamaan yang indah.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini memiliki banyak kekurangan. Sehingga mengharapkan kritik dan saran untuk perbaikan.

Malang, 15 Juli 2014
Penulis

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN LEMBAR PENGESAHAN	iii
HALAMAN LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Daerah Penelitian	5
2.2. Magma	6
2.3. Panasbumi	8
2.4. Sistem Panasbumi di Indonesia	10
2.5. Metode Magnetotelurik	11
2.5.1. Sumber Sinyal Magnetotelurik	12
2.5.2. Prinsip Penjalaran Gelombang	13

2.5.3. Pemodelan Data Magnetotelurik	19
2.6. Sifat Kelistrikan Batuan	19
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.2. Data Penelitian	24
3.3. Peralatan Penelitian	24
3.4. Pengolahan Data	25
3.4.1. Data Mentah	25
3.4.2. Transformasi Fourier	27
3.4.3. <i>Robust Processing</i>	27
3.4.4. <i>Filtering Data</i>	27
3.4.5. Pemodelan 2D	30
3.4.6. Diagram Alir Pengolahan Data	30
3.5. Interpretasi	32
3.6. Diagram Alir Penelitian	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Hasil Pengolahan Data	33
4.2. Pembahasan	36
4.2.1. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 1	36
4.2.2. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 2	36
4.2.3. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 3	37
4.3. Sistem Panasbumi Pada Daerah Penelitian	41
4.4. Potensi Lapangan Panasbumi X	48
BAB V PENUTUP	51
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN 1	57

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Geologi daerah penelitian	6
Gambar 2.2. Penampang bumi yang tersusun atas inti dalam, inti luar, selubung, dan kerak bumi.	7
Gambar 2.3. Sistem panasbumi	9
Gambar 2.4. Proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi.....	13
Gambar 2.5. Ilustrasi dari <i>skin depth</i>	16
Gambar 2.6. Pemodelan konfigurasi magnetotelurik.....	18
Gambar 2.7. Kisaran nilai resistivitas material di bumi	21
Gambar 3.1. Peta lokasi penelitian	24
Gambar 3.2. Instrumen MTU	25
Gambar 3.3. Contoh data mentah hasil perekaman.....	26
Gambar 3.4. Kurva sebelum <i>filtering data</i>	28
Gambar 3.5. Kurva setelah <i>filtering data</i>	29
Gambar 3.6. Diagram alir pengolahan data	31
Gambar 3.7. Diagram alir penelitian	32
Gambar 4.1. Posisi lapangan panasbumi X terhadap lapangan panasbumi Y	33
Gambar 4.2. Peta kontur elevasi titik pengambilan data.....	35
Gambar 4.3. Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 1.....	38
Gambar 4.4. Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 2.....	39

Gambar 4.5.	Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 3.....	40
Gambar 4.6.	Dugaan sesar pada lintasan 1	44
Gambar 4.7.	Dugaan sesar pada lintasan 2	45
Gambar 4.8.	Dugaan sesar pada lintasan 3	46
Gambar 4.9.	Visualisasi 3D kontur resistivitas bawah permukaan.....	47
Gambar 4.10.	Perbandingan model konseptual sistem panasbumi (a) menurut literatur pada Dickson dan Fanelli (2004) dengan (b) hasil pengolahan data pada lapangan panasbumi X.....	49
Gambar L1.1.	Data titik 01	57
Gambar L1.2.	Data titik 02	58
Gambar L1.3.	Data titik 03	59
Gambar L1.4.	Data titik 04	60
Gambar L1.5.	Data titik 05	61
Gambar L1.6.	Data titik 06	62
Gambar L1.7.	Data titik 07	63
Gambar L1.8.	Data titik 08	64
Gambar L1.9.	Data titik 09	65
Gambar L1.10.	Data titik 10	66
Gambar L1.11.	Data titik 11	67
Gambar L1.12.	Data titik 12	68
Gambar L1.13.	Data titik 13	69
Gambar L1.14.	Data titik 14	70
Gambar L1.15.	Data titik 15	71
Gambar L1.16.	Data titik 16	72

Gambar L1.17. Data titik 17	73
Gambar L1.18. Data titik 18	74
Gambar L1.19. Data titik 19	75
Gambar L1.20. Data titik 20	76
Gambar L1.21. Data titik 21	77
Gambar L1.22. Data titik 22	78
Gambar L1.23. Data titik 23	79
Gambar L1.24. Data titik 24	80
Gambar L2.1. Konfigurasi akuisisi magnetotelurik	81
Gambar L2.2. Koil magnetik	81
Gambar L2.3. <i>Porous pot</i>	81



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1. Resistivitas dari beberapa batuan dan mineral	21
Tabel 2.2. Resistivitas beberapa batuan dan sedimen	22
Tabel 4.1. Nilai resistivitas pada lapangan panasbumi X	48
Tabel 4.2. Temperatur permukaan manifestasi lapangan panasbumi X.....	50



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Data.....	57
Lampiran 2. Dokumentasi Akuisisi Data.....	81

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan ekonomi dan perkembangan populasi maka kebutuhan akan energi juga mengalami peningkatan. Peningkatan kebutuhan akan energi menyebabkan eksploitasi sumber-sumber energi fosil juga semakin meningkat. Di sisi lain, ketersediaan sumber energi fosil juga semakin menipis mengingat sumber energi ini tidak dapat diperbaharui. Selain itu, permasalahan yang menjadi sorotan masyarakat internasional adalah pemakaian energi fosil oleh manusia telah menghasilkan emisi gas rumah kaca yang meningkatkan temperatur Bumi. Kesadaran masyarakat akan lingkungan semakin tinggi. Oleh karena itu, teknologi yang tidak ramah lingkungan akan ditinggalkan, sedangkan energi yang ramah terhadap lingkungan akan menjadi suatu pilihan untuk dikembangkan.

Menurut Tim Penyusun Buku Panasbumi Indonesia (TPBPI) (2004) secara geologis Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama yaitu lempeng Eropa-Asia, India-Australia dan Pasifik. Pertemuan tiga lempeng tersebut mengakibatkan proses terbentuknya gunung berapi di Indonesia. Pada jalur inilah yang kemudian muncul daerah barisan pegunungan atau yang lazimnya dikenal sebagai *ring of fire* (cincin gunungapi). Sebagai daerah vulkanik, Indonesia mempunyai potensi sekitar 40% dari seluruh cadangan dunia. Potensi energi panasbumi yang dimiliki Indonesia merupakan yang terbesar di dunia. Sayangnya, hingga saat ini Indonesia baru menghasilkan sebanyak 1.348 MWe tenaga listrik (total terpasang) panasbumi atau sekitar 4,71 % dari total potensi energi panasbumi yang dimiliki (Wirakusumah dkk, 2013).

Pemilihan panasbumi sebagai sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan semakin mempunyai peranan penting. Energi panasbumi adalah energi panas yang dipindahkan dari bagian dalam bumi. Energi tersebut dapat diambil dalam bentuk uap atau air panas (Utami, 1998). Sumber panasbumi yang ada di suatu daerah tertentu perlu diteliti untuk mengetahui sifat-sifat fisika dan kimia dari cadangan panasbumi yang dikandung oleh sumber. Dari proses karakterisasi ini dapat ditentukan kelayakan sumber

panasbumi yang dimaksud untuk keperluan eksplorasi lanjut dan eksploitasi (Gaffar, dkk, 2007).

Menurut Tim Kerja Pemulihan Kawasan Dieng (TKPKD) (2012), daerah penelitian merupakan kawasan vulkanik aktif yang memiliki potensi panasbumi. Daerah penelitian diinisialisasikan sebagai lapangan panasbumi X. Lapangan panasbumi X berada di dekat lapangan panasbumi Y yang telah dikelola menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTPB). Pada lapangan panasbumi X belum pernah dilakukan survei geofisika dengan menggunakan metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik. Terdapat kemungkinan bahwa lapangan panasbumi X dapat dijadikan sebagai daerah pengembangan dari lapangan panasbumi Y, apabila struktur bawah permukaan pada lapangan panasbumi X memiliki sistem panasbumi yang berpotensi untuk dieksplorasi.

Survei geofisika digunakan untuk melihat struktur bawah permukaan. Metode magnetotelurik merupakan metode pasif yang memanfaatkan sumber dari alam berupa gelombang elektromagnetik untuk mengetahui konduktivitas dari struktur bawah permukaan (Simpson dan Bahr, 2005). Teknik magnetotelurik merekam data dalam frekuensi 400 Hz hingga 0,0000129 Hz, sehingga cocok untuk investigasi bawah permukaan hingga mencapai kedalaman yang sangat dalam. Sementara itu, teknik audio magnetotelurik merekam data dalam frekuensi 1000 Hz hingga 10000 Hz, sehingga cocok untuk investigasi bawah permukaan hingga mencapai kedalaman yang dangkal (Roger, 2004). Perpaduan metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik mampu memberikan gambaran sistem panasbumi yang lebih detail dari permukaan hingga kedalaman tertentu. Berdasarkan uraian di atas, dilakukan penelitian dengan judul “Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Pada Lapangan Panasbumi X dengan Menggunakan Metode Audio Magnetotelurik dan Magnetotelurik”.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang dapat dirumuskan pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana struktur bawah permukaan pada lapangan panasbumi X?
2. Bagaimana model sistem panasbumi pada lapangan panasbumi X?

1.3. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal berikut :

1. Data audio magnetotelurik dan magnetotelurik yang digunakan merupakan data sekunder hasil akuisisi Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
2. Pengolahan data dilakukan hingga didapatkan peta kontur distribusi resistivitas bawah permukaan.
3. Struktur bawah permukaan yang dianalisis adalah komponen penyusun sistem panasbumi (sumber panas, reservoir, dan batuan penudung) berdasarkan distribusi resistivitas bawah permukaan hasil pengolahan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Mengidentifikasi struktur bawah permukaan pada daerah penelitian berdasarkan distribusi resistivitas bawah permukaan hasil pengolahan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik.
2. Membuat model sistem panasbumi daerah penelitian.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk menambah pengetahuan mengenai aplikasi metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik dalam menentukan karakteristik panasbumi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menambah basis data kepanasbumian di Indonesia sebagai acuan untuk eksplorasi lanjut pada daerah penelitian.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

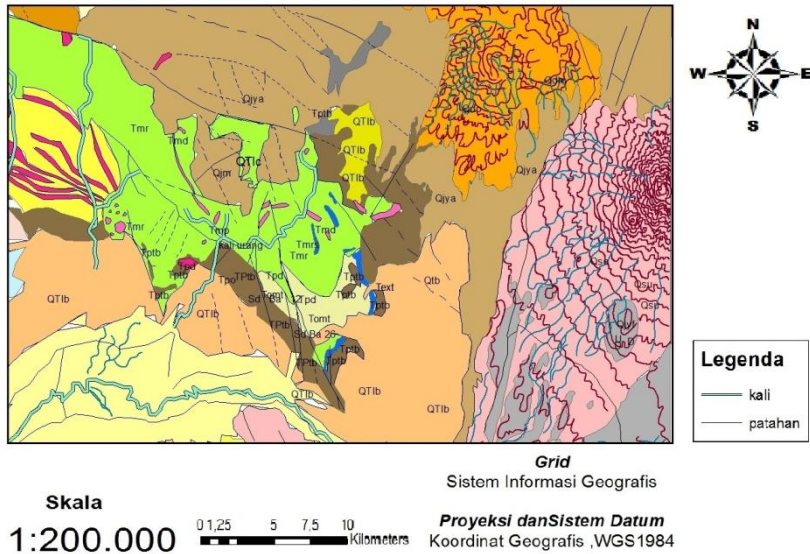
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Daerah Penelitian

Daerah penelitian adalah kawasan vulkanik aktif dan dapat dikatakan merupakan gunungapi raksasa dengan beberapa kepundan kawah. Daerah penelitian ini berasal dari gunungapi tua yang mengalami penurunan drastis (dislokasi) oleh patahan. Sebagai akibatnya, pada bagian yang amblas, muncul beberapa gunung kecil. Sejak tahun 1600, kegiatan gunungapi di daerah penelitian tidak memperlihatkan adanya letusan magmatik, tetapi lebih didominasi oleh aktivitas letusan freatik atau hidrotermal, sebagaimana diperlihatkan oleh beberapa aktivitas yang telah diperlihatkan dalam sejarah letusan (TKPKD, 2012).

Daerah penelitian merupakan sebuah piring gunungapi yang di sekelilingnya muncul gunungapi muda dan plato yang merupakan dasar kawah kaldera. Morfologi daerah penelitian dapat dibagi menjadi dua satuan, yaitu satuan dataran dan satuan pegunungan. Pada satuan dataran terbentuk pada ketinggian 2000 mdpl dan memiliki litologi berupa endapan lahar dan tanah hasil lapukan batuan lempung-pasir tufaan. Pada satuan pegunungan dibagi menjadi tiga, yaitu pegunungan sangat terjal, pegunungan terjal dan pegunungan agak terjal. Pembagian satuan morfologi tersebut berdasarkan atas pengukuran lereng

Secara geologi regional, menurut Sukhyar dan Effendi (1986) daerah komplek gunungapi di daerah penelitian ditutupi oleh endapan berumur kuartar, berupa aliran lava, piroklastik, endapan freatik, endapan lahar, endapan permukaan, dan hasil erupsi. Daerah penelitian merupakan kawasan potensial untuk panasbumi. UNESCO menetapkan daerah penelitian merupakan salah satu sumber panasbumi yang memiliki prospek sangat bagus di Indonesia (TKPKD, 2012). Beberapa contoh manifestasi panasbumi yang muncul di permukaan pada daerah penelitian yakni mataair panas, fumarol, solfatara, *mudpool* dan *hot lake*.



Gambar 2.1. Geologi daerah penelitian

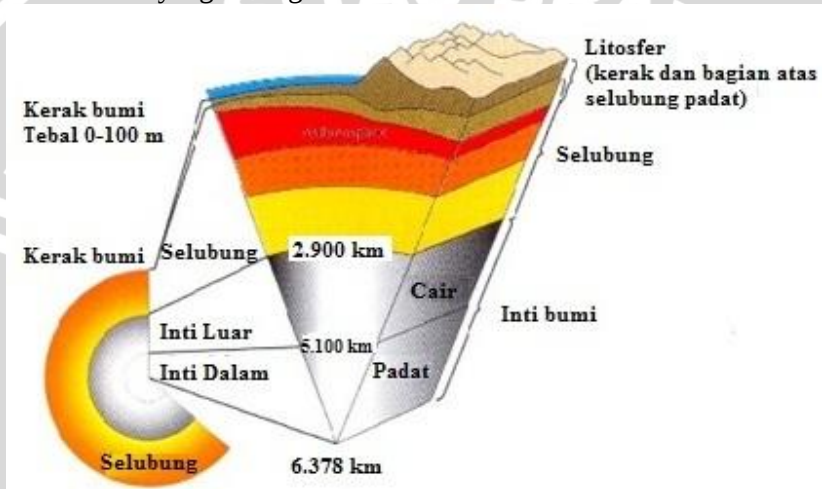
2.2. Magma

Sumber energi panasbumi sangat tergantung dari kehadiran intrusi magma. Magma adalah lelehan massa batuan yang bercampur dengan gas terlarut bertemperatur sangat tinggi. Adanya gunungapi menandakan di wilayah itu banyak terdapat intrusi magma. Itulah sebabnya lokasi sumber energi panasbumi selalu berada di sekitar gunungapi (Suparno, 2009).

Magma diyakini terbentuk pada selubung bagian atas sampai dengan kerak bumi (Gambar 2.2). Asal-usul magma berkaitan dengan sumber panas yang ada di dalam bumi. Bronto (2010) menguraikan beberapa pendapat tentang asal-usul magma yaitu :

1. Sebagai hasil disintegrasi unsur-unsur radioaktif.
2. Meleburnya batuan sebagai akibat gesekan deformasi. Hal ini dibuktikan dengan terjadinya magma granit dari batuan malihan.
3. Penujaman lempeng kerak bumi ke dalam selubung bumi. Berdasarkan teori tektonik lempeng, terdapat bagian lempeng kerak bumi yang menujam hingga mencapai selubung bumi. Kerak bumi yang menujam akan melebur menjadi magma karena tekanan yang besar dan suhu yang tinggi di lingkungan selubung bumi.

4. Pencairan bahan selubung bumi akibat penambahan H_2O yang berasal dari sedimen laut dan alterasi batuan gunungapi, bersama-sama dengan lempeng kerak bumi menujam ke dalam selubung bumi.
5. Pembubungan selubung bumi (*upwelling mantle* atau *plumbing mantle*). Dalam hal ini sebagai akibat tertentu (gerak-gerak dinamika bumi), bahan selubung bumi meleleh, kemudian membubung naik secara diapiris atau seperti gelembung udara di dalam air yang sedang naik.



Gambar 2.2. Penampang bumi yang tersusun atas inti dalam, inti luar, selubung, dan kerak bumi (Bronto, 2010).

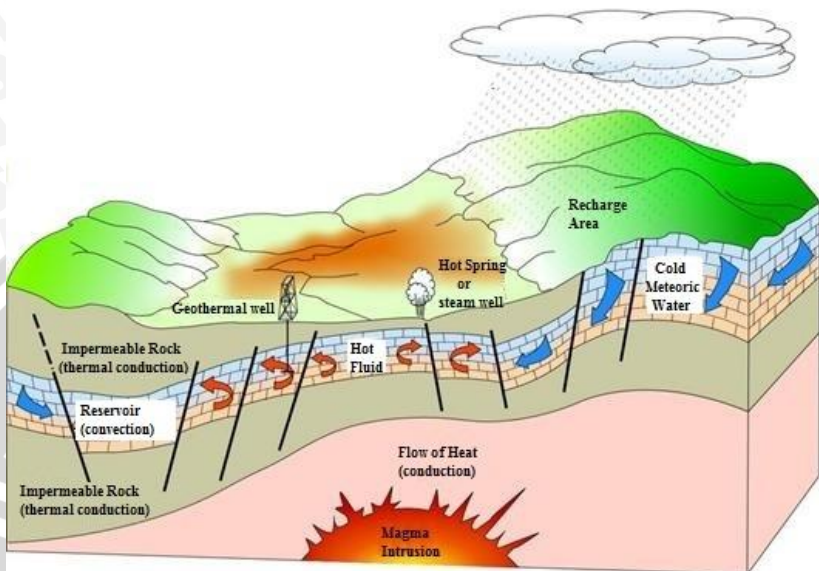
Pendapat lama mengenai pembentukan magma sebagai hasil warisan panasbumi semula dan sebagai akibat adanya gradien panasbumi sudah tidak diterima lagi oleh para ahli. Hal itu disebabkan pertama, bahwa pembentukan magma berasal dari selubung dan kerak bumi yang tidak berhubungan langsung dengan inti bumi. Kedua, berdasarkan gradien panasbumi, terjadi kenaikan temperatur bumi sebanyak 3°C untuk setiap penurunan kedalamannya 100 m. Sehingga secara teori inti bumi mempunyai temperatur 193060°C , namun hasil penyelidikan menunjukkan bahwa temperatur di dalam inti bumi hanya berkisar 3500°C - 4000°C (Bronto, 2010).

2.3. Panasbumi

Panasbumi adalah sebuah sumber energi panas yang terdapat dan terbentuk pada kerak bumi. Sumber energi panas terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panasbumi dan untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan (Broto dan Thomas, 2011).

Panasbumi membentuk suatu sistem tertentu yang disebut dengan sistem panasbumi, seperti yang terlihat pada Gambar 2.3. Sistem panasbumi adalah energi yang tersimpan dalam bentuk air panas atau uap pada kondisi geologi tertentu pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Pembentukan sistem panasbumi dikontrol oleh proses geologi yang telah ada dan yang sedang berlangsung di sepanjang jalur gunungapi. Proses pengangkatan juga mengakibatkan terbentuknya struktur-struktur patahan di sepanjang jalur tersebut (Kusumawardhani, 2007).

Sumber energi panasbumi berasal dari magma yang berada di dalam bumi yang berperan seperti kompor yang menyala. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduksi pada batuan disekitarnya. Panas tersebut juga mengakibatkan aliran konveksi fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan. Kemudian fluida hidrotermal ini akan bergerak ke atas melalui rekahan-rekahan yang memungkinkan uap dan air panas mengalir ke permukaan, tetapi fluida hidrotermal tidak sampai ke permukaan karena tertahan oleh lapisan batuan yang bersifat *impermeable*. Lokasi tempat terakumulasinya fluida hidrotermal disebut reservoir panasbumi. Agar panas tidak hilang ke permukaan maka reservoir ditutupi oleh lapisan batuan yang solid atau *impermeable* sebagai lapisan penutup (*cap rock*) (Mardiana, 2007).



Gambar 2.3. Sistem panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004)

Berdasarkan fluida yang terkandung di dalam reservoir, menurut Utami (1998) sistem panasbumi dapat dikelompokkan menjadi tiga, yakni sistem dominan uap, sistem air panas, dan sistem dua fasa.

1. Sistem dominasi uap merupakan sistem yang sangat jarang dijumpai dimana reservoir panasbuminya mempunyai kandungan fasa uap yang lebih dominan dibandingkan dengan fasa airnya. Rekahan umumnya terisi oleh uap dan pori-pori batuan masih menyimpan air. Reservoir air panasnya umumnya terletak jauh di kedalaman di bawah reservoir dominasi uapnya.
2. Sistem dominasi air merupakan sistem panasbumi yang umum terdapat di dunia di mana reservoirnya mempunyai kandungan air yang sangat dominan. Dibandingkan dengan temperatur reservoir minyak, temperatur reservoir panasbumi relatif sangat tinggi, bisa mencapai 350°C (Saptadji, 2002).
3. Sistem dua fasa merupakan sistem dengan kandungan fluida di dalam reservoir yang terdiri atas dua fasa yaitu uap dan air dengan proporsi yang bervariasi (Utami 1998).

Sementara itu, berdasarkan pada besarnya temperatur, Hochstein (1982) membedakan sistem panasbumi menjadi tiga, yaitu

sistem panasbumi bertemperatur rendah, sistem panasbumi bertemperatur sedang, dan sistem panasbumi bertemperatur tinggi.

1. Sistem panasbumi bertemperatur rendah, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur lebih kecil dari 125°C.
2. Sistem panasbumi bertemperatur sedang, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida bertemperatur antara 125°C hingga 225°C.
3. Sistem panasbumi bertemperatur tinggi, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur di atas 225°C.

2.4. Sistem Panasbumi di Indonesia

Pada umumnya sistem panasbumi di Indonesia merupakan sistem hidrotermal yang mempunyai temperatur tinggi ($> 225^{\circ}\text{C}$), hanya beberapa diantaranya yang mempunyai temperatur sedang ($150\text{-}225^{\circ}\text{C}$). Sistem panasbumi jenis hidrotermal terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi. Perambatan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perambatan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung. Akibat gaya gravitasi air akan selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke bawah, tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi atau arus konveksi (Susanti, 2011).

Berdasarkan asosiasi terhadap tatanan geologi, sistem panasbumi di Indonesia dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu sistem panasbumi vulkanik, vulkano-tektonik, dan non vulkanik (Kasbani, 2009).

1. Sistem panasbumi vulkanik merupakan sistem panasbumi yang berasosiasi dengan gunungapi kuarter yang umumnya terletak pada busur vulkanik yang memanjang dari Sumatra, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara, sebagian Maluku dan Sulawesi Utara. Pembentukan sistem panasbumi ini biasanya tersusun oleh batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam dan umumnya memiliki karakteristik reservoir $\pm 1,5$ km dengan temperatur reservoir tinggi ($\sim 250 - \leq 370^{\circ}\text{C}$). Pada daerah vulkanik aktif

biasanya memiliki umur batuan yang relatif muda dengan kondisi temperatur yang sangat tinggi dan kandungan gas magmatik besar.

2. Sistem panasbumi vulkano-tektonik merupakan sistem yang berasosiasi antara graben dan kerucut vulkanik, umumnya ditemukan di daerah Sumatera pada jalur sistem sesar Sumatera (Sesar Semangko).
3. Sistem panasbumi non vulkanik merupakan sistem panasbumi yang tidak berkaitan langsung dengan vulkanisme dan umumnya berada di luar jalur vulkanik Kuarter. Lingkungan non vulkanik di Indonesia bagian barat pada umumnya tersebar di bagian timur Sunda *land* (paparan Sunda) karena pada daerah tersebut didominasi oleh batuan yang merupakan penyusun kerak benua Asia seperti batuan metamorf dan sedimen. Di Indonesia bagian timur lingkungan non vulkanik berada di daerah lengan dan kaki Sulawesi serta daerah Kepulauan Maluku hingga Irian didominasi oleh batuan *granitic*, *metamorf* dan sedimen laut.

Menurut Boedihardi, dkk (1991) prospek panasbumi di Indonesia terletak pada jalur gunungapi yang memiliki temperatur yang cukup tinggi yang berkaitan dengan gunungapi muda. Prospek panasbumi yang berkaitan dengan gunungapi aktif saat ini umumnya memiliki temperatur tinggi dan kandungan gas magmatik yang cukup besar serta permeabilitas bawah permukaan yang relatif kecil. Sementara itu, prospek panasbumi yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik kuarter dengan permeabilitas reservoir yang lebih besar diakibatkan oleh perkembangan struktur geologi yang telah matang (*mature*).

2.5. Metode Magnetotelurik

Magnetotelurik adalah metode geofisika pasif. Metode magnetotelurik adalah metode sounding elektromagnetik (EM) dengan mengukur secara pasif komponen medan listrik ($\vec{E}$) dan medan magnet alam ($\vec{H}$) yang berubah terhadap waktu. Perbandingan antara medan listrik dengan medan magnet yang saling tegak lurus disebut impedansi yang merupakan sifat kelistrikan suatu medium seperti konduktivitas dan resistivitas. Kurva sounding yang dihasilkan dari metode magnetotelurik merupakan kurva resistivitas semu terhadap frekuensi yang menggambarkan variasi konduktivitas listrik terhadap kedalaman. Magnetotelurik adalah satu-satunya

teknik elektromagnetik yang mampu menghasilkan pencitraan untuk kedalaman lebih dari 10 km (Unsworth, 1999).

2.5.1. Sumber Sinyal Magnetotelurik

Pada metode magnetotelurik, medan magnetik yang terukur di permukaan bumi merupakan sumber sinyal alami yang berasal dari dalam maupun luar bumi dengan rentang frekuensi yang bervariasi. Komponen medan magnetik yang berasal dari dalam bumi disebabkan oleh arus konveksi serta medan-medan magnet yang berada di kerak bumi. Sementara itu, komponen sumber medan magnet yang berasal dari luar bumi berasal dari medan magnet yang dihasilkan di atmosfer dan magnetosfer. Kedua sumber medan magnetik tersebut mempunyai nilai yang bervariasi terhadap waktu yang memungkinkan dapat menghasilkan sumber sinyal elektromagnetik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber sinyal magnetotelurik. Akan tetapi, sumber sinyal yang berasal dari dalam bumi mempunyai variasi yang sangat kecil dan frekuensi yang sangat rendah sehingga sumber sinyal yang digunakan dalam metode magnetotelurik hanya sumber sinyal yang berasal dari komponen luar bumi karena mempunyai rentang frekuensi di atas dan di bawah 1 Hz (Unsworth, 1999).

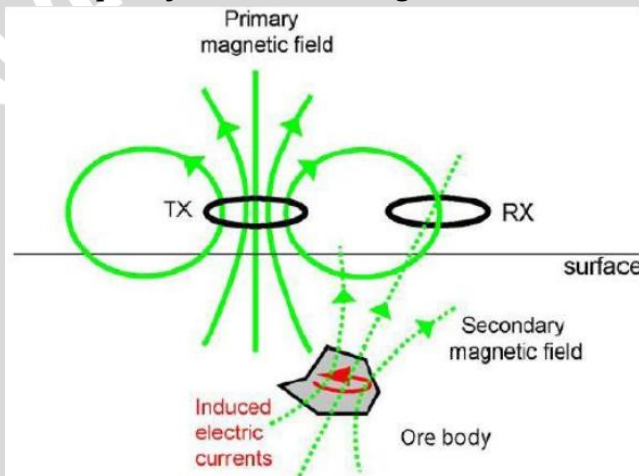
Sebagian besar sumber sinyal yang berfrekuensi tinggi (diatas 1 Hz) berasal dari kilat. Kilat terjadi di ionosfer pada seluruh bagian bumi, kemudian akan menjalar hingga permukaan bumi. Pada saat kilat ini mencapai permukaan bumi, dengan seketika itu pula medan magnet bumi mengalami perubahan. Apabila kilat ini mencapai permukaan bumi berulang kali maka medan magnet di bumi akan mengalami perubahan secara terus-menerus. Hal tersebut akan menghasilkan fluks magnet yang selanjutnya fluks magnet ini akan menginduksi arus listrik di bawah permukaan bumi serta menghasilkan medan magnet sekunder yang kemudian terekam pada alat magnetotelurik (Vozoff, 1991).

Sumber sinyal yang memiliki frekuensi rendah (dibawah 1 Hz) dihasilkan melalui perubahan atau fluktuasi medan magnetik bumi yang disebabkan perubahan intensitas pada magnetosfer akibat fenomena alam yang disebut badai matahari. Magnetosfer adalah zona plasma kompleks, yang terus-menerus diterpa badai matahari (Vozoff, 1991).

Sumber sinyal *noise* pada metode magnetotelurik dapat berupa sumber *noise* alami maupun buatan. *Noise* alami disebabkan akibat

aktivitas dari *solar wind*. Pada frekuensi 0.5 sampai 5 Hz sinyal elektromagnetik alami yang digunakan sebagai sumber sinyal magnetotelurik mengalami pelemahan amplitudo yang akan melemahkan sinyal yang akan digunakan (Castells, 2006). Sementara itu, *noise* buatan merupakan sumber-sumber *noise* yang berasal dari sumber-sumber medan listrik atau magnet yang berasal dari lingkungan sekitar seperti jaringan listrik, alat elektronik, tegangan tinggi, atau *ground motion* (pergerakan tanah akibat aktivitas di lingkungan sekitar) (Gamble dkk, 1979).

2.5.2. Prinsip Penjalaran Gelombang



Gambar 2.4. Proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi (Unsworth, 2008 dalam Kadir, 2011)

Gambar 2.4 memperlihatkan proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi. Sumber-sumber medan magnet baik frekuensi tinggi maupun frekuensi rendah masuk ke dalam bumi sebagai bidang konduktor. Pada saat medan magnet merambat melalui bidang konduktor maka akan terjadi induksi yang menghasilkan arus yang disebut *eddie current*. Arus yang berputar pada saat melalui bidang konduktor akan menghasilkan medan magnet sekunder. Sumber medan magnet yang masuk ke dalam bumi atau *primary magnetic field* disimbolkan dengan Tx sedangkan *secondary magnetic field* yang dihasilkan dari *eddie current* disimbolkan dengan Rx (Unsworth, 1999).

Perilaku elektromagnetik dari medium umumnya dinyatakan dalam tiga parameter, yaitu konduktivitas listrik, konstanta dielektrik, dan permeabilitas magnetik. Konduktivitas listrik (σ), konstanta dielektrik (ϵ) dan permeabilitas magnetik (μ) masing-masing menggambarkan sifat konduktif, kapasitif dan induktif dari material. Untuk bahan isotropik linear, besaran ini didefinisikan oleh hubungan berikut (Xiao, 2004) :

$$J = \sigma E \quad (2.1)$$

$$D = \epsilon E \quad (2.2)$$

$$B = \mu H \quad (2.3)$$

dimana :

J = rapat arus listrik (A/m^2)

E = kuat medan listrik (V/m)

D = perpindahan listrik (C/m^2)

B = rapat fluks magnet (Wb/m^2)

H = kuat medan magnet (A/m)

Untuk memahami metode magnetotelurik, perlu diperhatikan prinsip gelombang datar yang datang di permukaan bumi. Resistivitas bumi lebih rendah dari atmosfer, sehingga sinyal elektromagnetik menjalar sebagai gelombang pada udara dan berdifusi di dalam bumi. Persamaan diferensial yang mendasar untuk menjelaskan perilaku gelombang elektromagnetik diformulasikan pada persamaan Maxwell :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

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

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma E + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.7)$$

dimana :

ρ = rapat muatan (C/m^3)

σ = konduktivitas (S/m)

ϵ = konstanta dielektrik (F/m).

Karena $J = \sigma E$ dan $B = \mu H$, maka persamaan 2.1. dan 2.3. dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

dimana :

μ = permeabilitas magnetik (H/m)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.8 pada curl dari persamaan 2.6, maka dapat diperoleh persamaan diferensial orde kedua untuk $\vec{E}$ yakni :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Pada kasus lingkungan dielektrik terdapat arus konduksi kecil dan *displacement current* mendominasi, sehingga persamaan 2.9 dapat disederhanakan menjadi persamaan gelombang sebagai berikut :

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.10)$$

Pada kasus lingkungan yang konduktif, arus konduksi mendominasi dan efek dari *displacement current* dapat diabaikan. Oleh karena itu, persamaan 2.9 dapat disederhanakan untuk menghasilkan persamaan difusi :

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

Bumi dapat diinterpretasikan sebagai lingkungan konduktif, jadi persamaan difusi dapat digunakan pada analisa data magnetotelurik. Untuk sebuah gelombang elektromagnetik sinusoidal yang bervariasi terhadap waktu, kuat medan listrik dapat dituliskan sebagai $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t}$, sehingga apabila disubstitusikan ke dalam persamaan 2.11 akan menghasilkan persamaan :

$$\nabla^2 \vec{E} + i\omega\mu\sigma \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

Energi elektromagnetik dapat bertransformasi menjadi panas seiring dengan perambatannya pada kedalaman tertentu. Pengurangan energi elektromagnetik ini terjadi secara eksponensial. Dengan memperhitungkan fenomena yang disebut atenuasi tersebut maka persamaan 2.12 dapat diubah menjadi :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + i\omega\mu\sigma \vec{E} = 0 \quad (2.13)$$

Dengan $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{ikz}$, dimana $\vec{E}_0$ adalah adalah kuat medan listrik pada permukaan bumi maka akan didapatkan persamaan lain yang merupakan modifikasi dari persamaan 2.13 menjadi :

$$\vec{E} k^2 + i\omega\mu\sigma \vec{E} = 0 \quad (2.14)$$

Penyelesaian dari variabel k sendiri adalah

$$k = \pm(1 - i) \sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.15)$$

nilai k merupakan suatu bilangan kompleks yang menyatakan kondisi dari suatu medium. Jadi perambatan gelombang

elektromagnetik di dalam medium dapat dituliskan dengan persamaan :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} e^{i\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} \quad (2.16)$$

Pada persamaan 2.16, $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z}$ merupakan simbol peluruhan dari amplitudo pada saat gelombang pada arah z yang dikenal dengan istilah *skin depth*. *Skin depth* (δ) merupakan jarak sepanjang kuat medan listrik teratenuasi oleh $1/e$ dari kuat medan listrik awal.

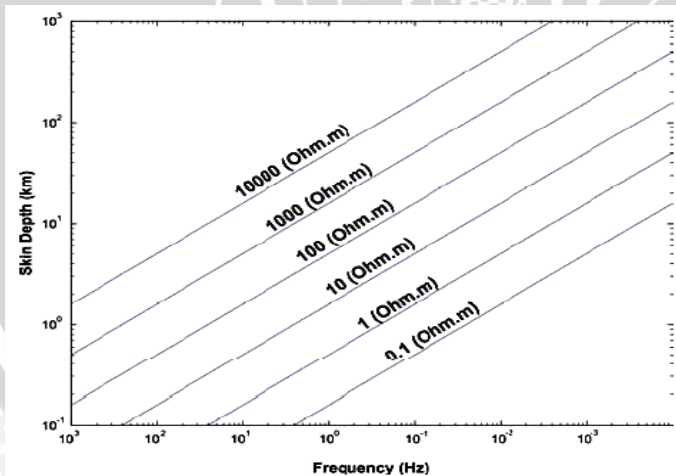
Selama nilai $e^{-\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}}z} = e^{-1}$ maka *skin depth* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.17)$$

atau dapat pula dinyatakan bahwa :

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 menunjukkan bahwa *skin depth* bergantung pada dua parameter yaitu resistivitas dari medium dan frekuensi gelombang. *Skin depth* menurun dengan menurunnya resistivitas dan meningkatkan frekuensi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Ilustrasi dari *skin depth* yang menunjukkan hubungan antara frekuensi MT dan resistivitas medium pada daerah survei (Simpson dan Bahr, 2005)

Kuat medan magnet dari gelombang elektromagnetik sinusoidal yang bervariasi terhadap waktu dapat dinyatakan sebagai $H = H_o e^{-i\omega t}$, sehingga dari persamaan 2.6. akan didapatkan :

$$H = \frac{1}{i\omega\mu_o} \nabla \times E \quad (2.19)$$

Oleh karena itu, perbandingan antara medan listrik dan medan magnet di bumi adalah sebagai berikut :

$$E_x = E_o e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (2.20)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_o} E_o e^{-i\omega t} e^{kz} \quad (2.21)$$

dengan medan listrik (E_x) tegak lurus terhadap medan magnet (H_y).

Untuk mendapatkan informasi mengenai resistivitas semu bumi pada permukaan ($z = 0$) digunakan rasio antara medan listrik dengan medan magnet yang disebut sebagai impedansi (Z) yang dengan persamaan :

$$Z = \frac{E}{H} \quad (2.22)$$

Dari persamaan (2.20) dan (2.21), maka impedansi Z_{xy} dapat dinyatakan sebagai :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu_o\rho} \quad (2.23)$$

Berdasarkan impedansi Z_{xy} pada persamaan 2.23, maka dapat diperoleh *apparent resistivity* yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_o} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.24)$$

dengan fase (φ) :

$$\varphi_{xy} = \arg(Z_{xy}) \quad (2.25)$$

dimana frekuensi sudut $\omega = 2\pi f$. Sehingga dapat dikatakan bahwa resistivitas semu bergantung pada rasio komponen medan listrik dan magnetik. Jadi amplitudo absolut dari insiden gelombang elektromagnetik tidak mempengaruhi, sehingga pengukuran pada waktu yang berbeda dapat dikombinasikan untuk memperkirakan impedansi dalam domain frekuensi (Xiao, 2004).

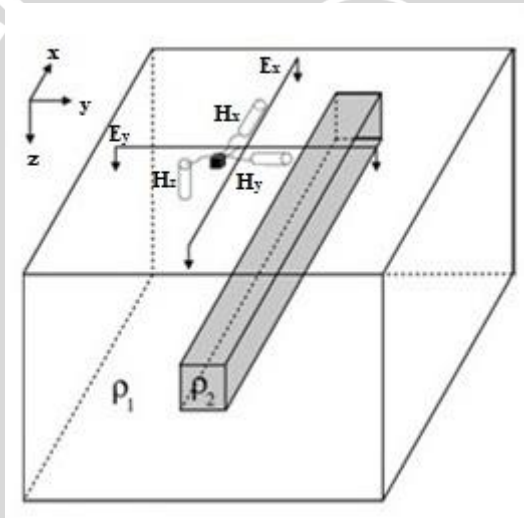
Pada kasus 1 dimensi, nilai yang sama akan diperoleh untuk $Z_{xy}(\omega)$ dan $Z_{yx}(\omega)$, terlepas dari orientasi medan listrik dan medan magnet yang diukur asalkan keduanya ortogonal. Akan tetapi untuk kasus Bumi secara 2 dimensi nilai $Z_{xy}(\omega)$ dan $Z_{yx}(\omega)$ akan bervariasi terhadap perubahan azimuth sumbu x. Secara matematis hal ini dapat dinyatakan dengan menuliskan impedansi sebagai tensor 2x2, seperti pada persamaan 2.26 (Irwan, 2012).

$$\begin{pmatrix} E_x & (\omega) \\ E_y & (\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x & (\omega) \\ H_y & (\omega) \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Gambar. 2.5 menunjukkan konfigurasi dasar untuk akuisisi data MT di lapangan. E_x dan E_y adalah dipol yang mengukur medan listrik dan H_x , H_y dan H_z adalah komponen medan magnet yang diukur dengan kumparan induksi pada magnetotelurik. Karena terdapat dua komponen utama impedansi, persamaan resistivitas semu yang berbeda dapat diturunkan seperti berikut :

$$\rho_{xy}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}(\omega)|^2 \quad (2.27)$$

$$\rho_{yx}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}(\omega)|^2 \quad (2.28)$$



Gambar 2.6. Pemodelan konfigurasi magnetotelurik ($\rho_2 < \rho_1$)
(Irwan, 2012)

Resistivitas semu, ρ_{xy} , merupakan rata-rata volume resistivitas bumi dari belahan bumi dengan radius sama dengan *skin depth*. Sementara itu, fase φ_{xy} mencerminkan perbedaan fasa antara komponen medan listrik dan medan magnet. Resistivitas semu dan fase adalah dua parameter utama yang digunakan untuk mendapatkan informasi resistivitas struktur dari data pengukuran. Dengan menghitung resistivitas semu sebagai fungsi frekuensi, variasi resistivitas dengan kedalaman dapat ditentukan (Vozoff, 1991).

2.5.3. Pemodelan Data Magnetotelurik

Pada pemodelan data magnetotelurik, digunakan proses inversi. Inversi adalah proses pencarian model dari data yang diperoleh. Jika diasumsikan m sebagai model, F sebagai fungsi keadaan, serta d' adalah data yang diperoleh sesuai dengan model yang dibuat, maka dapat ditulis :

$$d' = F m \quad (2.29)$$

Persamaan 2.29 digunakan untuk mencari data jika model telah diketahui (*forward modeling*). Namun, jika ingin mendapatkan model (m) dari data yang telah dimiliki (d), maka dilakukan proses inversi menggunakan persamaan berikut :

$$m = d F^{-1} \quad (2.30)$$

Pada proses inversi, dilakukan pula proses *smoothing* terhadap kurva resistivitas. Nilai resistivitas (ρ^{data}) dan fase (φ^{data}) akan di *smoothing* sehingga menghasilkan nilai resistivitas (ρ^{smooth}) dan fase (φ^{smooth}) yang baru. Namun model yang dihasilkan akan tetap mengacu pada data. Selisih yang ada karena perbedaan nilai model dengan data sebenarnya dihitung sebagai *root mean square (rms) error* (Nuqramadha, 2011).

2.6. Sifat Kelistrikan Batuan

Aliran listrik di dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik dan konduksi secara dielektrik (Telford dkk, 1990).

1. Konduksi elektronik

Konduksi ini dapat terjadi ketika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas, sehingga arus listrik dialirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut. Aliran listrik ini dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat batuan tersebut adalah resistivitas yang menunjukkan kemampuan bahan tersebut untuk menghantarkan arus listrik.

Jika ditinjau suatu silinder dengan panjang L , luas penampang A , dan resistansi R , maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.31)$$

Menurut hukum Ohm :

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.32)$$

Kebalikan dari resistivitas (ρ) adalah konduktivitas (σ) dengan satuan Siemens per meter (S/m)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} = \frac{IL}{VA} = \frac{I L}{A V} = \frac{I}{E} \quad (2.33)$$

2. Konduksi elektrolitik

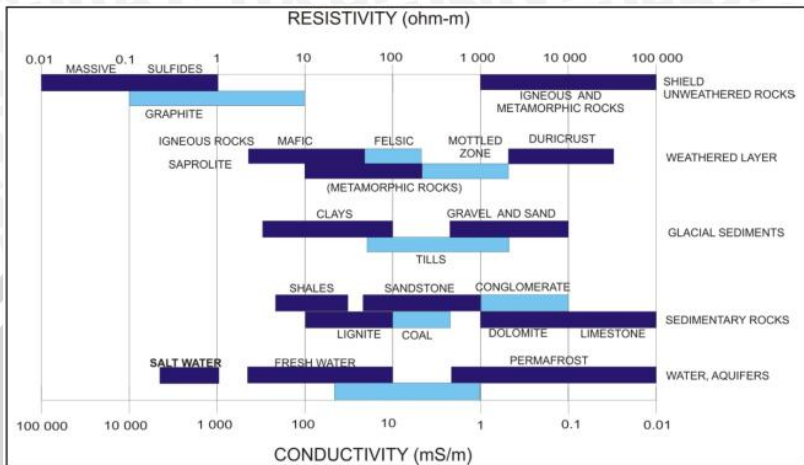
Sebagian besar batuan merupakan konduktor yang buruk dan memiliki resistivitas yang sangat tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, Tabel 2.1, dan Tabel 2.2. Batuan biasanya memiliki pori-pori yang terisi oleh fluida, terutama air. Batuan-batuan tersebut menjadi konduktor elektrolitik, dimana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolitik dalam air. Konduktivitas dan resistivitas batuan berpori bergantung pada volume dan susunan pori-porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan bertambah banyak, dan sebaliknya resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang. Menurut rumus Archie:

$$\rho_e = a\varphi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (2.34)$$

dimana ρ_e adalah resistivitas batuan, φ adalah porositas, S adalah fraksi pori-pori yang berisi air, dan ρ_w adalah resistivitas air, $n \approx 2$ sedangkan a , dan m adalah konstanta $0,5 \leq a \leq 2,5$, $1,3 \leq m \leq 2,5$. Konstanta m disebut juga faktor sementasi.

3. Konduksi dielektrik

Konduksi dielektrik dapat terjadi jika batuan atau mineral bersifat dielektrik terhadap aliran arus listrik, artinya batuan atau mineral tersebut mempunyai elektron bebas sedikit bahkan tidak sama sekali. Elektron dalam batuan berpindah ke dalam inti karena adanya pengaruh medan listrik di luar, sehingga terjadi polarisasi dielektrik.



Gambar 2.7. Kisaran nilai resistivitas material di bumi (Sheriff, 1991).

Tabel 2.1. Resistivitas dari beberapa batuan dan mineral (Loke, 2000)

<i>Material</i>	<i>Resistivity (Ωm)</i>
<i>Igneous and Metamorphic Rocks</i>	
<i>Granite</i>	$5 \times 10^3 - 10^6$
<i>Basalt</i>	$10^3 - 10^6$
<i>Slate</i>	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
<i>Marble</i>	$10^2 - 2,5 \times 10^8$
<i>Quartzite</i>	$10^2 - 2 \times 10^8$
<i>Sedimentary Rocks</i>	
<i>Sandstone</i>	$8 - 4 \times 10^3$
<i>Shale</i>	$20 - 2 \times 10^3$
<i>Limestone</i>	$20 - 2 \times 10^3$
<i>Soil and Water</i>	
<i>Clay</i>	1 – 100
<i>Alluvium</i>	10 – 800
<i>Groundwater (fresh)</i>	10 – 100
<i>Sea water</i>	0,2

**Tabel 2.2. Resistivitas beberapa batuan dan sedimen
(Telford dkk, 1990)**

Rock Type	Resistivity Range (Ωm)
<i>Granite porphyry</i>	$4,5 \times 10^3$ (wet) - $1,3 \times 10^6$ (dry)
<i>Feldspar porphyry</i>	4×10^3 (wet)
<i>Diorite porphyry</i>	$1,9 \times 10^3$ (wet) - $2,8 \times 10^4$ (dry)
<i>Porphyrite</i>	$10 - 5 \times 10^4$ (wet) - $3,3 \times 10^3$ (dry)
<i>Quartz diorite</i>	2×10^4 - 2×10^6 (wet) - $1,8 \times 10^5$ (dry)
<i>Porphyry (various)</i>	$60 - 10^4$
<i>Dacite</i>	2×10^4
<i>Andesite</i>	$1,7 \times 10^2$ (dry) - $4,5 \times 10^4$ (wet)
<i>Diabase (various)</i>	$20 - 5 \times 10^7$
<i>Lavas</i>	$10^2 - 5 \times 10^4$
<i>Gabbro</i>	$10^3 - 10^6$
<i>Basalt</i>	$10 - 1,3 \times 10^7$ (dry)
<i>Tuffs</i>	2×10^3 (wet) - 10^5 (dry)
<i>Graphite schist</i>	$10 - 10^2$
<i>Gneiss (various)</i>	$6,8 \times 10^4$ (wet) - 3×10^6 (dry)
<i>Marble</i>	$10^2 - 2,5 \times 10^8$ (dry)
<i>Quartzities (various)</i>	$10 - 2 \times 10^8$
<i>Consolidated shales</i>	$20 - 2 \times 10^3$
<i>Argillites</i>	$10 - 8 \times 10^2$
<i>Conglomerates</i>	$2 \times 10^3 - 10^4$
<i>Sandstones</i>	$1 - 6,4 \times 10^8$
<i>Limestones</i>	$50 - 10^7$
<i>Clays</i>	$1 - 100$
<i>Oil sands</i>	$4 - 800$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian skripsi ini adalah data sekunder dari Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Pengukuran data primer dilakukan oleh tim survei Pusat Penelitian Geoteknologi di daerah penelitian pada tanggal 08 September 2013 hingga 13 Oktober 2013. Pengolahan magnetotelurik dilakukan pada 1 Februari 2014 hingga 20 Maret 2014 di *Laboratory for Earth Hazard*. Sementara itu, penyusunan naskah skripsi dilakukan pada bulan Februari 2014 hingga Mei 2014 di Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya, Malang.

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan alat MTU 5A yang berfungsi sebagai alat untuk merekam variasi medan listrik dan medan magnet terhadap waktu. Data yang diambil dengan menggunakan alat MTU 5A merupakan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik. Pada saat pengambilan data digunakan 4 buah *porous pot* yang ditanam saling tegak lurus dan berfungsi sebagai sensor medan listrik (E_x dan E_y). Selain itu, digunakan pula 2 buah koil (H_x dan H_y) berfungsi sebagai sensor medan magnet yang ditanam secara horizontal dan saling tegak lurus. Konfigurasi akuisisi metode magnetotelurik dapat dilihat pada Gambar L2.1. Pengambilan data dengan menggunakan teknik audio magnetotelurik dilakukan selama ± 1 jam dengan menggunakan koil yang memiliki rentang frekuensi 1000 Hz hingga 10000 Hz. Setelah akuisisi audio magnetotelurik telah selesai, dilakukan penggantian koil untuk pengambilan data berikutnya menggunakan teknik magnetotelurik. Pengambilan data dengan menggunakan teknik magnetotelurik dilakukan selama ± 17 jam dengan menggunakan koil yang memiliki rentang frekuensi 400 Hz hingga 0,0000129 Hz. Lintasan pengambilan data sebanyak 3 lintasan dengan total titik pengambilan data sebanyak 24 titik. Pada tiap lintasan terdiri dari 8 titik pengukuran.



Gambar 3.1. Peta lokasi penelitian (Sumber : Google Earth)

3.2. Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder. Adapun data sekunder tersebut antara lain terdiri dari :

1. Waktu dan tanggal pengambilan data
2. Letak koordinat titik pengamatan (lintang dan bujur)
3. Ketinggian titik pengamatan
4. Data hasil perekaman MTU 5A

3.3. Peralatan Penelitian

Pada penelitian ini peralatan yang dibutuhkan adalah :

1. Satu set alat MTU 5A
Alat MTU 5A (Gambar 3.2) digunakan untuk akuisisi data audio magnetotelurik dan magnteotelurik.
2. Peralatan pendukung
Peralatan pendukung berupa kompas, multimeter, GPS, meteran, *waterpass*, dan alat bor tanah.
3. Perangkat komputer
Dalam proses pengolahan data sangat dibutuhkan perangkat komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini berupa *Software SSMT2000*, *MT Editor*, *WinGlink*, dan *MS.Word*.
4. Alat tulis
Dalam proses penelitian dibutuhkan alat tulis seperti buku dan bolpoint.

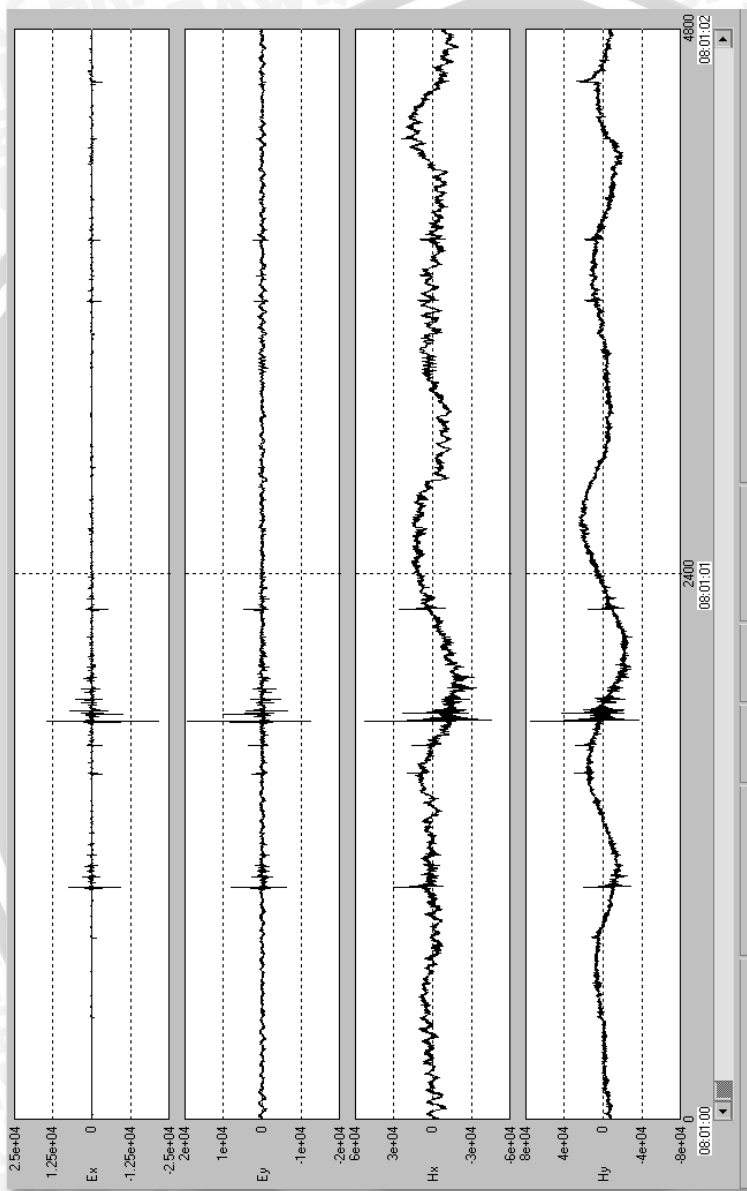


Gambar 3.2. Instrumen MTU

3.4. Pengolahan Data

3.4.1. Data Mentah

Data yang direkam oleh alat MTU 5A adalah berupa data mentah dalam format *time series*. Sumbu vertikal merupakan *magnitude* dari E_x , E_y , H_x , dan H_y hasil dari perekaman komponen medan listrik dan medan magnetik di lapangan. Sedangkan sumbu horizontal merupakan waktu *sampling* perekaman pada saat pengambilan data. Gambar 3.3. menunjukkan contoh data mentah hasil akuisisi lapangan.



Gambar 3.3. Contoh data mentah hasil perekaman.

3.4.2. Transformasi Fourier

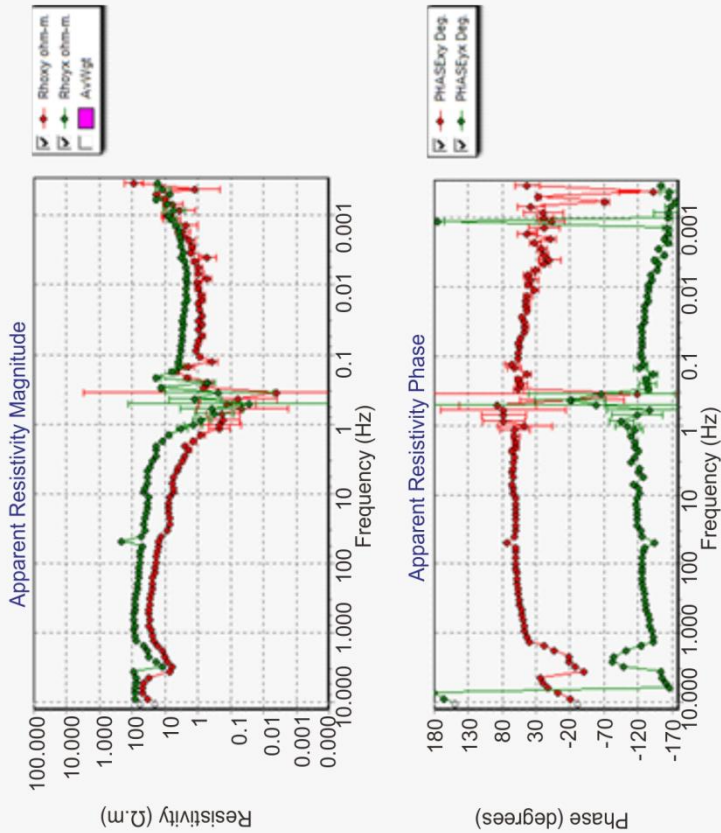
Transformasi Fourier digunakan untuk mengubah data mentah yang masih dalam domain waktu menjadi data dalam domain frekuensi. Data dalam domain frekuensi akan digunakan untuk menghitung nilai impedansi, resistivitas, dan fase. Proses transformasi Fourier dilakukan dengan menggunakan *Software SSMT2000*.

3.4.3. Robust Processing

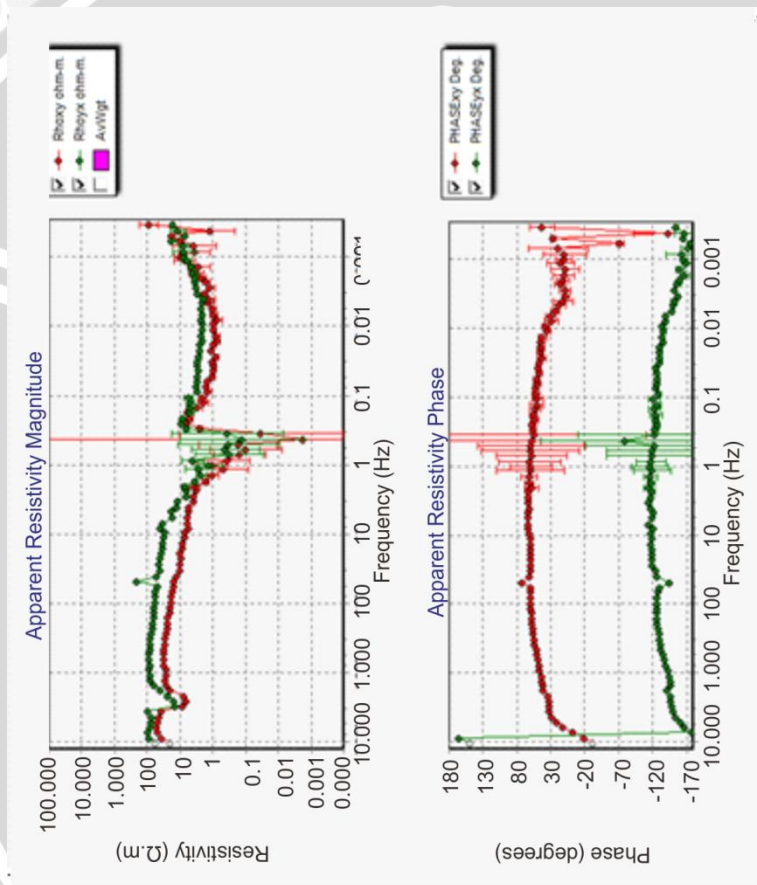
Robust processing merupakan proses pengolahan data untuk mendapatkan nilai impedansi, resistivitas dan fase. *Robust processing* dilakukan dengan menggunakan *Software SSMT2000*. Pada saat *robust processing* dilakukan pengaturan tipe referensi yang digunakan dan *maximum crosspower* untuk menentukan banyaknya data yang akan diseleksi pada tahap *filtering data*. Pada penelitian ini digunakan *local H* sebagai referensi dikarenakan medan magnetik secara umum lebih bebas *noise* daripada medan listrik dan nilai medan magnet disuatu tempat relatif sama. Penentuan *local H* sebagai referensi berguna untuk mereduksi *noise* yang ada pada saat proses akuisisi. Sementara itu, jumlah *crosspower* yang digunakan merupakan nilai maksimal yakni 100 dengan tujuan agar data yang diolah menjadi lebih halus.

3.4.4. Filtering Data

Data hasil pengolahan *Software SSMT2000* selanjutnya akan diolah pada *Software MTeditor*. Proses *filtering data* dilakukan melalui proses seleksi *crosspower*. Jumlah *crosspower* yang ditampilkan pada *Software MTeditor* sesuai dengan jumlah *crosspower* yang diatur pada *Software SSMT2000*. Seleksi *crosspower* dilakukan dengan memilih titik data yang dihidupkan ataupun dimatikan. Pada penelitian ini, *crosspower* yang digunakan adalah 100, hal ini berarti untuk tiap frekuensi terdapat 100 pilihan titik yang dapat dihidupkan ataupun dimatikan. *Filtering data* bertujuan untuk mendapatkan kurva resistivitas *versus* frekuensi dan fase *versus* frekuensi yang lebih baik dan representatif. Gambar 3.4 merupakan salah satu contoh data sebelum proses *filtering*, sedangkan Gambar 3.5 merupakan contoh data hasil *filtering* melalui proses seleksi *crosspower*.



Gambar 3.4. Kurva sebelum filtering data



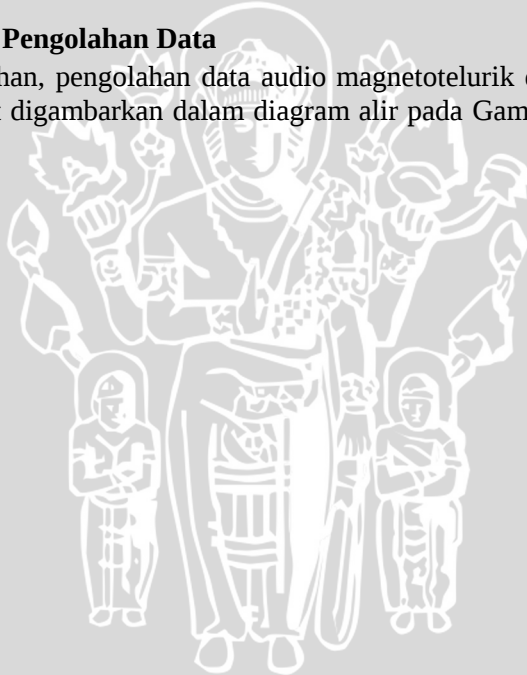
Gambar 3.5. Kurva setelah filtering data

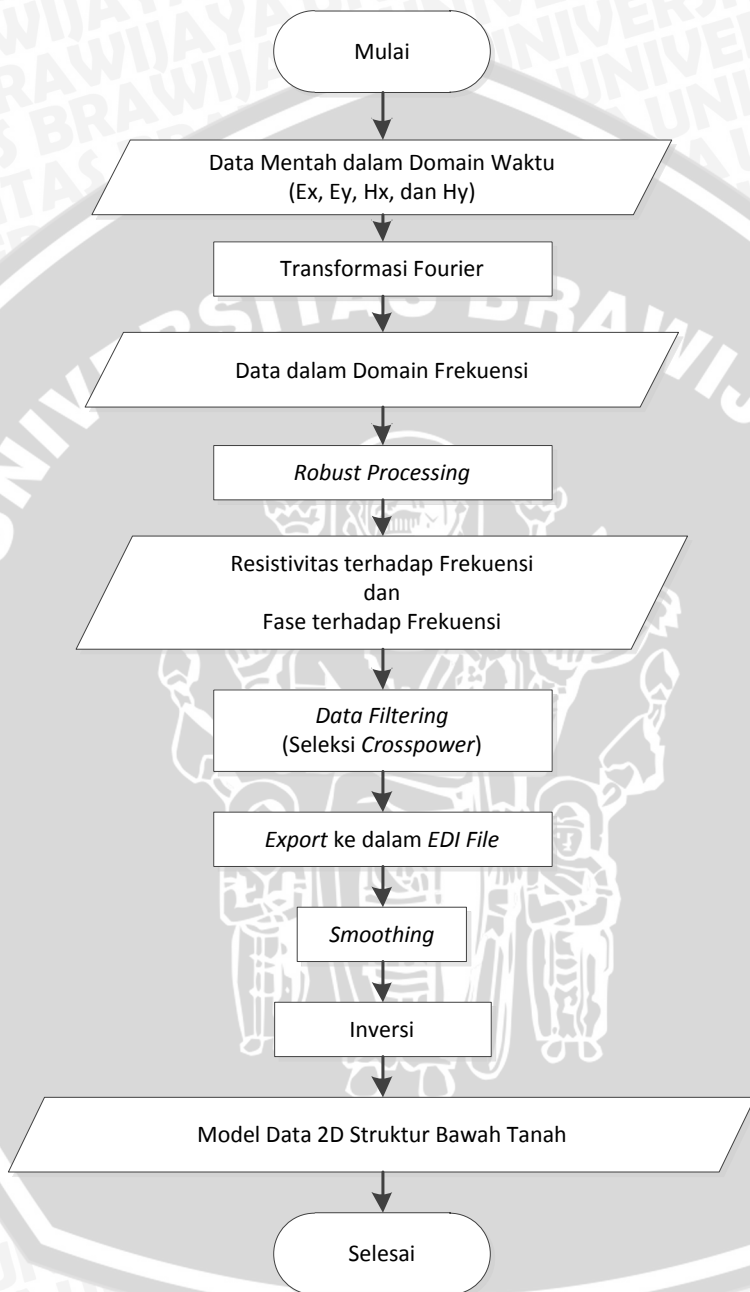
3.4.5. Pemodelan 2D

Pemodelan 2D bertujuan untuk menampilkan distribusi resistivitas terhadap kedalaman dalam bentuk kontur. Pemodelan 2D dilakukan dengan menggunakan *Software* WinGlink. Proses pemodelan 2D ini menggunakan teknik inversi. Pada tahapan ini, data dapat diperhalus (*smoothing*) lagi. Nilai resistivitas dan fase akan diperhalus sehingga menghasilkan nilai resistivitas dan fase yang baru, akan tetapi dengan tetap mengacu pada data yang ada. Setelah *smoothing data*, selanjutnya dibuat sebuah *mesh* untuk tiap lintasan. Untuk mendapatkan kontur distribusi resistivitas tiap kedalaman, dilakukan proses iterasi. Proses iterasi diakhiri ketika semua *mesh* sudah terproses dan dianggap representatif.

3.4.6. Diagram Alir Pengolahan Data

Secara keseluruhan, pengolahan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik dapat digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.6.





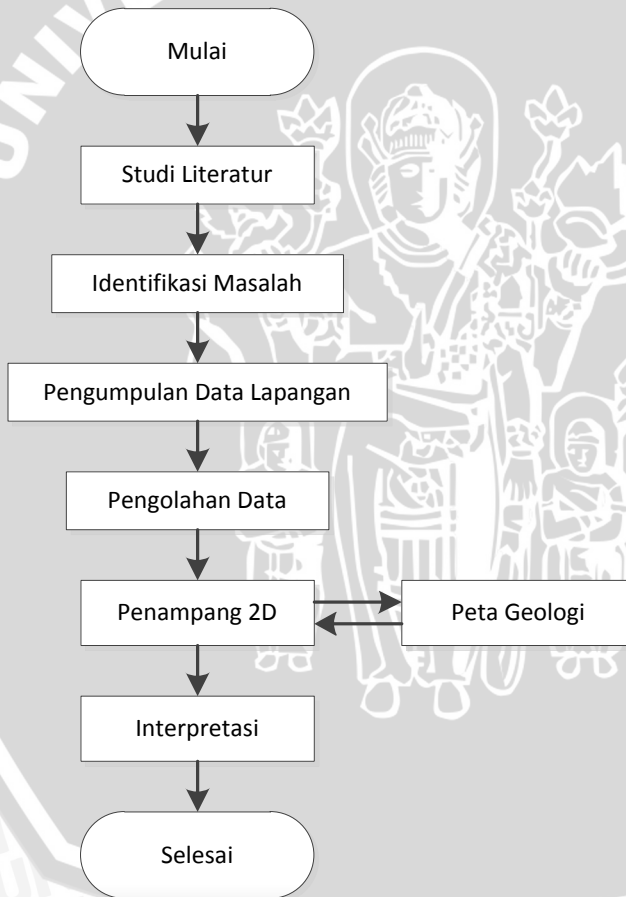
Gambar 3.6. Diagram alir pengolahan data

3.5. Interpretasi

Interpretasi merupakan tahap akhir dari penelitian ini. Interpretasi dilakukan dengan mengamati kontur resistivitas kemudian dikorelasikan dengan data tabel nilai resistivitas batuan serta peta geologi daerah penelitian. Hasil interpretasi dapat menafsirkan informasi di bawah permukaan pada daerah penelitian.

3.6. Diagram Alir Penelitian

Secara keseluruhan, proses penelitian dapat digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram alir penelitian

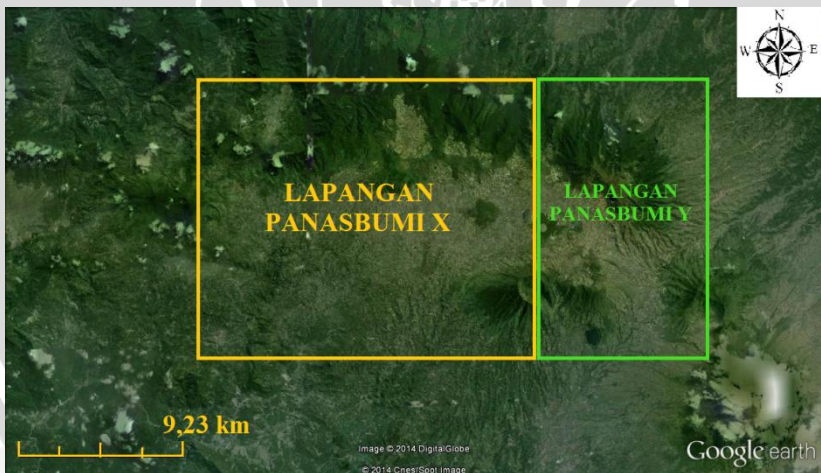
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengolahan Data

Identifikasi struktur bawah permukaan bumi khususnya untuk menentukan sistem panasbumi dapat dilakukan dengan menggunakan metode geofisika, salah satunya metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik. Metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik mengukur secara pasif medan listrik dan medan magnetik alam yang berubah terhadap waktu. Pada dasarnya prinsip dan teknik akuisisi kedua metode tersebut sama, yang membedakan hanyalah frekuensi sensor yang digunakan pada saat akuisisi.

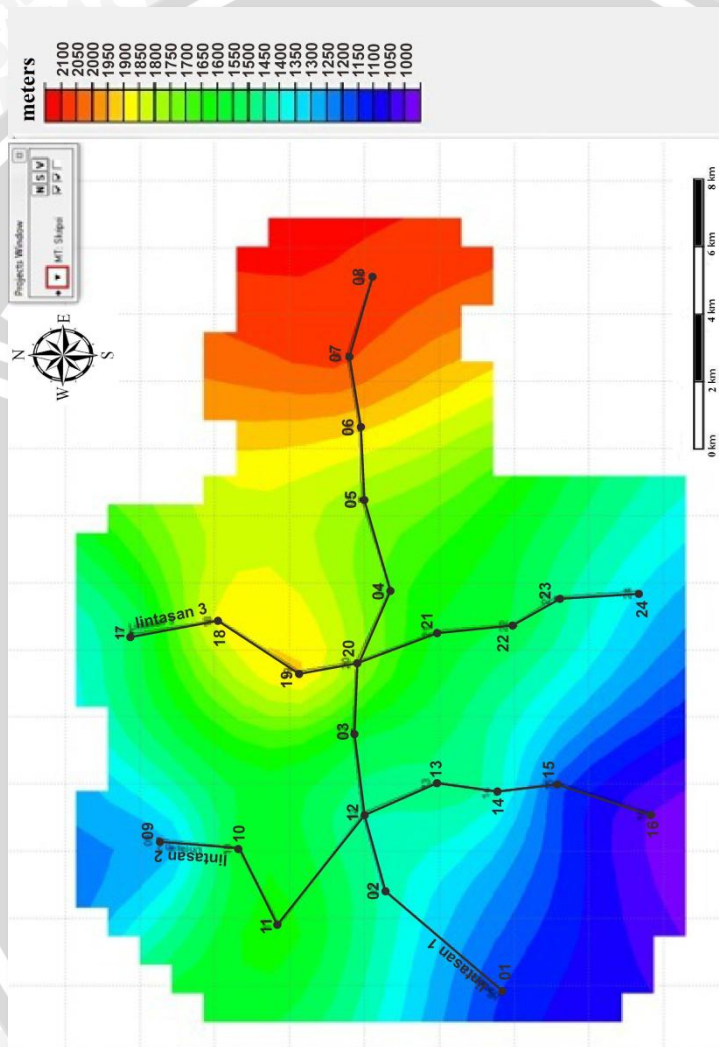
Penelitian ini dilakukan pada lapangan panasbumi X. Posisi lapangan panasbumi X berada di dekat lapangan panasbumi Y yang telah terbukti memiliki potensi panasbumi sangat bagus dan telah diproduksi untuk menghasilkan listrik (Gambar 4.1). Lapangan panasbumi X direncanakan sebagai daerah pengembangan dari lapangan produksi Y. Oleh karena itu, perlu dilakukan identifikasi struktur bawah permukaan pada lapangan panasbumi X untuk menentukan sistem panasbumi pada lapangan panasbumi X.



Gambar 4.1. Posisi lapangan panasbumi X terhadap lapangan panasbumi Y (Sumber : Google Earth)

Data yang digunakan merupakan data sekunder hasil akuisisi dari Pusat Penelitian Geoteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Pengambilan data menggunakan seperangkat alat magnetotelurik seri MTU-5A dari *Phoenix Geophysics*. Pada penelitian ini digunakan 24 data audio magnetotelurik dan 24 data magnetotelurik. Data tersebut merupakan data hasil pengukuran pada 24 titik (Gambar 4.2), untuk setiap titik pengukuran dilakukan akuisisi metode audio magnetotelurik dan metode magnetotelurik secara bergantian. Lamanya waktu akuisisi data bergantung pada frekuensi yang ingin didapatkan. Apabila ingin mendapatkan data hingga frekuensi yang sangat kecil, maka waktu akuisisi data diperpanjang. Pada penelitian ini, akuisisi metode audio magnetotelurik dilakukan selama ± 1 jam, sehingga didapatkan data dalam rentang frekuensi 10000 Hz hingga 1 Hz. Sementara itu akuisisi metode magnetotelurik dilakukan selama ± 17 jam, sehingga didapatkan data dalam rentang frekuensi 400 Hz hingga 0,001 Hz.

Pengolahan data pada tahap awal yaitu transformasi fourier hingga *robust processing* dilakukan dengan *Software SSMT2000*. Setelah itu, pengolahan data dilanjutkan dengan menggabungkan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik untuk dilakukan *filtering* data pada *Software MTeditor*. Tahapan akhir pada proses pengolahan data adalah *smoothing* dan inversi untuk pemodelan 2D data magnetotelurik pada *Software WinGlink*. Proses *smoothing* data menyebabkan faktor selisih atau perbedaan nilai yang didapatkan dari proses pemodelan dengan nilai data sebelumnya yang disebut dengan *root mean square error (RMS error)*. Hasil pengolahan data secara keseluruhan berupa peta kontur resistivitas untuk tiap lintasan pengukuran.



Gambar 4.2. Peta kontur elevasi titik pengambilan data

4.2. Pembahasan

Pembahasan pada hasil pengolahan data dilakukan dengan interpretasi terhadap peta kontur resistivitas.

4.2.1. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 1

Lintasan 1 merupakan lintasan yang berarah Timur - Barat. Pengolahan data pada lintasan 1 melibatkan 10 titik ukur, dimana 8 titik ukur merupakan titik ukur pada lintasan 1 itu sendiri, 1 titik ukur merupakan titik pertemuan antara lintasan 1 dengan lintasan 2 (titik 12), dan 1 titik ukur yang merupakan titik pertemuan antara lintasan 1 dengan lintasan 3 (titik 20). Gambar 4.3 merupakan model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 1 hasil pengolahan data pada *software* WinGlink. Pada kontur resistivitas lintasan 1 dilakukan iterasi sebanyak 300 kali sehingga didapatkan hasil akhir seperti pada Gambar 4.3 dengan *RMS error* sebesar 4,24%. Berdasarkan korelasi dengan peta geologi daerah penelitian dan tabel resistivitas, kontur pada Gambar 4.3 dapat diinterpretasikan bahwa lapisan dengan nilai resistivitas $4 \Omega.m - 16 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan alterasi, resistivitas $>16 \Omega.m - 64 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan breksi yang mulai sedikit mengalami alterasi, resistivitas $>64 \Omega.m - 1024 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan tufa breksi, resistivitas $>1024 \Omega.m - 4096 \Omega.m$ merupakan lapisan lava andesit, dan resistivitas $>4096 \Omega.m - 16384 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan basalt.

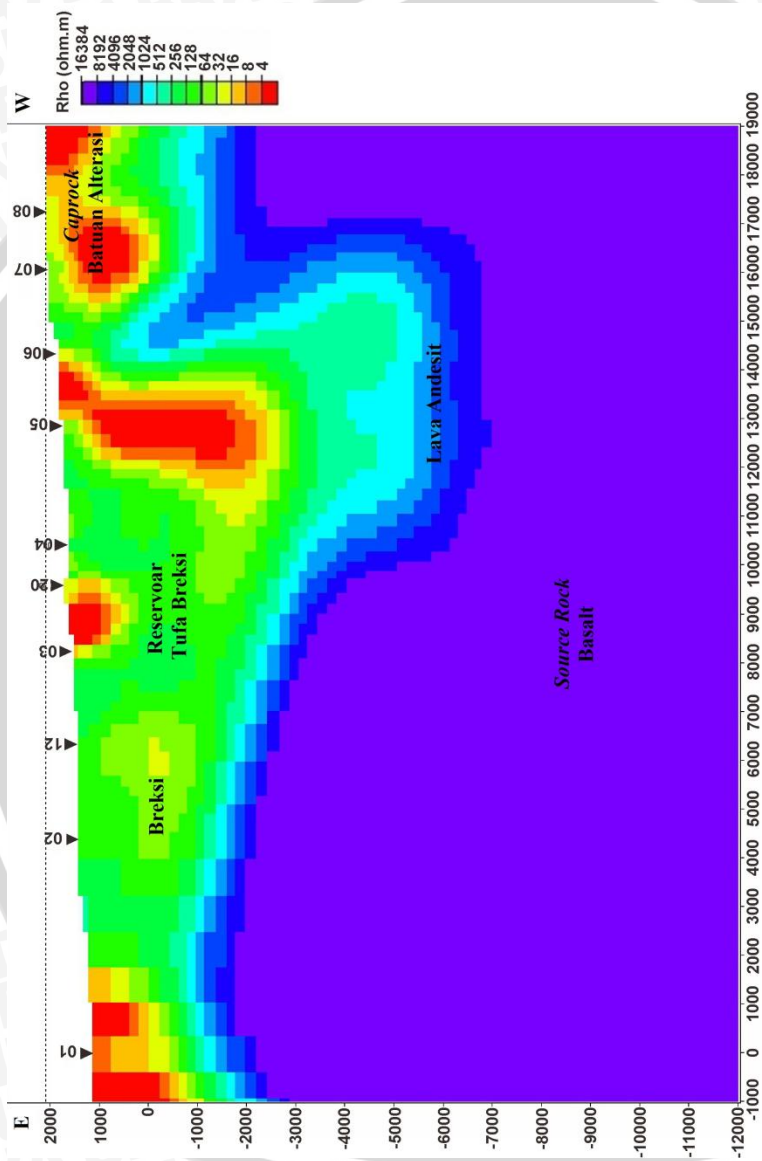
4.2.2. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 2

Lintasan 2 merupakan lintasan yang berarah Utara - Selatan. Pengolahan data pada lintasan 2 melibatkan 8 titik ukur. Gambar 4.4 merupakan model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 2 hasil pengolahan data pada *software* WinGlink. Pada kontur resistivitas lintasan 2 dilakukan iterasi sebanyak 400 kali sehingga didapatkan hasil akhir seperti pada Gambar 4.4 dengan *RMS error* sebesar 2,78%. Berdasarkan korelasi dengan peta geologi daerah penelitian dan tabel resistivitas, kontur pada Gambar 4.4 dapat diinterpretasikan bahwa lapisan dengan nilai resistivitas antara $4 \Omega.m - 16 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan alterasi, resistivitas $>16 \Omega.m - 64 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan breksi yang mulai sedikit mengalami alterasi, resistivitas $>64 \Omega.m - 1024 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan tufa breksi, lapisan

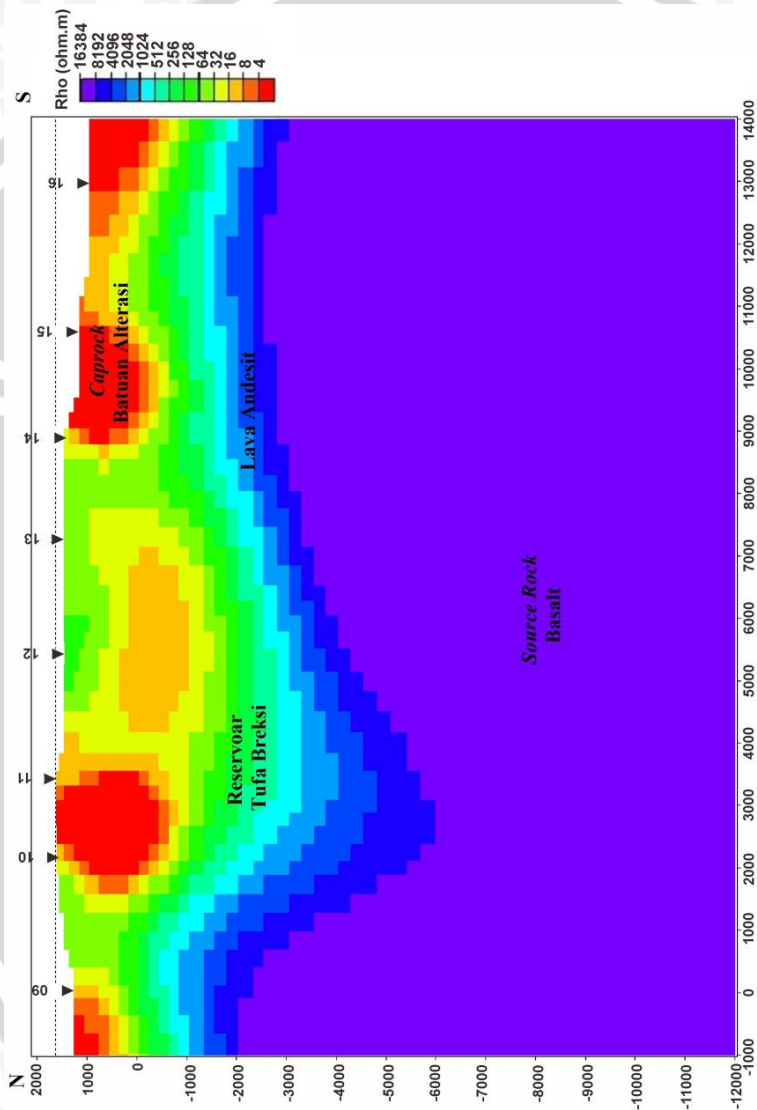
dengan nilai resistivitas $>1024 \Omega.m$ - $4096 \Omega.m$ merupakan lapisan lava andesit, dan resistivitas $>4096 \Omega.m$ - $16384 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan basalt.

4.2.3. Interpretasi Litologi Pada Lintasan 3

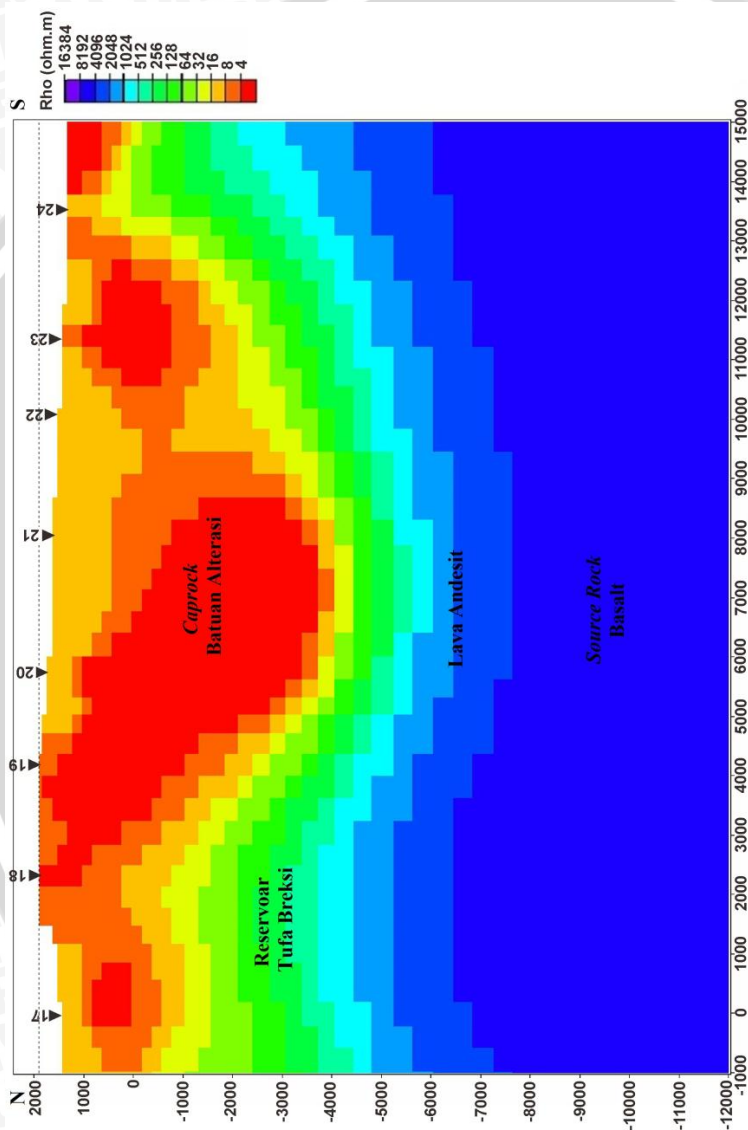
Lintasan 3 merupakan lintasan yang berarah Utara - Selatan. Pengolahan data pada lintasan 2 melibatkan 8 titik ukur. Gambar 4.5 merupakan model 2D resistivitas bawah permukaan hasil pengolahan data pada *software* WinGlink. Pada kontur resistivitas lintasan 3 dilakukan iterasi sebanyak 300 kali sehingga didapatkan hasil akhir seperti pada Gambar 4.5 dengan *RMS error* sebesar 2,74%. Berdasarkan korelasi dengan peta geologi daerah penelitian dan tabel resistivitas, kontur resistivitas pada Gambar 4.5 dapat diinterpretasikan bahwa nilai resistivitas $4 \Omega.m$ - $16 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan alterasi, resistivitas $>16 \Omega.m$ - $64 \Omega.m$ diduga merupakan lapisan batuan breksi yang mulai sedikit mengalami alterasi, resistivitas $>64 \Omega.m$ - $1024 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan tufa breksi, resistivitas $>1024 \Omega.m$ - $4096 \Omega.m$ merupakan lapisan lava andesit, dan lapisan batuan dengan nilai resistivitas $>4096 \Omega.m$ - $8192 \Omega.m$ merupakan lapisan batuan basalt.



Gambar 4.3. Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 1



Gambar 4.4. Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 2



Gambar 4.5. Model 2D struktur bawah permukaan pada lintasan 3

4.3. Sistem Panasbumi Pada Daerah Penelitian

Sistem panasbumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi. Perambatan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perambatan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung. Akibat gaya gravitasi air akan selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke bawah, tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi (Susanti, 2011).

Berdasarkan analisis litologi lintasan 1, 2, dan 3 dapat diketahui sistem panasbumi pada daerah penelitian. Sistem panasbumi tersusun atas sumber panas, reservoir dan batuan penudung. Batuan dengan resistivitas tinggi ($>1024 \Omega.m$ hingga $16384 \Omega.m$) berperan sebagai sumber panas. Batuan dengan resistivitas sedang ($>64 \Omega.m$ hingga $1024 \Omega.m$) berperan sebagai reservoir panasbumi. Reservoir panasbumi merupakan tempat terakumulasinya fluida hidrotermal hasil pemanasan oleh sumber panas. Batuan yang berperan sebagai reservoir panasbumi merupakan batuan yang memiliki permeabilitas dan porositas yang baik sehingga dapat menjadi perangkap bagi fluida panas. Sementara itu, batuan dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 64 \Omega.m$) berperan sebagai lapisan penudung pada sistem panasbumi di daerah penelitian. Lapisan penudung tersusun atas batuan yang bersifat impermeabel karena berfungsi sebagai penahan agar fluida panas yang telah terakumulasi pada reservoir tidak mengalir ke permukaan.

Pada penelitian ini, batuan sumber panas diduga tersusun atas batuan lava andesit dan basalt yang masih memiliki sisa panas dari dapur magma. Reservoir panasbumi di daerah penelitian diduga tersusun atas batuan tufa breksi. Sementara itu, lapisan penudung tersusun atas batuan teralterasi yang dominan lempung dan batuan breksi yang teralterasi lemah.

Alterasi hidrotermal merupakan proses yang terjadi akibat adanya reaksi antara batuan asal dengan fluida panasbumi. Proses alterasi hidrotermal terjadi akibat adanya reaksi antara batuan dengan air jenis klorida yang berasal dari reservoir panasbumi yang terdapat

jauh di bawah permukaan (*deep chloride water*) dapat menyebabkan terjadinya pengendapan dan pertukaran elemen-elemen batuan dengan fluida (Saptadji, 2002). Interaksi mengakibatkan porositas dan permeabilitas batuan yang awalnya besar menjadi berkurang karena hasil alterasi mengisi pori-pori yang ada pada matriks batuan (Nuqramadha, 2011). Sementara itu, air panas membutuhkan celah agar dapat naik ke permukaan. Air panas akan keluar melalui beberapa sesar yang ada pada daerah penelitian.

Berdasarkan hasil pengolahan data, dapat dianalisa bahwa pada lintasan 1 terdapat lapisan penudung dengan ketebalan ± 2000 m hingga 3000 m dengan persebaran yang tidak merata di seluruh permukaan. Zona reservoir memiliki ketebalan ± 3000 m. Batuan panas berada pada kedalaman ± 2000 m di bawah permukaan air laut. Pada lintasan 1 ini tampak kontras resistivitas yang diindikasikan sebagai sesar (Gambar 4.6). Sesar ini dapat menjadi jalan bagi fluida panas yang untuk keluar ke permukaan. Adanya sistem panasbumi yang lengkap dan didukung oleh keberadaan sesar, menjadikan lintasan 1 ini memiliki prospek panasbumi yang baik.

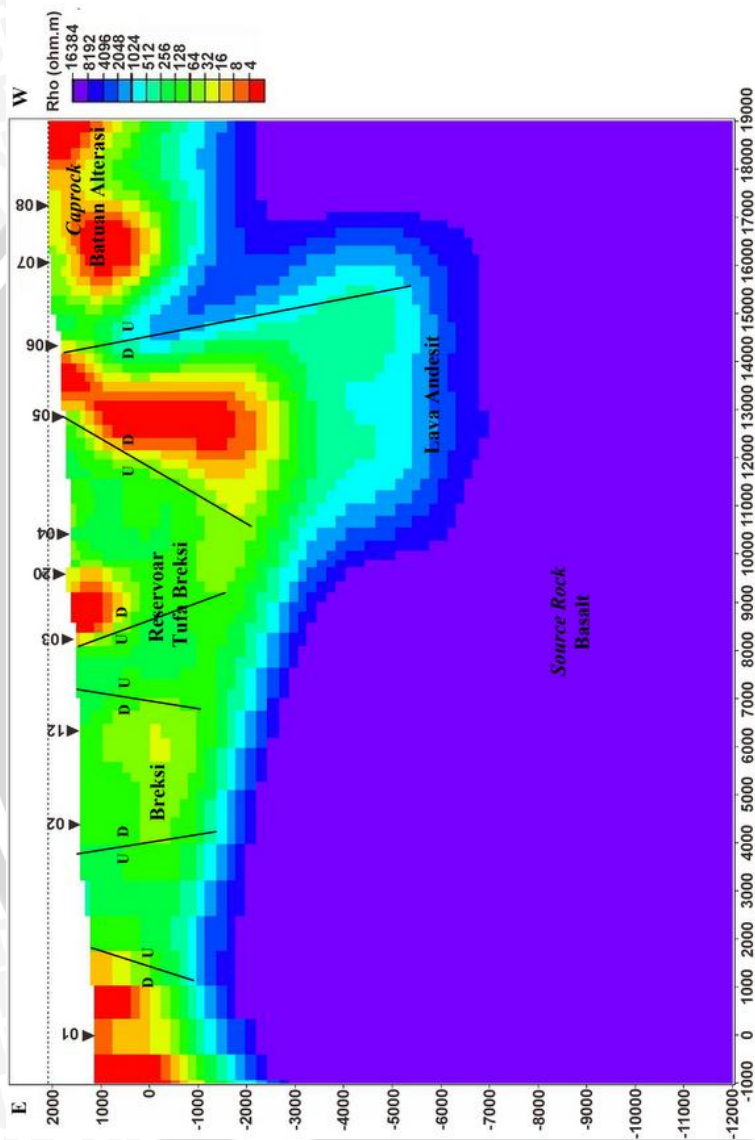
Pada lintasan 2 dapat dianalisa lapisan penudung mempunyai ketebalan sekitar ± 1500 m dengan persebaran merata di seluruh permukaan lintasan 2. Zona reservoir mempunyai ketebalan sekitar 1000 m hingga 1500 m. Batuan panas berada di kedalaman ± 1500 m di bawah permukaan air laut. Lintasan kedua ini diperkirakan merupakan daerah dengan prospek panasbumi yang baik, dikarenakan adanya batuan panas, reservoir sebagai perangkap fluida panas, dan batuan penudung dengan ketebalan yang cukup baik untuk menahan fluida panas agar tidak mengalir ke permukaan. Pada lintasan 2 juga terdapat sesar yang berfungsi sebagai jalan bagi fluida panas untuk keluar ke permukaan (Gambar 4.7).

Sementara itu, pada lintasan 3 dapat dianalisa lapisan penudung mempunyai ketebalan ± 4000 m di seluruh permukaan lintasan 3. Zona reservoir mempunyai ketebalan ± 2500 m. Batuan panas berada pada kedalaman ± 5000 m di bawah permukaan air laut. Pada lintasan 3 juga terdapat sesar yang menjadi jalan bagi fluida panas untuk keluar ke permukaan (Gambar 4.8). Lintasan ketiga ini diperkirakan merupakan daerah yang memiliki prospek panasbumi kurang baik, dikarenakan adanya lapisan penudung yang terlalu tebal.

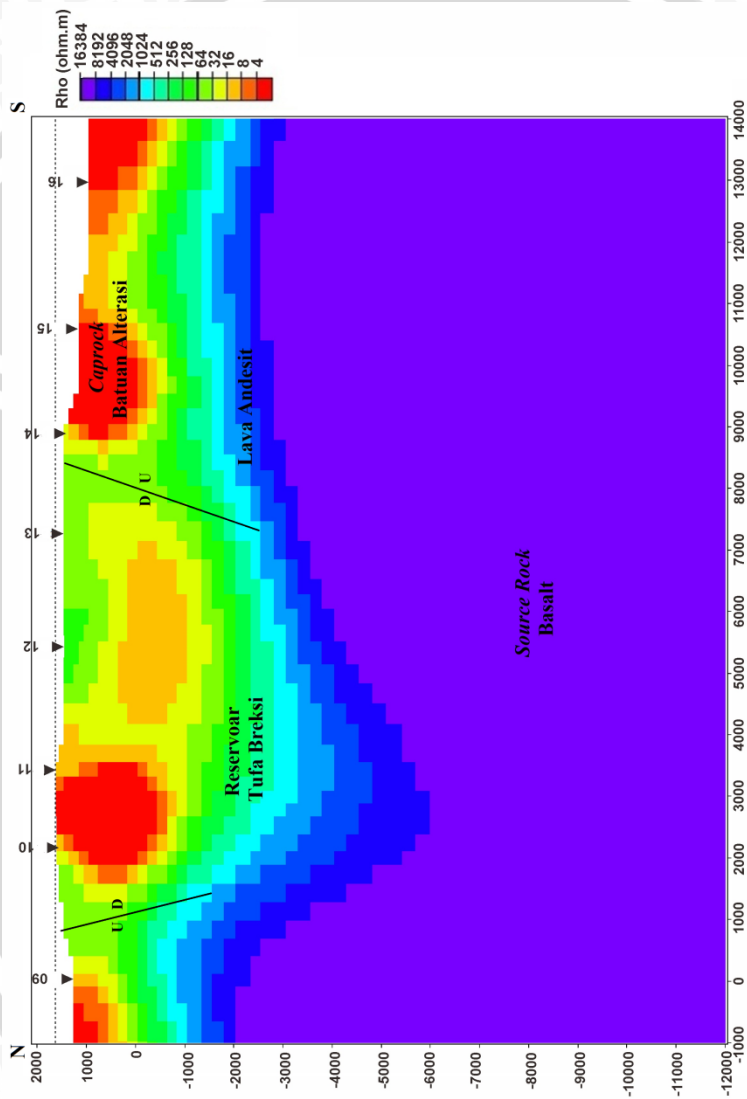
Gambar 4.9 memperlihatkan visualisasi 3D dari ketiga lintasan pengukuran sehingga dapat digunakan untuk interpretasi terpadu.

Berdasarkan visualisasi 3D terlihat bahwa lapisan penudung mengalami penebalan di bagian Utara (pada lintasan 3) hingga ± 4000 m. Kemenerusan zona reservoir terlihat di semua arah pada daerah penelitian. Zona reservoir semakin mengecil pada arah Utara-Selatan. Batuan sumber panas juga terdapat di seluruh area lapangan panasbumi X. Semakin ke arah Timur, batuan sumber panas ditemukan pada kedalaman yang lebih dalam dibandingkan posisinya pada arah Barat. Pada blok bagian selatan terjadi penurunan akibat adanya sesar.

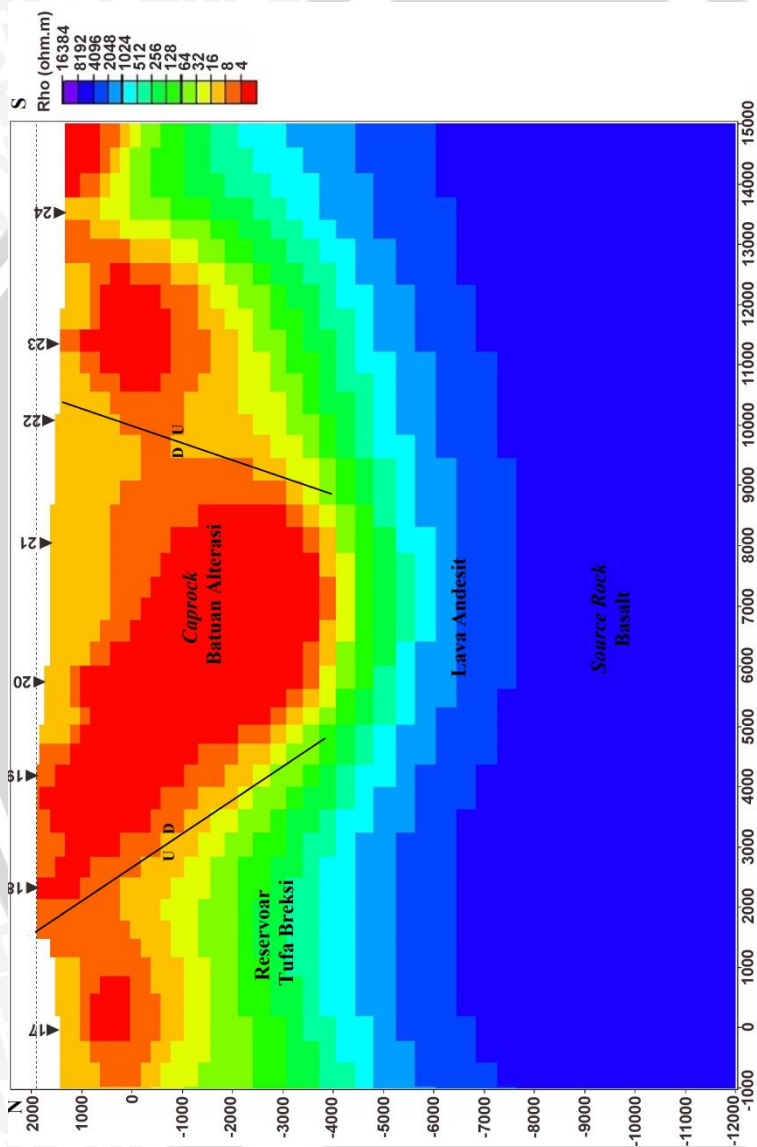




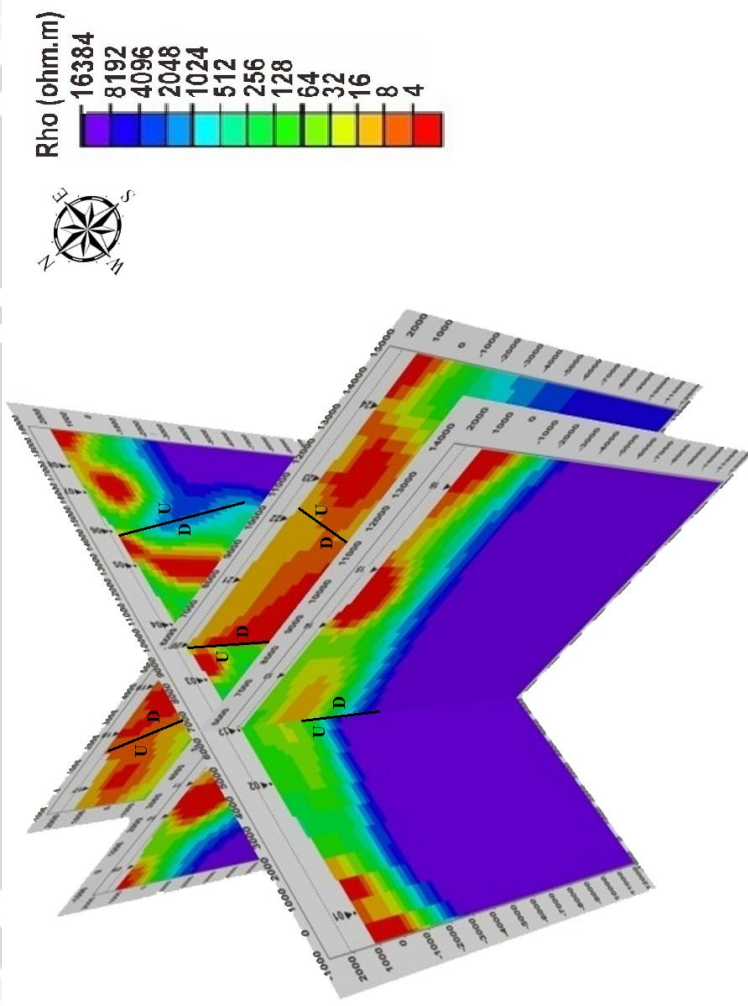
Gambar 4.6. Dugaan sesar pada lintasan 1



Gambar 4.7. Dugaan sesar pada lintasan 2



Gambar 4.8. Dugaan sesar pada lintasan 3



Gambar 4.9. Visualisasi 3D kontur resistivitas bawah permukaan

4.4. Potensi Lapangan Panasbumi X

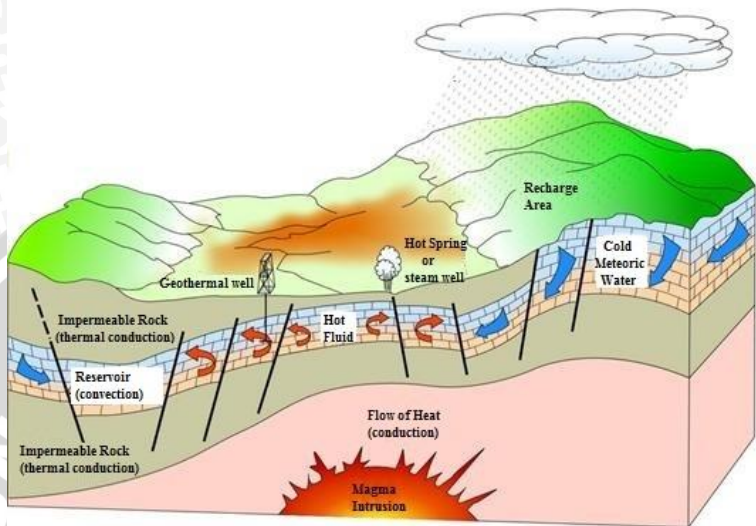
Berdasarkan analisa data, didapatkan nilai resistivitas batuan penyusun sistem panasbumi pada lapangan panasbumi X seperti yang disajikan pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1. Nilai resistivitas pada lapangan panasbumi X

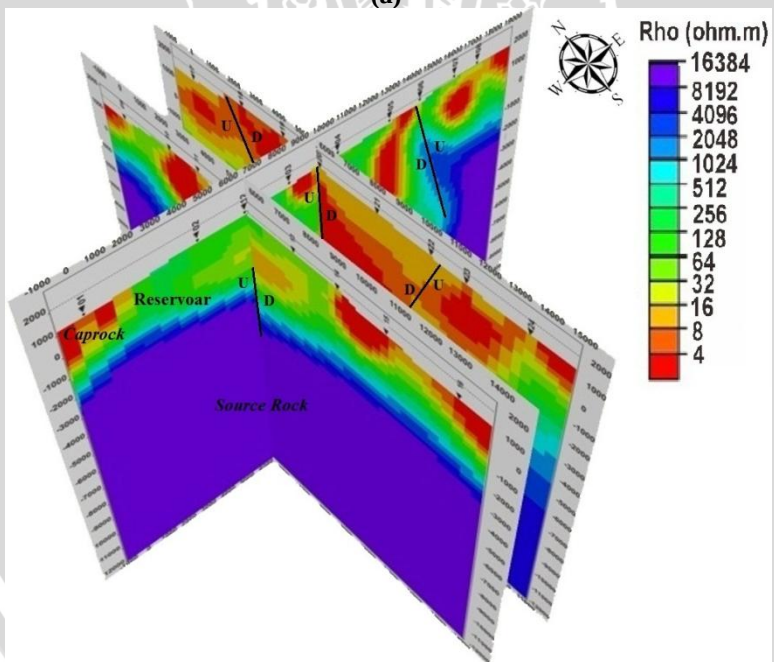
Komponen Sistem Panasbumi	Nilai Resistivitas ($\Omega.m$)
Batuan penudung	≤ 64
Reservoar	$>64 - 1024$
Batuan sumber panas	$>1024 - 16384$

Jika ditinjau berdasarkan hasil pengolahan data audio magnetotelurik dan magnetotelurik, dapat dikatakan bahwa sistem panasbumi pada lapangan panasbumi X sangat baik. Sistem panasbumi pada lapangan panasbumi X telah memenuhi semua komponen yang harus dimiliki oleh sistem panasbumi berdasarkan literatur, yakni sumber panas, reservoar, dan batuan penudung. Keberadaan sesar pada lapangan panasbumi X juga semakin mendukung potensi sistem panasbuminya, dimana sesar akan berfungsi sebagai jalan bagi fluida panas untuk mengalir ke permukaan. Adanya sistem panasbumi yang lengkap dan didukung oleh keberadaan beberapa sesar, menjadikan lapangan panasbumi X memiliki potensi panasbumi yang baik. Perbandingan model konseptual sistem panasbumi menurut literatur dengan hasil pengolahan data pada lapangan panasbumi X dapat dilihat pada Gambar 4.10.

Pada lapangan panasbumi X, batuan basalt dan andesit berperan sebagai batuan sumber panas. Batuan basalt dan andesit merupakan batuan beku hasil pendinginan magma. Batuan tufa breksi berperan sebagai reservoar panasbumi karena batuan ini memiliki porositas dan permeabilitas yang baik, sehingga dapat dijadikan tempat untuk terakumulasinya fluida panas. Batuan alterasi dan batuan breksi vulkanik yang mulai sedikit mengalami teralterasi berperan sebagai lapisan penudung karena bersifat *impermeable*.



(a)



(b)

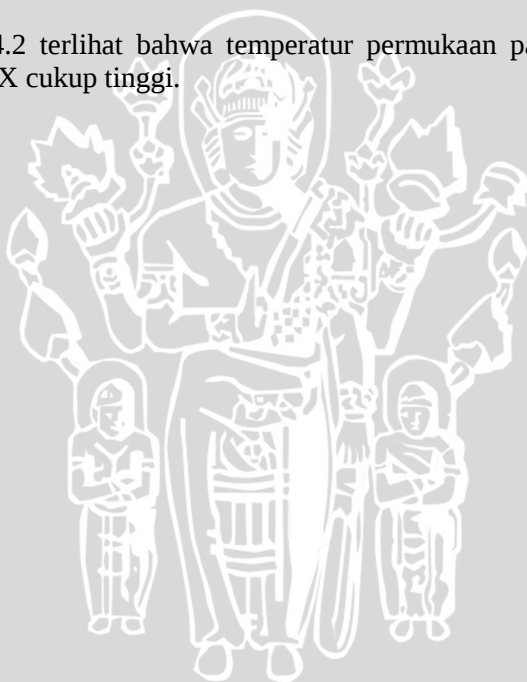
Gambar 4.10. Perbandingan model konseptual sistem panasbumi (a) menurut literatur pada Dickson dan Fanelli (2004) dengan (b) hasil pengolahan data pada lapangan panasbumi X

Pada daerah potensi panasbumi terdapat beberapa manifestasi air panas. Temperatur permukaan pada lapangan panasbumi X dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Temperatur permukaan manifestasi lapangan panasbumi X (Indarto dkk, 2013)

Lokasi		Temperatur Air
Lapangan Panasbumi X	Air panas 1	40 - 45°C
	Air panas 2	93°C
	Air panas 3	43 - 44°C
	Air panas 4	70 - 80°C
	Air panas 5	70°C

Berdasarkan Tabel 4.2 terlihat bahwa temperatur permukaan pada lapangan panasbumi X cukup tinggi.



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dengan menggunakan metode audio magnetotelurik dan magnetotelurik di daerah penelitian dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil pengolahan data dan interpretasi menunjukkan bahwa struktur bawah permukaan pada lintasan 1,2, dan 3 diidentifikasi tersusun atas batuan alterasi ($4 \Omega.m - 16 \Omega.m$), breksi yang mulai teralterasi ($>16 \Omega.m - 64 \Omega.m$), tufa breksi ($>64 \Omega.m - 1024 \Omega.m$), lava andesit ($>1024 \Omega.m - 4096 \Omega.m$), dan basalt ($>4096 \Omega.m - 16384 \Omega.m$).
2. Model sistem panasbumi pada daerah penelitian tersusun atas batuan lava andesit dan basalt sebagai sumber panas, batuan tufa breksi sebagai reservoir, dan batuan alterasi serta breksi sebagai lapisan penudung. Batuan sumber panas yang berada pada kedalaman ± 2000 m pada lintasan 1, ± 1500 m pada lintasan 2, dan ± 5000 m pada lintasan 3. Reservoir memiliki ketebalan ± 3000 m pada lintasan 1, dan $\pm 1000 - 1500$ m pada lintasan 2, dan ± 2500 m pada lintasan 3. Sementara itu, lapisan penudung memiliki ketebalan $\pm 2000 - 3000$ m pada lintasan 1, ± 1500 m pada lintasan 2, dan ± 4000 m pada lintasan 3.
3. Potensi panasbumi pada lapangan panasbumi X sangat baik karena memiliki sistem panasbumi yang lengkap, yakni batuan sumber panas, reservoir, dan batuan penudung, serta didukung oleh keberadaan beberapa sesar.

5.2. Saran

Agar didapatkan hasil penelitian yang lebih baik dan detail, maka perlu dilakukan beberapa hal sebagai berikut :

1. Digunakan koil magnetik dengan 3 channels (H_x , H_y , dan H_z)
2. Hasil penelitian akan lebih optimal jika potensi listrik yang dihasilkan dapat dihitung. Untuk menghitung potensi listrik tersebut diperlukan data geokimia berupa temperatur reservoir, saturasi uap, dan saturasi air.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Boedihardi, R.M., Suranto, dan S. Sudarman. 1991. *Evaluation of The Dieng Geothermal Field : Review of The Development Strategy*. Proceeding of the 20th Indonesia Petroleum Assosiation Annual Convention, Vol 1. Jakarta.
- Bronto, Sutikno. 2010. *Geologi Gunung Api Purba*. Badan Geologi. Bandung
- Broto, Sudaryo dan Thomas Triadi Putranto. 2011. *Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi*. Jurnal Teknik. 32 (1) : 79-87.
- Castells, A. M. 2008. *Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensinality And Study of The Central Betic Crustal Structure*. Univesitat De Barcelona, Departement De Geodinamica I Geofisica. Barcelona.
- Dickson, Mary H dan Mario Fanelli. 2004. *Geothermal Energy*. Istituto di Geoscienze e Georisorse. Italy.
- Gaffar, Eddy Z., Dadan D. Wardhana, dan Djedi S. Widarto. 2007. *Studi Geofisika Terpadu Di Lereng Selatan G. Ungaran, Jawa Tengah, dan Implikasinya terhadap Struktur Panasbumi*. Jurnal Meteorologi dan Geofisika. 8 (2) : 98-118.
- Gamble. T. D, W. M. Goubaou, dan J. Clarke. 1979. *Magnetotelluric with Remote Reference*. Geophysics. 40 (1) : 53-68.
- Hochstein, M. P. 1982 *Introduction to Geothermal Prospecting*, Geothermal Institute. University of Auckland.
- Indarto, Sri., Haryadi Permana, Eddy Z. Gaffar, Sudarsono, Yayat Sudrajat, Hendra Bakti, Iwan Setiawan, Sunardi, dan Jakah,. 2013. *Konsep Awal Sistem Panasbumi Berdasarkan Data Manifestasi Permukaan dan Bawah Permukaan*. Laporan Kegiatan Pusat Geoteknologi LIPI. Bandung.

- Irwan. 2012. *Magnetotelluric Imaging Improves Understanding of Geothermal System: Case in Chingshui Geothermal Area, Northeastern Taiwan*. Master Thesis Universitas Brawijaya. Malang.
- Kadir, Tri Virgantoro Salahudin. 2011. *Metode Magnetotelluric (MT) untuk Eksplorasi Panasbumi Daerah Lili, Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi*. Skripsi S1 Universitas Indonesia. Depok.
- Kasbani. 2009. *Tipe Sistem Panasbumi Di Indonesia Dan Estimasi Potensi Energinya*. Program Penelitian Panasbumi. Buletin Badan Geologi. 4 (2) : 64-73.
- Kusumawardhani, Astri. 2007. *Alterasi Hidrotermal dan Korelasi Sumur F dan G pada Lapangan Panasbumi Dieng*. Laporan Kerja Praktek S1 Teknik Geologi Universitas Diponegoro. Semarang.
- Loke, M. H. 2000. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*. Cangkat Minden. Malaysia.
- Mardiana, Undang. 2007. *Manivestasi Panasbumi Papandayan Berdasarkan Nilai Tahanan Jenis Batuan Studi Kasus Gunung Papandayan Kabupaten Garut - Propinsi Jawa Barat*. Laporan Penelitian Jurusan Geologi Universitas Padjadjaran. Bandung.
- Nuqramadha, Wambra Aswo. 2011. *Pemodelan Sistem Panasbumi dengan Metode Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Welirang Jawa Timur*. Skripsi S1 Universitas Indonesia. Depok.
- Roger, Stuart. 2004. *V-5 System 2000MTU/MTU-A User Guide*. Phoenix Geophysics. Canada.
- Saptadji, N. M. 2002. *Teknik Panasbumi*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

- Sheriff, R.E.. 1991. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, Third Edition*. Society of Exploration Geophysicists.
- Simpson, F dan Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Sukhyar, N.S. Sumartadipura dan W. Effendi. 1986. *Peta Geologi Komplek Gunungapi Dieng, Jawa Tengah*, Direktorat Vulkanologi, Direktorat Jenderal Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departemen Pertambangan dan Energi.
- Suparno, Supriyanto. 2009. *Energi Panasbumi*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Susanti, Nova. 2011. *Pemodelan Sistem Panasbumi Pincara Kabupaten Luwu Utara Sulawesi Selatan Berdasarkan Data Geofisika*. Tesis Universitas Indonesia. Jakarta.
- Telford, W.M., Gedart, L.P. dan Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge. New York.
- Tim Kerja Pemulihan Kawasan Dieng (TKPKD). 2012. *Roadmap Pemulihan Kawasan Dieng Kabupaten Banjarnegara Tahun 2011 -2016*. Pemerintah Kabupaten Banjarnegara.
- Tim Penyusun Buku Panasbumi Indonesia (TPBPI). 2004. *Panasbumi : Energi Kini dan Masa Depan*. Asosiasi Panasbumi Indonesia. Jakarta.
- Unsworth, M.J. 1999. *Magnetotelluric*. McGraw-Hill. New York.
- Utami, Pri. 1998. *Energi Panasbumi*. Jurnal Energi. 2 : hal 39-42.
- Vozoff, K. 1991. *The Magnetotelluric Method*. Society of Exploration Geophysicists.
- Wirakusumah, A. D., Oman Abdurahman, dan Atep Kurnia. 2013. *Hubungan Tektonik dan Potensi Panasbumi di Indonesia*. Majalah Geologi Populer GeoMagz. 3 (3) : 64-67.

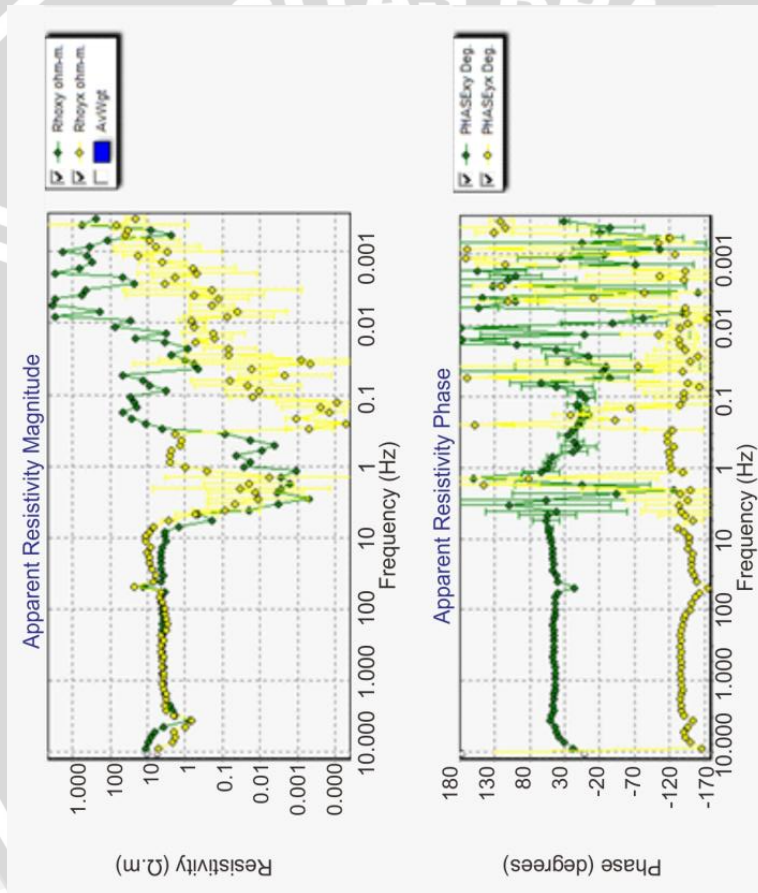
Xiao, W. 2004. *Magnetotelluric Exploration in the Rocky Mountain Foothills*. Master Thesis University of Alberta. Alberta.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

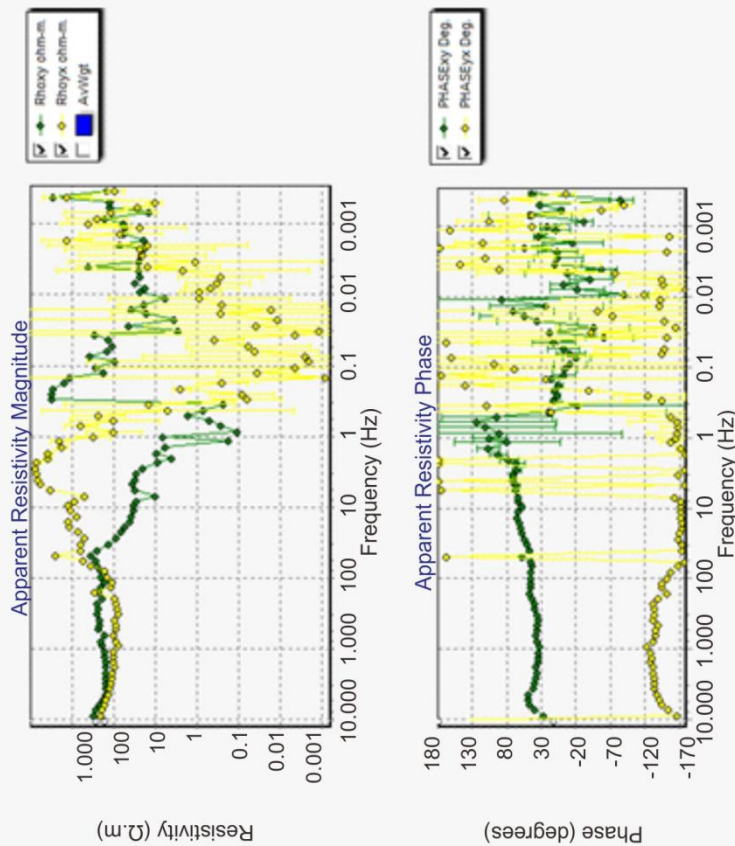


LAMPIRAN 1

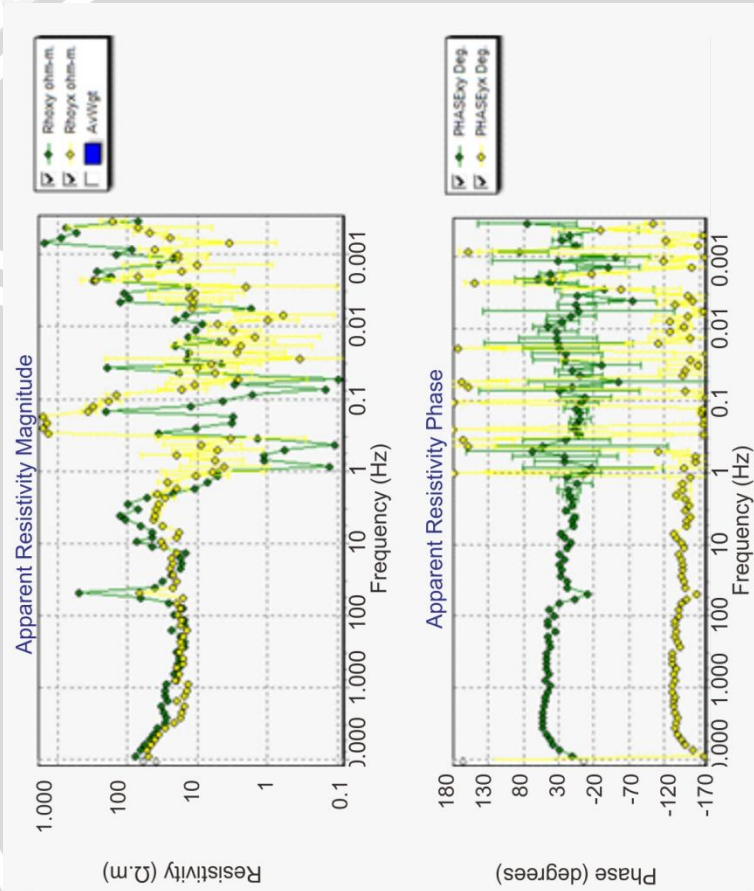
Data



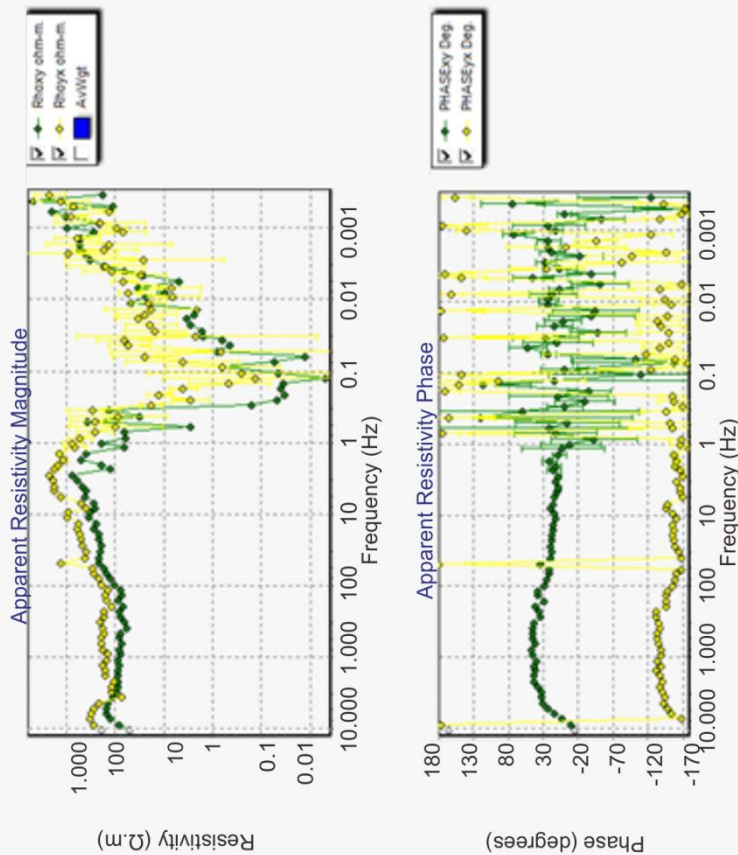
Gambar L1.1.1. Data titik 01



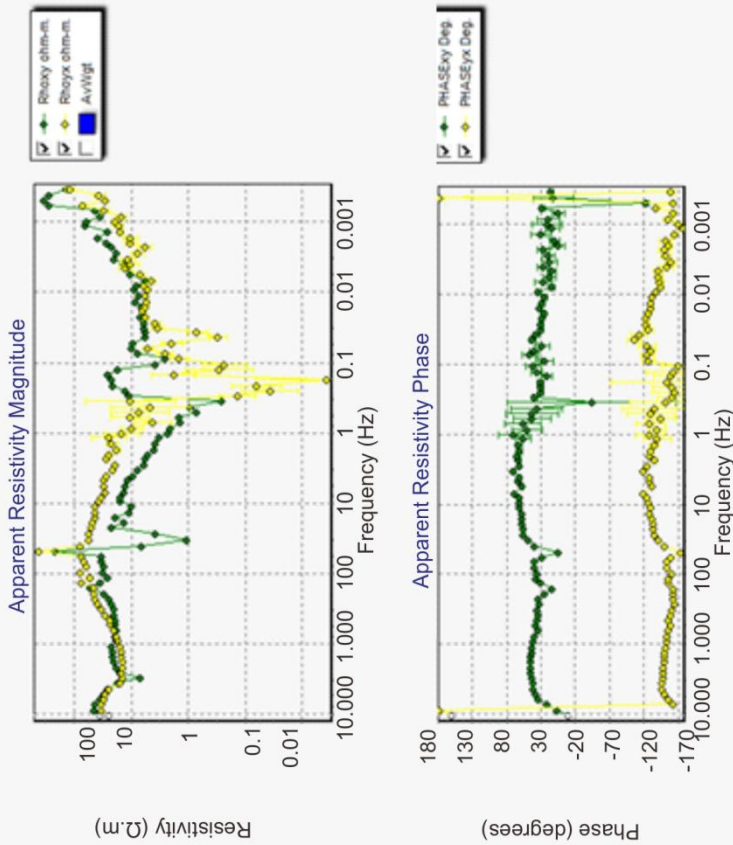
Gambar L.1.2. Data titik 02



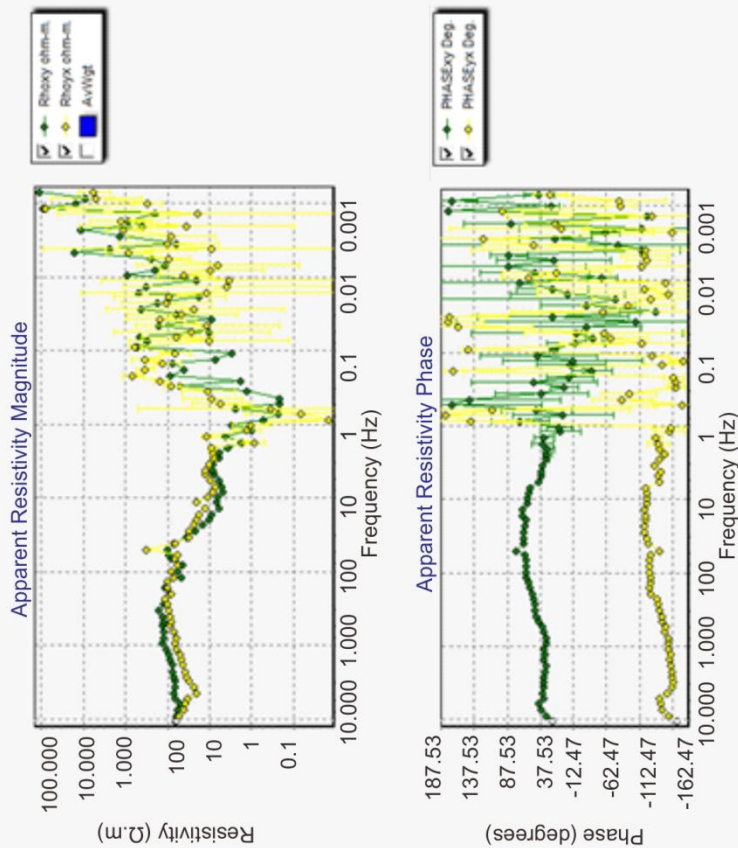
Gambar L.1.3. Data titik 03



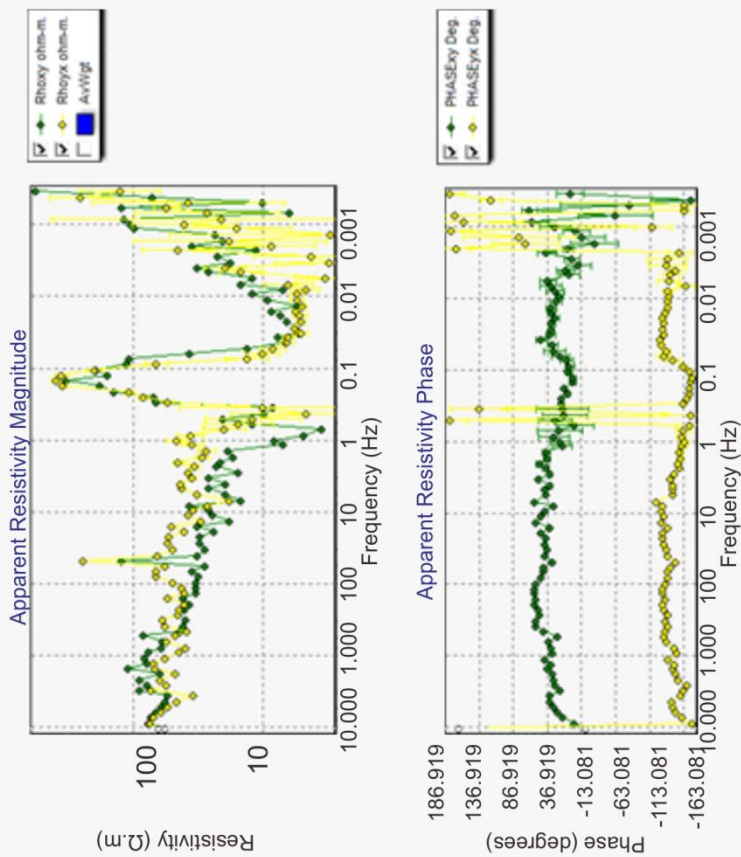
Gambar L.1.4. Data titik 04



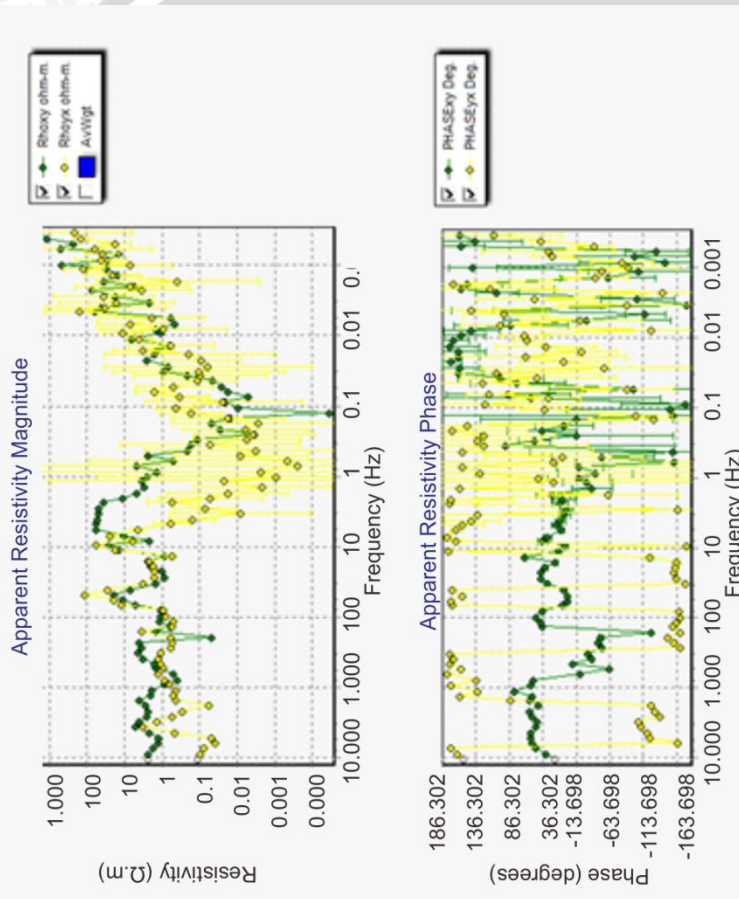
Gambar L.1.5. Data titik 05



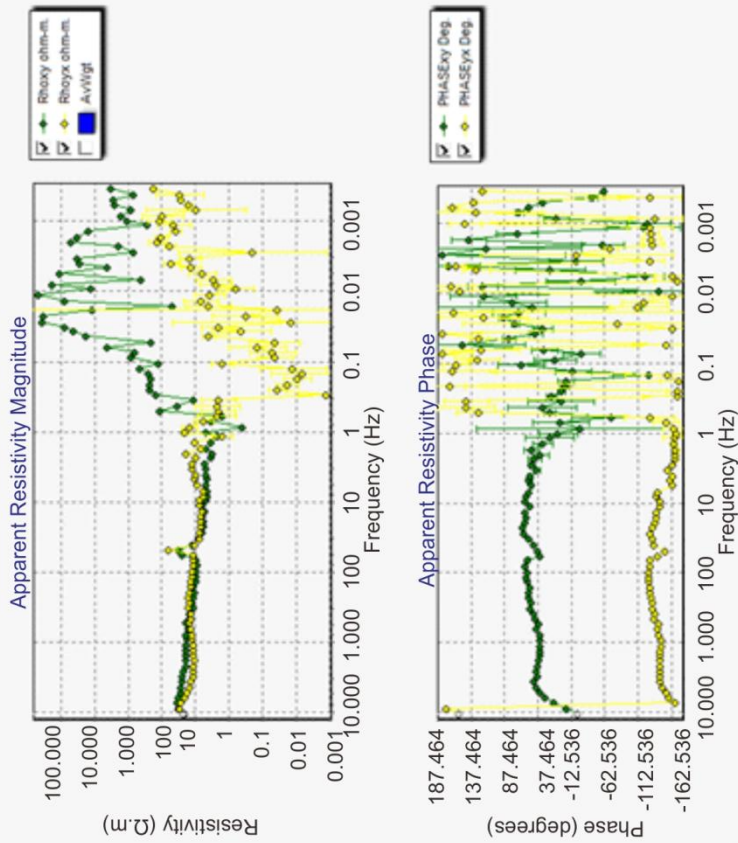
Gambar L.1.6. Data titik 06



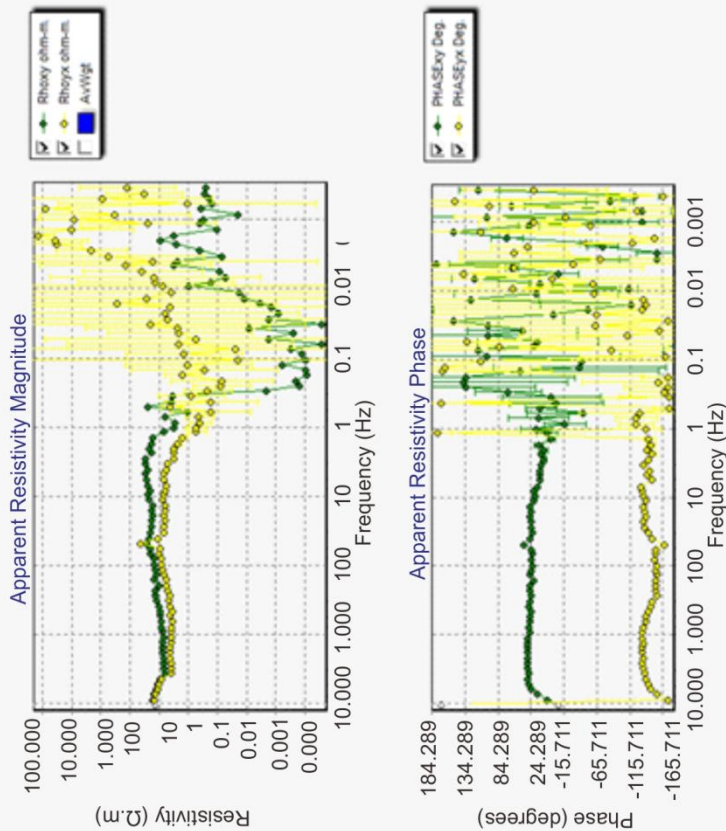
Gambar L.1.7. Data titik 07



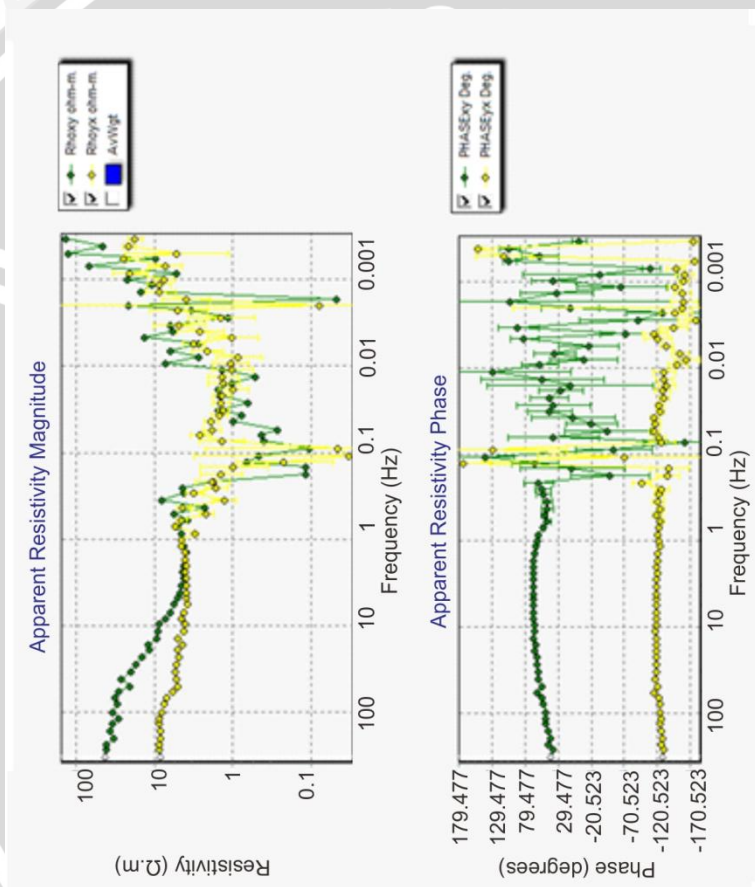
Gambar L.1.8. Data titik 08



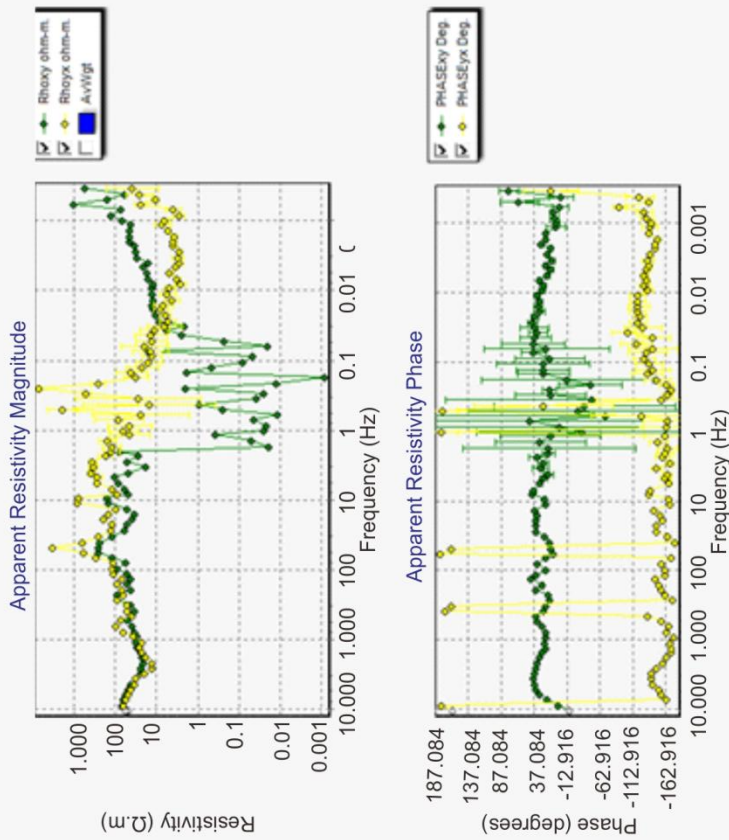
Gambar L.1.9. Data titik 09



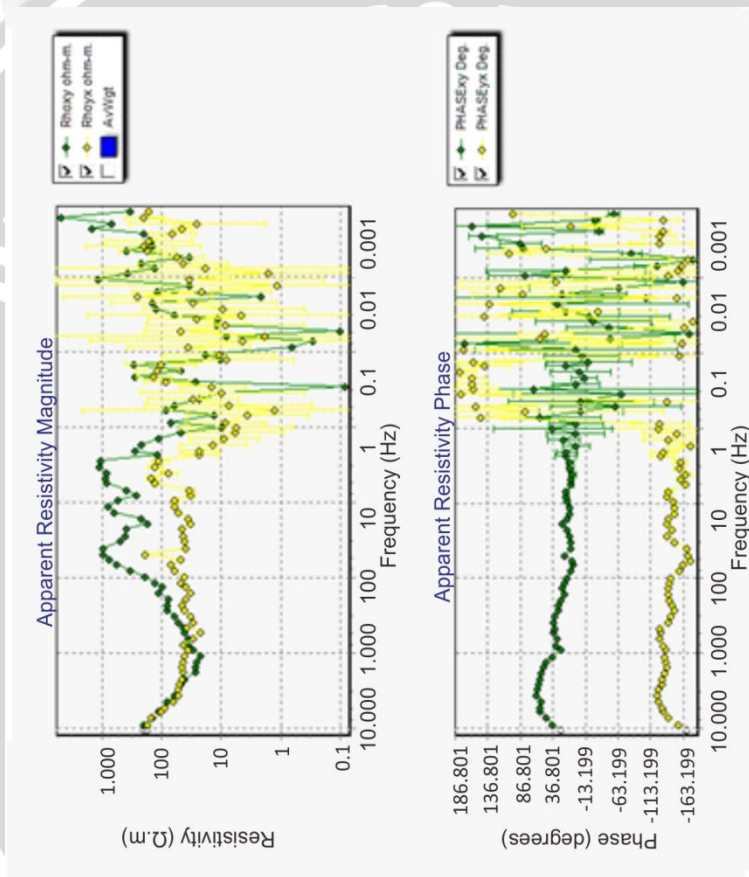
Gambar L1.10. Data titik 10



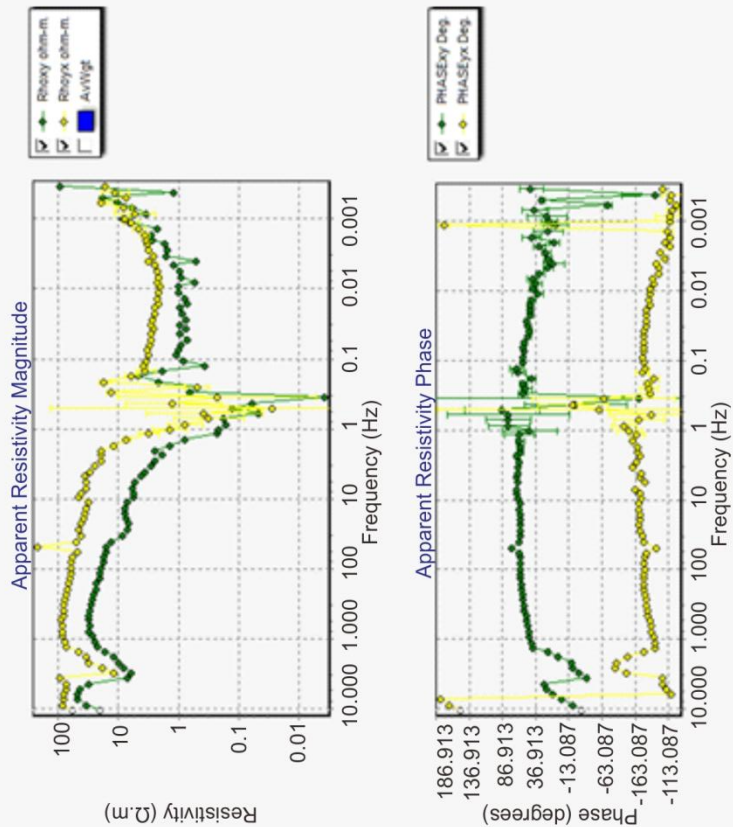
Gambar L1.11. Data titik 11



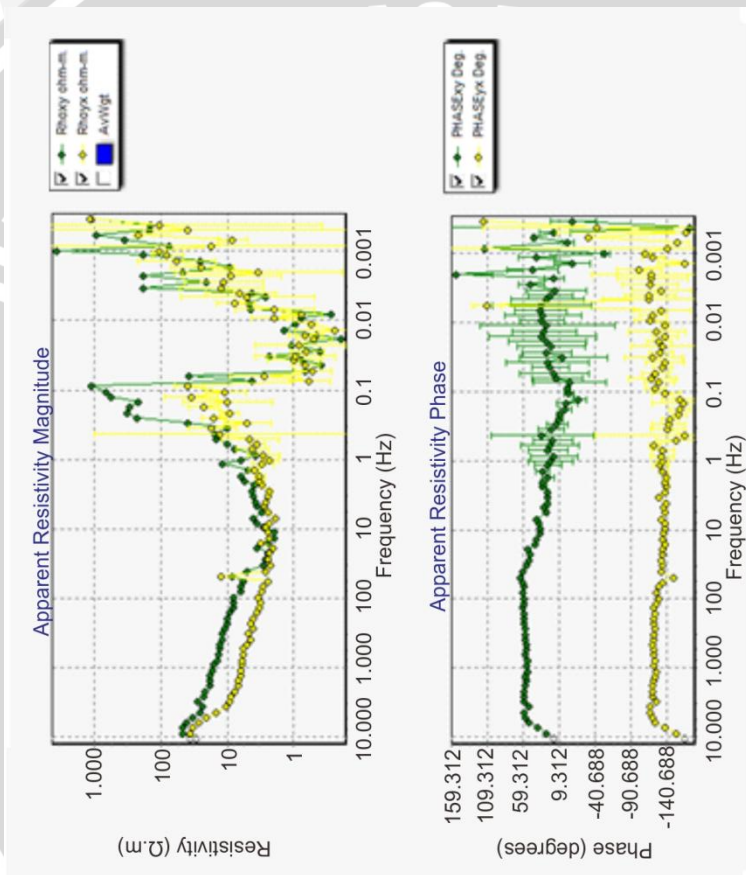
Gambar L1.12. Data titik 12



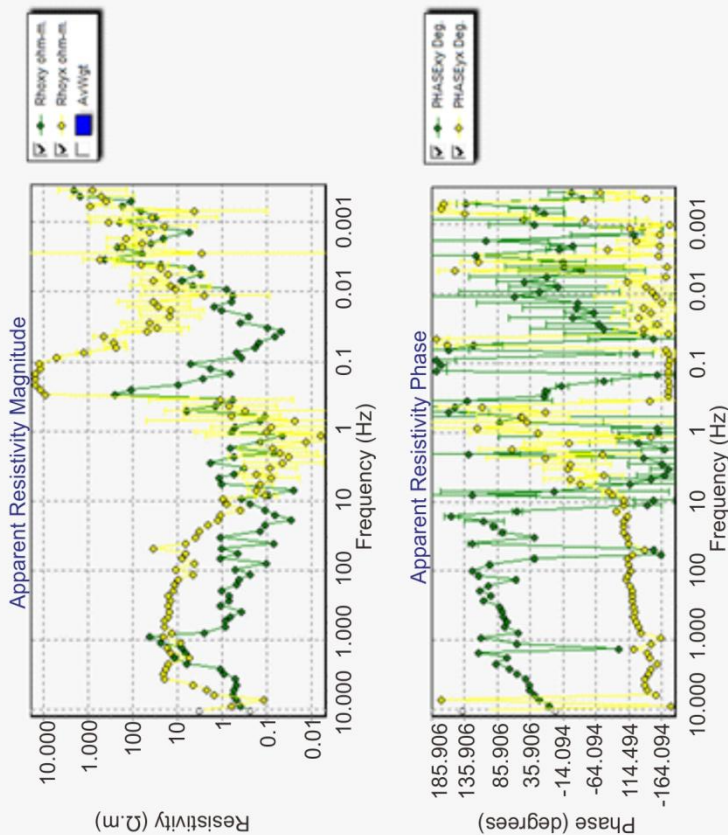
Gambar L1.13. Data titik 13



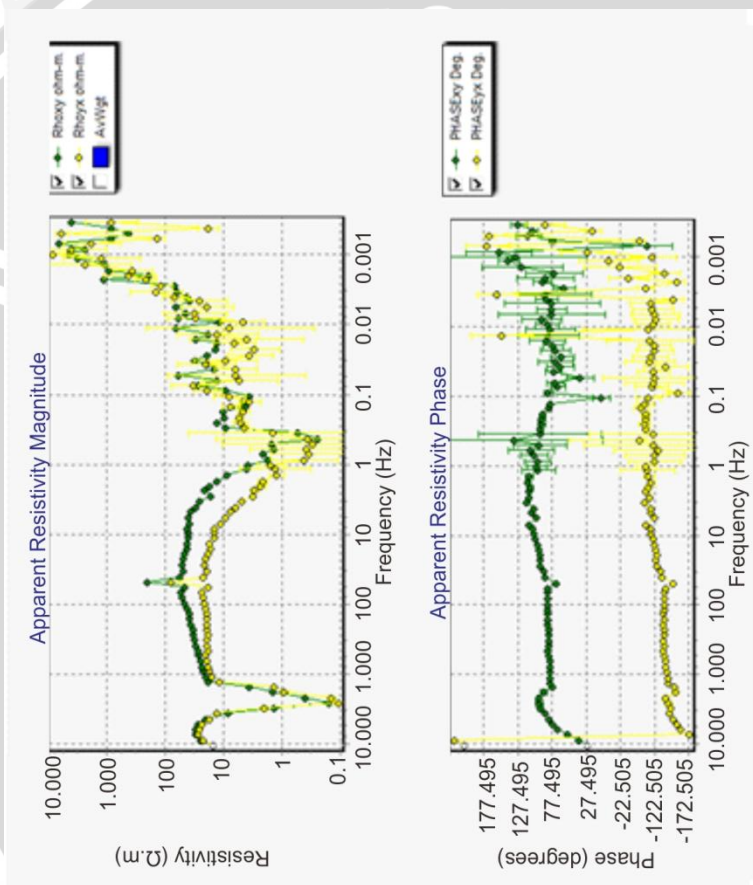
Gambar L1.14. Data titik 14



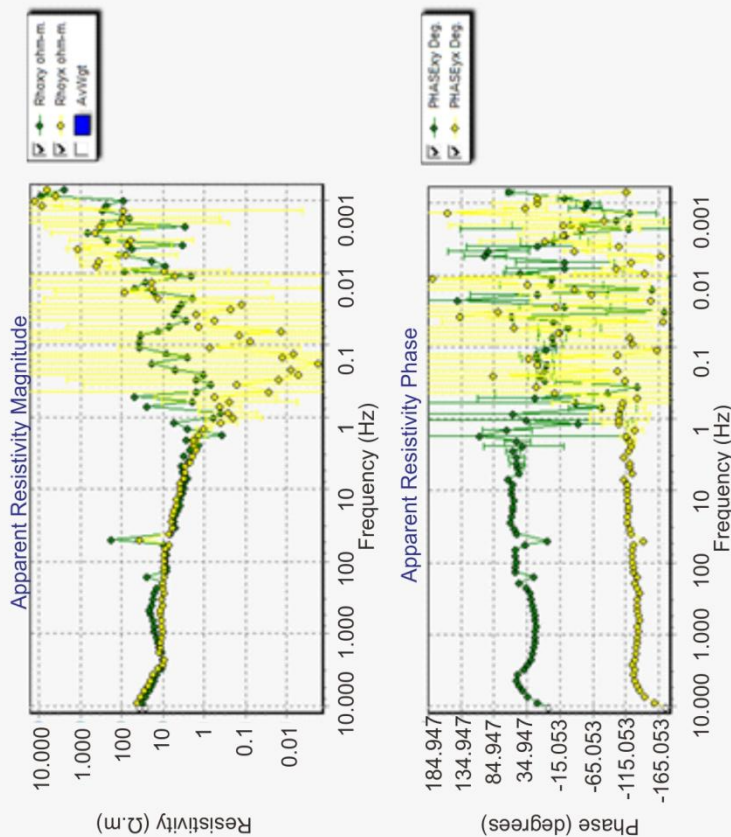
Gambar L1.15. Data titik 15



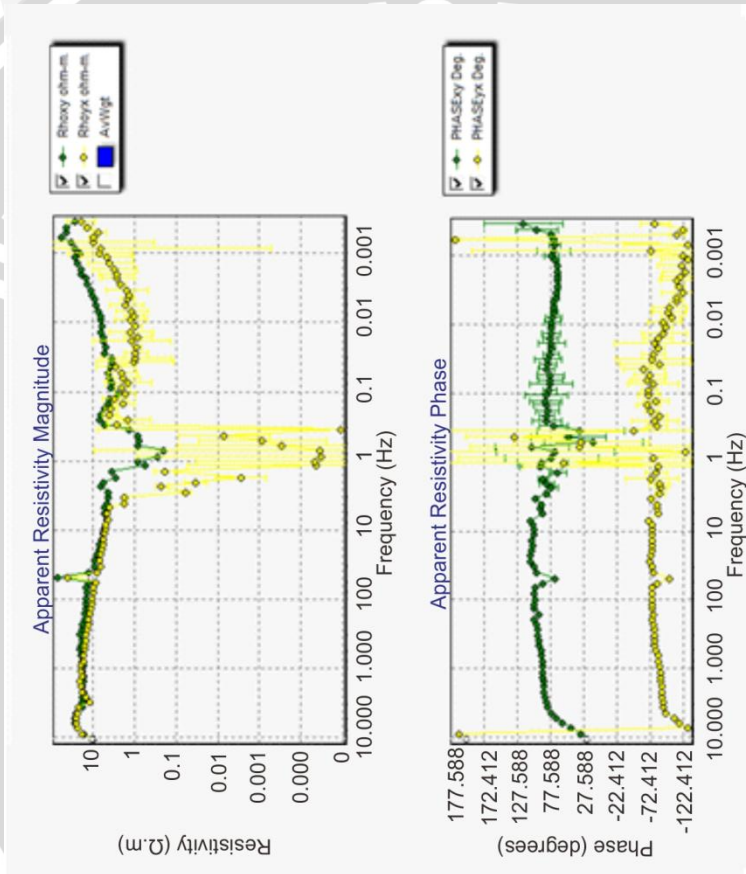
Gambar L1.16. Data titik 16



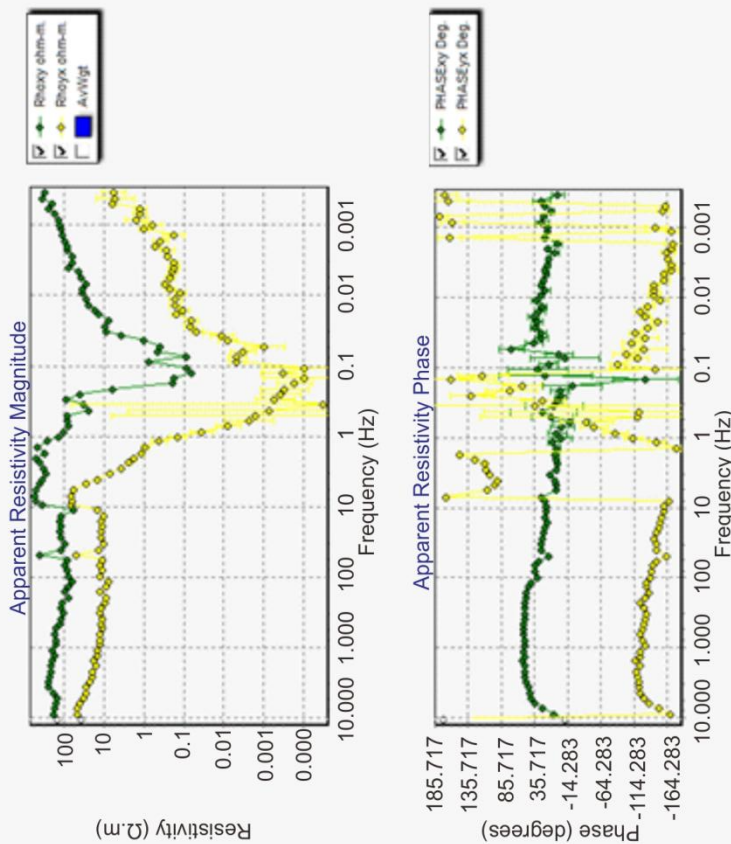
Gambar L1.17. Data titik 17



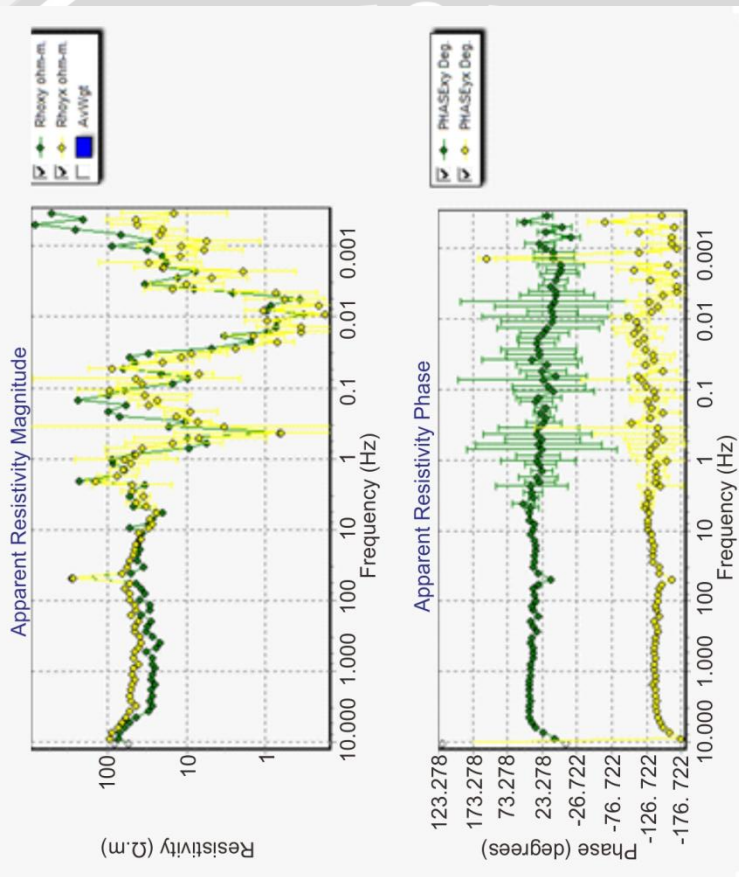
Gambar L1.18. Data titik 18



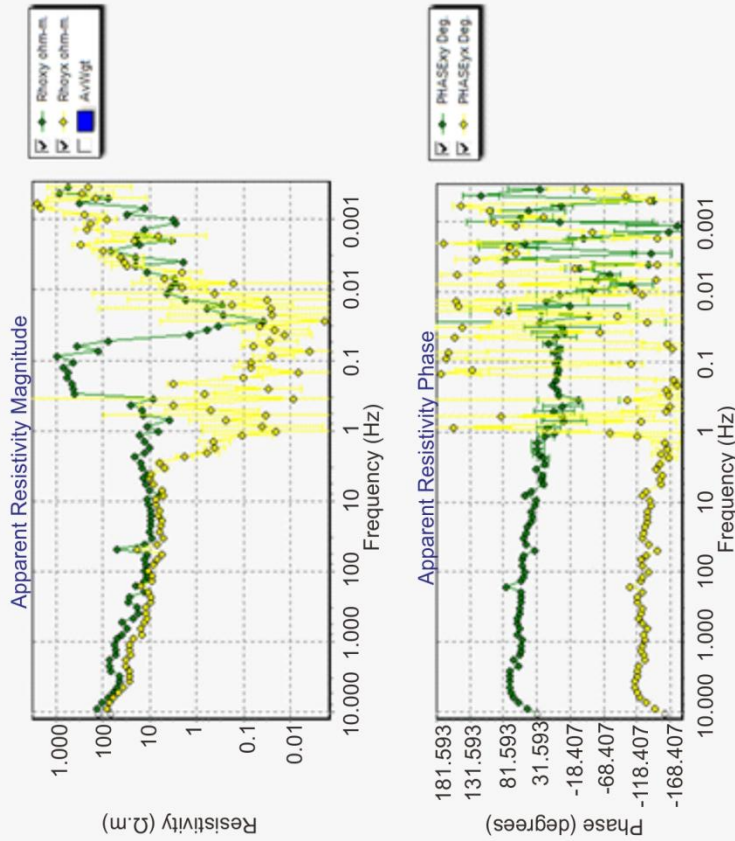
Gambar L1.19. Data titik 19



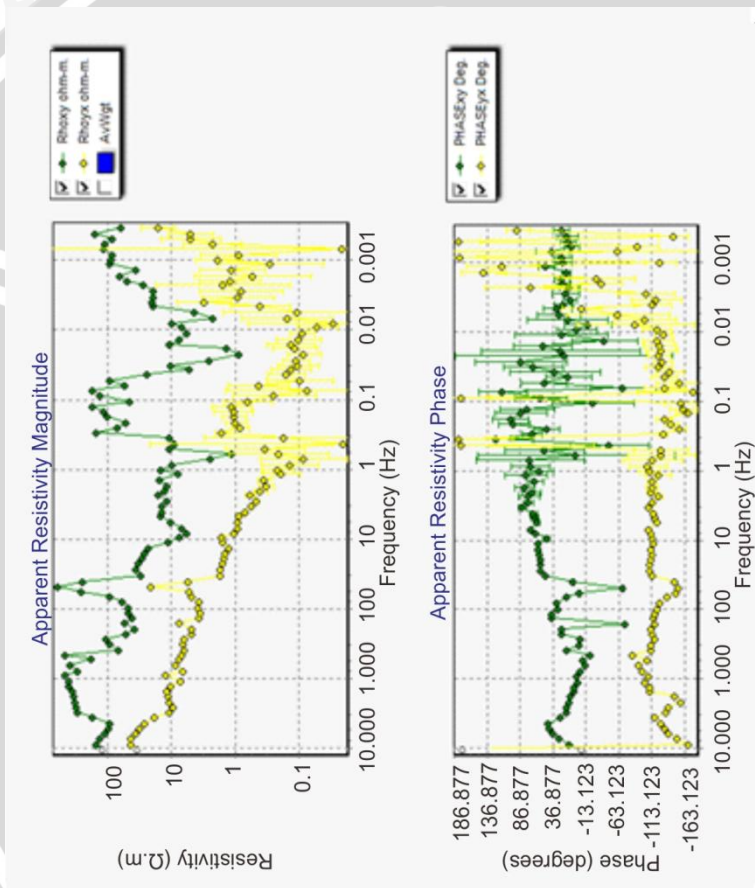
Gambar L1.20. Data titik 20



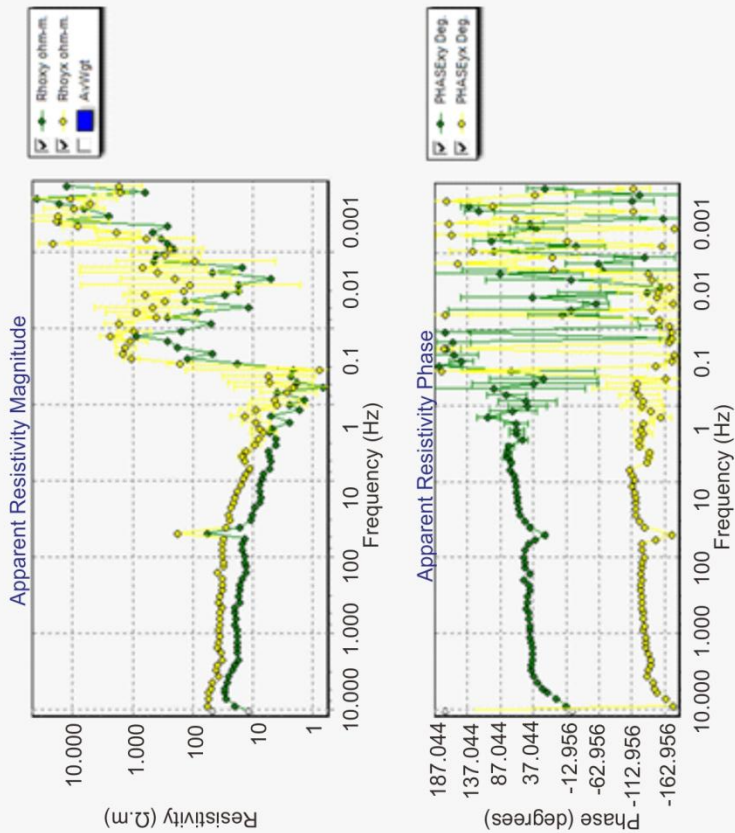
Gambar L1.21. Data titik 21



Gambar L1.22. Data titik 22



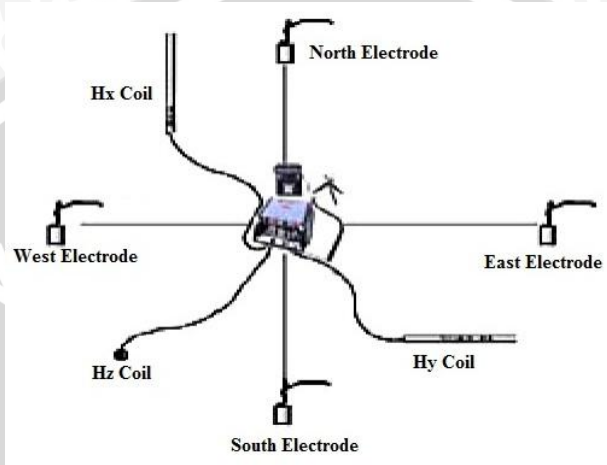
Gambar L1.23. Data titik 23



Gambar L1.24. Data titik 24

LAMPIRAN 2

Dokumentasi Akuisisi Data



Gambar L2.1. Konfigurasi akuisisi magnetotellurik



Gambar L2.2. Koil magnetik



Gambar L2.3. Porous pot

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

