



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN SISTEM PANASBUMI DENGAN METODE
MAGNETOTELURIK DI DAERAH ARJUNO-WELIRANG,
JAWA TIMUR**

SKRIPSI

WAMBRA ASWO NUQRAMADHA

0606068796

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : WAMBRA ASWO NUQRAMADHA

NPM : 0606068796

Tanda Tangan :



Tanggal : 9 Juni 2011

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Wambra Aswo Nuqramadha
NPM : 0606068796
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Pemodelan Sistem Panasbumi dengan Metode Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Welirang, Jawa Timur

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

DEWAN PENGUJI

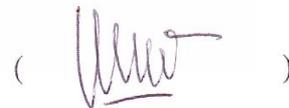
Pembimbing : Dr. Eng. Yunus Daud, M. Sc



Penguji 1 : Dr. Eng. Supriyanto



Penguji 2 : Dr. Jatmiko P. A.



Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 9 Juni 2011

KATA PENGANTAR

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

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

1. Dr. Eng. Yunus Daud, M. Sc, selaku pembimbing yang telah memberikan banyak sekali pelajaran berharga baik berkaitan dengan tugas akhir ini maupun untuk bekal rohani;
2. Lendriadi Agung, S. Si dan Surya Aji Pratama, S. Si untuk segenap arahan dan bantuan;
3. Rekan-rekan seperjuangan, Aditya Wira Perdana, Agus Sulistyono, dan Dzil Mulki Heditama;
4. Rekan-rekan Fisika angkatan 2006, sukses buat kalian semua;
5. Seluruh rekan-rekan Fisika dari angkatan 2004 - 2008;
6. Teman-teman dan sahabat-sahabat yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang senantiasa mendukung dan mendo'akan, juga bertanya kapan saya lulus. Karena pertanyaan kalian menjadi dorongan tersendiri buat saya;
7. Dan khususnya untuk keluarga saya. Papa, Mama, Ardha dan seluruh keluarga besar, semoga Allah senantiasa menjaga kebersamaan kita sampai nanti;
8. Serta untuk Ayu Setya Ismawati, yang telah banyak menemani, memberikan semangat serta do'a. Semoga Allah senantiasa memberkahi kamu dan keluarga;

Akhir kata, semoga Allah SWT senantiasa membalas semua kebaikan yang telah diberikan untuk saya. Dan semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk siapa saja yang membacanya.

Depok, 16 Juni 2011

Penulis



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

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

Nama : Wambra Aswo Nuqramadha
NPM : 0606068796
Program Studi : Geofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

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

**PEMODELAN SISTEM PANASBUMI DENGAN METODE
MAGNETOTELURIK DI DAERAH ARJUNO-WELIRANG, JAWA
TIMUR**

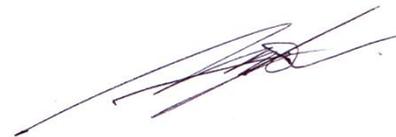
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 9 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Wambra Aswo Nuqramadha)

ABSTRAK

Nama : Wambra Aswo Nuqramadha
Program Studi : Geofisika
Judul : Pemodelan Sistem Panasbumi dengan Metode
Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Welirang, Jawa Timur

Daerah prospek panasbumi Arjuno-Welirang terletak di wilayah Kabupaten Malang, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Pasuruan dan Kota Batu. Daerah prospek ini berada di lingkungan geologi yang didominasi oleh batuan vulkanik berumur Kuartar. Manifestasi permukaan yang terdapat di daerah prospek ini berupa fumarol – Solfatar yang terletak di puncak Gunung Welirang serta mata air panas yang berada di sebelah barat dan barat laut Gunung Welirang. Mata air panas ini bertipe *bicarbonate*, dengan suhu berkisar antara 39,4 – 55 °C. Dari hasil perhitungan *geothermometer* Na-K, suhu *reservoir* area prospek ini sekitar 310-314 °C. Untuk mengetahui informasi bawah permukaan daerah prospek panasbumi Arjuno-Welirang, dilakukan survey magnetotelurik. Selanjutnya hasil dari data MT akan diintegrasikan dengan data geologi dan geokimia. Data magnetotelurik diolah dari *time-series* data hingga mendapatkan kurva resistivitas *versus* frekuensi, dan fase, lalu dilakukan *filtering*, rotasi dan koreksi *static shift* untuk mendapatkan kurva MT yang lebih representatif. Selanjutnya dilakukan inversi 2-dimensi dan divisualisasikan secara 3-dimensi. Hasil penelitian ini memperlihatkan lapisan konduktif (<15 ohm-m) dengan ketebalan sekitar 1 km, diindikasikan sebagai *clay cap* dari sistem panasbumi. Lapisan yang berada di bawah *clay cap* dengan nilai resistivitas sedikit lebih tinggi (>30 ohm-m), diindikasikan sebagai zona *reservoir*. *Updome shape* dengan nilai resistivitas yang tinggi (± 1000 ohm-m), mengindikasikan *hot rock*, yang berada di bawah Gunung Welirang dan masih meluas kearah Selatan dan Tenggara. Model konseptual dibuat dengan mengintegrasikan data MT, geologi dan geokimia, sebagai pedoman dalam melakukan pengeboran eksplorasi.

Kata kunci : Daerah prospek panasbumi Arjuno-Welirang, magnetotelurik, pemodelan sistem panasbumi, potensi

ABSTRACT

Name : Wambra Aswo Nuqramadha
Study Program : Geofisika
Title : Geothermal System Modeling Using Magnetotelluric Method in Arjuno-Welirang, East Java

Arjuno-Welirang geothermal prospect area is located in the district of Malang, Mojokerto, Pasuruan, dan Batu Town. The prospect area is located in the geological environment that is dominated by Quaternary volcanic rocks. Surface manifestations occurred in this prospect area are fumaroles-solfatara found on the top of Mount Welirang and hot springs located on the West and Northwest of Mount Welirang. These hot springs are bicarbonate types, with temperature range between 39.4 to 55 °C. From the calculation of Na-K geothermometer, the temperature of the reservoir is about 310-314 °C. To understand the subsurface information of the Arjuno-Welirang geothermal prospect for further development, a magnetotelluric survey was carried out. The result was then integrated with geological and geochemical data. The Magnetotelluric data was processed from the time-series data to obtain resistivity and phase versus frequency. Further processing were filtering, rotation and static shift correction to obtain a more representative MT curve. The final processing was two-dimensional inversion and 3-D visualization. The results show a conductive layer (<15 ohm-m) with a thickness of about 1 km, indicating a clay cap of the geothermal system. A slightly higher resistivity values (>30 ohm-m) is found below the clay cap, indicating as reservoir zone. An up dome shape of high resistivity zone (± 1000 ohm-m) is encountered below the indicated reservoir zone. This resistive zone indicating the hot rock is located below the Mount Welirang cone and is still expanding towards the south and southeast. A conceptual model of the geothermal system was then developed on the basis of the MT data, integrated with geological and geochemical data. This model could be used for a guidance in conducting exploration drilling.

Keyword : Arjuno-Welirang geothermal prospect area, magnetotelluric, geothermal system modeling, potential

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PENGESAHAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Model Sistem Panasbumi	8
2.1.1 Sistem Dominasi Air	9
2.1.2 Sistem <i>Natural Two-Phase</i>	9
2.1.3 Sistem Dominasi Uap	10
2.2 Metode Magnetotelurik	11
2.2.1 Prinsip Dasar Penjalaran Gelombang	14
2.2.2 Metode MT pada Media 2-Dimensi.	17
2.2.3 Rotasi	19
2.2.4 <i>Static shift</i>	20
2.3 Karakteristik Resistivitas Batuan Pada Daerah Panasbumi.	21

2.3.1 Suhu	21
2.3.2 Fluida	22
2.3.3 Alterasi Mineral.....	22
BAB 3 DATA PENDUKUNG	24
3.1 Data Geologi.	24
3.2 Data Geokimia.....	30
BAB 4 PENGOLAHAN DATA MT	33
4.1 Titik Pengukuran MT.....	33
4.2 Analisis <i>Time-Series</i>	34
4.3 Transformasi Fourier.....	34
4.4 <i>Robust Processing</i>	35
4.5 <i>Filtering</i> Data.....	37
4.6 Rotasi.....	39
4.7 Koreksi <i>static shift</i>	41
4.8 Inversi 2-Dimensi.....	42
4.9 Visualisasi 3-Dimensi.....	46
BAB 5 PEMBAHASAN.....	48
5.1 Model Konseptual.....	48
5.2 Perkiraan Potensi.....	51
5.3 Rekomendasi Pengeboran.....	52
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	54
6.1 Kesimpulan.....	54
6.2 Saran.....	55
DAFTAR ACUAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Peta lokasi penyelidikan.....	1
Gambar 1. 2	Peta geologi daerah penyelidikan.....	2
Gambar 1. 3	Peta Iso tahanan jenis semu $AB/2 = 1000$ dan lintasan pengukuran geolistrik	3
Gambar 1. 4.	Penampang tahanan jenis semu dan sesungguhnya, lintasan D.....	4
Gambar 1. 5.	Diagram alir penelitian.....	7
Gambar 2. 1.	Model konseptual sistem dominasi air.....	9
Gambar 2. 2.	Model sederhana sistem natural dua fasa.....	10
Gambar 2. 3.	Model konseptual sistem dominasi uap	10
Gambar 2. 4.	Contoh sinyal MT frekuensi tinggi	12
Gambar 2. 5.	Contoh sinyal MT frekuensi rendah.....	13
Gambar 2. 6.	Interaksi gelombang EM dengan medium di bawah permukaan	14
Gambar 2. 7.	Model 2-D sederhana	17
Gambar 2. 8.	Penampang vertikal.....	19
Gambar 2. 9.	Model sketsa untuk menjelaskan efek statik.....	20
Gambar 2. 10.	Data core, log resistivitas, dan MT survey.....	22
Gambar 2. 11.	Variasi resistivitas dari NaCl solutions dari pengukuran Ucock al (1980)	23
Gambar 3. 1.	Peta geologi dengan sebaran produk-produk gunung api daerah penelitian (Soetoyo, 2010)	29
Gambar 3. 2.	Kolom stratigrafi daerah penelitian (Soetoyo, 2010).....	29
Gambar 3. 3.	Diagram segitiga tipe air panas (Kusnadi D. , 2010)	31
Gambar 3. 4.	Tipe air panas dan lokasinya	32
Gambar 4. 1.	Titik pengukuran MT	33
Gambar 4. 2.	Contoh data <i>time-series</i>	34

Gambar 4. 3. Proses transformasi <i>Fourier</i> pada SSMT 2000	35
Gambar 4. 4. Menu “Edit PRM” pada SSMT 2000.....	36
Gambar 4. 5. Parameter yang diatur dalam “Edit PRM”	36
Gambar 4. 6. Menu “Process” pada SSMT 2000.....	37
Gambar 4. 7. Contoh data dan kurva sebelum di seleksi	38
Gambar 4. 8. Contoh data dan kurva setelah di seleksi	38
Gambar 4. 9. Lokasi daerah penelitian dan pola struktur (<i>insert</i>).....	39
Gambar 4. 10. Menu rotasi pada MT editor dan memasukkan nilai sebesar 45 ...	40
Gambar 4. 11. Hasil rotasi	40
Gambar 4. 12. Sebelum dikoreksi <i>static shift</i>	41
Gambar 4. 13. Setelah dikoreksi <i>static shift</i>	42
Gambar 4. 14. Peta distribusi pengukuran MT dan lintasan inversi 2-D.....	43
Gambar 4. 15. Hasil inversi	45
Gambar 4. 16. (a) Visualisasi 3-dimensi dari “lintasan 5”, “lintasan 10”, dan “lintasan 11”, (b) 2-D slice arah barat-timur dan utara-selatan, (c) <i>cubic slice</i>	47
Gambar 5. 1. Model konseptual sistem panasbumi daerah penelitian. (a) <i>cubic slice view</i> dengan <i>isovalue body</i> (biru) 1000 Ωm (b) 3-D view “lintasan 5”, “lintasan 10”, dan “lintasan 11” dengan kemungkinan struktur dan keberadaan mata air panas Padusan dan Cangar.....	51
Gambar 5. 2. Perkiraan zona potensi daerah penelitian.....	52
Gambar 5. 3. Rekomendasi titik pengeboran eksplorasi.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1. Parameter inversi model	45
---	----



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gunung Arjuno-Welirang merupakan salah satu area prospek panasbumi di Provinsi Jawa Timur (Gambar 1.1), yang terletak di wilayah Kabupaten Malang, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Pasuruan dan Kota Batu. Gunung Arjuno-Welirang dikategorikan gunung *stratovolcano*. Daerah prospek ini berada di lingkungan geologi yang didominasi oleh batuan vulkanik berumur Kuartar.

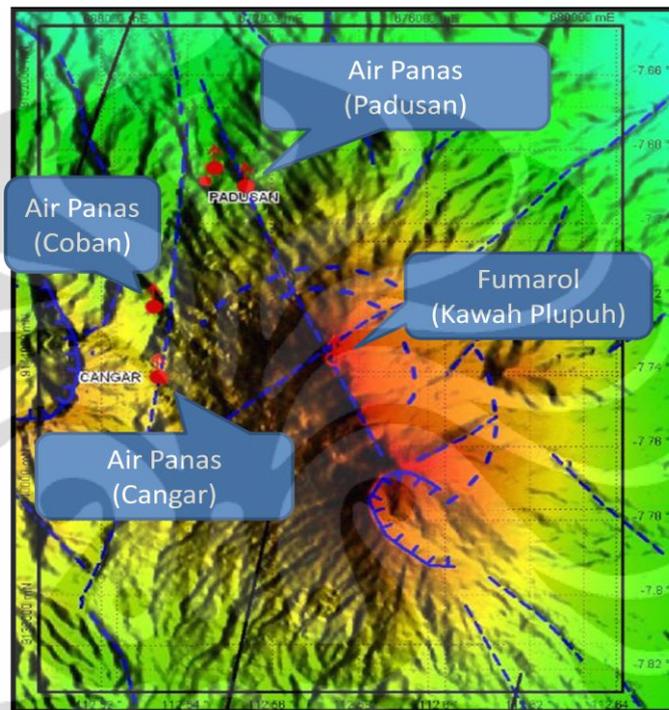


Gambar 1. 1 Peta lokasi penyelidikan

Manifestasi permukaan yang muncul di daerah ini berupa fumarol yang terletak pada puncak Gunung Welirang, dengan suhu berkisar antara 94,1 – 137,3 °C, dan beberapa lokasi mata air panas (Gambar 1.2). Mata air tersebut antara lain:

- Padusan I, suhu 55 °C

- Padusan II, suhu 50 °C
- Coban, suhu 39,4 °C
- Cangar I, suhu 54,1 °C
- Cangar II, suhu 48,3 °C

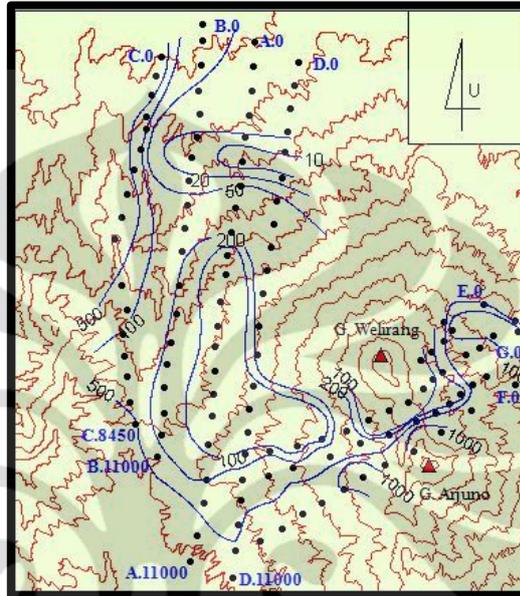


Gambar 1. 2 Lokasi manifestasi permukaan

Penelitian geofisika, yaitu dengan menggunakan metode geolistrik ($AB/2=1000$ meter), yang dilakukan sebanyak 7 lintasan. Empat lintasan membentang dari arah utara ke selatan yaitu lintasan A, B, C, dan D, sedangkan 3 lintasan, yaitu lintasan E, F, dan G, arah timur laut – barat daya (Gambar 1.3) (Kusnadi, Nasution, & Simanjuntak, 2010).

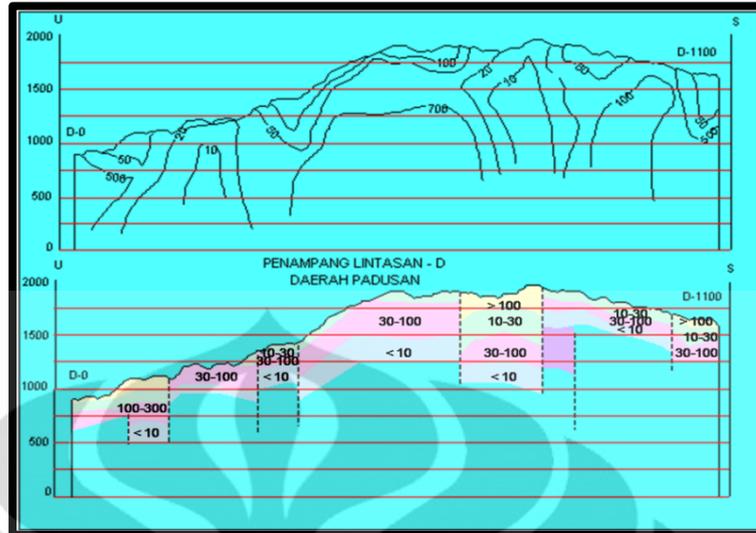
Dari hasil penelitian ini didapatkan hasil berupa indikasi prospek panasbumi yang terletak di sebelah barat-laut zona vulkanik Welirang. Diketahui dari terdeteksinya lapisan lempung (*clay cap*) dengan nilai resistivitas semu <10 ohm-m pada kedalaman yang bervariasi (Gambar 1.4) (Kusnadi, Nasution, & Simanjuntak, 2010). Namun hasil ini belum cukup kuat untuk menilai seberapa besar prospek panasbumi yang bisa dihasilkan dari daerah ini.

Perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk memastikan bahwa daerah prospek panasbumi di kompleks Arjuno-Welirang ini berpotensi untuk dikembangkan.



Gambar 1. 3 Peta Iso tahanan jenis semu $AB/2 = 1000$ dan lintasan pengukuran geolistrik

Metode magnetotelurik (MT) sangat direkomendasikan untuk penelitian lanjutan geofisika di daerah ini. Dari data magnetotelurik nantinya akan didapat ketebalan *clay cap*, dengan begitu akan diketahui kedalaman *top reservoir*. Sehingga dapat mendeliniasi *reservoir* untuk mendapatkan geometri dari *reservoir* dan penyebarannya. Selain itu metode ini juga sangat baik dalam lingkungan vulkanik, seperti masalah yang ada pada daerah penelitian.



Gambar 1. 4. Penampang tahanan jenis semu dan sesungguhnya, lintasan D

1.2 Tujuan Penelitian

- a) Membuat *integrated interpretation* sistem panasbumi pada daerah penelitian
- b) Membuat model konseptual sistem panasbumi
- c) Menentukan perkiraan potensi panasbumi daerah penelitian
- d) Merekomendasikan titik pengeboran

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada pengolahan data magnetotelurik dari data lapangan (*time-series*) sampai inversi dan divisualisasikan secara 3-dimensi. Model yang dihasilkan dari data magnetotelurik selanjutnya diintegrasikan dengan informasi pendukung dari data geologi dan geokimia untuk membuat model konseptual.

1.4 Metodologi Penelitian

Secara umum metode penelitian yang dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah melakukan pengolahan data dan interpretasi dengan didukung oleh data geologi dan geokimia. Data lapangan yang diperoleh

dari metode magnetotelurik berupa *time-series* yang ditransformasikan menjadi *frequency-series* yang selanjutnya diproses untuk mendapatkan nilai resistivitas dan fase. Namun sebelum mendapatkan nilai resistivitas dan fase, terlebih dahulu melakukan proses untuk menghilangkan *biasing-noise* pada data dengan metode *robust*.

Setelah mendapatkan nilai resistivitas dan fase, dilakukan *filtering* data untuk mendapatkan kurva MT yang representatif. Selanjutnya dilakukan beberapa koreksi terhadap data. Koreksi yang pertama, setelah di-*filter*, data MT dirotasi untuk meminimalisasi efek struktur bawah permukaan pada data. Data dirotasi sesuai arah *strike* dominan pada daerah penelitian. Koreksi yang kedua adalah koreksi *static shift*. Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan efek inhomogenitas didekat permukaan, juga efek topografi pada lokasi pengukuran yang menyebabkan *shifting* pada kurva resistivitas. Rangkaian pemrosesan data ini dimasukkan kedalam proses pengolahan data (Gambar 1.5).

Setelah melakukan pengolahan data, selanjutnya adalah melakukan inversi untuk mendapatkan penampang 2-dimensi dari berbagai lintasan yang dibuat pada daerah pengukuran, kemudian divisualisasikan secara 3-dimensi. Tahap akhir adalah melakukan interpretasi gabungan untuk menjawab semua pertanyaan yang menjadi tujuan dari penelitian ini.

Seluruh rangkaian metodologi ini digambarkan dalam diagram alir penelitian pada Gambar 1.5

1.5 Sistematika Penulisan

BAB 1 : Pendahuluan

Berisi tentang latar belakang penelitian, tujuan dilakukannya penelitian, batasan masalah, dan metodologi yang digunakan.

BAB 2 : Landasan Teori

Membahas tentang teori dasar mengenai model sistem panasbumi yang berkaitan dengan daerah penelitian. Selanjutnya teori mengenai metode geofisika yang digunakan, yaitu metode magnetotelurik (MT). Bagian terakhir tentang karakteristik resistivitas batuan pada daerah panasbumi.

BAB 3 : Pemrosesan Data Geofisika

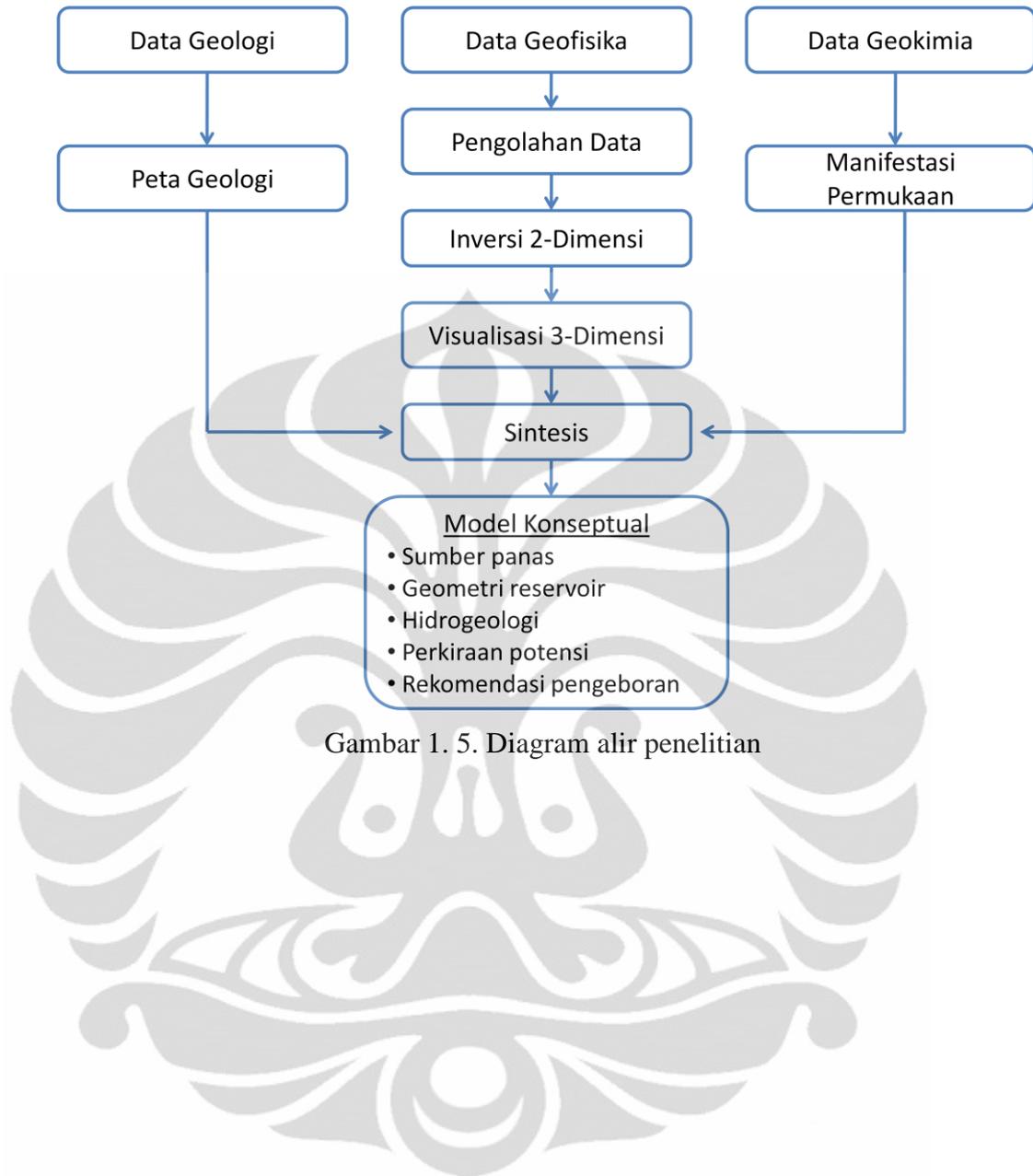
Langkah-langkah yang dilakukan dalam mengolah data MT, mulai dari data lapangan sampai visualisasi 3-dimensi.

BAB 4 : Pembahasan

Hasil dari pengolahan data geofisika akan dibahas pada bab ini. Diintegrasikan dengan data pendukung seperti data geologi dan data geokimia sampai mendapatkan model konseptual, perkiraan potensi, dan rekomendasi pengeboran.

BAB 5 : Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dari bab 4 akan dibahas secara singkat sebagai kesimpulan dan selanjutnya memberikan saran untuk penelitian berikutnya.



Gambar 1. 5. Diagram alir penelitian

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Model Sistem Panasbumi

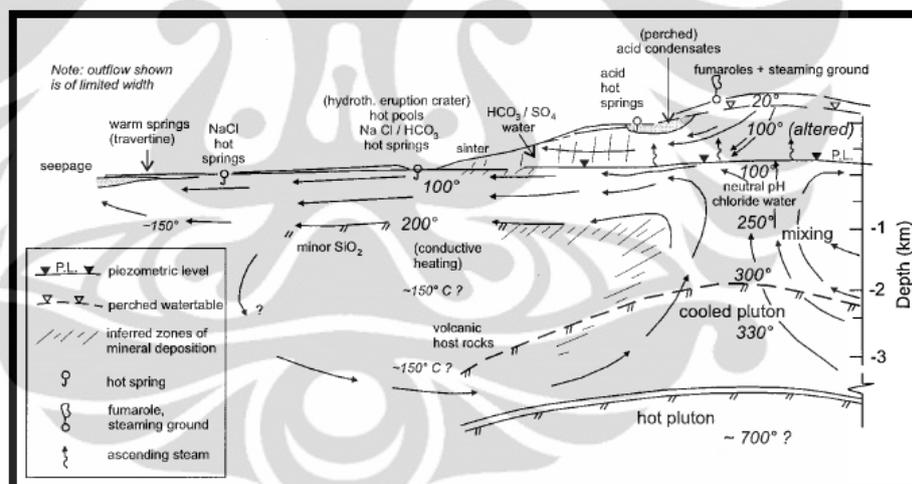
Gunung Arjuno-Welirang dikategorikan sebagai *high standing stratovolcano* dengan ketinggian sekitar 3340 meter (Hochstein & Sudarman, 2008). Dengan kategori ini, umumnya memiliki sistem panasbumi dengan suhu yang tinggi (*high temperature sistem*). Dari manifestasi permukaan yang muncul, juga berasosiasi dengan permeabilitas batuan *reservoir*, sistem ini dibagi lagi menjadi sistem dominasi air (*liquid dominated sistem*), sistem *natural two-phase*, dan dominasi uap (*vapor dominated sistem*). Terminologi “rendah”, “menengah”, dan “tinggi” digunakan untuk menggambarkan permeabilitas batuan dengan permeabilitas rata-rata, k , lebih kecil dari 1 sampai 3, 3 sampai 10, dan lebih besar dari 10 milidarcy (Hochstein & Browne, 2000).

Jika nilai k pada batuan *reservoir* tinggi tetapi batuan pada *recharge area* menengah, maka dikategorikan sebagai sistem dominasi air (saturasi air pada batuan *reservoir*, S_1 , antara 1 sampai 0,7). Jika nilai k pada batuan *reservoir* dan *recharge area* menengah, maka termasuk sistem *natural two-phase* dengan saturasi air antara 0,7 sampai 0,4. Ketika k pada area di sekitar *reservoir* rendah sedangkan k pada *reservoir* tinggi, maka air yang dominan pada *reservoir* menjadi *vapor*, dan sistemnya adalah dominasi uap (Hochstein & Browne, 2000).

2.1.1 Sistem Dominasi Air

Konseptual model untuk sistem dominasi air (Gambar 2.1) memperlihatkan bahwa seluruh manifestasi permukaan berasal dari pusat *reservoir* yang dibawa bersamaan dengan naiknya uap (*steam*) yang berubah menjadi fumarol dan *steaming (hot) ground*. Uap yang terkondensasi, dengan oksidasi gas H_2S , menghasilkan sedikit *hot acid spring*. Gas CO_2 berinteraksi dengan *groundwater* menghasilkan *warm spring* yang mengandung *bicarbonate* (HCO_3) *water*.

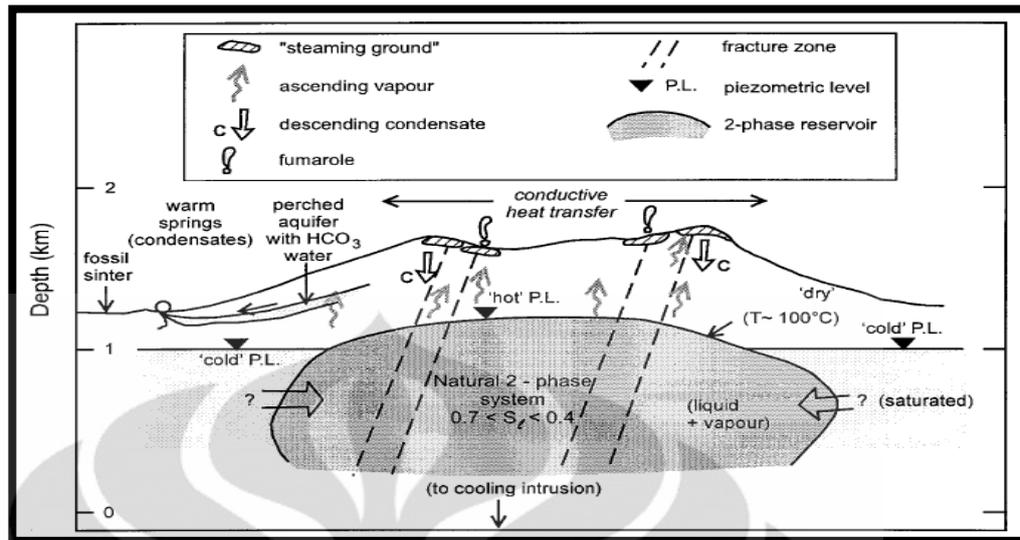
Umumnya dari sistem dominasi air, dengan kondisi hidrologi seperti pada Gambar 2.1, memiliki *concealed outflow* dengan pH netral yang berasal dari bagian atas *reservoir*, yang terjadi pada bukit atau elevasi yang tidak terlalu tinggi, menghasilkan *hot spring* dan *hot pools*.



Gambar 2. 1. Model konseptual sistem dominasi air (Hochstein & Browne, 2000)

2.1.2 Sistem *Natural Two-Phase*

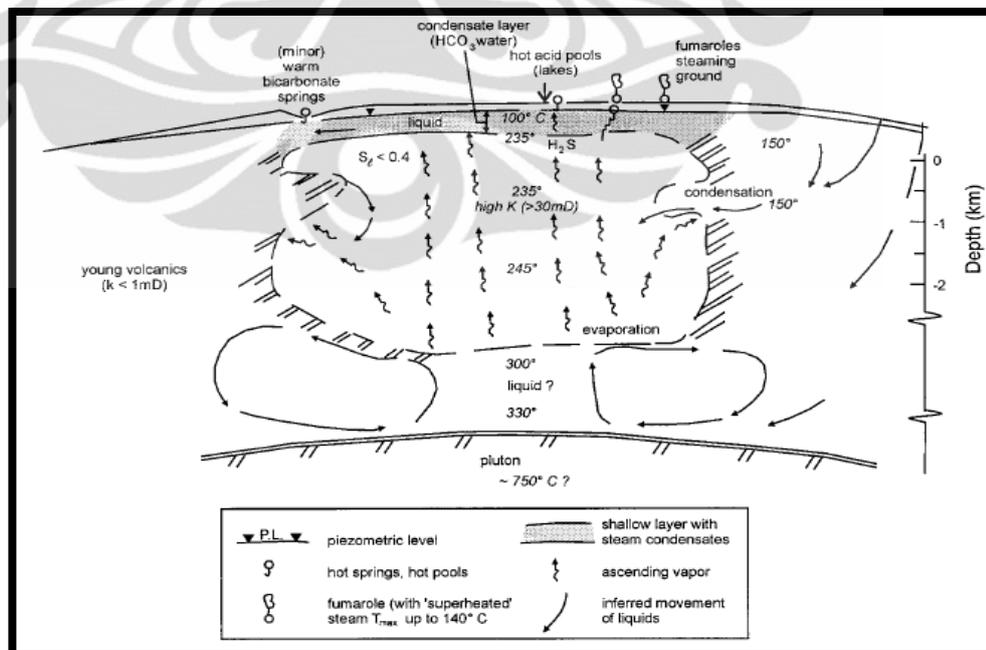
Sistem ini merupakan kondisi yang terjadi antara sistem dominasi air dan dominasi uap. Manifestasi permukaan didominasi oleh *steaming ground* dengan sedikit fumarol. Tidak banyak air yang berubah kecuali untuk beberapa *minor warm spring*.



Gambar 2. 2. Model sederhana sistem natural dua fasa (Hochstein & Browne, 2000)

2.1.3 Sistem Dominasi Uap

Tidak banyak lapangan panasbumi yang memiliki sistem ini. *Steaming ground* dan fumarol ditemui disini. Manifestasi yang muncul pada sistem ini tidak banyak mengandung air. Karena permeabilitas batuan pada daerah ini sangat rendah, sehingga air yang dihasilkan tidak dalam jumlah (volume) yang besar.

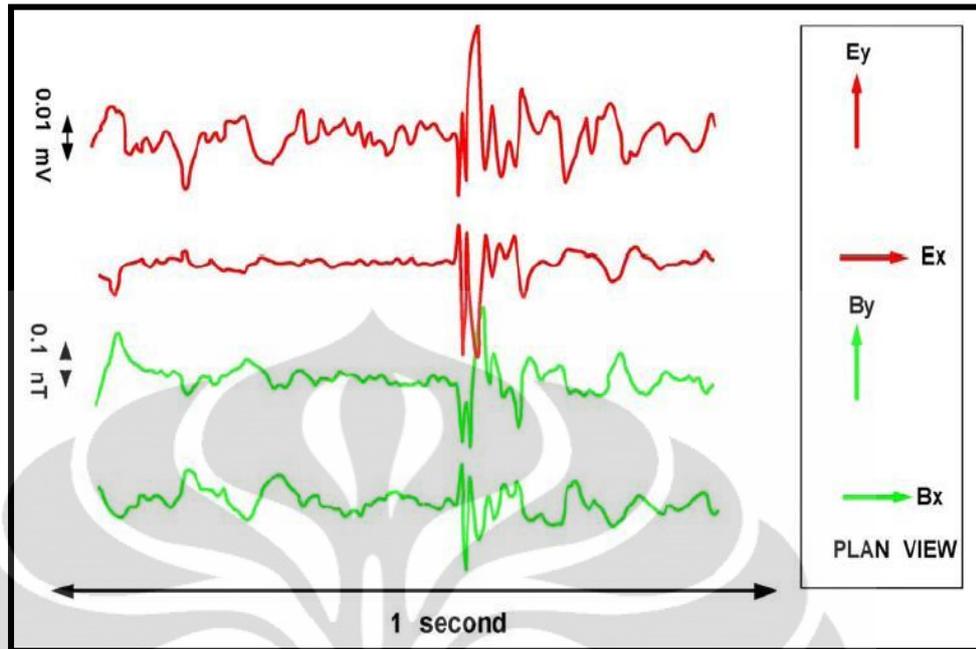


Gambar 2. 3. Model konseptual sistem dominasi uap (Hochstein & Browne, 2000)

2.2 Metode Magnetotelurik

Metode Magnetotelurik (MT) merupakan metode pasif atau metode yang memanfaatkan sumber dari alam, berupa gelombang elektromagnetik, dengan mengukur fluktuasi medan magnet dan medan listrik pada arah tegak lurus di permukaan bumi untuk mengetahui konduktivitas dari struktur bawah permukaan sampai kedalaman ratusan kilometer (Simpson & Bahr, 2005). Medan magnet yang diukur berasal dari dalam dan luar bumi. Sumber dari dalam bumi (*internal*) berasal dari aktifitas pada inti bumi dan *remnant magnetization* pada batuan kerak (*crustal rock*). Sumber dari luar (*external*) dihasilkan dari atmosfer dan magnetosfer. Tetapi variasi komponen internal dari sumber medan magnet ini sangat lemah (frekuensinya rendah), akibatnya hanya variasi eksternal yang digunakan dalam metode MT. Frekuensi yang dihasilkan diklasifikasikan lagi menjadi frekuensi tinggi (diatas 1 Hz) dan frekuensi rendah (dibawah 1 Hz) (Unsworth, 2008). Amplitudo paling rendah dari gelombang terjadi pada frekuensi 0,5 – 5 Hz, yang disebut sebagai *dead-band* (Simpson & Bahr, 2005).

Sinyal MT frekuensi tinggi berasal dari aktifitas meteorologi seperti petir atau kilat (*lightening*) yang terjadi antara lapisan atmosfer bagian bawah dengan permukaan bumi. Sinyal yang dihasilkan dikenal sebagai *sferics* (Simpson & Bahr, 2005).



Gambar 2. 4. Contoh sinyal MT frekuensi tinggi (Unsworth, 2008)

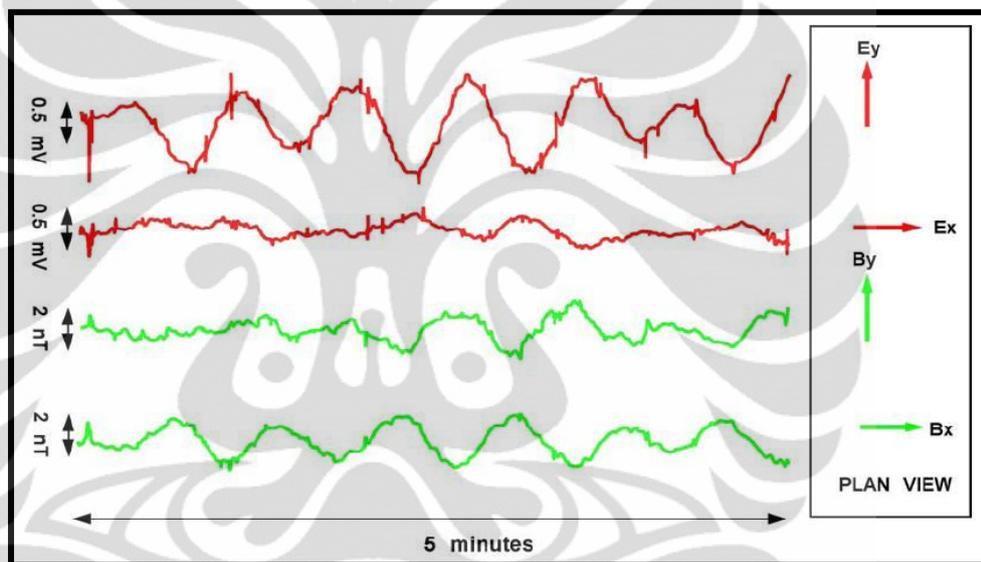
Sinyal MT yang memiliki frekuensi rendah (dibawah 1 Hz), berasal dari magnetosfer yang merupakan hasil interkasi antara *solar wind* dengan magnetosfer dan dengan ionosfer (Simpson & Bahr, 2005). Magnetosfer adalah wilayah disekitar bumi dimana medan magnet utama bumi ditekan dan terperangkap oleh *solar wind* (Vozoff, 1991).

Ionosfer yang berada pada 50 – 1500 km diatas permukaan bumi merupakan tempat dimana terdapat plasma yang memiliki konduktifitas elektrik yang cukup tinggi (Unsworth, 2008). Perubahan medan magnet dari magnetosfer dapat menginduksi arus listrik yang cukup besar di ionosfer. Perubahan pada arus ini menghasilkan perubahan yang signifikan pada medan magnet yang terukur di permukaan bumi.

Ketika *solar wind* berada pada keadaan yang tetap, medan magnet bumi memperlihatkan variasi nilai magnetik tiap harinya, yang disebabkan oleh rotasi bumi di dalam sistem arus dari magnetosfer dan ionosfer, keadaan ini disebut juga *solar quiet day variation* (S_q), dimana amplitudonya sekitar 10-20 nT. Namun setiap 25 hari diketahui terdapat variasi medan magnet yang

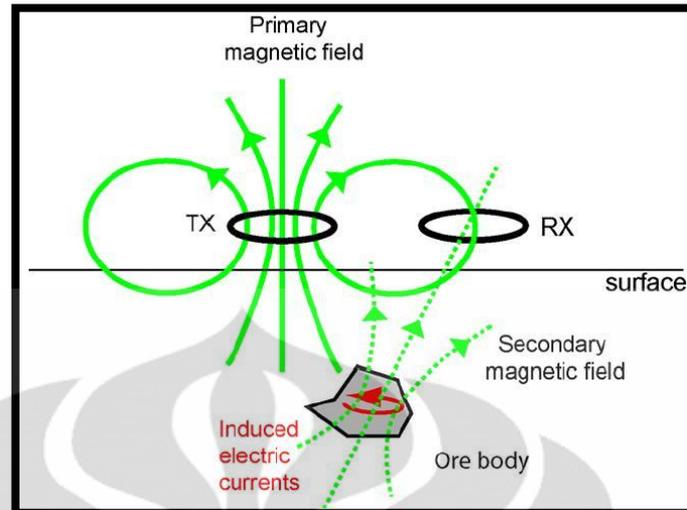
lebih kecil yang disebabkan adanya rotasi bulan yang mengorbit pada bumi (Unsworth, 2008).

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



Gambar 2. 5. Contoh sinyal MT frekuensi rendah (Unsworth, 2008)

Medan magnet yang berasal dari kedua sumber sinyal MT (frekuensi tinggi dan rendah) tadi sampai ke permukaan bumi dan meng-induksi arus dalam permukaan bumi. Arus tersebut dikenal dengan arus telurik (*telluric current*). Medan magnet yang berasal dari kedua sumber sinyal MT (Tx) ini dinamakan medan magnet primer (*primary magnetic field*). Dari arus telurik tersebut, menghasilkan medan magnet sekunder (*secondary magnetic field*), keduanya akan direkam oleh *receiver* (Rx) (Gambar 2.6). Pada lapisan yang konduktif (contoh : *ore body*) di bawah permukaan bumi, induksi medan magnet menyebabkan timbulnya arus eddy (*eddy current*), yang selanjutnya juga akan menghasilkan medan magnet sekunder.



Gambar 2. 6. Interaksi gelombang EM dengan medium di bawah permukaan (Unsworth, 2008)

2.2.1 Prinsip Dasar Penjalaran Gelombang

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

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

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

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

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

Dimana \bar{E} adalah kuat medan listrik (V/m), \bar{H} adalah kuat medan magnet, \bar{B} adalah rapat *flux* magnet (W/m^2), ρ adalah rapat muatan (C/m^3), σ adalah konduktivitas (S/m), ϵ adalah konstanta dielektrik (F/m). Karena $\bar{J} = \sigma \bar{E}$ dan $\bar{B} = \mu \bar{H}$, persamaan (2.3) menjadi :

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

\bar{J} adalah rapat arus (A/m^2), dan μ adalah permeabilitas magnetik (H/m). Nilai untuk ruang hampa $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m dan $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ H/m. Dengan menggunakan *curl* dari persamaan 2.4 dan disubstitusikan pada persamaan 2.3a, persamaan diferensial orde kedua untuk \bar{E} didapat :

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

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

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

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

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

Catatan bahwa, karena transformasi energi elektromagnetik menjadi panas, kuat medan menurun secara eksponensial terhadap kedalaman, persamaan (2.7) menjadi :

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

Dengan $\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-i\omega t} e^{kz}$, dimana \bar{E}_0 adalah kuat medan listrik pada permukaan bumi, persamaan (2.7a) menjadi :

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

Selanjutnya penyelesaian untuk k :

$$k = \pm(1-i)\sqrt{\frac{i\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.9)$$

k adalah bilangan kompleks dari medium. Jadi perambatan medan didalam bumi dapat ditulis:

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

Pada persamaan (2.10), $e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z}$ menggambarkan peluruhan dari amplitudo karena merambatnya gelombang pada arah z . *Skin depth* didefinisikan sebagai jarak (δ) sepanjang kuat medan listrik teratenuasi oleh $1/e$ dari kuat medan asal (origin). Selama $e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}z} = e^{-1}$ *skin depth* dapat dituliskan :

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

Bentuk lain dari persamaan (2.11) :

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

Dengan cara yang sama, dicari untuk medan magnet dari gelombang EM. Komparasi antara medan listrik dan medan magnet dapat ditulis :

$$E_x = E_0 e^{-kz} e^{-i\omega t} \quad (2.13)$$

$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} E_0 e^{-kz} e^{-i\omega t} \quad (2.14)$$

Disini medan listrik tegak lurus terhadap medan magnet.

Untuk mendapatkan informasi mengenai resistivitas bumi dari pengukuran pada permukaan ($z=0$) rasio dari pengukuran tegak lurus E dan H didefinisikan sebagai impedansi :

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

Dari persamaan (2.13) dan (2.14), impedansi Z_{xy} menjadi :

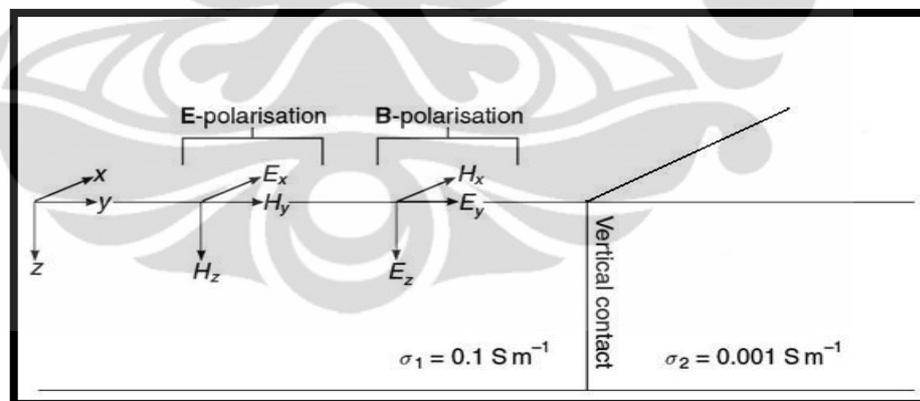
$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu_0\rho} \quad (2.16)$$

Resistivitas semu (*apparent resistivity*) ρ_{xy} bisa didapat dari persamaan (2.16)

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.17)$$

dengan fase : $\varphi_{xy} = \tan^{-1}(Z_{xy})$ (Xiao, 2004).

2.2.2 Metode MT pada Media 2-Dimensi



Gambar 2. 7. Model 2-D sederhana (Simpson & Bahr, 2005)

Gambar 2.7 menunjukkan gambaran 2-dimensi yang sangat sederhana dengan sebuah *vertical contact* antara dua zona dengan konduktivitas berbeda, σ_1 dan σ_2 . Rapat arus, (j_y), melintasi batasan (*boundary*) dengan persamaan :

$$j_y = \sigma E_y \quad (2.18)$$

Gambar 2.7 dapat pula direpresentasikan sebagai *dyke* atau patahan yang memiliki nilai konduktivitas konstan sepanjang *strike*. Tidak ada variasi terhadap medan sepanjang *strike* ($\frac{\partial}{\partial x}=0$), dari persamaan Maxwell dapat diekspansikan menjadi :

$$\frac{\partial(E_x - E_y + E_z)}{\partial y} + \frac{\partial(E_x - E_y + E_z)}{\partial z} = i\omega(B_x - B_y + B_z) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial(B_x - B_y + B_z)}{\partial y} + \frac{\partial(B_x - B_y + B_z)}{\partial z} = \mu_0\sigma(E_x - E_y + E_z) \quad (2.20)$$

Lebih lanjut, untuk kasus 2-dimensi, medan listrik dan medan magnet saling tegak lurus: medan listrik parallel terhadap *strike* meng-induksi medan magnet tegak lurus terhadap *strike* dan pada arah vertikal, atau sebaliknya. Kondisi ini diistilahkan dua mode, *E-polarization/Transverse Electric (TE) mode* dan *B-polarization/Transverse Magnetic (TM) mode* (Simpson & Bahr, 2005).

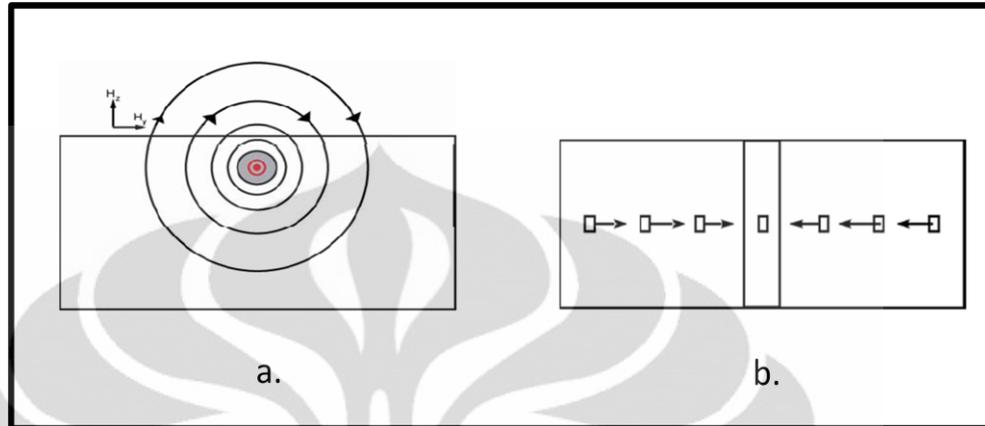
TE mode menggambarkan arus mengalir parallel terhadap *strike* (arah sumbu-x), komponennya E_x , B_y , B_z (Simpson & Bahr, 2005) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial t} = -i\omega B_y \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x \end{aligned} \right\} E - polarization \quad (2.21)$$

sedangkan TM mode menggambarkan aliran arus yang tegak lurus terhadap *strike* (sumbu-y). dengan komponen B_x , E_y , dan E_z (Simpson & Bahr, 2005):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu_0\sigma E_z \\ -\frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu_0\sigma E_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \end{aligned} \right\} B - polarization \quad (2.22)$$

Arus listrik yang ada pada TE mode menyebabkan timbulnya medan magnet vertikal (Unsworth, 2008). Sebagai contoh kasus, terdapat suatu benda konduktif pada arah sumbu-x (Gambar 2.8).



Gambar 2. 8. Penampang vertikal (Unsworth, 2008)

Arus akan menginduksi benda tersebut, sehingga menyebabkan timbulnya medan magnetik yang arah vektornya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8 (b). Adanya fenomena tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan struktur resistivitas bawah permukaan dengan menghitung arah vektor induksi dengan persamaan :

$$\vec{I}_y = \frac{\vec{H}_z}{\vec{H}_y} \quad (2.23)$$

$$\vec{I}_x = \frac{\vec{H}_z}{\vec{H}_x} \quad (2.24)$$

2.2.3 Rotasi

Pada kasus 2-dimensi dan 3-dimensi, ada beberapa factor yang harus diperhatikan karena berkaitan dengan data yang dihasilkan. Seperti arah struktur (*strike*). Untuk menggambarkan efeknya, terlebih dahulu ditinjau konsep tensor impedansi. Hubungan medan listrik dan medan magnet dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \\ E_y &= Z_{yy}H_y + Z_{yx}H_x \end{aligned} \quad (2.25)$$

Pada kasus 1-dimensi, Z_{xx} dan Z_{yy} adalah nol. Untuk kasus 2-dimensi, jika x atau y sejajar dengan *strike*, maka $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, maka $E_x = Z_{xy}H_y$, dan formula matematis untuk menghitung resistivitas menjadi sederhana, yaitu :

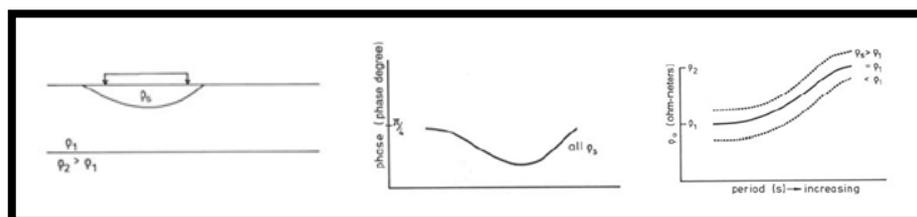
$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2$$

Tetapi jika x atau y tidak sejajar dengan *strike*, $Z_{xx} = -Z_{yy} \neq 0$. Maka untuk mendapatkan nilai resistivitas, formula matematikanya lebih kompleks. Oleh karena itu, menjadi sangat perlu dalam pengolahan data, menentukan arah *strike* pada daerah penelitian, dan merotasi data agar sejajar dengan arah *strike* (Xiao, 2004).

2.2.4 *Static shift*

Static shift didefinisikan sebagai perpindahan vertikal dari resistivitas semu pada kurva *sounding*. Antara titik pengukuran (stasiun) yang berdekatan atau antara dua kurva pada stasiun yang sama, tanpa ada perbedaan yang lain baik kondisi kurva maupun fase-nya (Gambar 2.5). *Static shift* disebabkan oleh medan listrik yang dihasilkan dari muatan-muatan pada batas permukaan yang tidak homogen (Vozoff, 1991).

Medan listrik yang dihasilkan dari *boundary charges* mereduksi nilai medan listrik yang terukur, juga menurunkan nilai impedansi, merendahkan resistifitas semu dari bagian yang memiliki resistivitas rendah. Pada bagian yang resistif, medan listrik mengalami penguatan, membuat daerah tersebut lebih resistif. Efek dari *boundary charge* ditemukan pada semua frekuensi. Jika inhomogenitas cukup luas (lebih besar dari *skin depth* pada frekuensi yang paling tinggi dari kurva MT-nya) (Xiao, 2004).



Gambar 2. 9. Model sketsa untuk menjelaskan efek statik (Vozoff, 1991)

2.3 Karakteristik Resistivitas Batuan Pada Daerah Panasbumi

Sistem panasbumi dapat ditentukan dengan mengetahui nilai-nilai resistivitasnya dari komponen-komponen (*clay cap, reservoir, hot source*) penyusun sistem. Pada kondisi lingkungan yang umum, resistivitas *bulk* dari suatu formasi dipengaruhi saturasi air. Hubungan antara resistivitas *bulk* suatu formasi (ρ), saturasi air (S_w), resistivitas air (ρ_w), dan porositas (ϕ) dirumuskan secara matematis oleh Archie (*Archie's law*) :

$$\rho = a\rho_w\phi^{-n}S_w^{-m} \quad (2.27)$$

Dimana a dan n adalah konstanta yang berhubungan dengan karakteristik porositas. Pada saturasi diatas 25%, $m \cong n$.

Untuk lingkungan panasbumi, ada beberapa faktor lain yang juga mempengaruhi nilai resistivitas ini. Diantaranya adalah suhu, fluida yang ada dalam matriks batuan, dan alterasi mineral (Ussher, 2000).

2.3.1 Suhu

Untuk mengetahui hubungan antara suhu dan resistivitas, ada contoh yang representatif, dilakukan perbandingan antara data log resistivitas, *core*, dan MT pada beberapa lapangan panasbumi (Gambar 2.6). Secara umum, resistivitas tinggi terlihat pada lapisan atas dari sistem, dimana suhu kurang dari 70⁰C. resistivitas sangat rendah ditemukan pada suhu 70 – 200 ⁰C, sekitar 1 – 10 Ω m. Pada suhu diatas 200⁰C, resistivitas naik, bisa lebih dari 100 Ω m, tergantung litologi.

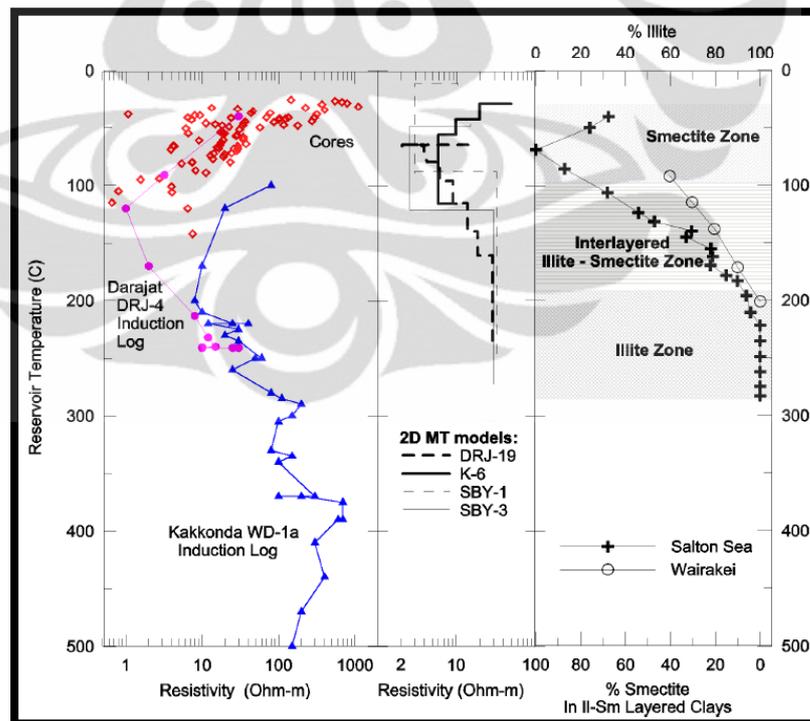
Resistivitas tinggi pada bagian atas dari sistem, dapat diinterpretasikan sebagai lapisan dengan saturasi air yang kurang, minim alterasi, dan ada sedikit pengaruh dari suhu. Zona yang sangat konduktif setelahnya, merupakan ciri dari daerah panasbumi, yang merupakan zona alterasi dari proses hidrotermal. Dan nilai resistivitas paling tinggi ditemukan pada bagian yang paling panas dari sistem.

2.3.2 Fluida

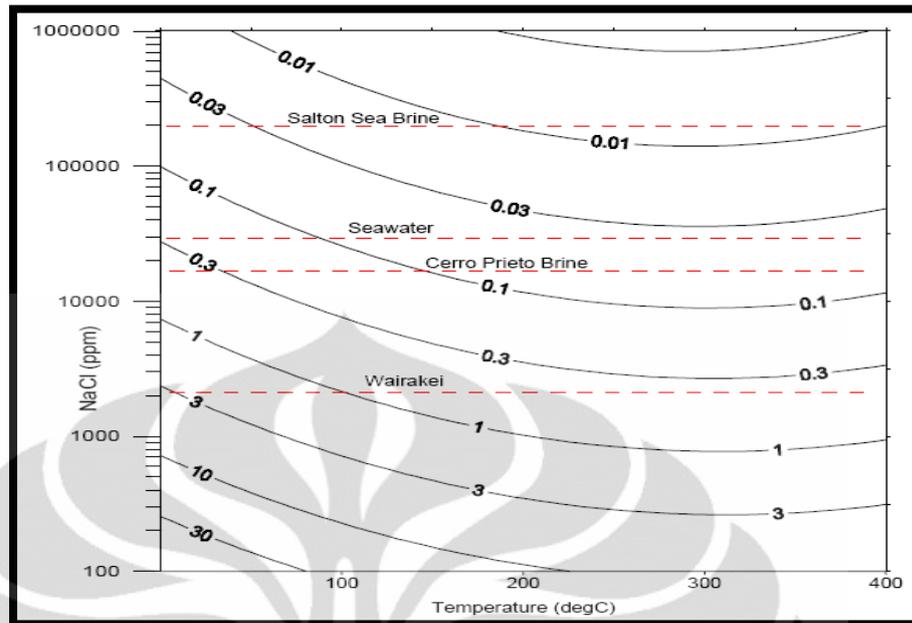
Selain saturasi fluida (air), atau banyaknya air yang mengisi pori-pori batuan, kandungan fluida yang terdapat pada formasi batuan, juga berpengaruh terhadap nilai resistivitasnya. Semakin tinggi salinitas dari fluida, maka resistivitasnya akan semakin rendah (Gambar 2.7).

2.3.3 Alterasi Mineral

Alterasi mineral melalui proses hidrotermal mempengaruhi nilai resistivitas pada batuan. Pada Gambar 2.6 terlihat bahwa perbedaan mineral menyebabkan nilai resistivitas yang berbeda pula. Lapisan yang mengandung mineral *smectite* yang lebih dominan, nilai resistivitasnya cenderung rendah, dan umumnya mengindikasikan *clay cap*. Perubahan *smectite* menjadi *illite*, menyebabkan naiknya nilai resistivitas, semakin tinggi kandungan *illite*, nilai resistivitas juga semakin besar. Mineral *illite* umumnya mengindikasikan *reservoir*.



Gambar 2. 10. Data core, log resistivitas, dan MT survey (Ussher, 2000)



Gambar 2. 11. Variasi resistivitas dari NaCl solutions dari pengukuran Ucoke et al (1980) (Ussher, 2000)

BAB 3

DATA PENDUKUNG

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

3.1 Data Geologi

Daerah panasbumi Arjuno-Welirang berada dalam jalur Gunung api Jawa bagian Selatan. Lokasi kompleks panasbumi ini termasuk di dalam zona Gunung api Kuarter.

Dari data stratigrafi, daerah penelitian dibagi kedalam beberapa satuan (Gambar 3.1) (Soetoyo, 2010):

- Satuan Lava Anjasmoro (Qla)

Satuan ini tersebar di bagian barat daerah penyelidikan, tersusun oleh lava andesit – basaltis dan breksi vulkanik. Lava andesit berwarna abu-abu gelap afanitik – porfiritik, keras dan masif, beberapa daerah nampak jelas struktur vesikular yang mencerminkan lava bagian atas, terdapat kekar berlembar (*sheeting joint*), tebal satuan ini lebih dari 1000 m dicirikan dengan topografi curam dengan bentuk dinding / gawir sesar yang cukup luas, berbentuk radial seperti *rim* kaldera.

Batuan tersusun oleh plagioklas dan mineral mafik (olivin, piroksen) yang cukup banyak. Singkapan banyak muncul di sepanjang jalan dari arah Padusan ke arah Kota Batu. Breksi vulkanik berwarna abu-abu gelap sampai kehitaman, menyudut, kompak dan keras, terdiri dari komponen lava basaltik berukuran lapili – bom, tersusun oleh mineral

plagioklas dan piroksen, matriks berwarna coklat kehitaman tersusun oleh tufa kasar. Singkapan tersingkap dengan baik di daerah Mrasih.

- Lava Pra-Arjuno Welirang (Qlaw)

Satuan ini tersebar di bagian barat hingga ke selatan daerah penyelidikan, terutama di sekitar Gunung Ringgit, Gunung Lincing, di bagian utara di sekitar Prigen dan juga tersingkap sedikit di bagian barat di daerah air panas Coban. Karakteristik batuan berupa lava andesit – basaltis dengan tekstur porfiritik, keras dan tebal > 1000 m. Mineral penyusun didominasi oleh mineral mafik (piroksen) dan plagioklas. Beberapa tempat berstruktur kekar berlembar. Satuan ini diduga sebagai tubuh tua dari kompleks Arjuno – Welirang yang masih tersingkap dipermukaan.

- Aliran Piroklastik Pra – Arjuno Welirang (Qapaw)

Satuan ini terhampar di bagian selatan daerah penyelidikan, berupa aliran piroklastik berwarna abu-abu kecoklatan, terdiri dari komponen lava, *scorea* dan *pumice* berukuran lapili sampai bom, menyudut sampai menyudut tanggung, vesikular tertanam dalam masa dasar tufa pasiran berwarna kecoklatan. Satuan ini diperkirakan merupakan produk eksplosif dari tubuh lava pra-Arjuno Welirang yang berumur Kuarter Awal, hal tersebut berkaitan dengan munculnya *pumice* dan *scorea* yang merupakan material hasil eksplosif besar. Disamping itu pembentukan satuan ini diperkirakan berhubungan dengan runtuhnya tubuh Arjuno Welirang yang membentuk struktur *ring fracture*.

- Aliran piroklastik Penanggungan (Qapp)

Satuan batuan ini tersebar di bagian timur laut daerah penyelidikan, tersusun oleh aliran piroklastik berwarna abu-abu kecoklatan dengan komponen lava andesit produk Gunung Penanggungan, angular. Matrik batuan berupa tuf berwarna kecoklatan. Singkapan tersingkap di daerah Belik.

- Erupsi Samping (Qes)

Satuan ini tersebar di tiga lokasi, masing – masing adalah lava produk Gunung Bulak, lava produk Gunung Pundak di bagian utara dan lava produk Gunung Tunggangan di bagian barat Komplek Arjuno – Welirang. Lava berkomposisi andesit – basaltik berwarna abu-abu tua – kehitaman, afanitik – porfiritik dengan mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan sedikit olivin. Produk erupsi samping ini terbentuk setelah pembentukan lava pra-Arjuno-Welirang yang muncul melalui zona struktur di bagian samping kompleks Arjuno-Welirang. memiliki ketinggian sampai 300 m dari lereng sampingnya.

- Lava Welirang I (Qlw I)

Satuan ini tersebar di bagian tengah ke arah utara daerah penyelidikan. Lava basalt berwarna abu-abu kehitaman, porfiritik, masif, terdiri dari mineral plagioklas, piroksen, olivin dan mineral sekunder berupa mineral lempung dan oksida besi. Satuan ini diduga merupakan produk sin-arjuno welirang yang terbentuk setelah terjadinya kolaps/subsiden pada batuan pra-Arjuno Welirang. Munculnya lava Welirang kemungkinan diakibatkan oleh terbentuknya struktur regional dengan arah Baratlaut – Tenggara yang memfasilitasi naiknya lava melalui zona tersebut ke permukaan, struktur tersebut yang sejajar dengan munculnya pusat erupsi Gunung Kembar I, II dan Arjuno.

- Aliran Piroklastik Welirang I (Qapw I)

Satuan ini tersebar di bagian utara daerah penyelidikan, disekitar Padusan, Pacet, hingga ke Kenang di kaki Gunung Penanggungan. Satuan ini memiliki hubungan yang selaras dengan Lava Welirang I. Diperkirakan terbentuk sebagai akibat adanya letusan eksplosif yang juga membentuk *ring fracture* dimana menghasilkan produk aliran piroklastik yang tersebar luas dengan jatuhan piroklastik yang tipis.

Aliran piroklastik berwarna abu-abu tua kecoklatan, keras, menyudut dengan komponen lava andesit – basalt berukuran bongkah – lapili yang tertanam pada matrik tuf berukuran sedang berwarna kecoklatan. Satuan ini menindih lava Welirang dan aliran piroklastik tua Pra-Arjuno Welirang. Jatuhan piroklastik tipis berwarna abu-abu tua, berukuran sedang tersingkap di daerah Claket menindih aliran piroklastik Welirang 1 dengan ketebalan < 30 cm.

- Lava Arjuno (Qla)

Satuan ini menempati bagian tengah kompleks Arjuno – Welirang dengan penyebaran ke arah Tenggara. Produk Arjuno terbentuk setelah terjadinya subsiden yang merupakan Sin-Arjuno Welirang. Batuan berkomposisi lava basalt, berwarna abu-abu kehitaman, afanitik – porfiritik, setempat terdapat struktur kekar berlembar. Mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan olivin, serta mineral lempung dan sedikit oksida besi. Satuan ini mengalami aktifitas struktur yang lebih kuat dibanding satuan lainnya, ditunjukkan dengan terbentuknya longsoran berarah Tenggara dan Timurlaut.

- Aliran Piroklastik Arjuno (Qapa)

Satuan ini tersebar di bagian tenggara daerah penyelidikan, di sekitar Tambaksari. Tersusun oleh aliran piroklastik produk Arjuno yang berwarna abu-abu kecoklatan, dengan komponen lava basalt berukuran lapili – bom dan matrik tuf kecoklatan berukuran sedang. Satuan ini menindih secara selaras satuan lava arjuno.

- Lava Welirang II (Qlw II)

Satuan ini menindih satuan lava welirang I dengan pusat erupsi yang sama. Pada bagian puncak terbentuk kawah yang masih aktif dan terbagi menjadi dua lokasi. Kawah Jero berada di bagian puncak dan kawah Pluluh berada di tepian, hanya berjarak < 500 m antara

keduanya. Batuan berupa lava basalt dan aliran piroklastik. Pada masing – masing kawah terbentuk pengendapan belerang dalam jumlah yang banyak, penduduk memanfaatkannya untuk penambangan. Alterasi, solfatar dan fumarol ditemukan pada satuan ini. Lava Welirang berjenis basalt, tektur porfiritik, berongga/ *scoreous* menunjukkan proses pendinginan di permukaan dengan cepat dan banyak mengeluarkan gas. Lava ini berselang-seling dengan aliran piroklastik dimana tersingkap charcoal sebagai salah satu komponennya.

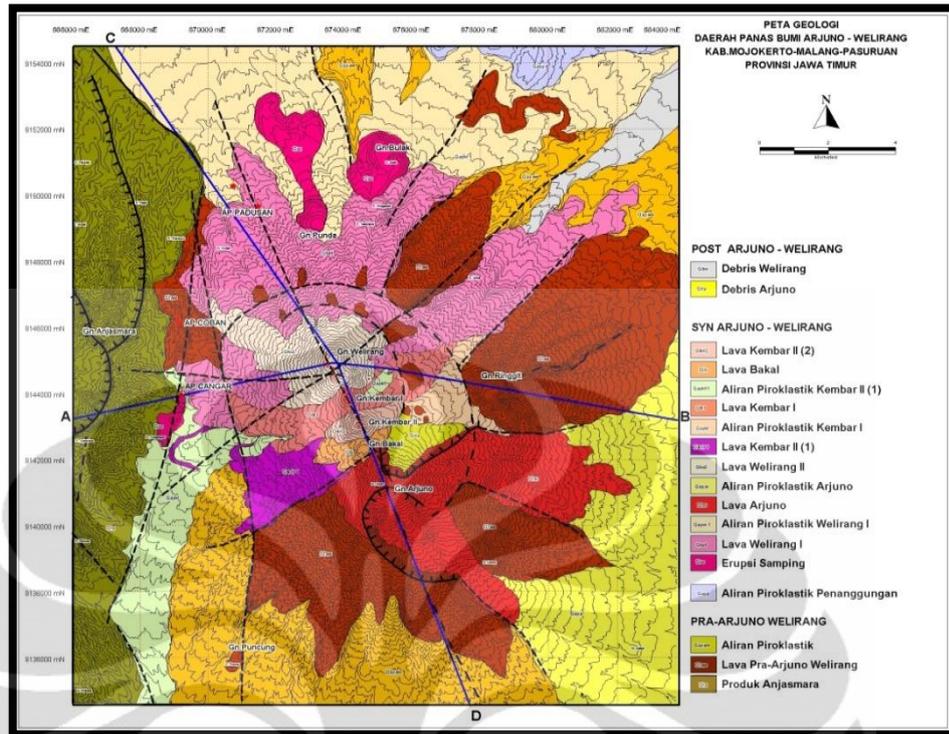
- Lava Kembar II (1)

Satuan ini berada diantara puncak Arjuno dan Welirang, terbentuk setelah terjadinya proses subsiden/ amblesan yang kemudian membentuk pola kesejajaran pusat erupsi, salah satunya adalah Gunung Kembar II. Aliran lava mengalir ke bagian barat hingga daerah Cangar. Komposisi batuan berupa lava basalt berwarna abu-abu, porfiritik dengan mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan sedikit olivin.

- Aliran Piroklastik Kembar II (1)

Satuan ini berada di bagian barat daya daerah penelitian dengan penyebaran di sekitar Sumberbrantas ke arah Kota Batu. Aliran piroklastik berwarna coklat dengan komponen lava berukuran lapili – bom, matrik berupa abu vulkanik berwarna kehitaman. Air panas Cangar muncul melalui rongga dan rekahan dari satuan ini, menindih satuan aliran piroklastik pra-arjuno welirang dan lava Kembar II (1).

Data stratigrafi daerah penelitian, juga ditampilkan dalam kolom stratigrafi (Gambar 3.2).



Gambar 3. 1. Peta geologi dengan sebaran produk-produk gunung api daerah penelitian (Soetoyo, 2010)

UMUR	ARJUNO-WELIRANG											
	ANJASMORA	PENANGGUNGAN	PRA		WELIRANG		SYN		KEMBAR II		BAKAL	POST
	Lava	Aliran Piroklastik	Lava	Aliran Piroklastik	Lava	Aliran Piroklastik	Lava	Aliran Piroklastik	Lava	Aliran Piroklastik	Lava	ERUPSI SAMPING
ATAS												Qdw Qda
KUARTER												
BAWAH												

Gambar 3. 2. Kolom stratigrafi daerah penelitian (Soetoyo, 2010)

3.2 Data Geokimia

Data geokimia didapat dari beberapa manifestasi berupa fumarol dan mata air panas yang ada pada daerah penelitian (Kusnadi D. , 2010). Dari data-data tersebut akan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui suhu *reservoir* maupun hidrogeologinya.

- Air Panas Padusan

Air panas muncul pada batuan aliran piroklastik dan bongkah-bongkah lava andesit produk Gunung Welirang. Telah diambil 2 sampel air panas, pada elevasi 893-901 m dpl, yang bertemperatur 50 dan 55°C, dengan temperatur udara di lokasi 22 dan 25 °C, jernih, tidak berbau dan tidak berasa, pH 5,87-6,30, debit masing-masing 2 L/detik, terdapat lapisan sinter karbonat dan oksida besi yang cukup banyak.

- Air Panas Coban

Air panas muncul pada elevasi 1348 mdpl, pada sela-sela lava andesit produk vulkanik Pra Arjuno-Welirang dengan temperatur 39,4°C, temperatur udara 22,7°C, jernih tidak berbau dan tidak berasa, pH 6,44, debit air panas kecil (0,1 L/detik), dengan oksida besi yang cukup banyak.

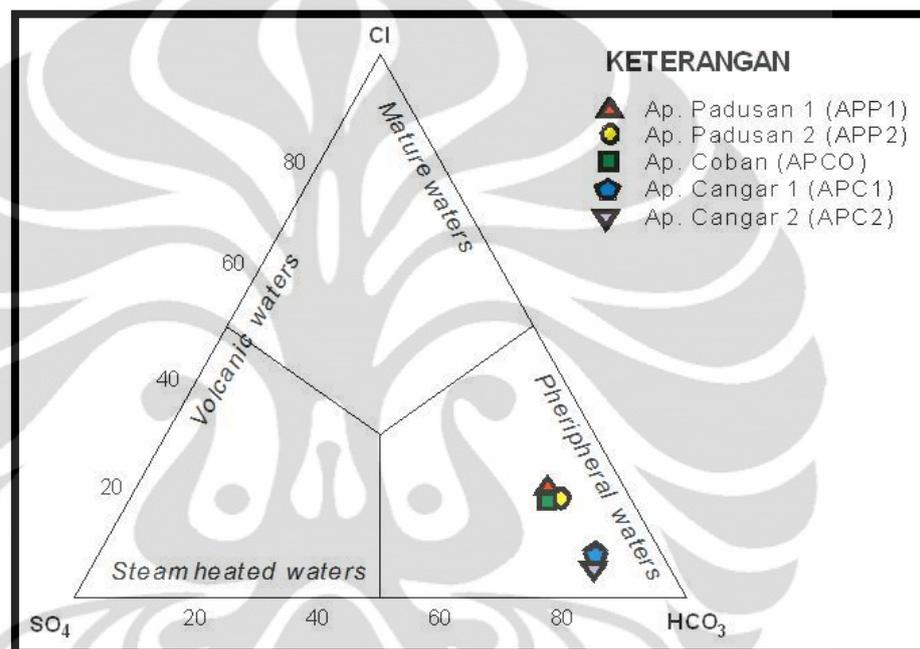
- Air Panas Cangar

Sebaran air panas Cangar terdapat di dua lokasi dengan jarak sekitar 100 meter antara air panas Cangar 1 dan air panas Cangar 2. Air panas muncul pada batuan aliran piroklastik produk Gunung Kembar pada elevasi 1604-1611 m dpl, temperatur air panas 48,3 dan 54,1 °C, temperatur udara 22,3 dan 24,1 °C, air panas jernih, tidak berbau dan berasa. Lapisan sinter karbonat ditemukan tipis, oksida besi lemah.

- Fumarol

Sebaran fumarol berada di masing – masing puncak kerucut kompleks Gunung Arjuno – Welirang seperti di kawah Gunung Arjuno, Gunung

Kembar I, Kembar II dan kawah Gunung Welirang (Plupuh dan Jero). Temperatur terukur dilakukan di Kawah Plupuh dengan kisaran antara 94,1 – 137,5°C, dengan temperatur udara 17,2 °C, hembusan kuat, tidak ada air, beberapa tempat disertai sublimasi belerang membentuk solfatara. Solfatara/fumarol Gunung Welirang terdapat pada elevasi 3050-3150 mdpl.



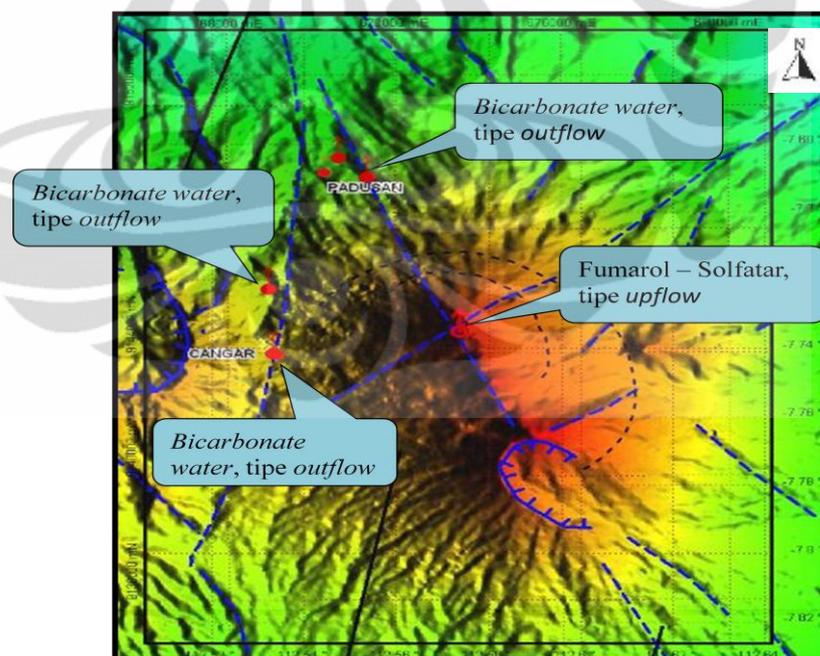
Gambar 3. 3. Diagram segitiga tipe air panas (Kusnadi D. , 2010)

Dari Gambar 3.3, seluruh manifestasi berupa air panas yang ada pada daerah penelitian berada pada kelompok *bicarbonate* (HCO_3). Air panas yang mengandung *bicarbonate* berasal dari proses disolusi CO_2 atau kondensasi dari uap panasbumi (*geothermal steam*) (Gupta & Roy, 2007). Kadar pH pada mata air panas ini cenderung netral tetapi masih mengarah ke asam, ini disebabkan karena proses disolusi dari CO_2 (Gupta & Roy, 2007). *Groundwater* (H_2O) berinteraksi dengan gas CO_2 yang berasal dari *steam* menghasilkan asam karbonat (H_2CO_3). Reaksi selanjutnya dihasilkan ion *hydrogen* (H^+) dan ion *bicarbonate* (HCO_3^-) dari proses *splitting* asam karbonat (National Geographic, 2008). Walaupun memiliki kandungan asam yang tidak dominan, namun dapat mengkonversi mineral *feldspar* yang

terkandung menjadi *clay* (Gupta & Roy, 2007). Air panas yang mengandung *bicarbonate* ini terbawa mengikuti arus dari *groundwater* sampai menemui celah (*fracture*) atau patahan (*fault*) untuk naik ke permukaan. Proses ini mengindikasikan bahwa kemunculan air panas merupakan *outflow* dari sistem panasbumi daerah penelitian (Gambar 3.4).

Sedangkan untuk *upflow* dari sistem diindikasikan oleh keberadaan fumarol pada puncak Gunung Welirang. Fumarol adalah lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung butiran-butiran air (*wet steam*). Solfatar yang ada disekitar fumarol menandakan bahwa uap tersebut mengandung H_2S (Daud, 2008). Dari manifestasi yang ada pada daerah penelitian, mengindikasikan bahwa daerah ini tergolong sistem dengan suhu tinggi (*high temperature sistem*).

Dari data *geothermometer* untuk mengetahui suhu *reservoir*, memperkuat dugaan tingginya suhu pada sistem ini. Kalkulasi matematis dengan rumus *geothermometer* Na-K adalah $310-314\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kusnadi D. , 2010).



Gambar 3. 4. Tipe air panas dan lokasinya

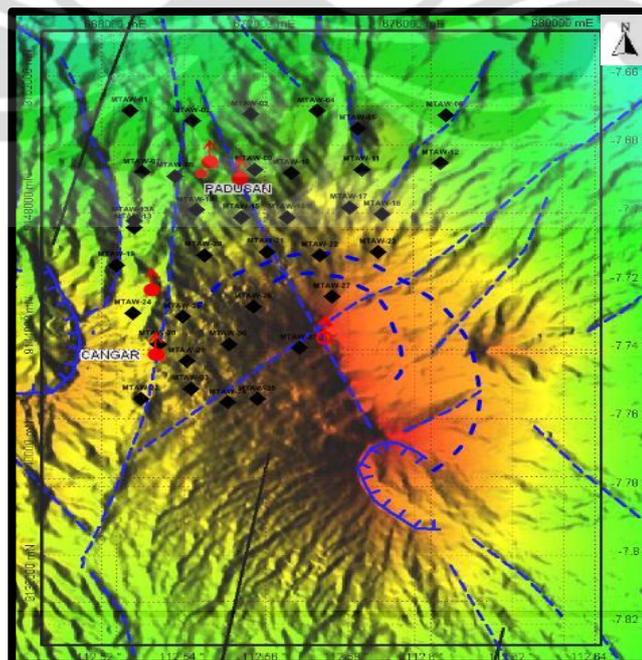
BAB 4

PENGOLAHAN DATA MT

Sebelum data MT dapat diinterpretasi lebih lanjut, perlu dilakukan beberapa prosedur pengolahan data untuk dapat meningkatkan kualitas data. Pada bab ini akan dijelaskan tahapan dalam melakukan pengolahan data tersebut.

4.1 Titik Pengukuran MT

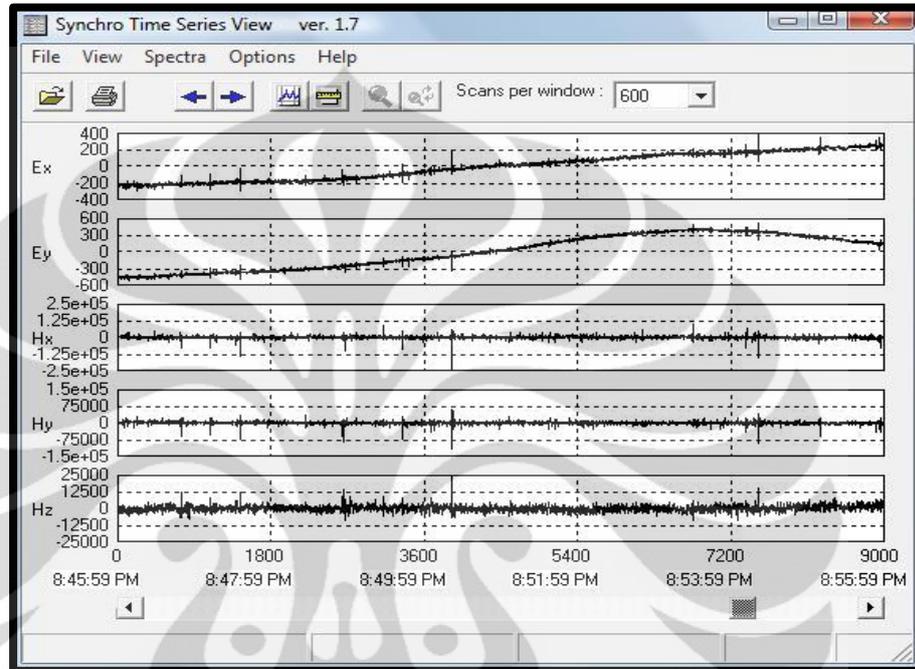
Sebelum melakukan pengukuran di lapangan, penentuan titik pengukuran pada saat membuat *design* pengukuran juga sangat penting. Pada umumnya rancangan titik pengukuran dibuat berdasarkan keberadaan manifestasi permukaan sebagai hipotesa awal tentang sistem panasbumi yang didapatkan dari data geologi dan geokimia dalam *survey* pendahuluan. Titik pengukuran sedapat mungkin melingkupi manifestasi dan daerah sekitarnya. Seperti titik pengukuran yang berada pada daerah penelitian ini (Gambar 4.1), ada manifestasi berupa fumarol dan air panas seperti yang terlihat dalam Gambar 4.1. Lokasi-lokasi manifestasi tersebut dilingkupi oleh titik pengukuran MT untuk mendapatkan hubungan antar manifestasi tersebut.



Gambar 4. 1. Titik pengukuran MT

4.2 Analisis *Time-Series*

Data yang didapat dari lapangan merupakan *time-series* yang terukur dari selang waktu yang ditentukan dalam pengukuran (Gambar 4.2).



Gambar 4. 2. Contoh data *time-series*

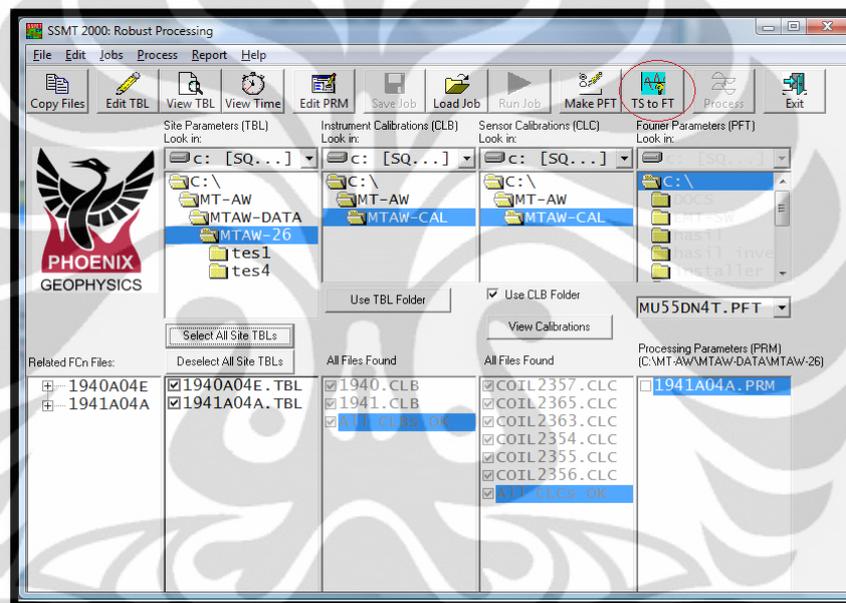
Selanjutnya adalah memilih interval waktu yang diinginkan untuk diproses, dari sinilah proses analisis dimulai. Pemilihan data pada selang waktu tertentu sangat menentukan kualitas data. Panjang-pendeknya interval waktu yang dipilih juga perlu diperhatikan, semakin panjang interval waktu, jumlah data yang didapat juga semakin banyak. Sebaliknya, jika interval pendek, data yang ada juga sedikit. Akibatnya data (*crosspower*) yang bisa dipilih pada saat *filtering* juga terbatas (akan dibahas pada bagian *filtering* data).

4.3 Transformasi Fourier

Sebagaimana telah diketahui bahwa, data yang diterima berupa *time-series*. Sehingga domain waktu harus diubah menjadi domain frekuensi dengan transformasi Fourier agar dapat dihitung nilai impedansinya, yang

selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai resistivitas (persamaan 2.17).

Proses pengolahannya menggunakan software SSMT 2000. Sebelum dilakukan transformasi Fourier, proses diawali dengan memilih stasiun yang akan diolah, *checklist* file .TBL, memilih *file* kalibrasi, lalu memasukan interval waktu yang sudah dipilih pada saat analisis *time-series* (Gambar 4.3).



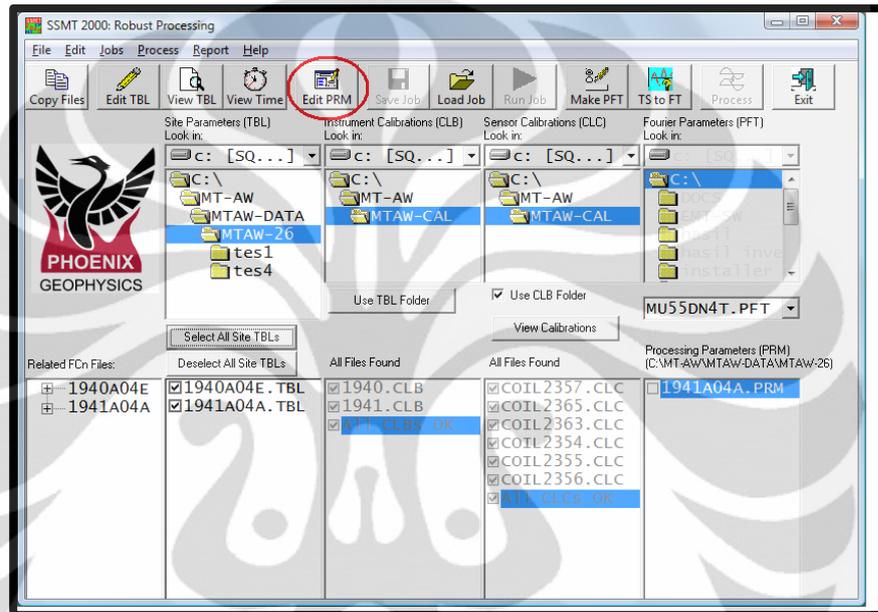
Gambar 4. 3. Proses transformasi *Fourier* pada SSMT 2000

4.4 *Robust Processing*

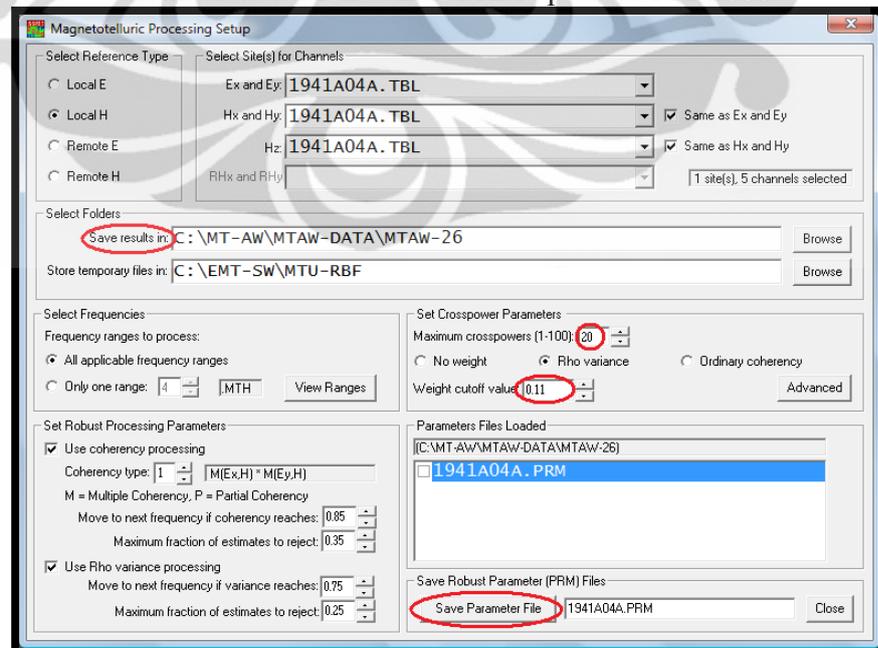
Setelah melewati proses transformasi Fourier, data yang dimiliki sekarang sudah dalam domain frekuensi. Selanjutnya adalah menghitung nilai impedansi, resistivitas dan fase serta menghilangkan *biasing noise* yang ada pada data dengan metode *robust processing*.

Langkah-langkah dalam melakukan proses ini dengan software SSMT, yang pertama adalah “Edit PRM” (Gambar 4.4). Disini akan diatur parameter-parameter yang diperlukan, seperti lokasi penyimpanan hasil olahan nanti, maximum crosspower. Seperti yang telah disinggung sebelumnya,

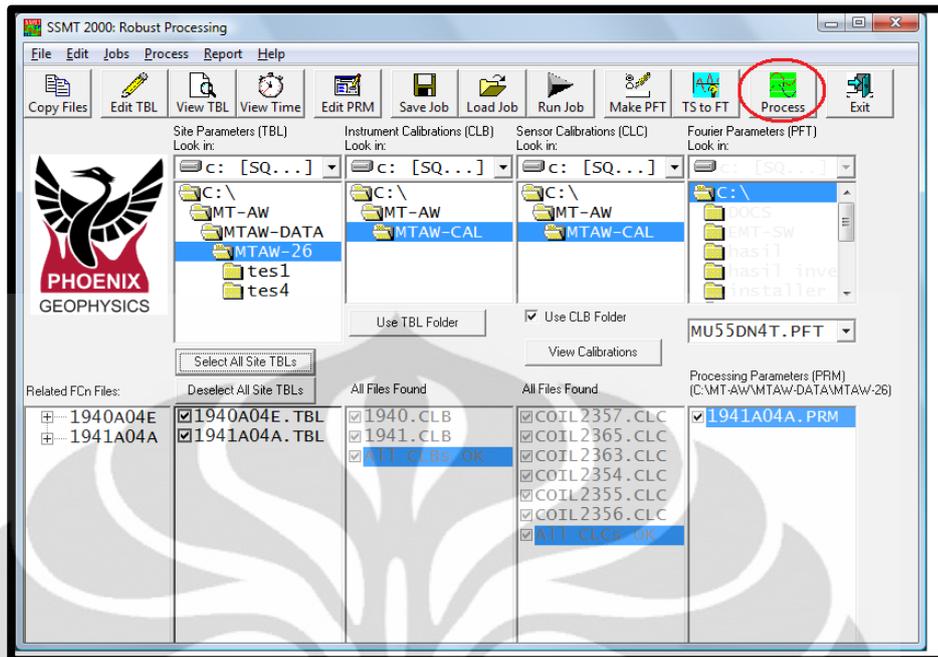
maximum crosspower ini yang harus diatur untuk menentukan seberapa banyak data yang diinginkan untuk diseleksi pada bagian *filtering* data, setelah itu mengatur harga *weight cutoff*, dan terakhir menyimpan parameter-parameter tersebut (Gambar 4.5). kemudian proses robust bisa dilakukan dengan meng-*click* icon “Process” (Gambar 4.6)



Gambar 4. 4. Menu “Edit PRM” pada SSMT 2000



Gambar 4. 5. Parameter yang diatur dalam “Edit PRM”

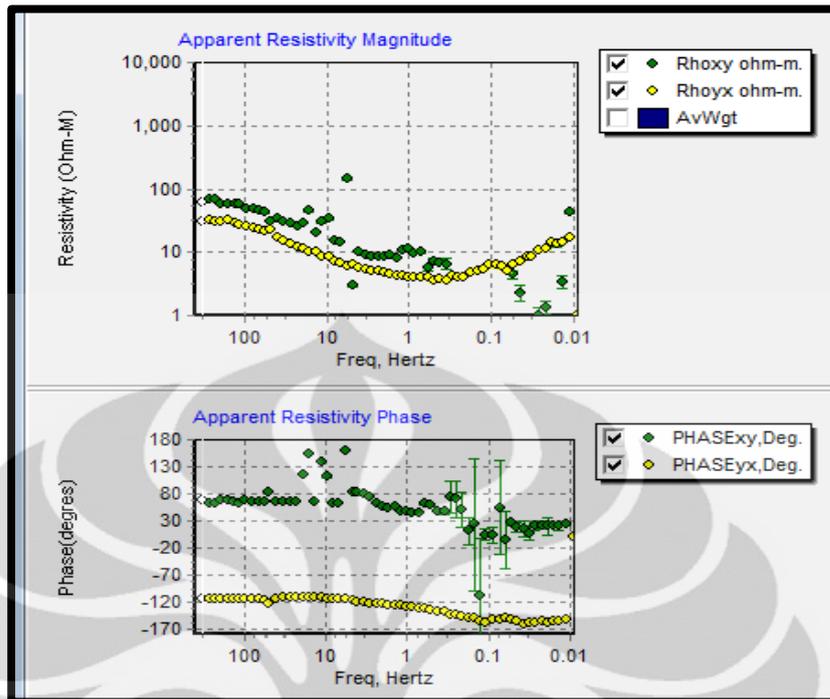


Gambar 4. 6. Menu “Process” pada SSMT 2000

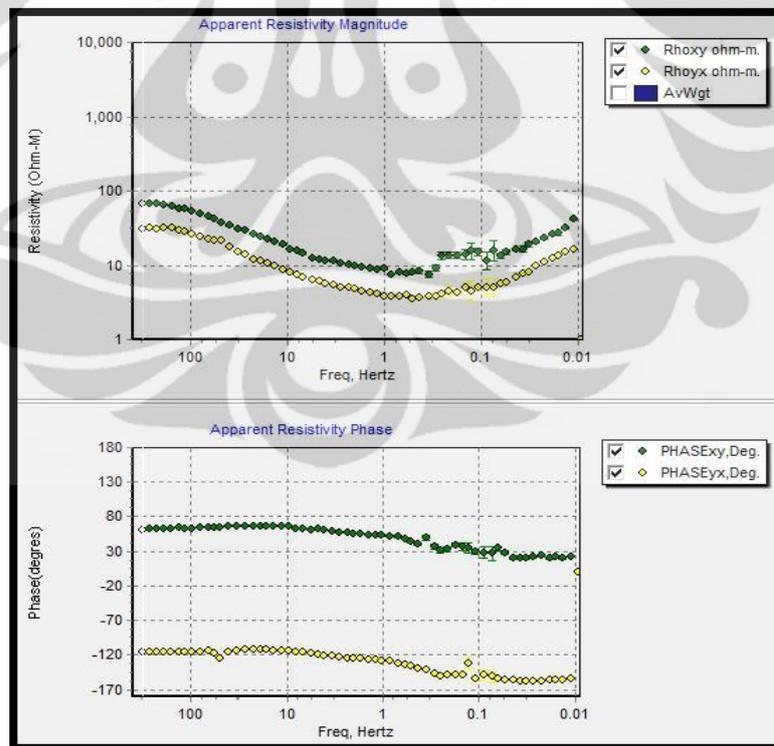
Dengan berakhirnya tahapan ini, berakhir pula proses pengolahan data dengan SSMT 2000.

4.5 Filtering Data

Setelah melalui proses dengan software SSMT 2000, maka data yang ada sekarang sudah berupa resistivitas versus frekuensi, dan fase, yang dapat dibuka dengan software MTeditor (Gambar 4.7). Selanjutnya adalah proses seleksi *crosspower* untuk mendapat kurva resistivitas versus frekuensi yang representatif (Gambar 4.8). Jumlah *crosspower* sesuai dengan parameter yang telah diatur dalam SSMT 2000.



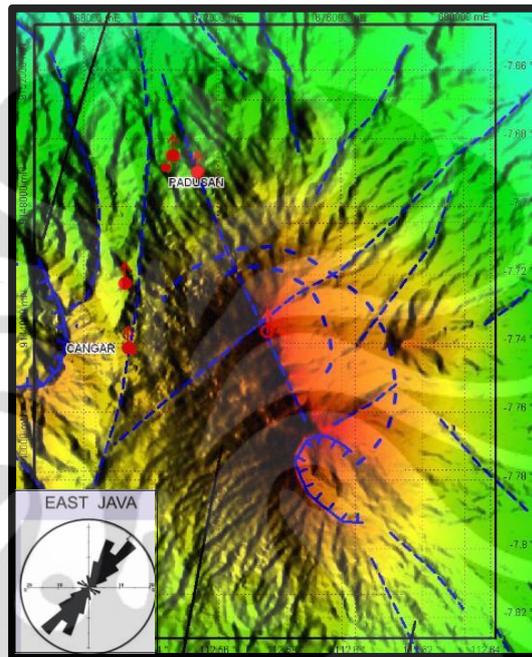
Gambar 4. 7. Contoh data dan kurva sebelum di seleksi



Gambar 4. 8. Contoh data dan kurva setelah di seleksi

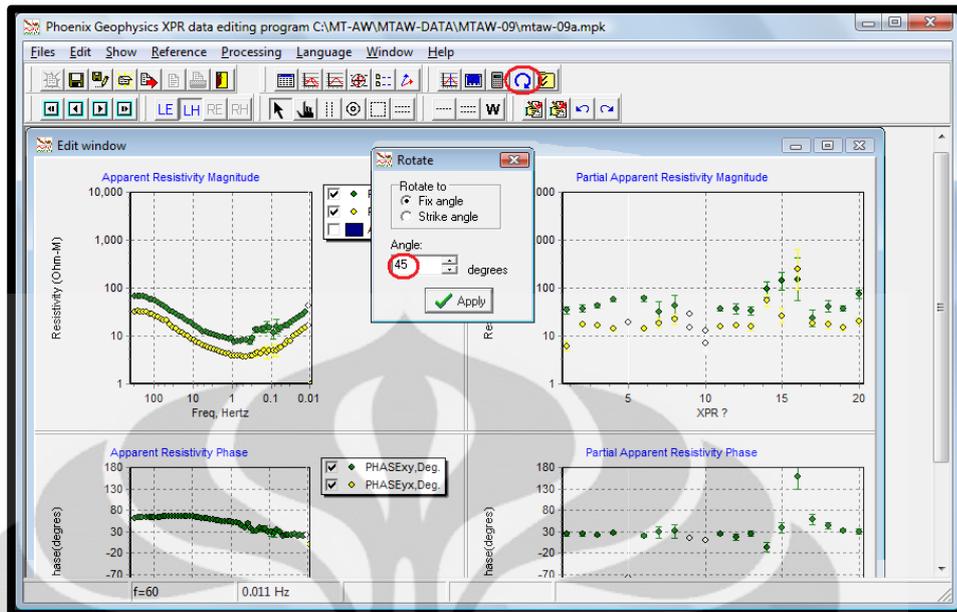
4.6 Rotasi

Teknik rotasi yang digunakan untuk mendapatkan arah *strike* adalah berdasarkan referensi pola struktur mayoritas pada daerah penelitian (Gambar 4.9).

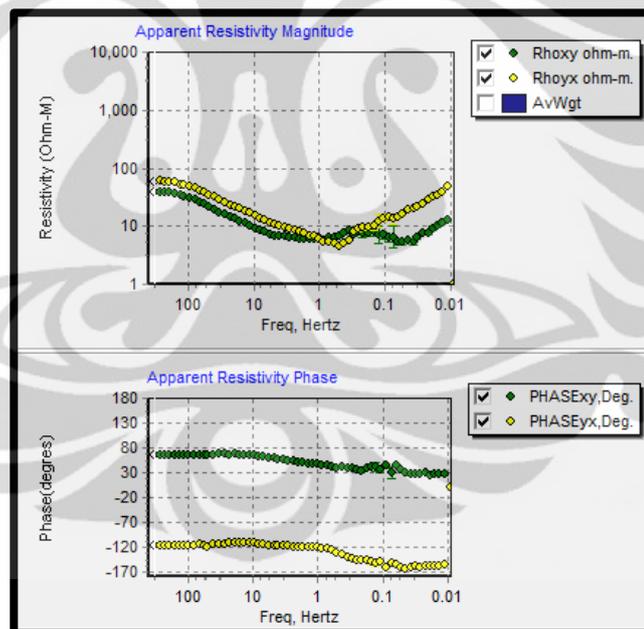


Gambar 4. 9. Lokasi daerah penelitian dan pola struktur (*insert*)

Arah struktur mayoritas mengarah N45⁰E, sehingga rotasi bisa dilakukan sebesar 45⁰ (Gambar 4.10). Maka kurva sebelumnya (Gambar 4.8) berubah menjadi seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 10. Menu rotasi pada MT editor dan memasukkan nilai sebesar 45



Gambar 4. 11. Hasil rotasi

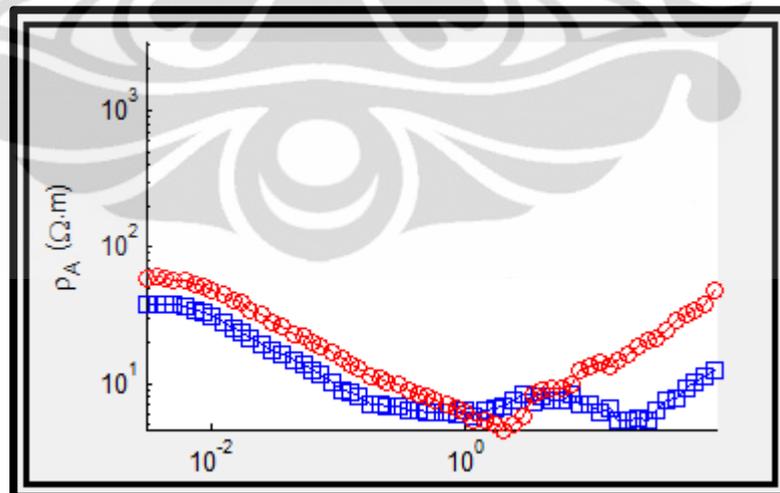
Struktur bawah permukaan sebenarnya sangat kompleks, pola struktur yang tersaji pada peta geologi juga merupakan hasil interpretasi, artinya ada kemungkinan *error* (memiliki persentase kesalahan). Namun jika diteliti satu per satu efek dari struktur terhadap data MT, akan sangat sulit. Karena satu data MT dipengaruhi oleh banyak struktur bawah permukaan dengan arah yang berbeda-beda. Oleh karena itu, walaupun memiliki persentase

kesalahan, referensi arah struktur dominan pada data geologi cukup merepresentasikan struktur yang bekerja pada daerah penelitian.

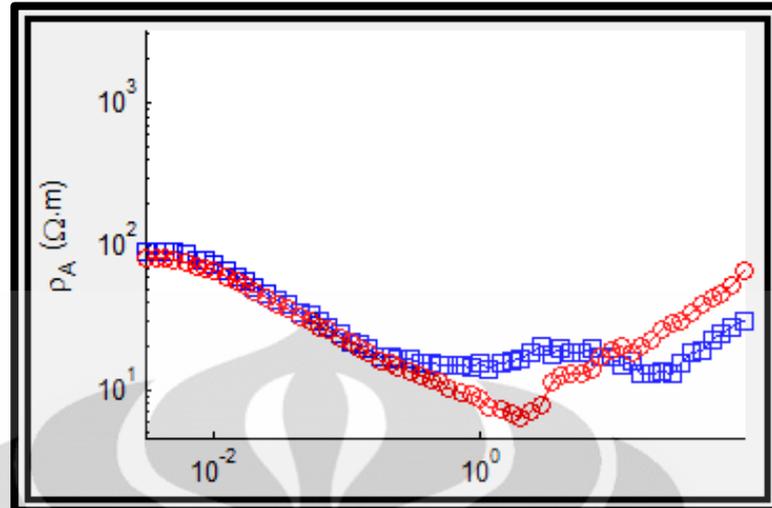
4.7 Koreksi *static shift*

Koreksi karena gangguan pada data MT yang berikutnya adalah koreksi *static shift*. *Static shift* disebabkan antara lain oleh inhomogenitas di dekat permukaan (kedalaman yang dangkal) dan pengaruh topografi yang tidak rata. Metode untuk mengoreksi efek ini ada beberapa cara, bisa dengan data TDEM, atau dengan formula matematis. Karena tidak ada data TDEM pada daerah penelitian, maka digunakan metode matematis untuk pengoreksian ini. Metode yang digunakan adalah *averaging/spatial filtering*.

Metode ini menggunakan teknik perata-rataan, yaitu titik yang akan dikoreksi akan dirata-rata oleh titik di sekitarnya sebagai pengoreksi. Untuk membuat kondisi bawah permukaan pada daerah tersebut homogen. Metode ini memberikan hasil yang mendekati hasil dari TDEM (Sulistyo, 2011). Berikut contoh hasil koreksi *static shift* yang dilakukan pada titik yang sama setelah dirotasi (Gambar 4.13).



Gambar 4. 12. Sebelum dikoreksi *static shift*



Gambar 4. 13. Setelah dikoreksi *static shift*

4.8 Inversi 2-Dimensi

Inversi adalah proses pencarian model dari data yang diperoleh. Jika diasumsikan \mathbf{m} sebagai model, dan \mathbf{F} sebagai fungsi keadaan, serta \mathbf{d}' adalah data yang diperoleh sesuai dengan model yang dibuat, maka dapat ditulis :

$$\mathbf{d}' = \mathbf{Fm} \quad (4.1)$$

Persamaan diatas digunakan untuk mencari data jika model telah diketahui, atau biasa disebut *forward modeling*. Namun, jika ingin mendapatkan suatu model (\mathbf{m}) dari data yang dimiliki (\mathbf{d}) maka diperlukan proses inversi. Secara matematis ditulis :

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

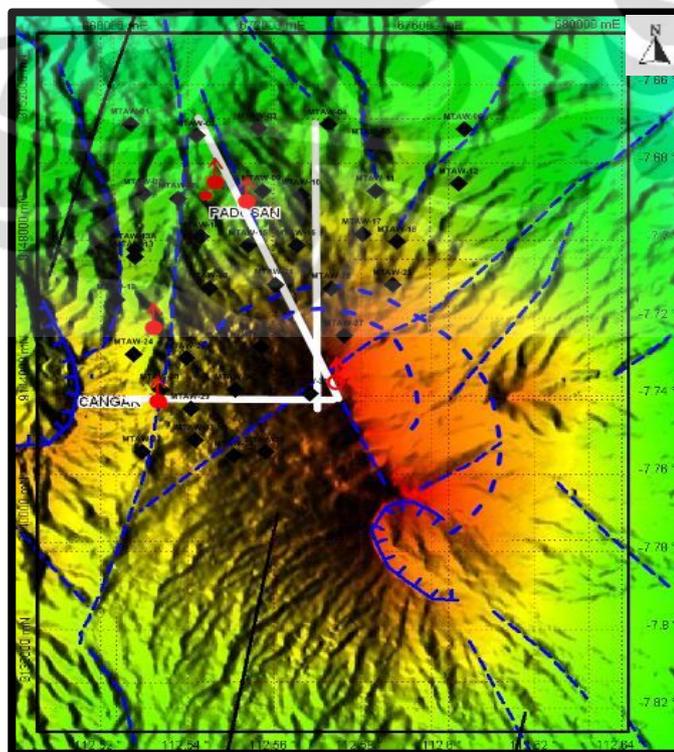
dalam proses inversi ini, dilakukan pula proses *smoothing* terhadap kurva resistivitas. Nilai resistivitas (ρ^{data}) dan fase (φ^{data}) akan di-*smoothing* sehingga menghasilkan nilai resistivitas (ρ^{smooth}) dan fase (φ^{smooth}) yang baru. Namun model yang dihasilkan tetap akan mengacu pada data.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

$$rms = \sqrt{\frac{1}{2NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{(\rho_{ij}^{data} - \rho_{ij}^{smooth})^2}{e_{ij}^{r^2}} + \frac{1}{2NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_{ij}^{data} - \phi_{ij}^{smooth})^2}{e_{ij}^{p^2}}} \quad (3.3)$$

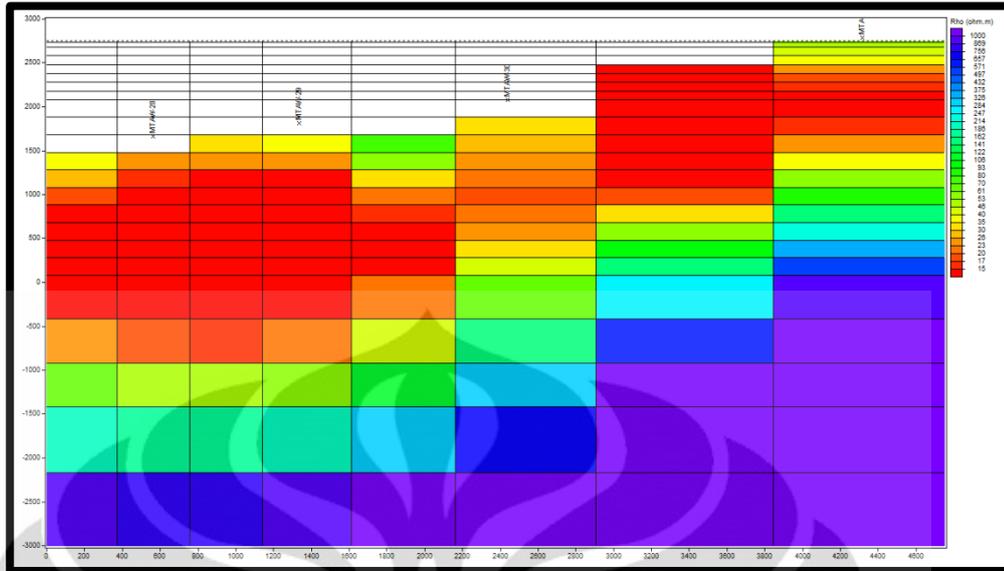
dimana e^r dan e^p merupakan *standard error* yang diperbolehkan dari nilai resistivitas dan fase yang ada (Xiao, 2004).

Proses inversi pada daerah penelitian dilakukan pada 12 lintasan. Namun tidak semua hasil lintasan tersebut dimasukkan kedalam subbab ini. Hanya tiga buah lintasan yang ditampilkan. Lintasan yang diberi nama, lintasan 5, lintasan 10, dan lintasan 11 (Gambar 4.14) hasil dari inversinya (Gambar 4.15) didasari oleh parameter-parameter yang diatur dan *rms error* yang dihasilkan (Tabel 4.1).

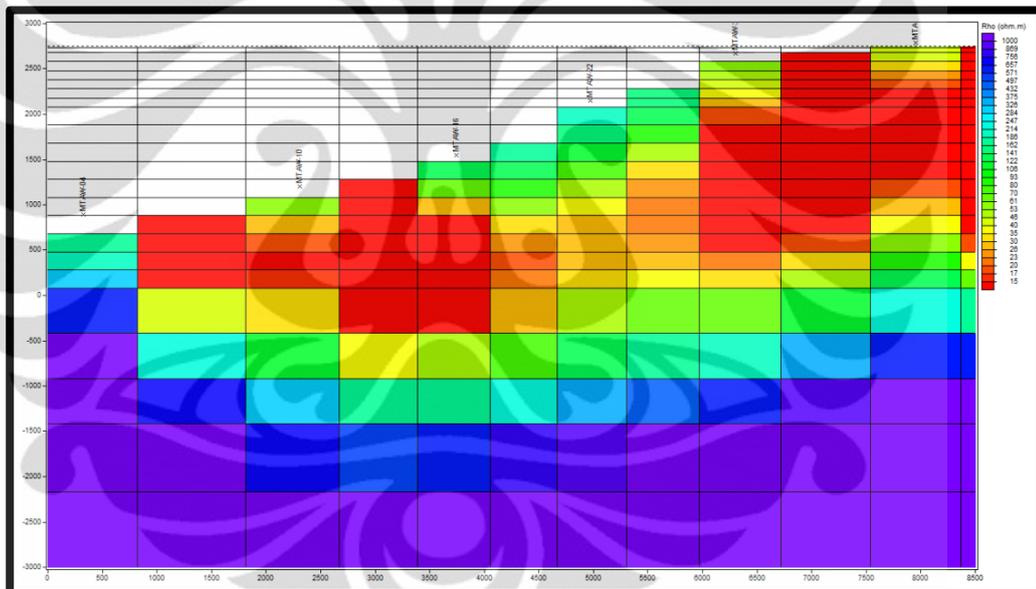
Pengambilan ketiga lintasan ini didasarkan pada kemunculan fumarol dan air panas disekitarnya. Untuk melihat apakah ada hubungan antara manifestasi-manifestasi tersebut. Apakah sesuai dengan indikasi awal bahwa fumarol mengindikasikan *upflow* dari sistem panasbumi, dan air panas yang ada di sekitarnya sebagai *outflow*.



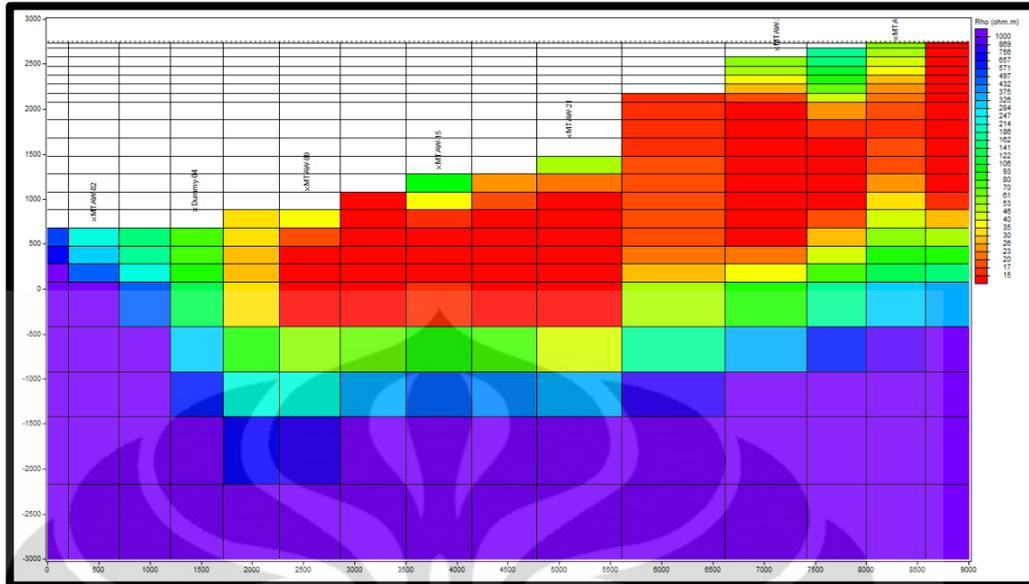
Gambar 4. 14. Peta distribusi pengukuran MT dan lintasan inversi 2-D



(4.15-a)



(4.15-b)



(4.15-c)

- Keterangan :
- a. lintasan 5
 - b. lintasan 10
 - c. lintasan 11

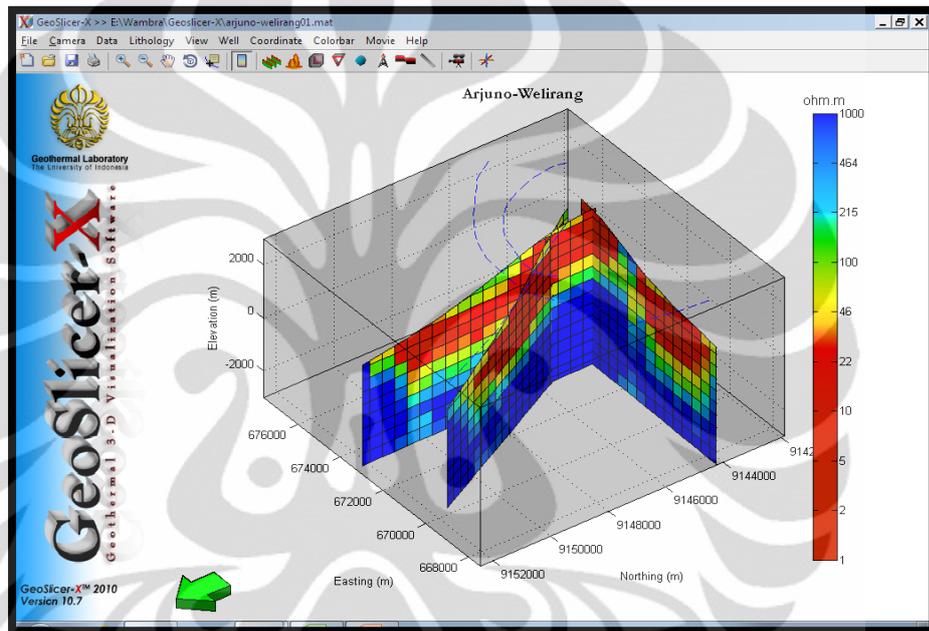
Gambar 4. 15. Hasil inversi

Tabel 4. 1. Parameter inversi model

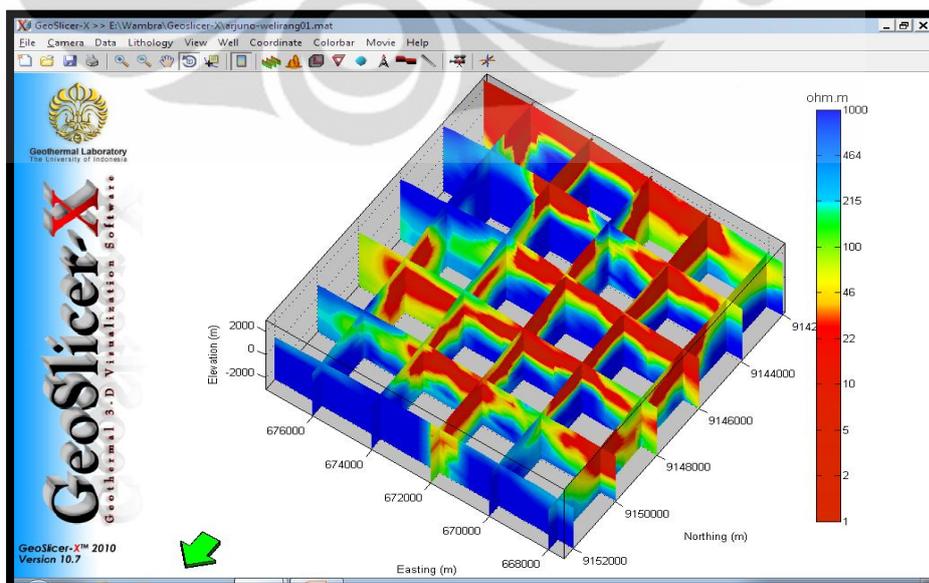
Data input	Data resistivitas semu dan fase untuk TE dan TM mode		
Error floor	5 % untuk resistivitas semu dan fase untuk kedua mode		
τ for smoothing operator	$\tau = 3$		
r.m.s	4,95 %	11,33 %	10,5 %
Jumlah Iterasi	300	203	85

4.9 Visualisasi 3-Dimensi

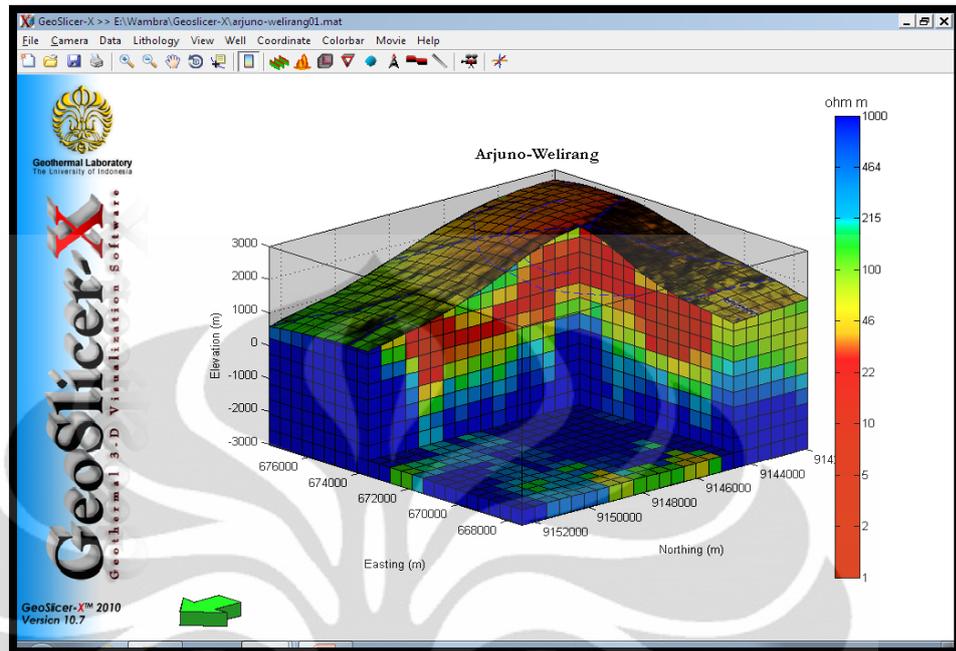
Hasil inversi dari seluruh lintasan yang ada disajikan dalam 3-dimensi dengan software Geoslicer-X, *software* yang dikembangkan oleh *Geothermal Laboratory, University of Indonesia*. Dari hasil inversi yang dilakukan pada “lintasan 5”, “lintasan 10”, dan “lintasan 11”, divisualisasikan dalam bentuk 3-dimensi juga beberapa metode *slicing* pada Geoslicer-X (Gambar 4.16)



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 16. (a) Visualisasi 3-dimensi dari “lintasan 5”, “lintasan 10”, dan “lintasan 11”, (b) 2-D slice arah barat-timur dan utara-selatan, (c) *cubic slice*

BAB 5 PEMBAHASAN

5.1 Model Konseptual

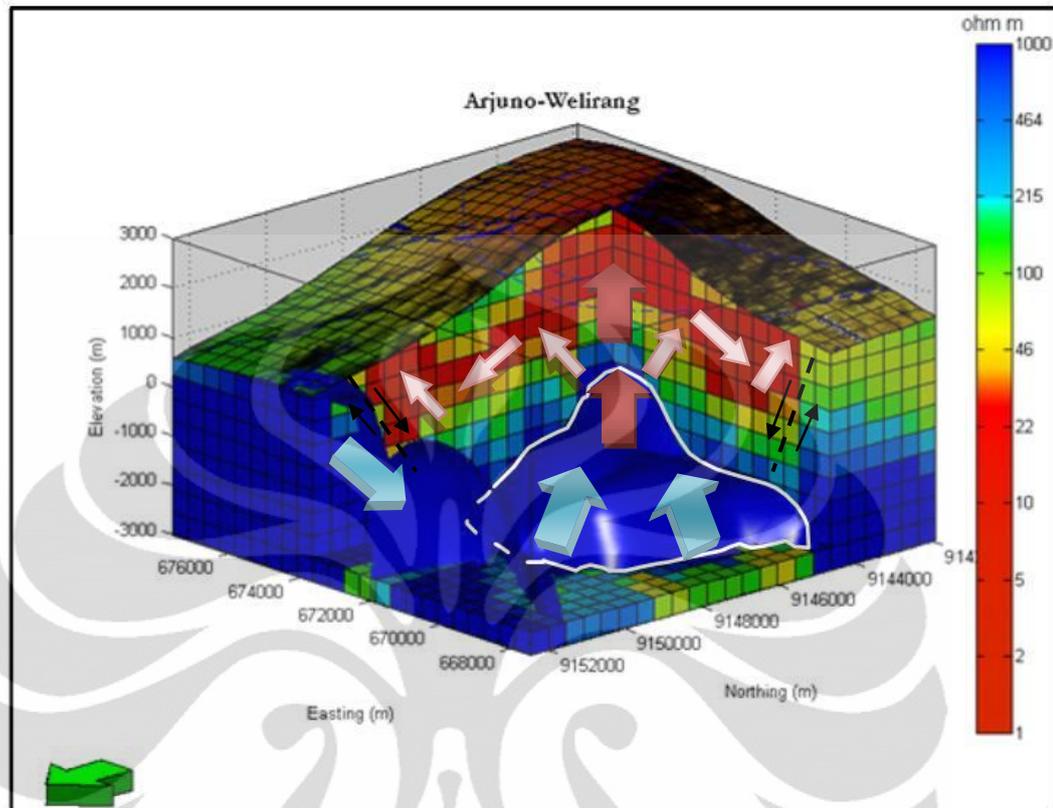
Indikasi *upflow* dan *outflow* dari sistem panasbumi daerah penelitian yang didapat dari data geokimia, juga diperlihatkan dari data geofisika (MT). *Updome* dengan nilai resistivitas yang cukup tinggi, $\pm 1000 \Omega\text{m}$, menandakan lokasi tersebut adalah pusat dari sistem panasbumi yang bekerja pada daerah penelitian (Gambar 5.5(a)). Hidrogeologi dari sistem juga dapat terlihat dari model 3-dimensi dari hasil inversi data MT ini, bahwa kemunculan mata air panas juga berasal dari pusat sistem (*updome*), ketika uap naik sampai muncul di puncak Gunung Welirang, air panas yang berasal dari reservoir tidak menerus ke puncak, tetapi turun ke lembah berinteraksi dengan *groundwater* dan naik ke permukaan melalui celah atau patahan (Gambar 5.5(b)). Atau air panas yang memiliki kandungan *bicarbonate* ini juga dapat terbentuk dari hasil kondensasi dari uap sebelum mencapai permukaan, jika sistem termasuk *vapor-dominated* (karena ada indikasi ke arah *vapor-dominated*, melihat tidak ada air pada keterangan keberadaan fumarol dari data geokimia, *dry steam*). *High resistivity body* di sebelah utara (Gambar 5.5(a)) tidak termasuk ke dalam sistem, kemungkinan berasal dari litologi yang berbeda, produk dari Gunung Anjasmoro.

Struktur *caldera* dari peta geologi juga terlihat pada data geofisika yang diindikasikan dengan keberadaan *graben*, Patahan yang berkaitan dengan *graben* ini ada kemungkinan berkontribusi terhadap kemunculan mata air panas Padusan. Keberadaan *caldera* juga diperkuat dengan geometri *high resistivity body* pada pusat sistem (Gambar 5.5(a)), yang dapat diinterpretasikan sebagai *hot rock*, memiliki nilai resistivitas sekitar $1000 \Omega\text{m}$. Dari data geologi, kemungkinan *hot rock* ini adalah intrusi dari batuan andesit-basaltis. Geometrinya, dari *updome* lalu semakin menutup ke arah utara dan barat laut mengikuti batas dari *caldera*. Karena diameter *hot rock*

(*source rock*) sama dengan atau terkadang lebih besar dari *caldera ring fault* (Wohletz & Heiken, 1992). Jika dilihat dari lokasi interpretasi *caldera* pada peta geologi (Gambar 5.1) dengan indikasi keberadaannya pada data geofisika (Gambar 5.5), letaknya tidak tepat dibawahnya. Hal ini dimungkinkan karena informasi geologi dilihat dari kenampakannya diatas permukaan, sedangkan geofisika memperlihatkan kondisi bawah permukaan. Apa yang terdapat di atas permukaan tidak selalu sama dengan keadaan bawah permukaannya.

Zona *reservoir* berada di antara zona *high resistivity* (± 1000 ohm-m) dengan zona alterasi mineral dengan nilai resistivitas yang rendah (< 15 ohm-m), dengan nilai resistivitas diatas 30 ohm-m pada suhu sekitar 310-314 $^{\circ}\text{C}$ yang dihitung berdasarkan geothermometer Na-K (Kusnadi D. , 2010). Ketebalannya berkisar antara 1 – 1,5 km (Gambar 5.5). Namun geometri dari reservoir belum dapat didelineasi secara keseluruhan, karena diperkirakan masih terdapat perluasan potensi di sebelah tenggara dan selatan daerah penelitian. Titik pengukuran sebelah tenggara hanya sampai titik MTAW-31 (dekat dengan fumarol). Visualisasi 3-dimensi melengkapi data disebelah tenggara dengan ekstrapolasi, namun tidak dapat diinterpretasi lebih lanjut.

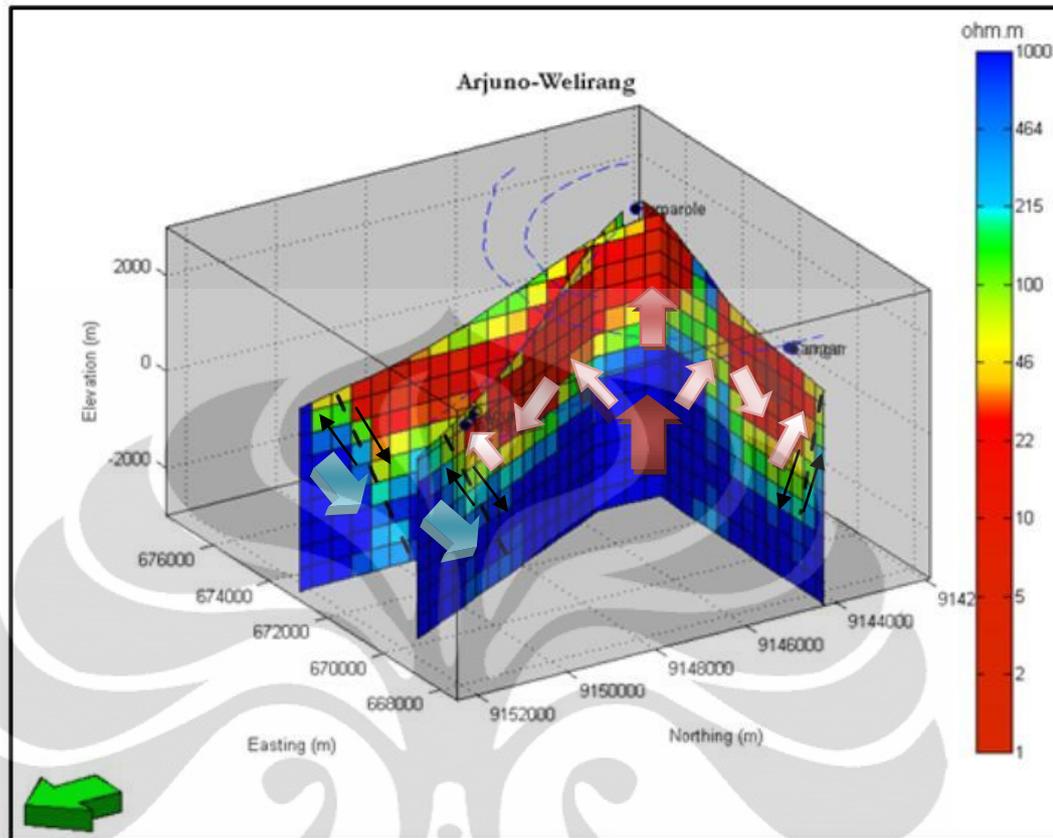
Zona alterasi (*clay cap*) terbentuk dari proses *hydrothermal alteration*, yaitu perubahan mineral, tekstur, dan respon kimia dari batuan karena interaksi dengan air panas, *steam*, atau gas (Wohletz & Heiken, 1992). Zona alterasi pada daerah penelitian, yang ditandai dengan lapisan berwarna merah (Gambar 5.5) dengan resistivitas yang rendah (< 15 ohm-m) diakibatkan oleh interaksi *steam* dan air panas dari *reservoir* dengan batuan-batuan yang dilaluinya. Interaksi mengakibatkan porositas dan permeabilitas batuan yang awalnya besar menjadi berkurang kerana hasil alterasi mengisi pori-pori yang ada pada matriks batuan. Oleh karena itu, *steam* dan air panas membutuhkan celah agar dapat naik ke permukaan. Pada kasus ini, *steam* dan air panas keluar melalui beberapa patahan yang ada pada daerah penelitian (Gambar 5.5(b)).



Keterangan :

-  recharge
-  upflow
-  outflow
-  patahan

(a)



(b)

Gambar 5. 1. Model konseptual sistem panasbumi daerah penelitian. (a) *cubic slice view* dengan *isovalue body* (biru) 1000 Ωm (b) 3-D view “lintasan 5”, “lintasan 10”, dan “lintasan 11” dengan kemungkinan struktur dan keberadaan mata air panas Padusan dan Cangar.

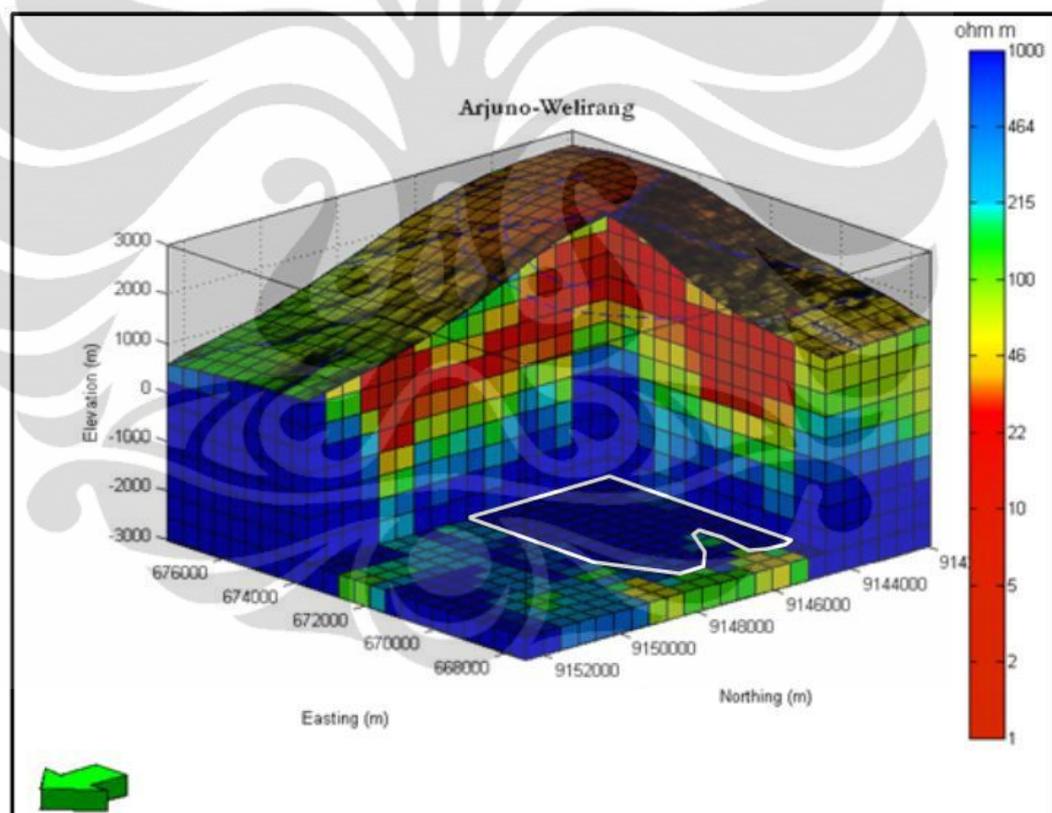
5.2 Perkiraan Potensi

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

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

A adalah luas daerah *reservoir*, k adalah koefisien *reservoir* yaitu 0,1 (faktor konversi untuk energi panas yang dikandung di dalam fluida panas saja, sedangkan $k=0,19$ untuk energi panas yang dikandung di dalam fluida dan formasi batuan), $T_{\text{reservoir}}$ adalah suhu *reservoir* yang didapat dari hasil *geothermometer* sekitar 314°C (Suhu maksimal dari Na-K *geothermometer*)

(Kusnadi D. , 2010), dan $T_{\text{cut off}}$ adalah 180°C . Luas daerah *reservoir* didapat dari mendeliniasi *hot rock*, diperkirakan luasan *hot rock* tidak jauh berbeda dengan luasan *reservoir*. Karena luasan *reservoir* lebih sulit dideliniasi secara visual (Gambar 5.6). Kalaupun ada perbedaan, cenderung luasan *reservoir* lebih besar dari luasan *hot rock*, jadi tidak mengurangi perkiraan potensi yang diberikan. Luasan *reservoir* sekitar 22 km^2 , dan potensi yang dihasilkan sekitar 295 MW. Jika energi panas yang terkandung dalam batuan dihitung ($k=0.19$), maka potensi sekitar 560 MW. Hasil perhitungan ini belum memperhitungkan peluasan zona prospek kearah Tenggara dan Selatan daerah penelitian.

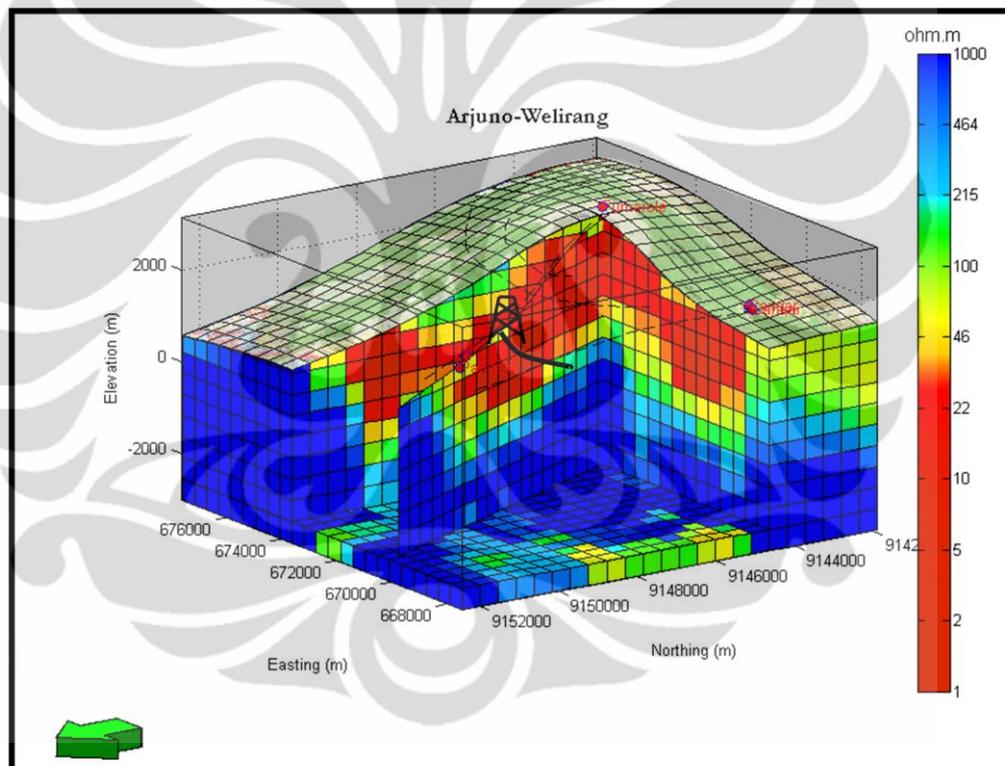


Gambar 5. 2. Perkiraan zona potensi daerah penelitian

5.3 Rekomendasi Pengeboran

Dari hasil pemodelan sistem panasbumi juga perkiraan potensi yang ada pada daerah penelitian, maka dapat dikatakan bahwa daerah prospek panasbumi Arjuno-Welirang berpotensi untuk dikembangkan. Langkah

selanjutnya adalah melakukan pengeboran eksplorasi untuk memastikan batasan area prospek untuk diproduksi dan mendapatkan data yang lebih lengkap mengenai *properties* dari batuan *reservoir*. Saran mengenai titik pengeboran adalah sekitar 4 km dari puncak Gunung Welirang. Dengan kedalaman pengeboran sekitar 2 km mengarah ke zona *upflow*. Titik pengeboran ini dipilih mengingat akses jalan yang terdekat adalah sekitar 4 km mengarah ke Desa Padusan (Baratlaut Gunung Welirang), dan daerah tersebut dekat dengan zona patahan untuk mendapatkan fluida panasnya, karena permeabilitas lebih besar.



Gambar 5. 3. Rekomendasi titik pengeboran eksplorasi

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

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

1. Metode MT telah berhasil mendeteksi keberadaan lapisan *clay cap*, geometri *reservoir*, *hot rock*, dan penyebarannya serta struktur yang mengontrol keberadaan sistem panasbumi, berdasarkan nilai resistivitasnya.
2. Data MT memperlihatkan lapisan konduktif (<15 ohm-m) dengan ketebalan sekitar 1 km, diindikasikan sebagai *clay cap* dari sistem panasbumi. Lapisan yang berada di bawah *clay cap* dengan nilai resistivitas sedikit lebih tinggi (>30 ohm-m), diindikasikan sebagai zona *reservoir*, dengan ketebalan 1 - 1,5 km. Lapisan dengan nilai resistivitas tinggi (± 1000 ohm-m) dan berbentuk *updome*, berada di bawah Gunung Welirang mengindikasikan *hot rock*. Lokasi ini juga mengindikasikan *upflow* dari sistem panasbumi yang ditandai dengan kemunculan fumarol di puncak Gunung Welirang. *Outflow* dari sistem mengarah ke Barat dan Baratlaut Gunung Welirang, ditandai dengan keberadaan mata air panas Padusan, Cangar, dan Coban.
3. Lokasi titik pengeboran eksplorasi direkomendasikan berada di dekat titik MTAW-15, yaitu di sebelah Baratlaut Gunung Welirang mengarah ke Desa Padusan, dengan kedalaman sekitar 2 km. Potensi daerah penelitian diperkirakan sekitar 295 MW.

6.2 Saran

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

1. Penambahan titik pengukuran MT kearah selatan dan tenggara daerah penelitian untuk mendapatkan informasi tentang batas *reservoir* yang masih dimungkinkan adanya perluasan.
2. *Survey* metode gaya berat (*gravity*) lanjutan untuk meng-*cover* Gunung Welirang dan potensi penyebaran *reservoir*, yaitu kearah selatan dan tenggara. Untuk menguatkan interpretasi struktur yang ada serta keberadaan *hot rock* sebagai sumber dari sistem panasbumi.
3. Pengeboran eksplorasi pada titik rekomendasi, guna mendapatkan batasan secara vertikal dari *reservoir* (*top* dan *bottom reservoir*), juga mineralisasi yang terjadi sepanjang sumur untuk memperkuat prediksi suhu dari *reservoir*.
4. Pengeboran *geothermal gradient*, untuk mendapatkan perkiraan suhu *reservoir* yang lebih akurat.

DAFTAR ACUAN

- Daud, Y. (2008). Modul Kuliah Eksplorasi Geothermal. Program Studi Fisika Universitas Indonesia.
- Gupta, H., & Roy, S. (2007). *Geothermal Energy An Alternative Resource for the 21st Century*. Elsevier.
- Hochstein, M. P., & Browne, P. R. (2000). Surface Manifestations of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. In *Encyclopedia of Volcanoes* (p. 835). Academic Press.
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics* , 230-266.
- Kusnadi, D. (2010). *Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia*. Pusat Sumber Daya Geologi.
- Kusnadi, D., Nasution, A., & Simanjuntak, J. *Penyelidikan Panas Bumi Kompleks Arjuno-Welirang Jawa Timur*.
- Manzella, A. (n.d.). Geophysical Methods in Geothermal Exploration.
- National Geographic. (2008). *Earth Science*. The McGraw-Hill Company.
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotelluric*. Cambridge University Press.
- Soetoyo, d. (2010). *Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia*. Pusat Sumber Daya Geologi.

Sulistyo, A. (2011). *Koreksi Pergesaran Statik Menggunakan Metode Geostatik, Perata-rataan dan TDEM*.

Unsworth, M. (2008). Lecture Notes. *Geophysics 424* .

Ussher, G. (2000). Understanding the Resistivities Observed in Geothermal System. *World Geothermal Congress*, (p. 1915).

Vozoff, K. (1991). The Magnetotelluric Method. In M. N. Nabighian, *Electromagnetic Methods In Applied Geophysics-Applications Part A and Part B* (pp. 641-711). Society of Exploration Geophysicist.

Wohletz, K., & Heiken, G. (1992). *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California Press.

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