

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAN POTENSI PANAS BUMI  
DAERAH CANGAR, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE  
MAGNETOTELURIK DAN DATA GEOKIMIA**

**TESIS**

**Untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Magister Sains dalam bidang Fisika**



**Oleh:  
RAHMAWATI  
156090300011001**

**PROGRAM STUDI ILMU FISIKA  
MINAT GEOFISIKA**

**PROGRAM PASCASARJANA FAKULTAS MIPA  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**





TESIS

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAN POTENSI PANAS BUMI  
DAERAH CANGAR, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE  
MAGNETOTELURIK DAN DATA GEOKIMIA**

Oleh:

**Rahmawati**

**156090300011001**

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji

pada tanggal 19 Juli 2018

dan dinyatakan LULUS

Menyetujui,

Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota

Sukir Maryanto, Ph.D

NIP. 197106211998021001

Adi Susilo, Ph.D

NIP.196312271991031002

Mengetahui,

**Ketua Program Studi S2 Fisika**

Mauludi Ariesto Pamungkas, Ph.D

NIP.197304122000031013

**JUDUL TESIS:**

**IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAN POTENSI PANAS BUMI  
DAERAH CANGAR, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE  
MAGNETOTELURIK DAN DATA GEOKIMIA**

Nama Mahasiswa : Rahmawati

NIM : 156090300011001

Program Studi : S2 Ilmu Fisika

Minat : Geofisika

**KOMISI PEMBIMBING**

Ketua : Sukir Maryanto, Ph.D

Anggota : Adi Susilo, Ph.D

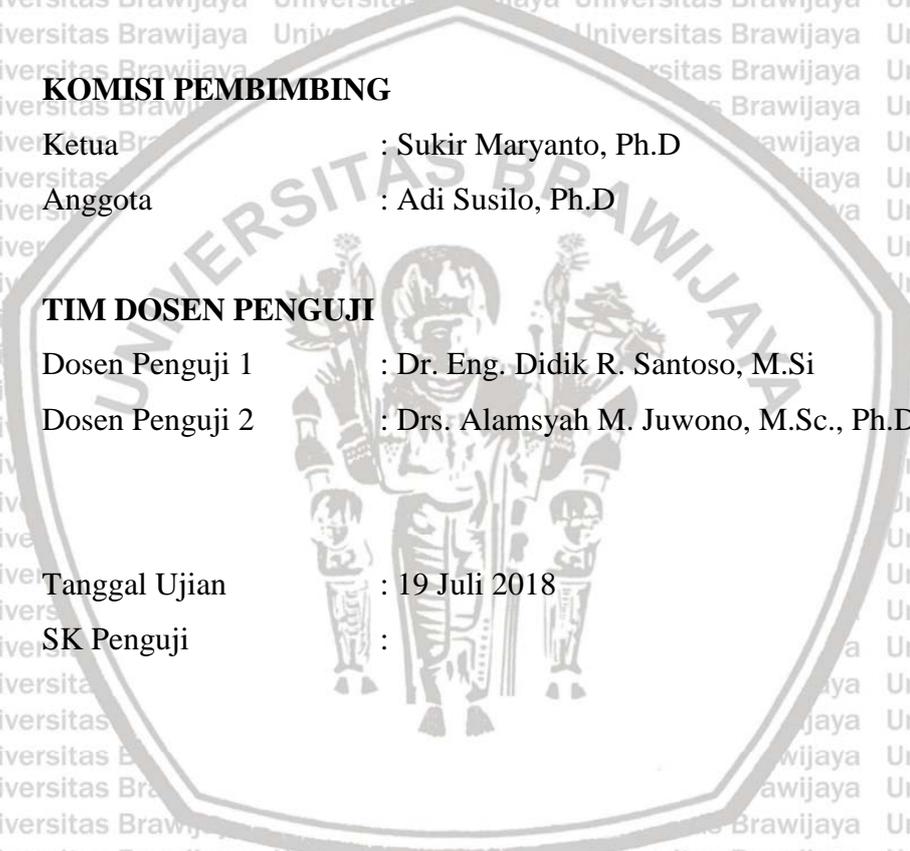
**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Didik R. Santoso, M.Si

Dosen Penguji 2 : Drs. Alamsyah M. Juwono, M.Sc., Ph.D

Tanggal Ujian : 19 Juli 2018

SK Penguji :



**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan (plagiat) tesis, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, Juli 2018

Rahmawati  
NIM. 156090300011001

## RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Rahmawati, lahir di Kediri, Lombok Barat, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Penulis merupakan putri dari bapak bernama H. Maskun dan ibu bernama Hj. Rohani. Penulis menempuh pendidikan formal Sekolah Dasar pada tahun 1999-2005 di SDN 2 Banyumulek, Sekolah Menengah Pertama pada tahun 2005-2008 di SMPN 1 Gerung dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 Mataram 2008-2011.

Tahun 2010-2014 penulis menempuh pendidikan tinggi sebagai mahasiswa Program Studi Fisika di FMIPA Universitas Mataram melalui jalur Seleksi Masuk Unggulan Daerah (SMUD). Tahun 2015/2 penulis melanjutkan studi pascasarjana pada Jurusan Fisika bidang minat Geofisika di FMIPA Universitas Brawijaya (UB) Malang.

Malang, Juli 2018

Penulis

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua yaitu H. Maskun dan Hj. Rohani dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan dukungan dan do'a.
2. Bapak Sukir Maryanto, Ph.D dan Adi Susilo, Ph.D, selaku pembimbing I dan pembimbing II atas waktu yang telah diluangkan untuk memberi bimbingan dan nasehat.
3. Bapak Dr. Eng. Didik Rahadi Santoso, M.Si dan Drs. Alamsyah M. Juwono, M.Sc, Ph.D, selaku tim dosen penguji yang telah memberikan saran untuk perbaikan tesis ini.
4. Dana hibah penelitian dari PTUPT No. Ristek Dikti No. : 063/SP2H/LT/DPRM/IV/2017 yang telah mendanai sebagian penelitian sehingga penelitian ini dapat terlaksana.
5. Direktur *Agrotechno Park* UB Cangar dan Kepala Taman Hutan Raya R. Soeryo yang telah mengizinkan pengambilan data di lokasi.
6. Seluruh bapak/ibu dosen Jurusan S2 Fisika yang telah memberikan banyak ilmu.
7. Teman-teman Fisika angkatan 2015/2 dan tim Cangar atas segala bantuan, kerjasama dan kebersamaannya selama penelitian di Cangar.
8. Sahabat-sahabat yang selalu memberikan motivasi, do'a dan dukungan dalam penyusunan tesis ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

# IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAN POTENSI PANAS BUMI DAERAH CANGAR, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE MAGNETOTELURIK DAN DATA GEOKIMIA

## ABSTRAK

Penelitian mengenai sistem panas bumi telah dilakukan di daerah Cangar, kompleks Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur. Metode yang digunakan adalah metode magnetotelurik dan data geokimia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sistem panas bumi berdasarkan persebaran resistivitas, menentukan tipe air dan temperatur reservoir, serta potensi panas bumi Cangar. Akuisisi data magnetotelurik dilakukan di 11 titik dengan spasi 70 meter sampai 150 meter, yang terbagi menjadi 5 lintasan. Berdasarkan hasil pengolahan data magnetotelurik diperoleh rentang nilai resistivitas berkisar antara  $4 \Omega.m - 2000 \Omega.m$ . Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah Cangar terdiri dari lapisan penudung ( $\leq 21 \Omega.m$ ), lapisan reservoir ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) dan lapisan sumber panas ( $\geq 167 \Omega.m$ ). Sementara itu, berdasarkan data geokimia, diketahui bahwa tipe air panas di daerah Cangar adalah bikarbonat, dan memiliki temperatur reservoir  $\pm 300^\circ C$ . Korelasi dari metode magnetotelurik dan data geokimia digunakan untuk perhitungan potensi panas bumi. Berdasarkan hasil perhitungan potensi panas bumi daerah penelitian diperoleh sebesar 4,8 MW.

**Kata Kunci:** Cangar, geokimia, magnetotelurik, panas bumi

## IDENTIFICATION SYSTEM AND POTENTIAL GEOTHERMAL OF CANGAR, EAST JAVA BASED ON MAGNETOTELLURIC AND GEOCHEMICAL DATA

### ABSTRACT

A research has been done in Cangar area of complex of Mt. Arjuno-Welirang, East Java. This research uses magnetotelluric method and geochemical data. The purpose of this research are to identify the geothermal system of research area based on its resistivity values, types of fluids and temperatures of reservoir, and also to determine the energy potential of research area. Acquisitions of magnetotelluric data were done in 11 points with spaces of 70 meters up to 150 meters. Magnetotelluric measurement points is divided into 5 profile. Based on the result of data processing given range resistivity value in research area between 4  $\Omega$ .m up to 2000  $\Omega$ .m. The result of modeling geothermal system in Cangar indicated of caprock ( $\leq 21 \Omega$ .m), reservoir (21  $\Omega$ .m – 167  $\Omega$ .m) and a heat source ( $\geq 167 \Omega$ .m). Meanwhile, based on geochemical data, it is found that type of fluid is bicarbonate and the reservoir temperature is approximately  $\pm 300^\circ\text{C}$ . Correlations of magnetotelluric method and geochemical data are used to calculate of geothermal potential. Based on the calculation of the geothermal potential of the research area is 4,8 MW<sub>e</sub>.

**Keywords:** Cangar, magnetotelluric, geochemical, geothermal

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karuniaNya yang tak terbatas sehingga tesis dengan judul “Identifikasi Sistem Panas Bumi dan Potensi Panas Bumi Daerah Cagar, Jawa Timur menggunakan Metode Magnetotelurik dan Data Geokimia” dapat diselesaikan.

Segala kesulitan dan hambatan yang terjadi dalam penulisan tesis ini dapat teratasi karena adanya bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya untuk berbagai pihak yang telah terlibat dalam penulisan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini tidak lepas dari kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu, pendapat, kritik, maupun saran dari semua pihak sangat diharapkan untuk perbaikan tesis ini. Semoga segala yang tertulis dalam tesis ini dapat bermanfaat untuk dipahami bagi penulis dan semua orang yang membacanya, serta dapat dikembangkan sesuai dengan kemajuan ilmu pengetahuan.

Malang, Juli 2018

Rahmawati

**DAFTAR ISI**

<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>IDENTITAS TIM PENGUJI.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RIWAYAT HIDUP.....</b>	<b>v</b>
<b>UCAPAN TERIMAKASIH .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Panas Bumi.....	6
2.2 Magma.....	8
2.3 Metode Magnetotelurik.....	9
2.3.1 Sumber Sinyal Magnetotelurik.....	10
2.3.2 Prinsip Penjalaran Gelombang.....	10
2.3.3 Tensor Impedansi.....	14
2.4 Transformasi Fourier.....	16
2.5 Sifat Kelistrikan Batuan.....	16
2.6 Geokimia Panas Bumi.....	17
2.6.1 Tipe Air Panas.....	18
2.6.2 Geotermometer Unsur.....	19



2.7 Metode Estimasi Potensi Energi.....	22
2.7.1 Rumus Dasar Perhitungan.....	24
2.7.2 Angka Parameter.....	25
2.8 Geologi Kompleks Arjuno-Welirang.....	27
2.9 Manifestasi Air Panas Kompleks Arjuno-Welirang.....	29
2.10 Penelitian Terdahulu.....	31
2.10.1 Metode Resistivitas.....	31
2.10.2 Geomagnetik.....	33
<b>BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....</b>	<b>37</b>
<b>BAB IV METODE PENELITIAN.....</b>	<b>40</b>
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	40
4.2 Akusisi Data Penelitian.....	40
4.3 Pengolahan Data Magnetotelurik.....	44
4.3.1 Transformasi <i>Fourier</i> .....	45
4.3.2 Seleksi Data dan <i>Filtering Data</i> .....	48
4.3.3 <i>Smoothing Data</i> .....	52
4.3.4 Pemodelan.....	54
4.4 Pengolahan Data Geokimia.....	54
4.5 Interpretasi.....	55
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>57</b>
5.1 Analisa Hasil.....	57
5.1.1 Analisa Hasil Magnetotelurik.....	57
5.1.2 Analisa Hasil Data Geokimia.....	68
5.2 Pembahasan.....	70
5.3 Potensi Energi Panas Bumi.....	77
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>81</b>
6.1 Kesimpulan.....	81
6.2 Saran.....	81
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>82</b>
<b>LAMPIRAN 1.....</b>	<b>87</b>
Koordinat titik pengukuran.....	87

LAMPIRAN 2.....	88
Data MT.....	88
LAMPIRAN 3.....	96
Hasil inversi pemodelan 2D.....	96
LAMPIRAN 4.....	101
Dokumentasi pengambilan data.....	101
LAMPIRAN 5.....	102
Perhitungan potensi panas bumi.....	102



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema sistem panas bumi ideal (Dickson dan Fanelli, 2003).....7

Gambar 2.2 Proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi (Unsworth, 1999) .....11

Gambar 2.3 Peta geologi kompleks Arjuno-Welirang modifikasi dari (Hadi dkk, 2011).....28

Gambar 2.4 Desain perencanaan *Agrotechno Park* UB di daerah Cangar.....29

Gambar 2.5 (a) Interpretasi *mapping* lintasan 1 dan (b) *mapping* lintasan 2 (Rakhmanto dkk., 2011).....31

Gambar 2.6 Interpretasi *mapping* lintasan 3 dan lintasan 4 (Rakhmanto dkk., 2011).....32

Gambar 2.7 Interpretasi tomografi geolistrik (Rakhmanto dkk., 2011).....33

Gambar 2.8 Kontur anomali residual dengan interval 60 nT (Afandi dkk., 2012).....34

Gambar 2.9 Sayatan A-B dan C-D pada anomali residual dengan interval 40 nT (Afandi dkk., 2012).....34

Gambar 2.10 Penampang sayatan A-B (Afandi dkk., 2012).....36

Gambar 2.11 Penampang sayatan C-D (Afandi dkk., 2012) .....36

Gambar 3.1 Diagram Kerangka Penelitian .....39

Gambar 4.1 Desain survei akuisisi metode magnetotelurik.....41

Gambar 4.2 Konfigurasi alat dalam akuisisi magnetotelurik modifikasi dari (Zanuar, 2009).....43

Gambar 4.3 Diagram alir pengolahan data magnetotelurik .....44

Gambar 4.4 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 65 kHz.....45

Gambar 4.5 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 4 kHz.....45

Gambar 4.6 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 128 Hz.....45

Gambar 4.7 Contoh data dalam domain frekuensi (128 Hz) .....47

Gambar 4.8 Contoh data yang mengalami tumpang tindih.....49

Gambar 4.9 Contoh data setelah dilakukan seleksi data.....50

Gambar 4.10 Contoh data setelah dilakukan *filtering* data.....51

Gambar 4.11 Contoh data dilakukan *smoothing* .....53

Gambar 5.1 Kontur elevasi daerah penelitian ..... 57

Gambar 5.2 Model Penampang 2D Lintasan 1 ..... 59

Gambar 5.3 Model Penampang 2D Lintasan 2 ..... 61

Gambar 5.4 Model Penampang 2D Lintasan 3 ..... 63

Gambar 5.5 Model Penampang 2D Lintasan 4 ..... 65

Gambar 5.6 Model Penampang 2D Lintasan 5 ..... 66

Gambar 5.7 Pemodelan *fence* sistem panas bumi daerah penelitian ..... 67

Gambar 5.8 Diagram  $Cl-SO_4-HCO_3$  ..... 69

Gambar 5.9 Diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  Arjuno-Welirang (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017) ..... 76



**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1	Reristivitas dari beberapa batuan dan mineral (Telford dkk., 1990).....	17
Tabel 2.2	Klasifikasi reservoir dan asumsi-asumsi yang digunakan dalam estimasi potensi energi panas bumi (Badan Standardisasi Indonesia, 1999).....	23
Tabel 2.3	Asumsi angka parameter pada kelas sumber daya hipotesis (Badan Standardisasi Nasional, 2000).....	26
Tabel 2.4	Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan terduga (Badan Standardisasi Nasional, 2000).....	26
Tabel 2.5	Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan mungkin (Badan Standardisasi Nasional, 2000).....	26
Tabel 2.6	Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan terbukti (Badan Standardisasi Nasional, 2000).....	27
Tabel 5.1	Data Geokimia Fluida Panas .....	68
Tabel 5.2	Geotermoter <i>Na-K</i> .....	70
Tabel 5.3	Asumsi dan acuan yang digunakan untuk perhitungan parameter.....	78
Tabel 5.4	Hasil perhitungan potensi energi panas bumi Cangar.....	79

**DAFTAR LAMPIRAN**

**LAMPIRAN 1**

Koordinat titik pengukuran ..... 87

**LAMPIRAN 2**

Data MT ..... 88

**LAMPIRAN 3**

Hasil inversi pemodelan 2D ..... 96

**LAMPIRAN 4**

Dokumentasi pengambilan data ..... 101

**LAMPIRAN 5**

Perhitungan potensi panas bumi ..... 102

**LAMPIRAN 6**

Deteksi plagiasi ..... 104



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi terdapat dan terbentuk secara alami di dalam kerak bumi (Broto dan Putranto, 2011). Berdasarkan data Badan Geologi Kementerian Energi Sumber Daya Mineral tahun 2010, Indonesia memiliki potensi yang cukup besar yaitu sekitar 29  $\text{GW}_e$  atau setara 40% dari potensi panas bumi dunia (Fandari dkk., 2014). Sumber daya panas bumi di Indonesia tersebar di 312 daerah (Bertani, 2015).

Akan tetapi dari segi pengembangan dan pemanfaatan panas bumi masih kurang, yaitu sekitar 9% yang telah dimanfaatkan dari total potensi sumber panas bumi yang ada di Indonesia (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017). Sehingga perlu dilakukan eksplorasi panas bumi lebih lanjut agar dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Pulau Jawa memiliki potensi panas bumi cukup besar yang tersebar di 71 daerah dengan estimasi energi panas bumi sebesar 10  $\text{GW}_e$  (Herdianita dkk., 2012).

Pulau Jawa merupakan bagian dari mikrokontinen *Sunda Land*, yang terbentuk akibat interaksi konvergen antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Subduksi lempeng samudera di bawah mikrokontinen *Sunda Land* membentuk busur vulkanik di sepanjang selatan Pulau Jawa. Aktivitas gunung berapi ditunjukkan dengan terbentuknya gunungapi strato andesit yang berpotensi sebagai sistem hidrotermal di Pulau Jawa (Herdianita dkk., 2012). Daerah Jawa Timur bagian selatan berada pada jalur vulkanik yang dikenal dengan jalur *ring of fire*.

Terbentuknya sistem panas bumi terkait dengan keberadaan gunungapi aktif.

Kompleks Arjuno-Welirang merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi

panas bumi di Jawa Timur. Manifestasi panas bumi yang berada di kompleks Arjuno-Welirang berupa fumarol, alterasi dan beberapa mata air panas (Hadi dkk., 2011). Salah satu manifestasi mata air panas kompleks Arjuno-Welirang terdapat di desa Tulungrejo, Kecamatan Bumiaji, Kota Batu, Jawa Timur yaitu panas bumi Cangar.

Penelitian terdahulu di kompleks Arjuno-Welirang pernah dilakukan oleh tim PSDG (Pusat Sumber Daya Geologi) dengan menggunakan beberapa metode geofisika yaitu salah satunya adalah magnetotelurik (Sugianto dkk., 2010). Hasil dari penelitian tersebut adalah teridentifikasi lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah ( $<20 \Omega.m$ ) diinterpretasikan sebagai lapisan penudung. Sebaran nilai resistivitas rendah ini cukup luas yaitu berada di sebelah utara dan barat puncak Gunung Arjuno-Welirang (di sekitar fumarol Gunung Welirang melebar ke utara melewati mata air panas Padusan dan membuka ke sebelah barat, dan barat daya melalui air panas Cangar dan mata air panas Coban) yang melingkupi seluruh manifestasi panas bumi permukaan. Selain itu teridentifikasi adanya lapisan dengan nilai resistivitas sedang ( $20 \Omega.m - 100 \Omega.m$ ) yang berada di bawah lapisan penudung. Lapisan dengan nilai resistivitas sedang, diinterpretasikan sebagai lapisan reservoir. Resistivitas ini tersebar di bagian tengah antara fumarol Gunung Welirang, mata air panas Padusan, Cangar dan Coban. Berdasarkan data magnetotelurik daerah yang memiliki potensi panas bumi berada di sebelah barat dan barat daya puncak Gunung Welirang (Sugianto dkk., 2010).

Beberapa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan di daerah Cangar adalah metode geolistrik resistivitas yaitu *Electrical Resistivity Tomography* (Rahmanto dkk., 2011) dan geomagnetik (Afandi dkk., 2012). Berdasarkan

penelitian dari metode geolistrik resistivitas (*ERT*) teridentifikasi nilai resistivitas rendah yaitu  $\leq 10 \Omega.m$ , diduga sebagai lapisan pembawa fluida panas. Terdapat beberapa rekahan batuan di sekitar mata air panas, yang diduga sebagai media aliran panas untuk keluar ke permukaan. Keberadaan panas bumi di Cangar ditandai oleh mata air panas yang terdapat di dekat kolam pemandian (Rakhmanto dkk, 2011).

Metode geolistrik sensitif dalam mendeteksi keberadaan air panas namun memiliki penetrasi dangkal (Maryanto dkk., 2016). Sementara itu, berdasarkan metode geomagnetik diketahui bahwa terdapat anomali rendah yaitu  $-1.000 \text{ nT}$ . Nilai anomali rendah tersebut menunjukkan nilai suseptibilitas yang rendah pula. Nilai suseptibilitas yang rendah tersebut menunjukkan adanya potensi panas bumi (Afandi dkk., 2012).

Berdasarkan penelitian terdahulu, hasil yang diperoleh belum cukup detail untuk mengetahui sistem panas bumi Cangar, dan besar potensi panas bumi di daerah penelitian. Pada penelitian ini, selain dilakukan di sekitar air panas Cangar juga dilakukan perluasan area ke *Agrotechno Park* Cangar milik Universitas Brawijaya yang berada di sebelah utara dari kolam pemandian. Metode yang direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya adalah metode magnetotelurik. Selain itu, data geokimia digunakan untuk mendukung hasil metode magnetotelurik.

Metode magnetotelurik merupakan salah satu metode geofisika non seismik yang bersifat pasif, yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik. Medan elektromagnetik ketika menembus bumi (bumi sebagai konduktor) menghasilkan arus yaitu arus telurik. Arus induksi tersebut menghasilkan medan magnet sekunder (Simpson dan Bahr, 2005). Magnetotelurik mampu menggambarkan sistem panas

bumi secara detail karena memiliki penetrasi yang cukup dalam. Sebagai data pendukung magnetotelurik dibutuhkan data geokimia dari manifestasi panas bumi.

Geokimia digunakan untuk mengetahui karakteristik fluida panas bumi, yaitu untuk identifikasi tipe air panas dan temperatur reservoir. Salah satunya dilakukan melalui penelitian karakteristik mata air panas yang muncul di permukaan (Surmayadi, 2014). Data geokimia yang digunakan pada penelitian ini adalah data hasil penelitian PSDG tahun 2010 (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017). Hasil dari data geokimia, dikorelasikan dengan data magnetotelurik untuk mengetahui potensi panas bumi di daerah penelitian.

### **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana nilai resistivitas sistem panas bumi daerah Cangar berdasarkan metode magnetotelurik?
2. Bagaimana tipe air panas dan temperatur reservoir berdasarkan kandungan kimia yang terdapat di air panas Cangar?
3. Bagaimana potensi energi panas bumi daerah Cangar?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menentukan nilai resistivitas dari sistem panas bumi Cangar menggunakan metode magnetotelurik.
2. Menentukan tipe air panas dan temperatur reservoir berdasarkan kandungan kimia yang terdapat di air panas Cangar.

3. Menentukan potensi energi panas bumi daerah Cangar.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Data geokimia yang digunakan merupakan data penelitian PSDG tahun 2010.
2. Perhitungan potensi energi listrik berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 13-6171-1999).

#### 1.5 Manfaat Penelitian

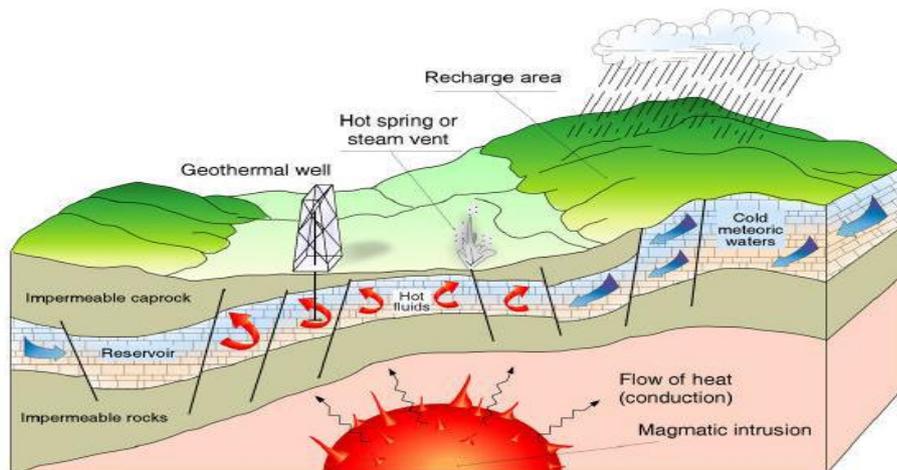
Manfaat dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat menambah pengetahuan mengenai aplikasi metode magnetotelurik dan geokimia untuk eksplorasi panas bumi. Selain itu, diharapkan hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai data penunjang untuk eksplorasi panas bumi selanjutnya, terutama di daerah Cangar.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Panas Bumi

Sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem hidrotermal bertemperatur tinggi ( $>225^{\circ}\text{C}$ ) dan beberapa yang memiliki temperatur sedang ( $150^{\circ}\text{C} - 225^{\circ}\text{C}$ ). Sistem panas bumi hidrotermal terjadi karena adanya perpindahan panas dari sumber panas secara konduksi dan konveksi. Medium yang berperan untuk perpindahan panas secara konduksi adalah batuan yang berada di sekitar sumber panas, sedangkan yang menjadi medium konveksi adalah air yang berada di bawah permukaan. Air yang mendapatkan energi dari sumber panas bergerak menuju permukaan melalui rekahan. Air yang lebih dingin menggantikan posisi air yang lebih panas sehingga memunculkan arus konveksi secara terus menerus (Saptadji, 2012).

Sistem panas bumi memiliki tiga elemen penting, yaitu sumber panas, reservoir, dan fluida pembawa panas. Sumber panas dapat berupa intrusi magma yang memiliki temperatur sangat tinggi ( $>600^{\circ}\text{C}$ ) dengan kedalaman sekitar 5 km sampai 10 km. Reservoir merupakan tempat terakumulasinya fluida pembawa panas, yang dilindungi oleh lapisan penutup. Reservoir tersusun atas batuan permeabel. Sementara itu, fluida panas bumi dapat berupa air maupun uap panas (Dickson dan Fanelli, 2003). Berikut adalah skema dari sistem panas bumi (Gambar 2.1). Manifestasi panas bumi di permukaan antara lain adalah mata air panas, geyser, solfatar, dan fumarol, menunjukkan adanya sistem hidrotermal di bawah permukaan.



**Gambar 2.1 Skema sistem panas bumi ideal (Dickson dan Fanelli, 2003)**

Berdasarkan fluida yang terkandung di dalam reservoir, sistem panas bumi terbagi menjadi tiga, yaitu sistem dominasi uap, sistem air panas, dan sistem dua-fasa. Pada sistem dominasi uap, air yang terpanasi oleh batuan panas menguap, sehingga ketika mencapai permukaan dalam keadaan relatif kering dengan temperatur sekitar 200°C (Utami, 1998). Sistem dominasi uap, merupakan sistem yang sangat jarang dijumpai di dunia. Sementara itu, sistem air panas merupakan sistem yang lebih banyak dijumpai dibandingkan dengan sistem dominasi uap. Pada sistem dominasi air, reservoir mempunyai kandungan air yang sangat dominan. Sedangkan sistem dua fasa, merupakan sistem yang terdapat fluida di dalam reservoir yang terdiri atas dua fasa yaitu uap dan air, dengan proporsi bervariasi (Utami, 1998).

Sistem panas bumi berdasarkan temperatur reservoir, dibedakan menjadi tiga, yaitu sistem panas bumi dengan temperatur rendah, temperatur sedang dan temperatur tinggi. Sistem panas bumi dengan temperatur rendah, yaitu sistem yang memiliki temperatur reservoir <125°C. Sistem panas bumi dengan temperatur sedang, yaitu sistem yang memiliki temperatur reservoir berkisar antara 125°C

hingga 225°C. Sistem panas bumi dengan temperatur tinggi, yaitu sistem yang temperatur reservoirnya >225°C (Hochstein, 1982).

## 2.2 Magma

Magma adalah lelehan massa batuan yang bercampur dengan gas terlarut, memiliki temperatur sangat tinggi (800°C – 1.200°C), dan terbentuk secara alami (Suparno, 2009). Keberadaan intrusi magma menjadi sumber energi panas bumi.

Keberadaan intrusi magma tersebut salah satunya ditandai dengan banyaknya gunungapi di suatu daerah. Pada umumnya lokasi sumber panas bumi berada di sekitar gunungapi. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduktif pada batuan di sekitarnya. Panas tersebut juga mengakibatkan aliran konveksi fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan (Suparno, 2009).

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses terbentuknya magma yaitu temperatur dan tekanan. Namun terdapat faktor lain yang menjadi faktor penentu yaitu jumlah kandungan gas terlarut dan kandungan silika dalam magma.

Berdasarkan kandungan silika, magma diklasifikasikan kedalam tiga kelompok, yaitu (Suparno, 2009):

1. Magma basalt, berasal dari lelehan batuan pada bagian luar mantel bumi.

Lelehan batuan tersebut bergerak menuju permukaan dan bereaksi dengan lempeng benua dan sedimen. Kandungan silika pada magma ini adalah kurang dari 50%. Rendahnya kandungan silika menyebabkan viskositas magma menjadi rendah. Sehingga menyebabkan gas yang berada pada magma basalt dapat keluar dengan mudah.

2. Magma andesit, pada umumnya terdapat di zona subduksi lempeng samudera dengan lempeng benua. Material penyusun berasal dari lelehan batuan lempeng samudera. Kandungan silika pada magma andesit yaitu berkisar antara 50% hingga 60%. Tingginya kandungan silika pada magma ini menyebabkan viskositas menjadi sedang dan mampu menangkap gas lebih banyak.

3. Magma rhyolit, terbentuk akibat lelehan batuan naik dan bereaksi dengan lempeng benua yang memiliki kandungan silika dan kandungan air yang tinggi.

Kandungan silika pada magma rhyolit yaitu lebih besar dari 60%.

### 2.3 Metode Magnetotelurik

Resistivitas merupakan karakteristik fisis utama dari bumi yang dipengaruhi oleh aktivitas panas bumi. Anomali konduktivitas yang tinggi disebabkan oleh perubahan panas bumi dan adanya zona rekahan atau patahan yang terisi oleh fluida panas sehingga menjadikan metode elektromagnetik dapat digunakan untuk eksplorasi panas bumi. Metode magnetotelurik merupakan salah satu metode geofisika pasif yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan elektromagnetik dimanfaatkan dengan cara mengukur variasi medan listrik dan medan magnet secara simultan dalam rentang waktu tertentu untuk mengetahui struktur konduktivitas batuan bawah permukaan. Medan elektromagnetik yang secara alami diinduksikan ke dalam bumi dan digunakan dalam eksplorasi magnetotelurik (Simpson dan Bahr, 2005). Alat magnetotelurik merekam medan listrik dan medan magnet sekunder dalam material konduktif (Zarkasyi dan Rahadinata, 2015). Metode magnetotelurik adalah metode elektromagnetik yang paling sering digunakan untuk menentukan distribusi resistivitas, mendeteksi

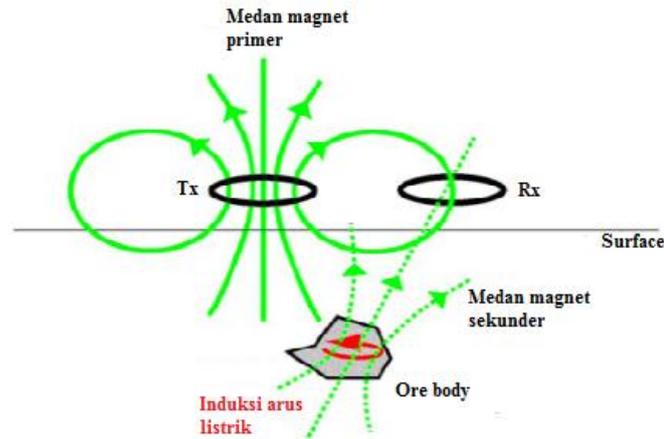
anomali konduktif, dan penargetan lokasi sumur potensial di daerah panas bumi (Erdogan dan Candansyar, 2017).

### 2.3.1 Sumber Sinyal Magnetotelurik

Medan magnet yang terukur di permukaan bumi merupakan sumber sinyal alami yang berasal dari dalam ataupun luar bumi yang memiliki frekuensi yang berbeda. Medan magnet yang berasal dari dalam bumi merupakan arus konveksi dan medan magnet yang ada di kerak bumi. Sedangkan medan magnet yang berasal dari luar bumi merupakan dari atmosfer dan magnetosfer (Unsworth, 1999). Sinyal magnetotelurik dihasilkan dari dua sumber yang memiliki frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Pada frekuensi yang lebih rendah ( $<1$  Hz), sumber sinyal berasal dari interaksi *solar wind* dengan medan magnet bumi. *Solar wind* memancarkan aliran ion yang dapat melingkupi bumi dan mempengaruhi medan magnet yang ada di bumi, serta menghasilkan energi elektromagnetik frekuensi rendah (Simpson dan Bahr, 2005). Sedangkan untuk sinyal frekuensi tinggi ( $>1$  Hz) disebabkan oleh aktivitas meteorologis yaitu berupa badai atau kilat yang terjadi di seluruh dunia di tempat yang sangat jauh. Energi yang dihasilkan oleh badai tersebut bergerak mengelilingi bumi dan ionosfer (Vozoff, 1972).

### 2.3.2 Prinsip Penjalaran Gelombang

Gambaran proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Unsworth, 1999). Ketika medan elektromagnetik utama mencapai permukaan bumi, ada energi yang terpantulkan dan menembus ke dalam bumi. Bumi berperan sebagai konduktor sehingga ketika medan elektromagnetik menembus bumi menghasilkan arus listrik (arus telurik). Arus induksi tersebut menghasilkan medan magnet sekunder (Simpson dan Bahr, 2005).



**Gambar 2.2** Proses interaksi gelombang elektromagnetik dengan bumi (Unsworth, 1999)

Penjelasan perilaku gelombang elektromagnetik dijelaskan oleh persamaan diferensial pada persamaan Maxwell (Xiao, 2004):

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

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

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

di mana:

$\bar{E}$  = kuat medan listrik (V/m)

$\bar{H}$  = kuat medan magnet (A/m)

$\sigma$  = konduktivitas (S/m)

$\epsilon$  = konstanta dielektrik (F/m)

Karena  $\bar{J} = \sigma \bar{E}$  dan  $\bar{B} = \mu \bar{H}$  maka persamaan 2.4 menjadi:

$$\nabla \times \bar{B} = \mu \bar{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.5)$$

di mana,

$\bar{J}$  = rapat arus ( $A/m^2$ )

$\bar{B}$  = rapat fluks magnet ( $W/m^2$ )

Untuk ruang hampa  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  dan  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ H/m}$ .

Bila dilakukan operasi *curl* terhadap persamaan (2.3) dan persamaan (2.4), didapatkan:

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

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H} = -\mu\epsilon \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Dari hubungan  $\nabla \times \nabla \times x = \nabla \cdot \nabla \cdot x - \nabla^2 x$ , bila  $x$  diganti  $\bar{E}$  dan  $\bar{H}$ , maka diperoleh persamaan gelombang untuk medan listrik dan medan magnet:

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Jika gelombang magnetotelurik melewati benda konduktif berkonduktivitas tinggi, maka arus konduksi lebih mendominasi dibandingkan dengan arus perpindahan sehingga efek dari arus perpindahan dapat diabaikan. Sehingga persamaan (2.8) dapat disederhanakan menjadi persamaan difusi:

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

Bumi dianggap sebagai lingkungan yang konduktif, sehingga digunakan persamaan difusi untuk menganalisis data magnetotelurik. Kuat medan listrik untuk gelombang elektromagnetik dengan variasi waktu sinusoidal dapat ditulis sebagai

$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t}$ , jika disubstitusikan ke dalam persamaan (2.10), menghasilkan:

$$\nabla^2 \bar{E} + i\omega\mu\sigma \bar{E} = 0 \quad (2.11)$$

Akibat transformasi energi elektromagnetik menjadi panas, medan listrik menurun secara eksponensial terhadap kedalaman. Meninjau sebuah gelombang yang bergerak mengelilingi bumi dengan peluruhan amplitudo secara eksponensial dalam arah  $z$ , maka persamaan (2.11) menjadi:

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} + i\omega\mu\sigma\bar{E} = 0 \quad (2.12)$$

dengan  $\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz}$ , dimana  $\bar{E}_0$  merupakan kuat medan listrik pada permukaan bumi, maka persamaan (2.12) menjadi:

$$\begin{aligned} \bar{E}k^2 + i\omega\mu\sigma\bar{E} &= 0 \\ \bar{E}(k^2 + i\omega\mu\sigma) &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Penyelesaian untuk variabel  $k$  adalah:

$$k = \pm(1-i)\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.14)$$

Nilai  $k$  merupakan suatu bilangan gelombang kompleks yang menyatakan kondisi dari suatu medium. Jadi perambatan gelombang elektromagnetik di bumi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{i\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z} e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z} \quad (2.15)$$

Pada persamaan (2.15), bagian eksponensial  $e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z}$  mewakili peluruhan amplitudo ketika gelombang bergerak pada arah  $z$ . *Skin depth* ( $\delta$ ) didefinisikan sebagai jarak, kuat medan listrik mengalami pelemahan oleh  $1/e$  dari kuat medan listrik awal. Karena  $e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z} = e^{-1}$  maka *skin depth* dapat ditulis menjadi:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.16)$$

atau dapat dinyatakan dengan

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.17)$$

Pada persamaan (2.17) menunjukkan bahwa *skin depth* bergantung pada dua parameter yaitu resistivitas dan frekuensi gelombang. *Skin depth* menurun terhadap menurunnya nilai resistivitas dan meningkatnya frekuensi.

Kuat medan magnet dari gelombang elektromagnetik dengan variasi waktu sinusoidal dapat ditulis  $\bar{H} = \bar{H}_0 e^{-i\omega t}$ . Maka, dari Persamaan (2.3), diperoleh:

$$\bar{H} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \nabla \times \bar{E} \quad (2.18)$$

Sehingga perbandingan antara kuat medan listrik dan kuat medan magnet di bumi dapat dinyatakan dengan:

$$E_x = E_0 e^{-i\omega t} e^{-kz} \quad (2.19)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} E_0 e^{-i\omega t} e^{-kz} \quad (2.20)$$

Medan listrik ( $E_x$ ) tegak lurus terhadap medan magnet ( $H_y$ ).

### 2.3.3 Tensor Impedansi

Metode magnetotelurik terdiri dari pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus. Komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus tersebut dihubungkan dengan tensor impedansi ( $\bar{Z}$ ) (Simpson dan Bahr, 2005). Pada pemodelan magnetotelurik untuk memperoleh informasi mengenai resistivitas semu bumi ( $z=0$ ) digunakan tensor impedansi (Xiao, 2004).

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x/\mu_0 \\ B_y/\mu_0 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Tensor impedansi merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Impedansi kompleks dapat juga dinyatakan dalam bentuk resistivitas dan fase.

$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (2.22)$$

$$\varphi_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{im}\{Z_{ij}\}}{\text{re}\{Z_{ij}\}} \right) \quad (2.23)$$

Pada kasus pemodelan 1D, konduktivitas berubah terhadap kedalaman.

$$\begin{aligned} Z_{xx} = Z_{yy} &= 0 \\ Z_{xy} &= -Z_{yx} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Pada kasus pemodelan 2D, konduktivitas berubah terhadap kedalaman dan sepanjang arah horizontal.

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= -Z_{yy} \\ Z_{xy} &\neq -Z_{yx} \\ Z_{xx} = Z_{yy} &= 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Nilai  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ , jika sumbu  $x$  dan  $y$  searah dengan *strike*.

Pada kasus 2D terdapat dua komponen utama impedansi, sehingga diperoleh persamaan resistivitas semu yang berbeda:

$$\rho_{xy}(\omega) = \frac{1}{\omega \mu} |Z_{xy}(\omega)|^2 \quad (2.26)$$

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

Pada kasus 3D berlaku sebagai berikut (Simpson dan Bahr, 2005):

$$\begin{aligned} Z_{xx} &\neq Z_{yy} \neq 0 \\ Z_{xy} &\neq Z_{yx} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Resistivitas semu dan fase merupakan parameter utama untuk memperoleh informasi resistivitas struktur dari data pengukuran. Resistivitas semu ( $\rho_{xy}$ ) merupakan rata-rata dari volume resistivitas bumi dari belahan bumi dengan radius yang sama dengan *skin depth*. Fase ( $\phi_{xy}$ ) merupakan perbedaan fase antara komponen medan listrik dan medan magnet (Vozoff, 1991).

## 2.4 Transformasi Fourier

Transformasi *Fourier* dalam pengolahan sinyal merupakan metode matematis yang sangat penting. Transformasi *Fourier* berfungsi untuk mengubah sinyal dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Hal tersebut bertujuan untuk mempermudah dalam melakukan analisis sinyal (Brandwood, 2003). Berikut persamaan transformasi *Fourier* (Hsu, 1995):

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.29)$$

Sementara untuk persamaan inversi transformasi *Fourier* sebagai berikut:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2.30)$$

## 2.5 Sifat Kelistrikan Batuan

Salah satu sifat kelistrikan yang dimiliki oleh lapisan penyusun batuan adalah batuan memiliki nilai resistivitas rendah. Semakin besar nilai resistivitas suatu batuan maka semakin sulit batuan tersebut menghantarkan arus listrik dan sebaliknya (Prameswari dkk, 2012). Besarnya nilai resistivitas tiap batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu kandungan air yang terdapat dalam batuan serta porositas batuan. Kandungan air yang terdapat di dalam batuan menurunkan

nilai resistivitasnya (Reynolds, 1997). Resistivitas dari batuan dan mineral ditunjukkan pada Tabel 2.1. Batuan digolongkan kedalam tiga kategori berdasarkan nilai resistivitasnya yaitu konduktor baik ( $10^{-6} < \rho < 1 \Omega.m$ ), konduktor sedang ( $1 < \rho < 10^7 \Omega.m$ ) dan isolator ( $\rho > 10^7 \Omega.m$ ).

**Tabel 2.1 Resistivitas dari beberapa batuan dan mineral (Telford dkk., 1990)**

No.	Material	Resistivitas (ohm-m)
1	Lava	$10^2 - 5 \times 10^4$
2	Tufa	$2 \times 10^3 - 10^5$
3	Pirit	0,01 – 100
4	Kuarsa	$500 - 800 \times 10^3$
5	Kalsit	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
6	Granit	$200 - 100 \times 10^3$
7	Andesit	$1,7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
8	Basalt	$200 - 100 \times 10^3$
9	Batu Gamping	$500 - 10 \times 10^3$
10	Batu Pasir	200 - 8.000
11	Pasir	1 - 1.000
12	Lempung	1 – 100
13	Magnetit	0,01 – 1000
14	Kerikil	100 – 600
15	Kerikil Kering	$600 - 10 \times 10^3$

## 2.6 Geokimia Panas Bumi

Tujuan eksplorasi geokimia adalah untuk mengetahui konsentrasi kandungan air panas bawah permukaan pada sistem panas bumi. Informasi kandungan air panas tersebut dapat digunakan untuk mengetahui tipe air panas, temperatur, sumber dan arah aliran air panas pada sistem panas bumi. Sehingga dapat diketahui keberadaan reservoir panas bumi (Ármansson, 2012).

### 2.6.1 Tipe Air Panas

Ada beberapa tipe air panas berdasarkan analisis geokimia, yaitu antara lain:

#### 1. Air Klorida

Tipe air klorida banyak ditemukan pada area yang memiliki temperatur tinggi yang diindikasikan berasal dari reservoir panas bumi. Pada area tersebut mata air panas mengalir dalam skala besar dan merupakan indikasi dari zona permeabel. Air klorida memiliki konsentrasi klorin ( $Cl$ ) yang tinggi yaitu sampai ribuan  $mg/kg$ . Selain itu terdapat beberapa unsur utama lainnya yaitu sodium dan potassium (Ariwibowo dan Nurrohman, 2012).

#### 2. Air Sulfat

Tipe air panas sulfat merupakan air panas yang terbentuk pada kedalaman dangkal dan terbentuk akibat dari proses kondensasi gas panas bumi yang menuju dekat permukaan. Air sulfat biasanya ditemukan pada batas daerah dan berjarak tidak jauh dari area *upflow* utama. Air sulfat dapat mengalir melewati patahan menuju sistem panas bumi (Ariwibowo dan Nurrohman, 2012). Air sulfat dicirikan dengan nilai  $SO_4$  yang tinggi,  $Cl$  dan  $HCO_3$  yang sangat rendah, dan memiliki pH rendah. Kemunculan air sulfat yang disertai fumarole pada sistem panas bumi topografi tinggi merupakan indikasi zona *upflow* dari sistem panas bumi tersebut.

#### 3. Air Bikarbonat

Tipe air bikarbonat banyak mengandung  $CO_2$ . Tipe air panas ini merupakan produk dari proses kondensasi gas dan uap menjadi mata air bawah tanah yang mengandung sedikit oksigen. Air bikarbonat memiliki pH yang mendekati netral sebagai akibat reaksi dengan batuan lokal (baik pada reservoir dangkal

maupun selama proses mengalir ke permukaan). Air tipe ini cenderung mudah bereaksi dan sangat korosif (Ariowo dan Nurrohman, 2012).

### 2.6.2 Geotermometer Unsur

Geotermometer merupakan aplikasi geokimia yang digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir dari komposisi air panas bumi. Air panas bumi dapat ditemukan di atas permukaan sebagai manifestasi panas bumi yang meliputi uap, cairan panas ataupun dingin, percampuran air dan air permukaan dengan uap (Fridiksson dan Ármannsson, 2007). Hal tersebut didasarkan pada keberadaan zat-zat terlarut dalam air panas bumi. Konsentrasi kandungan air panas bumi sangat tergantung pada temperatur.

Geotermometer diterapkan untuk memperkirakan temperatur reservoir karena adanya proses interaksi air dengan batuan yang terjadi pada bagian dalam sistem panas bumi yang sangat penting dalam komposisi air panas bumi. Sebelum dilakukannya pendugaan temperatur reservoir panas bumi terlebih dahulu dilakukan analisis konsentrasi kandungan unsur kimia yang terlarut dalam air panas bumi. Kandungan unsur yang terdapat dalam air panas bumi yang dapat digunakan geotermometer antara lain: silika, *Na*, *K*, dan *Ca*. Contoh geotermometer unsur yang dapat digunakan yaitu geotermometer silika, geotermometer *Na-K* dan geotermometer *Na-K-Ca* (Ariowo, 2011).

Geotermometer silika ( $SiO_2$ ) dibuat berdasarkan kelarutan berbagai jenis silika dalam air sebagai fungsi dari temperatur yang ditentukan dengan eksperimen.

Perkiraan temperatur air dapat diketahui apabila terdapat konsentrasi silika di dalam air panas bumi. Geotermometer silika tergantung dari adanya keseimbangan antara mineral dan air yang dipengaruhi oleh temperatur dan keberadaannya terawetkan

sampai air tersebut muncul ke permukaan. Kelarutan berbagai jenis mineral silika merupakan fungsi terhadap temperatur (Sismanto dan Andayany, 2012).

Geotermometer ini sangat baik digunakan untuk *discharge* sumur dan *boiling spring* yang berasosiasi dengan endapan sinter silika. Persamaan ini diterapkan untuk air yang mengalami kehilangan uap karena *boiling* yang menyebabkan meningkatnya kandungan silika pada air sisa (Sismanto dan Andayany, 2012).

Geotermometer kuarsa baik digunakan untuk reservoir yang memiliki temperatur  $>150^{\circ}\text{C}$ . Pada temperatur  $<150^{\circ}\text{C}$ , kalsedon lebih mengontrol kandungan silika terlarut daripada kuarsa (Karingithi, 2009).

1. Geotermometer kuarsa yang mengalami pendinginan secara adiabatik digunakan untuk air dari mata air yang mendidih dan mempunyai kandungan silika sinter. Adapun menurut Fournier perumusan geotermometer kuarsa yang mengalami pendinginan secara adiabatik adalah (Karingithi, 2009):

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1522}{5,75 - \log[\text{SiO}_2]} - 273,15 \quad (2.31)$$

di mana,

$t$  = temperatur reservoir ( $^{\circ}\text{C}$ )

$[\text{SiO}_2]$  = konsentrasi silika (*ppm*)

2. Geotermometer kuarsa yang mengalami pendinginan secara konduktif digunakan untuk air yang berasal dari mata air yang hampir mendidih sehingga memberikan estimasi temperatur reservoir berdasarkan kelarutan kuarsa (Karingithi, 2009):

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{5,19 - \log[\text{SiO}_2]} - 273,15 \quad (2.32)$$

3. Geotermometer kalsedon digunakan apabila geotermometer kuarsa dan geotermometer lainnya menunjukkan hasil temperatur reservoir sebesar  $120^{\circ}\text{C}$ -

180°C. Apabila geotermometer kalsedon menunjukkan hasil temperatur 100°C-120°C, maka temperatur tersebut merupakan temperatur yang sebenarnya pada reservoir. Adapun perumusan geotermometer kalsedon menurut Arnorsson (Karingithi, 2009):

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1112}{4,91 - \log[\text{SiO}_2]} - 273,15 \quad (2.33)$$

4. Geotermometer silika amorf digunakan apabila geotermometer kalsedon menunjukkan hasil temperatur reservoir <100°C sehingga silika amorf menurut Fournier (Karingithi, 2009):

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{731}{4,52 - \log[\text{SiO}_2]} - 273,15 \quad (2.34)$$

Geotermometer *Na-K* memiliki keunggulan dan kekurangan. Keunggulan dari geotermometer ini yaitu tidak banyak terpengaruh *dilution* maupun *steam loss*, baik digunakan untuk reservoir air klorida dengan temperatur >180°C. Sedangkan kekurangan dari geotermometer ini adalah kurang baik untuk diterapkan pada air panas bumi yang memiliki kandungan konsentrasi kalsium (*Ca*) tinggi dan pada temperatur rendah atau <100°C (Aribowo, 2011).

Geotermometer *Na-K* dapat mengindikasikan bagian yang lebih dalam dari sistem panas bumi dibandingkan geotermometer silika. Hal tersebut dikarenakan geotermometer *Na-K* memiliki proses kembali kekeadaan setimbang lebih lambat dibandingkan dengan geotermometer silika-kuarsa. Adapun persamaan untuk geotermometer *Na-K* (Karingithi, 2009):

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1390}{1,75 + \log \left[ \frac{[\text{Na}]}{[\text{K}]} \right]} - 273,15 \quad (2.35)$$

di mana,

$[Na]$  = konsentrasi natrium (*ppm*)

$[K]$  = konsentrasi kalium (*ppm*)

Geotermometer *Na-K-Ca*, geotermometer ini diterapkan pada air yang memiliki konsentrasi kalsium (*Ca*) yang tinggi. Geotermometer *Na-K-Ca* dapat digunakan dengan asumsi adanya kelebihan silika dalam air panas bumi dan aluminium (*Al*) dalam kondisi *solid* (konsentrasi dalam air sangat sedikit) (Aribowo dan Nurrohman, 2012). Geotermometer ini baik digunakan pada kisaran temperatur

120°C-200°C, selebihnya tidak terlalu bagus (Aribowo, 2011). Persamaan yang digunakan untuk perhitungan geotermometer *Na-K-Ca* (Fournier dan Truesdell, 1973):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1647}{\log \frac{[Na]}{[K]} + \left\{ \beta \log \left( \frac{[Ca]^{1/2}}{[Na]} \right) + 2,06 \right\} + 2,47} - 273 \quad (2.36)$$

di mana,

$[Na]$  = konsentrasi natrium (*ppm*)

$[K]$  = konsentrasi kalium (*ppm*)

$\beta$  = 4/3 untuk  $([Ca]^{1/2}/[Na]) > 1$  dan  $t < 100^{\circ}C$

$\beta$  = 1/3 untuk  $([Ca]^{1/2}/[Na]) < 1$  atau jika  $t_{(\beta=4/3)} < 100^{\circ}C$

Geotermometer *Na-K-Ca* digunakan karena mengandung banyak konsentrasi dari unsur kation *Na-K-Ca* dan mendominasi dibandingkan dengan unsur kation yang lainnya, serta dijumpai juga endapan travertin (Ermianto dan Aribowo, 2011). Geotermometer *Na-K* dan *Na-K-Ca* tidak cocok diterapkan pada air panas bumi yang bersifat asam. Hal ini disebabkan karena kesetimbangan *feldspar* tidak terjadi (Sismanto dan Andayany, 2012).

## 2.7 Metode Estimasi Potensi Energi

Estimasi besarnya potensi energi panas bumi di Indonesia sangat beraneka ragam yang disebabkan oleh perbedaan di dalam penggunaan metode perhitungan,

perkiraan besarnya parameter reservoir dan penggunaan asumsi-asumsi lainnya.

Perkiraan besarnya potensi energi listrik di suatu daerah dapat menggunakan metode estimasi potensi energi panas bumi. Perkiraan tersebut berdasarkan hasil penyelidikan geologi, geokimia, geofisika, karakteristik reservoir serta estimasi kesetaraan listrik (Badan Standardisasi Nasional, 1999).

Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah metode volumetrik.

Metode volumetrik adalah estimasi potensi energi panas bumi pada kelas sumber daya hipotesis sampai dengan cadangan terbukti. Prinsip dasar dari metode volumetrik yaitu dengan menganggap bentuk reservoir seperti kotak, sehingga volume dapat dihitung dengan mengalikan luas sebaran dan ketebalannya.

Besarnya potensi energi sumber daya atau cadangan dalam metode volumetrik berdasarkan kandungan energi panas yang ada di dalam reservoir. Kandungan panas di dalam batuan dan air merupakan kandungan energi panas yang ada di dalam reservoir (Badan Standardisasi Nasional, 1999). Pada Tabel 2.2 dapat dilihat beberapa asumsi yang dibutuhkan untuk estimasi kesetaraan energi panas dengan energi listrik.

**Tabel 2.2 Klasifikasi reservoir dan asumsi-asumsi yang digunakan dalam estimasi potensi energi panas bumi (Badan Standardisasi Indonesia, 1999)**

Reservoir	Batas Temperatur (°C)	Temperatur Akhir (°C)	Daya per satuan luas (Mwe/km <sup>2</sup> )*	Konversi Energi (%)	Lain-lain**
Temperatur rendah	< 125	90	10	10	$\Phi = 10\%$
Temperatur sedang	125-225	120	12,5	10	$t = 30$ tahun
Temperatur tinggi	> 225	180	15	15	$S_L = 100\%$

\*) Asumsi daya per satuan luas pada kelas sumber daya spekulatif

\*\*\*) Berlaku untuk estimasi sumber daya pada kelas hipotesis dan cadangan kelas terduga

### 2.7.1 Rumus Dasar Perhitungan

Berdasarkan kelas sumber daya hipotesisi sampai cadangan terbukti digunakan metode volumetrik dengan persamaan dasar kandungan panas yang terdapat di dalam reservoir (Bandar Standardisasi Nasional, 1999).

$$H_e = Ah\{(1 - \Phi)\rho_r c_r T + \Phi(\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V)\} \quad (2.37)$$

di mana,

$H_e$  = Kandungan energi panas ( $kJ$ )

$A$  = Luas area panas bumi ( $m^2$ )

$h$  = Tebal reservoir ( $m$ )

$T$  = Temperatur reservoir ( $^{\circ}C$ )

$S_L$  = Saturasi air (*fraksi*)

$S_V$  = Saturasi uap (*fraksi*)

$U_L$  = Energi dalam air ( $kJ/kg$ )

$U_V$  = Energi dalam uap ( $kJ/kg$ )

$\Phi$  = Porositas batuan reservoir (*fraksi*)

$c_r$  = Kapasitas panas batuan ( $kJ/kg^{\circ}C$ )

$\rho_r$  = Densitas batuan ( $kg/m^3$ )

$\rho_L$  = Densitas air ( $kg/m^3$ )

$\rho_V$  = Densitas uap ( $kg/m^3$ )

Estimasi potensi energi panas bumi metode volumetrik dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menghitung kandungan energi di dalam reservoir pada keadaan awal ( $T_i$ ):

$$H_{ei} = Ah\{(1 - \Phi)\rho_r c_r T_i + \Phi(\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V)_i\} \quad (2.38)$$

2. Menghitung kandungan energi dalam reservoir pada keadaan akhir ( $T_f$ ):

$$H_{ef} = Ah\{(1 - \Phi)\rho_r c_r T_f + \Phi(\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V)_f\} \quad (2.39)$$

3. Menghitung maksimal energi yang dapat dimanfaatkan (sumber daya):

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (2.40)$$

4. Menghitung energi panas yang pada kenyataannya dapat diambil (cadangan panas bumi). Apabila cadangan dinyatakan dalam satuan  $kJ$ , maka besarnya cadangan ditentukan sebagai berikut:

$$H_{de} = R_f \cdot H_{th} \quad (2.41)$$

Apabila cadangan dinyatakan dalam satuan  $MW_{th}$ , maka besarnya cadangan ditentukan sebagai berikut:

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000} \quad (2.42)$$

Menghitung besarnya potensi listrik panas bumi yaitu besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode waktu  $t$  tahun (dalam satuan  $MW_e$ ):

$$H_{el} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000} \quad (2.43)$$

di mana:

$T_i$  = temperatur reservoir pada keadaan awal ( $^{\circ}C$ )

$T_f$  = temperatur reservoir pada keadaan akhir ( $^{\circ}C$ )

$H_{ei}$  = kandungan energi dalam batuan dan air pada keadaan awal ( $kJ$ )

$H_{ef}$  = kandungan energi dalam batuan dan air pada keadaan akhir ( $kJ$ )

$H_{th}$  = energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan ( $kJ$ )

$H_{de}$  = energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan (cadangan panas bumi) ( $kJ$ )

$H_{re}$  = energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan selama periode waktu tertentu (cadangan panas bumi) ( $MW_{th}$ )

$H_{el}$  = potensi listrik panas bumi ( $MW_e$ )

$R_f$  = faktor perolehan (%)

$t$  = lama waktu (umur) pembangkit listrik (tahun)

$\eta$  = faktor konversi (%)

### 2.7.2 Angka Parameter

Ada beberapa parameter yang harus ditentukan dengan asumsi dalam kelas sumber daya hipotesis sampai dengan cadangan terbukti. Asumsi angka parameter pada kelas sumber daya hipotesis dapat dilihat pada Tabel 2.3, kelas cadangan terduga (Tabel 2.4), kelas cadangan mungkin (Tabel 2.5) dan kelas cadangan terbukti (Tabel 2.6). Selain itu juga terdapat parameter yang lainnya, yaitu yang

dapat diukur langsung di lapangan atau diambil dari referensi yang telah ada sebelumnya (Badan Standardisasi Nasional, 2000).

**Tabel 2.3 Asumsi angka parameter pada kelas sumber daya hipotesis (Badan Standardisasi Nasional, 2000)**

Parameter	Temperatur Tinggi (>225°C)	Temperatur Sedang (125-225°C)	Temperatur Rendah (<125°C)
Tebal reservoir ( <i>m</i> )	2000	2000	2000
Saturasi air (%)	100	100	100
Porositas batuan (%)	10	10	10
Kapasitas panas batuan ( <i>kJ/kg°C</i> )	1,0	0,9	0,8
Umur pembangkit (tahun)	30	30	30
Faktor konversi listrik (%)	10	10	10

**Tabel 2.4 Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan terduga (Badan Standardisasi Nasional, 2000)**

Parameter	Temperatur Tinggi (>225°C)	Temperatur Sedang (125-225°C)	Temperatur Rendah (<125°C)
Saturasi air (%)	100	100	100
Porositas batuan (%)	10	10	10
Kapasitas panas batuan ( <i>kJ/kg°C</i> )	1,0	0,9	0,8
Densitas batuan ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	2,5x10 <sup>3</sup>	2,6x10 <sup>3</sup>	2,7x10 <sup>3</sup>
Umur pembangkit (tahun)	30	30	30
Faktor konversi listrik (%)	10	10	10

**Tabel 2.5 Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan mungkin (Badan Standardisasi Nasional, 2000)**

Parameter	Temperatur Tinggi (>225°C)	Temperatur Sedang (125-225°C)	Temperatur Rendah (<125°C)
Umur pembangkit (tahun)	30	30	30
Faktor konversi listrik (%)	10	10	10

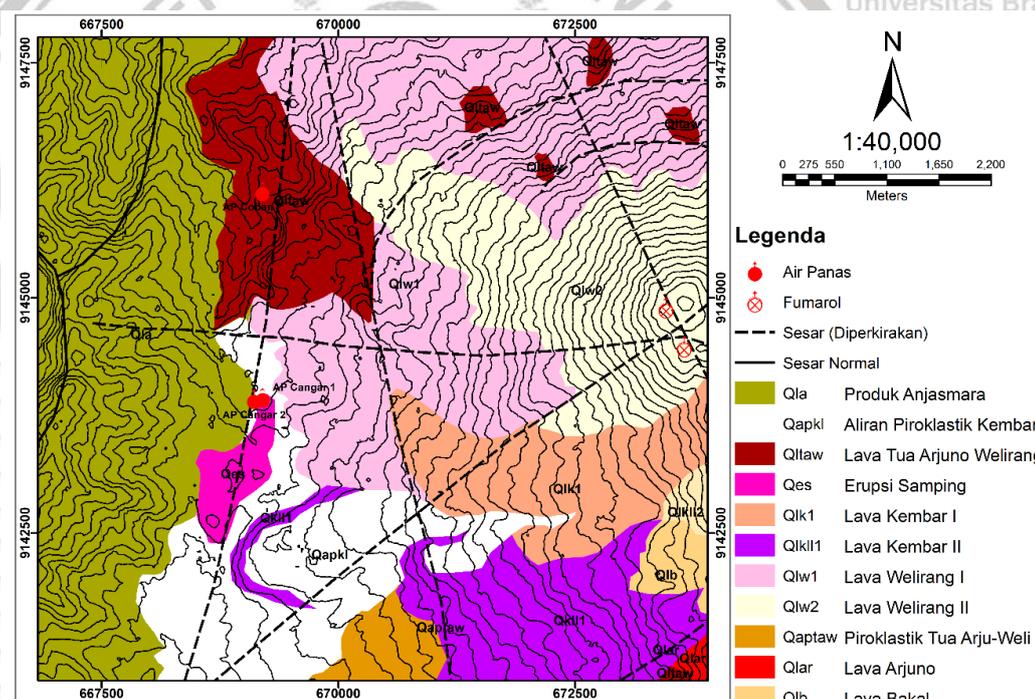
**Tabel 2.6 Asumsi angka parameter pada tingkat cadangan terbukti (Badan Standardisasi Nasional, 2000)**

Parameter	Temperatur Tinggi (>225°C)	Temperatur Sedang (125-225°C)	Temperatur Rendah (<125°C)
Umur pembangkit (tahun)	30	30	30
Faktor konversi listrik (%)	10	10	10

## 2.8 Geologi Kompleks Arjuno-Welirang

Daerah panas bumi Gunung Arjuno-Welirang secara administrasi berada di Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Malang dan Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur. Secara tektonik daerah ini berada pada busur magmatik dengan rentetan gunungapi aktif yang membentang di sepanjang selatan Pulau Jawa dan berasosiasi dengan sistem panas bumi (Sugianto dkk., 2010). Kompleks Gunung Arjuno-Welirang sendiri merupakan suatu kompleks gunungapi yang setidaknya memiliki lima pusat erupsi, diantaranya Gunung Welirang, Gunung Arjuno, Gunung Kembar I, Gunung Kembar II, Gunung Bakal dan beberapa erupsi samping (Gunung Bulak dan Gunung Pundak di sebelah utara Puncak Welirang dan Gunung Tunggangan di sebelah baratnya). Produk-produk gunungapi tersebut umumnya berupa lava dan piroklastik. Struktur-struktur geologi yang berkembang di daerah ini cukup kompleks diantaranya berupa sesar normal, sesar mendatar, rim kaldera dan amblasan. Sesar-sesar ini secara umum memotong kompleks Gunung Arjuno-Welirang dan berarah utara-selatan, barat laut tenggara, barat daya-timur laut dan barat-timur. Rim kaldera terletak bagian tengah kompleks Gunung Arjuno-Welirang, sedangkan amblasan berada di bagian selatan puncak Gunung Arjuno-Welirang dengan bukaan ke arah tenggara dan timur laut.

Secara administrasi daerah panas bumi Cangar termasuk dalam wilayah Kabupaten Malang, Jawa Timur. Daerah panas bumi Cangar merupakan salah satu bagian dari kompleks Arjuno-Welirang (Gambar 2.3) yang terletak di desa Tulungrejo, Kecamatan Bumiaji, Kota Batu. Batuan yang tertua pada daerah panas bumi Cangar adalah batuan vulkanik Gunung Anjasmoro dan Gunung Arjuno. Geologi daerah Cangar merupakan erupsi samping dari kompleks Gunung Arjuno-Welirang, lava Welirang I, aliran piroklastik Kembar I dan merupakan produk Anjasmara. *Agrotechno Park* Cangar milik Universitas Brawijaya terletak di wilayah Cangar yaitu di utara dari mata air panas Cangar. *Agrotechno Park* tersebut masih dalam tahap perencanaan proyek pembangunan (Gambar 2.4).



**Gambar 2.3** Peta geologi kompleks Arjuno-Welirang modifikasi dari (Hadi dkk, 2011)



**Gambar 2.4** Desain perencanaan Agrotechno Park UB di daerah Cangar  
(Sumber: youtube-Badan usaha akademik UB, 2016)

## 2.9 Manifestasi Air Panas Kompleks Arjuno-Welirang

Manifestasi panas bumi di kompleks Arjuno-Welirang berupa mata air panas, fumarol dan efek alterasi. Manifestasi panas bumi berupa mata air panas tersebar di Padusan, Coban dan Cangar, fumarol di puncak kompleks Gunung Arjuno-Welirang dan batuan teralterasi hidrotermal di sekitar Gunung Pundak dan sekitar Kawah Plupuh (Hadi dkk., 2011).

### 1. Air Panas Padusan

Air muncul pada aliran piroklastik dan bongkahan-bongkahan lava andesit produk Gunung Welirang. Sampel pada air panas Padusan memiliki karakteristik air panas teroksidasi, jernih, tidak berwarna dan tidak berasa, temperatur  $50^{\circ}\text{C}$  dan  $55^{\circ}\text{C}$ , pH sekitar 5,87-6,3, terdapat lapisan sinter karbonat dan oksidasi besi yang cukup banyak (Hadi dkk., 2011).

### 2. Air Panas Coban

Muncul pada sela-sela lava andesit produk vulkanik Arjuno-Welirang Tua. Air panas Coban memiliki temperatur  $39,4^{\circ}\text{C}$ , temperatur udara  $22,7^{\circ}\text{C}$ , jernih, tidak

berbau, tidak berasa, memiliki pH 6,44, dengan oksida besi yang cukup banyak (Hadi dkk., 2011).

### 3. Air Panas Cangar

Terdapat di dua lokasi dengan jarak sekitar 100 meter. Muncul pada aliran piroklastik produk Gunung Kembar (Kembar II), jernih, tidak berbau, temperatur air panas 48,3°C dan 54°C, pH 5,9, lapisan sinter karbonat ditemukan tipis dan oksidasi besi lemah (Hadi dkk., 2011).

### 4. Fumarol

Fumarol tersebar di masing-masing puncak kerucut kompleks Gunung Arjuno-Welirang yaitu di kawah Gunung Arjuno, Gunung Kembar I, Kembar II dan kawah Gunung Welirang (Plupuh dan Jero). Di Kawah Plupuh temperatur yang terukur sekitar 94,1°C-137,5°C, memiliki hembusan kuat, tidak ada air dan beberapa tempat disertai sublimasi belerang membentuk solfatar (Hadi dkk., 2011).

### 5. Alterasi

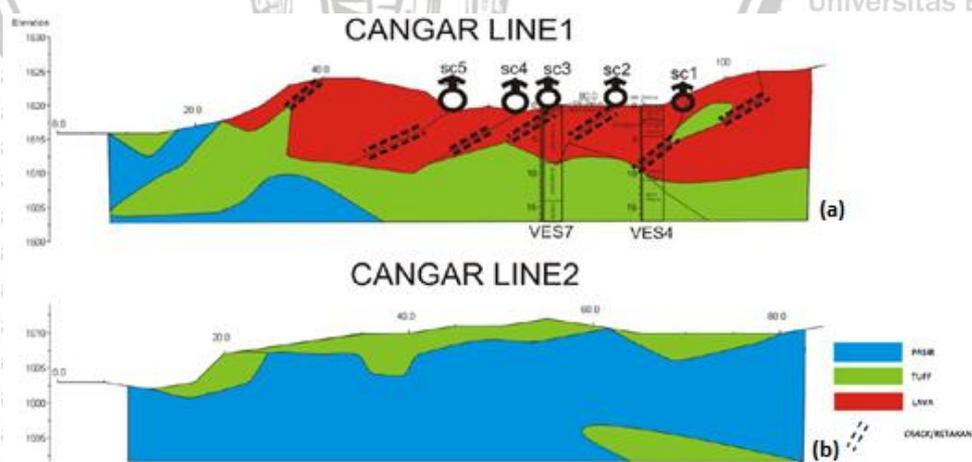
Alterasi batuan tersebar di dua lokasi yaitu di sekitar Kawah Plupuh dan di bawah Gunung Pundak. Daerah alterasi di sekitar Kawah Plupuh memiliki ciri-ciri adanya mineral ubahan seperti alunit, halloisit, dan kaolinit dengan intensitas kuat, terdapat pula oksidasi besi dalam jumlah yang cukup tinggi. Di daerah tersebut diduga telah terbentuk alterasi hidrotermal yang dipengaruhi oleh fluida asam dengan temperatur pembentukan <math><200^\circ</math> (Hadi dkk., 2011).

## 2.10 Penelitian Terdahulu

### 2.10.1 Metode Resistivitas

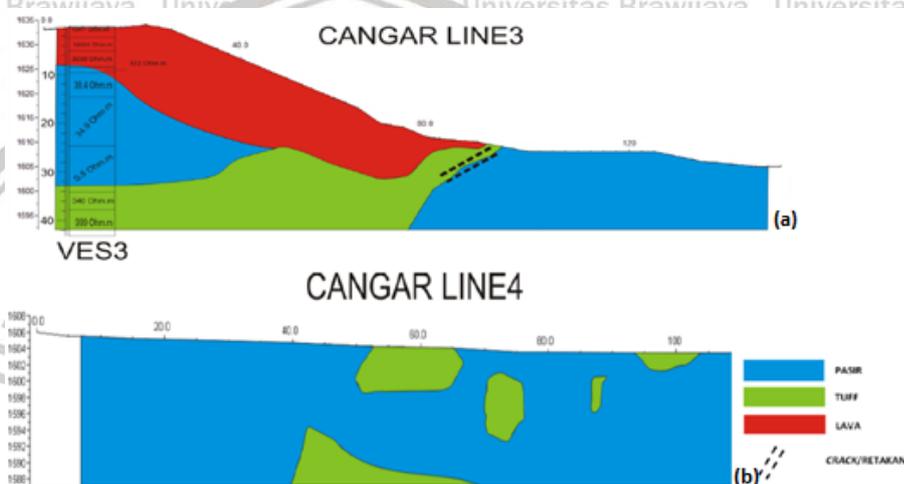
Penelitian dengan metode geolistrik resistivitas telah dilakukan sebagai studi awal potensi panas bumi Cangar. Metode geolistrik resistivitas yang digunakan yaitu *Electrical Resistivity Tomography (ERT)* yang merupakan gabungan antara metode *Vertikal Electrical Sounding (VES)* dan *mapping*. Proses akuisisi data dilakukan dengan konfigurasi Wenner dengan panjang lintasan yaitu 100 meter sampai 150 meter. Jumlah titik *VES* yaitu 7 titik dan lintasan *mapping* sebanyak 4 yang tersebar di sekitar sumber air panas.

Berdasarkan Gambar 2.5 (a) untuk lintasan 1 (CANGAR LINE 1) diketahui bahwa terdapat beberapa retakan pada batuan lava, terdapat lapisan tufa dan pasir. Gambar 2.5(b) menunjukkan sebagian besar lapisan pasir tertutup oleh batuan tufa. Pada lintasan 2 diduga merupakan sisa dari proses erosi yang terdapat di sekitar lereng pegunungan Welirang. Hal tersebut terbukti dengan terdapatnya lapisan batuan lunak yaitu tufa dan pasir yang tidak terikat oleh batuan lava.



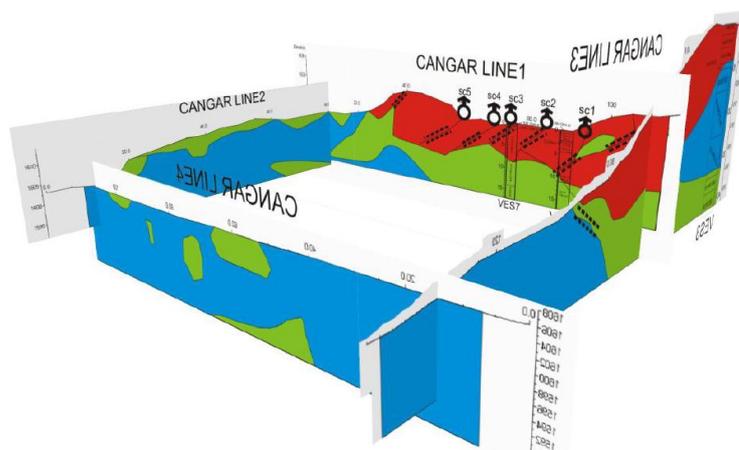
Gambar 2.5 (a) Interpretasi *mapping* lintasan 1 dan (b) *mapping* lintasan 2 (Rakhmanto dkk., 2011)

Sementara itu pada Gambar 2.6 (a) yaitu lintasan 3 (CANGAR LINE 3) terdapat lapisan batuan lava, pasir dan tufa. Pada gambar tersebut menunjukkan gradasi batuan pegunungan Welirang dan merupakan hasil sedimentasi dari lereng pegunungan yang didominasi oleh pasir. Pada lintasan ini terdapat titik CR3 yang menunjukkan anomali resistivitas pada kedalaman 24,7 meter dari ketinggian titik CR3. Pada lintasan 4 (CANGAR LINE 4) terdapat hasil sedimentasi, lapisan didominasi oleh batuan pasir dan terdapat sedikit batuan tufa.



**Gambar 2.6 Interpretasi *mapping* lintasan 3 dan lintasan 4 (Rakhmanto dkk., 2011)**

Hasil pemodelan *ERT* ditunjukkan pada Gambar 2.7. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa sebaran batuan lava terdapat pada bagian selatan dari daerah penelitian, sedangkan pada bagian utara lebih didominasi oleh pasir. Terdapat beberapa retakan pada batuan lava di selatan. Retakan tersebut berperan sebagai media mengalir fluida dari reservoir ke permukaan (Rakhmanto dkk., 2011).

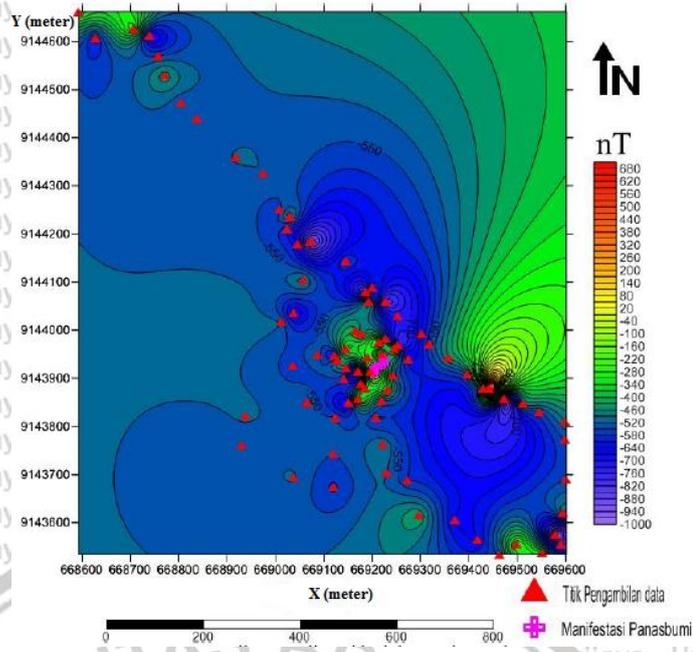


Gambar 2.7 Interpretasi tomografi geolistrik (Rakhmanto dkk., 2011)

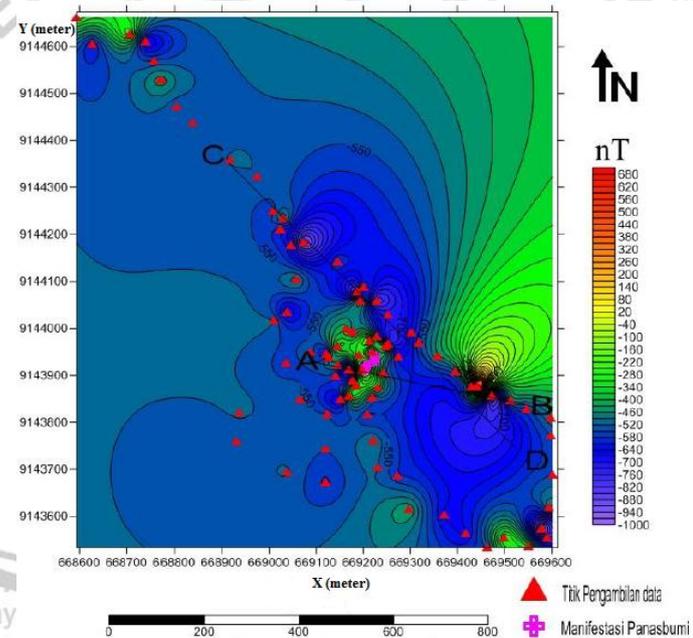
### 2.10.2 Geomagnetik

Penelitian geomagnetik dilakukan di daerah sekitar pemandian air panas Cangar. Alat yang digunakan untuk pengambilan data adalah *Proton Precession Magnetometer (PPM)* dengan metode *looping* tertutup. Spasi antar titik yaitu  $\pm 50$  meter, sehingga diperoleh titik pengambilan data sebanyak 86.

Kontur anomali lokal atau residual (Gambar 2.8) diperoleh dengan mengurangi anomali magnet total dengan anomali regional. Terdapat nilai anomali rendah sampai pada nilai  $-1000$  nT. Kerentanan suseptibilitas batuan ( $k$ ) berbanding lurus dengan konsentrasi mineral magnetik pada batuan sehingga batuan tersebut mengalami pelapukan. Anomali gradient horizontal dikorelasikan dengan anomali residual yang telah diperoleh. Hal tersebut dilakukan untuk menentukan sayatan A-B dan sayatan C-D (Gambar 2.9) (Afandi dkk., 2012).



Gambar 2.8 Kontur anomali residual dengan interval 60 nT (Afandi dkk., 2012)



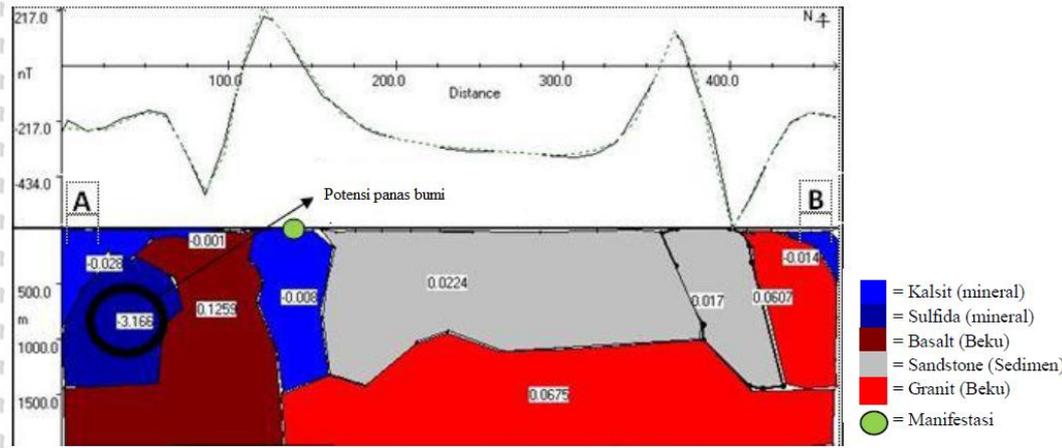
Gambar 2.9 Sayatan A-B dan C-D pada anomali residual dengan interval 40 nT (Afandi dkk., 2012)

Sehingga diperoleh pemodelan 2D seperti tampak pada Gambar 2.10 dan 2.11 untuk masing-masing sayatan. Berdasarkan pemodelan untuk sayatan A-B (Gambar 2.10) sebaran nilai suseptibilitas antara -651 nT dan 217 nT. Pada pemodelan sayatan A-B menunjukkan bahwa struktur batuan didominasi oleh

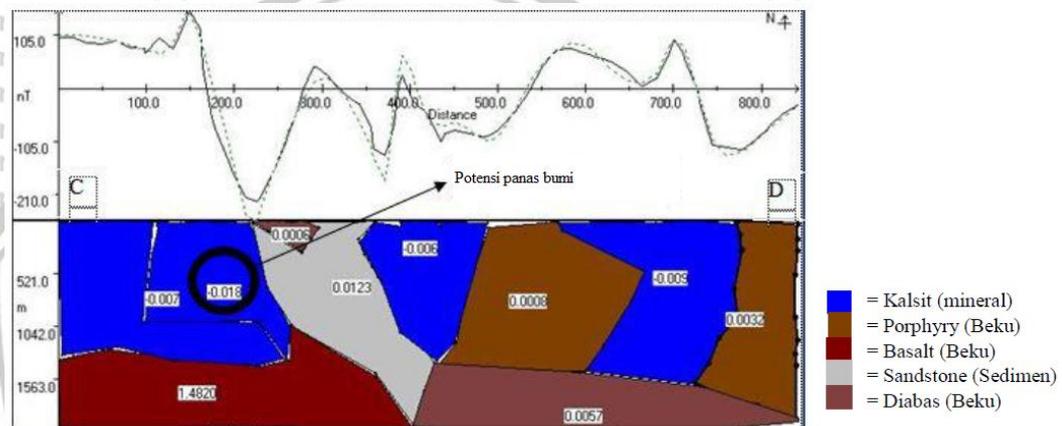
batuan beku. Batuan beku tersebut merupakan hasil pembekuan Gunungapi Arjuno-Welirang. Situ juga terdapat kalsit, sulfida, *sandstone*. Pada lapisan atas terdapat batuan kalsit, sulfida dan *sandstone*, batuan mineral tersebut menerobos batuan basalt akibat adanya rekahan dan aktivitas dari Gunung Arjuno-Welirang. Pada lapisan kedua didominasi oleh batuan beku yaitu basalt dan granit (Afandi dkk., 2012).

Pemodelan untuk sayatan B-C sebaran nilai susceptibilitas antara  $-270$  nT (nilai minimum) dan  $150$  nT (nilai maksimum). Pada daerah ini didominasi juga oleh batuan beku seperti basalt, *porphyry* dan diabas. Selain itu juga terdapat batuan mineral seperti kalsit dan batuan sedimen yaitu *sandstone*. Pada lapisan atas terdapat batuan kalsit, *porphyry*, *sandstone* dan diabas. Batuan-batuan tersebut menerobos batuan basalt akibat adanya rekahan batuan. Pada lapisan kedua didominasi oleh batuan beku yaitu basalt dan diabas (Afandi dkk., 2012).

Berdasarkan kedua pemodelan penampang sayatan A-B dan C-D menunjukkan terdapat keberadaan sesar, rekahan batuan dan batuan pembawa panas. Potensi panas bumi ditemukan dengan nilai susceptibilitas rendah untuk masing-masing penampang yaitu  $-3,166$  dan  $-0,018$ . Nilai susceptibilitas rendah tersebut akibat batuan telah termagnetisasi oleh panas bumi (Afandi dkk., 2012).



Gambar 2.10 Penampang sayatan A-B (Afandi dkk., 2012)



Gambar 2.11 Penampang sayan C-D (Afandi dkk., 2012)



### BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN

Identifikasi sistem panas bumi dan potensi energi panas bumi di daerah Cangar dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain adalah geologi, geofisika dan geokimia. Pada penelitian ini dilakukan identifikasi secara kuantitatif dan kualitatif pada daerah penelitian dengan menggunakan metode geofisika dan data geokimia. Selain itu pada penelitian ini, didukung dengan peta dan data geologi sebagai survei awal untuk penentuan desain survei dan pendukung interpretasi.

Metode geofisika bertujuan untuk mengetahui sistem panas bumi dan sebaran sistem panas bumi di daerah penelitian. Sementara itu data geokimia bertujuan untuk mengetahui karakteristik reservoir berdasarkan kandungan kimia dari manifestasi panas bumi. Pada penelitian ini, analisis secara kuantitatif berdasarkan hasil metode geofisika dan geokimia yaitu resistivitas batuan, temperatur reservoir dan besarnya potensi energi panas bumi. Analisis kualitatif berdasarkan hasil dari analisis data geokimia yaitu tipe air panas pada manifestasi panas bumi daerah penelitian.

Metode geofisika terdiri dari beberapa metode yaitu seismik, gravity, georadar, geolistrik, magnetik, magnetotelurik dan beberapa metode yang lainnya.

Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode magnetotelurik. Metode magnetotelurik sangat direkomendasikan sebagai penelitian lanjutan geofisika di daerah penelitian karena dapat mengidentifikasi sistem panas bumi. Metode magnetotelurik memiliki penetrasi yang dalam sehingga mampu menjangkau sistem panas bumi secara keseluruhan atau detail. Parameter yang diperoleh dari metode magnetotelurik adalah resistivitas batuan bawah permukaan terhadap

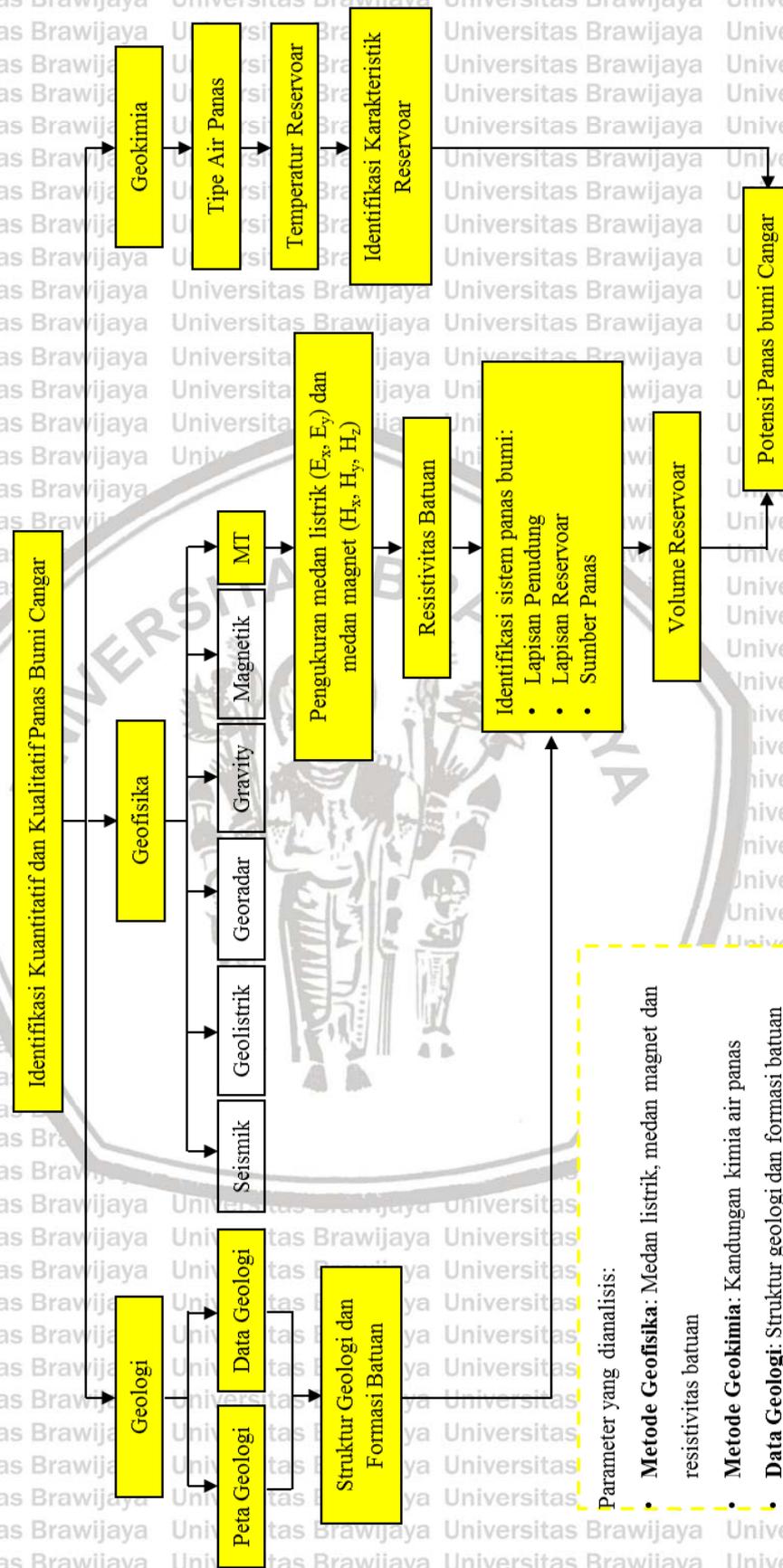
kedalaman. Resistivitas diperoleh dari hasil pengukuran medan listrik dan medan magnet yang bergantung waktu.

Nilai resistivitas yang diperoleh dari metode magnetotelurik digunakan untuk identifikasi sistem panas bumi. Komponen utama sistem panas bumi terdiri dari lapisan penutup, reservoir dan sumber panas. Setiap lapisan tersebut memiliki nilai resistivitas yang berbeda-beda, sehingga dapat diidentifikasi berdasarkan nilai resistivitas yang diperoleh dari magnetotelurik. Lapisan batuan penutup memiliki nilai resistivitas kecil dibandingkan dengan lapisan reservoir.

Nilai resistivitas tertinggi dimiliki oleh lapisan sumber panas. Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan 2D inversi dan pemodelan 3D. Pemodelan 2D inversi dilakukan untuk memperoleh penampang resistivitas batuan terhadap kedalaman dan pemodelan 3D dilakukan untuk mengetahui persebaran sistem panas bumi dan volume reservoir. Sebagai data pendukung penelitian digunakan data geokimia mata air panas Cagar milik PSDG tahun 2010. Geokimia bertujuan untuk mengetahui konsentrasi kandungan kimia yang terdapat pada mata air panas. Konsentrasi kandungan kimia tersebut dapat merepresentasikan kondisi bawah permukaan dari sistem panas bumi, yaitu tipe air panas dan temperatur reservoir.

Data magnetotelurik dan data geokimia dikorelasikan untuk menghitung potensi energi panas bumi di daerah penelitian. Parameter magnetotelurik yang dibutuhkan yaitu ketebalan reservoir dan batas sebaran reservoir, dan parameter geokimia yang dibutuhkan yaitu temperatur reservoir. Selain parameter yang diukur langsung dilapangan, digunakan juga parameter yang diambil dari referensi.

Perhitungan potensi energi panas bumi Cagar yang digunakan yaitu berdasarkan Standar Nasional Indonesia.



Gambar 3.1 Diagram Kerangka Penelitian

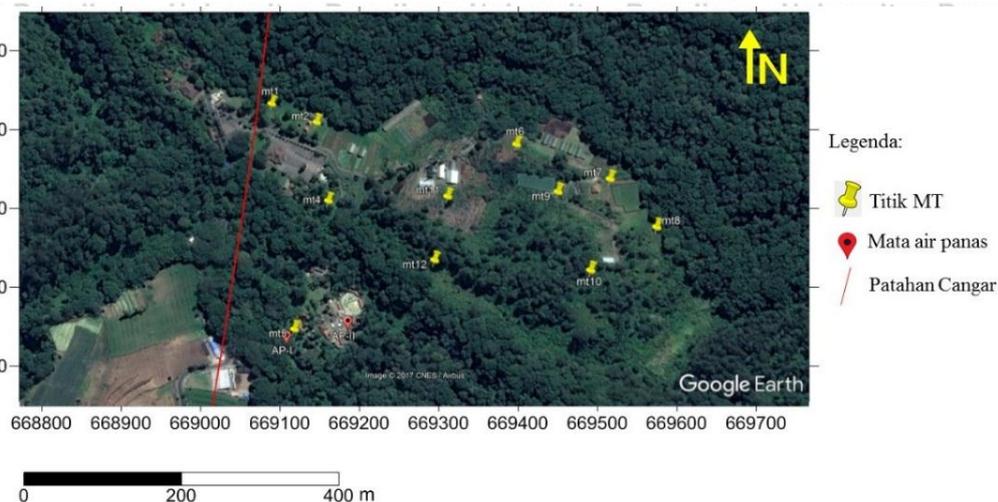
## BAB IV METODE PENELITIAN

### 4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Pengambilan data magnetotelurik dilakukan di daerah panas bumi Cangar yang berada di desa Tulungrejo, Kecamatan Bumiaji, Kota Batu. Akusisi data dilakukan pada tanggal 15 Juli sampai 2 Agustus 2017. Selanjutnya dilakukan pengolahan data di laboratorium Geofisika Universitas Brawijaya.

### 4.2 Akusisi Data Penelitian

Akusisi data difokuskan di sekitar pemandian air panas Cangar dan di area *Agrotechno Park* milik Universitas Brawijaya. Pengambilan titik magnetotelurik dilakukan di 11 titik dengan spasi antara 75 meter sampai 150 meter. Titik magnetotelurik tersebut terbagi dalam 5 lintasan. Pemilihan titik magnetotelurik tersebut disesuaikan dengan kondisi geologi daerah penelitian. Terdapat beberapa titik magnetotelurik di sekitar patahan Cangar dan sumber air panas Cangar. Titik akusisi data magnetotelurik melingkupi area air panas Cangar dan *Agrotechno Park* Universitas Brawijaya. Spasi yang digunakan pada penelitian lebih rapat dikarenakan fokus area yang relatif kecil. Desain survei daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1. Data geokimia yang digunakan adalah data penelitian PSDG tahun 2010. Data tersebut tersedia dalam buku *Potensi Panas Bumi-ESDM* tahun 2017 (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017).



**Gambar 4.1** Desain survei akuisisi metode magnetotelurik

Peralatan dan bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain satu set alat pengukuran magnetotelurik (Metronix ADU-07e, koil dan *porous pot*), GPS, kompas, roll-meter, *waterpass*, kabel, cangkul dan linggis. *Software* yang digunakan yaitu Mapros, WinGlink dan Rockworks. Konfigurasi akuisisi data magnetotelurik pada umumnya terdiri dari 4 *poros pout*, 3 koil, laptop (PC) dan *receiver* yaitu alat penerima sebagai pengolah sinyal dan perekam data.

Pada proses akuisisi data magnetotelurik, penentuan sistem koordinat dalam merangkai peralatan MT harus diperhatikan. Penentuan sistem koordinat berdasarkan pada arah *strike*, sejajar ataupun tegak lurus. Dalam sistem koordinat, arah *strike* didefinisikan sebagai arah utara-selatan (Green, 2003). Arah sensor medan listrik dan sensor medan magnet yang didefinisikan dengan “x” yaitu tegak lurus dengan *strike*, “y” yaitu sejajar dengan *strike*, dan “z” menunjukkan arah vertikal ke bawah.

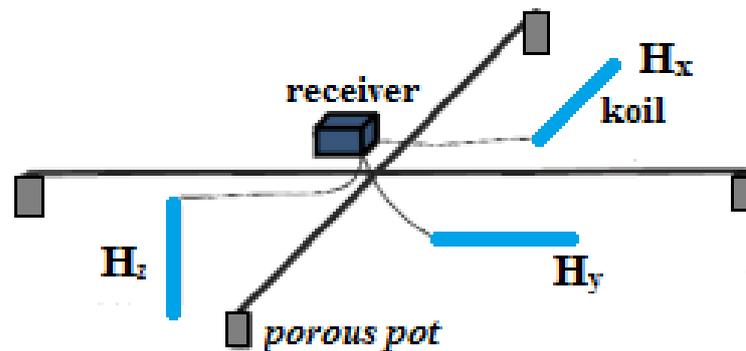
*Porous pot* berperan sebagai sensor medan listrik ( $E_x$  dan  $E_y$ ), yang ditanam saling tegak lurus. *Porous pot*  $E_x$  ditanam pada arah utara-selatan dan *porous pot*  $E_y$  pada arah timur-barat. Bentangan kabel yang digunakan yaitu  $\pm 15$  meter, dari

alat MT (*control unit*). Pada penelitian ini spasi yang digunakan lebih rapat sehingga untuk bentangan kabel *porous pot* minimal 15 meter. *Porous pot* bagian luar samping dan bawah dilapisi dengan bentonit agar *porous pot* lebih konduktif.

Sementara itu, koil berperan sebagai sensor medan magnet ( $H_x$ ,  $H_y$  dan  $H_z$ ), masing-masing koil ditanam pada kuadran yang berbeda. Sehingga setiap koil dapat merekam secara *orthogonal* komponen medan magnet  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Selain itu, koil diletakkan terpisah (kuadran berbeda) yaitu untuk mengantisipasi adanya *noise*.

Apabila salah satu dari koil terkena *noise*, maka data pada koil di kuadran yang lain terselamatkan dari *noise*. Apabila koil berada pada kuadran yang sama, maka ketika kuadran tersebut terkena *noise* maka semua data medan magnet ( $H$ ) akan terkena *noise*. Koil  $H_x$  dan  $H_y$  saling tegak lurus dan ditanam secara horizontal sedangkan untuk koil  $H_z$  ditanam secara vertikal. Koil  $H_x$  ditanam pada arah utara-selatan sedangkan koil  $H_y$  ditanam pada arah timur-barat. Bentangan kabel yang digunakan untuk setiap koil  $\pm 10$  meter. Bentangan kabel untuk koil lebih pendek dibandingkan dengan bentangan kabel untuk *porous pot*. Hal ini dilakukan untuk menghindari agar tidak terjadi error pada perekaman data atau “*NOT OKAY*” pada alat perekam.

Koil perlu dilapisi dengan plastik untuk melindungi dari *noise* yang dapat mengganggu. Konfigurasi alat dalam akusisi data magnetotelurik di lapangan ditunjukkan pada Gambar 4.2.



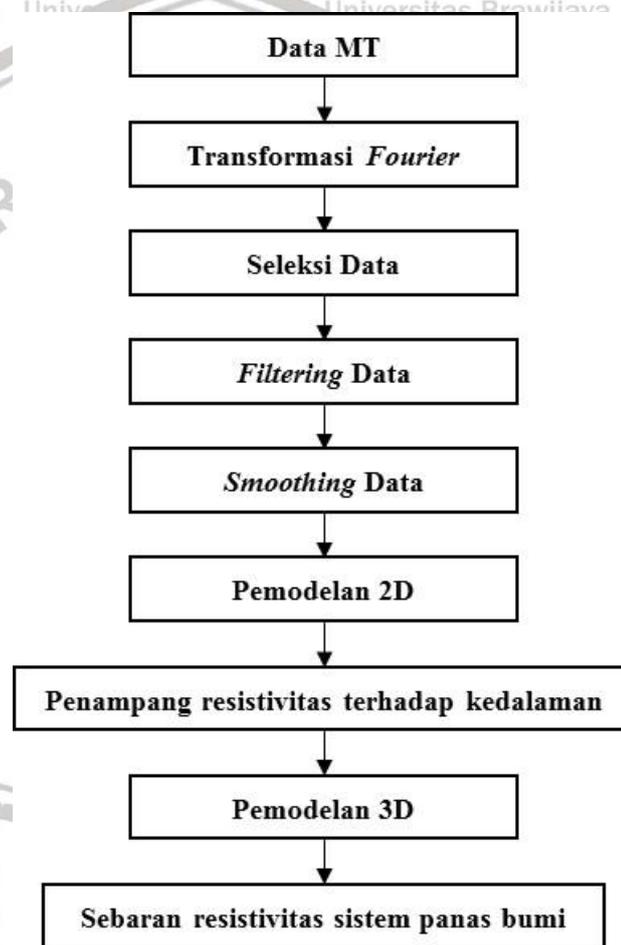
**Gambar 4.2** Konfigurasi alat dalam akuisisi magnetotelurik modifikasi dari (Zanuar, 2009)

Sebelum dilakukan perekaman data, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi alat (*selftest*) selama  $\pm 30$  menit. *Sampling* frekuensi yang digunakan pada penelitian ini adalah 65 kHz (frekuensi tinggi), 4 kHz (frekuensi sedang), dan 128 Hz (frekuensi rendah), dengan perekaman data selama  $\pm 7$  jam. Perekaman data dengan *sampling* frekuensi 65 kHz dilakukan selama  $\pm 30$  menit, *sampling* frekuensi 4 kHz selama  $\pm 1$  jam dan *sampling* frekuensi 128 Hz selama  $\pm 5$  jam 30 menit. Lama waktu perekaman data disesuaikan dengan besarnya nilai *sampling* frekuensi yang digunakan. Setiap *sampling* frekuensi memperoleh tingkat penetrasi yang berbeda.

*Sampling* frekuensi tinggi diperoleh penetrasi dangkal, sedangkan *sampling* frekuensi rendah diperoleh penetrasi dalam. Lama waktu perekaman dengan *sampling* frekuensi tinggi (65 kHz) hanya 30 menit, hal ini dikarenakan dalam rentang waktu tersebut sudah mewakili data untuk hasil penetrasi dangkal. Selain itu juga disesuaikan dengan kapasitas memori pada alat magnetotelurik yang digunakan pada penelitian. *Sampling* frekuensi tinggi merekam data sampel yang besar dan banyak sehingga membutuhkan kapasitas yang besar pula.

### 4.3 Pengolahan Data Magnetotelurik

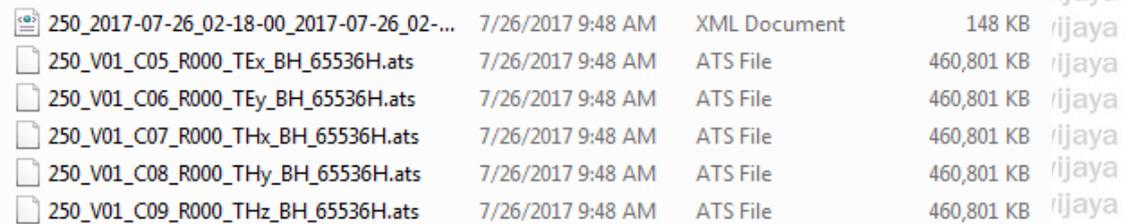
Diagram alir untuk pengolahan data magnetotelurik dapat dilihat pada Gambar 4.3. Data magnetotelurik yang diperoleh dari Metronix ADU-07e merupakan data mentah. Data magnetotelurik tersebut tidak lepas dari *noise*, sehingga perlu dilakukan pengolahan data. Pengolahan data magnetotelurik terdiri dari beberapa tahapan, yaitu transformasi *Fourier*, seleksi data, *filtering* data, dan *smoothing* data. Selanjutnya dilakukan pemodelan 2D inversi dan pemodelan 3D.



Gambar 4.3 Diagram alir pengolahan data magnetotelurik

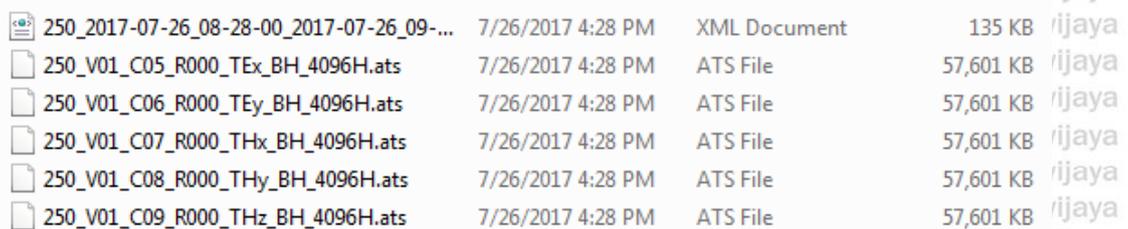
### 4.3.1 Transformasi *Fourier*

Data mentah hasil penelitian diolah menggunakan *software* Mapros. Format data perekaman yaitu dalam bentuk *.ats*. Data magnetotelurik yang terekam merupakan data dalam domain waktu (*time series*). Data disetiap stasiun dengan masing-masing *sampling frekuensi* terdiri dari 5 komponen yaitu komponen medan listrik ( $E_x$  dan  $E_y$ ) dan medan magnet ( $H_x$ ,  $H_y$ , dan  $H_z$ ) yang terekam dalam interval waktu tertentu (Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6).



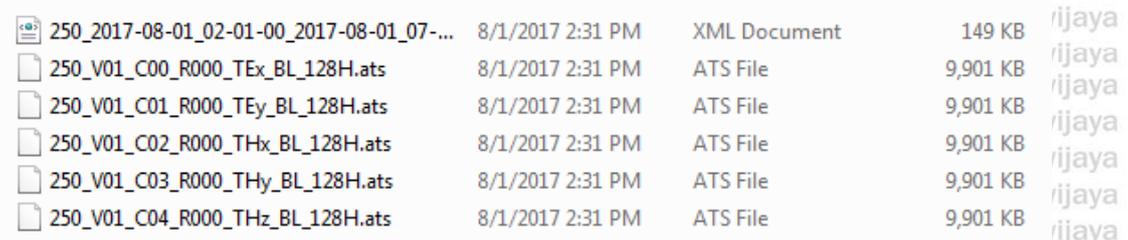
250_2017-07-26_02-18-00_2017-07-26_02-...	7/26/2017 9:48 AM	XML Document	148 KB
250_V01_C05_R000_TEx_BH_65536H.ats	7/26/2017 9:48 AM	ATS File	460,801 KB
250_V01_C06_R000_TEy_BH_65536H.ats	7/26/2017 9:48 AM	ATS File	460,801 KB
250_V01_C07_R000_THx_BH_65536H.ats	7/26/2017 9:48 AM	ATS File	460,801 KB
250_V01_C08_R000_THy_BH_65536H.ats	7/26/2017 9:48 AM	ATS File	460,801 KB
250_V01_C09_R000_THz_BH_65536H.ats	7/26/2017 9:48 AM	ATS File	460,801 KB

Gambar 4.4 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 65 kHz



250_2017-07-26_08-28-00_2017-07-26_09-...	7/26/2017 4:28 PM	XML Document	135 KB
250_V01_C05_R000_TEx_BH_4096H.ats	7/26/2017 4:28 PM	ATS File	57,601 KB
250_V01_C06_R000_TEy_BH_4096H.ats	7/26/2017 4:28 PM	ATS File	57,601 KB
250_V01_C07_R000_THx_BH_4096H.ats	7/26/2017 4:28 PM	ATS File	57,601 KB
250_V01_C08_R000_THy_BH_4096H.ats	7/26/2017 4:28 PM	ATS File	57,601 KB
250_V01_C09_R000_THz_BH_4096H.ats	7/26/2017 4:28 PM	ATS File	57,601 KB

Gambar 4.5 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 4 kHz

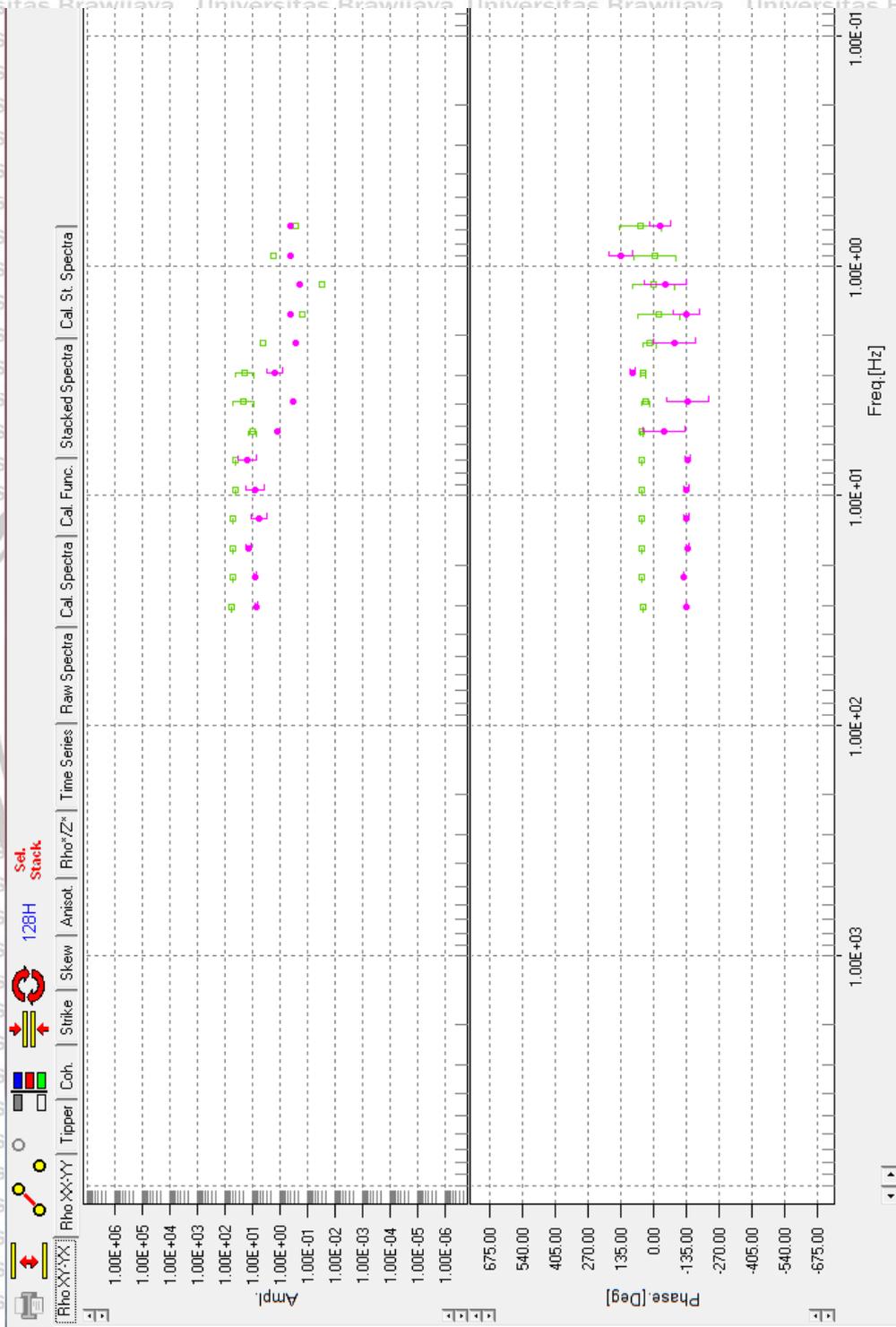


250_2017-08-01_02-01-00_2017-08-01_07-...	8/1/2017 2:31 PM	XML Document	149 KB
250_V01_C00_R000_TEx_BL_128H.ats	8/1/2017 2:31 PM	ATS File	9,901 KB
250_V01_C01_R000_TEy_BL_128H.ats	8/1/2017 2:31 PM	ATS File	9,901 KB
250_V01_C02_R000_THx_BL_128H.ats	8/1/2017 2:31 PM	ATS File	9,901 KB
250_V01_C03_R000_THy_BL_128H.ats	8/1/2017 2:31 PM	ATS File	9,901 KB
250_V01_C04_R000_THz_BL_128H.ats	8/1/2017 2:31 PM	ATS File	9,901 KB

Gambar 4.6 Contoh data mentah dengan *sampling* frekuensi 128 Hz

Data dalam domain waktu perlu diubah menjadi domain frekuensi. Tujuan transformasi tersebut adalah agar data lebih mudah untuk dianalisis. Pada metode magnetotelurik, transformasi yang banyak digunakan untuk mengubah deret waktu ke dalam deret frekuensi adalah transformasi *Fourier*. Jenis transformasi *Fourier* yang digunakan yaitu *Fast Fourier Transform (FFT)*. *FFT* digunakan agar proses transformasi yang dilakukan lebih cepat dan efisien. Sebagai mana diketahui bahwa pada penelitian ini digunakan sampling frekuensi tinggi yaitu 65 kHz, sehingga membutuhkan proses transformasi yang cepat.

Pengolahan transformasi *Fourier* dilakukan pada *software* Mapros. Hasil dari transformasi *Fourier* dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 merupakan contoh hasil transformasi *Fourier* pada titik perekaman data mt8. Hasil dari transformasi *Fourier* diperoleh grafik resistivitas semu dan fase. Grafik resistivitas semu terdiri dari grafik *rho XY* (resistivitas semu TE) dan *rho YX* (resistivitas semu TM). Sementara itu, grafik fase terdiri dari *phase XY* (fase TE) dan *phase YX* (fase TM). Grafik resistivitas semu dan fase TE ditandai dengan simbol kotak yang berwarna hijau. Sedangkan grafik resistivitas semu dan fase TM ditandai dengan simbol lingkaran yang berwarna merah muda. Pada hasil perekaman terdapat *error bar* yang ditandai dengan garis vertikal yang terdapat pada masing-masing titik data.



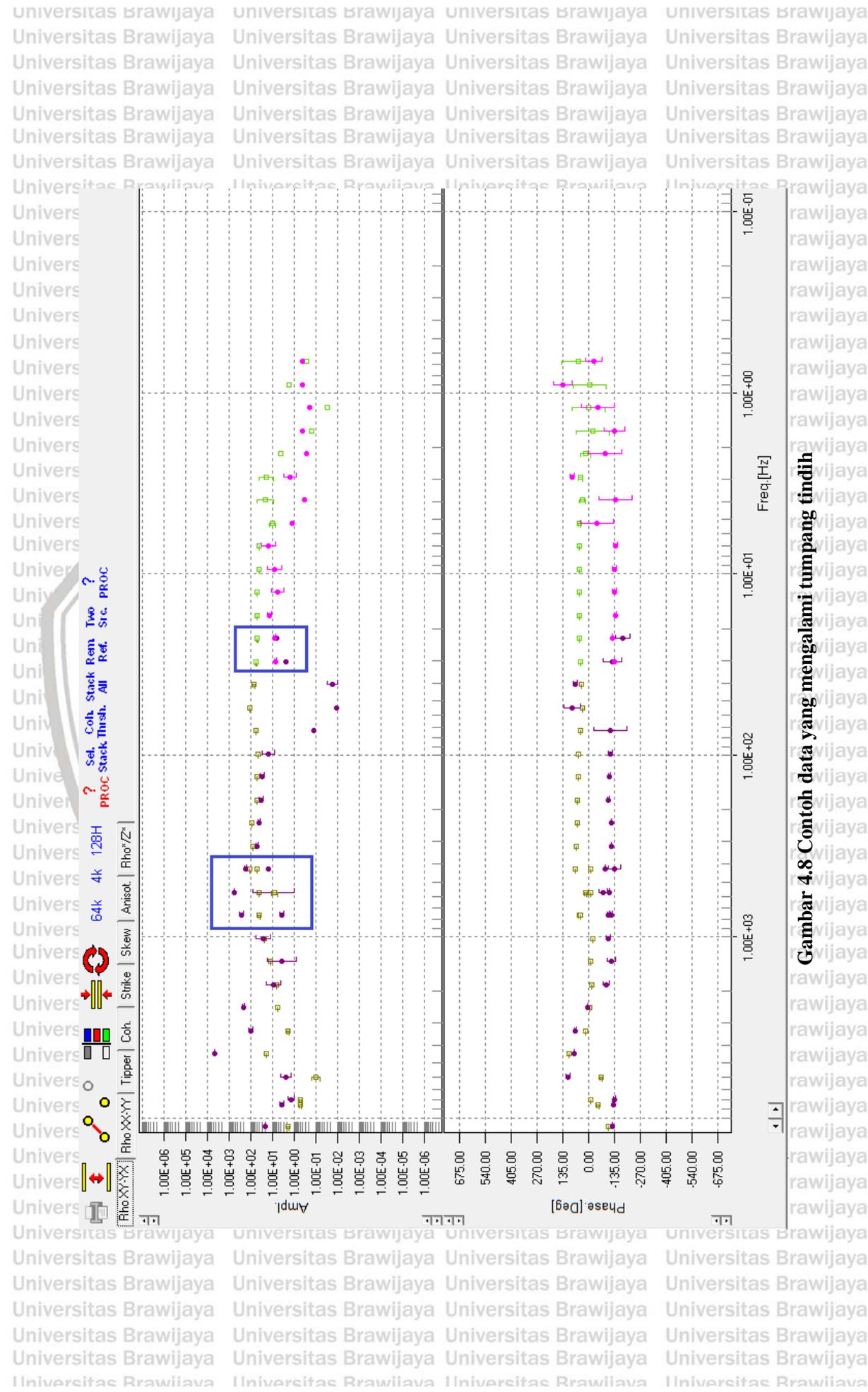
Gambar 4.7 Contoh data dalam domain frekuensi (128 Hz)

### 4.3.2 Seleksi Data dan *Filtering* Data

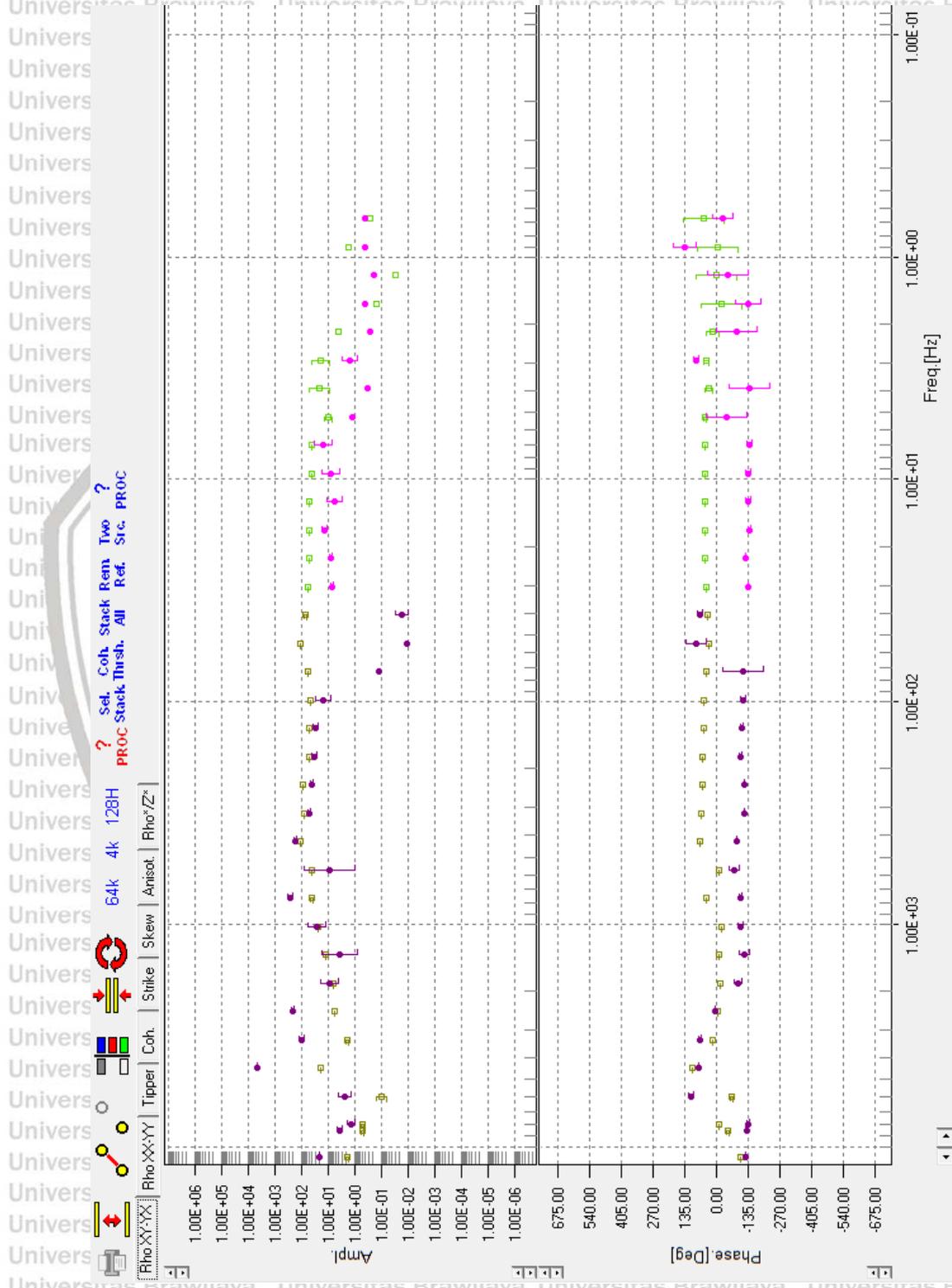
Setelah dilakukan transformasi *Fourier* untuk semua *sampling* frekuensi maka semua data digabungkan menjadi satu. Akibat dari penggabungan 3 *sampling* frekuensi (65 kHz, 4 kHz dan 128 Hz), terdapat data yang mengalami tumpang tindih atau *overlap*. Data yang saling tumpang tindih tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8 yang ditandai dengan kotak berwarna biru. Pada kotak berwarna biru tersebut terlihat bahwa ada beberapa titik data yang mengalami tumpang tindih.

Data-data yang saling tumpang tindih tersebut diduga karena adanya data yang sama terekam pada masing-masing *sampling* frekuensi. Agar tidak ada lagi data yang tumpang tindih, maka dilakukan seleksi yaitu dengan menggunakan data yang dianggap lebih baik sedangkan data yang kurang baik tidak digunakan. Kriteria data yang dianggap baik adalah nilai TE dan TM memiliki nilai yang hampir sama atau rentang titik TE dan TM tidak terlalu jauh berbeda. Hasil seleksi data dapat dilihat pada Gambar 4.9.

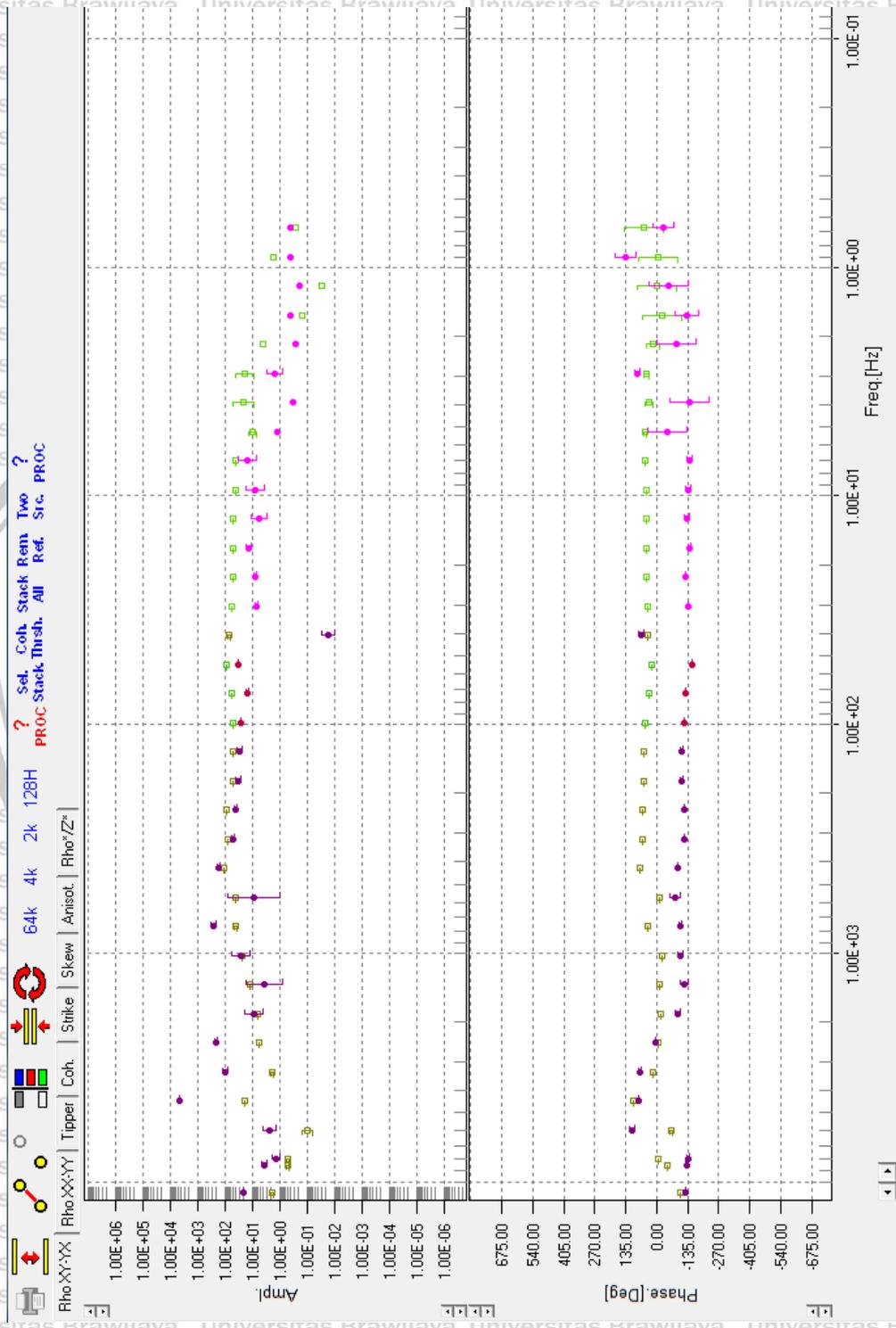
Sebelumnya juga dilakukan *filtering* data, yang bertujuan untuk mereduksi *noise* yang ikut terekam pada data. Sehingga diperoleh grafik resistivitas semu dan grafik fase dalam domain frekuensi yang lebih halus dan representatif. Gambar 4.10 merupakan contoh data yang telah dilakukan *filtering* dan telah digabungkan serta diseleksi.



Gambar 4.8 Contoh data yang mengalami tumpang tindih



Gambar 4.9 Contoh data setelah dilakukan seleksi data

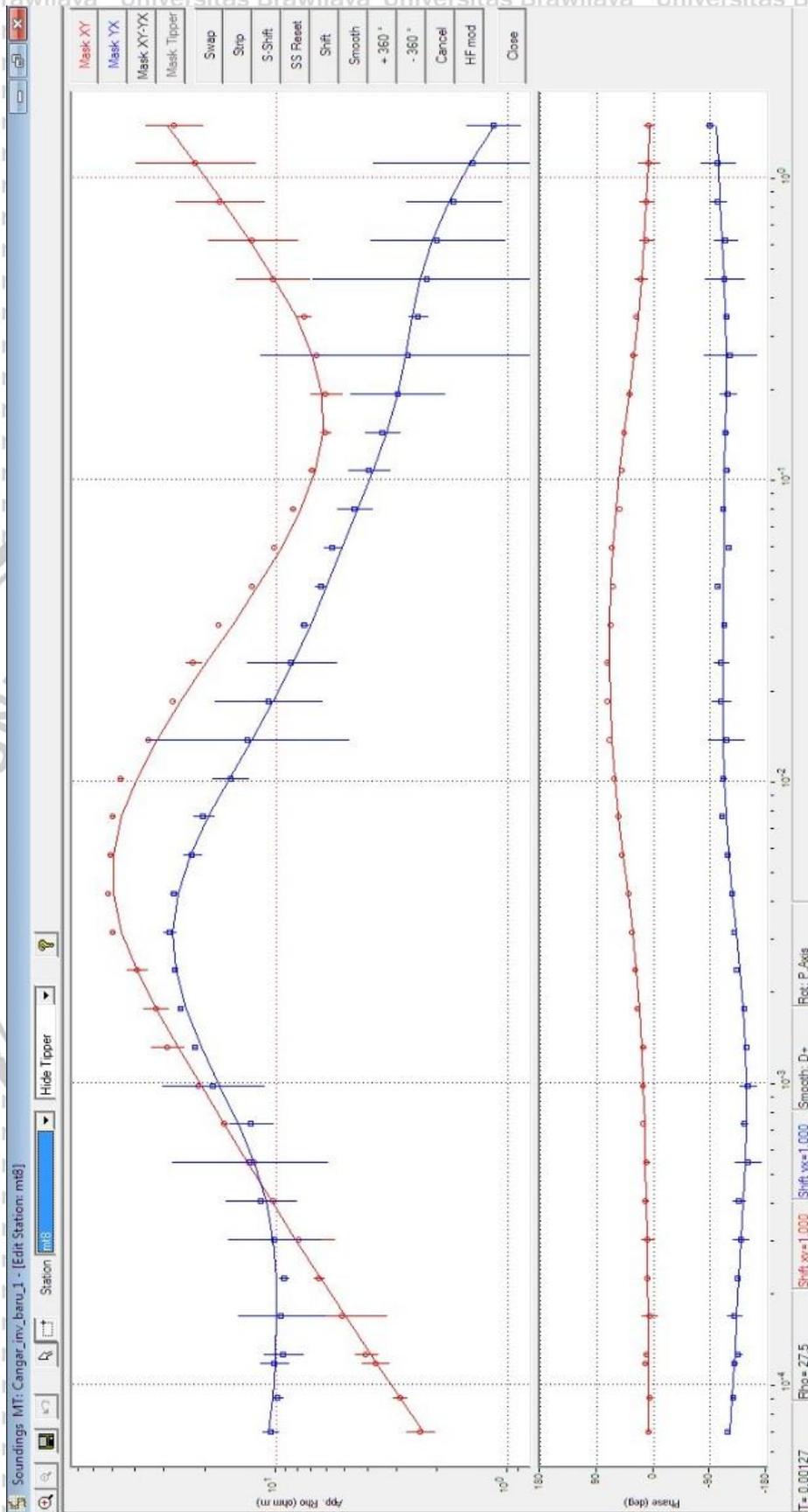


Gambar 4.10 Contoh data setelah dilakukan filtering data

### 4.3.3 Smoothing Data

Tahapan selanjutnya adalah dilakukan pengolahan data menggunakan *software* WinGlink. Pada tahapan ini dilakukan *smoothing* data yaitu agar titik-titik data hasil pengukuran sesuai dengan pola tren yang ada. *Smoothing* data dilakukan dengan mengedit pencilan data, pencilan data tersebut diduga akibat masih mengandung *noise*. Tujuan dilakukan *smoothing* data adalah memperhalus data sehingga diperoleh hasil pemodelan 2D yang lebih baik. Pada tahapan ini ditentukan perkiraan besar nilai kesalahan dari nilai resistivitas dan fase dari hasil pengukuran. Hal ini dilakukan untuk menghindari kemungkinan kesalahan kecil yang tidak realistis pada data untuk pendekatan model 2D (Oskooi dkk., 2012).

Pada penelitian ini digunakan *error* sebesar 30% untuk nilai resistivitas dan 15% untuk fase. Nilai perkiraan kesalahan tersebut digunakan untuk kalkulasi nilai resistivitas dan fase respon terukur.



Gambar 4. 11 Contoh data dilakukan *smoothing*

#### 4.3.4 Pemodelan

Tahapan terakhir dalam pengolahan data magnetotelurik adalah membuat model dari sistem panas bumi berdasarkan nilai resistivitas yang diperoleh. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan 2D dan pemodelan 3D untuk mempermudah interpretasi. Pemodelan 2D dilakukan dengan menggunakan teknik inversi. Inversi merupakan sebuah proses matematis dan statik yang digunakan untuk dapat memprediksi nilai parameter fisis di bawah permukaan berdasarkan data lapangan.

Diperlukan model matematika untuk menghubungkan data medan listrik dan data medan magnet sebagai hasil data lapangan dengan parameter fisis yang ingin diestimasi besarnya (data kalkulasi) (Daud dan Lestari, 2014). *Software* yang digunakan untuk membuat model 2D inversi adalah WinGlink. Pengolahan 2D bertujuan untuk mengetahui sistem panas bumi daerah penelitian berdasarkan sebaran nilai resistivitas terhadap kedalaman dalam bentuk kontur. Sebelumnya dibuat *mesh* untuk setiap lintasan dan dilakukan proses iterasi yang bertujuan mendapatkan kontur distribusi resistivitas batuan tiap kedalaman. Sementara itu, pengolahan 3D dilakukan dengan menggabungkan hasil dari pengolahan 2D menjadi satu menggunakan *software* Rockworks. Pemodelan 3D bertujuan untuk mengetahui pola sebaran nilai resistivitas dari sistem panas bumi secara menyeluruh dan untuk mengetahui volume reservoir panas bumi daerah penelitian.

#### 4.4 Pengolahan Data Geokimia

Metode geokimia sangat diperlukan dalam mendukung data geofisika untuk menentukan jenis sistem panas bumi daerah penelitian. Objek yang diamati pada geokimia adalah manifestasi panas bumi di permukaan yaitu dapat berupa mata air

panas ataupun gas. Pada penelitian ini data geokimia yang digunakan adalah data konsentrasi kandungan kimia pada mata air panas Cangar milik PSDG tahun 2010.

Berdasarkan data tersebut dilakukan analisis penentuan tipe air panas dan perhitungan temperatur reservoir. Untuk perhitungan temperatur reservoir, terlebih dahulu dilakukan penentuan geotermometer unsur. Tipe air panas dapat ditentukan berdasarkan konsentrasi anion dominan yang terdapat pada mata air panas. Hal tersebut dilakukan dengan *plotting* data pada diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$ .

Adapun tipe air panas yaitu air panas klorida, air panas bikarbonat dan air panas sulfat. Sementara itu, untuk penentuan geotermometer unsur ditentukan berdasarkan konsentrasi kandungan kation yang dominan, dan menimbang beberapa aspek lainnya. Ada beberapa jenis geotermometer unsur yang dapat digunakan, yaitu antara lain  $SiO_2$ ,  $Na-K$  dan  $Na-K-Ca$ . Geotermometer tersebut memiliki masing-masing perhitungan sendiri.

#### 4.5 Interpretasi

Interpretasi pada penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Interpretasi kuantitatif berdasarkan hasil pengolahan data magnetotelurik, geokimia dan korelasi kedua data tersebut. Sementara itu, untuk interpretasi kualitatif berdasarkan hasil geokimia yaitu berupa tipe air panas. Interpretasi magnetotelurik berdasarkan pemodelan 2D inversi dan 3D diperoleh penampang resistivitas sistem panas bumi bawah permukaan, volume reservoir dan sebaran sistem panas bumi daerah penelitian. Sementara itu, interpretasi data geokimia dilakukan dengan analisis konsentrasi kandungan kimia dominan yang terdapat pada mata air panas, dan perhitungan temperatur reservoir menggunakan geotermometer unsur.

Penentuan geotermometer unsur yang digunakan berdasarkan konsentrasi unsur kation dominan yang terdapat pada mata air panas. Korelasi dari data-data tersebut digunakan untuk perhitungan potensi energi panas bumi. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk perhitungan potensi energi panas bumi adalah metode volumetrik. Prinsip dari metode volumetrik yaitu menganggap reservoir berbentuk kotak, sehingga dengan mengalikan luas sebaran dan ketebalan reservoir dapat diketahui volumenya. Perhitungan matematis yang digunakan untuk potensi energi panas bumi yaitu berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI No. 13-6171-1999).

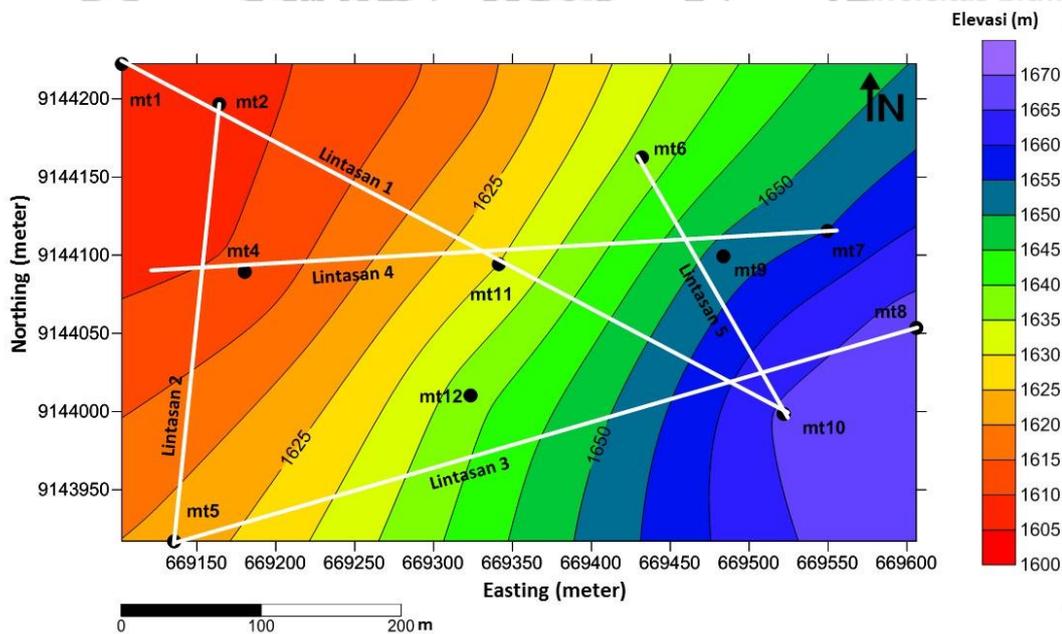


## BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Analisa Hasil

#### 5.1.1 Analisa Hasil Magnetotelurik

Akuisisi data magnetotelurik terdiri atas 11 titik pengukuran yang terbagi bagi menjadi 5 lintasan (Gambar 5.1). Titik-titik pengukuran data berada pada elevasi yang memiliki rentang nilai tidak jauh berbeda yaitu 1.600 meter sampai 1.670 meter. Pada Gambar 5.1 terlihat sebaran nilai elevasi rendah yang berada di bagian barat dan semakin meningkat di bagian timur. Berdasarkan geologi daerah penelitian, daerah bagian timur mengarah ke Gunung Welirang sehingga elevasi semakin meningkat.

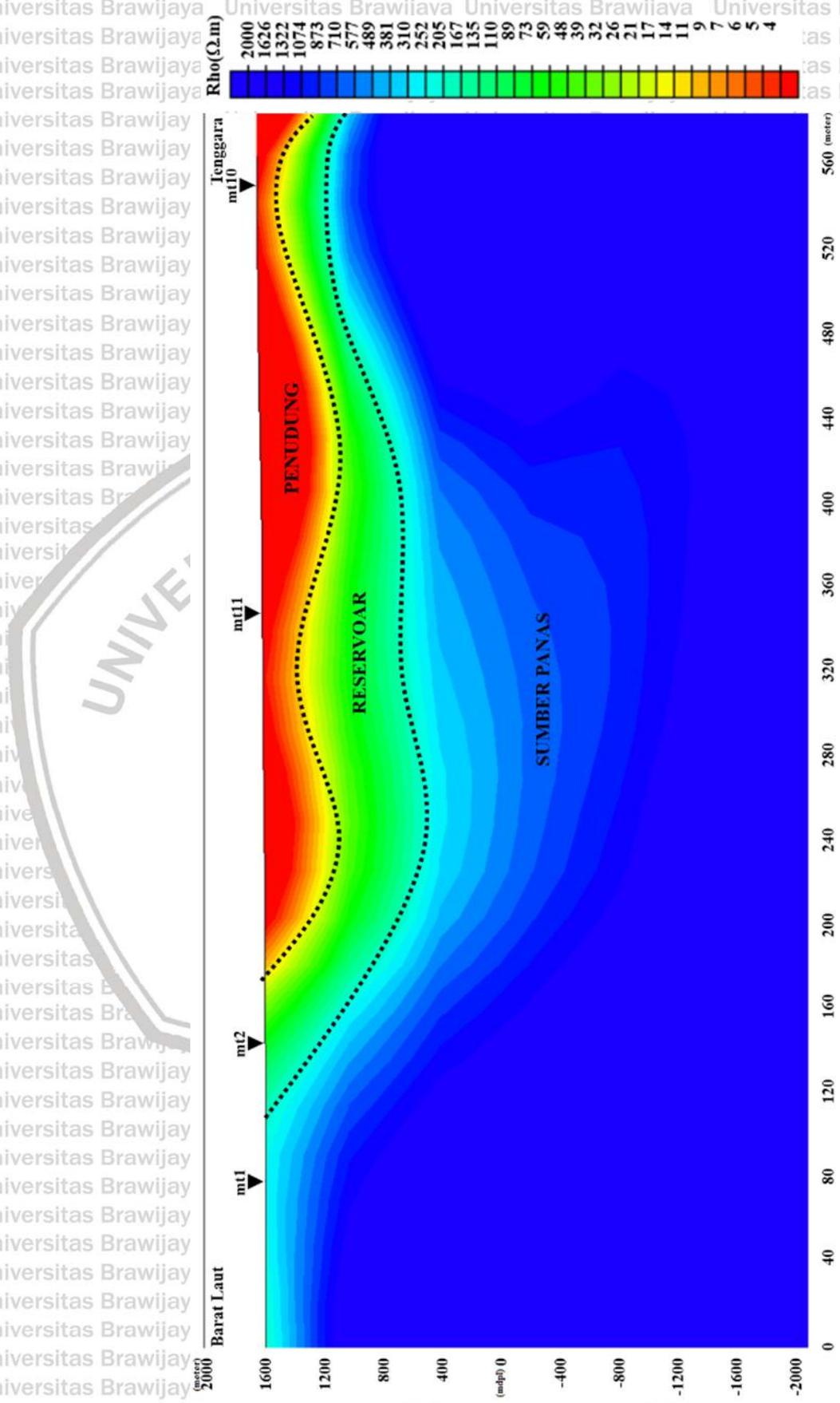


**Gambar 5.1 Kontur elevasi daerah penelitian**

Pada penelitian ini, teknik pemodelan 2D yang digunakan teknik inversi.

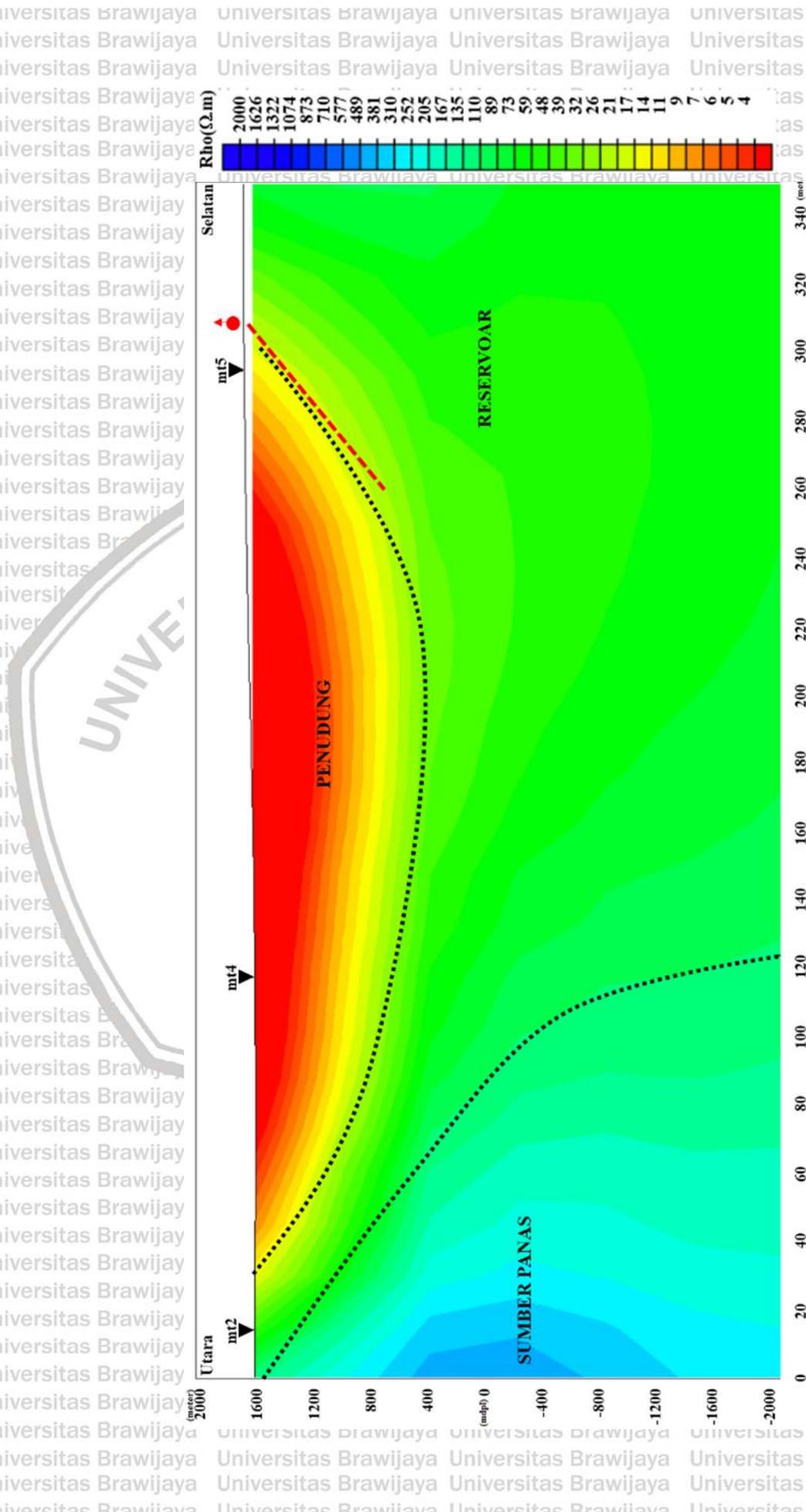
Proses inversi dilakukan pada setiap lintasan pengukuran. Parameter yang digunakan pada setiap lintasan yaitu  $\tau = 5$ ,  $\alpha = 1$  dengan iterasi 150 kali dan

diperoleh *RMS error* kurang dari 10%. Hasil pemodelan 2D untuk lintasan 1 (titik *mt1*, *mt2*, *mt11* dan *mt10*) dapat dilihat pada Gambar 5.2. Berdasarkan Gambar 5.2 terdapat perbedaan nilai resistivitas yang cukup kontras. Lapisan pertama memiliki nilai resistivitas rendah yaitu  $\leq 21 \Omega.m$  yang ditandai dengan warna merah. Keberadaan lapisan ini tampak berada di permukaan hingga elevasi 1100 meter dengan ketebalan lapisan  $\pm 500$  meter. Di bawah lapisan dengan nilai resistivitas rendah tersebut terdapat lapisan dengan nilai resistivitas sedang yaitu  $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ , yang ditandai dengan warna hijau. Lapisan ini berada hingga elevasi 500 meter dengan ketebalan  $\pm 600$  meter. Kemudian di bawah lapisan tersebut terdapat lapisan dengan nilai resistivitas tinggi yaitu  $\geq 167 \Omega.m$  yang ditandai dengan warna biru. Lapisan ini berada hingga elevasi 2000 mdpl dengan ketebalan yaitu  $\pm 3000$  meter, memiliki ketebalan paling tebal dibandingkan dengan lapisan yang lainnya. Pada lintasan 1 terdapat terobosan nilai resistivitas sedang dan resistivitas tinggi di sekitar titik *mt1* dan *mt2*. Berdasarkan data geologi daerah penelitian, di sekitar titik tersebut terdapat patahan yaitu patahan Cangar. Terobosan nilai resistivitas tersebut diduga berkaitan dengan patahan Cangar. Berdasarkan data geologi diketahui bahwa pada lintasan 1 batuan berasal dari aliran piroklastik kembar I (Qapkl) dan lava welirang I (Qlw1).



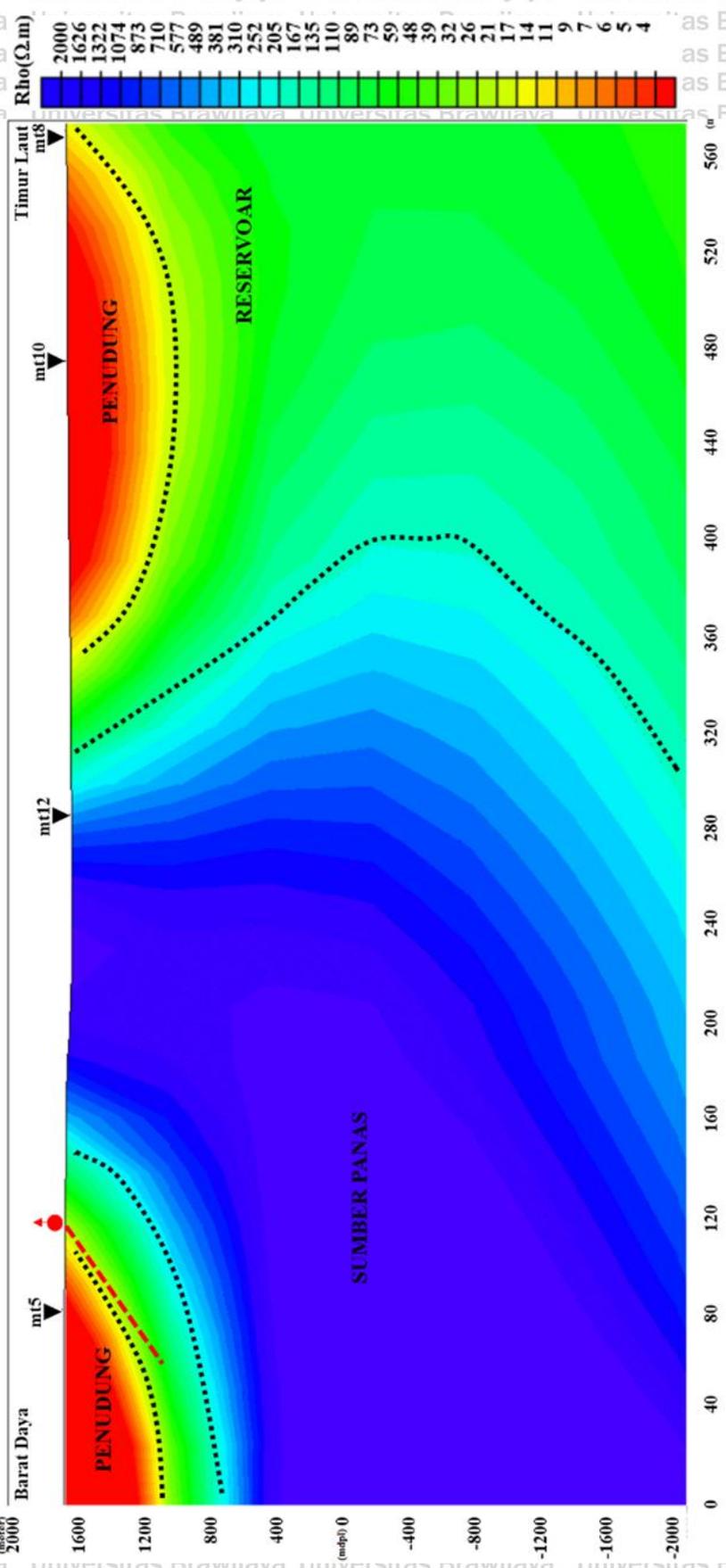
Gambar 5.2 Model Penampang 2D Lintasan 1

Penampang lintasan 2 dapat dilihat pada Gambar 5.3. Lintasan 2 terdiri dari titik *mt2*, *mt4* dan *mt5* yang membentang dari area *Agrotechno Park* UB menuju area panas bumi Cangar. Pada penampang lintasan 2 terdapat adanya lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ) yang berada di permukaan hingga elevasi 400 meter. Lapisan ini memiliki ketebalan  $\pm 1200$  meter yang lebih tebal dibandingkan pada lintasan 1. Pada lintasan 2 juga terdapat lapisan yang memiliki nilai resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ). Lapisan dengan nilai resistivitas sedang berada di bawah lapisan dengan nilai resistivitas rendah dan semakin menebal ke arah selatan hingga elevasi 2000 mdpl. Selain itu juga muncul nilai resistivitas tinggi ( $\geq 167 \Omega.m$ ) di permukaan yaitu di sekitar titik *mt2* hingga elevasi 2000 mdpl yang berada hanya di bagian utara. Terobosan nilai resistivitas sedang dan resistivitas tinggi di arah utara diduga berkaitan dengan adanya patahan Cangar, kondisi ini sama pada penampang lintasan 1. Lintasan 1 dan lintasan 2 saling berpotongan pada titik *mt2* sehingga terdapat kesesuaian hasil penampang. Selain itu, di sekitar titik *mt5* terdapat terobosan nilai resistivitas sedang ke permukaan. Hal ini diduga berkaitan dengan adanya rekahan batuan di sekitar titik tersebut. Sehingga menyebabkan fluida di dalam reservoir bermigrasi ke permukaan. Berdasarkan data geologi daerah penelitian diketahui bahwa di sekitar titik tersebut terdapat manifestasi air panas. Pada lintasan ini didominasi oleh batuan yang berasal dari aliran piroklastik Kembar I (Qapkl) dan erupsi samping (Qes).



Gambar 5.3 Model Penampang 2D Lintasan 2

Lintasan 3 terdiri dari titik *mt5*, *mt12*, *mt10* dan *mt8*. Penampang 2D untuk lintasan 3 dapat dilihat pada Gambar 5.4. Pada penampang lintasan 3 terdapat lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ), resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) dan resistivitas tinggi ( $\geq 167 \Omega.m$ ). Lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ) berada di arah barat daya dan timur laut. Lapisan ini muncul di permukaan hingga elevasi 1000 dengan ketebalan  $\pm 600$  meter. Lapisan dengan nilai resistivitas sedang menerobos ke permukaan dan lebih mendominasi hanya dibagian timur laut hingga elevasi 2000 mdpl. Lapisan ini memiliki ketebalan  $\pm 3300$  meter. Berdasarkan penelitian Rakhmanto dkk. (2011) pada daerah ini (lintasan 3) terdapat beberapa manifestasi air panas. Manifestasi tersebut berada di sekitar titik *mt5*. Terobosan nilai tersebut diduga berkaitan dengan keberadaan rekahan batuan. Selain itu, terdapat juga lapisan dengan nilai resistivitas tinggi ( $\geq 167 \Omega.m$ ) yang muncul di permukaan hingga elevasi 2000 mdpl. Lintasan 3 melewati sungai dan kolam pemandian air panas Cangar. Lapisan sedimen diduga berada di bawah sungai dan telah mengalami pengikisan, sehingga menyebabkan tingginya nilai resistivitas di permukaan. Berdasarkan data geologi, batuan pada lintasan 3 berasal dari erupsi samping (Qes), aliran piroklastik kembar I (Qapkl) dan lava Welirang I (Qlw1).

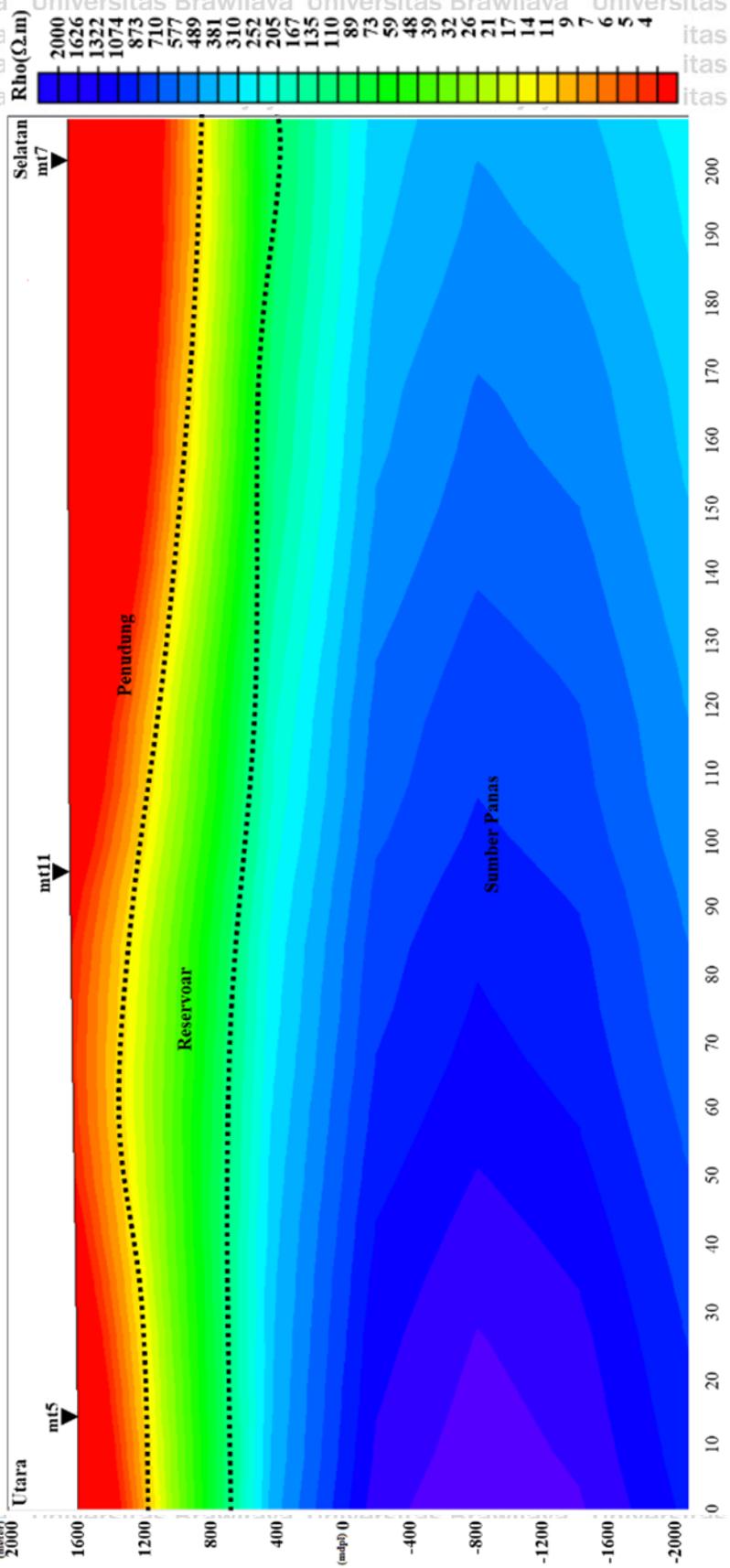


Gambar 5.4 Model Pemampang 2D Lintasan 3

Penampang 2D lintasan 4 dapat dilihat pada Gambar 5.5. Lintasan terdiri dari titik *mt5*, *mt11*, *mt9* dan *mt7*. Pada Gambar 5.5 terlihat hanya terdapat lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ) dan resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ). Titik awal lintasan 4 berada di dalam area panas bumi Cangar kemudian menuju ke arah timur area *Agrotechno Park* UB. Lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ) berada di permukaan hingga elevasi 1100 meter di arah barat dan muncul juga di arah timur namun lebih tipis. Lapisan ini memiliki ketebalan  $\pm 500$  meter. Sementara itu lapisan dengan nilai resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) juga terlihat di permukaan hingga elevasi 2000 mdpl. Pada lintasan 4 diduga terdapat rekahan-rekahan batuan akibat dari patahan Cangar. Berdasarkan data geologi, pada lintasan ini batuan yang mendominasi berasal dari lava Welirang I (Qlw1).

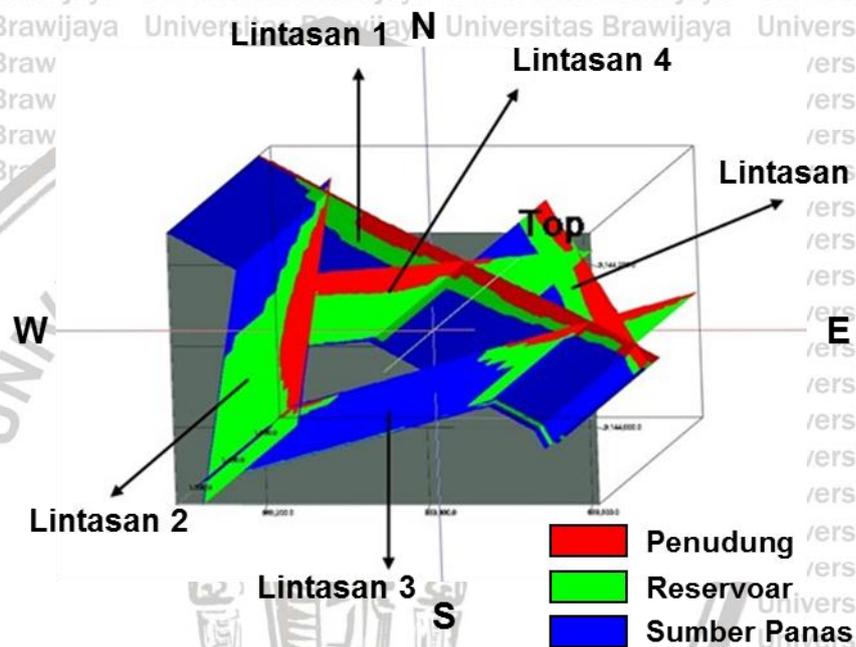
Penampang 2D lintasan 5 dapat dilihat pada Gambar 5.6, terdiri dari *mt6*, *mt9* dan *mt10*. Semua titik pada lintasan 5 berada di area *Agrotechno Park* UB, tepatnya di arah timur dari pemandian air panas Cangar. Lintasan ini berada pada elevasi tertinggi dibandingkan dengan lintasan-lintasan sebelumnya, karena posisi lintasan ini lebih mengarah ke Gunung Welirang. Berdasarkan penampang lintasan 5 terdapat lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ), resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) dan resistivitas tinggi ( $\geq 167 \Omega.m$ ) yang tersebar merata pada semua titik pengukuran. Lapisan resistivitas rendah muncul di permukaan dan semakin menebal ke arah selatan. Lapisan ini memiliki ketebalan  $\pm 500$  meter. Tepat di bawah lapisan resistivitas rendah terdapat lapisan resistivitas sedang dengan ketebalan lapisan  $\pm 600$  meter dan diikuti oleh lapisan resistivitas tinggi yang berada hingga elevasi 2000 mdpl dengan ketebalan  $\pm 2600$  meter.





Gambar 5.6 Model Penampang 2D Lintasan 5

Berdasarkan peta kontur elevasi pada Gambar 5.1, terlihat bahwa semua lintasan saling berpotongan. Jika kelima model penampang 2D (Gambar 5.2 – Gambar 5.6) digabungkan secara 3 dimensi sesuai arah lintasan, maka akan membentuk suatu model penampang *fence* 3D seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7. Model 3D sederhana ini digunakan untuk menentukan arah persebaran sistem panas bumi yang berada di area penelitian.



Gambar 5.7 Pemodelan *fence* sistem panas bumi daerah penelitian

Berdasarkan Gambar 5.7 terlihat sebaran nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega.m$ ) yang hampir merata pada permukaan daerah penelitian. Nilai resistivitas sedang ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) juga terlihat pada semua lintasan. Nilai resistivitas sedang ini diduga sebagai reservoir tempat terakumulasinya fluida panas. Lintasan 1 dan lintasan 2 terdapat terobosan nilai resistivitas tinggi ke permukaan. Hal tersebut diduga akibat adanya patahan Cangar. Lintasan 2 dan lintasan 3 juga terdapat terobosan nilai resistivitas sedang dan resistivitas tinggi. Kedua lintasan tersebut

diketahui bahwa terdapat manifestasi air panas yang muncul ke permukaan yang diduga berasal dari patahan Cangar dan rekahan batuan di sekitar daerah manifestasi. Patahan dan rekahan tersebut diduga merupakan jalur dari zona *outflow* dari sistem panas bumi Cangar. Zona *outflow* dari sistem panas bumi biasanya ditandai dengan keberadaan patahan di sekitar manifestasi panas bumi.

### 5.1.2 Analisa Hasil Data Geokimia

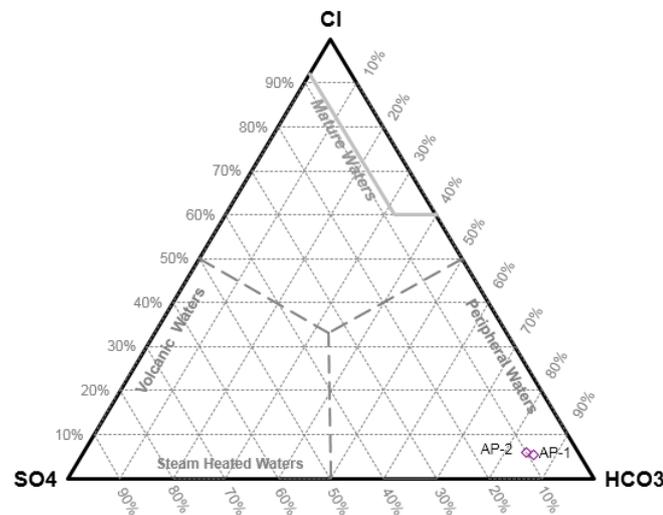
Data geokimia digunakan sebagai data pendukung penelitian. Geokimia digunakan untuk mengetahui tipe air panas dan temperatur reservoir. Data geokimia yang digunakan merupakan data geokimia kompleks Arjuno-Welirang hasil penelitian PSDG tahun 2010. Berikut adalah data geokimia untuk daerah Cangar (Tabel 5.1).

**Tabel 5.1 Data geokimia fluida panas**

No	Parameter	Konsentrasi (ppm)	
		Cangar 1 (AP-1)	Cangar 2 (AP-2)
1	pH	7,1	7,15
2	<i>Cl</i>	69,27	20,78
3	<i>SO<sub>4</sub></i>	83,99	50,22
4	<i>HCO<sub>3</sub></i>	611,46	335,36
5	<i>SiO<sub>2</sub></i>	119,81	108,54
6	<i>Na</i>	109,65	65
7	<i>K</i>	26,63	15,2
8	<i>Ca</i>	58,17	50,5

Hasil analisis geokimia menunjukkan bahwa air panas di daerah Cangar mempunyai kandungan *Cl*, *SO<sub>4</sub>*, *HCO<sub>3</sub>*, *SiO<sub>2</sub>*, *Na*, *K* dan *Ca* untuk setiap mata air panas. Air panas Cangar memiliki pH yang mendekati pH netral yaitu antara 7,1 – 7,15. Berdasarkan komposisi kandungan kimia pada Tabel 5.1 diketahui bahwa konsentrasi anion *HCO<sub>3</sub>* sangat tinggi yaitu 611,46 ppm (AP-1) dan 335,36 ppm

(AP-2). Hasil plotting diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  (Gambar 5.8) menunjukkan bahwa mata air panas Cangar adalah tipe air bikarbonat.



Gambar 5.8 Diagram  $Cl-SO_4-HCO_3$

Berdasarkan Tabel 5.1 diketahui bahwa konsentrasi kation dominan pada air panas Cangar adalah  $SiO_2$  dan  $Na$ . Sehingga geotermometer unsur yang dapat digunakan untuk perhitungan temperatur reservoir adalah  $SiO_2$ ,  $Na-K$  atau  $Na-K-Ca$ . Pada penelitian ini geotermometer yang digunakan adalah geotermometer  $Na-K$ . Hal ini dilakukan karena komposisi  $Na$  dalam fluida panas bumi juga relatif tinggi. Selain itu juga berdasarkan acuan dari penelitian sebelumnya bahwa geotermometer unsur yang digunakan adalah  $Na-K$ , sehingga menjadi alasan penggunaan geotermometer ini. Temperatur reservoir hasil perhitungan geotermometer  $Na-K$  dapat dilihat pada Tabel 5.2. Berdasarkan analisa pada Tabel 5.2 diketahui bahwa temperatur reservoir kedua mata air panas Cangar yaitu  $311^\circ C$  -  $315^\circ C$ . Rata-rata temperatur reservoir daerah penelitian adalah  $\pm 300^\circ C$ .

Tabel 5.2 Geotermometer Na-K

Mata air panas	Tipe air	Unsur	Konsentrasi (ppm)	Temperatur (°C)
Cangar 1	Air bikarbonat	Na	109,65	315
		K	26,63	
Cangar 2	Air bikarbonat	Na	65	311
		K	15,2	

## 5.2 Pembahasan

Kompleks Arjuno-Welirang merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi panas bumi. Potensi panas bumi di daerah tersebut berupa fumarol, solfatar dan beberapa mata air panas yang tersebar di bagian barat Gunung Welirang. Salah satu bagian dari kompleks Arjuno-Welirang yang memiliki potensi panas bumi adalah Cangar. Manifestasi panas bumi di daerah Cangar yaitu berupa mata air panas yang muncul di permukaan. Interpretasi kuantitatif dianalisis berdasarkan data magnetotelurik. Hasil magnetotelurik menunjukkan bahwa rentang nilai resistivitas di daerah penelitian berkisar antara 4  $\Omega$ .m sampai 2.000  $\Omega$ .m. Pada penelitian ini terdapat 3 lapisan dengan 3 rentang nilai resistivitas, yaitu resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega$ .m), resistivitas sedang (21  $\Omega$ .m – 167  $\Omega$ .m) dan nilai resistivitas tinggi ( $\geq 167 \Omega$ .m).

Pada daerah penelitian, lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $\leq 21 \Omega$ .m) diinterpretasikan sebagai lapisan penutup, yang ditandai dengan lapisan berwarna merah. Lapisan dengan nilai resistivitas rendah diperkirakan merupakan respon dari batuan alterasi yang berfungsi sebagai batuan penutup. Lapisan penutup bersifat konduktif, hal tersebut dikarenakan tingginya kandungan mineral lempung pada batuan (Uchida, 1990). Pada daerah penelitian, nilai resistivitas rendah diduga berkaitan dengan proses alterasi hidrotermal yaitu interaksi antara fluida panas yang

berasal dari reservoir dengan batuan sekitar (Zarkasyi dan Rahadinata, 2015).

Interaksi tersebut mengakibatkan porositas dan permeabilitas batuan berkurang karena hasil alterasi yang mengisi pori-pori pada batuan. Lapisan penudung bersifat kedap air sehingga memiliki kemampuan mencegah keluarnya fluida panas yang terdapat di reservoir menuju permukaan. Agar dapat naik ke permukaan, fluida panas membutuhkan celah. Pada daerah panas bumi Cangar, diduga fluida panas keluar melalui patahan dan rekahan batuan (Nuqramadha, 2011).

Zona reservoir berada diantara zona nilai resistivitas rendah dengan zona nilai resistivitas tinggi. Pada penelitian ini terdapat lapisan dengan nilai resistivitas sedang yaitu  $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ , yang diduga sebagai lapisan reservoir. Pada penelitian ini, diduga batuan yang berperan sebagai lapisan reservoir adalah lava dan andesit. Nilai resistivitas sedang biasanya berasosiasi dengan batuan yang berfungsi sebagai reservoir panas bumi. Lapisan reservoir memiliki nilai resistivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan penudung. Hal tersebut dikarenakan berkurangnya kandungan mineral lempung pada batuan penyusun (Asaue, 2005). Alterasi mineral melalui proses hidrotermal mempengaruhi nilai resistivitas batuan. Perbedaan kandungan mineral pada batuan dapat menyebabkan nilai resistivitas yang berbeda. Pada sistem panas bumi di daerah vulkanik, batuan yang teralterasi umumnya memberikan respon nilai resistivitas rendah sedangkan batuan yang berfungsi sebagai reservoir memberikan respon nilai resistivitas lebih tinggi dibandingkan batuan penudung (Johnston, dkk., 1992). Berbeda dengan lapisan penudung, lapisan reservoir tersusun atas batuan yang bersifat permeabel sehingga fluida panas pada reservoir bisa keluar menuju permukaan. Reservoir

merupakan tempat terakumulasinya air pembawa panas (Dickson dan Fanelli, 2003).

Nilai resistivitas tertinggi dari hasil penelitian ini adalah  $\geq 167 \Omega.m$ . Lapisan dengan ini diduga sebagai lapisan sumber panas. Batuan yang berperan sebagai lapisan sumber panas diduga adalah batuan tufa dan basalt. Sumber panas berfungsi memanaskan fluida yang berada dalam reservoir yang ditutupi oleh batuan penudung melalui proses konveksi (Dickson dan Fanelli, 2003). Lapisan penudung, lapisan reservoir dan lapisan sumber panas merupakan sistem utama dari panas bumi. Persebaran nilai resistivitas lapisan-lapisan tersebut dapat dilihat pada pemodelan 3D (Gambar 5.7). Diketahui bahwa lapisan penudung dan lapisan reservoir tersebar merata pada setiap lintasan. Berdasarkan hasil pemodelan 3D, volume reservoir panas bumi Cangar sekitar  $\pm 200.000.000 m^3$ .

Berdasarkan penelitian dari PSDG diketahui bahwa pada kompleks Arjuno-Welirang tersebar lapisan dengan nilai resistivitas rendah dan nilai resistivitas sedang. Pada penelitian tersebut, lapisan dengan nilai resistivitas rendah diperoleh sebesar  $\leq 10 \Omega.m$ , yang tersebar di dua lokasi yaitu salah satunya berada di area panas bumi Cangar. Nilai resistivitas rendah tersebut diduga sebagai lapisan penudung, yang merupakan respon dari batuan alterasi. Terdapat juga lapisan dengan nilai resistivitas sedang yaitu  $10 \Omega.m - 100 \Omega.m$ , yang diperkirakan berada di bawah batuan penudung. Lapisan dengan nilai resistivitas sedang tersebut diduga sebagai lapisan reservoir (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017). Akibat adanya rekahan batuan, menyebabkan fluida yang berasal dari reservoir bermigrasi ke permukaan. Berdasarkan data geologi, batuan penyusun lapisan reservoir adalah lava dan piroklastik, yang merupakan hasil dari letusan magmatik (Hadi dkk.,

2011). Selain itu batuan tersebut merupakan batuan dari produk vulkanik Arjuno-Welirang Tua yang telah mengalami proses deformasi. Akibat deformasi tersebut memungkinkan membentuk pola rekahan (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017). Sehingga fluida yang berasal dari reservoir dapat mengalir naik ke permukaan. Terdapat juga lapisan yang memiliki nilai resistivitas tinggi yang diduga sebagai lapisan sumber panas. Sumber panas kemungkinan akibat aktivitas vulkanik terakhir pada kompleks Arjuno-Welirang. Sumber panas tersebut diduga berasal dari bawah kerucut Gunung Arjuno-Welirang (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, Kementerian ESDM, 2017).

Selain itu, ditinjau juga berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu geolistrik resistivitas dan geomagnetik. Pada penelitian geomagnetic, lintasan 1 dan lintasan 3 memiliki arah sayatan yang sama yaitu arah barat laut-tenggara dan barat-timur. Hasil penampang magnetik pada kedua sayatan tersebut diperoleh nilai suseptibilitas rendah yaitu -3,166 dan -0,018. Nilai suseptibilitas rendah tersebut diduga sebagai indikasi keberadaan potensi panas bumi daerah Cangar (Afandi dkk., 2012). Melalui proses alterasi hidrotermal, batuan dalam sistem panas bumi memiliki magnetisasi lebih rendah dibandingkan dengan batuan sekitarnya (Maryanto, 2017). Batuan yang diduga menjadi batuan pembawa panas pada daerah Cangar adalah basalt (Afandi dkk., 2012). Air panas berasal dari pemanasan air bawah tanah oleh batuan basalt dan batuan lava dari batuan vulkanik Arjuno-Welirang (Maryanto, 2017). Sementara itu, berdasarkan metode geolistrik resistivitas diketahui terdapat lapisan dengan nilai resistivitas rendah  $\leq 10 \Omega.m$ , diduga sebagai lapisan pembawa panas. Terdapat lima lokasi manifestasi panas bumi yang berada di sekitar kolam pemandian air panas Cangar (Rakhmanto dkk.,

2011). Berdasarkan hasil magnetotelurik pada penampang lintasan 2 dan lintasan 3, terdapat manifestasi air panas yang diduga berasal dari rekahan batuan yang berada di sekitar kolam pemandian air panas, yang ditandai dengan adanya terobosan nilai resistivitas sedang ke permukaan.

Manifestasi air panas Cangar yang muncul ke permukaan diduga dikontrol oleh patahan yang berada di daerah Cangar yaitu patahan Cangar (Maryanto, 2017).

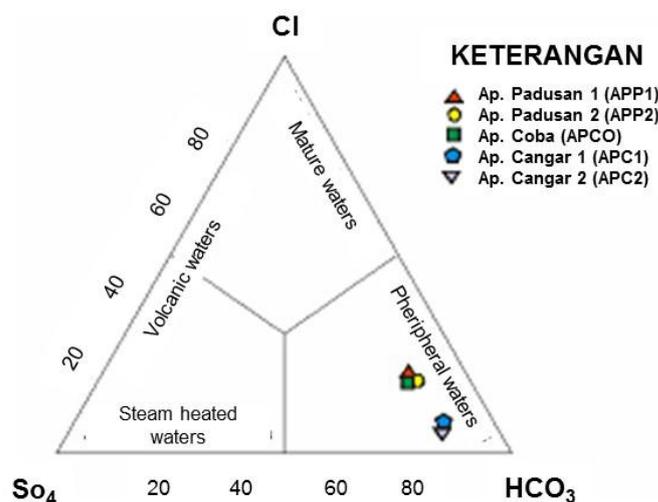
Akibat dari aktivitas patahan tersebut menyebabkan rekahan pada batuan. Rekahan batuan juga dapat berasal dari sifat fisik batuan itu sendiri yaitu salah satunya memiliki banyak pori (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, Kementerian ESDM, 2017). Patahan dan rekahan batuan diduga menjadi media keluarnya air panas menuju permukaan. Keberadaan patahan Cangar dan rekahan batuan yang menjadi celah mengidentifikasi bahwa daerah panas bumi Cangar merupakan zona *outflow*. Sedangkan zona *upflow* diduga berada di bawah puncak Gunung Welirang yang berasosiasi dengan batuan andesit (Utama dkk., 2012).

Sementara itu, berdasarkan data hasil geokimia diperoleh kandungan unsur kimia pada dasarnya sama untuk kedua mata air panas. Komponen kandungan kimia anion  $Cl$ ,  $SO_4$  dan  $HCO_3$  digunakan untuk mengetahui tipe air panas bumi dan dapat mengetahui proses yang berlangsung di dekat permukaan (dangkal) (Herdianita dkk., 2006). Hasil *plotting* pada diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  menunjukkan bahwa tipe air panas adalah tipe air bikarbonat. Berdasarkan analisis geokimia diketahui bahwa unsur anion yang paling dominan terdapat pada air adalah  $HCO_3$  dan mengandung  $CO_2$ . Pada daerah Cangar diketahui bahwa air panas memiliki pH netral dan terdapat sinter karbonat (Hadi dkk., 2011). Hal ini memperkuat bahwa tipe air panas pada daerah penelitian adalah air bikarbonat,

karena air bikarbonat memiliki pH netral sebagai hasil reaksi fluida dengan batuan di sekitarnya dan dipermukaan terdapat sinter karbonat. Air bikarbonat berasal dari proses disolusi  $CO_2$  dan kondensasi dari uap panas bumi (*geothermal steam*) (Gupta dan Roy, 2007). Terlarutnya gas  $CO_2$  ke dalam air membentuk  $HCO_3$  yang berhubungan dengan gas magmatik (Kusnadi dkk., 2006). Pada sistem yang didominasi vulkanik, umumnya air bikarbonat terbentuk di daerah marginal dan dekat permukaan (Sukhyar, 2014). Tipe air bikarbonat yang hadir tersebut menunjukkan bahwa air reservoir telah mengalami kondensasi dan pencampuran dengan air permukaan. Kondensasi uap tersebut dapat memanaskan air tanah sehingga membentuk larutan  $HCO_3$ . Air panas tipe bikarbonat terbawa mengikuti arus dari *ground water* sampai menemukan rekahan atau patahan untuk dapat naik ke permukaan. Proses tersebut mengindikasikan bahwa kemunculan air panas ke permukaan merupakan zona *outflow* dari sistem panas bumi daerah penelitian (Daud, 2008).

Tipe air panas berdasarkan penelitian PSDG di kompleks Arjuno-Welirang menunjukkan bahwa semua tipe air berjenis bikarbonat, termasuk di daerah Cangar.

Hasil *plotting* data PSDG tahun 2010 pada diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  dapat dilihat pada Gambar 5.9. Diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  tersebut menunjukkan hasil yang sama dengan hasil *plotting* data pada penelitian ini.



**Gambar 5.9** Diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$  di kompleks Arjuno-Welirang (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017)

Analisis geokimia selanjutnya adalah perhitungan temperatur reservoir dengan menggunakan geotermometer unsur. Geotermometer unsur yang digunakan adalah geotermometer  $Na-K$ , karena  $Na$  merupakan salah satu konsentrasi kation yang dominan pada air panas Cangar. Berdasarkan geotermometer  $Na-K$ , temperatur reservoir masing-masing mata air panas diperoleh sebesar  $311^{\circ}C$  dan  $315^{\circ}C$ . Hasil perhitungan tersebut hampir sama dengan hasil PSDG yaitu  $310^{\circ}C$  dan  $314^{\circ}C$ . Daerah penelitian memiliki nilai temperatur reservoir yang cukup tinggi yaitu dengan nilai rata-rata sebesar  $313^{\circ}C$ . Menurut Hochstein (1982), sistem panas bumi daerah penelitian termasuk dalam sistem panas bumi bertemperatur tinggi, karena memiliki temperatur reservoir lebih besar dari  $225^{\circ}C$ .

Indikasi zona *upflow* dan *outflow* dari sistem panas bumi kompleks Arjuno-Welirang dapat ditinjau berdasarkan penelitian Nuqramadha (2011). Kemunculan manifestasi fluida panas diduga berasal dari pusat sistem (*updome*). Fluida panas yang berasal dari reservoir tidak naik menerus ke puncak, tetapi turun ke lembah berinteraksi dengan air tanah (*groundwater*) dan naik ke permukaan melalui

rekahan atau patahan. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa diduga fluida panas pada daerah penelitian menuju permukaan melalui celah rekahan batuan atau patahan. Terobosan nilai resistivitas naik ke permukaan melalui patahan, yaitu patahan Cangar. Hal ini menunjukkan bahwa fluida yang berasal dari reservoir naik ke permukaan melalui patahan dan rekahan batuan yang disebabkan oleh patahan itu sendiri (Nuqramadha, 2011).

### 5.3 Potensi Energi Panas Bumi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan potensi energi panas bumi untuk daerah Cangar. Perhitungan potensi energi panas bumi membutuhkan data atau parameter dari metode magnetotelurik dan data geokimia. Parameter magnetotelurik yang dibutuhkan adalah luasan area panas bumi dan ketebalan reservoir. Parameter geokimia yang dibutuhkan adalah temperatur reservoir. Selain itu juga digunakan beberapa parameter lainnya yang terdapat pada Tabel 5.3. Perhitungan potensi energi panas bumi di daerah penelitian menggunakan metode volumetrik yang sesuai SNI No.13-6171-1999. Daerah panas bumi Cangar termasuk dalam kelas sumber daya terduga, sehingga dapat digunakan asumsi angka parameter pada kelas sumber daya terduga yang terdapat pada Tabel 2.4.

Tabel 5.3 Asumsi dan acuan yang digunakan untuk perhitungan parameter

Parameter	Kondisi Awal	Kondisi Akhir	Acuan
Porositas batuan reservoir		0,1	SNI No.13-6171-1999
Kapasitas batuan (kJ/kgC)		1	SNI No.13-6482-2000
Densitas batuan (kg/m <sup>3</sup> )		2,5x10 <sup>3</sup>	SNI No.13-6482-2000
Saturasi air (fraksi)		1	SNI No.13-6171-1999
Saturasi uap (fraksi)		0	SNI No.13-6171-1999
Temperatur akhir reservoir (°C)		120	SNI No.13-6171-1999
Densitas air (kg/m <sup>3</sup> )	909,1	909,1	Tabel uap
Densitas uap (kg/m <sup>3</sup> )	2,5	1,1	Tabel uap
Energi dalam air (kg/m <sup>3</sup> )	631,6	504,1	Tabel uap
Energi dalam uap (kg/m <sup>3</sup> )	2560,2	2529,8	Tabel uap
Waktu pembangkitan (tahun)		30	SNI No.13-6171-1999
Faktor perolehan (%)		0,25	Saptadji (2002)
Faktor konversi listrik (%)		0,1	SNI No.13-6171-1999

Perhitungan energi potensi panas bumi pada kelas sumber daya terduga dapat digunakan Persamaan (2.37):

$$H_e = Ah \{ (1 - \Phi) \rho_r c_r T + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V) \}$$

Pada persamaan tersebut dibutuhkan parameter berdasarkan metode magnetotelurik dan data geokimia yaitu  $A$  merupakan luas area potensi panas bumi,  $h$  merupakan ketebalan reservoir dan  $T$  merupakan temperatur reservoir. Luas area potensi panas bumi daerah penelitian adalah 306.000 m<sup>2</sup>, ketebalan reservoir 1.900 m dan temperatur reservoir  $\pm 300^\circ\text{C}$ . Terdapat dua kondisi yaitu kondisi awal ( $H_{ei}$ ) dan kondisi akhir reservoir ( $H_{ef}$ ). Kondisi awal reservoir menyatakan kondisi kandungan energi di dalam reservoir pada keadaan awal pemanfaatan. Berdasarkan hasil perhitungan geotermometer  $Na-K$  diperoleh temperatur reservoir rata-rata sebesar  $\pm 300^\circ\text{C}$  yang merupakan temperatur awal. Sementara itu, kondisi akhir reservoir menyatakan kondisi kandungan energi di dalam reservoir pada keadaan

akhir atau kondisi air yang telah berubah menjadi uap. Temperatur reservoir akhir yang digunakan adalah 180°C (Tabel 2.2), sesuai dengan ketentuan Badan Standardisasi Nasional (1999). Energi panas bumi yang tersedia dihitung berdasarkan kandungan energi yang tersimpan dalam reservoir pada keadaan awal (Persamaan 2.38) dan keadaan akhir (Persamaan 2.39).

$$H_{ei} = Ah \left\{ (1 - \Phi) \rho_r c_r T_i + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V)_i \right\}$$

$$H_{ef} = Ah \left\{ (1 - \Phi) \rho_r c_r T_f + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_V U_V S_V)_f \right\}$$

Hasil perhitungan energi panas yang tersedia diperoleh sebesar  $1,8 \times 10^{14}$  kJ.

Sementara itu, hasil perhitungan energi panas bumi yang dapat diproduksi, energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan dan potensi listrik dapat dilihat pada Tabel

5.4.

**Tabel 5.4 Hasil perhitungan potensi energi panas bumi Cangar**

Perhitungan	Kondisi Awal	Kondisi Akhir
Kandungan energi yang tersimpan dalam reservoir (kJ)	$4,4 \times 10^{14}$	$2,6 \times 10^{14}$
Energi panas bumi maksimal yang tersedia (kJ)		$1,8 \times 10^{14}$
Energi panas bumi yang dapat diproduksi (kJ)		$4,5 \times 10^{13}$
Energi panas yang dapat dimanfaatkan (MW <sub>th</sub> )		47,6
Potensi Listrik (MW <sub>e</sub> )		4,8

Potensi sumber daya listrik yang dihasilkan pada daerah panas bumi Cangar yaitu sebesar 4,8 MW<sub>e</sub>, hasil yang diperoleh tersebut relatif kecil. Salah satu faktor yang paling mempengaruhi nilai potensi energi panas bumi adalah luasan area penelitian yang kecil yaitu 680 m x 450 m. Area ini hanya melingkupi sekitar pemandian air panas Cangar dan *Agrotechno Park* UB. Berdasarkan hasil penelitian PSDG, diperoleh potensi panas bumi Cangar untuk sumber daya cadangan terduga sebesar 280 MW<sub>e</sub> (Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, 2017). Nilai tersebut sangat

berbeda jauh dengan hasil perhitungan potensi panas bumi pada daerah penelitian ini. Faktor yang paling signifikan mempengaruhi hasil tersebut adalah luasan area potensi panas bumi. Penelitian PSDG memiliki cakupan area yang sangat luas diduga area penelitian meliputi seluruh wilayah Cagar. Hal inilah yang mempengaruhi hasil perhitungan, sehingga menyebabkan perbedaan hasil yang sangat besar.



## BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan 2D inversi magnetotelurik, sistem panas bumi daerah penelitian tersusun atas lapisan penutup ( $\leq 21 \Omega.m$ ), lapisan reservoir ( $21 \Omega.m - 167 \Omega.m$ ) dan lapisan sumber panas ( $\geq 167 \Omega.m$ ). Pada daerah panas bumi Cangar, terdapat patahan Cangar dan beberapa rekahan-rekahan batuan di sekitar manifestasi air panas. Hal tersebut menunjukkan bahwa daerah Cangar merupakan zona *outflow*. Tipe air panas Cangar untuk kedua mata air panas adalah air bikarbonat dengan temperatur reservoir masing-masing mata air panas yaitu  $311^\circ C$  dan  $315^\circ C$ . Potensi energi listrik panas bumi Cangar relatif kecil yaitu 4,8 MW<sub>e</sub>.

### 6.2 Saran

Diharapkan untuk penelitian selanjutnya dilakukan perluasan area penelitian, terutama ke arah selatan dari air panas Cangar, karena berdasarkan penelitian sebelumnya belum dilakukan penelitian ke arah selatan. Diharapkan juga untuk memperbanyak titik pengambilan data.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, A., Maryanto, S. dan Susilo, A., (2012), “Survei Geomagnetik di Daerah Cagar, Kota Batu, Jawa Timur untuk Mengkaji Potensi Panas Bumi”, *NATURAL-B*, Vol. 1 No. 3.
- Aribowo, Y., (2011), “Prediksi Temperatur Reservoir Panasbumi dengan Menggunakan Metode Geotermometer Kimia Fluida”, *TEKNIK*, Vol. 32 No. 3, pp. 234–238.
- Aribowo, Y. dan Nurrohman, H., (2012), “Studi Geokimia Air Panas Area Prospek Panas Bumi Gunung Kendalisodo Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah”, *TEKNIK*, Vol. 33 No. 1.
- Ármansson, H., (2012), “Geochemical Aspects of Geothermal Utilization”, *Comprehensive Renewable Energy*, Vol. 7.
- Asaue, Hisafumi, Katsuaki Koike, Toru Yoshinaga, dan Shnichi Takakura, 2005, “Magnetotelluric Resistivity Modeling for 3D Characterization Geothermal Reservoir in the Western Side of Mt. Aso, SW Japan”, *Journal of Applied Geophysics*.
- Badan Standardisasi Nasional, (1999), “Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi”, *Standar Nasional Indonesia*.
- Badan Standardisasi Nasional, (2000), “Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi”, *Standar Nasional Indonesia*.
- Badan Usaha Akademik Universitas Brawijaya, 2016. Master Plan Agro Technopark Cagar. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Nh0RaISQyaA> [Accessed 10 April 2017].
- Bertani, Ruggero, (2015), “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report”, *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Brandwood, D., (2003), *Fourier Transforms in Radar and Signal*, Artech House, Boston.
- Broto, S. dan Putranto, T.T., (2011), “Aplikasi Metode Geomagnet dalam Eksplorasi Panas Bumi”, *TEKNIK*, Vol. 32, No. 1.

- Daud, Y., Fahmi, F., Nuqramadha, W.A., Heditama, D.M. dan Pratama, S.A., (2015), "3-Dimensional Inversion of MT Data over the Arjuno-Welirang Volcanic Geothermal System, East Java (Indonesia)", *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Dickson, M.H. dan Fanelli, M., (2003), *Geothermal Energy*, Instituto di Geoscienze Georisorse, Italy.
- Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, (2017), *Potensi Panas Bumi Indonesia*, Direktorat Panas Bumi, Jakarta.
- Ditjen EBTKE dan Badan Geologi, Kementerian ESDM, (2017), *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*, Direktorat Panas Bumi, Jakarta.
- Ermianto, Y.B. dan Aribowo, Y., (2011), "Studi Geokimia Fluida Panas Bumi Daerah Prospek Panasbumi Nglimut, G. Ungaran Kecamatan Limbangan, Kabupaten Kendal Jawa Tengah", *Teknik*, Vol. 32 No. 3, pp. 230–233.
- Erdogan, E. dan Candansayar, M.E., (2017), "The Conductivity Structure of the Gediz Graben Geothermal Area Extracted from 2D and 3D Magnetotelluric Inversion: Synthetic and Field Data Applications", *Geothermics*, Vol. 65, pp. 170–179.
- Fandari, A.E., Daryanto, A., dan Suprayitno, G., (2014), "Pengembangan Energi Panas Bumi yang Berkelanjutan (Sustainable Development of Geothermal Energy in Indonesia)", *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, Vol.17, No.1.
- Fournier, R.O. dan Truesdell, A.H., (1973), "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 37, pp. 1255–1275.
- Fridriksson, T. dan Ármannsson, H., (2007), "Application of Geochemistry in Geothermal Resource Assesments", *Resource Assessment and Environmental Management*, pp. 1–8.
- Gupta, H. dan Roy, S., (2007), "Geothermal Energy: An Alternative Resource For The 21<sup>st</sup> Century", *Elsavire*.
- Hadi, M.N., Kusnadi, D. dan Sugianto, A., (2011), "Penyelidikan Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Arjuno-Welirang, Kabupaten Mojokerto dan Malang, Provinsi Jawa Timur", *Prosiding Pusat Sumber Daya Geologi*.

Herdianita, N.R., Situmorang, J., Mussofan, W. dan Hamzah, I., (2012), "Geothermal Resources of Java – Indonesia", *Proceedings of the 2012 Australian Geothermal Energy Conference*, pp. 86–89.

Hochstein, M.P., (1982), *Introduction to Geothermal Prospecting*, Geothermal Institute, University of Auckland.

Hsu, H.P., (1995), *Theory and Problems of Signals and Systems*, McGraw-Hill, New York.

Karingithi, C.W., (2009), "Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration", *Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*, pp. 1–12.

Johnston, J.M., Pellerin, L., dan Hohmann, G.W., 1992, "Evaluation of Electromagnetic Methods for Geothermal Reservoir Detection", *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 16.

Maryanto, S., Suciningtyas, I.K.L.N., Dewi, N.D., dan Rachmansyah, A., (2016), "Integrated Resistivity and Ground Penetrating Radar Observations of Underground Seepage of Hot Water at Blawan-Ijen Geothermal Field", *International Journal of Geophysics*.

Maryanto, S., (2017a), "Geo Techno Park Potential at Arjuno-Welirang Volcano Hosted Geothermal Area, Batu, East Java, Indonesia (Multi Geophysical Approach) ", *International Conference Global Resource Concervation*.

Maryanto, S., Dewi, C.N., Syahra V., Rachmansyah, A., Foster, J.H., Nadhir, A., dan Santoso, D.R., (2017b), "Magnetotelluric-Geochemistry Investigations of Blawan Geothermal Filed, East Java, Indonesia", *Geosciences*, Vol. 7.

Nuqramadha, W.A., 2011, *Pemodelan Sistem Panas Bumi dengan Metode Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Welirang, Jawa Timur*, Universitas Indonesia.

Prameswari, F.W., Bahri, A.S. dan Parnadi, W., (2012), "Analisa Resistivitas Batuan dengan Menggunakan Parameter Dar Zarrouk dan Konsep Anisotropi", *Jurnal Sains Dan Seni Its*, Vol. 1 No. 1.

Rakhmanto, F., Maryanto, S. dan Susilo, A., (2011), "Tomografi Geolistrik Daerah Panasbumi Welirang-Arjuno (Studi Sumber Air Panas Cangar Batu)", *Natural B*, Vol. 1 No. 10, p. 2011.

- Reynolds, J.M., (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Willey and Sons Lid, New York.
- Saptadji, N., (2012), *Energi Panas Bumi (Geothermal Energy)*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Simpson, F. dan Bahr, K., (2005), *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Sismanto dan Andayany, H., (2012), "Pengembangan Persamaan Geotermometer Empiris untuk Estimasi Suhu Reservoir Sumber Mata Air Panas", *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI*, No. 4, pp. 191–195.
- Sugianto, A., Edi, S. dan Harapan, M., (2010), "Survei Magnetotellurik Daerah Panas Bumi Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur", *Kelompok Penyelidikan Panas Bumi Pusat Sumber Daya Geologi*.
- Sukhyar, R., Gurusinga, C.K.K., Kasbani, Widodo, S., Munandar, A., Dahlan, Hadi, M.N., Risdianto, D., Rezky, Y., Wibowo, A.E., Permana, L.A., Setyawan, D.I. dan Wahyuningsih, R., (2009), *Potensi dan Pengembangan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Suparno, S., (2009), *Energi Panas Bumi Edisi I*, Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia, Jakarta.
- Surmayadi, M., (2014), "Geokimia Panas Bumi Gunungapi Slamet Jawa Tengah", *Seminar Nasional Fakultas Teknik Geologi*, Bandung, No. 5, pp. 163–18.
- Uchida, T., dan Murakami, Y., 1989, "Geothermal Reservoir and Its Resistivity Structure", *Butsari Tansa (Geophysics Exploration)*.
- Unsworth, M.J., (1999), *Magnetotelluric*, McGraw-Hill, New York.
- Utama, A.P., Dwinanto, A., Situmorang, J., Hikmi, M. dan Irsamukhti, R., (2012), "Green Field Geothermal System in Java, Indonesia", *Proceeding ITB Geothermal Work*.
- Utami, P., (1998), "Energi Panas Bumi", *Jurnal Energi*, No. 11, Vol 2.
- Vozoff, K., (1972), "The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins", *Geophysicst*, Vol. 37 No. 1, pp. 98–141.
- Vozoff, K., (1991), "The Magnetotelluric Method. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics", *Society of Exploration Geophysicst*. No. 2, pp. 641–707.

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

Zanuar, R., (2009), "*Pemodelan 2-Dimensi Data Magnetotelurik di Daerah Prospek Panas Bumi Gunung Endut*", Banten, Indonesia.

Zarkasyi, A. dan Rahadinata, T., (2015), "*Metode Penyelidikan Geofisika*", *Panduan Penyelidikan Panas Bumi*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, pp. 59–89.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN 1

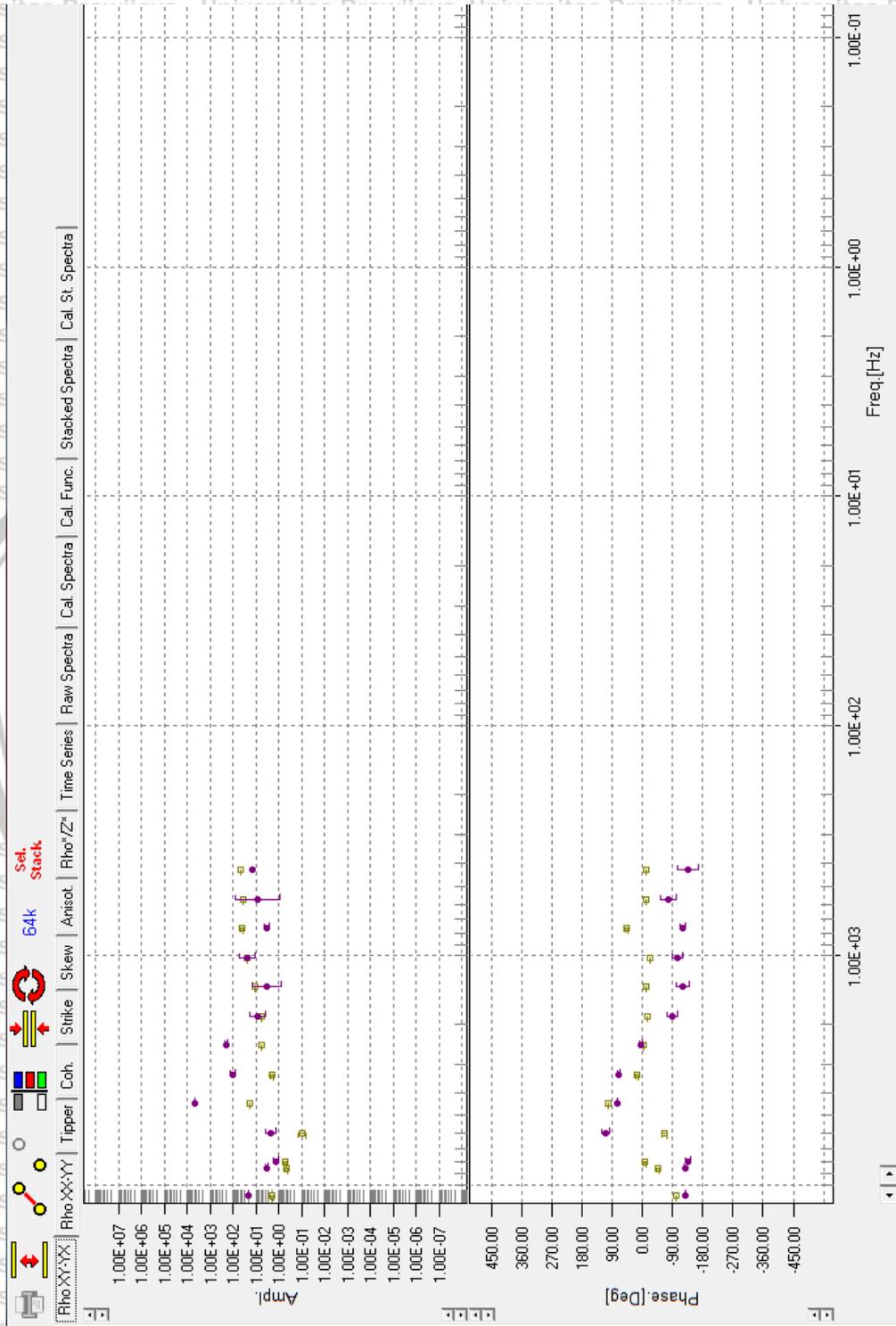
### Koordinat titik pengukuran

Tabel L1.1 Koordinasi titik pengukuran magnetotelurik

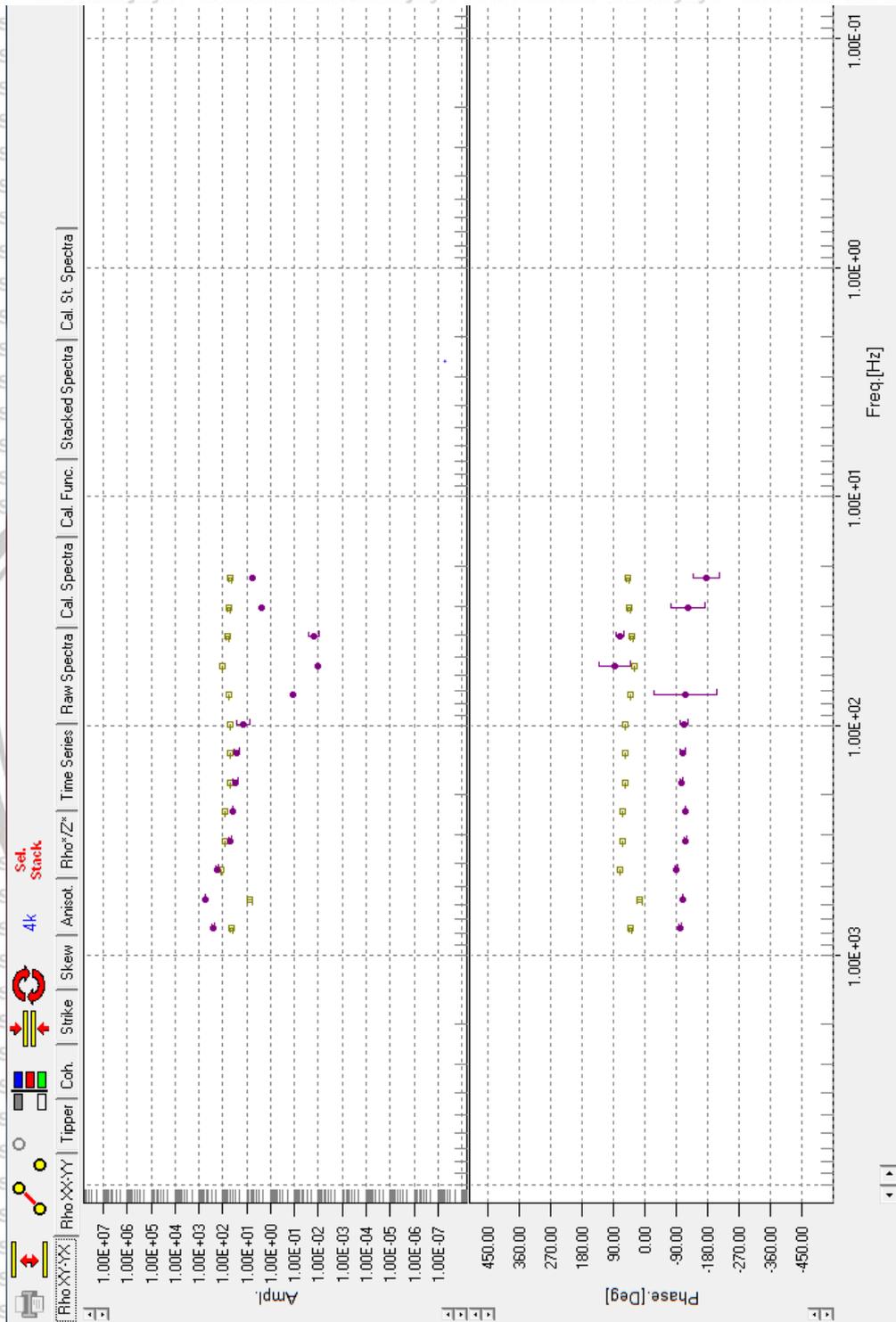
Titik	Koordinat (UTM)		Elevasi (meter)
	X (meter)	Y (meter)	
<i>mt1</i>	669.102,44	9.144.222,4	1.605
<i>mt2</i>	669.164,12	9.144.196,75	1.608
<i>mt4</i>	669.180,28	9.144.089,42	1.611
<i>mt5</i>	669.135,53	9.143.917,06	1.686
<i>mt6</i>	669.432,04	9.144.162,6	1.605
<i>mt7</i>	669.549,57	9.144.115,62	1.659
<i>mt8</i>	669.605,94	9.144.053,59	1.668
<i>mt9</i>	669.483,66	9.144.099,38	1.652
<i>mt10</i>	669.521,9	9.143.998,6	1.666
<i>mt11</i>	669.341,35	9.144.094,36	1.630
<i>mt12</i>	669.323,39	9.144.010,38	1.638

LAMPIRAN 2

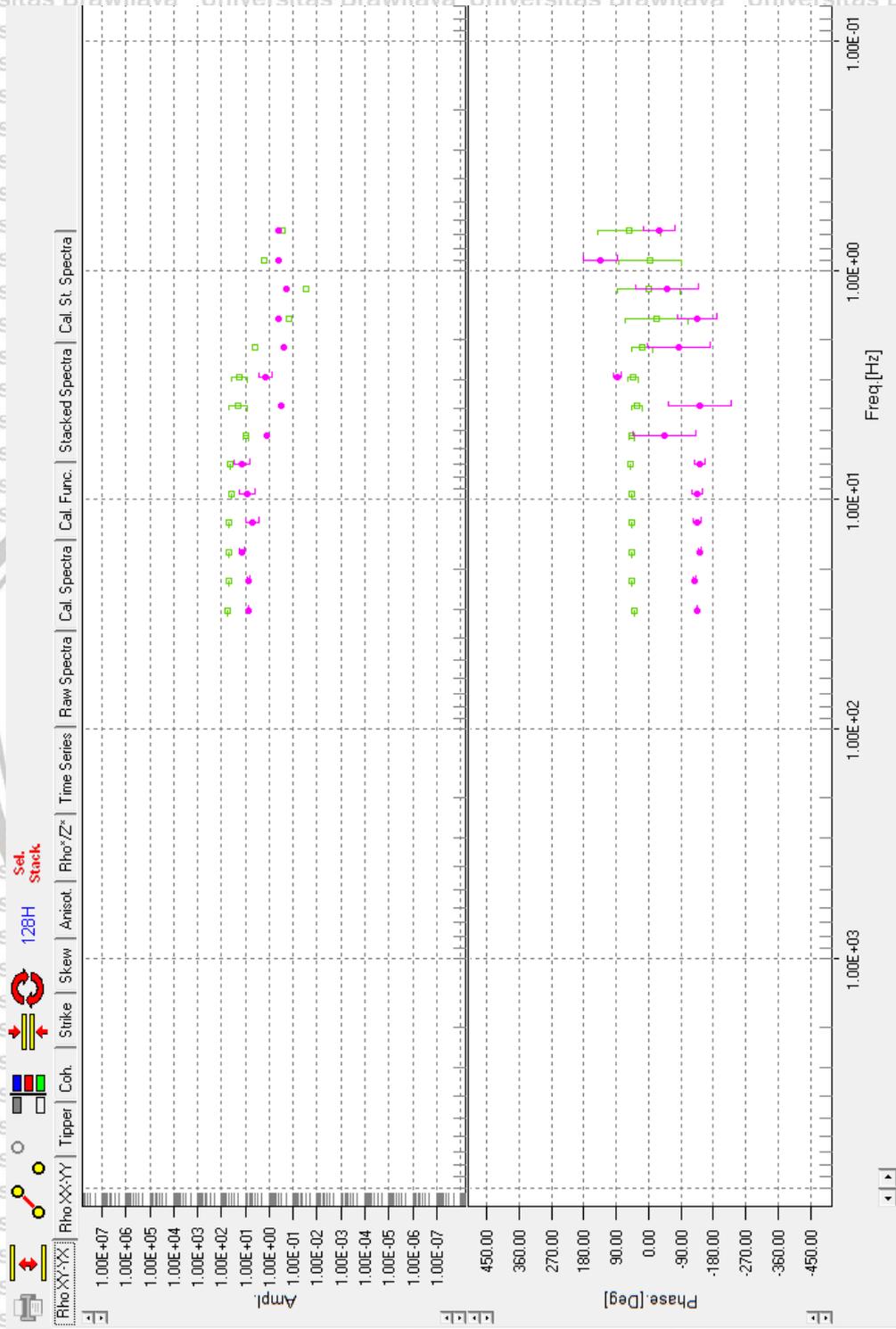
Data MT



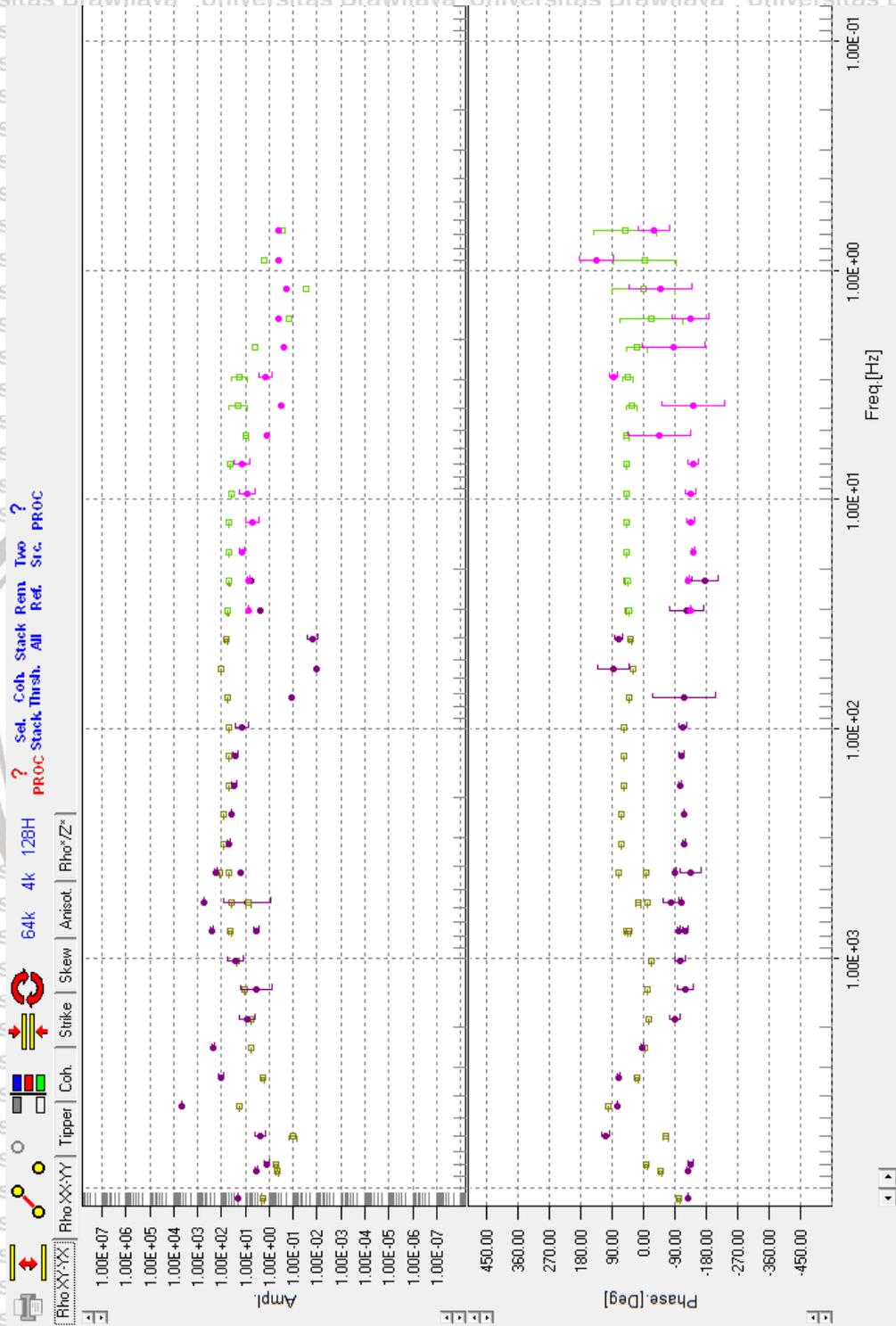
Gambar L2.1 Contoh data magnetotelurik titik *mt8* dalam domain frekuensi untuk *sampling* frekuensi 65 kHz



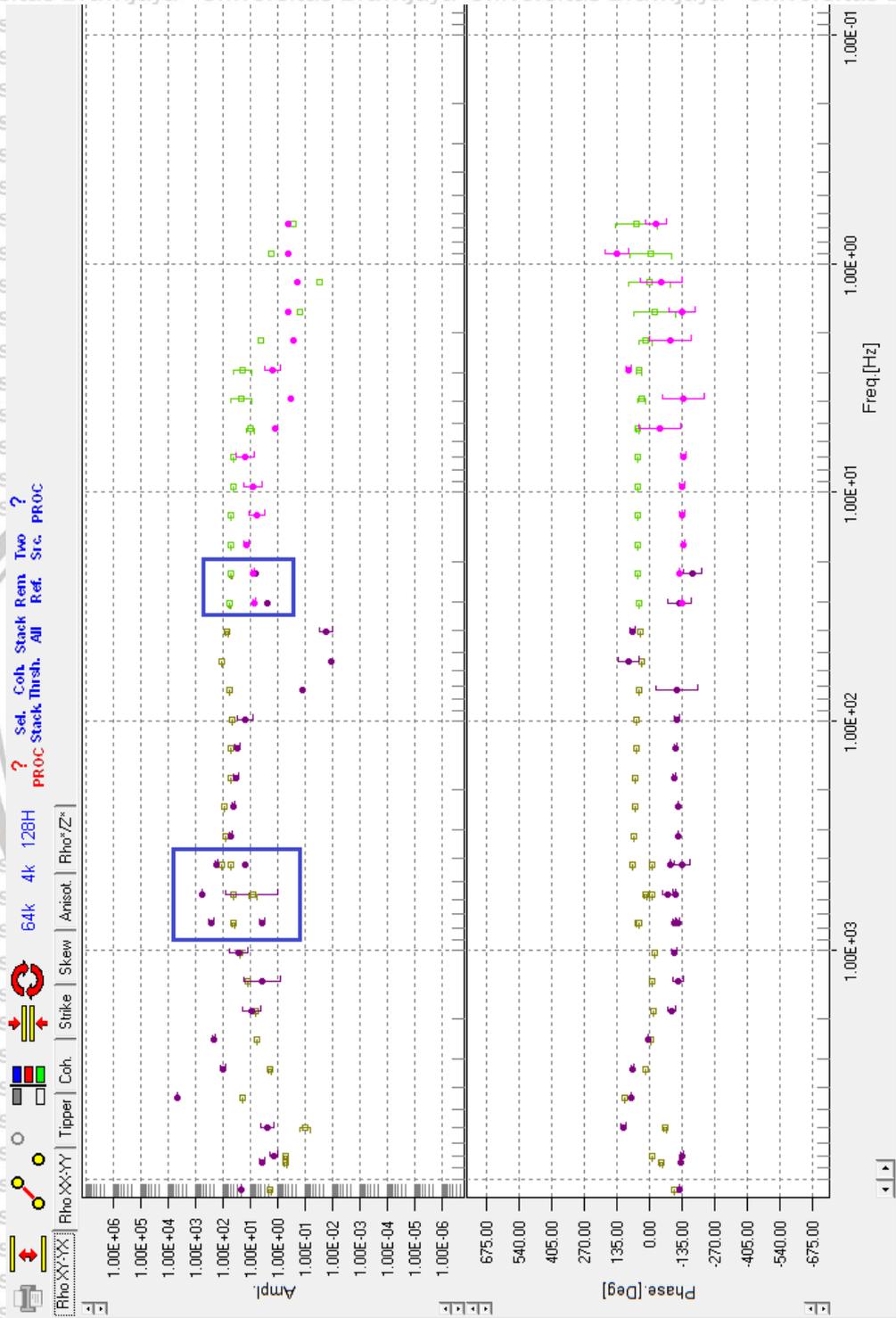
Gambar L2.2 Contoh data magnetotelurik titik *m18* dalam domain frekuensi untuk *sampling* frekuensi 4 kHz



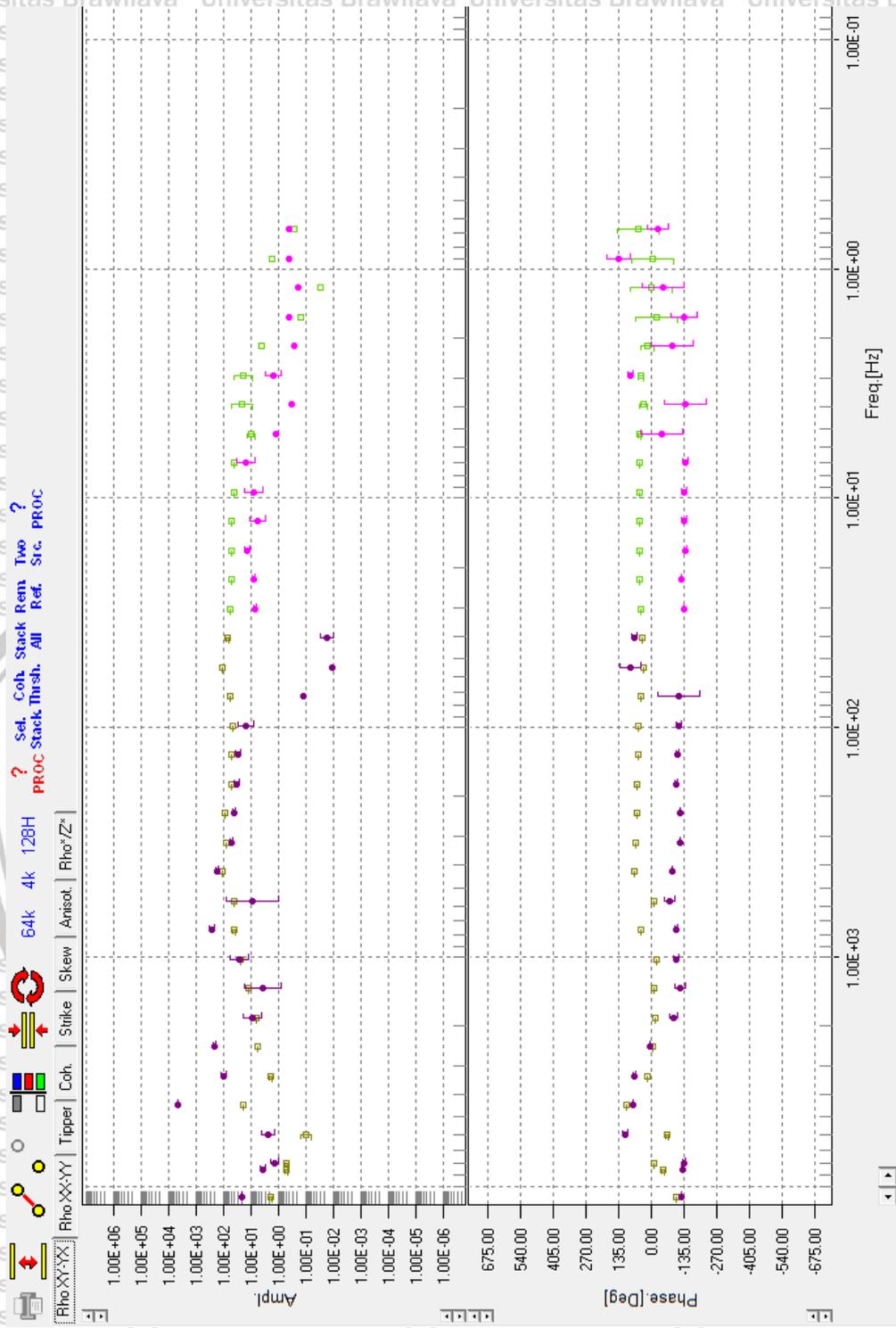
Gambar L2.3 Contoh data magnetotelurik titik  $m\delta$  dalam domain frekuensi untuk *sampling* frekuensi 128 Hz



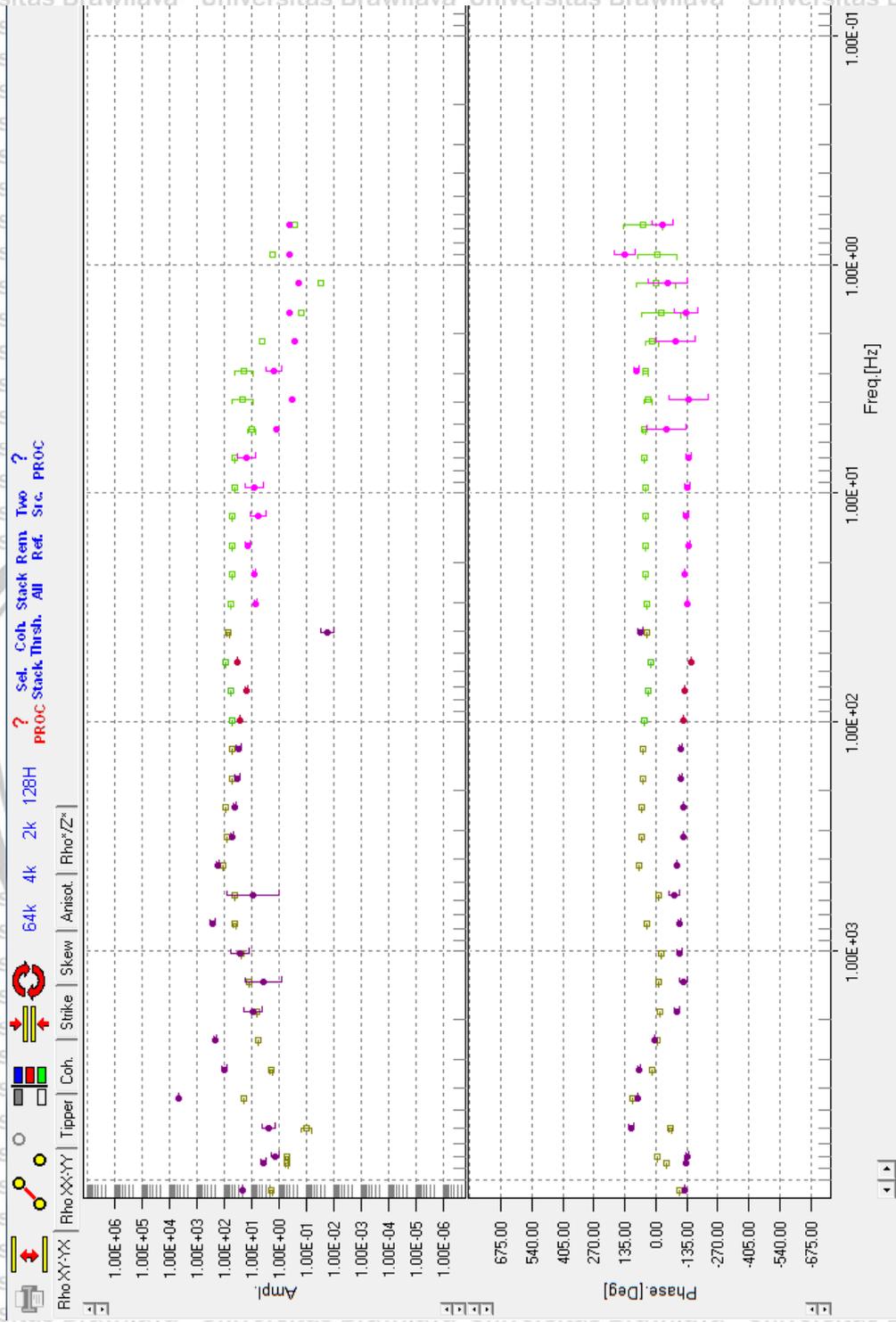
Gambar L2. 4 Contoh data gabungan semua sampling frekuensi pada titik *mt8*



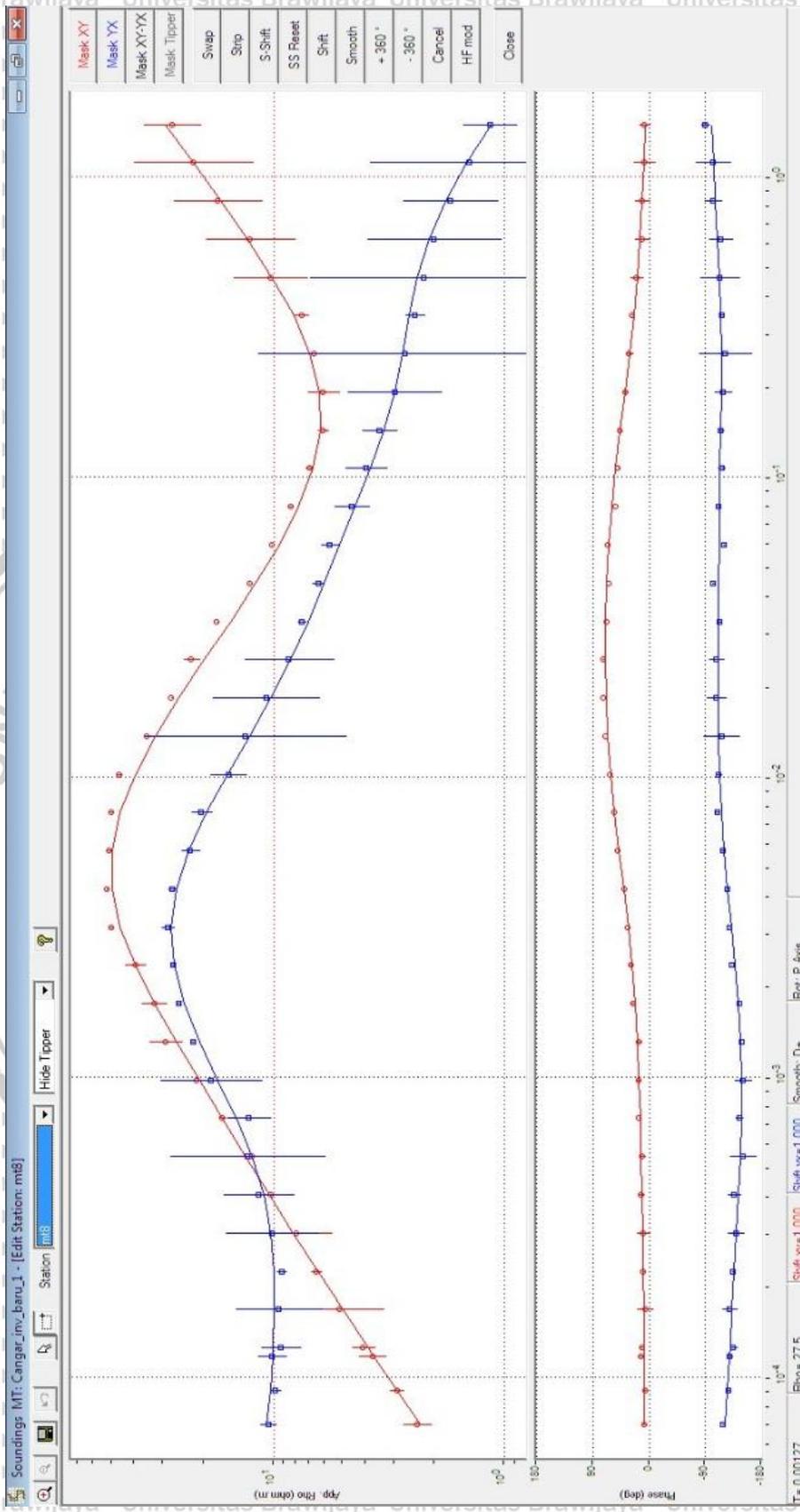
Gambar L2.5 Contoh data yang mengalami overlap pada titik *mt8* yang ditandai dengan kotak biru



Gambar L2.6 Contoh data *mt8* setelah dilakukan seleksi data (tidak ada data yang overlap)



Gambar L2.7 Contoh data titik *m18* setelah dilakukan *filtering* data

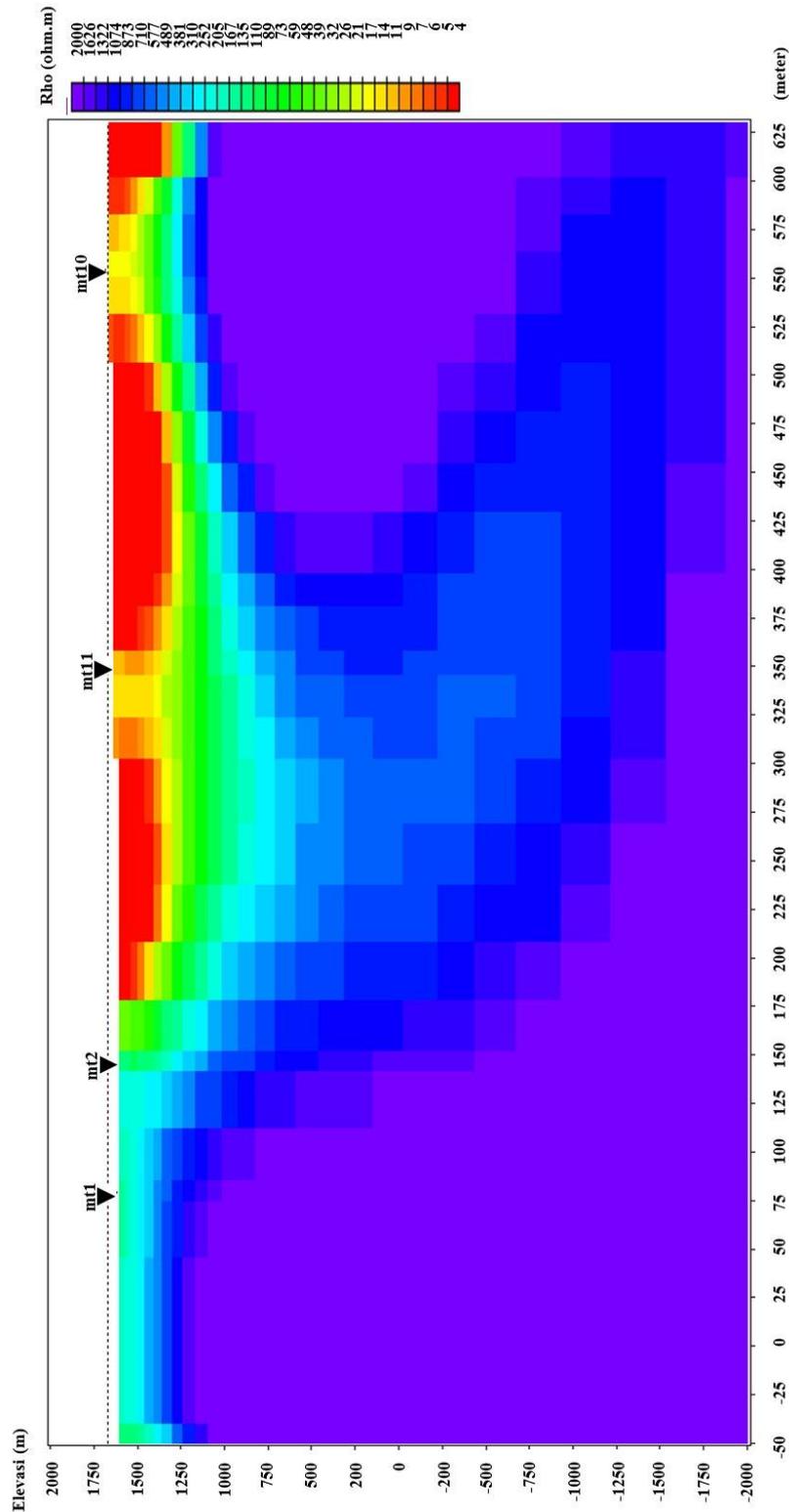


Gambar 1.2.8 Contoh data titik *mt8* dilakukan *smoothing* data



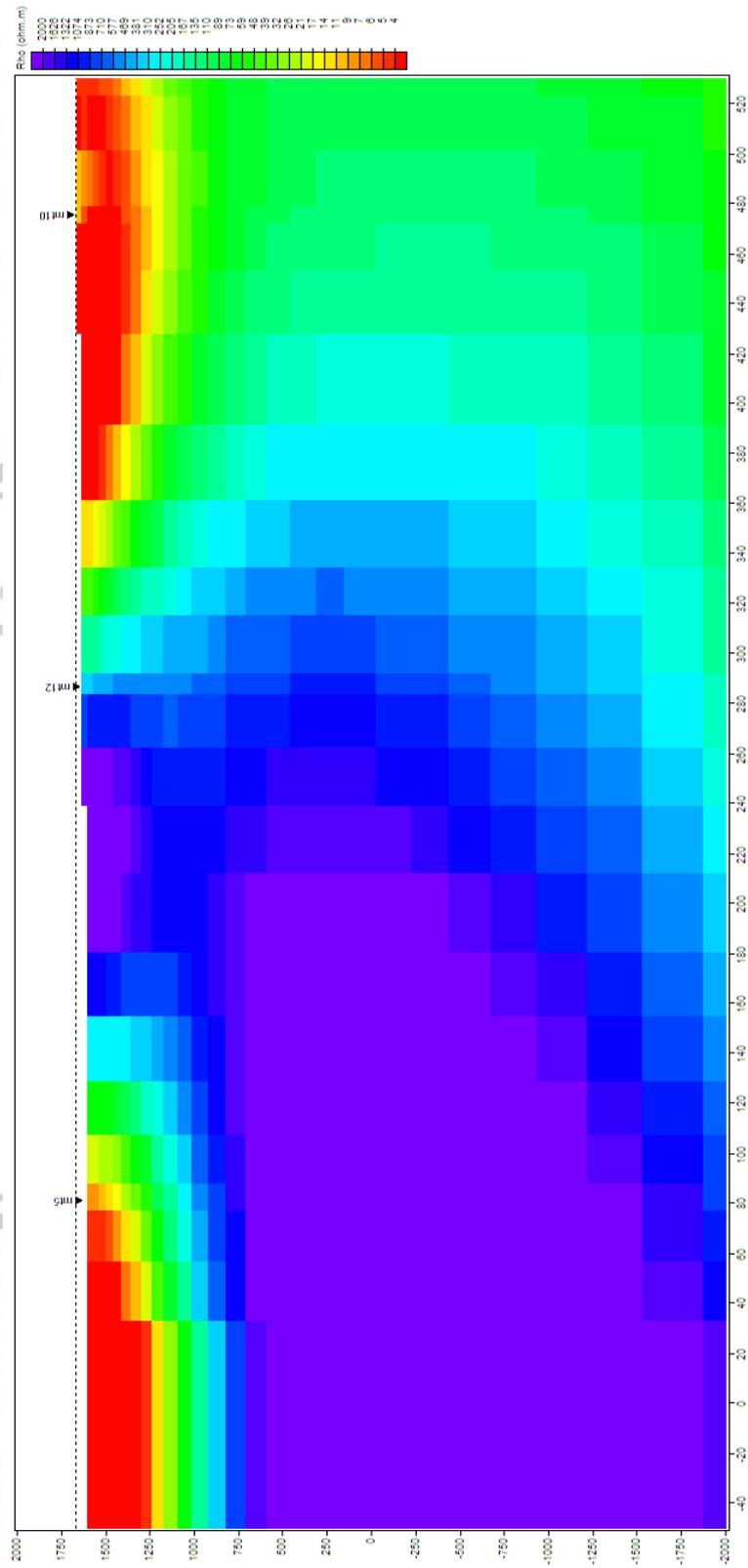
### LAMPIRAN 3

#### Hasil inversi pemodelan 2D



Gambar L3.1 Model 2D inversi lin tasan 1





Gambar L3.3 Model 2D inversi lintasan 3





LAMPIRAN 4

Dokumentasi pengambilan data



Gambar L4.1 Dokumentasi pengambilan data di lapangan

## LAMPIRAN 5

### Perhitungan potensi panas bumi

#### 1. Panas yang tersimpan dalam reservoir

##### a. Kondisi awal ( $H_{ei}$ )

$$H_{ei} = 306000 \times 1900 \{ (1 - 0,1)(2500 \times 1 \times 313) + 0,1((909,1 \times 631,6 \times 1) + (2,5 \times 2560,2 \times 0)) \}$$

$$H_{ei} = 5814 \times 10^5 \{ (704250) + (57418,8) \}$$

$$H_{ei} = 5814 \times 10^5 \times 761668,8$$

$$H_{ei} = 4,4 \times 10^{14} \text{ kJ}$$

##### b. Kondisi akhir ( $H_{ef}$ )

$$H_{ef} = 306000 \times 1900 \{ (1 - 0,1)(2500 \times 1 \times 180) + 0,1((909,1 \times 504,1 \times 1) + (2,5 \times 2529,8 \times 0)) \}$$

$$H_{ef} = 5814 \times 10^5 \{ (405000) + (45827,7) \}$$

$$H_{ef} = 5814 \times 10^5 \times 450827,7$$

$$H_{ef} = 2,6 \times 10^{14} \text{ kJ}$$

#### 2. Energi panas bumi maksimal yang tersedia

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef}$$

$$H_{th} = 4,4 \times 10^{14} - 2,6 \times 10^{14}$$

$$H_{th} = 1,8 \times 10^{14} \text{ kJ}$$

#### 3. Energi panas bumi yang dapat diproduksi

$$H_{de} = R_f \times H_{th}$$

$$H_{de} = 0,25 \times 1,8 \times 10^{14}$$

$$H_{de} = 4,5 \times 10^{13} \text{ kJ}$$

#### 4. Energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000}$$

$$H_{re} = \frac{4,5 \times 10^{13}}{30 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000}$$

$$H_{re} = 47,7 MW_{th}$$

#### 5. Potensi energi listrik

$$H_{el} = \frac{H_{de} \times \eta}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000}$$

$$H_{el} = \frac{4,5 \times 10^{13} \times 0,1}{30 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000}$$

$$H_{el} = 4,8 MW_e$$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LAMPIRAN 6

## Deteksi Plagiasi



Gambar L6.1 Sertifikat deteksi plagiasi